



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN Y DE PROYECTOS DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS DOCTORAL

**ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE SOPORTES
DE HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES SOMETIDOS A
COMPRESIÓN Y CARGA LATERAL CÍCLICA**

AUTORA
MARÍA DEL CARMEN CASTRO BUGALLO

DIRECTORES
Dr. JOSÉ L. BONET SENACH
Dr. JOSÉ R. MARTÍ VARGAS

VALENCIA, FEBRERO 2016

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN Y DE PROYECTOS DE INGENIERÍA CIVIL

**ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE SOPORTES DE HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES
SOMETIDOS A COMPRESIÓN Y CARGA LATERAL CÍCLICA**

MEMORIA

Que para optar al grado de Doctor por esta Universidad presenta

Fdo: María del Carmen Castro Bugallo

A mi familia por su apoyo y amor incondicional



Agradecimientos

Quisiera dedicar mis primeras palabras a todos aquellos que habéis compartido conmigo los distintos momentos vividos en la realización de este trabajo que, como en la vida, han sido muchos y muy diversos, buenos y malos, y en todo caso enriquecedores. Con estas palabras comienzo a redactar la parte más difícil de este trabajo, ya que he tenido la gran suerte de sentirme acompañada, apoyada y comprendida en cada fase. Es inevitable dejarme a alguien en el tintero, no por su menor relevancia, sino por descuido. Por eso, empiezo pidiendo disculpas y dando las gracias ya que aunque no os encontréis directamente nombrados, habéis sido también parte fundamental en el camino recorrido.

Agradezco a mis tutores y además compañeros, Jose y Jose Luis, su confianza en mí para desarrollar esta tesis doctoral. Gracias por vuestra orientación y apoyo.

He de agradecer al Ministerio de Economía y Competitividad de España por la financiación del Proyecto de Investigación del Plan Nacional de I+D+I BIA 2012-32645 en el cual se ha desarrollado esta tesis doctoral.

A mis chicos del laboratorio por su apoyo físico y anímico, haciéndome sentir la reina de los “chinos” y en los momentos más complicados sacándome una sonrisa. Gracias a Pascual, Juan F., Javier y Juan M. y por supuesto a mis “otros” chicos del laboratorio, Lino, Dani, Gonzalo, Vicente, Paco, Jürgen y Enrique. He disfrutado y aprendido mucho trabajando a vuestro lado, codo con codo. Muchas gracias chicos!

Gracias muy especialmente a Fredy, por todo y en especial por los esfuerzos tanto físicos como intelectuales que compartimos. Has sido clave para cumplir los objetivos propuestos.

A Pedro Serna por su generosidad al compartir conmigo su pasión, gran conocimiento y sabiduría del hormigón.

He compartido experiencias y sufrimientos con muchos compañeros de investigación que quiero también incluir en mis agradecimientos y animar en sus lides particulares: Jose Ramón, Javier P., Alberto, Juanan, Agustín, Ángela, Karen...gracias.

Gracias a mis compañeros de unidad docente: Pedro, Miguel A., Juan, Luis, Eduardo, Carlos..., siempre haciendo mi camino más fácil, dándome ánimo y aliento, ayudándome a compaginar mi faceta docente e investigadora.

A todos mis compañeros de departamento que de una u otra manera me acompañasteis en esta aventura. Gracias a Amalia, Vicky, Merche, Cristina, Jordi, Pepe, Juanjo C, Fernando, José Vicente, Hugo, Guillermo, Alberto, Pascual B, Juanjo M, Víctor, Eugenio... A mis chicas de administración, Alicia, Ana y M^a Carmen, siempre pendientes, siempre cuidándome. Gracias por estar ahí guapas.

Me he sentido muy apoyada y comprendida por mis compañeros de Escuela a los que aprovecho para darles las gracias, a Nacho Andrés, Lourdes Aznar, Pepe Casanova, Juanfran Moyá, Carlos M, Ximo Celma, Pepe Colomer, Carlos L, Pedro M, Loli Chust, JL Denia, Enriqueta, Isabel,...y a muchos más de los que me siento orgullosa al decir que podría seguir nombrando y que formamos esta gran familia. Sé que se alegran por mí. Una mención especial a mis compañeros del primer café: Xus y Luisma (gracias amigo por las grandes ideas y, cómo no, por el apoyo técnico en mis crisis con la informática).

Fuera del ámbito laboral, dar las gracias a mis amigos en Valencia a Rosa, David, Alberto y su Estela, Margarita y su luz, a mis compañeros de bodeguitas, a Emili, Leti, María, Sergio y Diego, ...En Galicia a Bego, Jorge el guapo y Pedro, a Luis, Mabel, Ana, M^a Jesus, Antonio L., Susi...que tanto me quieren y quiero. Y repartidos por muchos sitios a mis clánicos: Layos, Cesar, Juampe, Alvaro (Noc)...

Gracias también a mi familia gallega y valenciana por estar ahí en todas las etapas de mi vida.

A mi otra familia: mi "hermana" Maria José, Luis Angel y José. A mi familia murciana, a mi Manoli. Siempre apoyándome, cuidándome y protegiéndome. Muchas gracias por dejarme formar parte de vuestra vida. Os quiero.

Gracias Jesús por saber estar a mi lado, por tu paciencia infinita, por tus ánimos cuando decaía y por tu orgullo cuando volaba, haciéndome sentir la estrella más brillante de tu cielo. Gracias también a tu familia, por su comprensión y apoyo.

Y por último y por ello, para mí, los primeros, a mi mami, Carmiña, y hermanos, Fernan y Pepe, gracias por ser mis verdaderos soportes. Sois mi ejemplo de vida. Gracias porque, si soy quien soy, es por haber tenido la mejor familia que uno puede desear. Sois mi ejemplo de entrega, lucha, humanidad y fortaleza. Siempre animándome a amar lo que uno hace, a no tener límites y a ser feliz. Sin vuestro cariño, comprensión, alegría y paciencia con mi carácter, este trabajo no sería posible. Gracias por conseguir con vuestro amor que las distancias no existan, nunca os estaré suficientemente agradecida. No quiero dejar fuera de estos agradecimientos a mis abuelos y especialmente a mis hermanos, Riki y Javi, que, estén donde estén, siempre he sentido su apoyo y orgullo. Y termino con un recuerdo muy especial para mi padre a quien, por su pasión por su familia (y su nena) y por la ingeniería, le hubiera gustado disfrutar de este momento.

Gracias a TODOS por compartir ESTE MOMENTO conmigo.

Resumen

Investigaciones recientes han puesto de manifiesto que los métodos existentes, en la bibliografía y en las actuales normas, para evaluar la capacidad de deformación de los elementos de hormigón armado sometidos a compresión y flexión cíclica o monotónica, no son válidos para cierto rango de parámetros, como son los soportes esbeltos, con moderados y altos niveles de carga axil, en los cuales los efectos de segundo orden no pueden ser despreciados. A ello hay que añadir que se carece de información experimental sobre el comportamiento de soportes esbeltos fabricados con hormigones de resistencias a compresión en el rango de 100-150 MPa, y que las fibras de acero pueden servir para sustituir la armadura transversal y mejorar la fabricación de soportes sometidos a niveles altos de axil.

En consecuencia, esta tesis doctoral estudia el comportamiento de soportes de hormigón armado con fibras de acero y resistencias a compresión entre 100 y 150 MPa, planteando para ello una amplia campaña experimental compuesta por 26 elementos que simulan uniones soporte-viga, con los siguientes propósitos: cubrir el vacío experimental existente; identificar los parámetros que más influyen en la capacidad resistente y deformacional; y verificar el alcance y validez de los métodos simplificados existentes para predecir la capacidad de deformación y ductilidad en el diseño y análisis de soportes de hormigón armado, teniendo en cuenta las características que presentan los elementos ensayados.

Para ello se ha puesto a punto un modelo de ensayo experimental que ha permitido estudiar la influencia de variables como la esbeltez a cortante, el tipo y volumen de fibras de acero, la separación de la armadura transversal, la cuantía de la armadura longitudinal, el nivel de la carga axil, y el recubrimiento relativo del hormigón.

El comportamiento de los distintos elementos ensayados se ha analizado de un modo exhaustivo incluyendo: determinación de la capacidad resistente a nivel sección y a nivel elemento; obtención de la deformación de los materiales, de la sección y del elemento en las situaciones de inicio de la plastificación y rotura; identificación de los tipos de fallo, basados en la resistencia y deformación de los materiales; evaluación de los índices de capacidad de deformación, la ductilidad en curvatura y desplazamiento, y la longitud de la rótula plástica.

Con la información recopilada y las conclusiones obtenidas, esta tesis doctoral pretende ser un punto de partida para futuras investigaciones y ser de utilidad para la mejora de los modelos de predicción del comportamiento estructural de estos elementos. En particular, se ha constatado que el índice de la ductilidad tanto en curvaturas como en desplazamientos disminuye con el volumen de fibras de acero en el hormigón y cuando aumenta el axil reducido, la esbeltez del soporte y la separación de la armadura transversal; que el factor de rigidez elástica efectiva de la sección aumenta cuando aumenta el axil reducido, y que el factor de rigidez elástica efectiva del elemento aumenta cuando aumenta cuando el axil reducido una vez se supera el umbral de 0.2. Se ha corroborado que los métodos de cálculo y modelos simplificados recogidos en las normativas y en la bibliografía predicen de forma aceptable los resultados experimentales a nivel resistente y los valores elásticos a nivel deformacional, en tanto que no los valores últimos, lo que es indicativo de la no adecuación de estos métodos al comportamiento de hormigones de altas prestaciones.

Resum

Les investigacions més recents han posat de manifest que els mètodes existents, a la bibliografia i a les normes actuals, per avaluar la capacitat de deformació dels elements de formigó armat sotmesos a compressió i flexió cíclica o monotònica, no són vàlids per a un determinat marge de paràmetres, com són els suports esvelts, amb nivells moderats i alts de càrrega axial, en què els efectes de segon ordre no són negligibles. A això cal afegir la manca d'informació experimental sobre el comportament de suports esvelts fabricats amb formigons amb resistència a compressió entre 100 i 150 MPa, i que les fibres d'acer poden servir per substituir l'armat transversal i millorar la fabricació de suports sotmesos a nivells alts de càrrega axial.

En conseqüència, aquesta tesi doctoral estudia el comportament de suports de formigó armat amb fibres d'acer i resistències de compressió entre 100 i 150 MPa, plantejant amb aquest objectiu una àmplia campanya experimental consistent en 26 elements que simulen unions suport-biga amb els següents propòsits: cobrir l'actual buit experimental; identificar els paràmetres més influents sobre la capacitat resistent i deformacional; i verificar l'abast i la validesa dels mètodes simplificats existents per a la predicció de la capacitat de deformació i la ductilitat en el disseny i anàlisi de suports de formigó armat, tenint en compte les característiques dels elements assajats.

Per tal d'aconseguir-ho, s'ha posat a punt un model d'assaig que ha permès estudiar la influència de variables com l'esveltesa a tallant, el tipus i volum de fibres d'acer, l'espaiament de l'armat transversal, la dotació d'armat longitudinal, el nivell de càrrega axial i el recobriment relatiu del formigó.

El comportament dels diferents elements assajats s'ha analitzat de manera exhaustiva, incloent: determinació de la capacitat resistent a nivell secció i a nivell element; obtenció de la deformació dels materials, de la secció i de l'element en les situacions d'inici de la plastificació i trencament; identificació dels modes d'esgotament, basats en la resistència i la deformació dels materials; avaluació dels índexos de capacitat de deformació, la ductilitat en corbatura i desplaçament, i la longitud de la ròtula plàstica.

Amb la informació recopilada i les conclusions obtingudes, aquesta tesi doctoral pretén ser un punt de partida per a futures investigacions i ser d'utilitat per a la millora dels models de predicció del comportament estructural d'aquests elements. En particular, s'ha constatat que l'índex de la ductilitat tant en curvatures com en desplaçaments disminueix amb el volum de fibres d'acer en el formigó i quan augmenta l'esforç axial reduït, l'esveltesa del suport i l'espaiament de l'armat transversal; que el factor de rigidesa elàstica efectiva de la secció augmenta quan s'incrementa el nivell de càrrega axial, i que el factor de rigidesa elàstica efectiva de l'element augmenta quan amplifica el nivell el nivell de càrrega axial una vegada se supera el llindar de 0.2. Així mateix s'ha corroborat que els mètodes de càlcul i models simplificats recollits en les normatives i en la bibliografia prediuen de forma acceptable els resultats experimentals a nivell resistent i els valors elàstics a nivell deformacional, la qual cosa no succeeix amb els valors últims i és indicatiu de la no adequació d'aquests mètodes al comportament de formigons d'altres prestacions.

Abstract

Most recent research has revealed that the present methods, in either literature or current standards, for the evaluation of the deformation capacity of reinforced concrete elements in compression and in either monotonic or cyclical flexure, are not valid outside a certain range of some parameters. This is the case of slender supports subject to moderate or high levels of axial loading, where second order effects are not negligible. Furthermore, there is a shortage of experimental information concerning the behaviour of slender supports made with concretes with compressive strength values between 100 and 150 MPa, and the effect of steel fibers can be accounted for to replace transverse reinforcement and to improve the production of supports to be subjected to high levels of axial loading.

In consequence, this doctoral thesis addresses the behaviour of supports made with fiber reinforced concrete of compressive strength between 100 and 150 MPa. An ambitious experimental programme has been carried out, comprising the testing of 26 concrete specimens that simulate column-beam unions, to reach the following objectives: to bridge the experimental gap; to identify the most influential parameters on the load-bearing and deformational capacity; and to verify the validity of the simplified methods currently in use for the prediction of the load-bearing capacity and ductility when designing and analysing reinforced concrete supports, consistently with the characteristic of the specimens tested.

To this end, an experimental methodology has been calibrated and put into place to study the effect of variables such as shear slenderness, type and volume of steel fibers, spacing of transverse reinforcement, longitudinal reinforcement index, axial load level and the concrete cover.

The behaviour of the specimens tested has been analysed in depth. This analysis has included: determination of the load-bearing capacity of the cross-section and of the entire element; assessment of the strains of the materials, the strains profile of the cross-section and the deformation of the whole element at the stages of reinforcement yielding and when the ultimate capacity is reached; the identification of failure modes based on the strength and strains of the materials; the assessment of strain capacity indexes, rotational ductility and displacement, as well as the hinge length.

With the resulting information and the conclusions obtained, this doctoral thesis aims to be a starting point for future research and a useful instrument for the improvement of structural behaviour prediction models of these specimens. Specifically, it's been noted that the ductility ratio in curvatures and displacements decreases when the volume of steel fibers in the concrete decrease. Ductility ratio also decreases when the axial load level, shear slenderness and transverse reinforcement spacing increase. Moreover, effective flexural stiffness factor of a section increases when axial load level does in higher values than 0.2. It has been tested that calculation methods and simplified models included in either literature and current standards predict experimental results on load bearing capacity and elastic values on deformational capacity adequately. This does not happen for ultimate values, which means that these methods are not suitable for high performance concrete behaviour.

Resumo

Investigacións recentes puxeron de manifesto que os métodos existentes, na bibliografía e nas actuais normas, para avaliar a capacidade de deformación dos elementos de formigón armado sometidos a compresión e flexión cíclica ou monotónica, non son válidos para certo rango de parámetros, como son os soportes esveltos, con moderados e altos niveis de carga axil, nos cales os efectos de segunda orde non poden ser desprezados. A iso hai que engadir que se carece de información experimental sobre o comportamento de soportes esveltos fabricados con formigóns de resistencias a compresión no rango de 100-150 MPa, e que as fibras de aceiro poden servir para substituír a armadura transversal e mellorar a fabricación de soportes sometidos a niveis altos de axil.

En consecuencia, esta tese doctoral estuda o comportamento de soportes de formigón armado con fibras de aceiro e resistencias a compresión entre 100 e 150 MPa, suscitando para iso unha ampla campaña experimental composta por 26 elementos que simulan unións soporte-viga, cos seguintes propósitos: cubrir o baleiro experimental existente; identificar os parámetros que máis inflúen na capacidade resistente e deformacional; e verificar o alcance e validez dos métodos simplificados existentes para predecir a capacidade de deformación e ductilidade no deseño e análise de soportes de formigón armado, tendo en conta as características que presentan os elementos ensaiados.

Para iso púxose a punto un modelo de ensaio que permitiu estudar a influencia das variables como a esbeltez a cortante, o tipo e volume de fibras de aceiro, a separación da armadura transversal, a cuantía da armadura longitudinal, o nivel da carga axil, e o recubrimento relativo do formigón.

O comportamento dos distintos elementos ensaiados analizouse dun modo exhaustivo incluíndo: determinación da capacidade resistente a nivel sección e a nivel elemento; obtención da deformación dos materiais, da sección e do elemento nas situacións de inicio da plastificación e rotura; identificación dos tipos de fallo, baseados na resistencia e deformación dos materiais; avaliación dos índices de capacidade de deformación, a ductilidade en curvatura e desprazamento, e a lonxitude da rótula plástica.

Coa información recompilada e as conclusións obtidas, esta tese doctoral pretende ser un punto de partida para futuras investigacións e ser de utilidade para mellóraa dos modelos de predicción do comportamento estrutural destes elementos. En particular, constatouse que o índice da ductilidade tanto en curvaturas como en desprazamentos diminúe co volume de fibras de aceiro no hormigón e cando aumenta o axil reducido, a esbeltez do soporte e a separación da armadura transversal; que o factor de rixidez elástica efectiva da sección aumenta cando aumenta o axil reducido, e que o factor de rixidez elástica efectiva do elemento aumenta cando aumenta cando o axil reducido unha vez supérase o limiar de 0.2. Corroborouse que os métodos de cálculo e modelos simplificados recollidos nas normativas e na bibliografía predicen de forma aceptable os resultados experimentais a nivel resistente e os valores elásticos a nivel deformacional, en tanto que non os valores últimos, o que é indicativo da non adecuación destes métodos ao comportamento de hormigóns de altas prestacións.

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos

Resumen

Resum

Abstract

Resumo

Índice general

Índice

Índice de figuras

Índice de tablas

CAPÍTULO

I Introducción	23
II Estado actual del conocimiento	29
III Importancia de la investigación y objetivos específicos	89
IV Programa experimental	93
V Metodología experimental	109
VI Presentación de resultados	141
VII Observaciones experimentales y resultados directos	149
VIII Análisis de los resultados experimentales	163

IX Comprobación estructural mediante métodos de cálculo281

X Síntesis, conclusiones y futuras líneas de investigación315

Referencias329

ANEJOS (En formato digital)

Anejo A: Fichas de los elementos ensayados339

Anejo B: Mapas de fisuras493

Anejo C: Perfiles de deformación en la zona crítica501

Anejo D: Modos de fallo529

Anejo E: Envoltentes de los soportes549

Anejo F: Energía de disipación603

Anejo G: Módulo de Deformación613

Anejo H: Rigidez efectiva619

Anejo I: Longitud equivalente de la rótula plástica. Base de datos de los resultados existentes.....629

Anejo J: Comportamiento a tracción del hormigón: Análisis inverso635

Anejo K: Métodos simplificados: Capacidad de deformación645

ÍNDICE

I Introducción	23
I.1. Motivación de la investigación	25
I.2. Objetivo general	26
I.3. Estructura del documento	26
II Estado actual del conocimiento	29
II.1. Introducción	31
II.2. Fuentes	32
II.3. Hormigón armado de altas prestaciones	35
II.3.1. Consideraciones generales	35
II.3.2. Comportamiento mecánico del hormigón de altas prestaciones	37
II.4. Ductilidad en uniones soporte-viga	42
II.4.1. Fundamentos relativos a la capacidad de deformación	42
II.4.2. Parámetros que afectan a la capacidad de deformación	45
II.4.3. Modelos para evaluar la capacidad de deformación	47
II.4.4. Métodos propuestos en la normativa	60
II.4.5. Desarrollos experimentales	67
II.5. Resumen y cuestiones sin resolver	87
III Importancia de la investigación y objetivos específicos	89
IV Programa experimental	93
IV.1. Variables a analizar	95
IV.2. Series de ensayos	96
IV.3. Materiales utilizados	101
IV.3.1. Selección de materiales	101
IV.3.2. Caracterización de materiales	103
V Metodología experimental	109
V.1. Diseño del experimento	111
V.1.1. Elemento	111
V.1.2. Sistema de cargas	114

V.1.3. Dispositivos auxiliares	119
V.2. Operatividad del ensayo	120
V.2.1. Fabricación	120
V.2.2. Montaje.....	131
V.2.3. Fase de ensayo a rotura	132
V.2.4. Desmontaje.....	140
VI Presentación de resultados	141
VI.1. Resultados de preparación del elemento y fase previa de ensayo	143
VI.1.1. Ficha de materiales	143
VI.1.2. Ficha de instrumentación	144
VI.2. Resultados del ensayo del elemento	145
VI.2.1. Ficha de la rotura	145
VI.2.2. Ficha de gráficas directas	145
VI.2.3. Ficha de parámetros de comportamiento	146
VII Observaciones experimentales y resultados directos	149
VII.1. Comportamiento observado durante el ensayo	151
VII.1.1. Modo de fallo observado	151
VII.1.2. Patrón de fisuración y longitud crítica de daño	151
VII.1.3. Efecto de la rigidez del <i>stub</i>	154
VII.1.4. Pandeo de la armadura.....	155
VII.2. Resultados directos	157
VII.2.1. Carga lateral cíclica – <i>Drift</i>	157
VII.2.2. Deformada del elemento	158
VII.2.3. Deformación de la armadura en tracción y en compresión.	160
VII.2.4. Modo de rotura.....	160
VIII Análisis de los resultados experimentales	163
VIII.1. Determinación de la sección crítica del soporte	165
VIII.1.1. Análisis de la deformación en la armadura longitudinal.....	165
VIII.1.2. Determinación del cortante y del momento flector de plastificación del acero	168
VIII.2. Definición de los diagramas cortante-desplazamiento	181
VIII.3. Definición de los diagramas momento-curvatura	193
VIII.4. Modos de fallo.....	206

VIII.4.1. Análisis de los diagramas de respuesta <i>M-Drift</i> de la sección crítica	207
VIII.4.2. Análisis de las deformaciones últimas de los materiales en la zona crítica	208
VIII.5. Envolventes de los diagramas del comportamiento experimental	212
VIII.5.1. Envolventes cortante-desplazamiento	212
VIII.5.2. Envolventes momento-curvatura.....	214
VIII.6. Idealización del diagrama carga-flecha y momento-curvatura.....	217
VIII.6.1. Método aproximado.....	217
VIII.6.2. Método basado en el balance de energía	218
VIII.6.3. Método recogido en el Eurocódigo 8	218
VIII.7. Aplicación de los métodos de idealización a los resultados experimentales.....	220
VIII.7.1. Análisis a nivel sección	226
VIII.7.2. Análisis a nivel elemento.....	232
VIII.7.3. Energía de disipación.....	237
VIII.8. Módulo de deformación del hormigón	240
VIII.9. Rigidez efectiva	244
VIII.10. Longitud equivalente de la rótula plástica	258
VIII.10.1. Análisis paramétrico de los resultados experimentales obtenidos.....	260
VIII.10.2. Comparación de la longitud equivalente de plastificación con expresiones existentes en la bibliografía.....	266
VIII.10.3. Comparativa con los resultados experimentales existentes en otras investigaciones	276
IX Comprobación estructural mediante métodos de cálculo	281
IX.1. Métodos generales.....	283
IX.1.1. Determinación de las ecuaciones constitutivas de los materiales	283
IX.1.2. Análisis del diagrama Momento-Curvatura.....	294
IX.1.3. Análisis del comportamiento estructural mediante un modelo teórico de referencia	298
IX.2. Métodos simplificados	301
IX.2.1. Evaluación de la capacidad resistente.....	301
IX.2.2. Evaluación de la capacidad de deformación	308
X Síntesis, conclusiones y futuras líneas de investigación	315
X.1. Síntesis y principales contribuciones al estado del arte.....	317
X.2. Conclusiones	317
X.2.1. Conclusiones relativas a la revisión bibliográfica realizada	317
X.2.2. Conclusiones relativas a las observaciones experimentales y resultados directos	318
X.2.3. Conclusiones relativas al análisis de los resultados experimentales	319

X.2.4. Conclusiones relativas a la comprobación estructural mediante métodos de cálculo	324
X.2.5. Conclusiones globales del trabajo realizado	326
X.3. Futuras líneas de investigación	326
Referencias	329

ANEJOS (En formato digital)

Anejo A: Fichas de los elementos ensayados	339
Fichas de Materiales	341
Ficha de instrumentación	367
Ficha de la rotura	393
Ficha de gráficas directas.....	418
Ficha de parámetros de comportamiento	444
Anejo B: Mapas de fisuras	493
Mapas de fisuras y medida visual de la longitud crítica de daño	495
Anejo C: Perfiles de deformación en la zona crítica	501
Anejo D: Modos de fallo	529
Modo de fallo: Curvas Momento Flector- <i>Drift</i>	531
Modo de fallo: Deformación de los materiales	535
Anejo E: Envoltentes de los soportes	549
Envoltentes de las curvas experimentales: cortante - <i>drift</i> y momento – curvatura.....	551
Envoltentes de las curvas idealizadas: cortante - <i>drift</i> y momento – curvatura.....	559
Envoltentes obtenidas mediante un modelo teórico de referencia: cortante - desplazamiento y momento – curvatura.....	594
Anejo F: Energía de disipación.....	603
Energía de disipación: Acumulada y disipada por ciclo	605
Anejo G: Módulo de Deformación.....	613

Módulo de deformación del hormigón.....	615
Anejo H: Rigidez efectiva.....	619
Anejo I: Longitud equivalente de la rótula plástica. Base de datos de los resultados existentes	629
Base de datos de resultados existentes	631
Anejo J: Comportamiento a tracción del hormigón: Análisis inverso	635
Comportamiento a tracción del hormigón: Análisis inverso.....	637
Anejo K: Métodos simplificados: Capacidad de deformación.....	645
Métodos Simplificados. Capacidad de deformación.....	647
A nivel sección	647
A nivel elemento.....	651

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura II.1 Terremoto en Wenchuan (China) en el año 2008. Rótula plástica en soporte. Edificio colapsado en su base. Cai et al. (2012) [29]	31
Figura II.2 Publicaciones con el descriptor <i>Ductility</i> y la restricción <i>Concrete</i> en la <i>Web of Science</i> [54]	32
Figura II.3 Publicaciones con el descriptor <i>Very High Strength Concrete</i> y la restricción <i>Column</i> en la <i>Web of Science Science</i> [54].....	32
Figura II.4 Publicaciones con el descriptor <i>Very High Strength Concrete</i> , <i>Ductility</i> y <i>Column</i> en la <i>Web of Science</i> [54]	33
Figura II.5 Procedencia de las referencias consultadas (Figura II.3)	34
Figura II.6 Año de publicación de las referencias consultadas (Figura II.3)	34
Figura II.7 Breve historia del cemento y del hormigón hasta el UHPC, Spasojevic (2008) [114]	35
Figura II.8 Familias de hormigones con fibras. Características resistentes y de ductilidad, Japan Society of Civil Engineers (2008) [49]	36
Figura II.9 Tracción directa. Diagrama tensión-deformación característicos para hormigones con $f_c > 100$ MPa, Japan Society of Civil Engineers (2008) [49]	36
Figura II.10 Curva Tensión-Deformación de compresión de morteros reforzados con distintos tipos de fibras, Liao (2006) [75]	38
Figura II.11 Clasificación de los FRCC en base a la respuesta tensión de tracción-deformación, Naaman et al. (2007) [84]	38
Figura II.12 Comparación de los diagramas tensión de compresión-deformación de los distintos tipos de hormigón, el convencional (C), el de alta resistencia (HSC) y el de ultra alta (UHPC), Spasojevic (2008) [114]	39
Figura II.13 Esquema del Diagrama Tensión de Compresión -Deformación, Fehling et al. (2014) [58]	40
Figura II.14 Comparativa para distintos tipos de hormigón de los diagramas tensión de tracción-deformación, Spasojevic (2008) [114].....	41
Figura II.15 Ensayo de flexión realizado a 3 puntos desarrollado por Spasojevic (2008) [114]	41
Figura II.16 Representación gráfica de los índices de ductilidad, Bayrak (1998) [17]	44
Figura II.17 Diagrama típico tensión de compresión-deformación de un UHPC Fehling (2004) [57]	46
Figura II.18 Desplazamiento del elemento en la sección donde se obtiene la deriva	48
Figura II.19 Modelo de “soporte en voladizo”	51
Figura II.20 Diagrama Momento-curvatura	52
Figura II.21 Rótula plástica a nivel sección, EC 8. Parte 2 [40]	60
Figura II.22 Envolvente idealizada $M-\phi$	61
Figura II.23 Idealización uniones soporte-viga de un pórtico estructural	67
Figura II.24 Pórtico de ensayo, soporte tipo ménsula y esquema de carga, Bechtoula et al. (2015) [20]	68
Figura II.25 Tipos, geometría y disposición de armado de los soportes ensayados, Bechtoula et al. (2015) [20]	69
Figura II.26 Esquema de ensayo, Maya et al. (2013) [81]	70
Figura II.27 Geometría de los elementos ensayados, Maya et al. (2013) [81].....	70
Figura II.28 Características del ensayo y geometría de los soportes, Kim et al. (2013) [70]	72
Figura II.29 Geometría y distribución de armado de las vigas. Esquema de ensayo y medida, Kamal et al. (2013) [68]	73

Figura II.30 Geometría del elemento ensayado, Bedirhanoglu et al. (2013) [21]	74
Figura II.31 Esquema de carga, Bedirhanoglu et al. (2013) [21]	74
Figura II.32 Geometría y armado de los soportes ensayados Popa (2013) [101]	75
Figura II.33 Tipo de soporte ensayado y dirección de las cargas actuantes Yamamoto (2012) [120]	76
Figura II.34 Geometría de los soportes, Zohrevand et al. (2012) [125]	77
Figura II.35 Pórtico de ensayo, Zohrevand et al. (2012) [125]	77
Figura II.36 Configuración del ensayo Voo et al. (2010) [118]	79
Figura II.37 Pórtico de ensayo y forma de carga sobre el elemento. Takatsu et al. (2006) [116]	79
Figura II.38 Detalles del soporte, Takatsu et al. (2006) [116]	80
Figura II.39 Pórtico de ensayo y elemento a estudiar Bayrak (1998) [17]	81
Figura II.40 Dimensiones y armados de las secciones de los soportes ensayados	81
Figura IV.1. Tipo de fibras. Comparativa de tamaño de los distintos tipos	101
Figura IV.2. Ejemplo de probeta cilíndrica y cúbica realizada para control del hormigón	104
Figura IV.3. Ejemplo de probeta prismática realizada para control del hormigón	104
Figura IV.4. Prensas para la ejecución de los ensayos a compresión simple y flexotracción	104
Figura IV.5. Gráficas tensión-deformación de los distintos aceros empleados	106
Figura IV.6. Ejemplo de barras de acero ensayadas a tracción según normativa. Lote 2	106
Figura V.1. Esquema del modelo de ensayo	111
Figura V.2. Croquis de la geometría del elemento a ensayar e imagen de un elemento ya fabricado	111
Figura V.3. Croquis de la definición geométrica longitudinal del soporte tipo (sin escala)	112
Figura V.4. Secciones tipo de soporte y altura de <i>stub</i> correspondiente	112
Figura V.5. Plano de armado elemento tipo AS11	113
Figura V.6. Secciones tipo de ferralla (parte 1 de 2)	113
Figura V.7. Secciones tipo de ferralla (parte 2 de 2)	114
Figura V.8. Secciones tipo de ferralla	114
Figura V.9. Esquema del pórtico de ensayo	115
Figura V.10. Pórtico de ensayo, elementos principales	116
Figura V.11. Sistema de carga vertical	117
Figura V.12. Sistema de apoyo del soporte	117
Figura V.13. Sistema de apoyo del soporte. Croquis de la placa de apoyo del pórtico de carga	118
Figura V.14. Sujeción del soporte al pórtico de ensayo. Vista de la placa que recibe el elemento. UPN modificado	118
Figura V.15. Sistema de control de pandeo lateral	119
Figura V.16. Vista desde la parte superior del bastidor auxiliar de fijación	119
Figura V.17. Dispositivos auxiliares	120
Figura V.18. Acopio de las distintas ferrallas	120
Figura V.19. Croquis de los distintos UPN modificados empleados en este trabajo	121

Figura V.20. Perfil UPN modificado que se suelda en extremo de ferralla y que tras hormigonado queda embebido en el soporte.....	121
Figura V.21. Ferralla modificada según programa experimental previsto.....	122
Figura V.22. Croquis de situación de las bandas dentro del elemento a ensayar.....	123
Figura V.23. Distintas fases del pegado de las bandas extensométricas.....	124
Figura V.24. Detalle de chapa de encofrado perforada. Vista de barras pasantes auxiliares.....	124
Figura V.25. Detalle de las placas metálicas desmontables que conforman las paredes del soporte.....	125
Figura V.26. Moldes de probetas de acompañamiento para control del hormigón.....	126
Figura V.27. Vista del encofrado del soporte antes y después de introducir la ferralla del elemento.....	126
Figura V.28. Material sólido pesado según dosificación preparado para fabricar el hormigón.....	128
Figura V.29. Pesaje de líquidos, agua y aditivo, en báscula de precisión.....	128
Figura V.30. Vistas de las distintas etapas de amasado. Aporte de las materias primas y amasado de la mezcla, control de la consistencia mediante ensayo de escurrimiento y vertido en cazo para su transporte.....	129
Figura V.31. Vistas de las fases de transporte y vertido del hormigón en la pieza principal y probetas de control.....	130
Figura V.32. Hormigón fresco en soporte. Curado del elemento y de las probetas de control.....	130
Figura V.33. Conservación de las probetas de control en cámara húmeda.....	131
Figura V.34. Posición y nomenclatura de captadores horizontales.....	132
Figura V.35. Posición y nomenclatura de captadores verticales en zona crítica.....	132
Figura V.36. Plantilla y cuadrícula en la zona crítica.....	133
Figura V.37. Vista de la entalla realizada.....	133
Figura V.38. Montaje de rodillos en el pórtico. Esquema de carga.....	134
Figura V.39. Sujeción y posición del captador de desplazamiento.....	134
Figura V.40. Ejemplo de Diagrama Tensión-CMOD. Probeta 2 del soporte AS21-15.....	135
Figura V.41. Ensayo de Compresión simple.....	135
Figura V.42. Equipo para refrentar y probetas cilíndricas refrentadas.....	136
Figura V.43. Ejemplo de Diagrama Tensión-Carrera para probetas cilíndricas del soporte AS11-1.....	136
Figura V.44. Ensayo para la obtención del módulo de deformación en compresión del hormigón.....	136
Figura V.45. Ejemplo de Diagrama <i>drift</i> -nº de ciclos (medida en eje de abcisas en segundos).....	137
Figura V.46. Sistema de adquisición de datos. Historia de carga lateral cíclica.....	138
Figura V.47. Sistema de adquisición de datos. Instrumentación.....	139
Figura V.48. Vista de la zona de acopio de soportes ensayados.....	140
Figura VI.1. Ficha tipo de materiales.....	143
Figura VI.2. Ficha tipo de instrumentación.....	144
Figura VI.3. Ficha tipo rotura.....	145
Figura VI.4. Ficha tipo Gráficas Directas.....	146
Figura VI.5. Ficha tipo parámetros de comportamiento (1 de 2).....	147
Figura VI.6. Ficha tipo parámetros de comportamiento (2 de 2).....	148
Figura VII.1. Fisuración del elemento AS11-22. La vista de la izquierda corresponde con la caída de carga del 20%, la de la derecha con el final del ensayo.....	151

Figura VII.2. Longitud de la zona de daño visual.....	152
Figura VII.3. Ejemplo de medida de la longitud de daño por cara (E, W) y su longitud media de daño ($L_{\text{daño_med}}$).....	152
Figura VII.4. Pandeo local de las armaduras longitudinales	156
Figura VII.5. Ejemplo de curva carga Lateral – <i>drift</i>	158
Figura VII.6. Ejemplo de Deformada del soporte para distintos niveles de <i>drift</i> nominal	158
Figura VII.7. Deformada del soporte AS21-13. Axil de compresión nulo	159
Figura VII.8. Deformada del soporte AS21-24. Axil de compresión máximo	159
Figura VII.9. Gráfica Carga Lateral- ε del elemento AS23-14	160
Figura VII.10. Rotura de soporte AS11-2R y AS21-24	161
Figura VIII.1. Solicitaciones y deformada a nivel elemento. Secciones de medida de bandas extensométricas.	165
Figura VIII.2. Esfuerzos a nivel sección. Identificación de banda extensométrica en la sección “i”	166
Figura VIII.3. Perfiles de deformación en subida y bajada (BS13-19)	167
Figura VIII.4. Perfiles de deformación en subida y bajada (AS21-13)	168
Figura VIII.5. Diagrama de comportamiento del soporte durante el ensayo, Caballero (2015) [26]	169
Figura VIII.6. Relación V_y/V_{max} y valor de V_y con respecto a la separación de la armadura transversal.....	172
Figura VIII.7. Relación V_y/V_{max} y valor de V_y con respecto a tipo de hormigón	172
Figura VIII.8. Relación V_y/V_{max} y valor de V_y con respecto a volumen de fibras en el hormigón.....	173
Figura VIII.9. Relación V_y/V_{max} y valor de V_y con respecto al nivel de axil aplicado.....	173
Figura VIII.10. Relación V_y/V_{max} y valor de V_y con respecto a la esbeltez a cortante	174
Figura VIII.11. Relación V_y/V_{max} y valor de V_y con respecto a la cuantía de la armadura longitudinal	174
Figura VIII.12. Relación V_y/V_{max} y valor de V_y con respecto a la cuantía de la armadura longitudinal	175
Figura VIII.13. Relación V_y/V_{max} y valor de V_y con respecto al recubrimiento relativo.....	175
Figura VIII.14. Relación V_y/V_{max} y valor de V_y con respecto al tipo de carga	176
Figura VIII.15. Relación M_y/M_{max} y valor de M_y con respecto a la separación de la armadura transversal	177
Figura VIII.16. Relación M_y/M_{max} y valor de M_y con respecto a tipo de hormigón	177
Figura VIII.17. Relación M_y/M_{max} y valor de M_y con respecto a volumen de fibras en el hormigón	178
Figura VIII.18. Relación M_y/M_{max} y valor de M_y con respecto al nivel de axil aplicado	178
Figura VIII.19. Relación M_y/M_{max} y valor de M_y con respecto a la esbeltez a cortante	179
Figura VIII.20. Relación M_y/M_{max} y valor de M_y con respecto a la cuantía de la armadura longitudinal.....	179
Figura VIII.21. Relación M_y/M_{max} y valor de M_y con respecto a la cuantía de la armadura longitudinal.....	180
Figura VIII.22. Relación M_y/M_{max} y valor de M_y con respecto al recubrimiento relativo	180
Figura VIII.23. Relación M_y/M_{max} y valor de M_y con respecto al tipo de carga	181
Figura VIII.24. SERIE 1: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=5.77$, $v=0.20$, s_t =variable, $\rho_f=1.16\%$, $r/h=0.15$, cíclica.....	182
Figura VIII.25. SERIE 1: Tipo I y II, $V_f=2\%$, $\lambda_v=5.77$, $v=0.20$, s_t =variable, $\rho_f=1.16\%$, $r/h=0.15$, cíclica	183
Figura VIII.26. SERIE 1: Tipo I, $V_f=1$ y 2% , $\lambda_v=5.77$, $v=0.20$, s_t =variable, $\rho_f=1.16\%$, $r/h=0.15$, cíclica	184
Figura VIII.27. SERIE 2: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=7.50$, v = variable, $s_t=0.20$ m, $\rho_f=1.05\%$, $r/h=0.14$, cíclica	185
Figura VIII.28. SERIE 2: Tipo I, $V_f=2\%$, λ_v =variable, $v=0.20$, $s_t=0.20$, $\rho_f=0.96$, 1.05% , $r/h=0.14$, 0.16 , cíclica	185

Figura VIII.29. SERIE 3: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=7.50$, $v=0.20$, $s_t=variable$, $\rho_l=variable$, $r/h=0.14, 0.16, 0.17$, cíclica	186
Figura VIII.30. SERIE 4: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=7.50$, $v=0.10$, $s_t=variable$, $\rho_l=variable$, $r/h=variable$, cíclica	187
Figura VIII.31. SERIE 5: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=5.77$, $v=0.20$, $s_t=0.30$, $\rho_l=1.16\%$, $r/h=0.15$, Tipo de carga= variable	187
Figura VIII.32. Valor de V_{max} con respecto a la separación de la armadura transversal	188
Figura VIII.33. Valor de V_{max} con respecto a tipo de hormigón	189
Figura VIII.34. Valor de V_{max} con respecto a volumen de fibras en el hormigón	190
Figura VIII.35. Valor de V_{max} con respecto al nivel de axil aplicado	190
Figura VIII.36. Valor de V_{max} con respecto a la esbeltez a cortante	191
Figura VIII.37. Valor de V_{max} con respecto a la cuantía de la armadura longitudinal	191
Figura VIII.38. Valor de V_{max} con respecto a la cuantía de la armadura longitudinal	192
Figura VIII.39. Valor de V_{max} con respecto al recubrimiento relativo	192
Figura VIII.40. Valor de V_{max} con respecto al tipo de carga	193
Figura VIII.41. Medidas necesarias para obtener la curvatura de la sección	194
Figura VIII.42. SERIE 1: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=5.77$, $v=0.20$, $s_t=variable$, $\rho_l=1.16\%$, $r/h=0.15$, cíclica	194
Figura VIII.43. SERIE 1: Tipo I y II, $V_f=2\%$, $\lambda_v=5.77$, $v=0.20$, $s_t=variable$, $\rho_l=1.16\%$, $r/h=0.15$, cíclica	195
Figura VIII.44. SERIE 1: Tipo I, $V_f=1$ y 2% , $\lambda_v=5.77$, $v=0.20$, $s_t=variable$, $\rho_l=1.16\%$, $r/h=0.15$, cíclica	196
Figura VIII.45. SERIE 2: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=7.50$, $v=variable$, $s_t=0.20$ m, $\rho_l=1.05\%$, $r/h=0.14$, cíclica	197
Figura VIII.46. SERIE 2: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=variable$, $v=0.20$, $s_t=0.20$, $\rho_l=0.96, 1.05\%$, $r/h=0.14, 0.16$, cíclica	197
Figura VIII.47. SERIE 3: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=7.50$, $v=0.20$, $s_t=variable$, $\rho_l=variable$, $r/h=0.14, 0.16, 0.17$, cíclica	198
Figura VIII.48. SERIE 4: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=7.50$, $v=0.10$, $s_t=variable$, $\rho_l=variable$, $r/h=variable$, cíclica	199
Figura VIII.49. SERIE 5: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=5.77$, $v=0.20$, $s_t=0.30$, $\rho_l=1.16\%$, $r/h=0.15$, Tipo de carga= variable	199
Figura VIII.50. Valor de M_{max} con respecto a la separación de la armadura transversal	201
Figura VIII.51. Valor de M_{max} con respecto a tipo de hormigón	202
Figura VIII.52. Valor de M_{max} con respecto a volumen de fibras en el hormigón	202
Figura VIII.53. Valor de M_{max} con respecto al nivel de axil aplicado	203
Figura VIII.54. Valor de M_{max} con respecto a la esbeltez a cortante	203
Figura VIII.55. Valor de M_{max} con respecto a la cuantía de la armadura longitudinal	204
Figura VIII.56. Valor de M_{max} con respecto a la cuantía de la armadura longitudinal	204
Figura VIII.57. Valor de M_{max} con respecto al recubrimiento relativo	205
Figura VIII.58. Valor de M_{max} con respecto al tipo de carga	205
Figura VIII.59. Diagrama M-Drift del soporte AS11-3. Fallo por agotamiento de la sección crítica	208
Figura VIII.60. Diagrama M-Drift del soporte AS31-11. Fallo por inestabilidad del elemento	208
Figura VIII.61. Diagrama de deformaciones de los materiales para Momentos máximos, totales y de 1er orden, del soporte BS13-19. Fallo por agotamiento	209
Figura VIII.62. Diagrama de deformaciones del acero del elemento AS31-11. Ejemplo de fallo por inestabilidad	210
Figura VIII.63. Ejemplo de envolventes de las gráficas cortante-desplazamiento para los soportes de la Serie 2 (λ_v)	212
Figura VIII.64. Diagramas cortante-desplazamiento. Envolventes medias. Serie 2 (λ_v)	213

Figura VIII.65. Diagrama cortante-desplazamiento. Envolventes medias. Serie 2 (Nivel de Axil).....	213
Figura VIII.66. Diagrama cortante-desplazamiento. Envolventes medias. Serie 5 (Tipo de Carga)	213
Figura VIII.67. Diagrama momento-curvatura. Envolventes medias. Serie 3 (ρ_l)	215
Figura VIII.68. Envolventes medias adimensionalizadas. Nivel de axil y tipo de carga aplicada	216
Figura VIII.69. Diagrama idealizado de comportamiento. Método aproximado (Barrera (2012) [16])	218
Figura VIII.70. Diagrama idealizado de comportamiento. Método del balance de energía (Barrera (2012) [16])	218
Figura VIII.71. Fuente Eurocódigo 8, Anexo E, apartado E.3.2.....	219
Figura VIII.72. Diagrama idealizado de comportamiento. Método del Eurocódigo 8 (Barrera (2012) [16]).....	219
Figura VIII.73. Diagrama idealizado según el método aproximado. Elemento BS11-17	221
Figura VIII.74. Diagrama idealizado según el método del balance de energía. Elemento BS11-17	221
Figura VIII.75. Diagrama idealizado según el método del Eurocódigo 8. Elemento BS11-17	222
Figura VIII.76. Índice de ductilidad. Curvatura elástica y plástica. Serie 1 (s_t)	227
Figura VIII.77. Índice de ductilidad. Curvatura elástica y plástica. Serie 1 (Tipo de fibras).....	228
Figura VIII.78. Índice de ductilidad. Curvatura elástica y plástica. Serie 1 (Volumen de fibras)	229
Figura VIII.79. Índice de ductilidad. Curvatura elástica y plástica. Serie 2 (Nivel de axil)	229
Figura VIII.80. Índice de ductilidad. Curvatura elástica y plástica. Serie 2 (Esbeltez)	230
Figura VIII.81. Índice de ductilidad. Curvatura elástica y plástica. Serie 3 (ρ_l)	231
Figura VIII.82. Índice de ductilidad. Curvatura elástica y plástica. Serie 4 (Recubrimiento relativo (r/h)).....	231
Figura VIII.83. Índice de ductilidad. Curvatura elástica y plástica. Serie 5 (Tipo de carga)	232
Figura VIII.84. Índice de ductilidad. Separación de armadura transversal (s_t).....	233
Figura VIII.85. Índice de ductilidad. Tipo de fibras.....	233
Figura VIII.86. Índice de ductilidad. Volumen de fibras	234
Figura VIII.87. Índice de ductilidad. Esbeltez a cortante.....	234
Figura VIII.88. Índice de ductilidad. Nivel de axil	235
Figura VIII.89. Índice de ductilidad. Cuantía de armadura longitudinal.....	236
Figura VIII.90. Índice de ductilidad. Recubrimiento relativo.....	236
Figura VIII.91. Índice de ductilidad. Tipo de carga	237
Figura VIII.92. Definición de la energía disipada por ciclo (Caballero (2015) [26])	237
Figura VIII.93. Energía disipada, soporte AS21-10	238
Figura VIII.94. Energía normalizada.Serie 1	240
Figura VIII.95. Energía normalizada.Serie 2	240
Figura VIII.96. Energía normalizada.Serie 3 y serie 4	240
Figura VIII.97. Diagrama V- Δ . Comportamiento elástico de 2º orden	245
Figura VIII.98. Diagrama M- ϕ . Comportamiento elástico	245
Figura VIII.99. Esquema estructural empleado.....	247
Figura VIII.100. Esquema del soporte en ménsula en posición deformada.....	247
Figura VIII.101. Comparativa de los factores de rigidez frente a la longitud de daño	251

Figura VIII.102. Comportamiento y distribución de curvaturas.....	252
Figura VIII.103. Factor de Rigidez. Separación de armadura transversal.....	253
Figura VIII.104. Factor de Rigidez. Tipo de Fibras.....	253
Figura VIII.105. Factor de Rigidez. Volumen de Fibras.....	254
Figura VIII.106. Factor de Rigidez. Esbeltez.....	254
Figura VIII.107. Factor de Rigidez. Axil Reducido.....	255
Figura VIII.108. Factor de Rigidez. Cuantía de Armadura longitudinal.....	255
Figura VIII.109. Factor de Rigidez. Recubrimiento Relativo.....	256
Figura VIII.110. Factor de Rigidez. Tipo de carga.....	257
Figura VIII.111. Propuesta para el Factor de Rigidez (α_e). Nivel de axil.....	258
Figura VIII.112. Logitud de la zona de daño. Tipos.....	259
Figura VIII.113. Modelo en ménsula. Pristley y Park [102].....	259
Figura VIII.114. Relación I_p/h . Separación de la armadura transversal.....	262
Figura VIII.115. Relación I_p/h . Tipo de fibras.....	263
Figura VIII.116. Relación I_p/h . Volumen de fibras.....	263
Figura VIII.117. Relación I_p/h . Esbeltez.....	264
Figura VIII.118. Relación I_p/h . Axil reducido. Valores incluyendo $\nu = 0.4$ (ver izquierda) y $\sin \nu = 0.4$ (ver derecha).....	264
Figura VIII.119. Relación I_p/h . Cuantía de la armadura longitudinal.....	265
Figura VIII.120. Relación I_p/h . Recubrimiento relativo.....	265
Figura VIII.121. Relación I_p/h . Tipo de Carga.....	266
Figura VIII.122. Longitud crítica de daño (l_{cr}) a partir del método de los perfiles de curvatura (Pam y Ho (2009) [89]).....	270
Figura VIII.123. Comparación de la relación (L_p/h) calculada por los métodos idealizados, observada directamente y según los métodos recogidos por la bibliografía. Separación de la armadura transversal.....	272
Figura VIII.124. Comparación de la relación (L_p/h) calculada por los métodos idealizados, observada directamente y según los métodos recogidos por la bibliografía. Tipo de fibras.....	273
Figura VIII.125. Comparación de la relación (L_p/h) calculada por los métodos idealizados, observada directamente y según los métodos recogidos por la bibliografía. Volumen de fibras.....	273
Figura VIII.126. Comparación de la relación (L_p/h) calculada por los métodos idealizados, observada directamente y según los métodos recogidos por la bibliografía. Esbeltez.....	274
Figura VIII.127. Comparación de la relación (L_p/h) calculada por los métodos idealizados, observada directamente y según los métodos recogidos por la bibliografía. Nivel de axil.....	274
Figura VIII.128. Comparación de la relación (L_p/h) calculada por los métodos idealizados, observada directamente y según los métodos recogidos por la bibliografía. Cuantía de la armadura longitudinal.....	275
Figura VIII.129. Comparación de la relación (L_p/h) calculada por los métodos idealizados, observada directamente y según los métodos recogidos por la bibliografía. Recubrimiento relativo.....	275
Figura VIII.130. Comparación de la relación (L_p/h) calculada por los métodos idealizados, observada directamente y según los métodos recogidos por la bibliografía. Tipo de aplicación de la carga.....	275
Figura VIII.131. Valores de (L_p/h) recapitulados en la bibliografía (soportes- carga cíclica). Parámetros analizados: nivel de axil, esbeltez, cuantía de la armadura longitudinal y resistencia a compresión del hormigón.....	278

Figura VIII.132. Valores de (Lp/h) recopilados en la bibliografía (soportes- carga cíclica). Parámetros analizados: nivel de axil, esbeltez, cuantía de la armadura longitudinal y resistencia a compresión del hormigón.	279
Figura VIII.133. Valores de (Lp/h) recopilados en la bibliografía (soportes- carga cíclica). Parámetros analizados: nivel de axil, esbeltez, cuantía de la armadura longitudinal y resistencia a compresión del hormigón.	280
Figura IX.1. Diagrama Tensión-Deformación teórico del acero ($\sigma_s-\varepsilon_s$)	283
Figura IX.2. Comparativa de las curvas teóricas y experimentales	285
Figura IX.3. Diagrama a compresión Tensión-Deformación teórico del hormigón ($\sigma_c-\varepsilon_c$)	285
Figura IX.4. Diagrama supuesto para el comportamiento Tensión-Deformación a tracción	288
Figura IX.5. Geometría de la sección y diagrama deformacional.....	289
Figura IX.6. Diagrama de tensiones y deformaciones de la sección, Estado I.....	289
Figura IX.7. Diagrama de tensiones y deformaciones de la sección, Estado II.....	290
Figura IX.8. Diagrama de tensiones y deformaciones de la sección, Estado III.....	290
Figura IX.9. Diagrama de tensiones y deformaciones de la sección, Estado IV	291
Figura IX.10. Diagrama de tensiones y deformaciones de la sección, Estado V	291
Figura IX.11. Diagrama teórico Tensión-Deformación modelizado para el hormigón.....	292
Figura IX.12. Diagrama de ajuste experimental/teórico	294
Figura IX.13. Comparativa de los diagramas momento-curvatura experimental y obtenido numéricamente	296
Figura IX.14. Modelo de elementos finitos, Bonet et al. [24]	298
Figura IX.15. Integración de la sección, Bonet et al. [25].....	298
Figura IX.16. Descomposición en capas finas	299
Figura IX.17. Comparativa de envolventes experimental y teórica AS21-23	299
Figura IX.18. Diagrama a compresión AFGC-SETRA(2013) [4] y Diagrama a tracción propuesto	302
Figura IX.19. Diagrama bloque rectangular y Diagrama parábola rectángulo, EHE-08 [35]	302
Figura IX.20. Curvatura elástica teórica frente a la obtenida mediante los métodos de idealización	310
Figura IX.21. Curvatura última teórica frente a la obtenida mediante los métodos de idealización	310
Figura IX.22. Deriva elástica teórica frente a la obtenida mediante los métodos de idealización	314
Figura IX.23. Deriva última teórica frente a la obtenida mediante los métodos de idealización	314

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla II.1. Estados del Arte consultados	82
Tabla II.2. Relación de investigaciones experimentales consultadas adicionales (1/4)	83
Tabla II.3. Relación de investigaciones experimentales consultadas adicionales (2/4)	84
Tabla II.4. Relación de investigaciones experimentales consultadas (3/4)	85
Tabla II.5. Relación de investigaciones experimentales consultadas (4/4)	86
Tabla IV.1. Definición de los soportes y sus variables que forman las series del programa experimental	98
Tabla IV.2. Serie 1: Separación de la armadura transversal (s_t)	98
Tabla IV.3. Serie 1: Tipo de Fibras	99
Tabla IV.4. Serie 1: Volumen de fibras (V_f)	99
Tabla IV.5. Serie 2: Esbeltez a cortante (λ_v)	99
Tabla IV.6. Serie 2: Nivel de axil aplicado (v)	99
Tabla IV.7. Serie 3: Cuantía de la armadura longitudinal (ρ_l)	100
Tabla IV.8. Serie 4: Recubrimiento relativo (r/h)	100
Tabla IV.9. Serie 5: Tipo de carga aplicada	101
Tabla IV.10. Dosificaciones previstas para la realización del programa experimental	103
Tabla IV.11. Resultados obtenidos de los ensayos de acompañamiento del hormigón Tipo I (2%)	105
Tabla IV.12. Resultados obtenidos de los ensayos de acompañamiento del hormigón Tipo I (1%)	105
Tabla IV.13. Resultados obtenidos de los ensayos de acompañamiento del hormigón Tipo II (2%)	106
Tabla IV.14. Valores medios de los distintos parámetros de las barras de acero del Lote 2	107
Tabla IV.15. Valores medios de los distintos parámetros de las barras de acero del Lote 3	107
Tabla V.1. Historia de velocidad-drift impuesto en automatismo	138
Tabla VII.1. Valores observados y valores teóricos según Pam and Ho [88] por series	153
Tabla VII.2. Datos de los soportes y observación visual de existencia de pandeo local	156
Tabla VIII.1. Cortante y Momento Flector correspondientes al instante en el que plastifica a tracción la armadura en subida	170
Tabla VIII.2. Cortante y Momento Flector correspondientes al instante en el que plastifica a tracción la armadura en bajada	171
Tabla VIII.3. Serie 1: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=5.77$, $v=0.20$, $s_t=$ variable, $\rho_l=1.16\%$, $r/h=0.15$, cíclica	172
Tabla VIII.4. SERIE 1: Tipo I y II, $V_f=2\%$, $\lambda_v=5.77$, $v=0.20$, $s_t=$ variable, $\rho_l=1.16\%$, $r/h=0.15$, cíclica	172
Tabla VIII.5. SERIE 1: Tipo I, $V_f=1$ y 2% , $\lambda_v=5.77$, $v=0.20$, $s_t=$ variable, $\rho_l=1.16\%$, $r/h=0.15$, cíclica	173
Tabla VIII.6. SERIE 2: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=7.50$, $v=$ variable, $s_t=0.20$, $\rho_l=1.05\%$, $r/h=0.14$, cíclica	173
Tabla VIII.7. SERIE 2: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=$ variable, $v=0.20$, $s_t=0.20$, $\rho_l=0.96$, 1.05% , $r/h=0.14$, 0.16 , cíclica	174
Tabla VIII.8. SERIE 3: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=7.50$, $v=0.20$, $s_t=0.20$ m, $\rho_l=$ variable, $r/h=0.14$, 0.16 , 0.17 , cíclica	174
Tabla VIII.9. SERIE 3: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=7.50$, $v=0.20$, $s_t=0.30$ m, $\rho_l=$ variable, $r/h=0.14$, 0.16 , 0.17 , cíclica	175
Tabla VIII.10. SERIE 4: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=7.50$, $v=0.10$, $s_t=$ variable, $\rho_l=$ variable, $r/h=$ variable, cíclica	175
Tabla VIII.11. SERIE 5: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=5.77$, $v=0.20$, $s_t=0.30$, $\rho_l=1.16\%$, $r/h=0.15$, Tipo de carga= variable	176

Tabla VIII.12. Serie 1: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=5.77$, $v=0.20$, $s_t=variable$, $\rho_f=1.16\%$, $r/h=0.15$, cíclica.....	177
Tabla VIII.13. SERIE 1: Tipo I y II, $V_f=2\%$, $\lambda_v=5.77$, $v=0.20$, $s_t=variable$, $\rho_f=1.16\%$, $r/h=0.15$, cíclica	177
Tabla VIII.14. SERIE 1: Tipo I, $V_f=1$ y 2% , $\lambda_v=5.77$, $v=0.20$, $s_t=variable$, $\rho_f=1.16\%$, $r/h=0.15$, cíclica	178
Tabla VIII.15. SERIE 2: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=7.50$, $v=variable$, $s_t=0.20$, $\rho_f=1.05\%$, $r/h=0.14$, cíclica	178
Tabla VIII.16. SERIE 2: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=variable$, $v=0.20$, $s_t=0.20$, $\rho_f=0.96$, 1.05% , $r/h=0.14$, 0.16 , cíclica	179
Tabla VIII.17. SERIE 3: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=7.50$, $v=0.20$, $s_t=0.20$ m, $\rho_f=variable$, $r/h=0.14$, 0.16 , 0.17 , cíclica	179
Tabla VIII.18. SERIE 3: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=7.50$, $v=0.20$, $s_t=0.30$ m, $\rho_f=variable$, $r/h=0.14$, 0.16 , 0.17 , cíclica	180
Tabla VIII.19. SERIE 4: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=7.50$, $v=0.10$, $s_t=variable$, $\rho_f=variable$, $r/h=variable$, cíclica	180
Tabla VIII.20. SERIE 5: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=5.77$, $v=0.20$, $s_t=0.30$, $\rho_f=1.16\%$, $r/h=0.15$, Tipo de carga= variable	181
Tabla VIII.21. Serie 1: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=5.77$, $v=0.20$, $s_t=variable$, $\rho_f=1.16\%$, $r/h=0.15$, cíclica.....	188
Tabla VIII.22. SERIE 1: Tipo I y II, $V_f=2\%$, $\lambda_v=5.77$, $v=0.20$, $s_t=variable$, $\rho_f=1.16\%$, $r/h=0.15$, cíclica	189
Tabla VIII.23. SERIE 1: Tipo I, $V_f=1$ y 2% , $\lambda_v=5.77$, $v=0.20$, $s_t=variable$, $\rho_f=1.16\%$, $r/h=0.15$, cíclica	189
Tabla VIII.24. SERIE 2: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=7.50$, $v=variable$, $s_t=0.20$, $\rho_f=1.05\%$, $r/h=0.14$, cíclica	190
Tabla VIII.25. SERIE 2: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=variable$, $v=0.20$, $s_t=0.20$, $\rho_f=0.96$, 1.05% , $r/h=0.14$, 0.16 , cíclica	190
Tabla VIII.26. SERIE 3: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=7.50$, $v=0.20$, $s_t=0.20$ m, $\rho_f=variable$, $r/h=0.14$, 0.16 , 0.17 , cíclica	191
Tabla VIII.27. SERIE 3: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=7.50$, $v=0.20$, $s_t=0.30$ m, $\rho_f=variable$, $r/h=0.14$, 0.16 , 0.17 , cíclica	191
Tabla VIII.28. SERIE 4: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=7.50$, $v=0.10$, $s_t=variable$, $\rho_f=variable$, $r/h=variable$, cíclica	192
Tabla VIII.29. SERIE 5: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=5.77$, $v=0.20$, $s_t=0.30$, $\rho_f=1.16\%$, $r/h=0.15$, Tipo de carga= variable	192
Tabla VIII.30. Porcentaje alcanzado del valor post-pico en el momento de la rotura de los valores de las envolventes Momento-Curvatura.....	200
Tabla VIII.31. Serie 1: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=5.77$, $v=0.20$, $s_t=variable$, $\rho_f=1.16\%$, $r/h=0.15$, cíclica.....	201
Tabla VIII.32. SERIE 1: Tipo I y II, $V_f=2\%$, $\lambda_v=5.77$, $v=0.20$, $s_t=variable$, $\rho_f=1.16\%$, $r/h=0.15$, cíclica	201
Tabla VIII.33. SERIE 1: Tipo I, $V_f=1$ y 2% , $\lambda_v=5.77$, $v=0.20$, $s_t=variable$, $\rho_f=1.16\%$, $r/h=0.15$, cíclica	202
Tabla VIII.34. SERIE 2: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=7.50$, $v=variable$, $s_t=0.20$, $\rho_f=1.05\%$, $r/h=0.14$, cíclica	203
Tabla VIII.35. SERIE 2: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=variable$, $v=0.20$, $s_t=0.20$, $\rho_f=0.96$, 1.05% , $r/h=0.14$, 0.16 , cíclica	203
Tabla VIII.36. SERIE 3: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=7.50$, $v=0.20$, $s_t=0.20$ m, $\rho_f=variable$, $r/h=0.14$, 0.16 , 0.17 , cíclica	204
Tabla VIII.37. SERIE 3: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=7.50$, $v=0.20$, $s_t=0.30$ m, $\rho_f=variable$, $r/h=0.14$, 0.16 , 0.17 , cíclica	204
Tabla VIII.38. SERIE 4: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=7.50$, $v=0.10$, $s_t=variable$, $\rho_f=variable$, $r/h=variable$, cíclica	205
Tabla VIII.39. SERIE 5: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=5.77$, $v=0.20$, $s_t=0.30$, $\rho_f=1.16\%$, $r/h=0.15$, Tipo de carga= variable	205
Tabla VIII.40. Análisis de los modos de fallo para momento último y de 1 ^{er} orden.....	211
Tabla VIII.41. Resultados obtenidos para las envolventes de los diagramas. V-Delta	214
Tabla VIII.42. Resultados obtenidos para las envolventes de los diagramas. M-Curvatura	216
Tabla VIII.43. Valores experimentales de las deformaciones utilizadas de los materiales	220
Tabla VIII.44. Valores medios obtenidos para los diagramas V- Δ correspondientes al punto de plastificación.....	223
Tabla VIII.45. Valores medios obtenidos para los diagramas M- ϕ correspondientes al punto de plastificación.....	224
Tabla VIII.46. Valores de ductilidad a nivel sección. Separación de la armadura transversal	227
Tabla VIII.47. Valores de ductilidad a nivel sección. Tipo de fibra	227

Tabla VIII.48. Valores de ductilidad a nivel sección. Volumen de fibras	228
Tabla VIII.49. Valores de ductilidad a nivel sección. Nivel de axil aplicado	229
Tabla VIII.50. Valores de ductilidad a nivel sección. Esbeltez	229
Tabla VIII.51. Valores de ductilidad a nivel sección. Cuantía de la armadura longitudinal	231
Tabla VIII.52. Valores de ductilidad a nivel sección. Recubrimiento relativo.....	231
Tabla VIII.53. Valores de ductilidad a nivel sección. Tipo de carga	232
Tabla VIII.54. Valores de ductilidad a nivel elemento. Separación de la armadura transversal	233
Tabla VIII.55. Valores de ductilidad a nivel elemento. Tipo de fibras	233
Tabla VIII.56. Valores de ductilidad a nivel elemento. Volumen de fibras.....	234
Tabla VIII.57. Valores de ductilidad a nivel elemento. Esbeltez.....	234
Tabla VIII.58. Valores de ductilidad a nivel elemento. Nivel de axil aplicado	235
Tabla VIII.59. Valores de ductilidad a nivel elemento. Cuantía de la armadura transversal	236
Tabla VIII.60. Valores de ductilidad a nivel elemento. Recubrimiento relativo	236
Tabla VIII.61. Valores de ductilidad a nivel elemento. Tipo de carga	237
Tabla VIII.62. Energía disipada acumulada y la energía normalizada por series.....	239
Tabla VIII.63. Valores medios teóricos para el hormigón Tipo I (2% de volumen de fibras).....	241
Tabla VIII.64. Valores medios teóricos para el hormigón Tipo II (2% de volumen de fibras).....	241
Tabla VIII.65. Valores medios teóricos para el hormigón Tipo I (1% de volumen de fibras).....	242
Tabla VIII.66. Valores medios teóricos para el todos los tipos y dosificaciones de hormigón empleados en este trabajo	242
Tabla VIII.67. Valores medios experimentales para el hormigón Tipo I (2% de volumen de fibras)	242
Tabla VIII.68. Valores medios experimentales para el hormigón Tipo II (2% de volumen de fibras).....	242
Tabla VIII.69. Valores medios experimentales para el hormigón Tipo I (1% de volumen de fibras).....	243
Tabla VIII.70. Valores medios experimentales para el todos los hormigones de este trabajo	243
Tabla VIII.71. Valores del factor de rigidez a nivel elemento (α_e) obtenidos experimentalmente para cada método de idealización	249
Tabla VIII.72. Valores del factor de rigidez a nivel sección(α_s) obtenidos experimentalmente para cada método de idealización	250
Tabla VIII.73. Valores del factor α . Separación de la armadura transversal (s_t)	252
Tabla VIII.74. Valores del factor α . Tipo de Fibras	253
Tabla VIII.75. Valores del factor α . Volumen de Fibras.....	254
Tabla VIII.76. Valores del factor α . Esbeltez ($\lambda.v$)	254
Tabla VIII.77. Valores del factor α . Nivel de axil aplicado (v)	255
Tabla VIII.78. Valores del factor α . Cuantía de armadura longitudinal (ρ)	255
Tabla VIII.79. Valores del factor α . Recubrimiento relativo (r/h)	256
Tabla VIII.80. Valores del factor α . Tipo de carga	256
Tabla VIII.81. Propuesta del Factor de Rigidez, α_e	257
Tabla VIII.82. Valores de la longitud de la rótula plástica y su relación con el canto de la sección (l_p/h) para el Método Aproximado (MA), Método del Balance de Energía (BE) y Método del Eurocódigo 8 (EC8).....	261

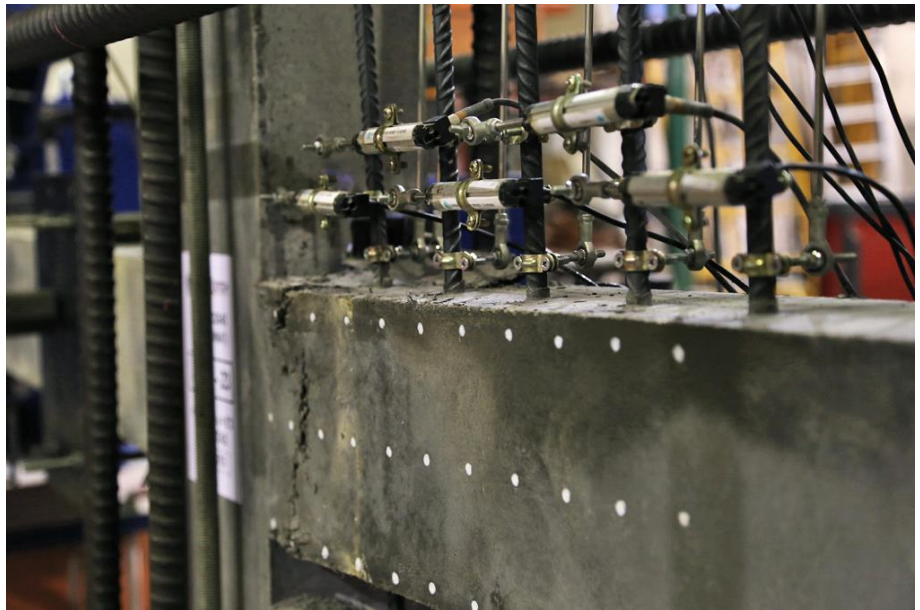
Tabla VIII.83. Valores de la longitud de la rótula plástica (l_p) y su relación con el canto de la sección (h). Separación de la armadura transversal (s_t)	262
Tabla VIII.84. Valores de la longitud de la rótula plástica (l_p) y su relación con el canto de la sección (h). Tipo de hormigón	262
Tabla VIII.85. Valores de la longitud de la rótula plástica (l_p) y su relación con el canto de la sección (h). Volumen de fibras en la masa de hormigón	263
Tabla VIII.86. Valores de la longitud de la rótula plástica (l_p) y su relación con el canto de la sección (h). Esbeltez (λ_v)	263
Tabla VIII.87. Valores de la longitud de la rótula plástica (l_p) y su relación con el canto de la sección (h). Nivel de carga axil (v)	264
Tabla VIII.88. Valores de la longitud de la rótula plástica (l_p) y su relación con el canto de la sección (h). Cuantía de la armadura longitudinal (ρ_l)	265
Tabla VIII.89. Valores de la longitud de la rótula plástica (l_p) y su relación con el canto de la sección (h). Recubrimiento relativo (r/h)	265
Tabla VIII.90. Valores de la longitud de la rótula plástica (l_p) y su relación con el canto de la sección (h). Tipo de carga	266
Tabla VIII.91. Valores obtenidos tras aplicar los métodos experimentales y la normativa	272
Tabla IX.1. Valores experimentales utilizados para definir el comportamiento tensión-deformación del hormigón	287
Tabla IX.2. Definición del diagrama σ - ε en tracción. Tipo I (2% volumen de fibras)	293
Tabla IX.3. Definición del diagrama σ - ε en tracción. Tipo II (2% volumen de fibras)	293
Tabla IX.4. Definición del diagrama σ - ε en tracción. Tipo I (1% volumen de fibras)	294
Tabla IX.5. Valores experimentales y numéricos del esfuerzo flector máximo. Relación entre ambos	296
Tabla IX.6. Valores teóricos y experimentales de la curvatura. Relación de los índices de ductilidad en curvatura obtenidos	297
Tabla IX.7. Valores experimentales y numéricos del esfuerzo cortante máximo. Relación entre ambos	300
Tabla IX.8. Valores teóricos y experimentales del desplazamiento. Relación de los índices de ductilidad en desplazamiento obtenidos	301
Tabla IX.9. Descripción de los métodos y nomenclaturas empleadas en el cálculo seccional	303
Tabla IX.10. Valores de los Momentos flectores últimos experimental y teóricos	304
Tabla IX.11. Resumen de la variables estadísticas obtenidas para la relación $M_u \text{ experimental} / M_u \text{ teórico}$	304
Tabla IX.12. Descripción de los métodos y nomenclaturas empleadas en el cálculo de los efectos de 2º orden	306
Tabla IX.13. Valores de la Carga lateral última experimental y la obtenida mediante los métodos teóricos	307
Tabla IX.14. Resumen de la variables estadísticas obtenidas para la relación $V_{\max \text{ experimental}} / V_u \text{ teórico}$	307
Tabla IX.15. Valores obtenidos a nivel sección mediante el método simplificado y los obtenidos experimentalmente.	309
Tabla IX.16. Ecuaciones según el método simplificado utilizadas para el análisis a nivel elemento	312
Tabla IX.17. Comparacion entre el Método simplificado de Panagiotakos y Fardis y el de idealización mediante el método aproximado	313
Tabla IX.18. Comparacion entre el método simplificado de Panagiotakos y Fardis y el de idealización mediante el método del Eurocódigo 8	313

Tabla IX.19. Comparacion entre el método simplificado del Eurocódigo 8 y el de idealización mediante el método aproximado.....313

Tabla IX.20. Comparacion entre los métodos simplificado y de idealización del Eurocódigo 8.....314

CAPÍTULO I

Introducción



I.1. Motivación de la investigación

El sismo es un fenómeno natural que por su gran poder devastador siempre ha preocupado a la humanidad. Cuando se produce un episodio sísmico se generan vibraciones en el terreno, que transmiten a las estructuras unas fuerzas horizontales y, por ende, a los elementos que las componen, dando lugar a esfuerzos que pueden alcanzar el agotamiento de las mismas. Un correcto diseño sísmico permite garantizar que la estructura no colapse, intentando evitar pérdidas de vidas humanas y disminuir el impacto económico producido por el siniestro.

En las últimas décadas han ocurrido importantes episodios sísmicos como son los de Nepal (2015), China (2014), Filipinas (2013), Pakistán (2013), Irán (2012), Turquía (2011), Japón (2011), Lorca (2011), Haití (2010), China (2008), entre otros. Esto ha llevado a la comunidad científica a incrementar su interés en el estudio y mejora de los diseños sísmicos actuales, así como de la optimización y prestaciones de los materiales utilizados en las construcciones en zona sísmica.

Así, en ICITECH-UPV se han desarrollado diversas líneas de investigación en este ámbito que, enmarcadas en el Plan Nacional de I+D+I, han dado como principales resultados dos tesis doctorales: “Estudio experimental y numérico de la capacidad de deformación de soportes esbeltos de hormigón armado” realizada por Ángela Barrera en 2012, y “Estudio teórico-experimental de soportes esbeltos de hormigón armado con fibras de acero sometidos a compresión y carga lateral cíclica” presentada por Karen Caballero en 2015.

Las principales aportaciones de dichas tesis doctorales se centran: en el primer caso, en proponer modelos simplificados para la evaluación de la capacidad de deformación de elementos de hormigón armado que puedan ser aplicados dentro de un amplio rango de parámetros de esbeltez, resistencia del hormigón, niveles de carga axial, y con diferentes grados de confinamiento; en el segundo caso evaluar la capacidad de deformación de soportes de hormigón armado con fibras de acero sometidos a compresión y carga lateral cíclica dentro de un amplio rango de parámetros. En ambos casos se realiza mediante el desarrollo y análisis de una campaña experimental y una campaña numérica para la simulación del comportamiento de soportes de hormigón armado

Atendiendo a las futuras líneas de investigación apuntadas en ambos trabajos, se constata que:

- a) Los métodos existentes en la bibliografía y en las actuales normas, para evaluar la capacidad de deformación de elementos de hormigón sometidos a compresión y flexión monotónica o cíclica, no son válidos para cierto rango de parámetros, como son los soportes esbeltos ($\lambda_v > 6$), con moderados y altos niveles de carga axial, en los cuales los efectos de segundo orden no pueden ser despreciados. Por consiguiente, es conveniente llevar a cabo nuevos estudios centrados en elementos sometidos a compresión y flexión cíclica, con el propósito de estudiar su comportamiento deformacional y proponer nuevos métodos aplicados a soportes esbeltos. Dichos estudios también podrían ser extensivos a otro tipo de materiales que carecen de comprobación experimental, como por ejemplo el hormigón con fibras.
- b) Sería asimismo interesante realizar un estudio teórico-experimental de soportes fabricados con hormigón reforzado con fibras de acero sometidos a cargas laterales cíclicas. Las fibras de acero pueden servir para sustituir la armadura transversal y mejorar la fabricación de soportes sometidos a niveles altos de axial, en donde las

normas de diseño requieren de una gran cuantía de armadura transversal con el objeto de asegurar un determinado nivel de ductilidad requerida.

- c) Quedan varios aspectos por analizar, como el pandeo de la armadura longitudinal, el detalle de anclaje de la armadura transversal, la efectividad del confinamiento del hormigón, la determinación de la longitud de la rótula plástica, etc.

A ello hay que añadir que, según Walraven (2009) [119], se carece de información experimental sobre el comportamiento de soportes esbeltos fabricados con hormigones de resistencias a compresión (f_c) en el rango de 100-150 MPa, el conocido *Very High Strength Concrete*, pues las investigaciones se han centrado en hormigones convencionales ($f_c < 50$ MPa), en hormigones de alta resistencia ($f_c < 100$ MPa) y en hormigones de UHPC ($f_c > 150$ MPa).

Por consiguiente, se justifica seguir investigando en este ámbito, enmarcándose la finalidad de esta tesis doctoral en el seno del Proyecto de Investigación del Plan Nacional de I+D+I BIA 2012-32645, titulado “Estrategias de mejora de la ductilidad frente a acciones sísmicas de uniones de elementos prefabricados mediante el empleo de nuevos materiales”, de acuerdo al objetivo general que se describe seguidamente.

1.2. Objetivo general

En coherencia con el apartado anterior, el objetivo de la presente tesis doctoral es contribuir al conocimiento del comportamiento de soportes de hormigón armado con fibras de acero y resistencias a compresión en el rango de 100-150 MPa sometidos a compresión y carga lateral cíclica.

Para ello se plantea un estudio experimental sobre elementos que simulan uniones soporte-viga, considerando para su análisis diversos parámetros y métodos descritos en la literatura científico-técnica y en la normativa, tanto a nivel fibra como a nivel sección y a nivel elemento.

1.3. Estructura del documento

La tesis se estructura en diez capítulos, correspondiendo el Capítulo I a la introducción.

El Capítulo II aborda el análisis del estado del conocimiento. Presenta una revisión de las investigaciones experimentales en el campo de la ductilidad estructural, en concreto las que atañen a los hormigones de altas prestaciones. Así mismo, se relacionan métodos y normas existentes para poder evaluar los efectos del sismo y verificar el correcto comportamiento estructural.

El Capítulo III justifica la importancia de la investigación y plantea los objetivos específicos a alcanzar en el desarrollo del presente trabajo.

En el Capítulo IV se recopilan las variables planteadas y la definición de los rangos de variación de los parámetros estudiados, así como la programación experimental a realizar. También se tratan los materiales con los que se han fabricado los distintos elementos ensayados, así como la caracterización de los mismos.

El Capítulo V recopila la información del desarrollo del ensayo de los soportes y describe el procedimiento de ensayo y los sistemas utilizados, así como todo lo relativo al proceso de fabricación, la instrumentación y la operatividad del ensayo.

En el Capítulo VI se muestra la presentación de los resultados obtenidos para cada elemento ilustrándolos con ejemplos.

El Capítulo VII se dedica a observaciones experimentales directamente recogidas en fase de realización y finalización del ensayo de los soportes.

En el Capítulo VIII se realiza el análisis de los resultados obtenidos experimentalmente, identificando el modo de fallo, evaluando la capacidad resistente y deformacional del soporte, y determinando la rigidez elástica del mismo y la longitud efectiva de la rótula plástica obtenida.

En el Capítulo IX se aborda el análisis tras realizar una comprobación estructural mediante modelos de cálculo numéricos y métodos simplificados existentes en la bibliografía tanto a nivel resistente como deformacional.

La tesis concluye con el Capítulo X que sintetiza las aportaciones fundamentales del trabajo y establece las líneas futuras de investigación que se derivan de éste.

Finalmente, se aporta el listado de referencias utilizadas y diversos anejos con información complementaria.

CAPÍTULO II

Estado actual del conocimiento

En las últimas décadas han ocurrido importantes episodios sísmicos que han llevado a la comunidad científica a incrementar su interés en el estudio y mejora de los diseños sísmicos actuales, así como de la optimización y prestaciones de los materiales utilizados en las construcciones en zona sísmica.

En este capítulo se presenta una revisión de las investigaciones experimentales en el campo de la ductilidad estructural, en concreto las que atañen a los hormigones de altas prestaciones. Asimismo, se relacionan métodos y normas existentes que permiten evaluar los efectos del sismo y verificar el correcto comportamiento estructural.

II.1. Introducción

La capacidad de las estructuras aperticadas de hormigón para resistir fuertes sismos depende principalmente de la formación de rótulas plásticas y su capacidad de absorber y disipar la energía sin significantes pérdidas de resistencia. Este es el motivo por el que la mayoría de los códigos tratan de asegurar la formación de rótulas plásticas en las vigas antes que en los soportes para garantizar la estabilidad de la estructura, lo que se conoce como “columna fuerte, viga débil”. Sin embargo, como indica el ACI 441R-96 (1997) [62], la experiencia de los últimos terremotos muestra la formación de rótulas plásticas en soportes de entramados localizadas en las conexiones soporte-viga o soporte-cimentación (Cai et al. (2012) [29]). Un ejemplo de ello se puede ver en la Figura II.1. Por otro lado los puentes en los que se desee un comportamiento dúctil se debe proyectar de forma que las rótulas plásticas aparezcan en las pilas, siempre y cuando el elemento de sustentación del tablero, pila o estribo, no esté conectado al mismo mediante apoyos elastoméricos o deslizantes, es decir, que esté empotrado o articulado al mismo, tal y como se apunta en la normativa NCSP-07 (2008) [115] y EC8 en su parte 2 dedicada a Puentes (2012) [40].



Figura II.1 Terremoto en Wenchuan (China) en el año 2008. Rótula plástica en soporte. Edificio colapsado en su base. Cai et al. (2012) [29]

En las distintas normativas, EHE-08 (2011) [35], EC-8 (Parte 2) (2012) [40] y NCSP-07 (2008) [115], se contempla una cuantía geométrica de armadura transversal a disponer en las zonas críticas susceptibles de albergar la rótula plástica para asegurar un comportamiento dúctil de los soportes. En general, la cuantía de armadura dispuesta es proporcional a la resistencia del hormigón y al nivel de axil aplicado, y, entre otros parámetros, inversamente proporcional al límite elástico del acero.

No obstante, como se corrobora en la bibliografía consultada, existen otras opciones para mejorar la ductilidad. Por ejemplo, mejorar el comportamiento dúctil del hormigón, ya sea agregando fibras de aceros o polímeros en la masa de hormigón, en la zona crítica o en todo el soporte (Paultre et al. (2001) [96]). Otras opciones consisten en emplear un hormigón autocompactante en todo el pilar (Chien Hun et al. (2006) [76]), o bien en sustituir el hormigón de la zona crítica por un hormigón de altas prestaciones o ultra alta resistencia (UHPC), (Fischer et al. (2002) [59]). Otras iniciativas son modificar la disposición de la armadura transversal en secciones rectangulares mediante cercos curvilíneos en espiral, mejorando la efectividad del confinamiento (Yin (2011) [122]), confinar el hormigón mediante mallas (Hadi y Zhao (2011) [63]), o substituir en las zonas críticas las armaduras pasivas longitudinales por barras de aleación superelásticas con memoria de forma (Saiidi (2009) [109]).

Con todo ello, el objeto de este capítulo es elaborar y analizar el estado actual del conocimiento con respecto a la mejora de la ductilidad, empleando la estrategia, comentada previamente, de utilizar hormigones de altas prestaciones en uniones soporte-viga, tanto en su totalidad como en la zona susceptible de aparición de la rótula plástica en el soporte.

II.2. Fuentes

El número de publicaciones referentes a cuestiones relacionadas con la ductilidad, así como con la mejora de las prestaciones resistentes del hormigón, ha ido creciendo de forma notable en los últimos años conforme ha ido evolucionando el estado del conocimiento al respecto.

A modo de ejemplo, si se buscan en la base de datos *Web of Science* [54] publicaciones con el descriptor genérico *Ductility* y la restricción *Concrete*, o *Very High Strength Concrete* (Figura II.2) y la restricción *Column* (Figura II.3), e incluso si se hace una búsqueda juntando todas la opciones (Figura II.4), se observa la evolución que ha tenido este tipo de referencias en los últimos 20 años.

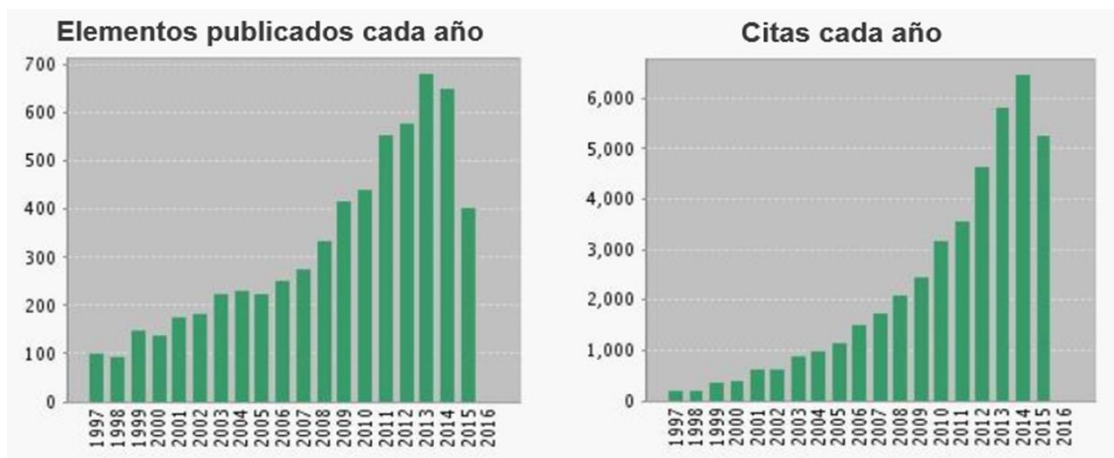


Figura II.2 Publicaciones con el descriptor *Ductility* y la restricción *Concrete* en la *Web of Science* [54]

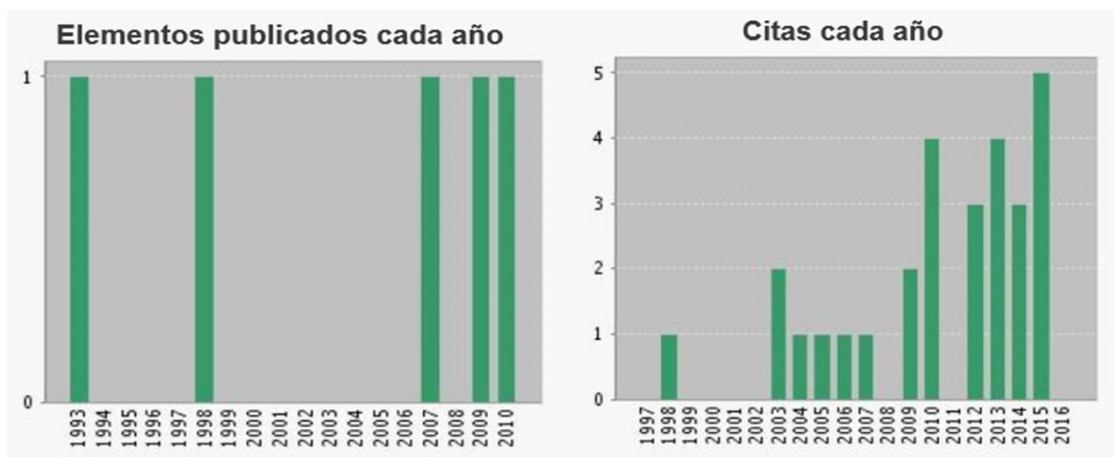


Figura II.3 Publicaciones con el descriptor *Very High Strength Concrete* y la restricción *Column* en la *Web of Science* [54]

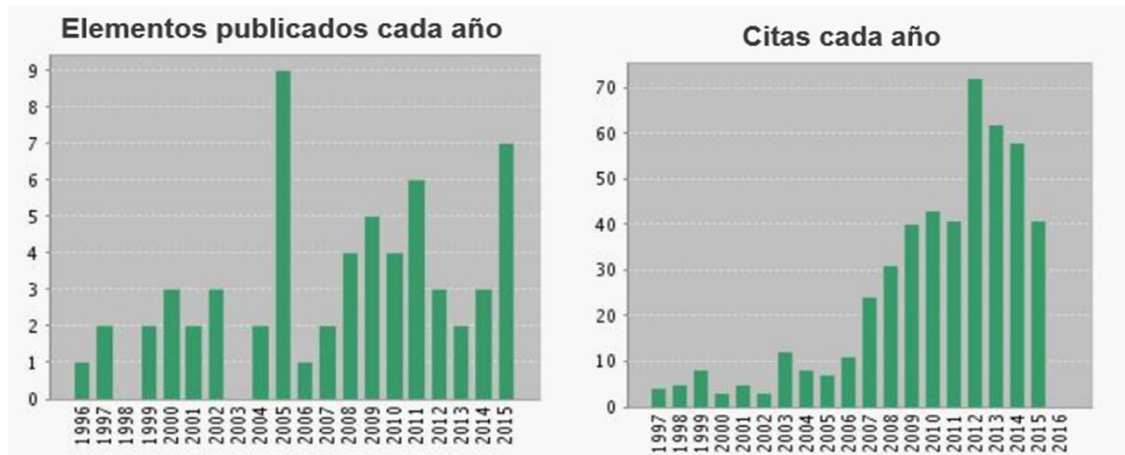


Figura II.4 Publicaciones con el descriptor Very High Strength Concrete, Ductility y Column en la Web of Science [54]

En un primer acercamiento al tema ya se puede apreciar el repunte del interés sobre estos temas en los últimos diez años. Otro aspecto que llama la atención es lo poco trabajado que está el caso de los hormigones cuya resistencia se encuentra entre un valor convencional o de alta resistencia (hasta 100 MPa) y un valor extremo que les lleva a alcanzar resistencias muy elevadas, por encima de 150 MPa, *Ultra High Concrete*. Existe pues, un tramo de resistencias entre 100 y 150 MPa, que correspondería a los conocidos en la literatura científico-técnica como hormigón de altas prestaciones o *Very High Strength Concrete*, en el que claramente hay un vacío investigador (Figura II.3).

Es por ello que la revisión del estado del conocimiento efectuada en esta tesis doctoral se ha centrado sobre todo en los hormigones que se corresponden con el tramo comprendido entre 100 y 150 MPa, por su previsible interés y la poca existencia de trabajos publicados. Se realizará una búsqueda tanto a nivel de caracterización y prestaciones del material como a nivel de comportamiento estructural.

La revisión de referencias se ha realizado básicamente a través de repositorios de Internet. En concreto, se ha utilizado la herramienta *Polibuscador* desarrollada por la Biblioteca General de la Universitat Politècnica de València, que ha permitido el acceso electrónico directo a las referencias buscadas. Cuando esto no ha sido posible, se ha recurrido al servicio de préstamo interbibliotecario e incluso, en algunos casos, al contacto directo con los autores.

En la Figura II.5 se representa el país de origen de las publicaciones estudiadas, entendiendo como tal el de la universidad, centro o institución de adscripción del primer autor de la referencia. Al existir muy pocas referencias se encuentran muy distribuidas a lo largo del mundo; ahora bien, China y Canadá, seguidos muy de cerca por Estados Unidos, Nueva Zelanda y Grecia son los países donde se está siendo pionero en la materia.

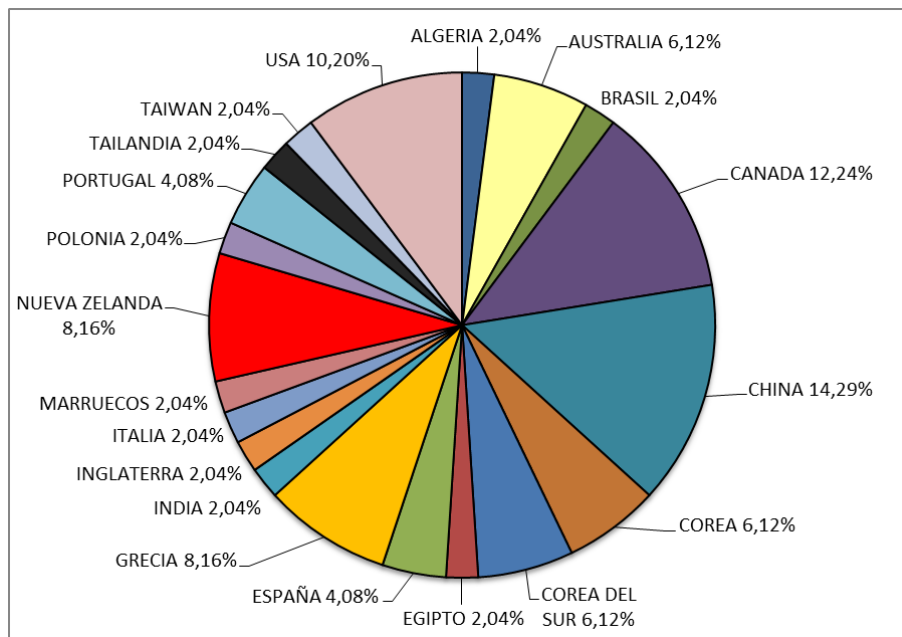


Figura II.5 Procedencia de las referencias consultadas (Figura II.3)

Otra cuestión interesante en cuanto a las referencias es el año de publicación de las mismas. Las más antiguas datan del comienzo de la década de los 90 y cabe destacar que la mayoría de las referencias se concentran en los últimos 10 años (Figura II.6).

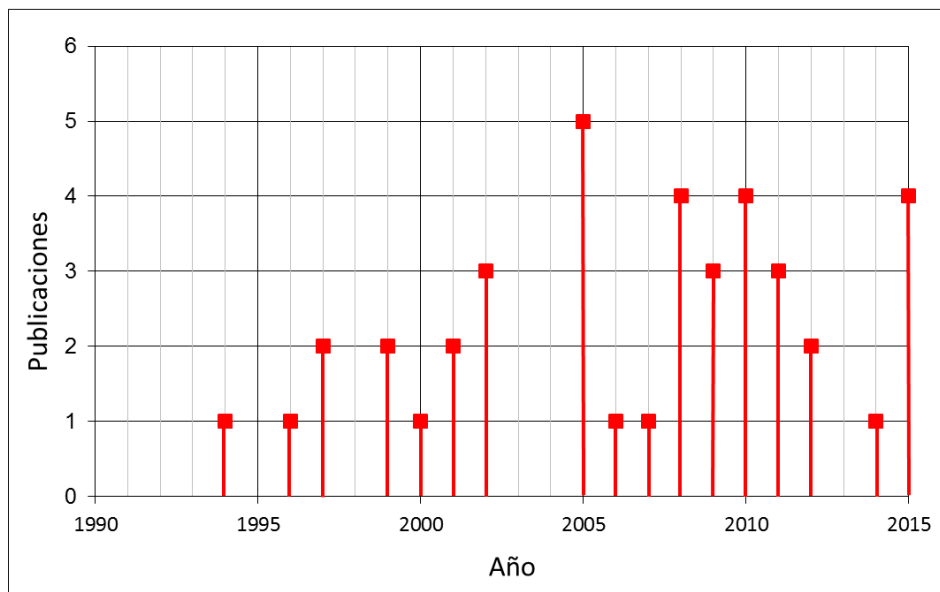


Figura II.6 Año de publicación de las referencias consultadas (Figura II.3)

II.3. Hormigón armado de altas prestaciones

II.3.1. Consideraciones generales

Se entiende por hormigón de altas prestaciones aquel que mejora su comportamiento frente a diferentes propiedades con respecto al hormigón convencional. Para ello incorporan en su dosificación aditivos que le proporcionan unas características que lo diferencian del resto de hormigones. Estas mejoras principalmente son, en estado endurecido, el incremento de la resistencia a compresión, a flexión y a tracción, así como una mayor durabilidad y ductilidad del elemento ejecutado; en fresco, el material presenta una mejor trabajabilidad con la consiguiente mejora y facilidad de puesta en obra.

El desarrollo de este material comenzó en los años 90, aunque se han necesitado dos décadas para que la comunidad científica muestre las ventajas de este tipo de material (Walraven (2009) [119]). En la Figura II.7 se ilustra la cronología de los principales hitos de la historia del cemento y del hormigón hasta la aparición del UHPC, recogida por Spasojevic (2008) [114] en su tesis doctoral.

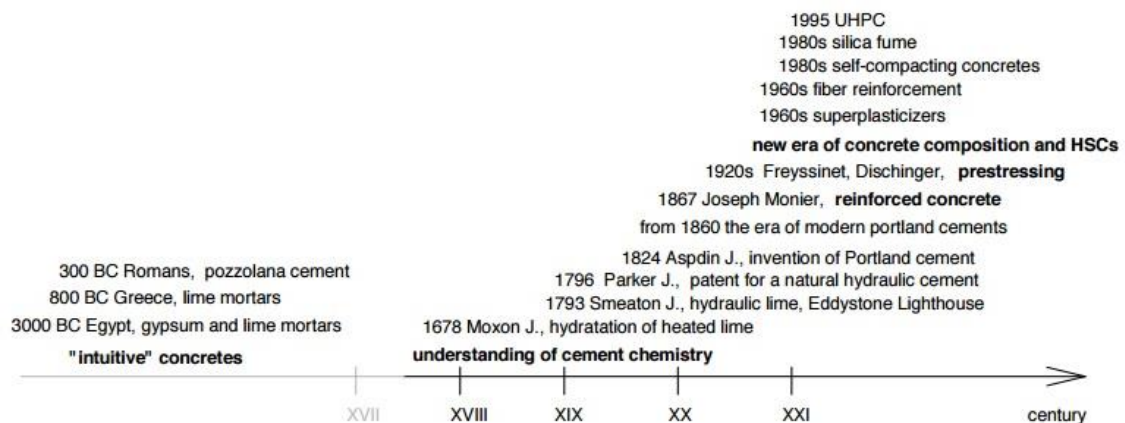


Figura II.7 Breve historia del cemento y del hormigón hasta el UHPC, Spasojevic (2008) [114]

Existe una gran variedad de hormigones que pueden ser identificados con el calificativo de "altas prestaciones", y cuyas denominaciones son bastante confusas. En el año 2006 la Japan Society of Civil Engineers (2008) [49], en concreto la comisión del hormigón, redactó unas recomendaciones para el diseño y construcción de los HPRCC donde se recoge un diagrama (Figura II.8) en el que se clasifica, de una forma clara y sencilla, tanto por sus características resistentes como de su ductilidad, las distintas familias de hormigones con fibras abarcando resistencias a compresión entre 30 y 250 MPa.

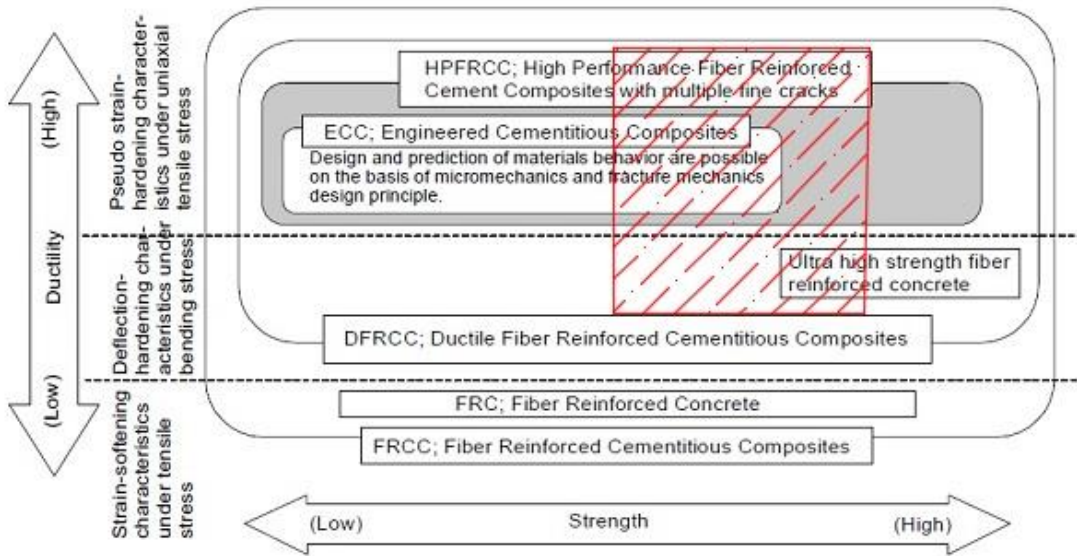


Figura II.8 Familias de hormigones con fibras. Características resistentes y de ductilidad, Japan Society of Civil Engineers (2008) [49]

En general, los hormigones que superan una resistencia a compresión de 100 MPa son materiales compuestos por una matriz de cemento reforzada con fibras cortas y otros componentes (como aditivos de altas prestaciones), lo que les permite alcanzar una alta ductilidad y presentar un cierto endurecimiento en deformaciones frente a esfuerzos de tracción uniaxial. Pero también se da el caso de hormigones en los que no se consigue la rama de endurecimiento frente a esfuerzos de tracción, aunque muestran una mejora de comportamiento a flexotracción, presentando un aumento de sus características de endurecimiento flexión-deformación. En la Figura II.9 se puede observar el comportamiento a tracción directa de este tipo de material, donde se ilustran tanto los casos que poseen rama de endurecimiento como los que no.

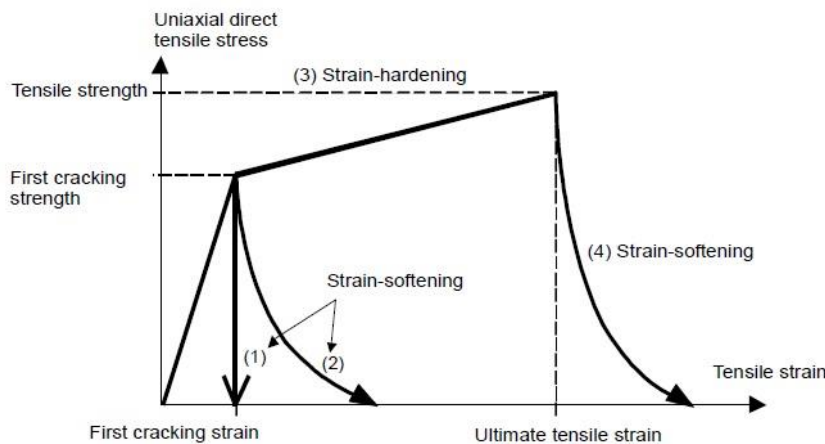


Figura II.9 Tracción directa. Diagrama tensión-deformación característicos para hormigones con $f_c > 100$ MPa, Japan Society of Civil Engineers (2008) [49]

Como apuntan López (2012) [77] y Walraven (2009) [119], los hormigones que tienen resistencias a compresión entre 110 y 150 MPa, los denominados DFRCC, VHPFRC o HPFRC

(Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites, Very/High Performance Fiber Reinforced Concrete), en general, no han sido objeto principal de los grupos de investigación a nivel mundial, a diferencia del gran interés despertado en su momento por los hormigones de resistencias hasta 100 MPa y los que superan los valores de 150 MPa.

La gran diferencia entre los hormigones de 100-150 MPa de resistencia a compresión con los hormigones que alcanzan mayores resistencias (los UHPFRC, Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete) es que los primeros pueden ser fabricados con medios, procesos y componentes accesibles y comunes en las empresas del ramo, sin necesidad de una gran adaptación tecnológica, facilitando la ejecución, y resultando claramente mucho más económicos que los UHPFRC. Por tanto, estos hormigones ofrecen un campo muy interesante de posibilidades ya que alcanzan resistencias a flexión y a compresión más que óptimas para las exigencias reales de la estructura y resultan más que recomendables teniendo en cuenta el peso, la durabilidad, la resistencia a la abrasión, y el coste (Walraven (2009) [119]).

Revisando la bibliografía existente hasta la fecha, se constata que existe un vacío en las normativas y guías de diseño para el hormigón cuya resistencia a compresión se encuentra entre los que superan los 100 MPa y los que no llegan a los 150 MPa (los que se han definido previamente como VHPFRC o HPFRC). La normativa internacionalmente aceptada no incluye directamente ningún hormigón por encima de los 100 MPa, y con respecto a los hormigones de UHPFRC (> 150 MPa), actualmente sólo existen unas escasas recomendaciones internacionales, de las que cabe destacar las redactadas por el SETRA-AFGC de Francia [4], por ser las que ofrecen los criterios más actualizados (última publicación del 2013), y además de dominio público. Con respecto a la normativa consultada, ACI 318 (2014) [1], EHE-08 (2011) [35], Código Modelo 2010 (2013) [55], Eurocódigo 2 (2013) [41] y Eurocódigo 8 (2010) [37], cabe destacar que sólo el Código Modelo ofrece unos criterios generales para caracterizar el hormigón con fibras sin limitación de la resistencia a compresión, añadiendo una clasificación del comportamiento en varias clases en función de la resistencia residual a tracción en condiciones de servicio y de rotura.

II.3.2. Comportamiento mecánico del hormigón de altas prestaciones

Numerosas investigaciones han demostrado la eficacia para mejorar el rendimiento estructural de los FRCC (Fiber Reinforced Concrete Composites), aumentando la ductilidad, la energía disipada y la tolerancia al daño cuando están sometidos a cargas cíclicas.

En función del tipo de fibra empleado existen distintos tipos de FRCC según que el refuerzo sea de acero, de vidrio, polimérico o de carbono. Evidentemente, según el tipo elegido, el comportamiento del FRCC es diferente (Parra (2005) [94]). En la Figura II.10 se pueden observar las curvas tensión-deformación de compresión para hormigones reforzados con fibras de distintos tipos.

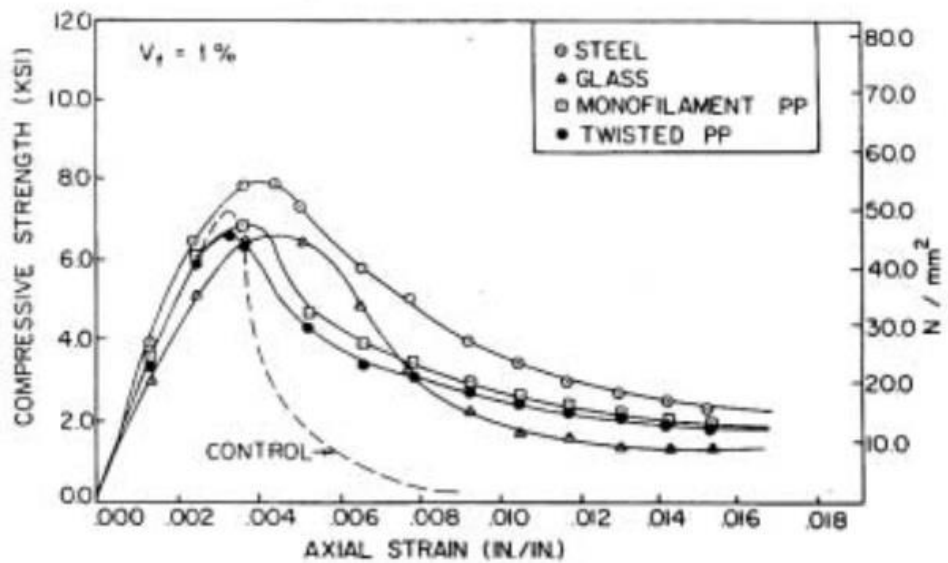


Figura II.10 Curva Tensión-Deformación de compresión de morteros reforzados con distintos tipos de fibras, Liao (2006) [75]

Naaman et al. (2007) [84] propusieron una nueva clase de FRCC, el HPRCC (High Performance Fiber Reinforced Cement Composites), con un alto rendimiento a tracción frente a los hormigones tradicionales de FRCC. En la Figura II.11 se muestra la clasificación realizada por estos autores.

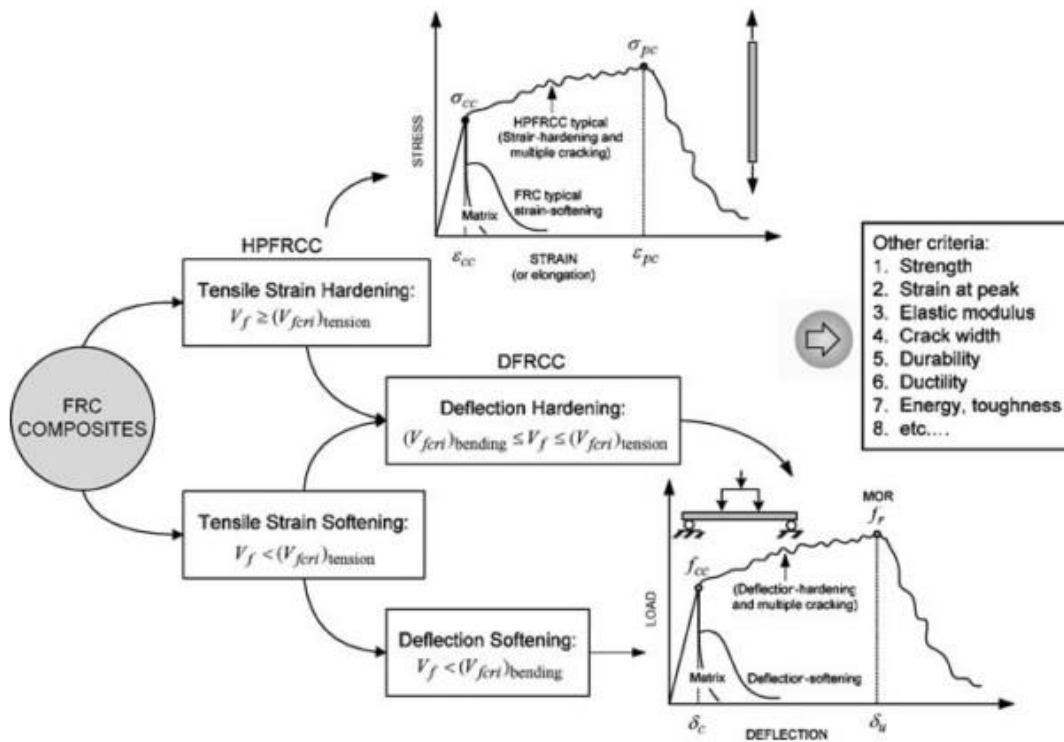


Figura II.11 Clasificación de los FRCC en base a la respuesta tensión de tracción-deformación, Naaman et al. (2007) [84]

Los HPFRCC muestran una mayor capacidad de resistencia y deformación en comparación con los FRCC tradicionales, lo que hace que este material (HPFRCC) resulte óptimo para su uso en estructuras con grandes necesidades de deformación inelástica, como lo son aquellas con necesidad de resistir terremotos, por su buen comportamiento sísmico.

Como contrapartida, a parte del alto coste del material, tiene una gran dificultad en su ejecución y puesta en obra, encareciendo y complicando su uso. Es por ello que, desde hace tiempo, se están desarrollando investigaciones en todo el mundo con el objetivo de minimizar esos inconvenientes.

Comparado con el hormigón convencional, el VHPFRC posee una mayor resistencia y rigidez debido a una microestructura más densa. Además, por el hecho de contener fibras en su matriz se mejora su comportamiento, que como es bien sabido, si la mezcla no las incluyese, el material incrementaría su fragilidad a la vez que aumenta su resistencia. Por tanto, es interesante hacer una reflexión sobre cómo influye la adición de las fibras en las propiedades mecánicas del material.

Los VHPFRC son hormigones de altas prestaciones cuyas propiedades mecánicas se encuentran en un rango intermedio entre las convencionales del FRC y el UHPFRC. Resumiéndose a continuación las características mecánicas del material:

Resistencia a Compresión

La resistencia a compresión y su curva tensión-deformación adopta valores muy distintos dependiendo no sólo de la dosificación, sino también del porcentaje de fibras así como del tratamiento seguido en su proceso de curado. La rama elástica se mantiene invariable hasta un determinado nivel de carga. A partir de la superación del valor post-pico, la rama de descenso puede sufrir una caída muy drástica o bien puede proporcionar una mayor deformación del material, según el hormigón tenga mejores prestaciones o no. En la Figura II.12 se recoge un diagrama tensión-deformación, recopilado por Spasojevic (2008) [114], comparativo de las distintas investigaciones realizadas a lo largo del tiempo sobre esta característica del material.

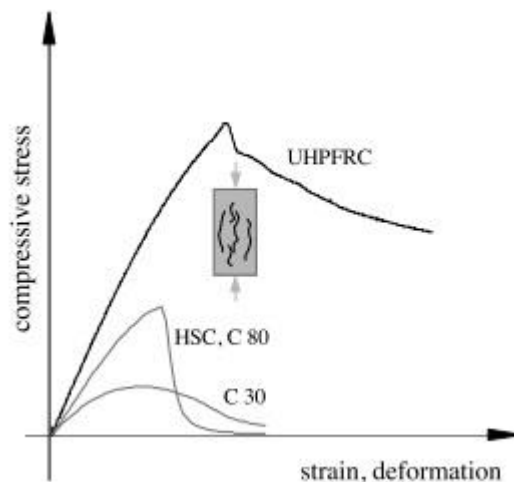


Figura II.12 Comparación de los diagramas tensión de compresión-deformación de los distintos tipos de hormigón, el convencional (C), el de alta resistencia (HSC) y el de ultra alta (UHPFRC), Spasojevic (2008) [114]

Por tanto, en general, se observa que la adición de fibras mejora el comportamiento en la rama de descenso. Ahora bien, esta rama de descenso se ve influenciada por el contenido de fibras, la geometría de las mismas, la orientación, la adherencia entre las fibras, la matriz cementante y la rigidez de las fibras, especialmente cuando se trata de hormigones híbridos con mezclas de distintos tipos de fibras. A nivel de puesta en obra, es importante recalcar que, así como en el amasado la orientación de las fibras se alinea con la dirección del flujo, a la hora de verterlo dentro del encofrado, la dirección de vertido condicionará la orientación de las mismas en la matriz del hormigón.

Respecto de la cantidad de fibras en la matriz del material y la resistencia del hormigón, recapitulando de la bibliografía consultada, se observa que, por encima de un 2 % de volumen, el contenido de fibras no resulta relevante en la resistencia a compresión.

Como resumen de lo visto sobre la resistencia a compresión de este material, es esperable un diagrama tensión-deformación como el mostrado en la Figura II.13.

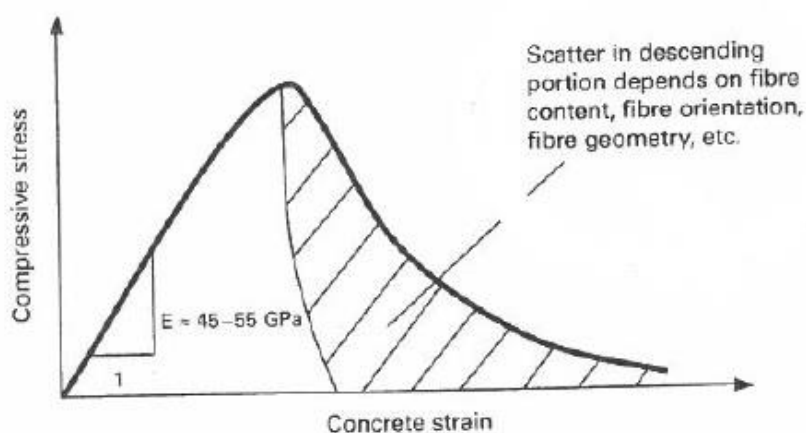


Figura II.13 Esquema del Diagrama Tensión de Compresión -Deformación, Fehling et al. (2014) [58]

Resistencia a Tracción

Siguiendo el trabajo recopilado por Spasojevic (2008) [114] el comportamiento tensión de tracción directa-deformación de los diferentes tipos de hormigón se muestra en la Figura II.14.

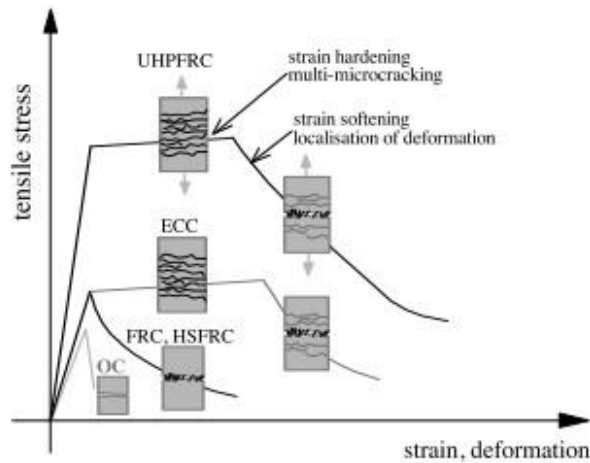


Figura II.14 Comparativa para distintos tipos de hormigón de los diagramas tensión de tracción-deformación, Spasojevic (2008) [114]

Se observa que una de las prestaciones alcanzadas con este tipo de hormigones no es sólo un aumento de la resistencia a tracción del material, sino un mayor incremento de la fisuración, produciéndose una multifisuración, y una vez superada la rama elástica del comportamiento del material se consigue una rama de endurecimiento donde se incrementan las deformaciones a un mismo nivel de tensión, con las correspondientes ventajas que aporta al comportamiento plástico del material.

Resistencia a Flexión

Realizando ensayos de tipo convencional de flexión (ensayos a tres puntos), este material en general presenta un comportamiento similar al recogido por Spasojevic (2008) [114], mostrado en la Figura II.15.

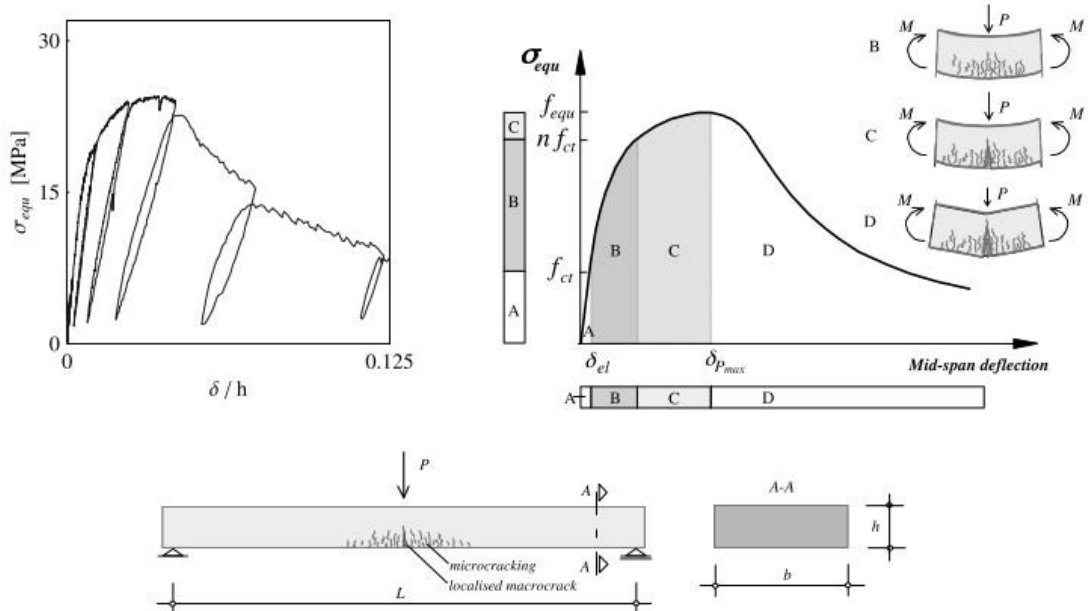


Figura II.15 Ensayo de flexión realizado a 3 puntos desarrollado por Spasojevic (2008) [114]

Se observa un comportamiento elástico, seguido de un comportamiento no-lineal con un desarrollo de microfisuración; una vez alcanzada la deformación de la máxima tensión, se genera una macrofisura en la sección crítica.

El comportamiento en la zona "C" y "D" depende del tipo y porcentaje de fibras utilizado en la dosificación del material. López (2012) [77] hace una reflexión de cómo actúan las distintas clases de fibras metálicas en las distintas zonas de comportamiento del material, concluyendo que la solución del hormigón híbrido es la opción más idónea para muchos casos en la práctica ingenieril, por su mayor control en el proceso de fisuración y mayor ductilidad, aunque puede tener el inconveniente de disminuir la trabajabilidad. Como ventaja de ejecución, el autor hace referencia a la escasa segregación comparada con la facilidad de que se produzca si sólo se emplea en la mezcla fibras largas; por tanto, será de especial atención su fabricación y puesta en obra.

II.4. Ductilidad en uniones soporte-viga

La capacidad de las estructuras aporricadas de hormigón para resistir fuertes sismos depende principalmente de la formación de rótulas plásticas en las zonas críticas y su capacidad de absorber y disipar la energía sin significantes pérdidas de resistencia, lo que se conoce como ductilidad.

Para conseguir esta respuesta en el elemento estructural es fundamental, entre otros factores, un adecuado diseño estructural que permita un buen comportamiento sin llegar al colapso. Para garantizar la estabilidad de la estructura se debe asegurar la formación de rótulas plásticas en determinadas zonas de la estructura. En la mayoría de los códigos existentes la formación de las rótulas plásticas se busca en las vigas antes que en los soportes, pero como se ha comentado previamente, la experiencia de los últimos terremotos muestra la formación de rótulas plásticas en los soportes.

II.4.1. Fundamentos relativos a la capacidad de deformación

Según el Anejo 10 de la EHE-08 (2011) [35] se define la ductilidad como "la capacidad de los materiales y las estructuras de deformarse en rango no-lineal sin sufrir una degradación sustancial de la capacidad resistente. Desde el punto de vista estructural se define como la relación entre la deformación última de rotura y la deformación plástica y puede ser referida a cualquier cantidad cinemática como lo son la deformación propiamente dicha, la ductilidad de las secciones, rotaciones o el desplazamiento de una estructura".

Existen varios índices de ductilidad que determinan la capacidad de deformación de los soportes de hormigón armado. Para poder definir estos índices es necesario conocer el diagrama idealizado del comportamiento resistente y deformacional.

Según el diagrama idealizado de respuesta utilizado se pueden obtener los índices de ductilidad a nivel sección, a nivel elemento o a nivel de la rótula plástica. Estos índices se conocen como ductilidad en curvatura (μ_ϕ), ductilidad en desplazamiento (μ_Δ) y los giros de la rótula (μ_θ), respectivamente. A continuación se definen esos índices.

A nivel sección

Los índices de deformación a nivel sección se obtienen a partir de la relación entre la curvatura última (ϕ_u) y la curvatura elástica efectiva (ϕ'_y); éstas se obtienen del diagrama idealizado bilineal a partir del diagrama real momento-curvatura.

$$(II.1) \quad \mu_\phi = \frac{\phi_u}{\phi'_y}$$

La ductilidad en curvatura define el comportamiento de la sección, y la curvatura plástica (ϕ_p) es la diferencia entre la curvatura última y la curvatura efectiva elástica.

$$(II.2) \quad \phi_p = \phi_u - \phi'_y$$

A nivel elemento

La capacidad de deformación a nivel elemento se mide a partir de dos variables: la ductilidad en desplazamiento y la deriva (también conocida como *chord rotation* o *drift*).

La ductilidad en desplazamiento es la relación entre el desplazamiento último y el desplazamiento efectivo elástico, y representa la ductilidad en toda la estructura. Por ello es el factor más comúnmente empleado en las normas de diseño sísmico.

$$(II.3) \quad \mu_\Delta = \frac{\Delta_u}{\Delta'_y}$$

La deriva, drift o *chord rotation* (θ) es un índice que mide la capacidad de deformación en elementos de hormigón armado y es utilizado en el análisis de estructuras para el diseño y comprobación sismorresistente. Se obtiene a partir de la relación entre el desplazamiento (Δ) y la distancia entre las secciones de momento máximo y nulo (L_s). Según el valor de desplazamiento seleccionado se puede obtener la deriva para el estado elástico o para el estado último.

$$(II.4) \quad \theta = \frac{\Delta}{L_s}$$

A nivel de la rótula plástica

Al acumularse grandes curvaturas alrededor de la sección de momento máximo se produce una rótula plástica. A la vez, en esa zona se desarrollan una serie de efectos no-lineales, como son la plastificación de la armadura, el pandeo o deslizamiento de la misma, la fisuración diagonal por cortante, la rotura del hormigón, etc.

El índice que define este comportamiento deformacional es la rotación de la rótula plástica (θ_p), y se obtiene a partir de las curvaturas última y elástica efectiva, y de la longitud equivalente (L_p) donde se concentran las curvaturas, conocida como longitud de plastificación o longitud de la rótula plástica.

$$(II.5) \quad \theta_p = (\phi_u - \phi'_y) \cdot L_p$$

Existen expresiones en la bibliografía que, teniendo en cuenta la longitud de la rótula plástica (L_p), relacionan la capacidad de deformación de la sección con la deformación del elemento. En concreto, para soportes Park y Paulay (1978) [93] proponen una expresión para obtener el

desplazamiento último (Δ_u) de un soporte en voladizo a partir de los índices de deformación a nivel sección y de la longitud de la rótula plástica (II.6).

$$(II.6) \quad \Delta_u = \Delta_y + \Delta_p = \frac{\phi_y \cdot L_s^2}{3} + (\phi_u - \phi_y) \cdot L_p \cdot (L_s - 0.5L_p)$$

Si se divide la expresión por Δ_y se obtiene el índice de ductilidad en desplazamientos (μ_Δ)

$$(II.7) \quad \mu_\Delta = 1 + 3(\mu_\phi - 1) \cdot \frac{L_p}{L_s} \cdot \left(1 - 0.5 \frac{L_p}{L_s}\right)$$

donde:

- Δ_u es el desplazamiento último
- Δ_y es el desplazamiento elástico efectivo
- Δ_p es el desplazamiento plástico ($\Delta_p = \Delta_u - \Delta_y$)
- ϕ_y es la curvatura elástica efectiva
- L_s es la distancia entre las secciones de momento máximo y nulo
- ϕ_u es la curvatura última
- L_p es la longitud de la rótula plástica
- μ_Δ es el índice de ductilidad en desplazamientos
- μ_ϕ es el índice de ductilidad en curvaturas

Bayrak (1998) [17] en su tesis doctoral representó (Figura II.16) la relación entre los índices de ductilidad a nivel sección frente a nivel elemento según la ecuación (II.7). Como apunta Bayrak, la relación depende de la esbeltez geométrica del soporte, del canto de su sección y de la longitud de la rótula plástica, sin considerar los efectos de segundo orden debidos a la actuación de la carga de axil de compresión en la posición deformada del soporte, ni las no-linealidades del material y geométricas del elemento, generando una expresión más compleja que la inicialmente planteada por Park y Paulay (1978) [93].

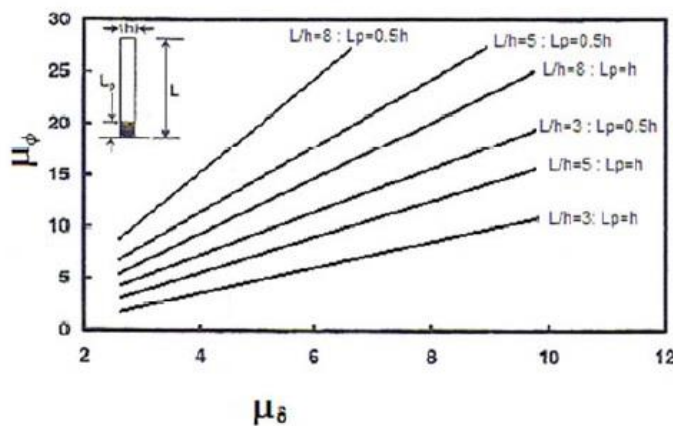


Figura II.16 Representación gráfica de los índices de ductilidad, Bayrak (1998) [17]

II.4.2. Parámetros que afectan a la capacidad de deformación

La ductilidad de los elementos de hormigón armado y, por tanto, su capacidad de deformación, se ve influenciada por distintos parámetros. En este apartado se hace una recapitulación de la bibliografía existente sobre estos parámetros, con el fin de que sirva para poder hacer un estudio adecuado de qué parámetros se deben considerar en el programa experimental a realizar en la presente tesis doctoral.

Esbeltez a cortante (λ_v)

En elementos esbeltos de hormigón, si la esbeltez es importante, antes de producirse el fallo por agotamiento del material se produce un fallo anticipado por la inestabilidad del soporte, de modo que la deformación del mismo se debe más a los efectos de la no-linealidad geométrica que a la no-linealidad de los materiales, lo que da lugar a un descenso brusco de la carga en el diagrama carga-desplazamiento, y por ende, a la disminución de la capacidad de deformación.

Hay numerosas publicaciones referentes al estudio de la capacidad resistente y de deformación de soportes sometidos a cargas cíclicas donde se estudia este parámetro (Berry (2004) [22], FIB Bulletin 25 (2003) [48]).

De acuerdo con Panagiotakos y Fardis (2001) [91], los soportes de hormigón armado ensayados experimentalmente tienen esbelteces a cortante inferiores a 6.5. Bae y Bayrak (2005) [12] y Caballero et al. (2015) [26] (2012) [27], demuestran que los efectos de segundo orden (efecto P- Δ) influyen en la capacidad de deformación de los soportes esbeltos. A pesar de ello, los trabajos experimentales de soportes con esbelteces superiores a 6.5 son escasos.

Nivel de axil de compresión (ν)

El nivel de axil de compresión es también un parámetro que da lugar a los efectos de segundo orden influyendo en la capacidad de deformación del elemento hasta el punto de poder provocar el fallo por inestabilidad antes de producirse el fallo por agotamiento del material. Además, a mayor nivel de axil, en flexo-compresión la ductilidad en curvaturas disminuye puesto que la rigidez elástica es mayor (menor curvatura elástica efectiva) y la deformación de la armadura más traccionada es menor en tanto que la deformación de la fibra más comprimida es mayor (menor curvatura última), por lo que la ductilidad en desplazamientos también se reduce con el nivel de axil. Al fallar por inestabilidad se produce de forma brusca la pérdida resistente y deformacional, afectando a la ductilidad. De hecho, a un mayor nivel de carga axil aplicada, la ductilidad del soporte disminuye.

El rango recogido por las normativas de construcción como la EHE-08 (2011) [35] y el ACI-318 (2014) [1] se encuentra entre 0.1 y 0.55. En el caso del Eurocódigo 8 (2011) [39] se indica que, si se diseña un soporte con ductilidad media (DCM), el nivel de axil reducido no debe exceder de 0.65; si el diseño es con ductilidad alta (DCH), ese valor se reduce a 0.55.

Resistencia del hormigón (f_c)

Este parámetro tiene una influencia muy importante en la ductilidad de los elementos estructurales en general, independientemente del nivel de carga axil aplicada; en los hormigones convencionales, a mayor resistencia a compresión del hormigón menor es la ductilidad. Sin embargo, los soportes fabricados con VHPRFC, dependiendo del porcentaje y distribución de las fibras que forman parte de su matriz, proporcionan una mayor ductilidad debida a la distribución de los esfuerzos internos. El diagrama de la Figura II.17, representado

por Fehling (2004) [57], muestra la variación del comportamiento tenso-deformacional en función de la cantidad de fibras y su orientación dentro de la masa de hormigón.

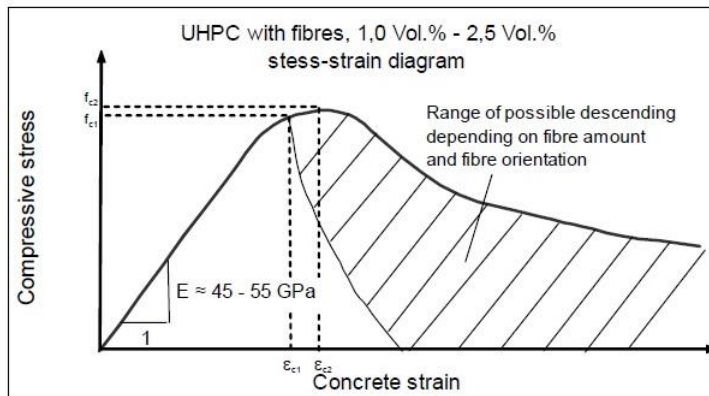


Figura II.17 Diagrama típico tensión de compresión-deformación de un UHPFRC Fehling (2004) [57]

La influencia de las características del hormigón no es independiente de la interacción con otras variables como son el nivel de carga axial, el confinamiento, el porcentaje y la distribución de las fibras en la masa de hormigón, la cuantía de armadura longitudinal y transversal, etc. La influencia de este parámetro es más clara en los elementos en los que se presenta un fallo por rotura del hormigón en compresión que en los que el fallo se produce por rotura de la armadura en tracción.

Volumen de fibras de la masa de hormigón

Como se ha constatado en el diagrama anterior, el porcentaje de fibras aportado a la masa del material, así como su orientación, pueden mejorar no sólo su resistencia a compresión sino también su ductilidad.

Ahora bien, adicionalmente a esa característica, se han realizado estudios respecto al diseño estructural con el objetivo de analizar una posible reducción de la cuantía de armadura transversal requerida por los códigos de diseño. En los últimos tiempos existen investigaciones al respecto, como son las de Hsu et al. (1995) [65], Foster (2001) [60], Aoude et al. (2009) [6], Campione et al. (2010) [31], Paultre et al. (2010) [95] y Caballero et al. (2015) [26] (2012) [27]. Éstas han demostrado cómo la presencia de fibras incrementa la capacidad de deformación y la ductilidad, y retrasan el salto del recubrimiento del hormigón, tanto en soportes sometidos a compresión simple como a esfuerzos combinados de axial y carga lateral cíclica.

Es importante resaltar que en las normas de diseño, EHE-08 [35], Eurocódigo 8 [37] y ACI 318 [1], no existen expresiones que incluyan el efecto favorable de las fibras de acero.

Cuantía de la armadura longitudinal (ρ_l) y transversal (ρ_{st})

Tal y como demostró Caballero et al. (2015) [26] (2012) [27], el aporte de fibras de acero aumenta la ductilidad del elemento. Dichas fibras mejoran el comportamiento post-pico del hormigón en compresión y en tracción.

Así, el aporte de fibras a la masa de hormigón puede ayudar a reducir la cuantía de armadura transversal, optimizándola, lo que puede resultar un aporte muy interesante que permitiría redefinir esa cuantía mínima recomendada por las normas de diseño sísmico existentes.

La cuantía de armadura longitudinal está directamente relacionada con el modo de fallo. Si la rotura se produce por tracción en la armadura, un aumento en su cuantía puede condicionar la ductilidad en la rotura, aumentando el desplazamiento último. Si, por el contrario, el modo de fallo es por compresiones, para una mayor cuantía, el desplazamiento último será menor, aumentando la profundidad de la fibra neutra.

II.4.3. Modelos para evaluar la capacidad de deformación

Para evaluar la capacidad de deformación existen diferentes modelos recogidos en la bibliografía. Estos modelos se pueden agrupar en tres grandes bloques (Barrera (2012) [15] (2012) [16]): los que son totalmente empíricos, los que evalúan la capacidad de deformación a partir de modelos analíticos simplificados, y los que lo hacen mediante modelos más complejos.

Los modelos analíticos más complejos no serán desarrollados en este apartado por no ser de aplicación en el trabajo desarrollado en esta tesis doctoral. Sin embargo, merece la pena destacar que tienen en cuenta los efectos no-lineales debidos por ejemplo a la fisuración, al confinamiento, al pandeo de la armadura longitudinal, la adherencia de ésta con la matriz de hormigón, etc. Existe una gran variedad de modelos analíticos que se centran en la simulación del comportamiento deformacional de los elementos tipo viga, con la evaluación de la rótula plástica como principal objetivo. Para elementos tipo soporte, existe un número mucho menor de modelos. Tanto unos como otros han sido recopilados por Barrera (2012) [15].

A continuación se resumen los modelos empíricos y analíticos simplificados más significativos.

II.4.3.1. Modelos empíricos

Dentro de este bloque se resumen dos modelos obtenidos exclusivamente a partir de los resultados de los ensayos experimentales realizados. Son los definidos por Panagiotakos y Fardis en 2001 [91] y Lam et al. en 2003 [72].

Modelo empírico de Panagiotakos y Fardis (2001) [91]

Formularon el modelo a partir de una extensa base de datos, recopilada por los autores, que incluyen diferentes tipos de elementos y geometrías estructurales (soportes, vigas, muros...) sometidos a flexión uniaxial bajo la actuación de carga monotónica o cíclica con existencia o no de carga axil.

Para poder evaluar la capacidad de deformación elástica y última de una estructura, a partir de los datos obtenidos plantean un método empírico que permite calcular la deriva (θ) mediante sencillas expresiones. Entendiendo como deriva (θ), *drift* o *chord rotation* la relación entre el máximo desplazamiento que muestra un elemento estructural en una distancia que hay desde la sección de momento máximo y la sección de momento nulo (II.8), Figura II.18.

$$(II.8) \quad \theta = \frac{\Delta}{L}$$

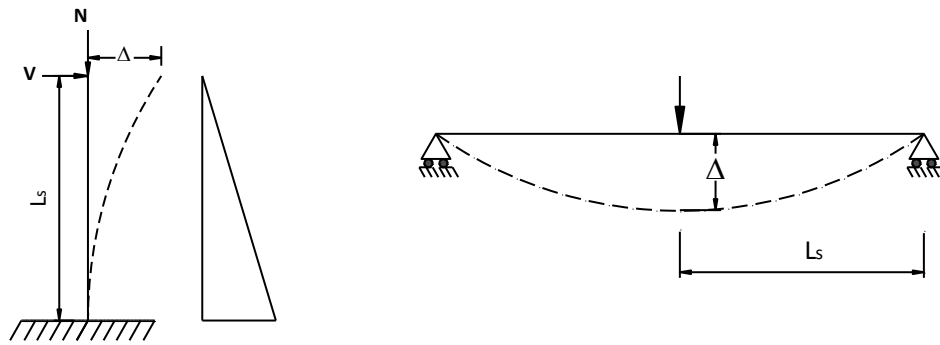


Figura II.18 Desplazamiento del elemento en la sección donde se obtiene la deriva

Proporcionan expresiones para obtener la deriva elástica (θ_y) y la última (θ_u). La primera es la que se produce cuando se alcanza la no-linealidad del elemento y, para obtener la última, la calibraron con los datos de rotura obtenidos de la base de datos recopilada, en la que en la mayoría de los ensayos se alcanzó cuando se produjo una caída del 15 % de la carga post-pico del diagrama carga-desplazamiento. En el año 2003, Fardis y Biskinis [53] rectifican la situación de rotura hasta el 20 % de caída de la rama post-pico.

Dentro de la normativa europea vigente, el Eurocódigo 8 ha incluido un modelo rectificado basado en el propuesto por estos autores.

Expresiones para obtener la deriva elástica (θ_y)

Se proponen dos ecuaciones, la primera es la inicialmente formulada por los autores y la segunda es la ajustada posteriormente con los ensayos experimentales realizados por Fardis y Biskinis [53]. En ambos casos son expresiones formadas por tres términos independientes. El primero de ellos se obtiene a partir de la deformación por flexión, sin incluir el efecto de segundo orden tipo P- Δ . El segundo término se ajusta en función de la fisuración diagonal por cortante del elemento para una flexión elástica. Y el último término incorpora el efecto de la rotación debida al deslizamiento de la armadura en la zona de anclaje en el extremo fijo del elemento.

Las ecuaciones propuestas son:

- En el año 2001, Panagiotakos y Fardis [91]

$$(II.9) \quad \theta_y = \phi_y \frac{L_s}{3} + 0.0025 + \alpha_{sl} \frac{0.25 \varepsilon_y d_b f_y}{(d-d') \sqrt{f_c}}$$

- En el año 2003, Fardis y Biskinis [53]

$$(II.10) \quad \theta_y = \phi_y \frac{L_s}{3} + 0.00275 + \alpha_{sl} \frac{0.2 \varepsilon_y d_b f_y}{(d-d') \sqrt{f_c}}$$

donde:

ϕ_y es la curvatura elástica

L_s es la distancia entre las secciones de momento máximo y nulo

α_{sl} es 1 si la armadura longitudinal desliza en la zona de anclaje, y 0 en caso contrario

ε_y es la deformación correspondiente al límite elástico del acero

d_b es el diámetro de la armadura longitudinal

f_y es el límite elástico del acero

f_c es la resistencia a compresión del hormigón

d es el canto útil de la sección con respecto a la armadura de tracción

d' es el recubrimiento mecánico de la armadura de compresión

Los valores de la curvatura elástica (θ_y) se obtienen a partir de la geometría de la sección y de las características del material que la conforman, el acero y el hormigón. El primer material que alcance el inicio de la no-linealidad definirá el valor de esta curvatura. En el caso del hormigón, la no-linealidad se producirá cuando se alcance la deformación límite del material en la fibra más comprimida de la sección, que en los modelos propuestos se ha supuesto para un valor del 90 % de la tensión pico (f_c). En el caso del acero, se considerará cuando en la armadura traccionada se alcance la deformación elástica del material (ε_y).

Expresiones para obtener la deriva última (θ_u)

A partir de la base de datos comentada previamente, se proponen distintas expresiones, incluyendo variables como el nivel de axil aplicado, la esbeltez a cortante, la resistencia del hormigón, las cuantías de las armaduras longitudinal y transversal, las características del acero, la adherencia de la armadura y el tipo de carga aplicada (si es cíclica o monotónica). En el caso de las expresiones propuestas por Panagiotakos y Fardis (2001) [91], se considera la rotura con el 15 % de caída de la rama post-pico de la carga, mientras que, en las ajustadas por Fardis y Biskinis (2003) [53] la rotura se produce al 20 % del mismo valor pico.

Por lo que pueda afectar al valor, cabe destacar que en caso de emplear estas expresiones para obtener el valor último, se ha de tener en cuenta que los datos incluidos en la base de datos son de muy diversos tipos de acero con distintas características de ductilidad, lo que puede influir bastante en la capacidad de deformación de los elementos de hormigón armado.

De todas las expresiones propuestas se van a seleccionar las que se refieren al tipo de carga cíclica y, en su defecto, a cíclica y monotónica.

Las ecuaciones propuestas son:

- En el año 2001, Panagiotakos y Fardis (2001) [91],
para ensayos bajo carga cíclica

$$(II.11) \quad \theta_u = \alpha_{st} \alpha_{cyc} \left[1 + \frac{\alpha_{sl}}{2} \right] (1 - 4\alpha_{wall}) (0.2)^v (f_c)^{0.175} \left(\frac{L_s}{h} \right)^{0.4} 1.1^{(100 \cdot \alpha \cdot k)} (1.3^{100 \rho_d})$$

para ensayos bajo carga monotónica y cíclica

$$(II.12) \quad \theta_u = \alpha_{st} \alpha_{cyc} \left[1 + \frac{\alpha_{sl}}{2.3} \right] \left(1 + \frac{\alpha_{wall}}{3} \right) (0.2)^v \left[\frac{\max(0.01, \omega')}{\max(0.01, \omega)} f_c \right]^{0.275} \left(\frac{L_s}{h} \right)^{0.45} 1.1^{(100 \alpha k)} (1.3^{100 \rho_d})$$

- En el año 2003, Fardis y Biskinis (2003) [53]
para ensayos bajo carga monotónica y cíclica

$$(II.13) \quad \theta_u = \alpha_{st} (1 - 0.4\alpha_{cyc}) [1 + 0.5\alpha_{cyc}] (0.3)^v \left[\frac{\max(0.01, \omega)}{\max(0.01, \omega)} f_c \right]^{0.175} \left(\frac{L_s}{h} \right)^{0.4} 25^{\alpha k} (1.25^{100\rho_d})$$

donde:

α_{st} es un factor que tiene en cuenta el tipo de acero

α_{cyc} es un factor que tiene en cuenta el tipo de carga, cíclica o monotónica

α_{sl} es 1 si la armadura longitudinal desliza en la zona de anclaje, y 0 en caso contrario

α_{wall} es 1 para elemento tipo muro y 0 para vigas y soportes

v es el nivel de axil reducido, $v=N/(A_g \cdot f_c)$

f_c es la resistencia a compresión del hormigón

f_y es el límite elástico del acero

L_s es la distancia entre las secciones de momento máximo y nulo

h es el canto de la sección

α es un factor de efectividad del confinamiento

ω es la cuantía mecánica de la armadura transversal, $\omega = \rho_{sk} \cdot f_y / f_c$

ρ_{sk} es la cuantía de la armadura transversal, paralela a la dirección de la carga, $\rho_{sk} = A_{sx} / (b_w \cdot s_h)$

b_w es el ancho del núcleo confinado del hormigón

s_h es la separación entre estribos

Modelo empírico de Lam et al. (2003) [72]

Estos investigadores proponen un modelo empírico a partir de 15 resultados experimentales en soportes de hormigón convencional sometidos a flexo-compresión bajo carga cíclica. Introducen un parámetro adimensional α para incluir la influencia debida a la esbeltez a cortante (λ_v), el nivel de axil reducido aplicado (v), la cuantía geométrica de la armadura transversal (ρ_s) y las propiedades mecánicas de los materiales que forman el elemento.

La ecuación propuesta es:

$$(II.14) \quad \frac{\theta_u}{100} = 0.564 + 8.489\alpha - 7.804\alpha^2$$

α es un factor adimensional que se obtiene a partir de, $\alpha = (1 + m)(1 - \sqrt{n}) \sqrt{\frac{\rho_s f_y h}{f_c}}$

donde:

m es la esbeltez a cortante ($\lambda_v = L_s/h$)

n es el nivel de axil reducido

ρ_s es la cuantía de la armadura transversal

f_{yh} es el límite elástico de la armadura transversal

f_c es la resistencia a compresión del hormigón

II.4.3.2. Modelos analíticos simplificados

A partir del modelo “soporte en voladizo” se proponen los siguientes métodos analíticos simplificados. Con ellos se puede evaluar el desplazamiento del extremo libre del soporte a partir de la distribución de curvaturas a flexión, en situación de carga elástica y última. Para ello se considera que la curvatura plástica se acumula en una longitud equivalente que correspondería a la longitud de la rótula plástica, o longitud de plastificación (L_p); fuera de esta longitud se asume un comportamiento elástico, como se muestra en la Figura II.19.

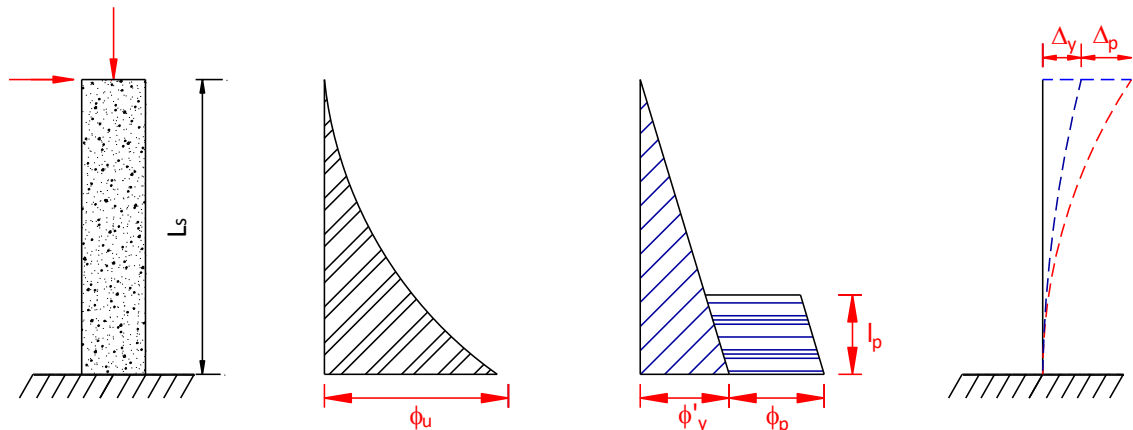


Figura II.19 Modelo de “soporte en voladizo”

Con este modelo se puede obtener el desplazamiento último a partir de la ecuación (II.15), donde si la longitud de la rótula plástica es conocida, puede obtenerse el desplazamiento en el extremo de la ménsula a partir de la integración de las curvaturas.

$$(II.15) \quad \Delta_u = \Delta_y + \Delta_p = \frac{\phi'_y \cdot L_s^2}{3} + (\phi_u - \phi'_y) \cdot l_p \cdot (L_s - 0.5 \cdot L_p)$$

donde:

Δ_y , Δ_p y Δ_u son los desplazamientos elástico, plástico y último, respectivamente

ϕ'_y , ϕ_p y ϕ_u son las curvaturas elástica, plástica y última, respectivamente

L_s es la longitud de la ménsula

L_p es la longitud de la rótula plástica

A continuación se resumen los métodos analíticos propuestos por Priestley et al. (1987) [102], por Lehman et al. (2000) [74] y por Fardis et al. (2003) [53]. Estos modelos, además de tener en cuenta la flexión, consideran la contribución de la deformación transversal por cortante y el deslizamiento de la armadura longitudinal en la zona de anclaje. De cada método se describe cómo obtener la curvatura efectiva elástica y última, el desplazamiento elástico y la longitud de la rótula plástica.

Modelo analítico de Priestley et al. (1987) [102]

Este método fue deducido a partir de los resultados experimentales de las pilas de puentes a gran escala, idealizando la respuesta monotónica para el elemento.

- Curvatura elástica efectiva y última (ϕ'_y, ϕ_u)

Se evalúa sobre la curva idealizada Momento-Curvatura representada en la Figura II.20, en el que la curvatura elástica no tiene por qué coincidir con el punto de plastificación. A partir del punto de plastificación del diagrama idealizado, para obtener el valor de la curvatura elástica, se busca el punto de corte entre la rama plástica y elástica. La rama elástica vendrá definida por su pendiente, la rigidez elástica efectiva a flexión de la sección (EI_s), que se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$(II.16) \quad EI_s = \frac{M_y}{\phi_y}$$

La curvatura elástica se define a partir del menor valor entre dos posibles situaciones, en función de cómo se inicie la no-linealidad en los materiales que conforman la sección. Para la armadura se considera ese momento cuando se alcanza la deformación elástica del acero (ϵ_y), y en el caso del hormigón cuando la fibra más comprimida alcanza un valor de 0.0015; este valor de deformaciones representa el 75 % de la deformación correspondiente a la tensión máxima para hormigones convencionales ($f_c < 50$ MPa).

Se resalta que en elementos con una alta cuantía de armadura longitudinal o que se encuentren sometidos a altos niveles de axil de compresión, la deformación en el hormigón puede ser importante, alejándose la deformación de la armadura traccionada de la correspondiente a su límite elástico.

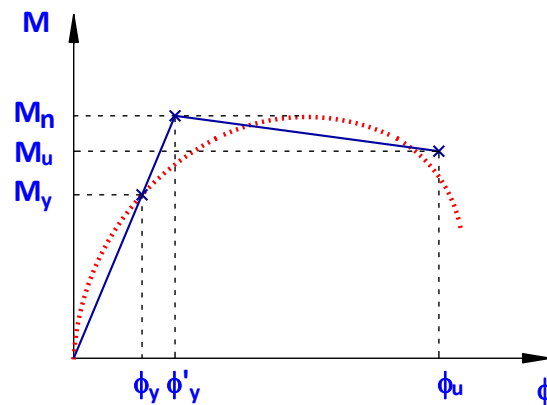


Figura II.20 Diagrama Momento-curvatura

La rama elástica se prolonga hasta el valor del momento efectivo (M_n) (Figura II.20), que es el que se obtiene cuando en la fibra más comprimida del hormigón la deformación es de 0.004. Con este valor se puede calcular la curvatura elástica efectiva (ϕ'_y) a partir de la ecuación, (II.17).

$$(II.17) \quad \phi'_y = \frac{M_n}{M_y} \phi_y$$

Para obtener la curvatura última se debe conocer la deformación máxima en la fibra más comprimida de la sección. Park y Priestley, en 1992, proponen para hormigones no confinados y con resistencia a compresión como máximo de 45 MPa, el valor de 0.004. La profundidad de la fibra neutra se calcula con la sección sin fisurar.

Priestley et al. (1987) [102] consideran que para elementos confinados la curvatura última se encuentra limitada por la capacidad de deformación del nudo confinado. En este caso, para la sección del núcleo confinado, proponen el cálculo de la deformación máxima de compresión

del hormigón con la ecuación de Mander (1989) [80] (II.18), y la profundidad de la fibra neutra (c_u).

$$(II.18) \quad \varepsilon_u = 0.004 + 1.4\varepsilon_{su} \frac{\rho_s f_{yh}}{f'_{cc}}$$

$$(II.19) \quad \phi_u = \frac{\varepsilon_{cu}}{c_u}$$

donde:

ε_{su} es la deformación del acero a su tensión máxima

ρ_s es la cuantía de la armadura transversal

f_{yh} es el límite elástico de la armadura transversal

f'_{cc} es la resistencia a compresión del hormigón confinado, $f'_{cc}=1.7f_c$

- Desplazamiento elástico efectivo (Δ'_y)

Con el modelo planteado, el valor del desplazamiento elástico (Δ_y) se obtiene mediante la expresión siguiente:

$$(II.20) \quad \Delta_y = \frac{\phi_y L_s^2}{3}$$

A nivel de diseño de elementos, el valor que interesa es el del desplazamiento elástico efectivo (Δ'_y), que se obtiene a partir de la respuesta idealizada.

$$(II.21) \quad \Delta'_y = \frac{M_n}{M_y} \Delta_y$$

- Longitud de la rótula plástica (L_p)

También conocida como longitud de plastificación, el modelo propone una expresión con dos términos independientes; el primero tiene en cuenta el comportamiento a flexión del soporte, y el segundo el efecto del deslizamiento de la armadura en la zona de anclaje.

$$(II.22) \quad L_p = 0.08 L_s + 0.0022 f_y \Phi$$

donde:

L_s es la longitud de la ménsula

f_y es el límite elástico del acero en MPa

Φ es el diámetro de la armadura longitudinal

Modelo analítico de Lehman et al. (2000) [74]

Al igual que el modelo anterior, asume un comportamiento idealizado bilineal del diagrama de respuesta de la sección, el Momento-Curvatura.

- Curvatura elástica efectiva y última (ϕ'_y, ϕ_u)

Ambas curvaturas se obtienen a partir de la plastificación del acero o del hormigón. El inicio de la no-linealidad del hormigón se produce para una deformación de 0.002. El momento nominal (M_n) se calcula conforme a la Norma ACI-318 (2014) [1]. Las expresiones que proponen son:

$$(II.23) \quad \phi_y = \frac{\varepsilon_c}{c_y}$$

$$(II.24) \quad \phi'_y = \frac{M_n}{M_y} \phi_y$$

A partir de la mitad del valor de la deformación límite del acero en tracción se puede obtener la curvatura máxima (ϕ_{max}). Este límite de la deformación de la armadura se asume para tener en cuenta los efectos de la carga cíclica.

$$(II.25) \quad \phi_{max} = \frac{0.5\varepsilon_{su}}{c_u}$$

- Desplazamiento elástico efectivo (Δ'_y)

Se obtiene, amplificado por la relación entre el momento nominal y el elástico, a partir de la suma de tres términos: el primero corresponde al de flexión (Δ_{y-f}), el segundo al deslizamiento de la armadura en el extremo del apoyo (Δ_{y-s}) y el último al de cortante (Δ_{y-v}).

$$(II.26) \quad \Delta_y = \Delta_{y-f} + \Delta_{y-v} + \Delta_{y-s}$$

$$(II.27) \quad \Delta_{y-f} = \frac{\phi_y L_s^2}{3}$$

$$(II.28) \quad \Delta_{y-s} = \phi_y L_s \frac{d_b f_y}{8\sqrt{f_c}}$$

$$(II.29) \quad \Delta_{y-v} = \frac{V_y L_s}{0.4 E_{cs} 0.8 A_g}$$

$$(II.30) \quad \Delta'_y = \frac{M_n}{M_y} \Delta_y$$

donde:

ϕ_y es la curvatura elástica

L_s es la longitud de la ménsula

V_y es la carga de cortante en el punto de plastificación

E_{cs} es el módulo de deformación secante del hormigón para $f_c \leq 50\text{MPa}$, $E_{cs} = f_c / 0.002$

A_g es el área bruta de la sección

d_b es el diámetro de la armadura longitudinal

f_y es el límite elástico del acero

f_c es la resistencia a compresión del hormigón

- Longitud de la rótula plástica (L_p)

Para obtener la longitud de la rótula plástica proponen la siguiente expresión:

$$(II.31) \quad L_p = 0.5 L_s \frac{(M_u - M_y)}{M_n} + \frac{1.2(f_u - f_y)d_b}{(4\sqrt{f_c})}$$

donde:

L_s es la longitud de la ménsula

f_y es el límite elástico del acero

M_n es el momento nominal obtenido según ACI-318 (2014) [1]

M_u es el momento último obtenido para la condición de curvatura última, $\varepsilon_s=0.5\varepsilon_{su}$

M_y es el momento al inicio de la plastificación

F_u es la tensión en el acero para la condición de $\varepsilon_s=0.5\varepsilon_{su}$

d_b es el diámetro de la armadura longitudinal

f_c es la resistencia a compresión del hormigón

Modelo analítico de Fardis et al. (2003) [53]

A partir de la base de datos con la que también propusieron el modelo empírico comentado previamente, que está compuesta por más de 1200 ensayos de elementos tipo viga y soporte de hormigón armado con agotamiento a flexión, proponen un modelo analítico que está basado en la expresión (II.15) del modelo de soporte en voladizo.

- Curvatura elástica efectiva y última (ϕ'_y, ϕ_u)

Para definir el punto que marca el comienzo de la plastificación en el diagrama momento-curvatura se adopta el punto o bien cuando plastifica el acero o bien cuando la deformación del hormigón en la fibra más comprimida es igual al 90 % de la correspondiente a la tensión máxima, lo que primero acontezca.

$$(II.32) \quad \phi_y = \min \left\{ \frac{f_y}{E_s} \frac{1}{d-x_y}, \frac{\varepsilon_{cy}}{x_y} \approx \frac{1.8f_c}{E_c k_y d} \right\}$$

$$(II.33) \quad \frac{M_y}{bd^3} = \phi_y \left\{ E_c \frac{k_y^2}{2} \left(0.5(1 + \delta') - \frac{k_y}{3} \right) + \frac{E_s}{2} \left[(1 - k_y)\rho + (k_y - \delta')\rho' + \frac{\rho_v}{6} (1 - \delta') \right] (1 - \delta') \right\}$$

donde:

ϕ_y es la curvatura elástica efectiva

E_s es el módulo de elasticidad del acero

d es el canto útil de la sección

d' es el recubrimiento mecánico de la armadura comprimida

x_y es la profundidad de la fibra neutra

ε_{cy} es la deformación elástica del hormigón, $\varepsilon_{cy}=0.9\varepsilon_{c0}$

k_y es la relación x_y/d

δ' es la relación d'/d

b es el ancho de la sección transversal

f_y es el límite elástico del acero

ρ es la cuantía de la armadura de tracción para la sección útil

ρ' es la cuantía de la armadura de compresión para la sección útil

ρ_v es la cuantía de la armadura diagonal para la sección útil

La definición del estado último de la sección es más complejo de definir. Por lo que requiere un análisis más detallado que tenga en cuenta, además de las características de los materiales, los parámetros más importantes que afectan a la deformación, como son: el confinamiento del hormigón, la esbeltez a cortante, el nivel de carga axil y la cuantía de la armadura longitudinal.

Panagiotakos y Fardis definen un procedimiento que identifica la capacidad de deformación última de la sección asociándola a la rotura de los materiales, el acero y el hormigón. Además se tiene en cuenta la interacción entre el nivel de axil aplicado y el nivel de confinamiento ya que son parámetros que pueden condicionar que el fallo se produzca a nivel del núcleo confinado, o a nivel de la sección completa.

El proceso seguido se puede consultar en el esquema recogido en Barrera (2012) [15]. Se inicia con el análisis de la sección completa. El fallo de la sección es debido a la rotura del acero y se considera cuando este material alcanza su deformación última, lo que sucede para niveles bajos de axil, donde la profundidad de la fibra neutra (k_{su}) es menor que $\frac{\epsilon_{cu}d}{(\epsilon_{cu} + \epsilon_{su})}$. Por tanto se tiene la limitación del nivel de axil aplicado (II.34):

$$(II.34) \quad \frac{N}{bdf_c} < \frac{\epsilon_{cu} - \frac{\epsilon_{c0}}{3}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{su}} + \omega' - \frac{\rho f_t}{f_c} - \frac{\rho_v (f_y + f_t)}{f_c} \cdot \frac{\epsilon_{su}(1 + \delta') - \epsilon_{cu}(1 - \delta')}{(1 - \delta') \cdot (\epsilon_{su} + \epsilon_{cu})}$$

donde:

N es el axil aplicado

b es el ancho de la sección

d es el canto útil de la sección

f_c es la resistencia a compresión del hormigón

ϵ_{cu} es la deformación última del hormigón no confinado en compresión

ϵ_{c0} es la deformación del hormigón para tensión máxima de compresión

ϵ_{su} es la deformación última del acero de la armadura longitudinal

ω' es la cuantía mecánica de la armadura longitudinal de compresión

ρ es la cuantía de la armadura longitudinal de tracción

f_t es la resistencia última del acero longitudinal

ρ_v es la cuantía de la armadura de reparto en caso de muros

δ' es la relación (d'/d)

Cuando se cumple la ecuación (II.34) se puede obtener la curvatura última (ϕ_{su}) a partir de la expresión (II.35):

$$(II.35) \quad \phi_{su} = \frac{\epsilon_{su}}{(1 - k_{su}) \cdot d}$$

$$(II.36) \quad k_{su} = \frac{(1-\delta') \cdot \left(\frac{N}{bdf_c} + \frac{\rho f_t}{f_c} - \frac{\rho' f_y}{f_c} + \frac{\varepsilon_{c0}}{3\varepsilon_{su}} \right) + \left(\frac{1+\delta'}{2} \right) \cdot \frac{\rho_v (f_y + f_t)}{f_c}}{(1-\delta') \left(\frac{1+\varepsilon_{c0}}{3\varepsilon_{su}} \right) \cdot \frac{\rho_v (f_y + f_t)}{f_c}}$$

donde:

k_{su} es la relación entre la profundidad de la fibra neutra (x) y el canto útil de la sección (d), cuando el fallo se da por agotamiento del acero

Si el fallo se produce por el hormigón, la expresión a emplear para obtener la curvatura última (ϕ_{cu}) es:

$$(II.37) \quad \phi_{cu} = \frac{\varepsilon_{cu}}{k_{cu}d}$$

donde:

k_{cu} es la relación, cuando el fallo se produce por agotamiento del hormigón, entre la profundidad de la fibra neutra (x) y el canto útil de la sección (d)

Ahora bien, el agotamiento del hormigón se alcanza o con la plastificación de la armadura de tracción o previamente a ésta, lo que lleva a que si la armadura de tracción plastifica, la profundidad de la fibra neutra (k_{cu}) es menor que $\frac{\varepsilon_{cu}d}{(\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{sy})}$, dando lugar a la condición recogida en la expresión (II.38):

$$(II.38) \quad \frac{N}{bdf_c} < \frac{\rho' f_y'}{f_c} - \frac{\rho f_y}{f_c} - \frac{\delta'}{1-\delta'} \frac{\rho_v f_y}{f_c} + \frac{(\varepsilon_{cu} - \frac{\varepsilon_{c0}}{3}) + (\varepsilon_{cu} - \varepsilon_{sy}) \cdot \frac{\rho_v f_y}{(1-\delta') \cdot f_c}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{sy}}$$

donde:

N es el axil aplicado

b es el ancho de la sección

d es el canto útil de la sección

f_c es la resistencia a compresión del hormigón

ε_{cu} es la deformación última del hormigón no confinado en compresión

ε_{c0} es la deformación del hormigón para tensión máxima de compresión

ε_{su} es la deformación última del acero de la armadura longitudinal

ω' es la cuantía mecánica de la armadura longitudinal de compresión

ρ es la cuantía de la armadura longitudinal de tracción

f_t es la resistencia última del acero longitudinal

ρ_v es la cuantía de la armadura de reparto en caso de muros

δ' es la relación (d'/d)

Si se cumple la ecuación (II.34) se puede obtener la relación k_{cu} a partir de la expresión (II.39):

$$(II.39) \quad k_{cu} = \frac{(1-\delta') \cdot \left(\frac{N}{bdf_c} + \frac{\rho f_y}{f_c} - \frac{\rho' f'_y}{f_c} \right) + (1-\delta') \left(\frac{1+\delta'}{2} \right) \frac{\rho_V f_y}{f_c}}{(1-\delta') \left(\frac{1+\epsilon_{co}}{3\epsilon_{su}} \right) + 2 \frac{\rho f_y}{f_c}}$$

En caso contrario, k_{cu} es la raíz positiva de la ecuación (II.40)

$$(II.40) \quad \left[1 - \frac{\epsilon_{co}}{3\epsilon_{cu}} - \frac{\rho_V f_y}{2(1-\delta')f_c} \cdot \frac{(\epsilon_{cu} - \epsilon_{sy})^2}{\epsilon_{cu}\epsilon_{sy}} \right] k^2 + \left[\frac{\rho' f'_y}{f_c} + \frac{\rho f_y \epsilon_{cu}}{f_c \epsilon_{sy}} - \frac{N}{bdf_c} + \frac{\rho_V f_y}{(1-\delta')f_c} \left(\frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{sy}} - \delta' \right) \right] k - \left[\frac{\rho f_y}{f_c} + \frac{\rho_V f_y}{2(1-\delta')f_c} \right] \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{sy}} = 0$$

Además el procedimiento considera que el modo de fallo puede ocurrir en el núcleo confinado del hormigón, obteniendo la deformación última según el modelo de Mander (1989) [80]. En ese caso, las expresiones anteriores se sustituyen por (II.41) y (II.42).

$$(II.41) \quad \epsilon_{su} = 0.004 + 1.4 \epsilon_{su} \frac{\rho_s f_y h}{f_{cc}}$$

$$(II.42) \quad f_{cc} = f_c \left(1 + 3.7 \left(\frac{0.5 \alpha \rho_s f_y h}{f_c} \right)^{0.87} \right)$$

donde:

d es el canto útil de la sección

ϵ_{su} es la deformación última del acero

ϵ_{cu} es la deformación última del hormigón a compresión

K_{su} es la relación x_v/d cuando ocurre el fallo por el acero

K_{cu} es la relación x_v/d cuando ocurre el fallo por el hormigón

ρ_{vs} es la cuantía de la armadura transversal

f_{yh} es el límite elástico de la armadura transversal

f_c es la resistencia a compresión del hormigón

α es el coeficiente que tiene en cuenta la distribución de la armadura transversal; la expresión para obtenerlo se adopta del Código Modelo 2010 [56]

- Desplazamiento elástico efectivo (Δ'_y)

Los investigadores proponen un método similar al propuesto por Lehman et al. (2000) [74], expuesto previamente. La expresión propuesta para calcular el desplazamiento elástico efectivo también tiene tres términos: el primero corresponde al de flexión (Δ_{y-f}), el segundo al cortante (Δ_{y-v}) y el último al deslizamiento de la armadura en el extremo del apoyo.

$$(II.43) \quad \Delta'_y = \Delta_{y-f} + \Delta_{y-v} + \Delta_{y-s}$$

$$(II.44) \quad \Delta_{y-f} = \frac{\phi_y L_s^2}{3}$$

$$(II.45) \quad \Delta_{y-v} = 0.00275 L_s$$

$$(II.46) \quad \Delta_{y-s} = a_{sl} \frac{0.2\varepsilon_y d_b f_y L_s}{(a-d')\sqrt{f_c}}$$

donde:

Δ_{y-f} es el desplazamiento elástico efectivo debido a la flexión

Δ_{y-v} es el desplazamiento elástico efectivo debido al cortante

Δ_{y-s} es el desplazamiento elástico efectivo debido al deslizamiento de la armadura anclada en el apoyo

ϕ_y es la curvatura elástica

L_s es la longitud de la ménsula

ε_y es la deformación del límite elástico del acero

d_b es el diámetro de la armadura longitudinal

f_y es el límite elástico del acero

f_c es la resistencia a compresión del hormigón

a_{sl} es 1 si desliza la armadura longitudinal y 0 en caso contrario

d es el canto útil de la sección

d' es el recubrimiento mecánico de la armadura comprimida

- Longitud de la rótula plástica (L_p)

En este método se proponen varias expresiones, según sea la carga aplicada cíclica o monotónica. En ambos casos se tienen en cuenta los efectos de la fisuración por cortante y el deslizamiento de la armadura por pérdida de adherencia.

Para carga monotónica:

$$(II.47) \quad L_p = 0.18 L_s + 0.025 a_{sl} d_b f_y$$

Para carga cíclica hay tres expresiones propuestas:

$$(II.48) \quad L_p = 0.08 L_s + \frac{1}{60} a_{sl} d_b f_y$$

$$(II.49) \quad L_p = 0.225h + \frac{1}{60} a_{sl} d_b f_y$$

$$(II.50) \quad L_p = 0.8h + 0.025 a_{sl} d_b f_y$$

donde:

L_s es la longitud de la ménsula

f_y es el límite elástico del acero

d_b es el diámetro de la armadura longitudinal

h es el canto de la sección

a_{sl} es 1 si desliza la armadura longitudinal y 0 en caso contrario

II.4.4. Métodos propuestos en la normativa

II.4.4.1. Eurocódigo 8. Parte 2 (2012) [40]

Dentro del Eurocódigo 8 “Diseño de estructuras sismorresistentes”, en la parte 2: Puentes, se propone un método analítico simplificado que permite evaluar la capacidad de la deriva total de la rótula plástica (θ_u), a partir de las derivas elástica (θ_y) y plástica ($\theta_{p,u}$). Para ello se basa en la estimación del diagrama momento-curvatura ($M-\phi$) y de la longitud de la rótula plástica (L_p) según la Figura II.21.

A continuación se recogen las expresiones que permiten obtener estos parámetros:

$$(II.51) \quad \theta_u = \theta_y + \theta_{p,u}$$

$$(II.52) \quad \theta_{p,u} = (\phi_u - \phi_y)L_p \left(1 - \frac{L_p}{2L}\right)$$

donde:

L es la distancia entre la sección en el extremo de la rótula plástica y el punto del momento nulo en el soporte

ϕ_y es la curvatura correspondiente al límite elástico

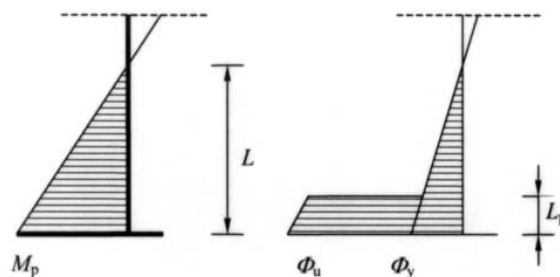


Figura II.21 Rótula plástica a nivel sección, EC 8. Parte 2 [40]

Para una variación lineal del momento flector, la deriva elástica se obtiene con la ecuación (II.53).

$$(II.53) \quad \theta_y = \frac{\phi_y L}{3}$$

Tanto la curvatura elástica (ϕ_y) como la última (ϕ_u) se obtienen a partir de un análisis de la sección ($M-\phi$), bajo la carga axial correspondiente a la acción sísmica de cálculo. La idealización del diagrama teórico mediante un diagrama bilineal, elasto-plástico perfecto, contempla una primera rama (la elástica) que empieza en el origen e intersecta con la curva envolvente real en el punto de plastificación. Dicho punto corresponde al momento en el que la armadura alcanza el límite elástico, y a partir de él se define la curvatura elástica ideal (ϕ_y). La curvatura última (ϕ_u), en la curva envolvente real, corresponderá a la situación de rotura convencional. El diagrama viene representado en la Figura II.22. El valor de M_u se obtiene igualando las áreas del diagrama idealizado y la curva real a partir del punto de plastificación.

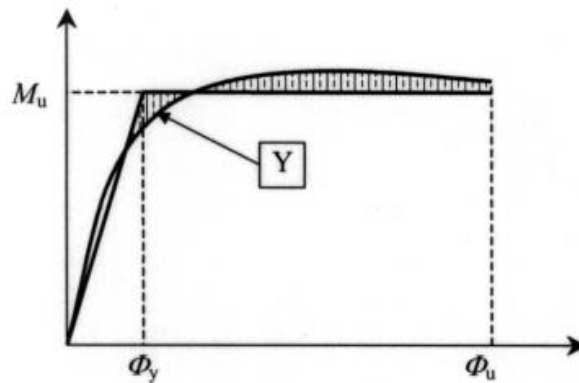


Figura II.22 Envolvente idealizada M-φ

Según la ecuación (II.54), la curvatura última (ϕ_u) se define para la situación en la que uno de los dos materiales (acero/hormigón) o los dos han alcanzado los valores de deformación última. La norma aclara que cuando la deformación en la fibra más comprimida de la sección completa es mayor o igual que la deformación última del hormigón no confinado ($\varepsilon_{cu,1}$), se tendrá en cuenta sólo la sección del núcleo confinado. Por lo tanto, el estado último viene dado por la condición $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu,c}$, siendo el canto útil el de la sección confinada ($d = d_c$).

$$(II.54) \quad \phi_u = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_c}{d}$$

donde:

ε_s es la deformación de la armadura en tracción para el estado último

ε_c es la deformación del hormigón para el estado último

$\varepsilon_{cu,1}$ es la deformación de compresión del hormigón no confinado, según EC-2 (2010) [38]

$\varepsilon_{cu,c}$ es la deformación de compresión del hormigón confinado, según EC-2 (2010) [38]

ε_{su} es la deformación del acero en tensión máxima

d es el canto útil de la sección

La longitud de la rótula plástica se evalúa según la siguiente expresión:

$$(II.55) \quad L_p = 0.115 L + 0.0085 \cdot f_{yk} \cdot d_s$$

donde:

L es la distancia entre la sección de momento máximo y la sección de momento nulo

f_{yk} es el límite elástico del acero de la armadura longitudinal

d_s es el diámetro de la armadura longitudinal

La expresión para el cálculo de la rotación plástica es válida para valores cuya esbeltez de cortante es $\lambda_v = L/d \geq 3$; para valores de $1 \leq \lambda_v < 3$, la deriva plástica debe multiplicarse por un factor de reducción k_{λ_v} , que se obtiene a partir de la ecuación siguiente:

$$(II.56) \quad k_{\lambda} = \sqrt{\frac{\lambda}{3}}$$

II.4.4.2. Eurocódigo 8. Parte 3 (2010) [37]

En su parte 3, esta normativa evalúa y revisa las estructuras existentes a partir de la capacidad de deformación de los elementos de hormigón mediante la deriva última. Estudia la estructura mediante tres tipos de estados límite (LS): cerca del colapso (NC), daño significativo (SD), y daño limitado (LD). Estos estados se caracterizan de la manera siguiente:

- **Estado límite cerca del colapso (NC):** La estructura está altamente dañada, con baja resistencia residual lateral y baja rigidez, aunque los elementos verticales son todavía capaces de aguantar cargas verticales. La mayoría de los elementos verticales han colapsado. Hay presencia de grandes derivas permanentes. La estructura está cerca del colapso y probablemente no resistiría otros sismos, incluso de moderada intensidad.
- **Estado límite de daño significativo (SD):** La estructura está significativamente dañada, con alguna resistencia y rigidez residual lateral, y los elementos verticales son capaces de aguantar cargas verticales. Los componentes no estructurales están dañados, aunque las particiones no han fallado. Hay presencia de derivas permanentes moderadas. La estructura puede aguantar réplicas sísmicas de moderada intensidad. Es posible que no sea económicamente factible reparar la estructura.
- **Estado límite de daño limitado (LD):** La estructura está ligeramente dañada. Se ha evitado una significativa plastificación de los elementos estructurales, manteniéndose sus propiedades de resistencia y rigidez. Los elementos no estructurales, tales como muros de partición y divisiones, pueden mostrar cierta distribución de fisuras, pero la reparación del daño puede ser económicamente viable. La deriva permanente es despreciable. La estructura no necesita ninguna medida de reparación.

Estado límite NC. Evaluación de la deriva última

El valor de la capacidad de deriva última (θ_u) se puede obtener a partir de la siguiente ecuación.

$$(II.57) \quad \theta_u = \alpha_{st} \frac{1}{\gamma_{el}} 0.016 (0.3^v) \left[\frac{\max(0.01; \omega')}{\max(0.01; \omega)} f_c \right]^{0.225} \left(\frac{L_v}{h} \right)^{0.35} 25^{\left(\alpha_{psx} \frac{f_{yw}}{f_c} \right)} (1.25^{100 \rho_d})$$

$$(II.58) \quad \alpha = \left(1 - \frac{s_h}{2b_0} \right) \left(1 - \frac{s_h}{2h_c} \right) \left(1 - \frac{\sum b_i^2}{6b_0 h_0} \right)$$

donde:

α_{st} es el coeficiente del tipo de acero (0.625 para aceros trabajados en frío y 1.0 para los demás tipos)

γ_{el} es un coeficiente igual a 1.5 para elementos estructurales principales y 1.0 para elementos secundarios

v es el axil reducido N/bhf_c , N es la carga axial aplicada

b es el ancho de la sección transversal

h es el canto de la sección transversal

- L_v es la distancia entre la sección de momento máximo y la sección de momento nulo
- ω es la cuantía mecánica de la armadura en tracción
- ω' es la cuantía mecánica de armadura en compresión
- f_c es la resistencia del hormigón en compresión
- ρ_{sx} es la cuantía de acero transversal
- s_h es la separación entre cercos
- f_{yw} es el límite elástico del acero transversal
- ρ_d es la cuantía de acero de refuerzo diagonal en cada una de las direcciones diagonales
- α es el factor de efectividad del confinamiento
- b_0 es el ancho del núcleo confinado de la sección
- h_0 es el canto del núcleo confinado de la sección
- b_i es la distancia entre barras lateralmente atadas con cercos o ganchos

Por otra parte, la deriva plástica puede calcularse del siguiente modo:

$$(II.59) \quad \theta_{um}^{pl} = \theta_{um} - \theta_y = \alpha_s \frac{1}{\gamma_{el}} 0.0145 (0.25^v) \left[\frac{\max(0.01; \omega')}{\max(0.01; \omega)} f_c \right]^{0.3} (f_c)^{0.2} \left(\frac{L_v}{h} \right)^{0.35} 25^{\left(\alpha \rho_{sx} \frac{f_{yw}}{f_c} \right)} (1.275^{100 \rho_d})$$

donde:

- α_s es el coeficiente del tipo de acero (0.5 para aceros trabajados en frío y 1.0 para los demás tipos)
- γ_{el} es un coeficiente igual a 1.8 para elementos estructurales principales y 1.0 para elementos secundarios
- θ_y es la deriva calculada según las ecuaciones (II.70) y (II.71)

En el caso de elementos sin detalles sismorresistentes, los valores de las ecuaciones (II.57) y (II.59) se multiplicarán por 0.825.

Método alternativo para evaluar la capacidad de la deriva última para el estado límite NC

Como método alternativo de cálculo para evaluar la deriva última para el estado límite NC se propone la siguiente expresión:

$$(II.60) \quad \theta_{um} = \frac{1}{\gamma_{el}} \left(\theta_y + (\phi_u - \phi_y) L_{p1} \left(1 - \frac{0.5 L_p}{L_v} \right) \right)$$

donde:

- θ_y es la deriva elástica evaluada según las ecuaciones (II.70) y (II.71)
- ϕ_u es la curvatura última de la sección cercana al apoyo

ϕ_y es la curvatura elástica de la sección cercana al apoyo

El valor de la longitud de rótula plástica (L_{p1}) depende del cálculo de la curvatura última de la sección, del aumento de la resistencia y de la capacidad de deformación del hormigón debido al confinamiento. Es por ello que la normativa establece dos alternativas para evaluarla, como se indica a continuación:

Alternativa 1

Se define la deformación última de la armadura longitudinal ε_{su} , como:

- El mínimo valor correspondiente a la tensión máxima en aceros clase A o B, EC-2 (2010) [38]
- 6% para el acero clase C

El modelo de confinamiento del Eurocódigo 2 (EC-2 (2010) [38]) asume distintas situaciones dependiendo de la tensión de confinamiento lateral efectiva ($\sigma_2 = \alpha \rho_{sx} f_{yw}$)

- Para $\sigma_2 \leq 0.05 f_{ck}$

$$(II.61) \quad f_{ck,c} = f_{ck} \left(1 + 5 \frac{\sigma_2}{f_{ck}} \right)$$

- Para $\sigma_2 > 0.05 f_{ck}$

$$(II.62) \quad f_{ck,c} = f_{ck} \left(1.125 + 2.5 \frac{\sigma_2}{f_{ck}} \right)$$

$$(II.63) \quad \varepsilon_{c2,c} = \varepsilon_{c2} \left(\frac{f_{ck,c}}{f_{ck}} \right)^2$$

$$(II.64) \quad \varepsilon_{cu2,c} = \varepsilon_{cu2} + 0.2 \frac{\sigma_2}{f_{ck}}$$

donde:

f_{yw} es el límite elástico del acero transversal

α es el factor de efectividad del confinamiento

f_{ck} es la resistencia característica del hormigón confinado en compresión

f_{ck} es la resistencia característica del hormigón en compresión

$\varepsilon_{c2,c}$ es la deformación última del hormigón confinado

ε_{c2} es la deformación del hormigón cuando se alcanza la tensión máxima de compresión, según el modelo parábola-rectángulo EC-2 (2010) [38]

ε_{cu2} es la deformación última del hormigón (Modelo parábola-rectángulo EC-2 (2010) [38])

ρ_{sx} es la cuantía de acero transversal paralela a la dirección de carga

A_{sx} es el área de armadura transversal paralela a la dirección de carga

s_h es la separación entre cercos

b_w es el ancho del núcleo confinado

Por otra parte, para elementos con detalles sismorresistentes y sin solapes de las barras longitudinales cerca de la zona susceptible de que se produzca una posible rótula plástica, L_{p1} puede calcularse a partir de la siguiente expresión:

$$(II.65) \quad L_{p1} = 0.1L_v + 0.17h + 0.24 \frac{d_{bl}f_y}{\sqrt{f_c}}$$

donde:

L_v es la distancia entre la sección de momento máximo y la sección de momento nulo

h es el canto de la sección transversal

d_{bl} es el diámetro medio de la armadura en tracción

f_y es el límite del acero

f_c es la resistencia del hormigón en compresión

Alternativa 2

La deformación última de la armadura longitudinal (ε_{su}) se calcula como en la alternativa anterior y se utiliza un modelo de confinamiento más adecuado que el planteado en el Eurocódigo 2 (2010) [38]. Para el cálculo de la resistencia del hormigón confinado, se hace uso de la ecuación siguiente:

$$(II.66) \quad f_{cc} = f_c \left(1 + 3.7 \left(\frac{\alpha \rho_{sx} f_{yw}}{f_c} \right)^{0.86} \right)$$

La deformación en tensión máxima del hormigón confinado se determina como:

$$(II.67) \quad \varepsilon_{cc} = \varepsilon_{c2} \left(1 + 5 \left(\frac{f_{cc}}{f_c} - 1 \right) \right)$$

y la deformación última en el extremo de la fibra más comprimida se evalúa por la ecuación:

$$(II.68) \quad \varepsilon_{cu} = 0.004 + 0.5 \frac{\alpha \rho_{sx} f_{yw}}{f_{cc}}$$

donde:

α es el factor de efectividad del confinamiento, definido en la primera alternativa

ρ_{sx} es la cuantía de acero transversal paralela a la dirección x de carga $A_{sx}/(b_w s_h)$

f_{yw} es el límite elástico del acero transversal

f_{cc} es la resistencia del hormigón confinado en compresión

Al igual que en la alternativa anterior, para elementos con detalles sismorresistentes y sin solapes de las barras longitudinales cerca de la zona donde se espera la aparición de la rótula plástica, L_{p1} se puede obtener a partir de:

$$(II.69) \quad L_{p1} = \frac{L_v}{30} + 0.2h + 0.11 \frac{d_{bl}f_y}{\sqrt{f_c}}$$

donde:

L_v es la distancia entre la sección de momento máximo y la sección de momento nulo

h es el canto de la sección transversal

d_{bl} es el diámetro medio de la armadura en tracción

f_y es el límite elástico del acero

f_c es la resistencia del hormigón en compresión

Hay que recalcar que si se usa el modelo de confinamiento del EC-2 (2010) [38] para el cálculo de la curvatura última de la sección (ϕ_u) y la longitud de plastificación (L_{p1}), como se muestra en la ecuación (II.65), y en la ecuación (II.60), entonces el factor γ_{el} es igual a 2.0 para elementos sismorresistentes principales y 1.0 para elementos sismorresistentes secundarios.

Si por el contrario se utiliza el modelo dado por la alternativa 2 junto con la expresión (II.69), entonces el valor del factor γ_{el} es igual a 1.7 para elementos sismorresistentes principales y 1.0 para elementos sismorresistentes secundarios.

Estado límite SD. Evaluación de la deriva última

La deriva correspondiente a un nivel de daño significativo se puede calcular como el 75% de la deriva última, aplicando cualquiera de los dos métodos anteriormente vistos.

Estado límite LD. Evaluación de la deriva última

Respecto a la capacidad de este estado límite, se tiene que verificar la deformación para el momento elástico de flexión (M_y), de modo que se requiere evaluar la deriva elástica (θ_y); y ésta puede ser calculada a partir de las dos alternativas para vigas y soportes:

$$(II.70) \quad \theta_y = \phi_y \frac{L_v + \alpha_v z}{3} + 0.00135 \left(1 + 1.5 \frac{h}{L_v} \right) + \frac{\epsilon_y}{(d-d')} \frac{d_b f_y}{6\sqrt{f_c}}$$

$$(II.71) \quad \theta_y = \phi_y \frac{L_v + \alpha_v z}{3} + 0.0013 \left(1 + 1.5 \frac{h}{L_v} \right) + 0.13 \frac{d_b f_y}{\sqrt{f_c}}$$

donde:

ϕ_y es la curvatura elástica de la sección

$\alpha_v z$ es el cambio del diagrama de momentos debido a las fisuras inclinadas, EC-2 (2010) [38]

z es el brazo mecánico de la sección

L_v es la distancia entre la sección de momento máximo y la sección de momento nulo

α_v es igual a 1.0 si se espera que la fisuración de cortante preceda a la flexión elástica en la sección, esto es, cuando el momento elástico de la sección excede L_v veces la resistencia de cortante del elemento sin considerar la armadura de cortante $V_{R,c}$; α_v es 0 en el resto de casos, esto es, si $M_y < L_v V_{R,c}$

$V_{R,c}$ es la resistencia a cortante sin considerar la armadura calculada según el EC-2 [38]

f_y es el límite elástico del acero

f_c es la resistencia del hormigón en compresión

ε_y es la deformación elástica del acero

d es el canto útil de la sección

d' es el recubrimiento mecánico de la armadura en compresión

d_{bl} es el diámetro medio de la armadura de tracción

II.4.5. Desarrollos experimentales

Debido a que en los últimos tiempos se han incrementado los episodios sísmicos, ha aumentado la inquietud de la comunidad científica con respecto al conocimiento y mejora de los diseños frente a este fenómeno.

Actualmente, las normas de diseño sísmico recogen recomendaciones para que la estructura tenga un comportamiento cuasi-elástico, originando daños mínimos, y presente un comportamiento dúctil con ausencia de colapso frente al sismo de diseño. Por ello, en la mayoría de los códigos tratan de asegurar la formación de rótulas plásticas en determinadas secciones críticas de los elementos estructurales, en general en el elemento tipo viga, aunque en los últimos episodios sísmicos se ha comprobado que las zonas críticas también se originan en los elemento tipo columna.

Todo ello ha propiciado que, recientemente, en el campo del hormigón armado el número de campañas experimentales haya aumentado de forma considerable. En dichas campañas se busca un incremento de la ductilidad del material de manera que absorba y disipe correctamente la energía transmitida al elemento estructural, consiguiendo que éste trabaje de forma más eficiente y segura.

La capacidad de deformación de los pórticos de hormigón armado bajo la actuación de cargas o deformaciones laterales depende, fundamentalmente, de la capacidad de deformación de sus conexiones, ya que en éstas se concentran las mayores deformaciones y es donde se puede desarrollar la rótula plástica. Los modelos de ensayo más empleados en la bibliografía para representar estas conexiones se muestran en la Figura II.23. Con cada tipología se intenta reproducir las uniones más comunes en una estructura.

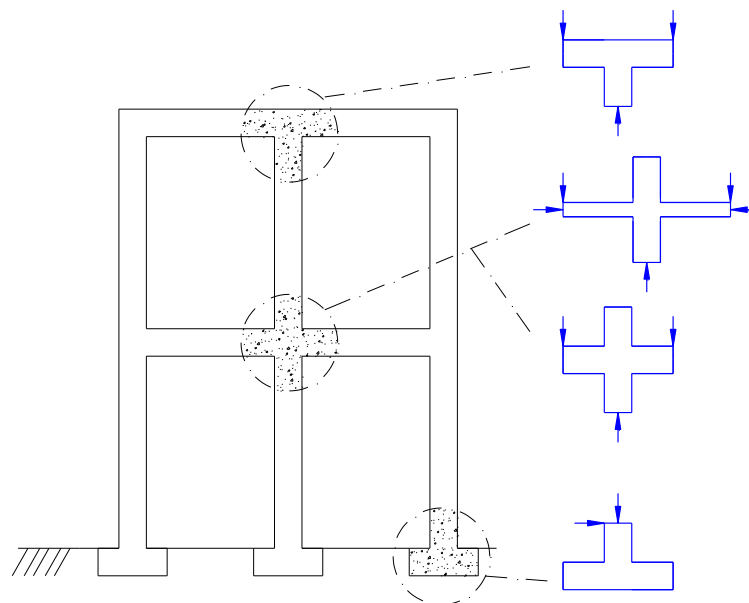


Figura II.23 Idealización uniones soporte-viga de un pórtico estructural

Existe publicada desde el año 2004 una base de datos muy completa recopilada por el *Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER)* de la Universidad de Washington (2004) [22] donde se recogen, perfectamente catalogados, aproximadamente unos 300 ensayos de soportes rectangulares. Caballero (2015) [26] en su tesis doctoral amplió esa base de datos con las investigaciones encontradas hasta el 2013, incluyendo soportes de hormigón convencional y HAR.

Dentro de las publicaciones consultadas existen varias que recapitulan el panorama investigador de los hormigones conocidos como UHPFRC, aquellos cuya resistencia a compresión es superior a 150 MPa. Ejemplo de ello puede ser el libro publicado por Fehling et al. [58] en 2014, así como el estado del arte recopilado por Russel y Graybeal [108] en 2013 o las investigaciones recogidas en los *proceedings* del Hipermat 2012 [126].

Tomando como base de partida estos trabajos, se pretende conocer lo documentado hasta la fecha sobre ensayos experimentales de uniones de elementos que forman un pórtico estructural realizadas con hormigones cuyas resistencias a compresión se encuentren en la franja entre los 100 y 150 MPa, por el interés despertado y el hecho de que existe un vacío en ese campo. Respecto al comportamiento dúctil, por las consultas realizadas de las publicaciones existentes, se ha constatado que actualmente los grupos de investigación, en general, están experimentando con hormigones de menor y mayor resistencia que la franja considerada de 100-150 MPa. Y por ser objeto de la presente tesis doctoral, se añadirá en la búsqueda los ensayos con esas características con cargas cíclicas.

A continuación se resumen los trabajos experimentales encontrados hasta la fecha.

Bechtoula et al. (2015) [20]

En este trabajo se realiza un análisis experimental y numérico del comportamiento sísmico de 12 soportes tipo ménsula bajo carga cíclica, con el fin de analizar el efecto escala, con diferentes tamaños y resistencia del hormigón.

Tipo de ensayo

El esquema estructural idealizado y el pórtico empleado se muestran en la Figura II.24:

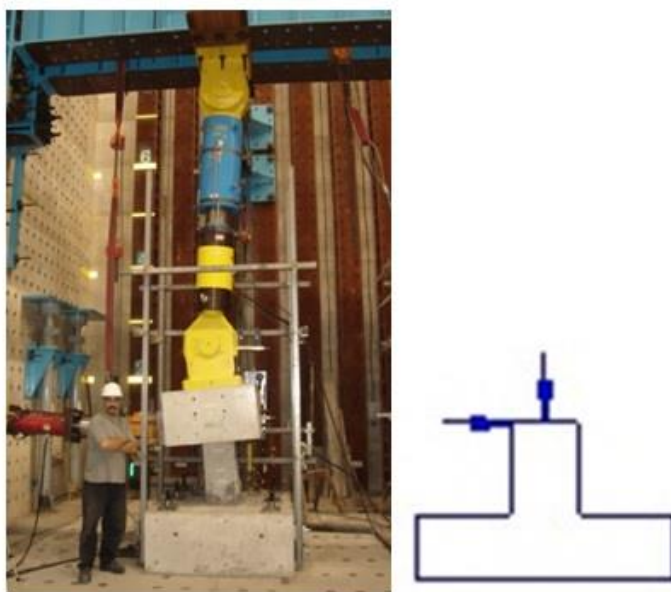


Figura II.24 Pórtico de ensayo, soporte tipo ménsula y esquema de carga, Bechtoula et al. (2015) [20]

A continuación en la Figura II.25 se muestran la geometría y armados de las secciones de los elementos ensayados.

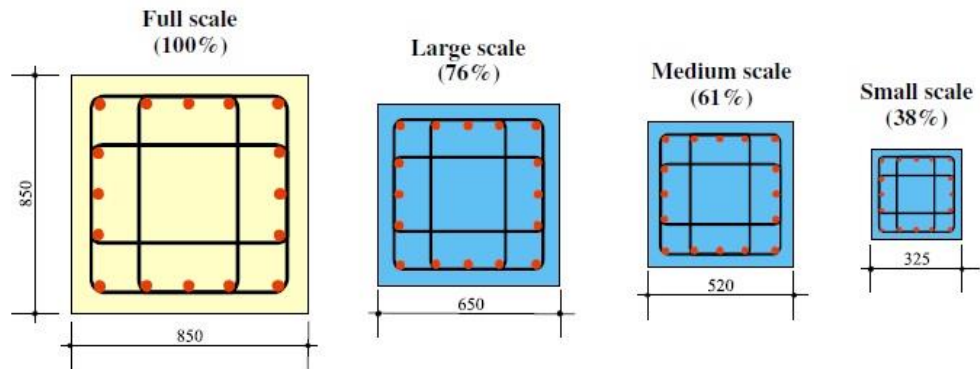


Figura II.25 Tipos, geometría y disposición de armado de los soportes ensayados, Bechtoula et al. (2015) [20]

Variables estudiadas

- Resistencia a compresión (f_c): 80, 130 y 180 MPa
- Volumen de fibras: 0 % de fibras
- Cuantía de la armadura longitudinal (ρ_l): 3.00 %
- Separación de la armadura transversal (s_t): entre 40 y 100 mm
- Nivel de axil aplicado: 0.30
- Esbeltez a cortante (λ_v): 2.5

Conclusiones de los autores

Se observa que el salto de recubrimiento fue más frágil en el hormigón de 180 MPa. Se observó un mayor daño para los soportes de gran escala y media. La curvatura medida es mayor para los soportes de menor escala frente a las de media y gran escala. A partir de los valores del elemento de pequeña escala, se ha propuesto una sencilla ecuación para evaluar las curvas momento-*drift* para los soportes de medio y gran tamaño. Esta ecuación está basada sólo en la geometría y en las características del material.

Maya et al. (2013) [81]

Los autores plantean dos tipos de investigaciones. En una primera etapa ensayan vigas biapoyadas con carga escalonada en un ensayo a cuatro puntos. Los elementos fueron construidos a partir de dos semivigas prefabricadas unidas en su centro por una unión ejecutada in situ con UHPFRC. En una segunda fase ensayan, bajo carga cíclica, uniones soporte-viga prefabricadas resueltas con UHPFRC, proponiendo una configuración que evita la interferencia entre la armadura longitudinal y transversal para reducir el trabajo *in situ* y definir un eficiente y seguro proceso de construcción.

Respecto de la parte experimental de la unión, ensayan cuatro nudos internos soporte-viga. En la Figura II.26 se muestra el esquema de ensayo empleado, así como la geometría y características de las uniones ensayadas.

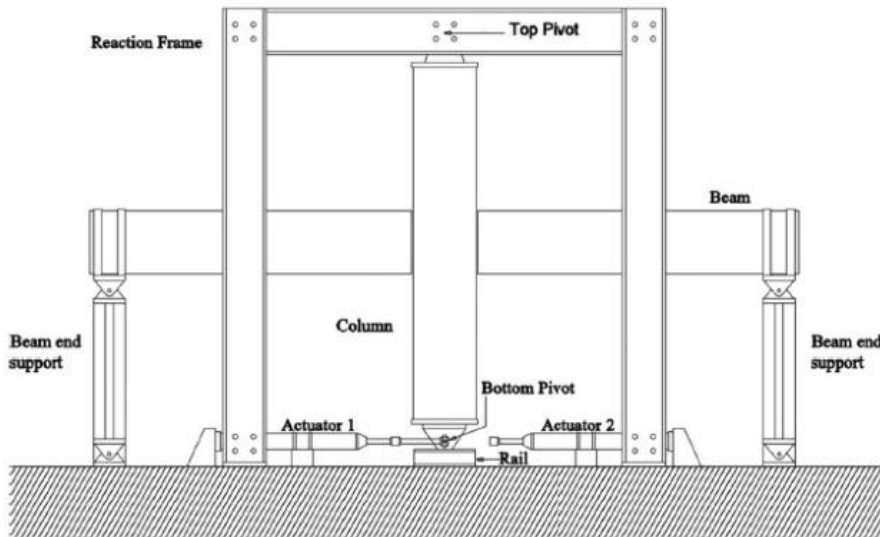


Figura II.26 Esquema de ensayo, Maya et al. (2013) [81]

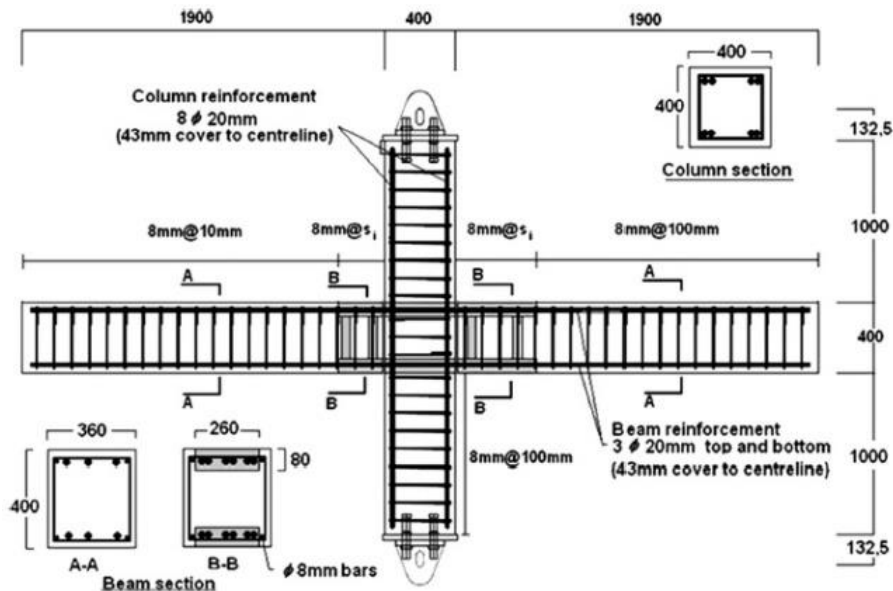


Figura II.27 Geometría de los elementos ensayados, Maya et al. (2013) [81]

Variables estudiadas

- Resistencia a compresión (f_c): entre 127 y 147.1 MPa
- Volumen de fibras: 6 % de fibras de acero de 13 mm de longitud y 0.20 mm de diámetro
- Separación de la armadura transversal (s_t): 100 y 150 mm

Conclusiones de los autores

Se ha propuesto una solución de la conexión soporte-viga de elementos prefabricados, aprovechando el poco espacio del que se dispone para realizar el solape. El sistema planteado

reduce la mano de obra *in situ* y mejora el tiempo de ejecución superando algunos de los inconvenientes típicos de estas uniones.

Aunque el comportamiento de la unión a flexión es la esperada, se necesita investigar sobre mejoras adicionales con sistemas de disipación de energía sísmica. La solución propuesta tiene como ventaja que los estribos cerrados pueden distribuirse por la viga, y los del soporte se mantienen en el centro de la unión, donde el confinamiento y el cortante son importantes, asegurando el buen comportamiento del elemento. Del mismo modo, el daño observado no es muy grande, localizándose en el interior del nudo.

Además, las medidas obtenidas no pueden ser tomadas como definitivas para incrementar la ductilidad y garantizar un adecuado control de la abertura de fisura en la sección de discontinuidad, y apuntan que deberían estudiarse otras alternativas a las uniones de elementos prefabricados.

Dong y Feng (2013) [52]

Realizan 15 ensayos de vigas a flexión simple de 2.4 m, un ensayo a tres puntos, buscando el volumen óptimo de fibras de acero para un hormigón UHPFRC.

Variables estudiadas

- Resistencia a compresión (f_c): 155 MPa
- Cuantía de la armadura longitudinal (ρ_l): 0.93, 4.16, 7.40 y 9.25 %
- Volumen de fibras: 0, 0.7, 1, 1.5 y 2%

Conclusiones de los autores

Con el incremento de la cuantía de armadura longitudinal se incrementa la carga. Se comprueba que las fibras aumentan la ductilidad de la viga. Cuando la armadura pandea se alcanza con facilidad el fallo. Para conseguir mejor ductilidad el contenido de fibras debe ser mayor que 0.7 %. Si el volumen es del 2 % y la cuantía de armadura longitudinal está por debajo de 4% afecta al pico de carga; si por el contrario la cuantía supera el 4%, ésta no trabaja, no presentado mejoras significativas en el comportamiento. El mejor resultado se obtiene con las combinaciones de 0.7% de volumen de fibras con 9.25% de cuantía de armadura longitudinal, y 2% volumen de fibras con 4% de cuantía de armadura longitudinal.

Kim et al. (2013) [70]

Los autores ensayan dos tipos de soportes mixtos de acero y hormigón con cuatro hormigones de resistencias 94, 113, 104, and 184 MPa. Se recoge en este resumen por el tipo de hormigón fabricado ya que está en la franja buscada.

En la Figura II.27 se puede observar tanto el esquema del ensayo empleado como las características geométricas del elemento ensayado.

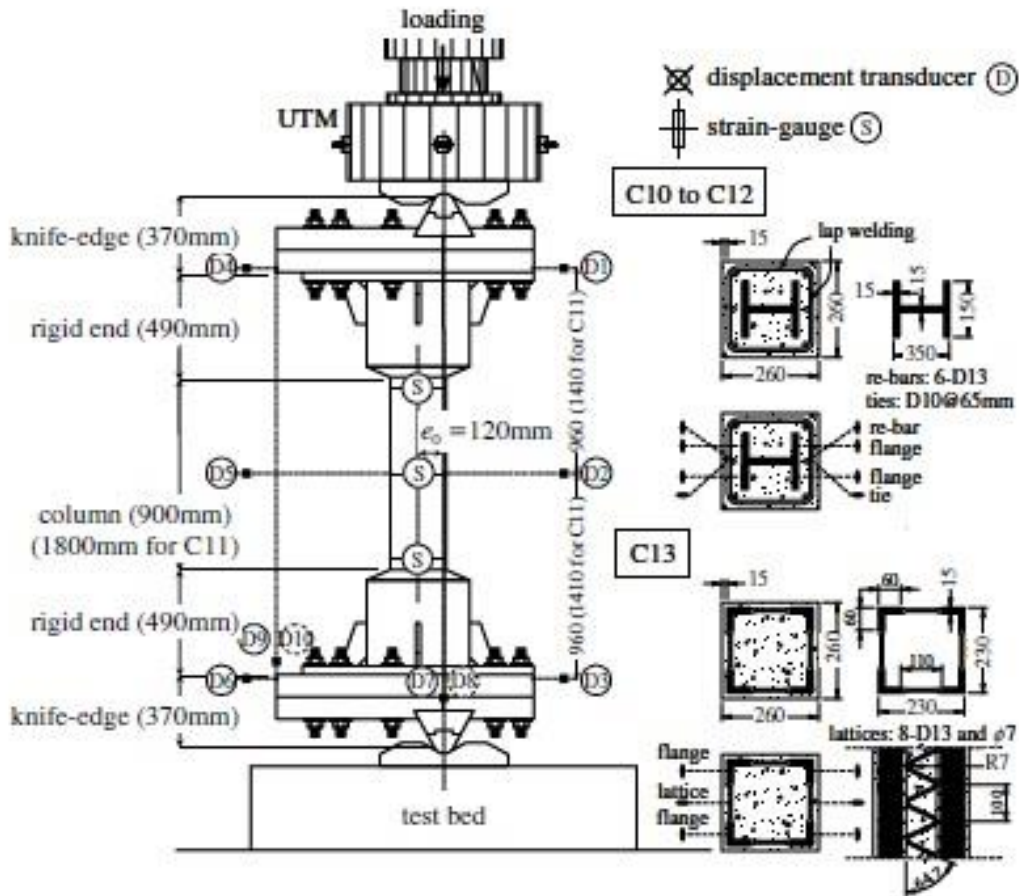


Figura II.28 Características del ensayo y geometría de los soportes, Kim et al. (2013) [70]

Variables estudiadas

- Resistencia a compresión (f_c): 93, 104, 113 y 184 MPa
- Cuantía de la armadura longitudinal (ρ_l): 0, 1.1 y 1.5 %
- Límite elástico de la armadura (f_y): entre 812 y 913 MPa
- Volumen de fibras: no hay datos

Conclusiones del autor

(No se reflejan por no ser comparativas con este trabajo)

Kamal et al. (2013) [68]

En esta investigación se ensayan bajo carga monotónica y a flexión simple 12 vigas con hormigones reforzados con dos tipos de fibras: de acero y de polipropileno. En la Figura II.28 se esquematiza el ensayo y sus características.

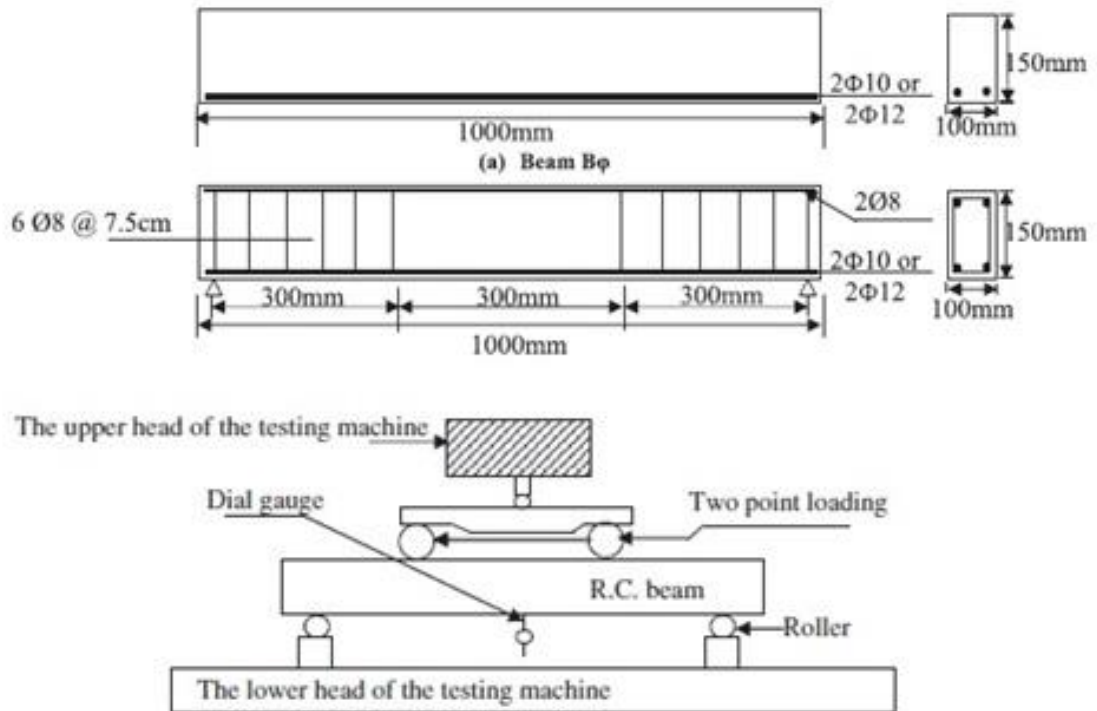


Figura II.29 Geometría y distribución de armado de las vigas. Esquema de ensayo y medida, Kamal et al. (2013) [68]

Variables estudiadas

- Resistencia a compresión (f_c): 127 MPa (sin fibras), 135 MPa (fibras de acero) y 130 MPa (fibras de polipropileno)
- Cuantía de la armadura longitudinal (ρ_l): 1.2 y 1.7 %
- Cuantía de armadura transversal (ρ_{st}): variable, incluyendo la opción de no disponer
- Límite elástico de la armadura (f_y): 550 MPa la longitudinal y 350 MPa la transversal
- Volumen de fibras: se ha usado el método de volumen absoluto para diseñar la mezcla, en concreto para ambos tipos se añadieron al hormigón en 40 y 1 kg/m^3 , respectivamente.

Conclusiones de los autores

Para resistencias de 135 MPa, el hormigón de UHPFRC se puede producir con materiales locales y técnicas de producción comunes de mezcla y curado con una trabajabilidad adecuada.

Independientemente de la cuantía de acero, las fibras de acero fueron más eficientes, aumentando tanto la carga inicial como la última. Ese aumento fue de un 13 % en las vigas con baja cuantía de refuerzo transversal.

Bedirhanoglu et al. (2013) [21]

Estudian el comportamiento frente a sismo de uniones soporte-viga construidas con hormigones de baja resistencia y barras lisas, reforzándolo con paneles prefabricados de HPFRCC.

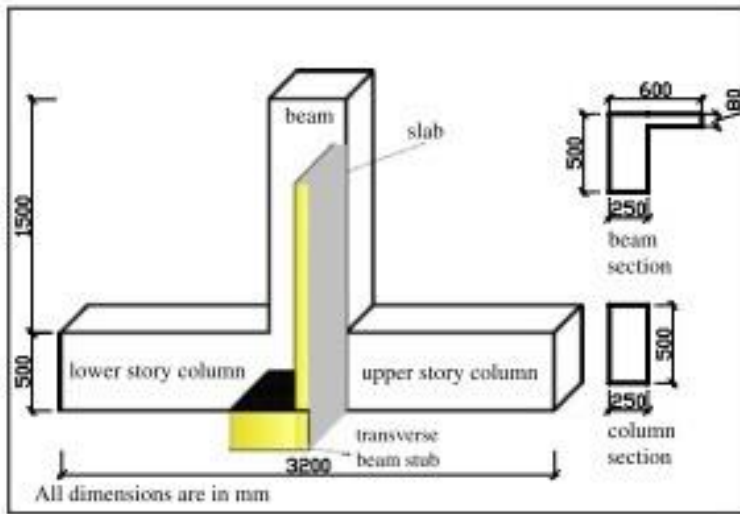


Figura II.30 Geometría del elemento ensayado, Bedirhanoglu et al. (2013) [21]

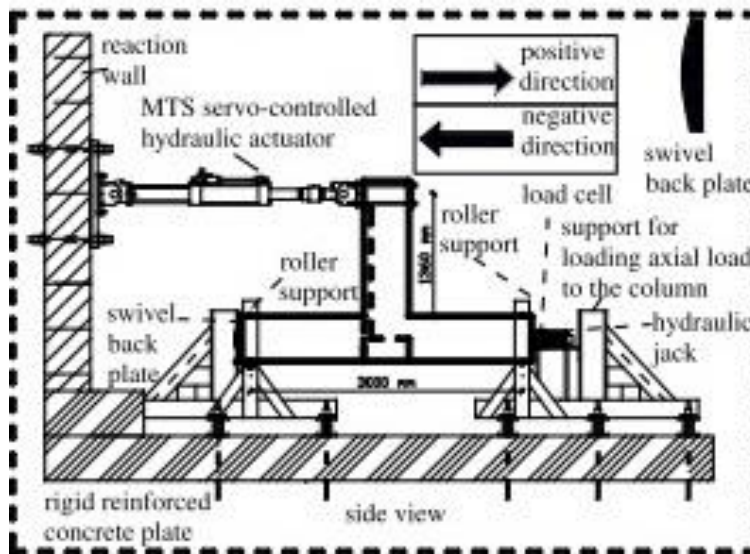


Figura II.31 Esquema de carga, Bedirhanoglu et al. (2013) [21]

Variables estudiadas

- Resistencia a compresión de los paneles (f_c): 135 MPa
- Nivel de axil aplicado: constante

Conclusiones del autor

El uso de HPFRCC produce una mejora considerable de la resistencia a cortante del nudo, y además limita la deformación por cortante del interior del nudo retrasando el daño debido al mismo.

Popa (2013) [101]

Estudia experimental y numéricamente el comportamiento de 16 soportes, compuestos de un núcleo de UHPFRC y exterior de Reinforced Concrete (RC), bajo carga monotónica. Las secciones de los elementos son 4 de sección de un único hormigón (RC) y 12 de sección compuesta de UHPFRC y RC. En la Figura II.30 se muestra la geometría de los soportes ensayados y su distribución de armado.

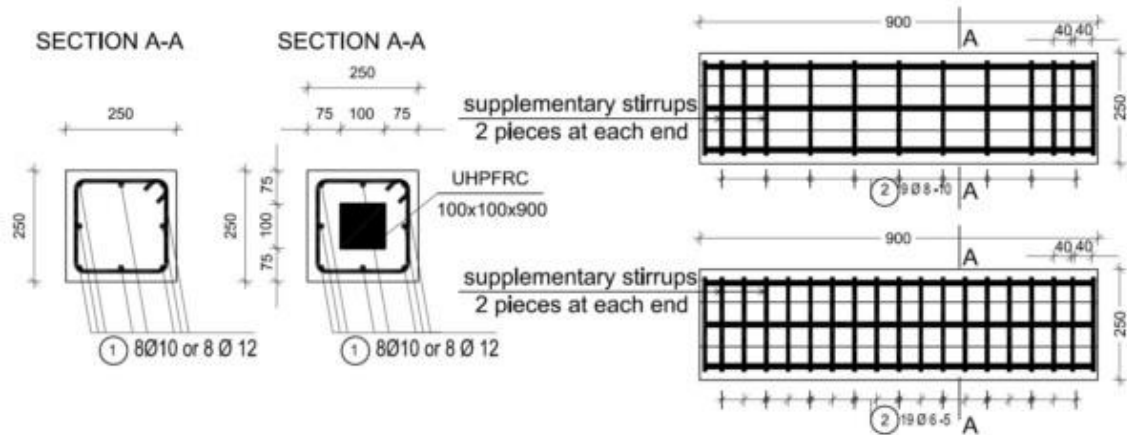


Figura II.32 Geometría y armado de los soportes ensayados Popa (2013) [101]

Variables estudiadas

- Resistencia a compresión (f_c): entre 91.7 y 160.4 MPa según Popa (2013) [100]
- Armadura longitudinal: formada por 8 ϕ 10 ó 8 ϕ 12
- Armadura transversal: ϕ 8 cada 10 cm o ϕ 6 cada 5 cm

Conclusiones del autor

El resultado de la simulación numérica fue muy similar al obtenido experimentalmente.

Los soportes son más frágiles a medida que aumenta la resistencia a compresión. Los elementos de sección compuesta tienen mayor capacidad de carga que los de sección simple.

Yamamoto (2012) [120]

Realizó una investigación experimental para examinar los efectos a corto y largo plazo de la acción sísmica en las deformaciones verticales de soportes de hormigón armado. El ensayo se realizó con carga lateral cíclica en elementos de 30 a 122 MPa sin fibras. En la Figura II.31 se muestra la geometría del elemento ensayado.

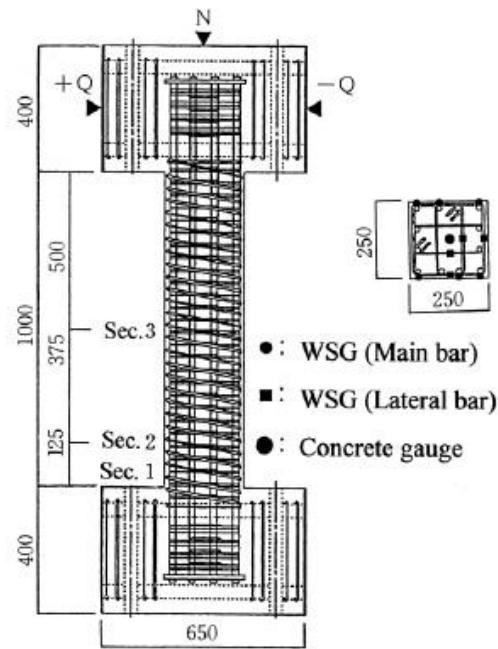


Figura II.33 Tipo de soporte ensayado y dirección de las cargas actuantes Yamamoto (2012) [120]

Variables estudiadas

- Resistencia a compresión (f_c): entre 30.6 y 122 MPa
- Cuantía de la armadura longitudinal (ρ_l): constante
- Límite elástico de la armadura (f_y): entre 541 y 1760 MPa
- Volumen de fibras: 0 %
- Nivel de axil aplicado: 0.33 ó 0.66

Conclusiones del autor

Las deformaciones totales se incrementaron notablemente en las rótulas de las columnas. La carga sísmica es la responsable de la disminución de la rigidez axial y el aumento de la deformación residual.

Debido a la alta cuantía de armadura transversal, el comportamiento a largo plazo de los soportes sometidos a cargas sísmicas es estable. Por tanto, si los soportes tienen suficiente armadura de refuerzo lateral, son estables a corto y largo plazo.

Zohrevand et al. (2012) [125]

Plantean una investigación experimental donde ensayan bajo carga cíclica soportes de sección circular, tipo ménsula, fabricados con hormigones híbridos de UHPFRC y de FRP (*Fiber Reinforced Polimers*).

En la Figura II.32 se muestra el esquema de ensayo y las características de los soportes ensayados.

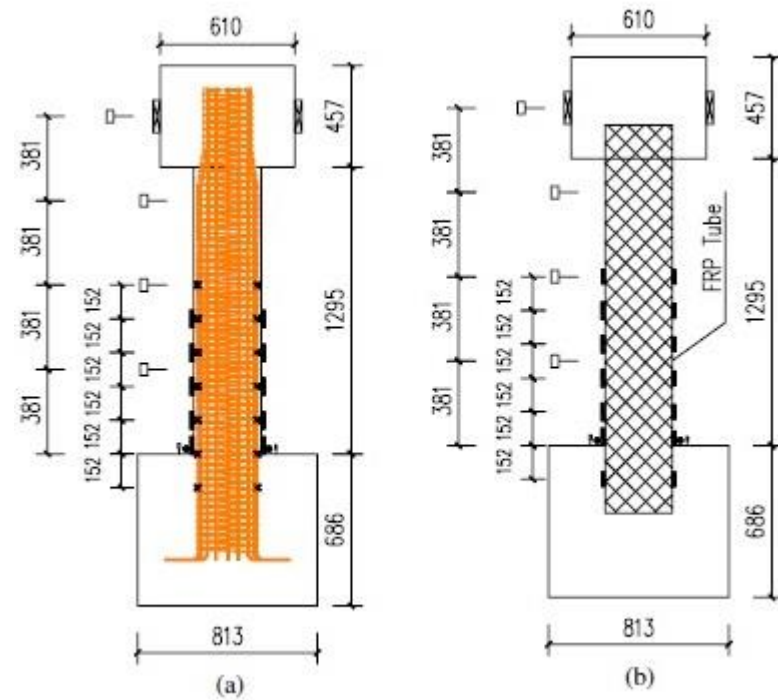


Figura II.34 Geometría de los soportes, Zohrevand et al. (2012) [125]



Figura II.35 Pórtico de ensayo, Zohrevand et al. (2012) [125]

Variables estudiadas (del soporte de UHPFRC)

- Resistencia a compresión (f_c): 151.7 MPa
- Volumen de fibras: 2 %

Conclusiones de los autores

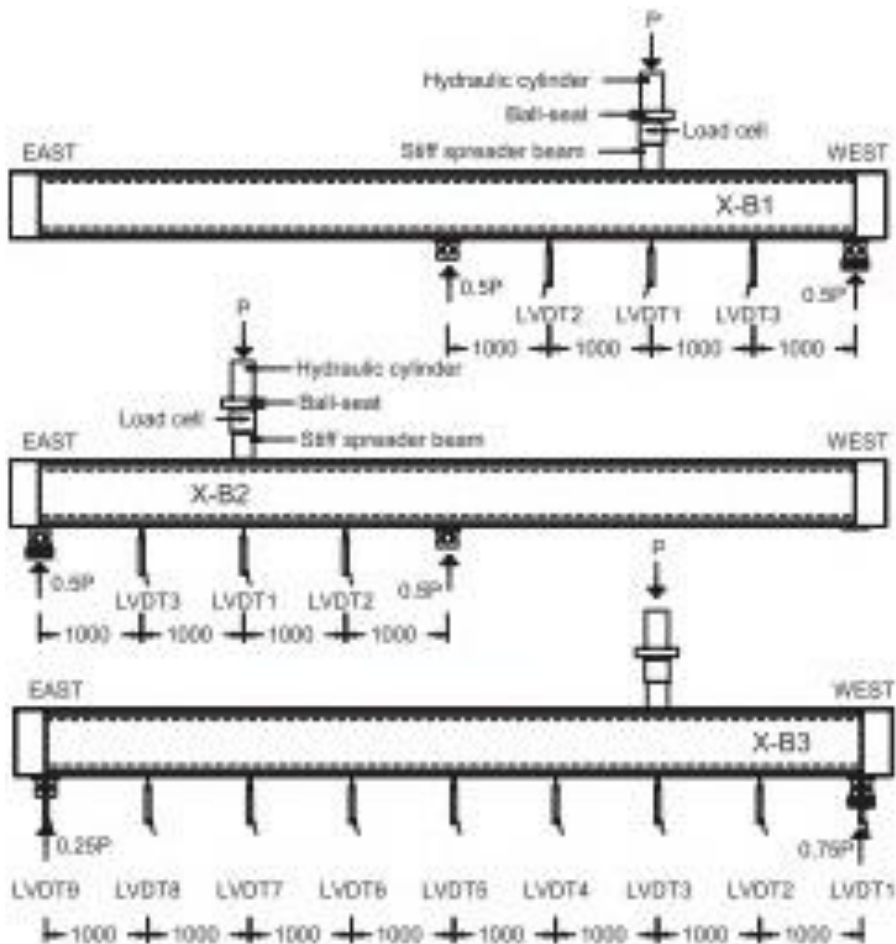
El soporte realizado con UHPRC presenta microfisuración, con ausencia de salto de recubrimiento desconchado a diferencia del hormigón convencional. Por otro lado, sustituir el hormigón convencional por UHPRC dentro de la rótula plástica incrementa de forma notable la rigidez y la resistencia, siendo interesante su utilización para bajar la necesidad de armadura. La mayor resistencia del hormigón permite una baja cuantía de armadura de confinamiento. Se necesitaría ampliar la investigación para determinar la cuantía de armadura mínima a disponer.

Voo et al. (2010) [118]

Ensayan 8 vigas pretensadas de 8.60 m de longitud sin armadura transversal. Aunque el objetivo principal es el estudio del cortante, resulta interesante por tratarse de hormigón con fibras con resistencias a compresión en el rango de estudio de este trabajo.

Tipo de ensayo

En la Figura II.33 se puede observar la configuración experimental empleada para materializar el ensayo bajo carga monotónica a flexión simple, que no es tipo unión sino tipo viga.



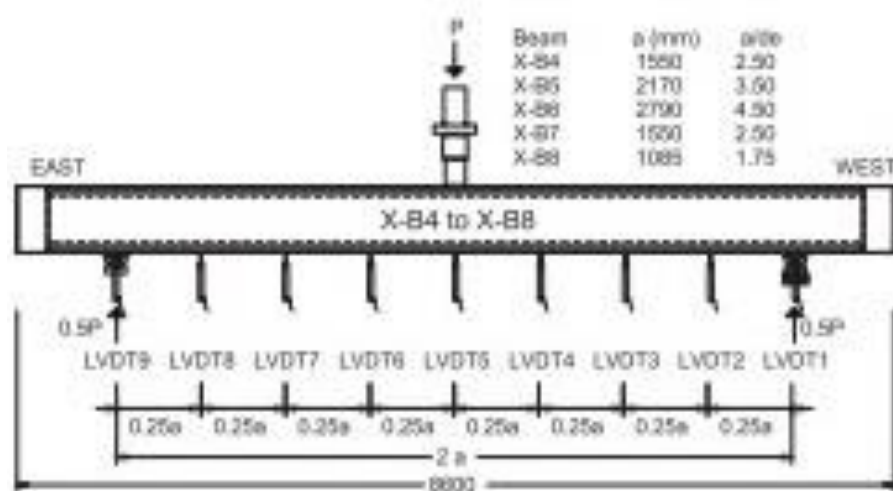


Figura II.36 Configuración del ensayo Voo et al. (2010) [118]

Variables estudiadas

- Resistencia a compresión (f_c): entre 122 y 140 MPa
- Volumen de fibras: 1 y 1.5 %
- Esbeltez a cortante (λ_v): entre 1.8 y 4.5

Conclusiones de los autores

La teoría de la plasticidad es una buena base para el diseño a cortante en este tipo de hormigones, así como el uso de un alto volumen de fibras en la matriz de hormigón que da lugar a una relativa respuesta plástica después del comienzo de la fisuración de la matriz, aumentando la resistencia a tracción y manteniendo abiertas las fisuras.

Takatsu et al. (2006) [116]

Estudian las características mecánicas y el comportamiento sísmico de soportes de hormigón reforzado con fibras. Ensayan 10 soportes bajo carga cíclica usando UHPFRC de 150 MPa. En la Figura II.34 se muestra la disposición del ensayo.

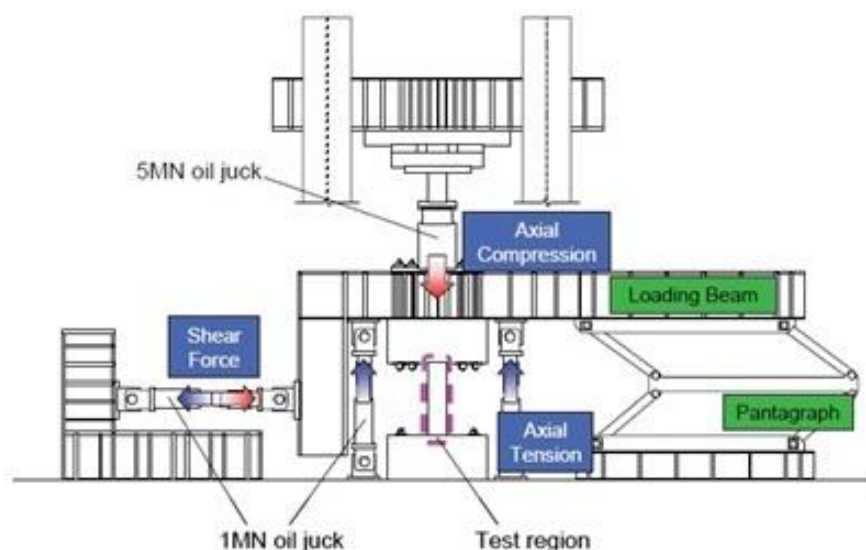


Figura II.37 Pórtico de ensayo y forma de carga sobre el elemento. Takatsu et al. (2006) [116]

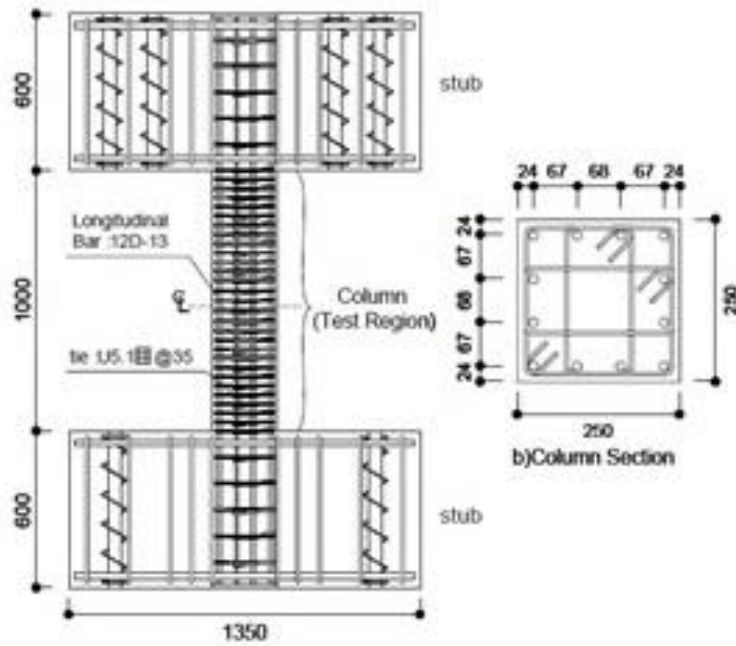


Figura II.38 Detalles del soporte, Takatsu et al. (2006) [116]

VARIABLES ESTUDIADAS

- Resistencia a compresión (f_c): entre 147.5 y 157.9 MPa
- Cuantía de la armadura longitudinal (ρ_l): 2.58 y 2.74 %
- Límite elástico de la armadura (f_y): entre 709 y 1278 MPa
- Volumen de fibras: 0, 1, 1.5 y 3 %
- Separación de la armadura transversal (s_t): entre 70 y 140 mm
- Nivel de axil aplicado: entre 0.3 y 0.6

CONCLUSIONES DE LOS AUTORES

Las fibras de acero dentro de la matriz de hormigón incrementan la capacidad de carga lateral, y, cuando el volumen de fibras aumenta, la resistencia de las columnas aumenta.

Bayrak (1998) [17]

En su tesis doctoral ensaya 24 soportes rectangulares de hormigón de alta resistencia con el fin de estudiar su comportamiento sísmico.

Tipo de ensayo

Ensayo bajo carga cíclica con carga axil de compresión aplicada. En la Figura II.35 se muestra el sistema de ensayo empleado, así como el tipo de elemento ensayado por el autor.

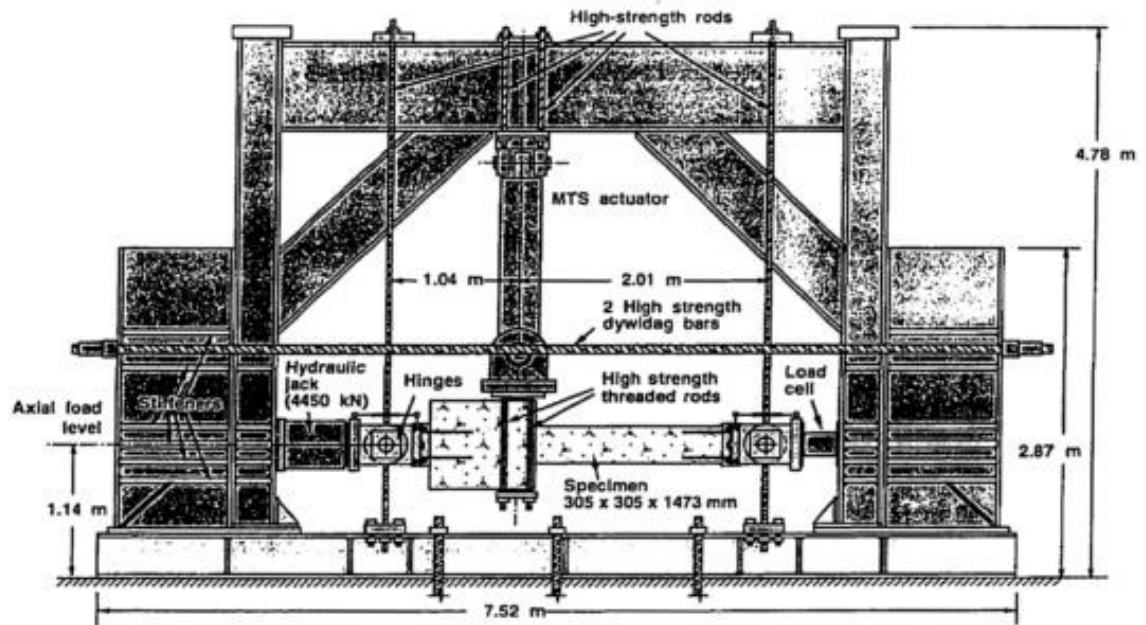


Figura II.39 Pórtico de ensayo y elemento a estudiar Bayrak (1998) [17]

En la Figura II.36 se muestran los distintos tipos de secciones y armados ensayados en este trabajo de investigación.

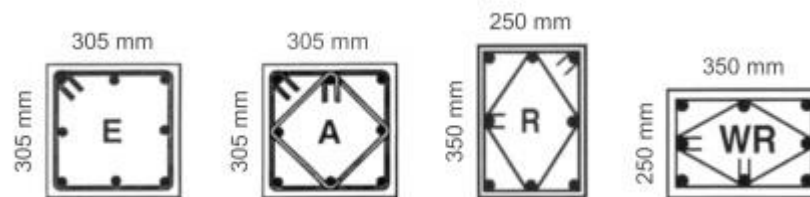


Figura II.40 Dimensiones y armados de las secciones de los soportes ensayados

Variables estudiadas

- Resistencia a compresión (f_c): entre 56.2 y 112.1 MPa
- Cuantía de la armadura longitudinal (ρ_l): 2.58 y 2.74 %
- Límite elástico de la armadura (f_y): 454 y 521 MPa
- Separación de la armadura transversal (s_t): entre 70 y 140 mm
- Nivel de axil aplicado: entre 0.32 y 0.52
- Distintas esbelteces a cortante (λ_v)
- Volumen de fibras: 0 %

Conclusiones del autor

Por un lado, el incremento del nivel de axil reduce la deformabilidad de los soportes y acelera la degradación de la rigidez con cada ciclo de carga; para compensar este efecto es necesario disponer mayor cuantía de armadura lateral.

Por otra parte, el autor apunta que se debe considerar incorporar el nivel de axil como parámetro importante en el diseño del hormigón confinado.

Finalmente, factores de ductilidad en curvatura similares pueden responder a diferentes factores de ductilidad en desplazamiento en función de la geometría de la sección y la esbeltez a cortante. Se observa que el factor de ductilidad en desplazamiento disminuye cuando se incrementa la esbeltez a cortante ($\lambda_v=L/h$). Los parámetros de ductilidad del elemento se ven influenciados significativamente por la geometría de la sección y la esbeltez a cortante, mientras que los índices de ductilidad de la sección no se ven afectados.

Adicionalmente, se han consultado los documentos que figuran en la Tabla II.1 por ser unos estados del arte de la materia tratada completos y actualizados. Las referencias de estos documentos pueden ser consultados en el Capítulo de Referencias al final de este trabajo.

Tabla II.1. Estados del Arte consultados

AÑO	AUTOR	TÍTULO
2014	[69] Khayat et al	Mechanical properties of self-compacting concrete
2014	[58] Fehling et al	Ultra-High Performance Concrete UHPC
2013	[107] Russel et al	Ultra-High Performance Concrete : A State-of-the-Art Report for the Bridge Community
2012	[85] Nematollahi et al	A Review on Ultra High Performance 'ductile' Concrete (UHPdC) Technology.
2009	[119] Walraven, J	High Performance Fiber Reinforced Concrete: Progress in Knowledge and Design Codes.

En las Tablas II.2 a II.5, se recogen las investigaciones encontradas que han sido excluidas por no estar directamente relacionadas con el tema buscado. Por un lado, se recogen para dar una visión de los temas que se están investigando sobre ductilidad o UHPFRC en los últimos años, y por otro, se complementa el trabajo previamente realizado por Caballero [26].

Tabla II.2. Relación de investigaciones experimentales consultadas adicionales (1/4)

AÑO	AUTOR	TÍTULO	CARGA	ELEMENTO	fc (MPa)
2015	[82] Melo, J	Experimental cyclic behaviour of RC columns with plain bars and proposal for Eurocode 8 formula improvement	cíclica y monotónica	Soporte en ménsula	17,1 ≤ fc ≤ 21,2
2014	[[7] Arslan, G	Shear strength of Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC) slender beams	monotónica	Viga biapoyada	20,6 ≤ fc ≤ 68,6
2014	[[9] Aviram, A	High-Performance Fiber-Reinforced Concrete Bridge Columns under Bidirectional Cyclic Loading	cíclica	Soporte en ménsula	35,1 ≤ fc ≤ 47,3
2014	[71] Kim, Y	Flexural performance of reinforced concrete beams strengthened with strain-hardening cementitious composite and high strength reinforcing steel bar	monotónica	Viga de RC refor con UHPFRC	-
2014	[78] Makita, T	Bending fatigue test of R-UHPFRC – RC composite beams Doctoral assistant Tohru Makita Professor Eugen Brühwiler Lausanne , February 2014	monotónica	Viga en ménsula	≥ 200
2014	[88] Osorio, LI	Seismic Behavior of Synthetic Fiber-Reinforced Circular Columns	cíclica	Soporte en ménsula	30
2013	[5] Al-jeabory, J	Ultimate Capacity of Reinforced Self Compacting Concrete Columns Subjected to Transverse Cyclic Loads	cíclica	Soporte	23, 57 y 25,42
2013	[10] Baby, F	Shear Behavior of Ultrahigh Performance Fiber-Reinforced Concrete Beams. I, II: Experimental Investigation	monotónica	Vigas pref pretensada	UHPFR C
2013	[28] Caballero, K	An experimental study of steel fiber-reinforced high-strength concrete slender columns under cyclic loading	cíclica	Conexión soporte-viga	≤ 100

Tabla II.3. Relación de investigaciones experimentales consultadas adicionales (2/4)

AÑO	AUTOR	TÍTULO	CARGA	ELEMENTO	fc (MPa)
2013	[32] Chalioris, C.	Steel fibrous RC beams subjected to cyclic deformations under predominant shear	cíclica	Viga biapoyada	Volumen de fibras variable
2013	[61] Germano, F	Experimental Study on the Behavior of Sfrc Columns Under Seismic Loads	cíclica	Soporte en ménsula	≤ 50,46
2013	[64] Hamrat, M	Transverse Reinforcement Effects on the Loading Behaviour of High Performances Concrete Beams	monotónica	Viga biapoyada	44, 65 y 86
2013	[87] Noshiravani, T	Rotation capacity and stress redistribution ability of R-UHPFRC–RC composite continuous beams: an experimental investigation	monotónica	Viga de RC refor con UHPFRC	228
2013	[86] Noshiravani, T	Experimental Investigation on Reinforced Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete Composite Beams Subjected to Combined Bending and Shear	monotónica	Viga de RC refor con UHPFRC	-
2013	[90] Pan, JL	Seismic Behaviors of Ecc/Concrete Composite Beam-Column Joints Under Reversed Cyclic Loading	cíclica	Unión soporte-viga	49,6 y 52,4
2013	[104] Rodsin, K	Seismic Performance Enhancement of Non-ductile RC Columns using Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC)	cíclica	Soporte en ménsula	23,5
2013	[113] Shin et al	Effectiveness of low-cost fiber-reinforced cement composites in hollow columns under cyclic loading	cíclica	Soporte hueco	24,6 ≤ fc ≤ 47,4

Tabla II.4. Relación de investigaciones experimentales consultadas (3/4)

AÑO	AUTOR	TÍTULO	CARGA	ELEMENTO	fc (MPa)
2013	[104] Rodsin, K	Seismic Performance Enhancement of Non-ductile RC Columns using Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC)	cíclica	Soporte en ménsula	23,5
2013	[113] Shin et al	Effectiveness of low-cost fiber-reinforced cement composites in hollow columns under cyclic loading	cíclica	Soporte hueco	24,6 ≤ fc ≤ 47,4
2013	[124] Zhang et al	Experimental and numerical investigation of the seismic performance of hollow rectangular bridge piers constructed with and without steel fiber reinforced concrete	cíclica	Soporte hueco	43,8
2013	[11] Bae et al	FE analysis of behavior of steel fibre reinforced Ultra-high strength concrete columns Under reversed cyclic loading	cíclica	Soporte	206,8
2012	[27] Caballero et al	Behaviour of steel-fibre-reinforced normal-strength concrete slender columns under cyclic loading	cíclica	Conexión soporte-viga	≤ 100
2012	[29] Cai et al	An Experimental Study on Ductility of Fiber-Strengthening Concrete	cíclica	Soporte	32
2012	[34] Cho et al	Cyclic responses of reinforced concrete composite columns strengthened in the plastic hinge region by HPFRC mortar	cíclica	Soporte hormigones mixto	28,7

Tabla II.5. Relación de investigaciones experimentales consultadas (4/4)

AÑO	AUTOR	TÍTULO	CARGA	ELEMENTO	fc (MPa)
2012	[51] Ding et al	Shear behaviour of steel fibre reinforced self-consolidating concrete beams based on the modified compression field theory	monotónica	Viga biapoyada	30 y 40
2012	[66] Hussein, M	Strength and ductility of RC beams strengthened with steel-reinforced strain hardening cementitious composites	monotónica	Viga de RC refor con UHPFRC	-
2012	[103] Rautenberg et al	Reconsidering the use of high-strength reinforcement in concrete columns	cíclica	Conexión soporte-viga	$28 \leq f_c \leq 69$
2012	[105] Röhm et al	Behaviour of fibre reinforced beam-column sub-assemblages under reversed cyclic loading	cíclica	Unión en T soporte-viga	< 90
2012	[117] Tavallali et al	Drift Limits of Concrete Frame Members Reinforced with High-performance Steel Bars and Fibers	cíclica	Conexión soporte-viga	41
2011	[50] Ding	The composite effect of steel fibres and stirrups on the shear behaviour of beams using self-consolidating concrete	monotónica	Viga biapoyada	50
2010	[121] Yang et al	Structural behavior of ultra high performance concrete beams subjected to bending	monotónica	Viga biapoyada	≤ 190
2005	[94] Parra et al	High-Performance Fiber-Reinforced Cement Composites: An Alternative for Seismic Design of Structures	cíclica	Conexión soporte-viga	HPFR CC

A modo de curiosidad, cabe comentar que, complementariamente a las investigaciones con elementos estructurales encontradas, existen varias investigaciones que se centran en la franja resistente del hormigón buscado, tanto a nivel de componentes del mismo como a nivel de su caracterización. Es lógico, que el interés investigador comience por el material antes que por el elemento. Dicha investigaciones no se han traído a este estado del conocimiento debido a que no son objeto de este estudio.

Finalmente, cabe añadir una reflexión recogida en el Anexo 12, "Comportamiento sísmico del UHPRFC", de las recomendaciones AFGC-SETRA (2013) [4], que textualmente dice: *"On the basis of current knowledge, it is not yet possible to fully adapt the specifications of Eurocode 8 for reinforced or prestressed concrete structures, to UHPRFC. Nevertheless, research studies have been conducted lately to determine the behaviour of UHPRFC under cyclic loading in order to investigate the possibilities of using UHPRFC in seismic areas. Both possibilities of seismic retrofitting using UHPRFC and dimensioning new seismic resistant structures have been investigated. Some key concepts can be kept as principles for design in seismic areas."*, que constituye una confirmación más del interés que despierta este tema.

II.5. Resumen y cuestiones sin resolver

Una vez revisada la bibliografía existente, relativa a los soportes de hormigones de altas prestaciones, se obtienen las siguientes conclusiones:

Desde hace una década se observa un incremento de investigaciones realizadas para soportes de alta resistencia ($f_c < 100$ MPa) sometidos a cargas cíclicas, y comienza un interés en el ensayo de hormigones con resistencias por encima de ese valor. Ahora bien, la mayoría de estudios se centran en hormigones por encima de los 150 MPa.

La mayoría de los métodos simplificados existentes en la normativa han sido desarrollados para hormigón convencional. En el caso de los hormigones de altas prestaciones, donde su comportamiento con respecto al hormigón convencional cambia considerablemente, está totalmente justificada la investigación en ese campo, para corroborar la validez de los métodos existentes y, en su defecto, trabajar en la definición de nuevos métodos más acordes con el nuevo comportamiento.

Con respecto a los parámetros que intervienen en la ductilidad de un elemento de hormigón armado, se ha corroborado que hay muy pocas investigaciones sobre soportes bajo carga cíclica fabricados con hormigones de altas prestaciones con fibras de acero, sometidos a niveles altos de axil, así como sobre la influencia de importantes parámetros que pueden afectar a la ductilidad, como son la esbeltez a cortante, la resistencia del hormigón y las cuantías de armaduras.

CAPÍTULO III

Importancia de la investigación y objetivos específicos

En este capítulo se justifica la importancia de la investigación y se plantean los objetivos específicos a alcanzar en el desarrollo de la presente tesis doctoral.

Tal como se ha podido constatar en el análisis de la literatura científico-técnica (Capítulo II), en el diseño de las estructuras sometidas a acciones sísmicas se suele recurrir a la capacidad de disipar la energía que tienen las estructuras con comportamiento dúctil.

En consecuencia, la deformación de los elementos de hormigón armado es de gran importancia para determinar el comportamiento de los mismos, sujetos a la combinación de acciones gravitatorias y laterales. En los últimos años se ha despertado un gran interés ya que aparecen novedosos procesos y métodos para la evaluación sísmica de estructuras, nuevas y existentes, que requieren la verificación de la capacidad de deformación en elementos de hormigón armado (Eurocódigo 8 (2011) [39], ASCE 41 (2013) [8]). En la actualidad, se aplica el criterio de proyecto por capacidad (Eurocódigo 8 (2011) [39]) en el diseño sísmico de las estructuras, el cual se basa en proteger los elementos y regiones frágiles de la estructura mediante un tratamiento adecuado de los elementos dúctiles para potenciar los mecanismos de rotura dúctiles. Por esta razón, se ha de asegurar que en las vigas se formen rótulas plásticas antes que en los soportes (“columna fuerte, viga débil”). Sin embargo, se ha constatado que en los extremos de los soportes se forman rótulas tras un seísmo (Hwang y Yun (2003) [67]), por lo que es necesario que los soportes de hormigón armado sean capaces de proporcionar una respuesta inelástica apreciable sin pérdida de capacidad portante.

En este contexto, y de acuerdo con el objetivo general de esta tesis doctoral, se pretende contribuir en este ámbito cubriendo diversos aspectos que resultan de gran importancia e interés dado el vacío experimental detectado, todo ello de cara a conocer el comportamiento de soportes bajo determinadas condiciones, a saber:

- Una mayor resistencia a compresión del hormigón (f_c) conduce a secciones de menor tamaño, lo que redundaría en un aumento de la esbeltez de los elementos estructurales y de los efectos de segundo orden asociados, al tiempo que se dificulta el hormigonado si las cuantías de armado son elevadas.
- Para niveles altos de axil es necesario disponer una cuantía importante de armadura transversal. Una posible solución (Paultre et al (2001) [96]) para evitar problemas de puesta en obra consiste en incluir fibras de acero en la masa de hormigón, pues de ese modo se puede reducir la cuantía de armadura transversal requerida por los códigos, especialmente en caso de diseño sísmico. Sin embargo, las expresiones propuestas por la normativa no tienen en cuenta este efecto favorable de las fibras de acero (EC-8 (2011) [39], ACI-318 (2014) [1]).
- Los ensayos experimentales disponibles se centran en soportes de hormigón armado (sin fibras) con esbeltez a cortante (λ_v) inferior a 6.5 (Panagiotakos y Fardis (2001) [91]). En la literatura técnica son escasos los ensayos de soportes fabricados con hormigón con fibras de acero sometidos a esfuerzos combinados de axil y carga lateral cíclica.
- El rango de resistencias a compresión de 100 a 150 MPa permite disponer de hormigones altamente competentes que pueden ser fabricados con medios, procesos y componentes accesibles y comunes en las empresas del ramo, sin necesidad de una gran adaptación tecnológica, facilitando la ejecución, y resultando claramente mucho más económicos que los UHPFRC. Por tanto, estos hormigones ofrecen un campo muy interesante de posibilidades ya que alcanzan resistencias a flexión y a compresión más que óptimas para las exigencias reales de la estructura y resultan más que recomendables teniendo en cuenta el peso, la durabilidad, la resistencia a la abrasión y el coste (Walraven (2009) [119]).

Por consiguiente, para el desarrollo de la investigación de esta tesis doctoral se contemplan los siguientes objetivos específicos:

- 1) Poner a punto un modelo y metodología de ensayo experimental que permita analizar la capacidad de resistencia y de deformación de soportes fabricados con hormigón de altas prestaciones.
- 2) Implementar un sistema de instrumentación y medida que permita obtener datos precisos y suficientes para lograr una interpretación adecuada del comportamiento de los soportes, especialmente en lo concerniente a la determinación de la capacidad resistente y de deformación.
- 3) Identificar los parámetros y sus rangos de variación a considerar en el programa de ensayos para el estudio experimental de soportes de hormigón de altas prestaciones sometidos a compresión y carga lateral cíclica.
- 4) Desarrollar un programa experimental suficientemente amplio para estudiar la influencia de los distintos parámetros analizados en el comportamiento de los soportes ensayados. El análisis se acometerá tanto de forma cualitativa como cuantitativa, así como de forma individual y agrupados por series. En particular se realizarán los siguientes estudios:
 - La capacidad resistente del elemento y de la sección.
 - La deformación de los materiales, de la sección, y del elemento en la situación de puntos de plastificación y rotura.
 - Identificación de tipos de fallos, en base a la resistencia y a la deformación de los materiales.
 - Evaluación de los índices de capacidad de deformación, las ductilidades de curvatura y de desplazamientos, y la longitud de rótula plástica.
- 5) Verificar el alcance y validez de los métodos simplificados existentes, en la bibliografía y en la normativa, para predecir la capacidad resistente, de deformación y ductilidad en el diseño y análisis de soportes de hormigón armado, teniendo en cuenta las características que presentan los elementos ensayados.

CAPÍTULO IV

Programa experimental

En este capítulo se recopilan las variables planteadas en esta tesis doctoral, así como la definición de los rangos de variación de los parámetros estudiados y la programación experimental a realizar.

También se recogen los materiales con los que se ha llevado a cabo la fabricación de los distintos soportes ensayados y los resultados de la caracterización de los mismos.

IV.1. Variables a analizar

Las variables a analizar y sus rangos de variación se han seleccionado tras realizar un estudio previo sobre los conceptos teóricos fundamentales del comportamiento estructural de los soportes, así como sobre los trabajos previos experimentales realizados en ese campo por el equipo de investigación.

Para el desarrollo del programa experimental de esta tesis doctoral se parte de unos parámetros comunes en todas las series estudiadas, como son: (1) las propiedades del acero, ya que se ha considerado el uso de acero B500 SD normalizado según EHE-08 [35]; y (2) la resistencia del hormigón (f_c) de todos los elementos a ensayar, fijada inicialmente en 130 MPa.

La relación de variables analizadas es la siguiente:

- Esbeltez a cortante (λ_v)
- Tipo de fibras de acero (I o II)
- Volumen de fibras de acero (V_f)
- Separación de la armadura transversal (s_t)
- Cuantía de la armadura longitudinal (ρ_l)
- Recubrimiento relativo (r/h)
- Nivel de carga axil (v)
- Tipo de carga lateral

Los rangos de variación para cada uno de los parámetros estudiados en el programa experimental son:

1. **Esbeltez a cortante (λ_v):** Se contemplan esbelteces de 5.77, 7.50 y 10.71. En ninguno de estos casos se pueden despreciar los efectos de segundo orden. Estos valores se corresponden con valores de esbeltez superiores a los existentes en la bibliografía. El EC-8-Parte 1 [39] es aplicable a soportes cuya esbeltez a cortante es inferior a 10, por lo que se analizan soportes con una esbeltez ligeramente superior al valor frontera indicado por esta normativa.
2. **Tipo de fibras de acero:** Se plantea comparar dos tipos de fibra de acero. El Tipo I (Mixta) está formado por una mezcla de fibras de dos tamaños, uno corto y otro largo, mientras que las fibras del Tipo II (Largas) son exclusivamente fibras del tamaño más largo de la mezcla anterior propuesta. Con esta variable se pretende analizar la influencia del tamaño de las fibras en el comportamiento en rotura.
3. **Volumen de fibras de acero (V_f):** El contenido de fibras de acero es de 75 y 150 kg/m³, lo que supone aproximadamente un volumen de fibras de acero por metro cúbico de hormigón de aproximadamente un 1 % y un 2 %, respectivamente.
4. **Separación de la armadura transversal (s_t):** El diámetro de la armadura transversal es 8 mm, siendo mayor que el especificado en EC-8-Parte 1 (2011) [39]. Según ACI-318 (2014) [1], para evitar el pandeo de la armadura longitudinal, la separación de la armadura transversal debe ser menor que $6 \cdot \phi_l$ (48 mm para un ϕ_8). Según EC-8-Parte 1 [39], dicha limitación depende del nivel de ductilidad que se quiera alcanzar, siendo igual a $8 \cdot \phi_l$ para la Clase de Ductilidad Media (DCM) y $6 \cdot \phi_l$ para la Clase de Ductilidad Alta (DCH). En el caso del soporte más esbelto, el diámetro de la armadura longitudinal

es un ϕ 8, por lo que según el nivel de ductilidad correspondería una separación de 64 mm y 48 mm, respectivamente. Para el elemento menos esbelto, cuyo diámetro de la armadura longitudinal es un ϕ 20, las separaciones según el nivel de ductilidad serían de 120 mm y 160 mm, respectivamente. Con todo ello, se han elegido las siguientes separaciones: 0.10, 0.20, 0.30, 0.40 y 0.50 m. Se han adoptado valores mayores que las separaciones que se indican en las normativas, con el fin de analizar el efecto favorable al comportamiento dúctil de la adición de fibras, junto a la armadura transversal, y al pandeo local de la armadura comprimida, asegurando una ductilidad mínima. Dichas separaciones se basan en los resultados previos obtenidos por el modelo mixto de determinación de la carga crítica de pandeo de las armaduras pasivas comprimidas propuesto por Pereiro et al. (2014) [99]. En todos los soportes el anclaje de la armadura transversal ha sido doblado 135° hacia el interior de la sección, siendo su longitud de $5 \cdot \phi_l > 50$ mm (Art. 8.5 del EC-8-Parte 1 [39]). Dicha longitud es menor que la indicada por ACI-318 [1], igual a $6 \cdot \phi_l > 76$ mm, para acciones sísmicas.

5. **Cuantía de la armadura longitudinal (ρ_l):** Se consideran cuatro cuantías efectivas de armadura longitudinal: 1.0%, 2.0%, 2.5% y 4.0%. La primera de las cuantías se dispone en soportes de esbelteces a cortante de 5.77, 7.50 y 10.75, mientras que la cuantía del 2% se dispone en el caso de un elemento de esbeltez a cortante de 5.77 y las dos últimas cuantías efectivas, en el caso de esbeltez a cortante de 7.50. Las cuantías se han elegido con el objeto de comparar la capacidad de deformación entre los ensayos a igualdad del resto de parámetros, y cubren el rango de valores señalados por EC-8-Parte 1 [39] (entre el 1% y el 4%) y gran parte del rango de cuantías contemplado en ACI-318 [1] (entre el 1% y el 6%). Los diámetros de la armadura longitudinal (ϕ_l) seleccionados son 8, 10, 12, 16 y 20 mm, siendo superiores a las especificaciones indicadas por el EC-8-Parte I (2011) [39].
6. **Recubrimiento relativo (r/h):** El recubrimiento relativo se obtiene como la relación entre el recubrimiento mecánico (r), distancia desde el exterior al centro de gravedad de la armadura longitudinal, y el canto de la sección (h). Se proponen los siguientes recubrimientos relativos: 0.09, 0.10, 0.14, 0.15, 0.16 y 0.17.
7. **Axil nominal reducido (v):** Se han considerado cinco niveles: 0, 0.1, 0.2, 0.3 y 0.4. El EC-8-Parte 1 [39] indica que el axil reducido no debe exceder de 0.65 en el caso de diseñar el soporte con una ductilidad media (DCM), ni de 0.55 en el caso de diseñarlo con una ductilidad alta (DCH). Además, según EHE-08 (Anejo 10) [35] y ACI-318 [1], el axil mínimo a considerar en soportes sometidos a acciones sísmicas es de 0.10. Por tanto, dentro del rango previsto se ha incluido un nivel de axil reducido inferior al valor indicado por esta normativa.
8. **Tipo de carga lateral:** Los tipos de carga lateral a aplicar son monotónica y cíclica. La carga lateral de forma cíclica actúa sobre todos los soportes excepto en uno de ellos, que se ensaya con carga lateral monotónica, a igualdad del resto de los parámetros, para permitir la comparación.

IV.2. Series de ensayos

Una vez definidas las distintas variables a estudiar y los rangos de las mismas, se plantean las distintas series de ensayo, con el objetivo de analizar su influencia sobre la deformabilidad de la pieza, la ductilidad y la capacidad resistente de la misma.

Se planifican 5 series de ensayos, que a su vez dan lugar a varias subseries:

- Serie 1: dentro de esta serie se varía la separación de la armadura transversal, el volumen de fibras de acero y el tipo de las mismas con el que se fabrica el hormigón.
- Serie 2: en esta serie, por un lado, se fija el nivel de axil y se varía la esbeltez a cortante de la pieza y, por otro, se plantean distintos niveles de reducción de axil manteniendo fija la esbeltez.
- Serie 3: en este caso se pretende analizar la influencia de la cuantía mecánica de la armadura longitudinal (ρ_l), y es por ello que se plantea, para dos separaciones de armadura transversal, distintos valores de ρ_l .
- Serie 4: la variación del recubrimiento relativo se analiza en esta serie. Se plantea el análisis desde dos puntos de vista: en el primero se fija la separación de la armadura transversal y se varía la cuantía mecánica de la armadura longitudinal, mientras que en el segundo se programa lo contrario.
- Serie 5: por último, se hace una comparación del tipo de carga lateral que actúa sobre el soporte, por un lado aplicándola de forma cíclica y por otro monotónica.

Según las series planteadas, el desarrollo del programa experimental supone la planificación de un total de 24 ensayos. Sin embargo, al final de la campaña se llevaron a cabo 26 ensayos, pues se repitió un soporte (AS11-2R) debido a que en el original se detectaron fallos de medida de la instrumentación (AS11-2) y, debido a un error de dosificación (AS11-22), un soporte resultó ser una duplicación de uno ya ensayado (AS11-1).

La nomenclatura empleada para identificar los distintos soportes está formada por dos códigos alfanuméricos separados por un guión (XYxy-xy). La parte izquierda identifica el tipo de ferralla que conforma el soporte, y la derecha el número de orden del elemento planificado según la campaña experimental. Por ejemplo, AS21-10 corresponde al segundo tipo de ferralla definido y al décimo soporte planificado. Los distintos tipos de ferralla se pueden consultar en el Capítulo V de este documento.

En la Tabla IV.1 se muestran las características de los elementos ensayados, así como las variables propuestas y su agrupación en las series previamente definidas. Para una mejor optimización del coste del trabajo realizado se proyectan soportes que puedan ser analizados de forma común en varias series de estudio.

Tabla IV.1. Definición de los soportes y sus variables que forman las series del programa experimental

Serie	Referencia	b ₀ (m)	h (m)	Tipo fibra	V _f (%)	φ _t (mm)	s _t (m)	n	φ _l (mm)	λ _v	ρ _l (%)	r/h	Axil reducido (υ)	Tipo de carga
1	AS11-1	0,15	0,26	I	2%	8	0,30	4	12	5,77	1,16%	0,15	0,20	Cíclica
	AS11-22	0,15	0,26	I	2%	8	0,30	4	12	5,77	1,16%	0,15	0,20	Cíclica
	AS11-2	0,15	0,26	I	2%	8	0,20	4	12	5,77	1,16%	0,15	0,20	Cíclica
	AS11-2R	0,15	0,26	I	2%	8	0,20	4	12	5,77	1,16%	0,15	0,20	Cíclica
	AS11-3	0,15	0,26	I	2%	8	0,10	4	12	5,77	1,16%	0,15	0,20	Cíclica
	AS11-20	0,15	0,26	I	2%	8	0,40	4	12	5,77	1,16%	0,15	0,20	Cíclica
	AS11-21	0,15	0,26	I	2%	8	0,50	4	12	5,77	1,16%	0,15	0,20	Cíclica
	AS11-4	0,15	0,26	II	2%	8	0,30	4	12	5,77	1,16%	0,15	0,20	Cíclica
	AS11-5	0,15	0,26	II	2%	8	0,20	4	12	5,77	1,16%	0,15	0,20	Cíclica
	AS11-6	0,15	0,26	II	2%	8	0,10	4	12	5,77	1,16%	0,15	0,20	Cíclica
	AS11-7	0,15	0,26	I	1%	8	0,30	4	12	5,77	1,16%	0,15	0,20	Cíclica
AS11-8	0,15	0,26	I	1%	8	0,20	4	12	5,77	1,16%	0,15	0,20	Cíclica	
AS11-9	0,15	0,26	I	1%	8	0,10	4	12	5,77	1,16%	0,15	0,20	Cíclica	
2	AS21-10	0,15	0,20	I	2%	8	0,20	4	10	7,50	1,05%	0,14	0,20	Cíclica
	AS31-11	0,15	0,14	I	2%	8	0,20	4	8	10,71	0,96%	0,16	0,20	Cíclica
	AS21-12	0,15	0,20	I	2%	8	0,20	4	10	7,50	1,05%	0,14	0,10	Cíclica
	AS21-13	0,15	0,20	I	2%	8	0,20	4	10	7,50	1,05%	0,14	0,00	Cíclica
	AS21-23	0,15	0,20	I	2%	8	0,20	4	10	7,50	1,05%	0,14	0,30	Cíclica
	AS21-24	0,15	0,20	I	2%	8	0,20	4	10	7,50	1,05%	0,14	0,40	Cíclica
3	AS23-14	0,15	0,20	I	2%	8	0,20	4	16	7,50	2,68%	0,16	0,20	Cíclica
	AS24-15	0,15	0,20	I	2%	8	0,20	4	20	7,50	4,19%	0,17	0,20	Cíclica
	AS13-16	0,15	0,26	I	2%	8	0,30	4	16	5,77	2,06%	0,16	0,20	Cíclica
4	BS11-17	0,15	0,26	I	2%	8	0,30	4	12	5,77	1,16%	0,09	0,20	Cíclica
	BS11-18	0,15	0,26	I	2%	8	0,10	4	12	5,77	1,16%	0,09	0,20	Cíclica
	BS13-19	0,15	0,26	I	2%	8	0,30	4	16	5,77	2,06%	0,10	0,20	Cíclica
5	AS11-25	0,15	0,26	I	2%	8	0,30	4	12	5,77	1,16%	0,15	0,20	Monotónica

En las Tablas IV.2 y IV.9 se recogen las subseries que derivan de cada una de las series recogidas en el programa experimental.

Tabla IV.2. Serie 1: Separación de la armadura transversal (s_t)

Subserie	Referencia	b ₀ (m)	h (m)	Tipo fibra	V _f (%)	φ _t (mm)	s _t (m)	n	φ _l (mm)	λ _v	ρ _l (%)	r/h	Axil reducido (υ)	Tipo de carga
s _t	AS11-3	0,15	0,26	I	2%	8	0,10	4	12	5,77	1,16%	0,15	0,20	Cíclica
	AS11-2	0,15	0,26	I	2%	8	0,20	4	12	5,77	1,16%	0,15	0,20	Cíclica
	AS11-2R	0,15	0,26	I	2%	8	0,20	4	12	5,77	1,16%	0,15	0,20	Cíclica
	AS11-1	0,15	0,26	I	2%	8	0,30	4	12	5,77	1,16%	0,15	0,20	Cíclica
	AS11-22	0,15	0,26	I	2%	8	0,30	4	12	5,77	1,16%	0,15	0,20	Cíclica
	AS11-20	0,15	0,26	I	2%	8	0,40	4	12	5,77	1,16%	0,15	0,20	Cíclica
	AS11-21	0,15	0,26	I	2%	8	0,50	4	12	5,77	1,16%	0,15	0,20	Cíclica

Tabla IV.3. **Serie 1:** Tipo de Fibras

Subserie	Referencia	b ₀ (m)	h (m)	Tipo fibra	V _f (%)	φ _t (mm)	s _t (m)	n	φ _i (mm)	λ _v	ρ _i (%)	r/h	Axil reducido (v)	Tipo de carga
Tipo fibra	AS11-3 ^(*)	0,15	0,26	I	2%	8	0,10	4	12	5,77	1,16%	0,15	0,20	Cíclica
	AS11-2 ^(*)	0,15	0,26	I	2%	8	0,20	4	12	5,77	1,16%	0,15	0,20	Cíclica
	AS11-2R ^(*)	0,15	0,26	I	2%	8	0,20	4	12	5,77	1,16%	0,15	0,20	Cíclica
	AS11-1 ^(*)	0,15	0,26	I	2%	8	0,30	4	12	5,77	1,16%	0,15	0,20	Cíclica
	AS11-22 ^(*)	0,15	0,26	I	2%	8	0,30	4	12	5,77	1,16%	0,15	0,20	Cíclica
	AS11-6	0,15	0,26	II	2%	8	0,10	4	12	5,77	1,16%	0,15	0,20	Cíclica
	AS11-5	0,15	0,26	II	2%	8	0,20	4	12	5,77	1,16%	0,15	0,20	Cíclica
AS11-4	0,15	0,26	II	2%	8	0,30	4	12	5,77	1,16%	0,15	0,20	Cíclica	

^(*) soporte empleado en el análisis de varias series

Tabla IV.4. **Serie 1:** Volumen de fibras (V_f)

Subserie	Referencia	b ₀ (m)	h (m)	Tipo fibra	V _f (%)	φ _t (mm)	s _t (m)	n	φ _i (mm)	λ _v	ρ _i (%)	r/h	Axil reducido (v)	Tipo de carga
Vol. fibra	AS11-3 ^(*)	0,15	0,26	I	2%	8	0,10	4	12	5,77	1,16%	0,15	0,20	Cíclica
	AS11-2 ^(*)	0,15	0,26	I	2%	8	0,20	4	12	5,77	1,16%	0,15	0,20	Cíclica
	AS11-2R ^(*)	0,15	0,26	I	2%	8	0,20	4	12	5,77	1,16%	0,15	0,20	Cíclica
	AS11-1 ^(*)	0,15	0,26	I	2%	8	0,30	4	12	5,77	1,16%	0,15	0,20	Cíclica
	AS11-22 ^(*)	0,15	0,26	I	2%	8	0,30	4	12	5,77	1,16%	0,15	0,20	Cíclica
	AS11-9	0,15	0,26	I	1%	8	0,10	4	12	5,77	1,16%	0,15	0,20	Cíclica
	AS11-8	0,15	0,26	I	1%	8	0,20	4	12	5,77	1,16%	0,15	0,20	Cíclica
AS11-7	0,15	0,26	I	1%	8	0,30	4	12	5,77	1,16%	0,15	0,20	Cíclica	

^(*) soporte empleado en el análisis de varias series

Tabla IV.5. **Serie 2:** Esbeltez a cortante (λ_v)

Subserie	Referencia	b ₀ (m)	h (m)	Tipo fibra	V _f (%)	φ _t (mm)	s _t (m)	n	φ _i (mm)	λ _v	ρ _i (%)	r/h	Axil reducido (v)	Tipo de carga
λ _v	AS11-2 ^(*)	0,15	0,26	I	2%	8	0,20	4	12	5,77	1,16%	0,15	0,20	Cíclica
	AS11-2R ^(*)	0,15	0,26	I	2%	8	0,20	4	12	5,77	1,16%	0,15	0,20	Cíclica
	AS21-10	0,15	0,20	I	2%	8	0,20	4	10	7,50	1,05%	0,14	0,20	Cíclica
	AS31-11	0,15	0,14	I	2%	8	0,20	4	8	10,71	0,96%	0,16	0,20	Cíclica

^(*) soporte empleado en el análisis de varias series

Tabla IV.6. **Serie 2:** Nivel de axil aplicado (v)

Subserie	Referencia	b ₀ (m)	h (m)	Tipo fibra	V _f (%)	φ _t (mm)	s _t (m)	n	φ _i (mm)	λ _v	ρ _i (%)	r/h	Axil reducido (v)	Tipo de carga
Axil reducido (v)	AS21-13	0,15	0,20	I	2%	8	0,20	4	10	7,50	1,05%	0,14	0,00	Cíclica
	AS21-12	0,15	0,20	I	2%	8	0,20	4	10	7,50	1,05%	0,14	0,10	Cíclica
	AS21-10 ^(*)	0,15	0,20	I	2%	8	0,20	4	10	7,50	1,05%	0,14	0,20	Cíclica
	AS21-23	0,15	0,20	I	2%	8	0,20	4	10	7,50	1,05%	0,14	0,30	Cíclica
	AS21-24	0,15	0,20	I	2%	8	0,20	4	10	7,50	1,05%	0,14	0,40	Cíclica

^(*) soporte empleado en el análisis de varias series

Tabla IV.7. Serie 3: Cuantía de la armadura longitudinal (ρ_l)

Subserie	Referencia	b_0 (m)	h (m)	Tipo fibra	V_f (%)	ϕ_t (mm)	s_t (m)	n	ϕ_l (mm)	λ_v	ρ_l (%)	r/h	Axil reducido (v)	Tipo de carga
ρ_l (%) h= 0,20 m st= 0,20 m	AS21-10 ^(*)	0,15	0,20	I	2%	8	0,20	4	10	7,50	1,05%	0,14	0,20	Cíclica
	AS23-14	0,15	0,20	I	2%	8	0,20	4	16	7,50	2,68%	0,17	0,20	Cíclica
	AS24-15	0,15	0,20	I	2%	8	0,20	4	20	7,50	4,19%	0,17	0,20	Cíclica

^(*) soporte empleado en el análisis de varias series

Subserie	Referencia	b_0 (m)	h (m)	Tipo fibra	V_f (%)	ϕ_t (mm)	s_t (m)	n	ϕ_l (mm)	λ_v	ρ_l (%)	r/h	Axil reducido (v)	Tipo de carga
ρ_l (%) h= 0,26 m st= 0,30 m	AS11-1 ^(*)	0,15	0,26	I	2%	8	0,30	4	12	5,77	1,16%	0,15	0,20	Cíclica
	AS11-22 ^(*)	0,15	0,26	I	2%	8	0,30	4	12	5,77	1,16%	0,15	0,20	Cíclica
	AS13-16	0,15	0,26	I	2%	8	0,30	4	16	5,77	2,06%	0,16	0,20	Cíclica

^(*) soporte empleado en el análisis de varias series

Tabla IV.8. Serie 4: Recubrimiento relativo (r/h)

Subserie	Referencia	b_0 (m)	h (m)	Tipo fibra	V_f (%)	ϕ_t (mm)	s_t (m)	n	ϕ_l (mm)	λ_v	ρ_l (%)	r/h	Axil reducido (v)	Tipo de carga
r/h $\rho_l = 1,16$ % st= 0,10 m	BS11-18	0,15	0,26	I	2%	8	0,10	4	12	5,77	1,16%	0,09	0,20	Cíclica
	AS11-3 ^(*)	0,15	0,26	I	2%	8	0,10	4	12	5,77	1,16%	0,15	0,20	Cíclica

^(*) soporte empleado en el análisis de varias series

Subserie	Referencia	b_0 (m)	h (m)	Tipo fibra	V_f (%)	ϕ_t (mm)	s_t (m)	n	ϕ_l (mm)	λ_v	ρ_l (%)	r/h	Axil reducido (v)	Tipo de carga
r/h $\rho_l = 1,16$ % st= 0,30 m	BS11-17	0,15	0,26	I	2%	8	0,30	4	12	5,77	1,16%	0,09	0,20	Cíclica
	AS11-1 ^(*)	0,15	0,26	I	2%	8	0,30	4	12	5,77	1,16%	0,15	0,20	Cíclica
	AS11-22 ^(*)	0,15	0,26	I	2%	8	0,30	4	12	5,77	1,16%	0,15	0,20	Cíclica

^(*) soporte empleado en el análisis de varias series

Subserie	Referencia	b_0 (m)	h (m)	Tipo fibra	V_f (%)	ϕ_t (mm)	s_t (m)	n	ϕ_l (mm)	λ_v	ρ_l (%)	r/h	Axil reducido (v)	Tipo de carga
r/h $\rho_l = 2,06$ % st= 0,30 m	BS13-19	0,15	0,26	I	2%	8	0,30	4	16	5,77	2,06%	0,10	0,20	Cíclica
	AS13-16 ^(*)	0,15	0,26	I	2%	8	0,30	4	16	5,77	2,06%	0,16	0,20	Cíclica

^(*) soporte empleado en el análisis de varias series

Tabla IV.9. **Serie 5:** Tipo de carga aplicada

Subserie	Referencia	b_0 (m)	h (m)	Tipo fibra	V_f (%)	ϕ_t (mm)	s_t (m)	n	ϕ_l (mm)	λ_v	ρ_l (%)	r/h	Axil reducido (ν)	Tipo de carga
Tipo de carga	AS11-1 ^(*)	0,15	0,26	I	2%	8	0,30	4	12	5,77	1,16%	0,15	0,20	Cíclica
	AS11-22 ^(*)	0,15	0,26	I	2%	8	0,30	4	12	5,77	1,16%	0,15	0,20	Cíclica
	AS11-25	0,15	0,26	I	2%	8	0,30	4	12	5,77	1,16%	0,15	0,20	Monotónica

^(*) soporte empleado en el análisis de varias series

IV.3. Materiales utilizados

IV.3.1. Selección de materiales

Para la fabricación de los soportes incluidos dentro del programa experimental previsto, y para poder llevarlo a cabo en las condiciones planteadas en el mismo, se han seleccionado los siguientes materiales.

Cemento

El cemento seleccionado para la dosificación del hormigón es del tipo CEM I 42.5 R-SR, suministrado por la empresa Cemento Asland Lafarge, ensacado en sacos de 35 kg.

Áridos

Los áridos empleados en la fabricación del hormigón son dos tipos de arena silíceas (AF-T-0/4-S y AF-T-0/8-S), suministradas en sacos de 30 kg por la empresa Caolines La Piedra, SL.

Fibras de acero

Con respecto a las fibras de acero se ha recurrido a dos tipos de fibras, Dramix 13/0.5 y Dramix 80/30 BP, de 13 mm y 30 mm de longitud, respectivamente (Figura IV.1). El primer tipo corresponde a una fibra corta de geometría recta, *Straight*, y el segundo a un tamaño mayor de geometría conocida como *Hook end*. Ambas tipologías de fibras se suministran en sacos de 20 kg.



Figura IV.1. Tipo de fibras. Comparativa de tamaño de los distintos tipos

Humo de Sílice

El humo de sílice utilizado es un humo de sílice densificado, Elkem Microsilica Grade 940-D, disponible en sacos de 25 kg y suministrado por la empresa Elkem Materials.

Aditivos

Se emplea como aditivo un super-plastificante, Sika 20 HE, disponible en bidones de 25 l y facilitado por la empresa Sika.

Agua

El agua dosificada para la fabricación del hormigón se suministra directamente de las instalaciones de agua potable de la Universitat Politècnica de València.

Hormigón

Con los materiales detallados previamente se plantea la dosificación del hormigón, teniendo en cuenta por un lado que la mezcladora empleada para el amasado tiene una capacidad de 110 l, aunque se limita a un máximo de 105 l y, por otro lado, que como los áridos se suministran ensacados no será necesaria realizar la corrección de humedad.

Analizando las distintas geometrías planteadas en el programa experimental, se puede obtener el volumen necesario de hormigón para fabricar el soporte. En todos los casos, y adicionalmente como control del material, se fabricarán tres probetas de acompañamiento cilíndricas (15.90 l), cuatro cúbicas (4 l) y dos prismáticas (24.75 l) normalizadas.

Los elementos de sección 0.26 m x 0.15 m necesitan un volumen de hormigón de 142.5 l, mientras que los soportes de sección 0.20 m x 0.15 m precisan un volumen de 118.5 l y los más esbeltos, los de sección 0.14 m x 0.15 m, demandan un volumen de hormigón de 94.6 l.

Añadiendo al volumen de cada tipo de soporte lo que se necesita para las probetas de acompañamiento, resulta una demanda de 187.15 l, 163.15 l y 139.25 l, respectivamente.

Si además se tiene en cuenta que la amasadora no es 100% eficiente, sino que se produce una pérdida de material en el proceso, se adopta un coeficiente de mayoración de 1.1. Por tanto, un vez aplicado este factor, los volúmenes resultantes son de 205.9 l, 181.7 l y 153.2 l. Esto conlleva, en todos los casos, la realización de dos amasadas consecutivas.

En esta tesis doctoral se han realizado tres tipos de dosificaciones en función del tipo de fibra empleado y del volumen de las mismas, con el fin de conseguir un hormigón de muy altas prestaciones (130 MPa). Para la dosificación se han tomado como referencia los trabajos realizados por López (2012) [77], Serna et al. (2012) [110] y Camacho (2013) [30] modificada por el equipo de investigación del proyecto BIA 2012-32645 en el que se desarrolla la presente tesis doctoral.

A continuación se muestran las tres dosificaciones empleadas.

Tabla IV.10. Dosificaciones previstas para la realización del programa experimental

Volumen dosificado (1 l)	Tipo I Mixtas (2%)	Tipo I Mixtas (1%)	Tipo II Largas (2%)
CEM I 42.5 R-SR	1 kg	1 kg	1 kg
Agua	0,172 kg	0,172 kg	0,172 kg
Humo de Sílice 940 D	0,15 kg	0,15 kg	0,15 kg
Arena silícea (AF-T-0/4-S)	0,31 kg	0,31 kg	0,31 kg
Arena silícea (AF-T-0/8-S)	0,575 kg	0,575 kg	0,575 kg
Sika 20 HE	0,0285 kg	0,0285 kg	0,0285 kg
Fibras cortas (Straight) 13/0.5	0,09 kg	0,045 kg	-
Fibras largas (Hook End) 80/30	0,06 kg	0,03 kg	0,15 kg

Acero

Las armaduras utilizadas son barras corrugadas de acero tipo B 500 SD, tipificado según EHE-08. Las barras empleadas como armadura longitudinal comprenden los diámetros de 8, 10, 12, 16 y 20 mm, mientras que la armadura transversal de todas las ferrallas se elabora con barras corrugadas de 8 mm de diámetro.

IV.3.2. Caracterización de materiales

Se realiza la caracterización tanto del hormigón con el que se fabrican los elementos a ensayar como de los aceros empleados para fabricar la ferralla de los mismos.

Hormigón

Como se ha comentado en apartados anteriores el hormigón de todos los elementos tiene una resistencia nominal a compresión de 130 MPa.

Se realizan varios ensayos de caracterización de las distintas amasadas, algunos en el momento de amasar y otros a 28 días de su fabricación. En todos los casos las probetas de acompañamiento se fabrican y conservan siguiendo las recomendaciones de la norma UNE-83504:2004 [43].

Durante la fabricación del hormigón se efectúa, por amasada, el ensayo de escurrimiento siguiendo lo indicado en la norma UNE-83361 (2007) [46]. Las medidas obtenidas para cada amasada se puede consultar en la "Ficha de materiales" correspondiente a cada soporte (ver Anejo A). Además se fabrican probetas de control a 28 días, en concreto, tres probetas cilíndricas, cuatro cúbicas y dos prismáticas.

Las probetas cilíndricas, de diámetro 0.15 m y longitud de 0.30 m. Se destinan a la rotura a compresión simple según la norma UNE 83507:2004 [44], previo refrentado de las mismas siguiendo las indicaciones de la norma UNE 83506:2004 [45] (Figura IV.2, izquierda).

Las probetas cúbicas, de lado 0.10 m (Figura IV.2, derecha), también se destina a la rotura a compresión simple.

Las dos probetas prismáticas fabricadas tienen sección cuadrada de 0.15 m de lado y una longitud de 0.60 m (Figura IV.3). Estas probetas se ensayan a flexotracción siguiendo las indicaciones de la norma UNE EN-14651:2007+A1 [36]. Para ello previamente se realiza, mediante sierra, una entalla de 25 mm en la zona central de la pieza.



Figura IV.2. Ejemplo de probeta cilíndrica y cúbica realizada para control del hormigón



Figura IV.3. Ejemplo de probeta prismática realizada para control del hormigón

Los datos obtenidos, tanto de las probetas de control como de los distintos conos realizados, se pueden encontrar en las fichas de datos de los distintos soportes dentro del Anejo A, donde se incluyen los parámetros obtenidos en los distintos ensayos de acompañamiento, así como los valores de ensayos de escurrimiento de las distintas amasadas.

Los ensayos de compresión y de flexotracción se realizan con prensas IBERTEST calibradas para una correcta ejecución de los mismos (Figura IV.4).



Figura IV.4. Prensas para la ejecución de los ensayos a compresión simple y flexotracción.

En las Tablas IV.11, IV.12 y IV.13 se muestran los resultados más representativos obtenidos de las probetas de acompañamiento para los distintos soportes.

Los valores experimentales muestran una variación esperable de los resultados para el valor de f_{R3} (Tabla IV.11). Esta variación es debida al carácter aleatorio de la orientación de las fibras de

acero. En el ensayo de flexo-tracción, conforme la abertura de fisura aumenta el número de fibras de acero que cosen la misma disminuye, y en consecuencia, la dispersión de los valores residuales de la resistencia, f_{Ri} , muestran un mayor coeficiente de dispersión con la abertura de fisura al depender en mayor medida de la orientación de la fibras.

Tabla IV.11. Resultados obtenidos de los ensayos de acompañamiento del hormigón Tipo I (2%)

Tipo			Ensayos					
Tipo I - Mixtas (2%)			Compresión Simple (MPa)			Flexotracción (MPa)		
Referencia	Fabricación	Rotura	$f_{cm,cilindrica}$	$f_{cm,cubica}$	$E_{c,compresion}$	$f_{ct,LOP}^f$	f_{R1}	f_{R3}
AS11-1	17/06/2014	15/07/2014	132,66	151,23	45328,00	10,70	18,94	5,37
AS11-2	19/06/2014	17/07/2014	130,41	151,47	47431,00	10,09	18,46	5,25
AS11-3	24/06/2014	22/07/2014	119,35	151,55	45636,00	10,21	18,33	5,50
AS21-10	16/09/2014	14/10/2014	148,07	150,60	49084,00	9,49	16,98	4,35
AS31-11	17/10/2014	14/11/2014	128,95	159,59	43914,00	8,11	15,25	4,33
AS21-12	18/09/2014	17/10/2014	142,28	156,86	50882,00	7,66	13,45	3,34
AS21-13	23/09/2014	21/10/2014	133,98	147,01	48045,00	9,27	15,59	5,09
AS23-15	25/09/2014	24/10/2014	145,53	162,71	48671,00	7,62	12,49	5,11
AS24-15	08/10/2014	05/11/2014	127,93	146,19	43501,00	9,89	18,36	6,05
AS13-16	24/10/2014	21/11/2014	125,79	144,52	44309,00	10,77	19,08	6,32
BS11-17	28/10/2014	25/11/2014	121,87	154,08	45510,00	11,24	21,09	17,48
BS11-18	04/11/2014	02/12/2014	122,04	149,70	43829,00	8,92	16,56	12,31
BS13-19	05/11/2014	04/12/2014	123,21	147,26	43177,00	10,19	18,68	17,11
AS11-20	13/01/2015	09/02/2015	119,29	127,40	41791,00	9,25	16,69	12,39
AS11-21	15/01/2015	11/02/2015	126,44	132,83	41601,00	10,27	18,92	16,37
AS11-22	20/01/2015	16/02/2015	117,94	137,07	40950,00	6,99	16,29	11,46
AS21-23	16/12/2014	13/01/2015	121,70	140,00	42132,00	20,27		
AS21-24	29/01/2015	27/02/2015	133,32	147,24	44074,00	12,28	24,49	22,69
AS11-25	22/01/2015	18/02/2015	120,56	140,97	43087,00	10,46	20,41	20,81
AS11-2R	27/01/2015	24/02/2015	125,09	147,27	42817,00	12,20	22,26	21,60
Valor medio			128,32	147,28	44788,45	10,29	18,01	10,68
Desviación típica (σ)			8,77	8,60	2754,63	2,74	2,90	6,72
C. de Variación (Cv %)			6,84%	5,84%	6,15%	26,67%	16,11%	62,97%

Tabla IV.12. Resultados obtenidos de los ensayos de acompañamiento del hormigón Tipo I (1%)

Tipo			Ensayos					
I - Mixtas (1%)			Compresión Simple (MPa)			Flexotracción (MPa)		
Referencia	Fabricación	Rotura	$f_{cm,cilindrica}$	$f_{cm,cubica}$	$E_{c,compresion}$	$f_{ct,LOP}^f$	f_{R1}	f_{R3}
AS11-7	02/09/2014	30/09/2014	127.37	147.17	45168.00	7.52	11.43	2.88
AS11-8	04/09/2014	02/10/2014	130.60	152.32	47486.00	7.28	12.44	3.50
AS11-9	09/09/2014	07/10/2014	134.71	143.90	31097.00	7.21	13.56	3.35
Valor medio			130.89	147.79	41250.33	7.33	12.48	3.24
Desviación típica (σ)			3.68	4.25	8869.10	0.16	1.07	0.33
Coeficiente de Variación (Cv %)			2.81%	2.87%	21.50%	2.19%	8.56%	10.07%

Tabla IV.13. Resultados obtenidos de los ensayos de acompañamiento del hormigón Tipo II (2%)

Tipo			Ensayos					
II - Largas (2%)			Compresión Simple (MPa)			Flexotracción (MPa)		
Referencia	Fabricación	Rotura	$f_{cm,cilindrica}$	$f_{cm,cubica}$	$E_{c,compresion}$	$f_{ctL,LOP}^f$	f_{R1}	f_{R3}
AS11-4	26/06/2014	24/07/2014	125.19	141.98	43592.00	8.06	17.81	9.30
AS11-5	30/06/2014	28/07/2014	122.25	145.01	43891.00	8.42	16.95	9.15
AS11-6	02/07/2014	30/07/2014	121.63	140.91	45170.00	9.11	18.79	14.46
Valor medio			123.03	142.64	44217.67	8.53	17.85	10.97
Desviación típica (σ)			1.90	2.13	838.19	0.54	0.92	3.02
Coeficiente de Variación (Cv %)			1.55%	1.49%	1.90%	6.28%	5.14%	27.56%

Acero

La caracterización de las barras de acero utilizadas se realiza según norma UNE-EN ISO 6892-1 (2010) [42]. Para el desarrollo del programa experimental se han suministrado dos lotes de acero, tipificados como Lote 2 y Lote 3. Como ejemplo, en la gráfica siguiente (Figura IV.5). se observan las curvas comparativas para todos los diámetros utilizados pertenecientes al lote 2. En la Figura IV.6 se muestra el resultado de las armaduras tras el ensayo.

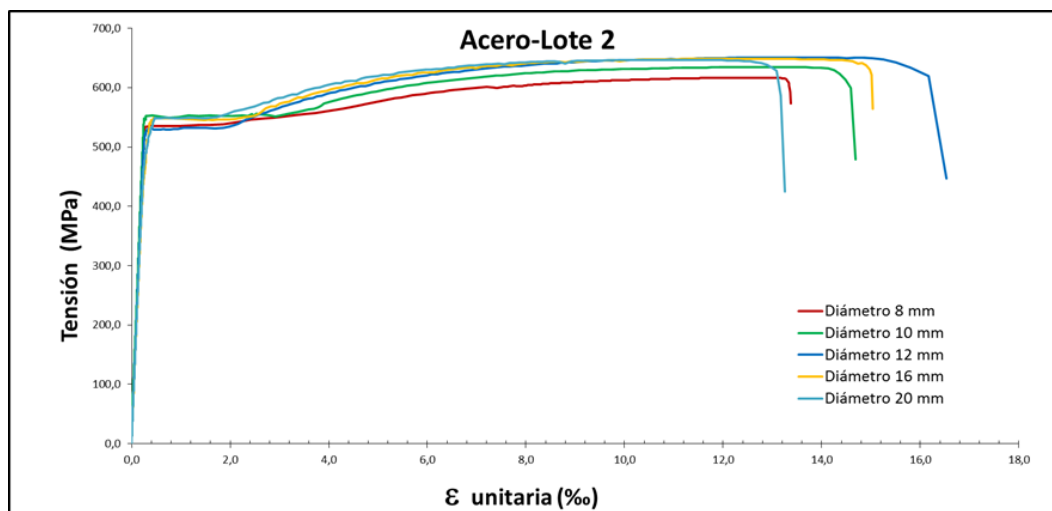


Figura IV.5. Gráficas tensión-deformación de los distintos aceros empleados



Figura IV.6. Ejemplo de barras de acero ensayadas a tracción según normativa. Lote 2

En las Tablas IV.14 y IV.15 se resumen los valores medios obtenidos para los distintos diámetros empleados en las ferrallas de los elementos fabricados, tanto para el lote 2 como para el lote 3.

Tabla IV.14. Valores medios de los distintos parámetros de las barras de acero del Lote 2

ϕ (mm)	Tipo	Módulo elasticidad (MPa)	f_s (MPa)	f_y (MPa)	f_s/f_y	ϵ_{sy} (‰)	ϵ_{smax} (‰)
8	B500SD	203732	617,29	534,61	1,15	2,63	12,56
10	B500SD	217906	630,12	552,31	1,14	2,54	12,20
12	B500SD	206853	651,48	528,03	1,23	2,55	13,82
16	B500SD	191503	648,87	548,45	1,18	2,86	12,28
20	B500SD	196105	647,25	543,04	1,19	2,77	10,79

Tabla IV.15. Valores medios de los distintos parámetros de las barras de acero del Lote 3

ϕ (mm)	Tipo	Módulo elasticidad (MPa)	f_s (MPa)	f_y (MPa)	f_s/f_y	ϵ_{sy} (‰)	ϵ_{smax} (‰)
8	B500SD	198360	646,46	550,50	1,17	2,78	28,20
10	B500SD	198939	633,10	544,05	1,16	2,74	33,48
12	B500SD	186727	686,41	577,00	1,19	3,09	17,00

CAPÍTULO V

Metodología experimental

Se presenta la información correspondiente al desarrollo de los ensayos de los soportes, tanto en lo concerniente a las distintas geometrías como a los materiales empleados. Se describe el procedimiento de ensayo y los sistemas utilizados, así como todo lo relativo al proceso de fabricación y manipulación de las probetas previo a la rotura, la instrumentación, el acopio, la manipulación y el control de los elementos ensayados. De la operativa llevada a cabo durante el ensayo, se describen todas las fases que se han ejecutado; desde que se recibe el material básico para la fabricación de los soportes hasta que el soporte se retira del pórtico de ensayo, finalizada la experimentación, incluyendo el desmontaje y traslado a su lugar de acopio para su posterior manipulación o transporte a vertedero.

V.1. Diseño del experimento

V.1.1. Elemento

El diseño del soporte que se va a ensayar representa la parte estructural de un edificio que correspondería, dentro de la estructura de una edificación, con la unión soporte-viga, soporte-forjado o soporte-cimentación.

En concreto, en esta tesis doctoral el diseño del elemento propuesto se basa en un entrepiso, específicamente en la unión de dos soportes conectados a un elemento rígido, definido en la literatura científico-técnica como *stub*. Con este diseño se intenta simular las condiciones reales de una estructura, tanto en lo que respecta a su capacidad de deformación como a su capacidad resistente.

Esta conexión rígida, simulada con el elemento a ensayar, representa la parte estructural del edificio que se encuentra sometida a carga axial de compresión constante (N) y a una carga lateral cíclica (S), Figura V.1.

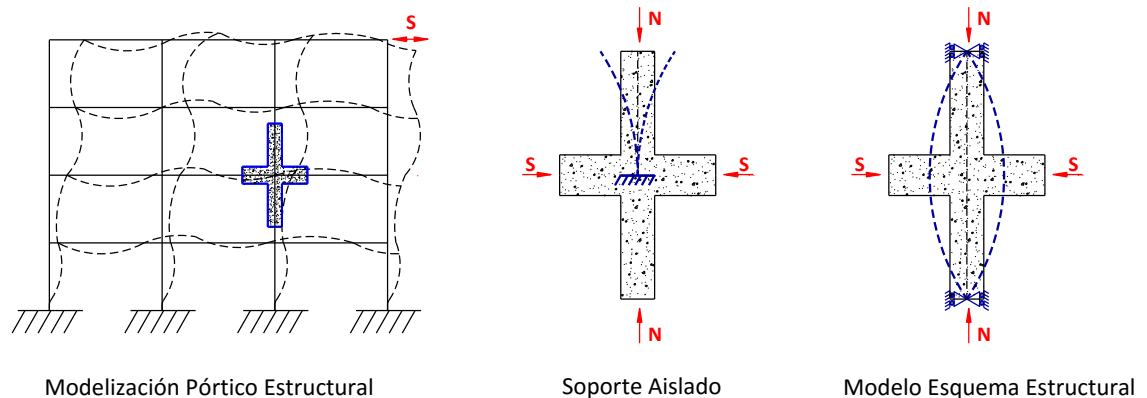


Figura V.1. Esquema del modelo de ensayo

El elemento a ensayar tiene una geometría que permite representar el soporte aislado antes mencionado, formado por un conjunto soporte-viga, ambos de sección rectangular, como se puede observar en la Figura V.2.

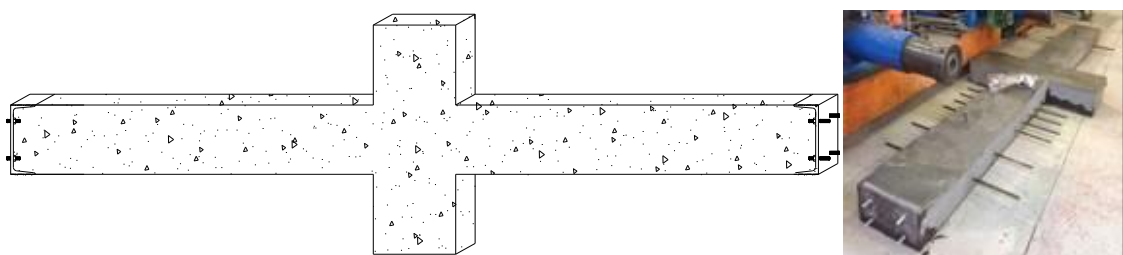


Figura V.2. Croquis de la geometría del elemento a ensayar e imagen de un elemento ya fabricado

La longitud entre apoyos es la misma en todos los ensayos realizados, siendo de 3.30 m entre apoyos de bastidor de carga. No obstante, la longitud del soporte de hormigón es de 2.96 m, por lo que de esta manera en cada extremo se dispone de un espacio libre de 0.17 m para disponer los perfiles UPN adaptados así como los elementos auxiliares de sujeción al pórtico de carga.

Otra magnitud longitudinal que se mantendrá constante entre los distintos elementos a ensayar es el ancho del *stub*, que será de 0.3 m. En la Figura V.3 se representa la definición geométrica longitudinal del soporte tipo.

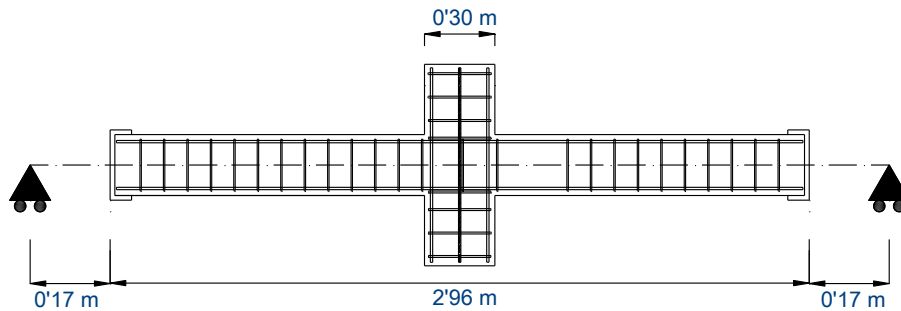


Figura V.3. Croquis de la definición geométrica longitudinal del soporte tipo (sin escala)

La sección transversal de hormigón de todos los elementos ensayados tiene como dimensión común el ancho de los mismos, que es de 0.15 m.

En cada serie de ensayos se definen unos cantos distintos tanto para el *stub* que simula la viga, así como para la parte que simula el soporte. En la Figura V.4 se recogen las distintas secciones de hormigón ensayadas.



Figura V.4. Secciones tipo de soporte y altura de *stub* correspondiente

Con respecto a la geometría de la armadura pasiva, se ha armado todos los soportes con cuatro armaduras longitudinales situadas en las esquinas, y con una armadura transversal, dispuesta exterior a ésta y a lo largo de su longitud, formada por cercos o estribos.

En uno de los lados del soporte se ha reforzado la armadura longitudinal con barras adicionales para garantizar que el fallo del elemento suceda por el lado más instrumentado.

De acuerdo con los parámetros propuestos en el programa experimental, se han generado ocho planos distintos de armado. A modo de ejemplo, se muestra en la Figura V.5 uno de los planos de armado.

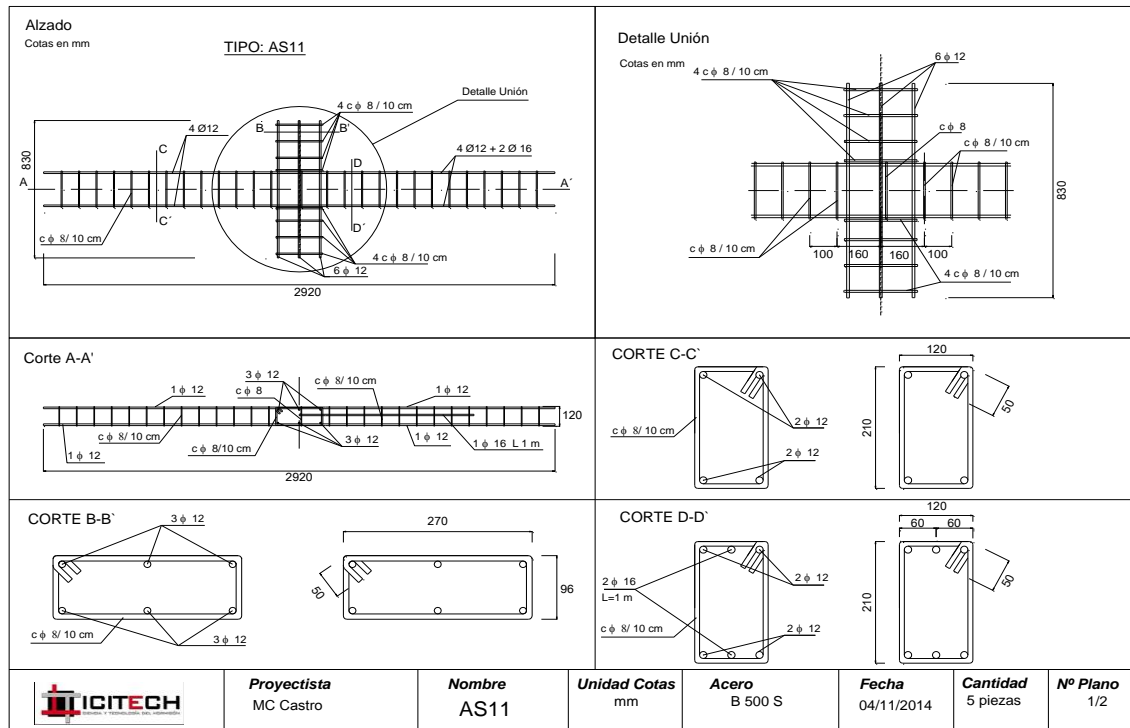


Figura V.5. Plano de armado elemento tipo AS11

De forma particular, se han establecido ocho secciones tipo de ferralla distintas para los elementos ensayados. En las Figuras V.6 y V.7 se pueden observar las distintas disposiciones de ferralla, así como su geometría.

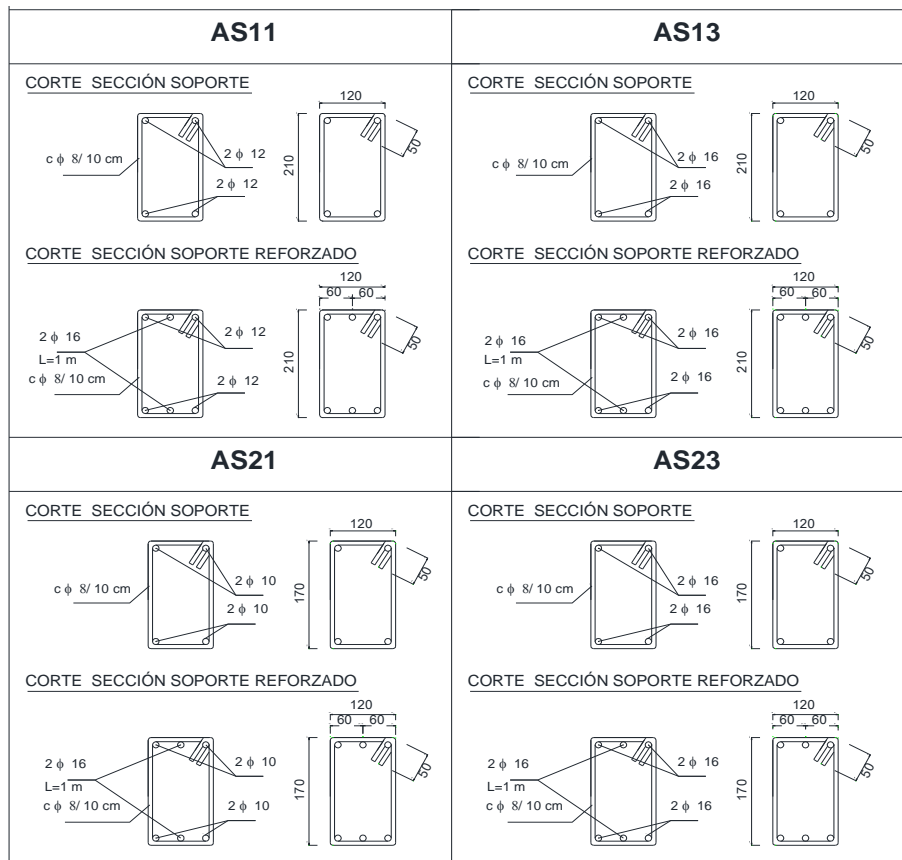


Figura V.6. Secciones tipo de ferralla (parte 1 de 2)

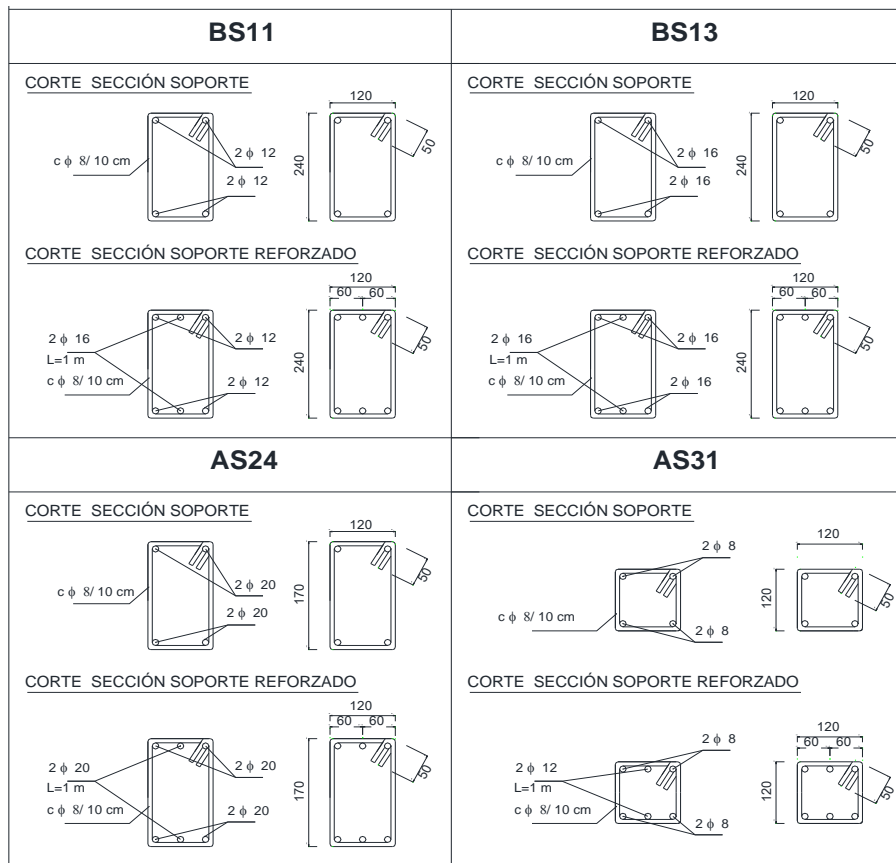


Figura V.7. Secciones tipo de ferralla (parte 2 de 2)

Con respecto a la sección tipo de la ferralla del *stub*, cabe destacar que es igual para todos los soportes. En la Figura V.8 se observa la disposición y dimensiones de las armaduras pasivas que forman la ferralla del mismo.

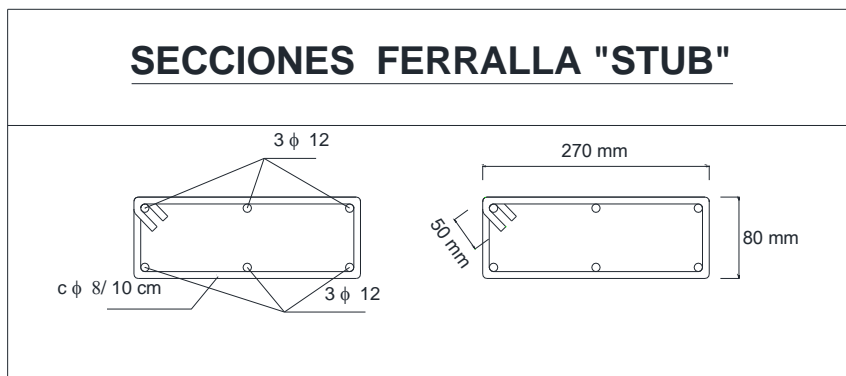


Figura V.8. Secciones tipo de ferralla

V.1.2. Sistema de cargas

En la fase experimental se ha utilizado un pórtico existente en el Laboratorio de ICITECH que ha sido modificado para la realización de este trabajo.

Este pórtico se diseñó para cargas monotónicas por Barrera (2012) [15] en el marco del proyecto de investigación “Estudio teórico-experimental de los efectos de 2º orden en

soportes de hormigón armado considerando la influencia de las regiones D en los extremos” (2002-2006). Dicho pórtico fue modificado por Caballero (2015) [26] para cargas cíclicas en el marco del proyecto de investigación “Estudio teórico-experimental de la ductilidad y de la capacidad de deformación de soportes de hormigón armado sometidos a compresión y carga cíclica” (BIA 2008-63734) financiado por el Ministerio de Educación. En 2010, Romero-García et al. (2012) [106] modificaron dicho pórtico para estudiar el comportamiento de la unión soporte-cimentación en el marco del proyecto “Diseño con criterios de ductilidad de uniones soporte-cimentación en elementos prefabricados de hormigón” (BIA 2009-10207). Finalmente, en 2013 se ha incluido un dispositivo adicional para mejorar el control del pandeo lateral en el marco de esta tesis doctoral y del proyecto de investigación “Estrategias de mejora de la ductilidad frente a acciones sísmicas de uniones de elementos prefabricados mediante el empleo de nuevos materiales” (BIA 2012-32645) financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad.

De forma general, en el esquema de la Figura V.9 se pueden observar los distintos componentes que conforman el pórtico de ensayo. Además, en la Figura V.10 se muestra una fotografía del pórtico de ensayo resaltando los elementos principales.

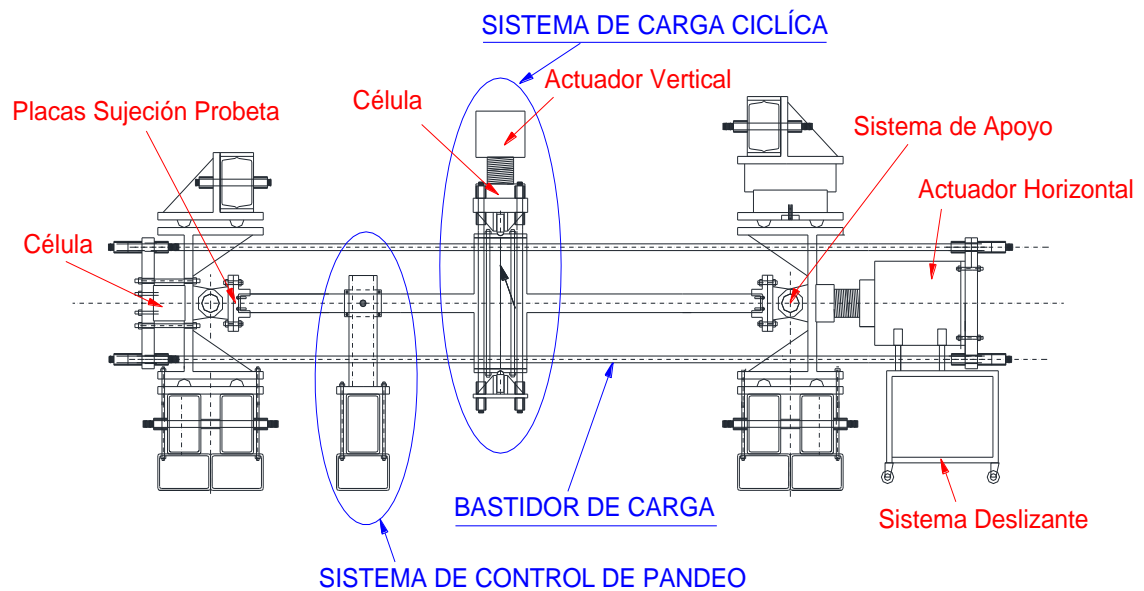


Figura V.9. Esquema del pórtico de ensayo

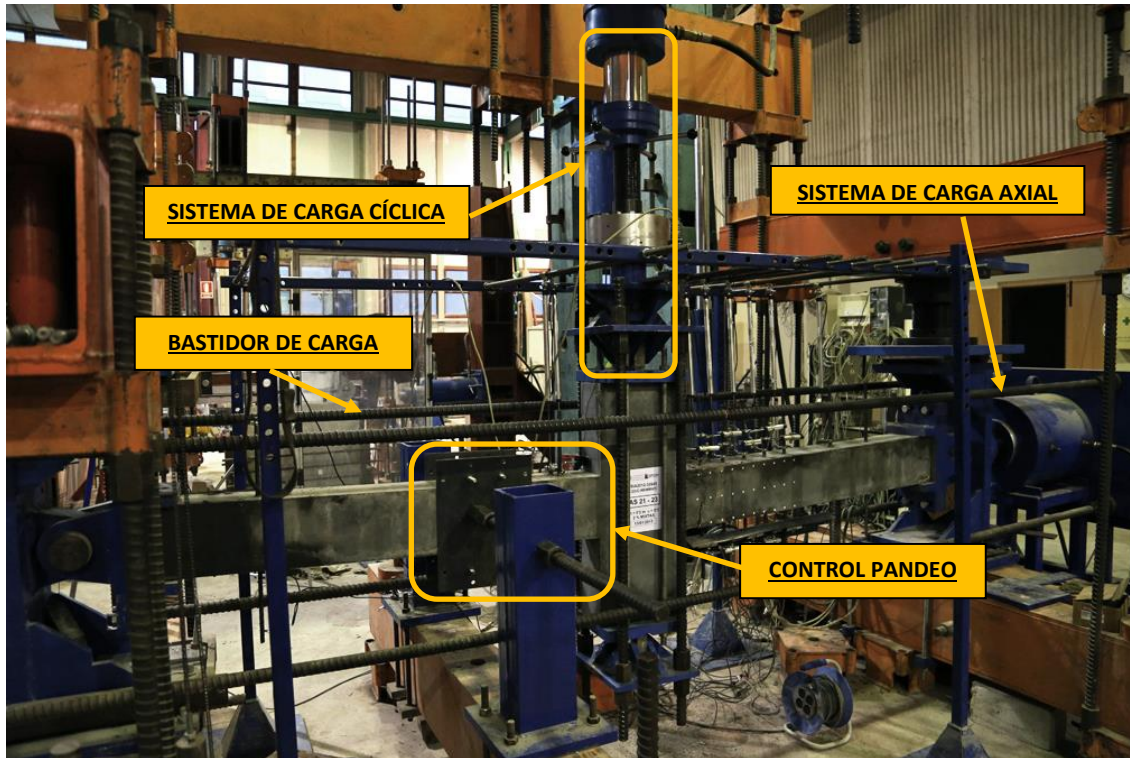


Figura V.10. Pórtico de ensayo, elementos principales

Bastidor de carga y sistema de carga axial

El pórtico se compone de un bastidor que permite la aplicación de la carga axial. Este bastidor está formado por un conjunto de 4 placas (2 internas y 2 externas) y diversos elementos de unión y fijación, con el fin de sujetar el elemento a ensayar y efectuar una adecuada aplicación de la carga.

Las placas externas se encuentran sujetas entre sí por cuatro barras de acero tipo GEWI de diámetro $\phi 36$.

En una de las dos placas externas se encuentra sujeto el actuador hidráulico horizontal de 2500 kN, mientras que en la otra se encuentra sujeta la célula de carga de 2000 kN.

Estos elementos del bastidor se apoyan en un sistema deslizante, con el fin de permitir el libre movimiento horizontal que se pueda generar por la posible deformación de las barras cuando se comprima el elemento.

En las placas internas, que se sujetan a las externas mediante tornillería, se sitúan las condiciones de apoyo del elemento a ensayar.

Sistema de carga vertical

En un pórtico auxiliar, sujeto adecuadamente a la losa del laboratorio, se encuentra el sistema de carga vertical (Figura V.11).

Este sistema está formado por una placa de reparto y un cuchillo de carga, cuya función es amortiguar las imperfecciones en la alineación y garantizar una adecuada nivelación de la célula de carga y el elemento rigidizador, así como centrar la carga sobre el eje de la placa de reparto.

La carga vertical se aplica sobre el elemento mediante un actuador hidráulico de doble efecto de 500 kN, y entre éste y el soporte a ensayar se sitúa una célula de carga de 500 kN.



Figura V.11. Sistema de carga vertical

Condiciones de apoyo y elementos de sujeción del soporte

Las condiciones de apoyo del elemento se resuelven con las placas internas del bastidor de carga, a los que se fijan unos sistemas de rótulas que permiten el giro libre del soporte y garantizan que la carga sea aplicada centrada sobre la directriz del elemento (Figura V.12). En cada una de las rótulas se atornillan unos perfiles que reciben el soporte, y están adecuados a cada sección transversal a ensayar. Estos perfiles se sujetan mediante tornillería a la rótula de apoyo del pórtico. A la hora de fabricar el elemento, en la posición adecuada dentro del soporte y en cada extremo se dejan embebidos unos UPN modificados con vástagos soldados para permitir el acople de los perfiles sujetos a la rótula que los recibe (Figura V.13 y V.14).

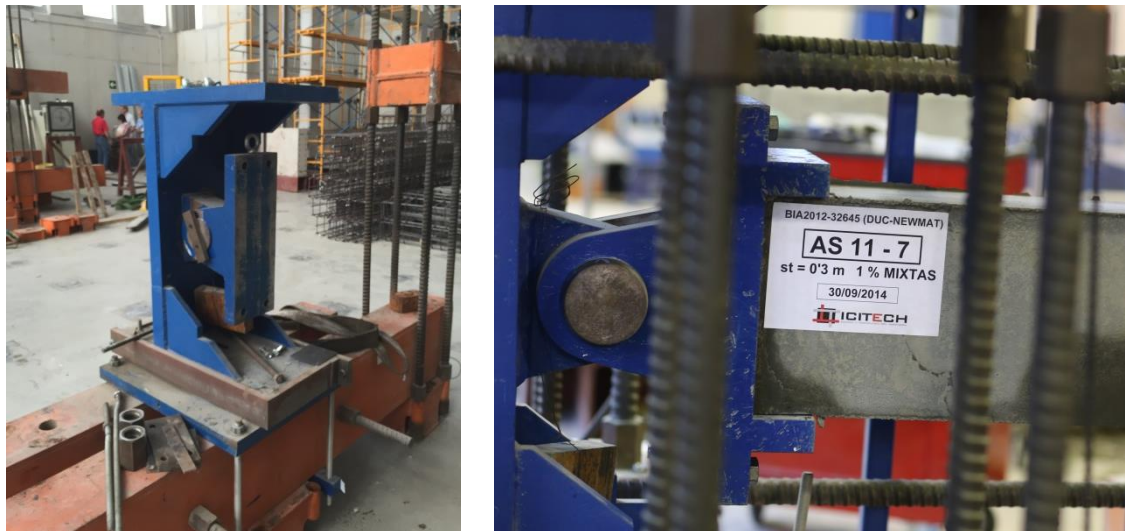


Figura V.12. Sistema de apoyo del soporte

Placa de Apoyo-Vistas

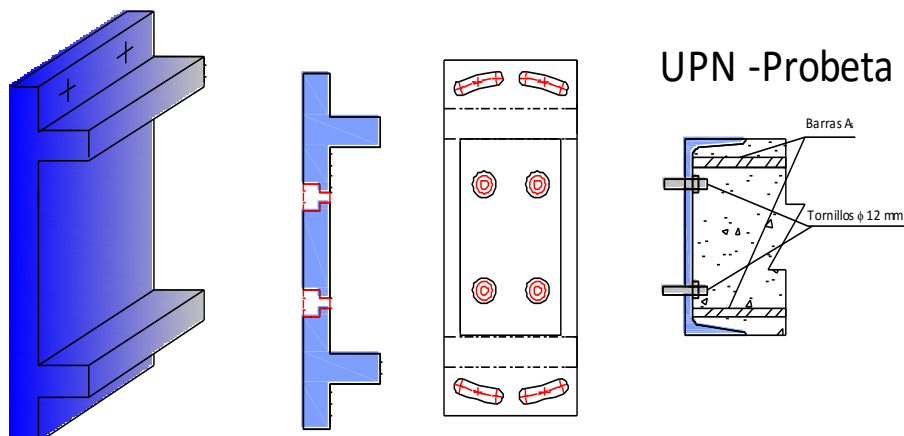


Figura V.13. Sistema de apoyo del soporte. Croquis de la placa de apoyo del pórtico de carga



Figura V.14. Sujeción del soporte al pórtico de ensayo. Vista de la placa que recibe el elemento. UPN modificado

Control de pandeo lateral

Como complemento al bastidor de carga se sitúan dos perfiles verticales perforados que se usan para aproximar unas barras Gewi. Éstas, mediante tornillería adecuadamente dispuesta, tienen como finalidad controlar el pandeo lateral estructural que pueda sufrir el elemento a ensayar cuando se encuentra sometido a carga (Figura V.15).

Para asegurar un buen contacto con el soporte, se han dispuesto unas chapas metálicas de apoyo convenientemente engrasadas a ambos lados del elemento a ensayar.

Este sistema se encuentra adecuadamente anclado a la losa de carga existente en el laboratorio de ensayo.



Figura V.15. Sistema de control de pandeo lateral

V.1.3. Dispositivos auxiliares

Adicionalmente al sistema de cargas se montan varios dispositivos auxiliares que permiten fijar y posicionar adecuadamente la instrumentación.

El dispositivo principal es un bastidor formado por un conjunto de perfilería y barras metálicas, cuya función es situar la mayoría de los captadores de desplazamiento verticales (Figura V.16).

El resto de captadores verticales se posiciona en diversos montajes aislados de basas metálicas y barras roscadas que aseguran la sujeción (Figura V.17).

Existe un captador horizontal utilizado para medir el desplazamiento en la dirección perpendicular al plano principal de ensayo, y que se fijará también con el mismo sistema de basas aisladas.

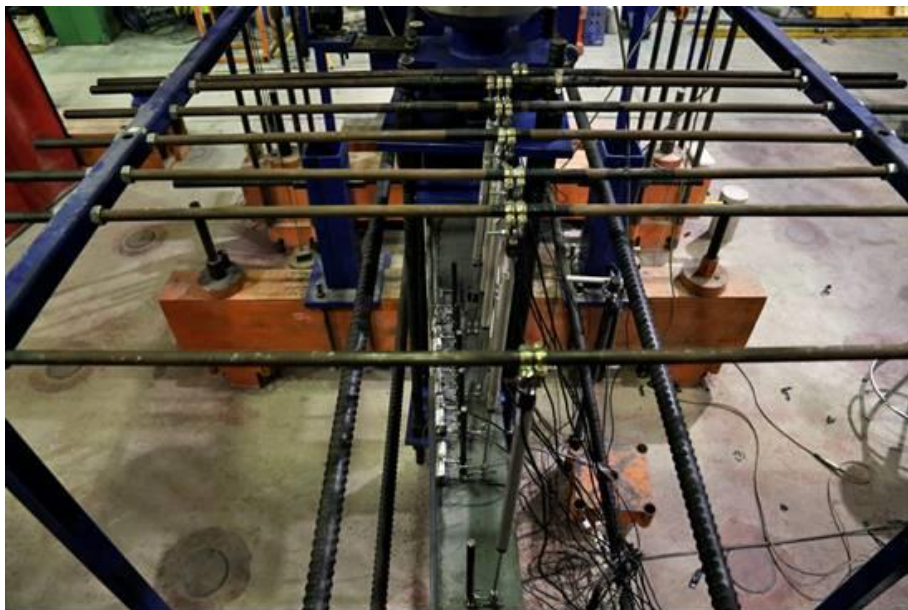


Figura V.16. Vista desde la parte superior del bastidor auxiliar de fijación

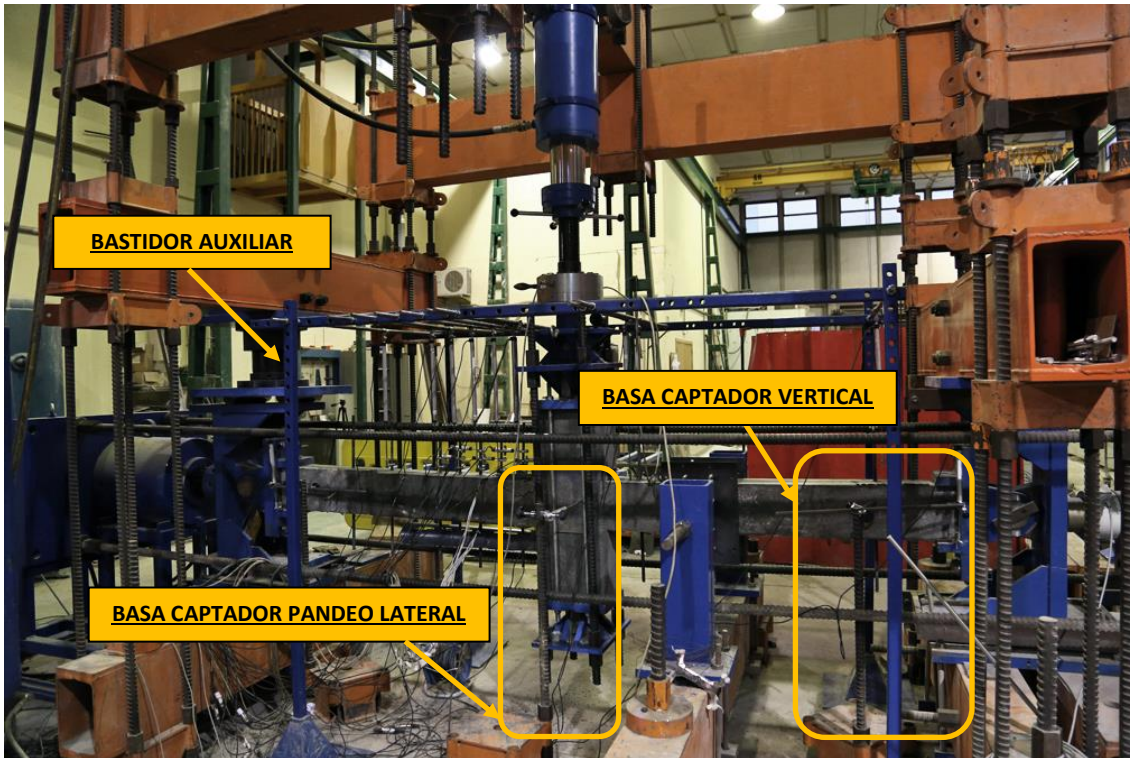


Figura V.17. Dispositivos auxiliares

V.2. Operatividad del ensayo

Para el desarrollo del trabajo experimental se han realizado distintas operaciones que se pueden agrupar en cuatro fases: la fabricación del soporte, el montaje del mismo en el pórtico de ensayo, la propia fase de ensayo y rotura, y una última de desmontaje y acopio.

En los apartados siguientes se describen los distintos pasos realizados en cada fase.

V.2.1. Fabricación

V.2.1.1. Elaboración de la ferralla

En una primera etapa, en un taller externo a la universidad se encarga la elaboración de las ferrallas que se agrupan en ocho tipologías diferentes.

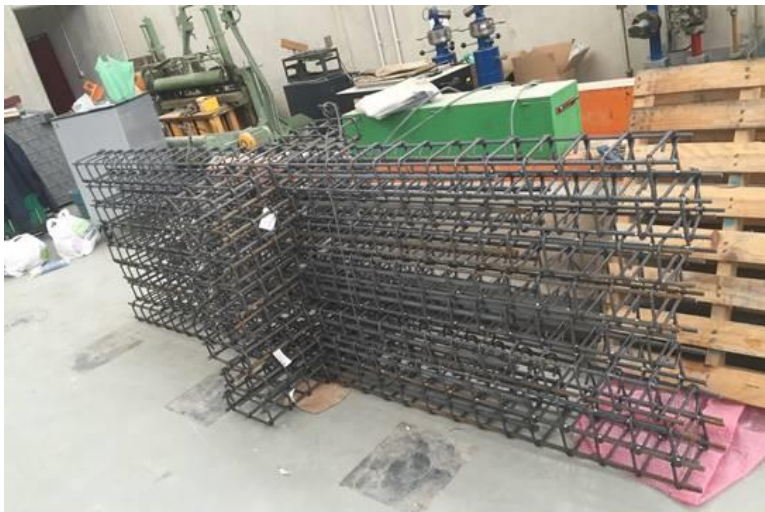


Figura V.18. Acopio de las distintas ferrallas

Una vez recibidas las ferrallas (Figura V.18), se procede a realizar las distintas operaciones previas al encofrado del soporte. Estas operaciones constan de dos etapas: el soldado de los UPN extremos y la modificación de la armadura transversal.

El soldado en los extremos de la ferralla de dos perfiles UPN modificados tienen como finalidad facilitar el acoplamiento del soporte al sistema de sujeción del pórtico de carga. Para cada tipo de sección transversal se corresponde una tipología de perfil UPN, si bien en todos los casos se les ha soldado cuatro tornillos de diámetro 12 mm, según el croquis de UPN modificado (Figura V.19). Estos perfiles se quedan embebidos dentro del elemento a ensayar una vez se procede al hormigonado.

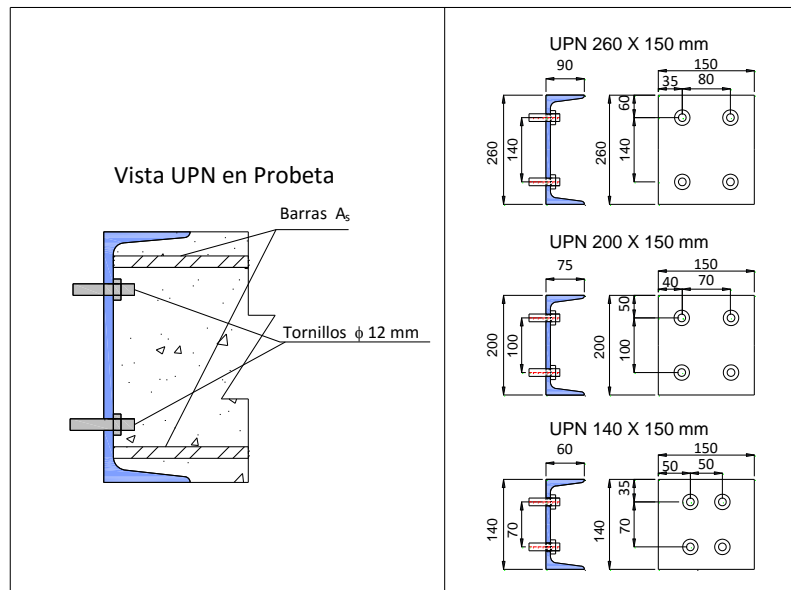


Figura V.19. Croquis de los distintos UPN modificados empleados en este trabajo

En esta etapa se tiene especial cuidado con la alineación de los elementos a soldar ya que condiciona la linealidad del soporte. En las imágenes de la Figura V.20 se observan distintos momentos de esta etapa.



Figura V.20. Perfil UPN modificado que se suelda en extremo de ferralla y que tras hormigonado queda embebido en el soporte

En una segunda etapa se procede a eliminar y/o a resituar la armadura transversal según la posición prevista en la campaña de ensayos, lo que conlleva diversas tareas de corte y atado de las mismas como se muestra en la Figura V.21.



Figura V.21. Ferralla modificada según programa experimental previsto

De forma adicional, se atan dos agarraderas (una a cada lado del soporte) simétricamente a la ferralla y fuera de la zona crítica. Estas agarraderas facilitan las distintas operaciones una vez fabricado el elemento, como son el desmoldeo, montaje y desmontaje en el pórtico de ensayo, o el acopio dentro del laboratorio.

V.2.1.2. Instrumentación

En este ensayo se disponen dos tipos de instrumentación, una interna al soporte a ensayar y otra externa. En ambos casos se han seleccionado tanto la tipología como la disposición de las mismas, con el fin de obtener información adicional de la respuesta del elemento ensayado.

En este apartado se describe la instrumentación interna que se lleva a cabo en esta etapa de la fabricación del soporte. Para ello, se utilizan bandas extensométricas del tipo K-LY41-50/120-3-0.5M de HBM (*Hottinger Baldwin Messtechnik*), que se suministran con un cable soldado a la banda de medida para realizar una adecuada conexión al sistema de adquisición de datos que se va a utilizar en el ensayo.

Se instrumenta la zona crítica del ensayo con bandas extensométricas que permiten medir las deformaciones de la armadura pasiva en esa franja, tanto de tracción como de compresión. Se instrumenta una longitud superior a 2 veces el canto de la pieza medida desde la unión *stub*-soporte.

Se dispone un total de 14 ó 15 bandas, dependiendo del número de estribos resultantes de acuerdo con la separación dispuesta entre ellos, que se distribuyen tanto en la armadura longitudinal como en la transversal de la zona crítica.

Existen cuatro secciones donde se disponen las bandas en las barras longitudinales. En las dos secciones más próximas a la zona de *stub* se disponen 4 unidades, una en cada barra longitudinal, mientras que en las dos secciones restantes se sitúan solo en la cara oeste una banda en cada sección.

Las bandas de las armaduras transversales se pegan centradas en la rama de la cara oeste en las dos o tres primeras armaduras transversales dentro de la zona crítica, según corresponda.

La codificación empleada identifica la sección donde se posiciona la banda, si está en cara este u oeste y si está en barra longitudinal o transversal. De esta manera se tiene identificada cada banda en todo momento.

En el siguiente esquema (Figura V.22).se observa dónde se posiciona esta instrumentación y su nomenclatura.

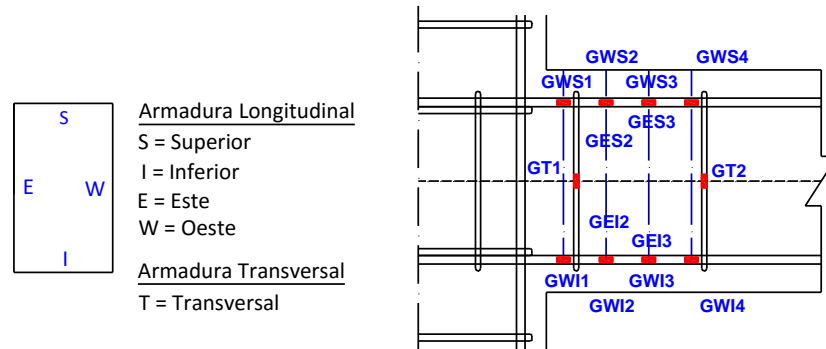


Figura V.22. Croquis de situación de las bandas dentro del elemento a ensayar

El procedimiento a seguir en esta fase se puede resumir en los pasos siguientes:

- Eliminar las corrugas en la zona donde se va a adherir la banda extensométrica. Se realiza en una longitud aproximada de 10 mm y para ello se emplea una sierra de disco comercial.
- Limar la zona de pegado para mejorar el pulido y la eliminación de posibles imperfecciones.
- Limpiar la zona limada con acetona para una correcta adhesión del pegamento suministrado por el fabricante de las bandas.
- Marcar en la barra la posición del centro de banda a pegar.
- Aplicar adhesivo sobre la base de la banda, manipulando con cuidado la misma para evitar cualquier contacto con la zona de medida, recurriendo para ello al uso de cinta adhesiva. Se coloca sobre la superficie alisada, centrada en las marcas previamente hechas y en la misma dirección de la barra longitudinal. Se presiona la banda hasta que la intensidad del pegado permita retirar la cinta adhesiva, sin que la banda se despegue.
- Aplicar sobre las bandas extensométricas una masilla protectora suministrada por el fabricante, para protegerlas de las agresiones que puedan sufrir durante el transporte, manipulación de la ferralla y el hormigonado del soporte.
- Etiquetar cada banda extensométricas para facilitar la identificación de las mismas en el momento de ensayar el soporte, ya que éstas se quedarán embebidas dentro del elemento tras el hormigonado.
- Sujetar los cables de las bandas a las barras con abrazaderas de plástico para evitar posibles tirones durante el transporte de la ferralla y el hormigonado de la pieza.
- Embolsar los cables de las bandas para evitar una posible rotura de los mismos durante el proceso de hormigonado. Las bolsas deben tener una rigidez adecuada y se deben sellar mediante cinta aislante para asegurar que quedan debidamente cerradas.

Los pasos descritos en este procedimiento se pueden visualizar de forma resumida en la serie de imágenes que se muestra en la Figura V.23.

En el Anejo A “Fichas de los elementos ensayados” puede consultarse la instrumentación utilizada en cada soporte (tanto las bandas extensométricas como los captadores de desplazamiento dispuestos).



Figura V.23. Distintas fases del pegado de las bandas extensométricas

V.2.1.3. Encofrado

En la etapa de encofrado se realizan las operaciones previas al hormigonado del soporte, consiguiendo, mediante los medios auxiliares necesarios, que el elemento fabricado adquiera la forma y medidas previstas en el programa experimental.

Para la fabricación de los distintos elementos a ensayar se dispone de un encofrado metálico formado por una mesa vibrante a la que se acoplan mediante tornillería unas piezas diseñadas que, acopladas entre sí, permiten la construcción de los distintos soportes incluidos dentro de este trabajo.

A las piezas que darán forma al elemento principal, diseñadas por Barrera (2012) [15], se les ha perforado unos orificios en una posición prefijada, de manera que permitan disponer por dichos orificios unas barras pasantes de acero atravesando la ferralla, una vez introducida la ésta dentro del encofrado. Estas barras servirán como punto de sujeción auxiliar de parte de la instrumentación exterior, lo que facilita obtener información de la deformada (curvatura) del elemento de forma directa en todas las fases del ensayo (Figura V.25).

El soporte se fabrica sobre una mesa vibrante diseñada por Caballero (2015) [26] montada sobre una estructura metálica con ruedas que permite su adecuado transporte a la zona destinada para la fabricación del elemento (Figura V.24).



Figura V.24. Detalle de chapa de encofrado perforada. Vista de barras pasantes auxiliares

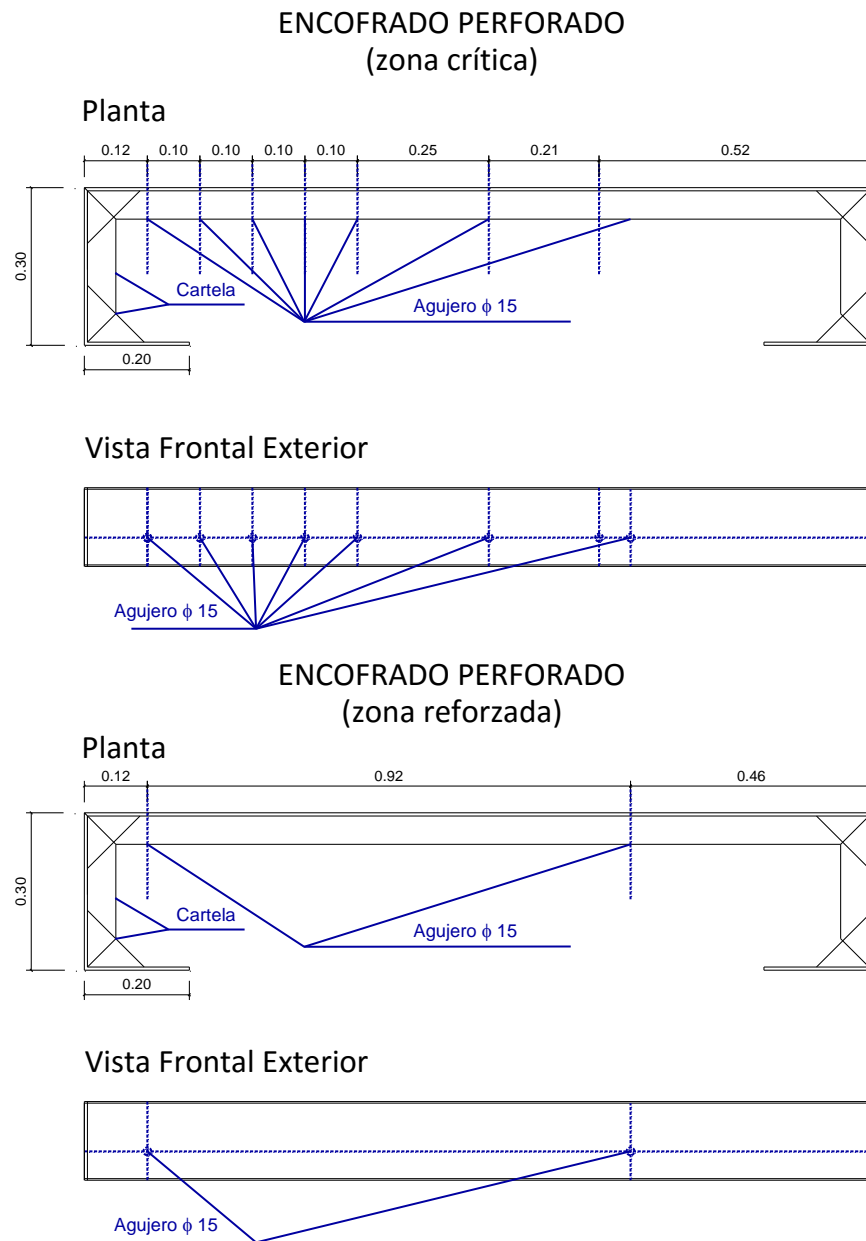


Figura V.25. Detalle de las placas metálicas desmontables que conforman las paredes del soporte

Además del encofrado principal se disponen los moldes metálicos normalizados para la realización de las pertinentes probetas de acompañamiento para control del hormigón. En este trabajo son: tres moldes cilíndricos de ϕ 150 y alto 300 mm, cuatro moldes cúbicos 100 mm de lado, y dos moldes prismáticos de dimensiones 600x150x150 mm.

En esta etapa, una vez montados los distintos moldes, tanto el principal como el de las probetas de acompañamiento, se procede a impregnarlos con líquido desencofrante para facilitar el posterior desmoldeo de las probetas (Figura V.26).

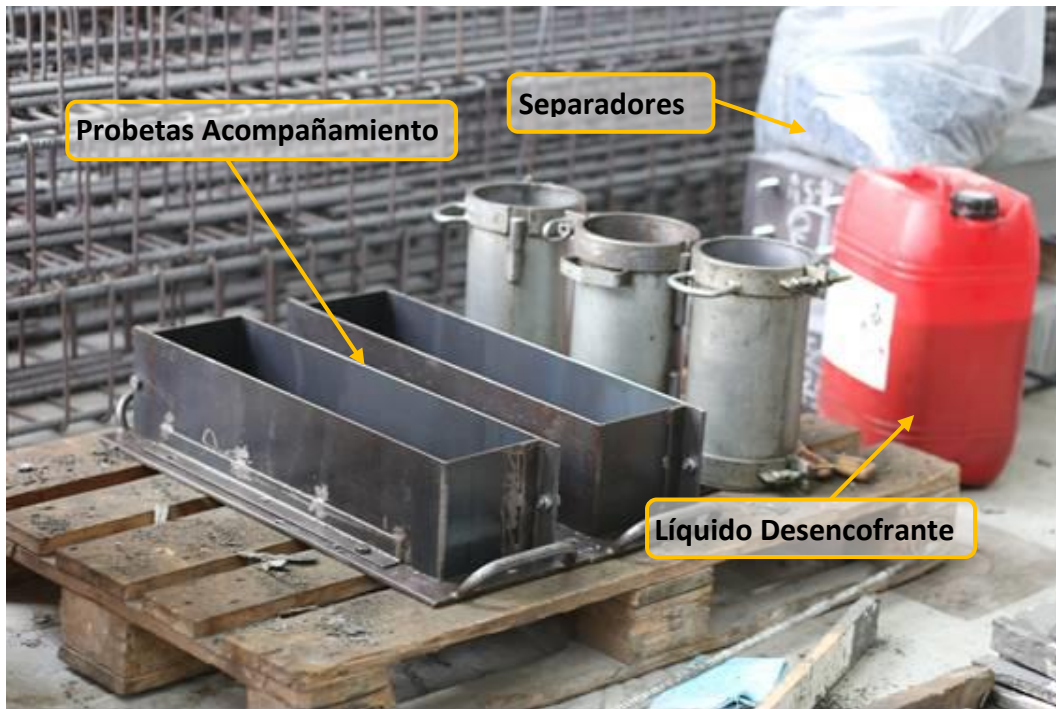


Figura V.26. Moldes de probetas de acompañamiento para control del hormigón

La siguiente fase consiste en situar la ferralla dentro del molde. Se disponen los separadores, atándolos a las armaduras, para asegurar el recubrimiento de las mismas.

El molde del soporte se fija adecuadamente con el fin de conseguir una mayor rigidez del mismo y un comportamiento lo más hermético posible. Para ello se usan de forma auxiliar distintos gatos de presión en puntos estratégicos del conjunto.

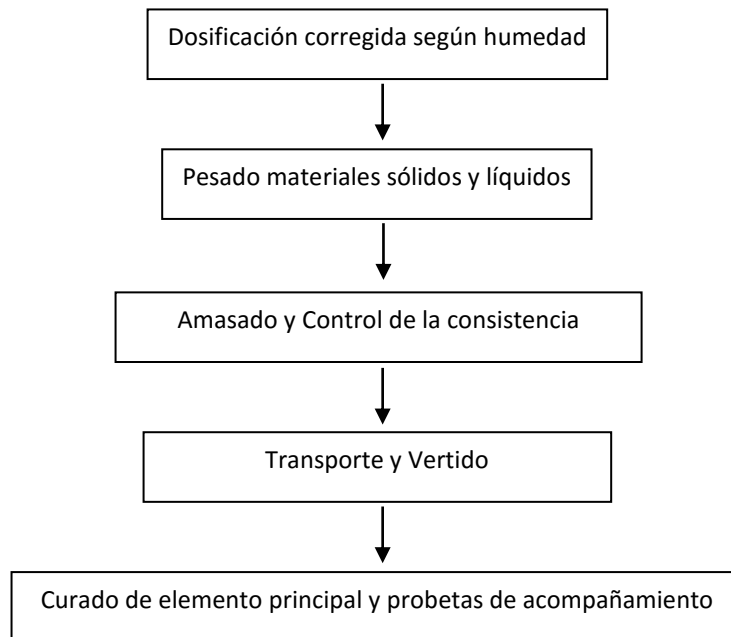
Antes de finalizar la fase de encofrado se disponen elementos auxiliares para separar las distintas zonas de hormigonado (Figura V.27), ya que con los medios que se cuenta para hormigonar, no permite ejecutar el proceso con una única amasada debido al tamaño del soporte.



Figura V.27. Vista del encofrado del soporte antes y después de introducir la ferralla del elemento

V.2.1.4. Hormigonado

La etapa de hormigonado se desarrolla de forma consecutiva en distintas fases, de acuerdo con el diagrama siguiente:



El primer paso para poder iniciar esta etapa es definir la necesidad de amasadas a realizar. El número de amasadas viene condicionado por la capacidad de amasado de la amasadora empleada y por el volumen necesario para fabricar, tanto el elemento principal como las probetas de control del material.

Para el hormigonado de los soportes incluidos en este trabajo, se utiliza una amasadora de eje vertical de 110 litros de capacidad, de los cuales, para garantizar una buena homogeneidad de la mezcla, se pueden aprovechar aproximadamente 105 litros como máximo.

Con estas condiciones, el número de amasadas realizadas en esta etapa es dos. En cada caso, se realiza un ajuste de la dosificación de cada una de ellas, no sólo según la humedad ambiente en la zona de hormigonado (que se encuentra en el exterior del laboratorio), sino también según el orden de amasada. Las mezclas de cada una de ellas se realizan de forma consecutiva y, por tanto, el balde de la amasadora no tiene la misma humedad base entre amasadas, lo que conlleva que la humedad de la segunda amasada venga condicionada por la de la primera. Este ajuste sólo va a afectar a la cantidad de agua añadida a la mezcla. El resto de materiales no se van a ver afectados por la humedad, ya que son suministrados ensacados por los distintos proveedores.

Una vez definidas las dosificaciones de cada amasada, se procede al pesado e identificación de los materiales sólidos de cada una de las amasadas. Cada material (el cemento, los dos tamaños de arenas, el humo de sílice, y las fibras según tipo) se protege adecuadamente para que no sea susceptible a los cambios de humedad del ambiente (Figura V.28).



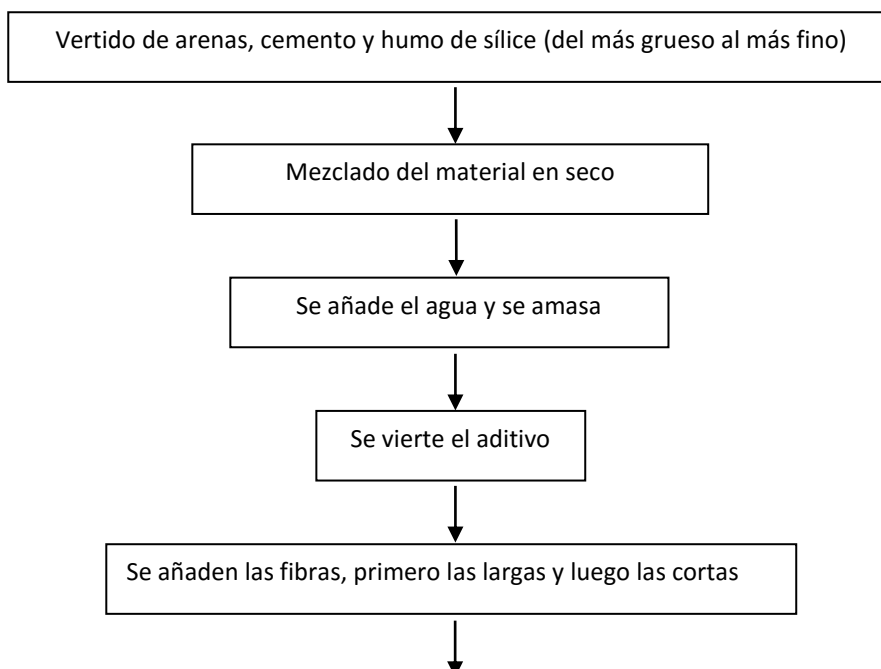
Figura V.28. Material sólido pesado según dosificación preparado para fabricar el hormigón

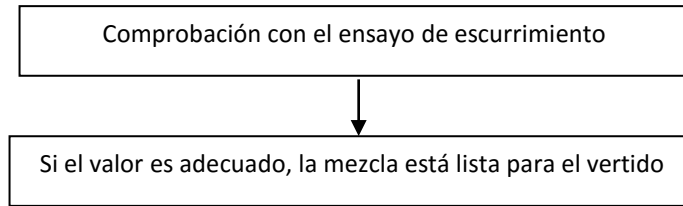
Justo antes de iniciar el amasado se procede al pesaje de los líquidos, tanto del agua como del aditivo correspondiente (Figura V.29).



Figura V.29. Pesaje de líquidos, agua y aditivo, en báscula de precisión

En la fase de amasado se sigue un procedimiento de vertido de los materiales, así como de “paradas” para control de la dosificación de la mezcla preparada. En resumen, esta fase se debe ejecutar según los siguientes pasos:





Este proceso se puede observar en la serie de fotografías siguientes (Figura V.30):



Figura V.30. Vistas de las distintas etapas de amasado. Aporte de las materias primas y amasado de la mezcla, control de la consistencia mediante ensayo de escurrimiento y vertido en cazo para su transporte

Una vez finalizada la fase de amasado se procede al transporte y vertido del material. Se emplea un cazo metálico donde se vuelca el material amasado para transportarlo mediante medios auxiliares a la zona donde se encuentran los distintos encofrados, tanto del elemento principal como de las probetas de control de los materiales.

Para el transporte desde la zona de amasado hasta la de encofrado se emplea una carretilla elevadora NISSAN modelo GQ02L30CU. Posteriormente, se utiliza un puente grúa que permite el correcto posicionado en la zona de vertido mediante elevación y traslado del cazo. Esta fase finaliza con el correcto vertido del material.

En la serie de fotografías que se muestran en la Figura V.31 se puede observar este proceso.

Se pueden consultar en el Anejo A, en la "Ficha de materiales", los datos correspondientes al hormigonado de cada soporte incluido en esta tesis doctoral.



Figura V.31. Vistas de las fases de transporte y vertido del hormigón en la pieza principal y probetas de control

Como fase final de esta etapa, se procede al curado de los elementos hormigonados, cubriéndolos adecuadamente con material plástico, para mantener una atmosfera húmeda Figura V.32. Esta fase resulta realmente importante en las horas siguientes al hormigonado, ya que el gran contenido de cemento genera un elevado calor de hidratación que ocasiona la pérdida de agua de la mezcla.



Figura V.32. Hormigón fresco en soporte. Curado del elemento y de las probetas de control

V.2.1.5. Desencofrado y Acopio

Esta etapa se desarrolla cuando transcurren 24 horas desde la anterior, es decir, cuando el hormigón fabricado ya tiene suficiente resistencia para ser desmoldeado. Se procede al desencofrado tanto del elemento principal como de las probetas de acompañamiento para control del material.

Debido a que el encofrado está formado por paredes unidas mediante tornillería, el desencofrado se realiza desmontando las mismas.

Con la ayuda del puente grúa y, sujetando el elemento en las abrazaderas dispuestas para ello, se procede al izado del mismo y acopio en el laboratorio, donde se almacena durante 28 días, edad a la cual se procede a la rotura del soporte.

Las probetas de control se conservan en una cámara húmeda bajo condiciones de temperatura y humedad constantes (Figura V.33).



Figura V.33. Conservación de las probetas de control en cámara húmeda

V.2.2. Montaje

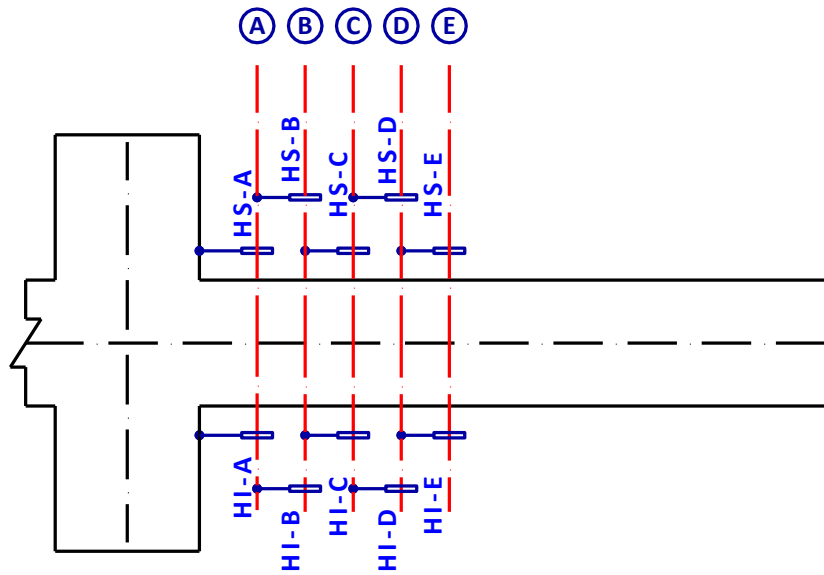
El montaje del soporte se inicia con el acoplamiento del mismo a las placas de las rótulas de apoyo de los extremos del pórtico. Para ello se utiliza la tornillería de los perfiles UPN modificados que se han dejado embebidos dentro del elemento.

La manipulación del soporte para acometer esta etapa se realiza en todo momento con la ayuda de un puente grúa. Esta operación conlleva el desmontaje de las barras Gewi que forman parte del bastidor de carga, y su posterior montaje. Así, la operación finaliza con un ajuste de la tornillería del pórtico y la verificación de la alineación del soporte dentro del mismo.

Una vez situado el elemento dentro del pórtico, se procede a situar la instrumentación externa al soporte. Ésta se compone de captadores de desplazamiento LVDT de distintas medidas que van desde 50 mm hasta 250 mm de fondo de escala.

Se disponen 24 captadores de desplazamiento, 13 en disposición vertical, 10 en horizontal en la dirección de la directriz del elemento y 1 perpendicular a ella para controlar el pandeo lateral de la probeta.

De los 10 captadores horizontales se disponen de forma simétrica 5 en la parte superior y 5 en la inferior de la zona crítica, como se muestra en la Figura V.34.



H-0 (centrado en stub y perpendicular a la vista)

Figura V.34. Posición y nomenclatura de captadores horizontales

Con el fin de tomar datos en las distintas fases de carga y obtener el valor de la curvatura más aproximada a la realidad, se sitúan los captadores de desplazamiento vertical en distintas secciones. En la Figura V.35 se observa la posición y nomenclatura de dicha instrumentación.

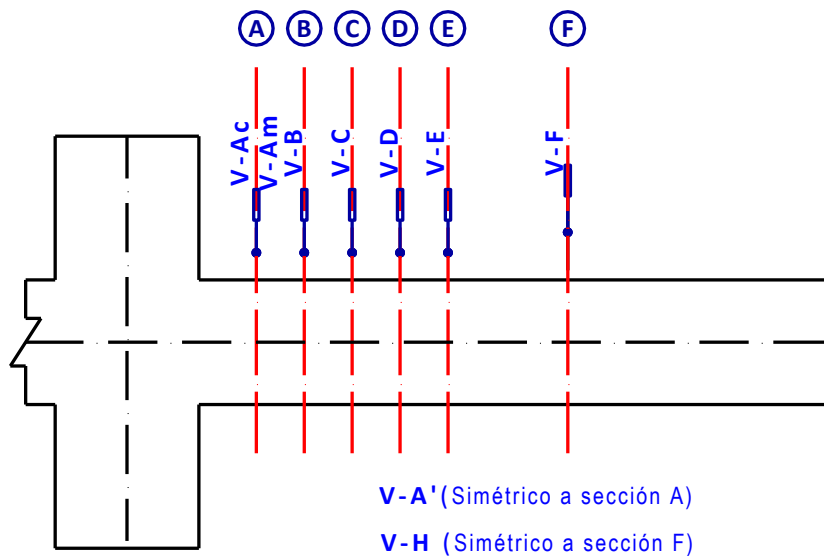


Figura V.35. Posición y nomenclatura de captadores verticales en zona crítica

Para cada soporte se puede consultar, en la “Ficha de instrumentación” del Anejo A, la posición y disposición de la instrumentación colocada.

V.2.3. Fase de ensayo a rotura

Esta fase se desarrolla cuando el elemento fabricado tiene la edad de 28 días. Se diferencian dos etapas claramente, una primera de rotura de las probetas de control del hormigón y otra de desarrollo del ensayo del soporte.

Previamente a la fase de ensayo se procede a una verificación de posicionamiento de la instrumentación externa. Finalizando con la comprobación de las conexiones internas y externas al equipo de adquisición de datos.

Con el fin de observar con mayor facilidad la red de fisuras que se genera en el ensayo del elemento, se procede a pintar la cara oeste (W) del mismo con un material que repele el agua, Impregnante Fijador HI-10, habitualmente utilizado para el sellado de pavimentos de hormigón impreso. Asimismo, también se pinta en la cara este (E) una cuadrícula de puntos para situar las fisuras que se vayan produciendo en el desarrollo del ensayo (Figura V.36).

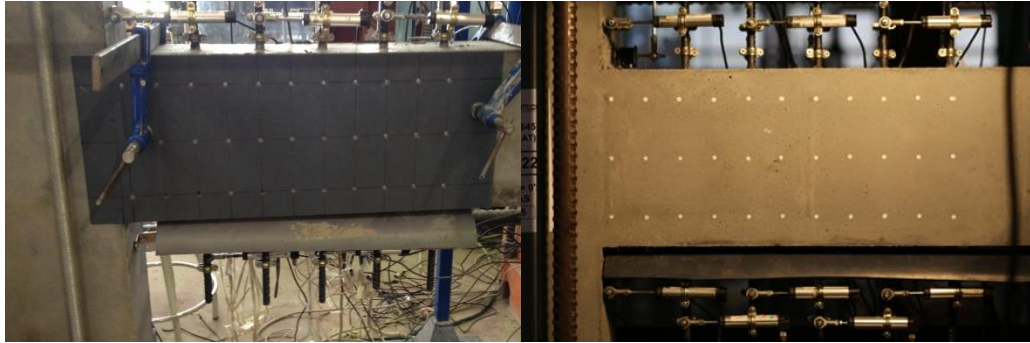


Figura V.36. Plantilla y cuadrícula en la zona crítica

V.2.3.1. Ensayos de acompañamiento

Generalmente el día anterior a la ejecución del ensayo, se procede a la rotura de las probetas de control del hormigón, tanto a compresión simple como a flexotracción. Previo a su rotura también se aprovecha para hacer un ensayo de módulo de deformación con una de las probetas cilíndricas.

Todos los ensayos se realizan con una prensa tipo Ibertest en función de que el ensayo se efectúe con carga a compresión simple o a flexotracción. En cada caso se dispone el esquema estructural correspondiente a cada tipo de rotura buscada.

Ensayo a Flexotracción

Por cada soporte fabricado se han realizado dos ensayos de flexotracción de acompañamiento. Este ensayo se realiza siguiendo las indicaciones de la norma UNE-EN 14651:2007+A1, "Método de ensayo para hormigón con fibras metálicas. Determinación de la resistencia a la tracción por flexión (límite de proporcionalidad (LOP), resistencia residual) (2008)"[36].

Siguiendo las indicaciones de esta norma por cada elemento se han fabricado dos probetas prismáticas con un tamaño nominal de sección transversal cuadrada de lado 0.15 m y longitud 0.60 m. Una vez fabricadas, se han conservado en cámara húmeda hasta el momento de su ensayo.

Como fase previa al ensayo, mediante aserrado por vía húmeda se efectúa una entalla en cada probeta. La entalla realizada tiene un ancho aproximado de 5 mm y un alto de entalla de 25 mm. Se ejecuta en el centro de vano de la pieza a ensayar. En la Figura V.37 se observa un detalle de la entalla.



Figura V.37. Vista de la entalla realizada

Las caras donde se aplica la carga y donde se efectúa el corte transversal, que es donde se mide la abertura de fisura, deben haber estado en contacto con las paredes del molde de fabricación.

El esquema de ensayo es el de viga biapoyada, de 0.50 m de luz, con carga centrada. La carga se aplica mediante un actuador sobre un rodillo que transmite la carga en el centro de vano, transversalmente a la probeta. La probeta se apoya sobre unos rodillos que materializan las reacciones del esquema de carga, como se refleja en la Figura V.38.

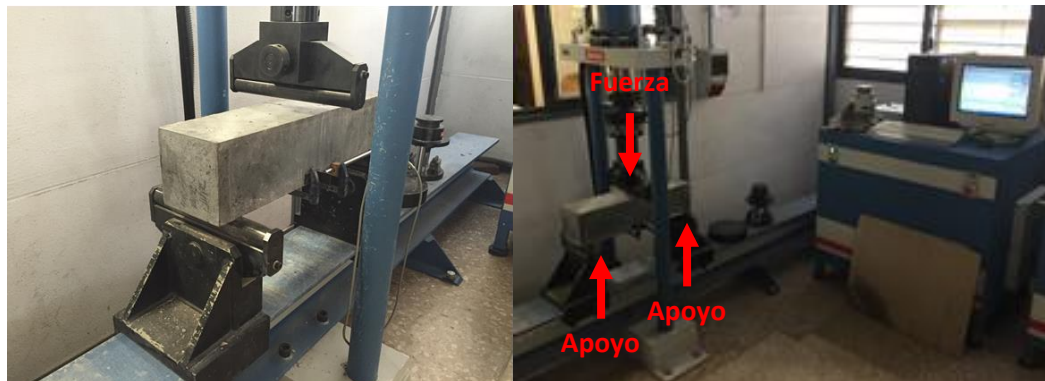


Figura V.38. Montaje de rodillos en el pórtico. Esquema de carga

Con el objeto de medir la abertura de fisura, en la entalla se dispone un captador de desplazamiento como se muestra en la Figura V.39.

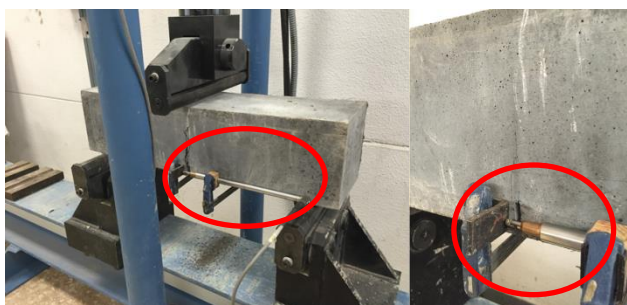


Figura V.39. Sujeción y posición del captador de desplazamiento

Se dispone de un sistema de adquisición de datos suministrado por la empresa Ibertest, con el que se recogen los distintos resultados de las fases de ensayo que se describen en la norma que sirve de base.

En la Figura V.40 se muestra un ejemplo de las gráficas de flexotracción obtenidas de los ensayos de control realizados.

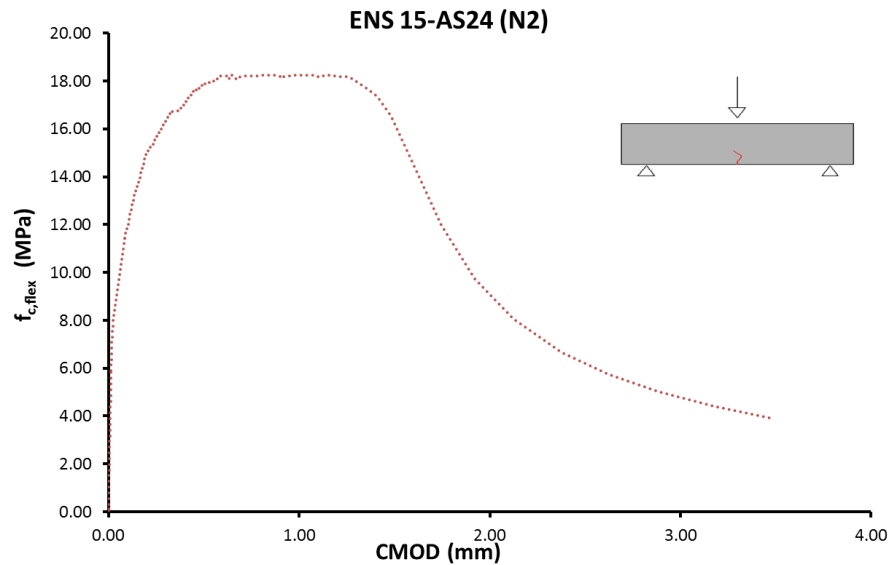


Figura V.40. Ejemplo de Diagrama Tensión-CMOD. Probeta 2 del soporte AS21-15

Ensayo a Compresión Simple

Por elemento a ensayar se han realizado 7 probetas de control para ensayar a compresión simple: 3 de ellas cilíndricas de 0.15 m de diámetro y 0.30 m de alto, y 4 probetas cúbicas de 0.10 m de lado. En ambos casos se ha realizado el ensayo siguiendo las indicaciones dadas por la norma UNE 83507, "Hormigones con Fibras. Rotura por compresión, (2004)" [44].

En ambos tipos de probeta se ha empleado una prensa a compresión simple con sistema de adquisición de datos tipo Ibertest (Figura V.41). Por motivos de seguridad, como la rotura de las probetas de control puede resultar explosiva, la prensa de carga dispone de un sistema de protección formado por pantallas de metacrilato, que permite garantizar la seguridad de los equipos y del personal presente ante el posible desprendimiento de fragmentos de hormigón durante la rotura.



Figura V.41. Ensayo de Compresión simple

Para garantizar que ambas caras de la probeta donde se aplica la carga estén paralelas entre sí y sin ningún tipo de irregularidad, en el caso de las probetas cilíndricas se procede al refrentado de dichas caras con una fina capa de mezcla de azufre comercial, siguiendo lo indicado en la norma de UNE 83506 "Hormigones con Fibras. Refrentado de probetas con mortero de azufre" (2004) [45]. Para que la mezcla de azufre adquiriera una resistencia suficiente para soportar las tensiones aplicadas por la prensa hidráulica, el refrentado de estas probetas se realiza 24 h antes del ensayo de las mismas. La Figura V.42 muestra tanto el equipo utilizado para refrentar como las probetas refrentadas.



Figura V.42. Equipo para refrentar y probetas cilíndricas refrentadas

En la Figura V.43 se muestra un ejemplo de las gráficas obtenidas.

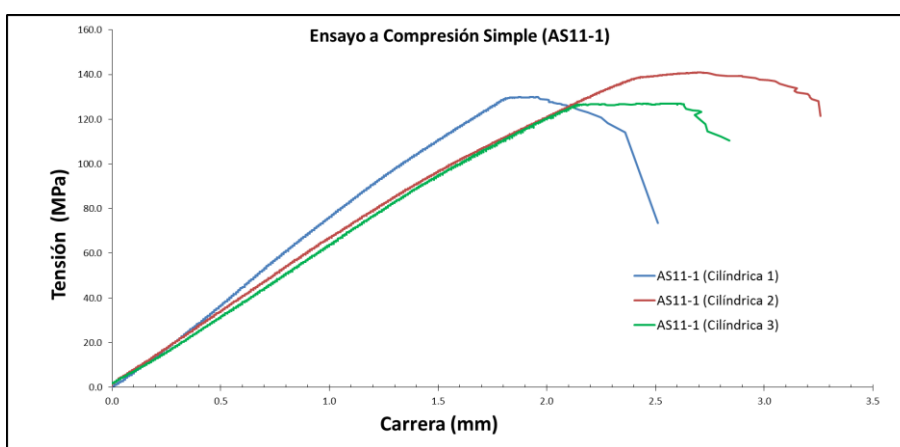


Figura V.43. Ejemplo de Diagrama Tensión-Carrera para probetas cilíndricas del soporte AS11-1

Previo a la rotura por compresión una de las probetas cilíndricas se ensaya siguiendo las indicaciones de la norma UNE-EN 12390-13, “Ensayos de hormigón endurecido. Parte 13: Determinación del módulo secante de elasticidad en compresión” [47]. De esta manera se puede estimar un valor del módulo de deformación del hormigón empleado en los elementos a ensayar.

Para ello se aprovecha la misma prensa que se utiliza para el ensayo de rotura a compresión, de modo que utilizando un dispositivo específico de medición y el sistema de adquisición de datos se puede obtener dicho módulo. En la Figura V.44 se puede observar el dispositivo y medición mientras se realiza el ensayo.



Figura V.44. Ensayo para la obtención del módulo de deformación en compresión del hormigón

Los resultados obtenidos para las distintas probetas de control, según los ensayos de acompañamiento realizados se encuentran recogidos en tablas que se pueden consultar en el capítulo IV, en el apartado de “Caracterización de materiales” y en el Anejo A en la “Ficha de materiales”.

V.2.3.2. Historia de cargas

Esta etapa comienza con la aplicación sobre el elemento a ensayar del axil de compresión constante, cuyo valor se determina previamente a partir de los resultados arrojados por los ensayos de control del hormigón.

Una vez el soporte se encuentra sometido al axil correspondiente, se procede al ajuste del pórtico auxiliar que permite la aplicación de la carga lateral cíclica.

En este trabajo se ha realizado un protocolo de carga lateral cíclica mediante el control de desplazamiento impuesto con una velocidad constante definida por ciclos, siguiendo la recomendación del ACI 374.2R-13 [2] y ACI 374.1-05 [3].

Para introducir el control de desplazamiento en el automatismo, que controla el actuador de carga vertical, se emplea un parámetro conocido como deriva, *drift rotation* o *chord rotation* (θ). Este parámetro se define como la relación entre el desplazamiento (Δ) del captador vertical más cercano al *stub* y la distancia (L) entre esa posición y el apoyo del soporte.

$$(V.1) \theta(\%) = \frac{\Delta}{L} \cdot 100$$

Para cada nivel de *drift* impuesto se aplican 3 ciclos de carga, manteniendo una velocidad de aplicación de la carga constante. En la la Figura V.45 se puede observar un diagrama donde se muestra un ejemplo de los *drift* impuestos y de las velocidades de carga aplicadas en los diversos ciclos.

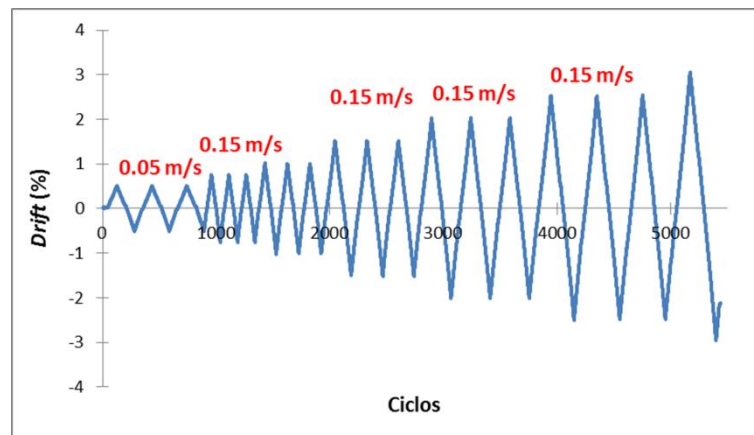


Figura V.45. Ejemplo de Diagrama *drift*-nº de ciclos (medida en eje de abcisas en segundos)

Salvo en el primero (AS11-1), en todos los elementos ensayados se ha aplicado la misma historia de carga según el *drift* impuesto. Esto fue debido a una corrección en la historia de carga posterior a dicho ensayo. En la Tabla V.1 se observa la historia definida en el automatismo de carga:

Tabla V.1. Historia de velocidad-drift impuesto en automatismo

Ensayo 1 (AS11-1)		Resto de Ensayos	
Velocidad (m/s)	Drift (%)	Velocidad (m/s)	Drift (%)
0.05	0.50	0.05	0.50
0.10	0.75	0.15	0.75
0.15	1.00	0.15	1.00
0.15	1.50	0.15	1.50
Constante 0.15	Resto de <i>drift</i>	Constante 0.15	Resto de <i>drift</i>

V.2.3.3. Control y desarrollo del ensayo

Para el control del ensayo se dispone de dos equipos informáticos. Ambos tienen instalado un sistema automático de adquisición de datos con un software propio, elaborado en *Lab View*, y desarrollado por el personal del Laboratorio del Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH).

Uno de los equipos tiene como función controlar la historia de cargas a aplicar sobre el elemento mediante un automatismo definido previamente. Este equipo controla los actuadores de carga, tanto el horizontal (aplicación de carga axial de compresión constante) como el vertical (aplicación de la carga lateral cíclica). Se muestra la historia de cargas que se puede observar en este equipo en la Figura V.46.

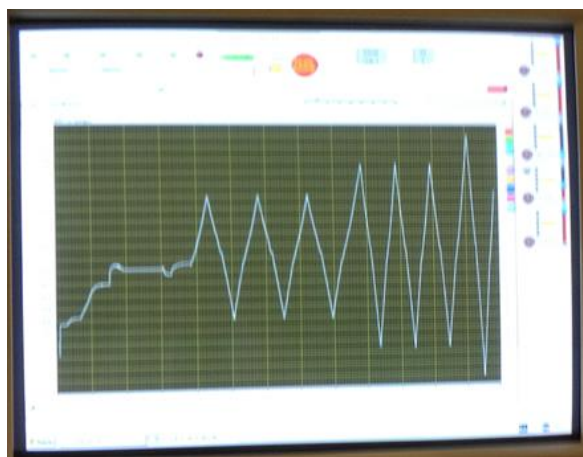


Figura V.46. Sistema de adquisición de datos. Historia de carga lateral cíclica

El otro equipo es el encargado de tomar los datos de toda la instrumentación dispuesta en el soporte. El sistema posibilita la visualización mediante gráficas de los resultados obtenidos del ensayo en tiempo real, así como de los datos de las distintas conexiones. De esta manera, se puede tener controlado el ensayo desde el inicio hasta el fin del mismo, permitiendo su interrupción en caso de ser necesario.

En la Figura V.47 se muestra la pantalla del equipo donde se visualizan parte de las gráficas comentadas anteriormente.

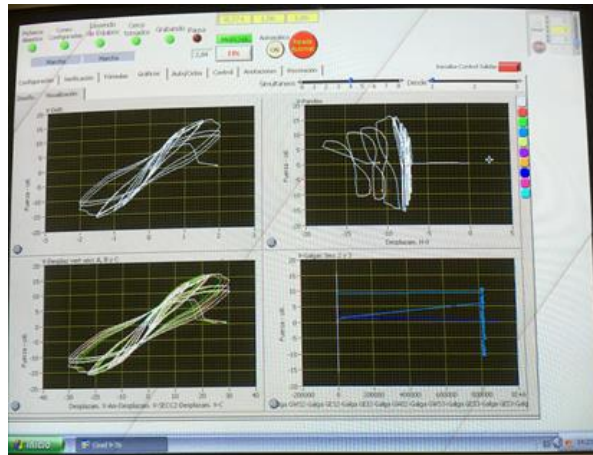
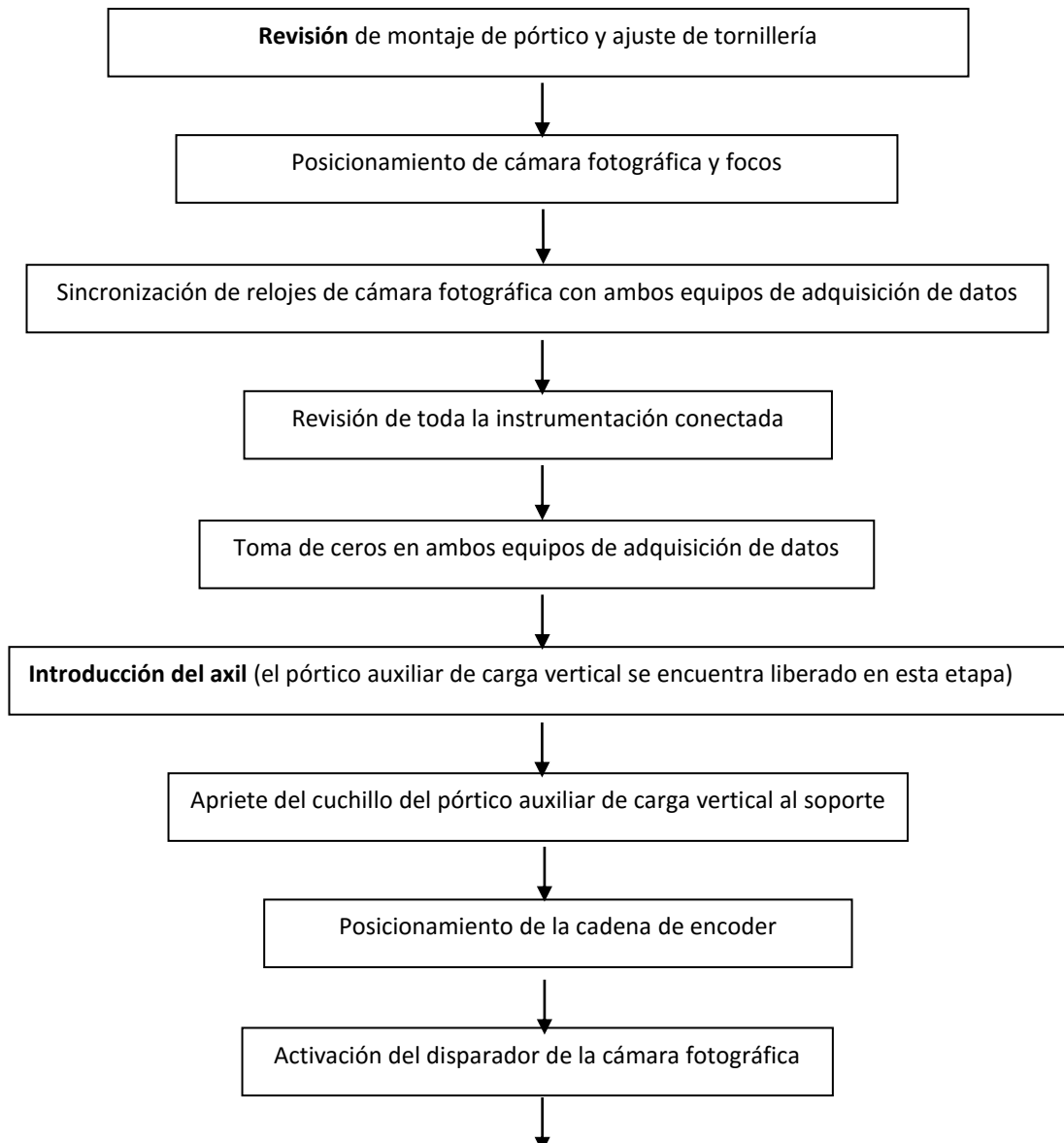
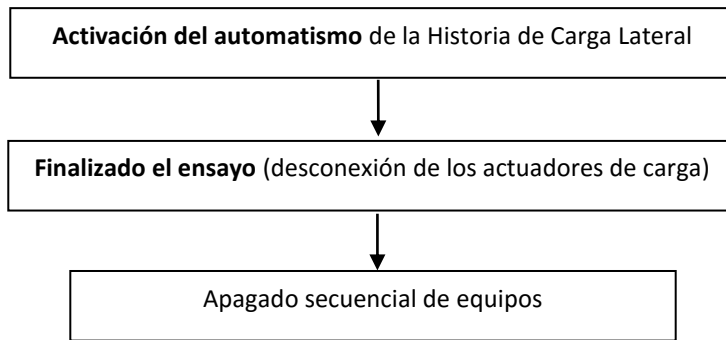


Figura V.47. Sistema de adquisición de datos. Instrumentación

Se ha elaborado una lista de verificación para asegurar la mayor efectividad en el desarrollo del ensayo. Las fases controladas en dicha lista se resumen en el diagrama siguiente:





V.2.4. Desmontaje

Una vez finalizado el ensayo se acomentan las operaciones de desmontaje.

Se comienza con la retirada de todas las conexiones que se han realizado a los distintos tipos de instrumentación empleada. También se retiran los dispositivos auxiliares utilizados para posicionar parte de la instrumentación, así como el encoder y las células de carga.

Previo a la retirada del elemento del pórtico, se toman datos de la rotura observada, tanto mediante medios fotográficos como empleando un acetato donde se efectúa el dibujo del mapa de fisuras (Anejo B: "Mapas de fisuras"). Este procedimiento se lleva a cabo en ambas caras de la zona crítica de rotura, la Este (E) y la Oeste (W).

Realizadas todas estas operaciones se puede proceder a la retirada del soporte del pórtico, desmontando parte de las barras Gewi del bastidor y desacoplando los perfiles UPN modificados que se han dejado embebidos dentro del elemento.

Para poder acometer esta etapa, la manipulación del soporte se realiza en todo momento con la ayuda de un puente grúa, que además facilita el transporte y acopio adecuado del elemento en la zona destinada para ello. Este acopio se puede observar en la la Figura V.48.



Figura V.48. Vista de la zona de acopio de soportes ensayados

CAPÍTULO VI

Presentación de resultados

Este capítulo está dedicado a la presentación de los resultados obtenidos para cada elemento que se ensaya en el marco del programa experimental descrito en capítulo IV. Se detalla la forma en la que se recogen y se presentan los resultados, ilustrándolos con ejemplos de los diferentes casos (Anejo A). El análisis de los resultados se desarrolla en el capítulo siguiente.

La presentación de los resultados se agrupa del siguiente modo:

Un primer grupo, en forma de fichas y croquis, relativo a la fase previa del ensayo, donde se recoge la información necesaria para la fabricación, instrumentación y ensayo del elemento.

Un segundo grupo, formado por tres tipos de fichas y gráficos, donde se recogen la información obtenida mediante la instrumentación dispuesta y la observación directa durante el ensayo.

VI.1. Resultados de preparación del elemento y fase previa de ensayo

Los resultados de preparación del elemento para la fase previa al ensayo se recogen en dos tipos de fichas. La primera es la “Ficha de materiales” y la segunda la “Ficha de instrumentación”.

VI.1.1. Ficha de materiales

En esta ficha se recoge información de cada elemento referente a su fabricación, así como a las probetas de acompañamiento y a los datos obtenidos a partir de éstas.

En el caso del acero la referencia al lote de pertenencia. En el caso del hormigón referentes a la dosificación de las distintas amasadas, a la medida del ensayo de escurrimiento de cada una de ellas y a las distintas observaciones realizadas durante el hormigonado.

También se recoge información de las probetas de control del hormigón, tanto las ensayadas a compresión simple como a flexotracción. Adicionalmente, se añade el cálculo del axil de compresión a aplicar en fase de ensayo.

A continuación, en la Figura VI.1, se muestra un ejemplo de este tipo de ficha.

ICITECH		ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE SOPORTES DE HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES SOMETIDOS A COMPRESIÓN Y CARGA LATERAL CÍCLICA		UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA	
ELEMENTO Nº: AS11-1					
ARMADURA PASIVA:			LOTE Nº 2		
HORMIGÓN					
fc nominal:	Fecha	Tipo Fibra	% Fibra		
130 Mpa	17/06/2014	MIXTAS	2%		
DOSIFICACIÓN PREVISTA (kg) con cemento y arenas (ensacados)		AMASADA 1	AMASADA 2		
Componentes:	Volumen (m³):	1	0,105	0,105	
CEM 42.5 R-SR	1000,00	105,00	105,00		
Agua	184,00	19,32	18,44		
Humo de Sílice 940 D	150,00	15,75	15,75		
Arena sílicea (AF-T-0/4-5)	310,00	32,55	32,55		
Arena sílicea (AF-T-0/8-5)	575,00	60,38	60,38		
Sika 20 HE	28,50	2,99	2,99		
Fibras cortas (Straight) 13/0.5	90,00	9,45	9,45		
Fibras largas (Hook End) 80/30	60,00	6,30	6,30		
OBSERVACIONES:					
Amasada 2: se corrige agua quitando al agua de la 1ª amasada 0.88 kg					
DATOS PREVIOS ROTURA SOPORTE					
Fecha Amasado:	17/06/2014				
Fecha Rotura:	15/07/2014				
Días:	28				
AXIL APLICADO (kN):					
v	b (m)	h (m)			
0,20	0,15	0,26			
N Teórico (kN):	1034,75				
N Aplicado (kN):	1034,96				
N Real Medido (kN):	1042,63				
OBSERVACIONES:					
PROBETAS COMPRESIÓN					
Cilíndrica 1	129,99	MPa	Cúbica 1	160,87	MPa
Cilíndrica 2	140,95	MPa	Cúbica 2	154,28	MPa
Cilíndrica 3	127,04	MPa	Cúbica 3	138,32	MPa
E	45328,00	MPa	Cúbica 4	151,43	MPa
f_{cm, cilíndrica}	132,66	MPa	f_{cm, cúbica}	151,23	MPa
PROBETAS FLEXOTRACCIÓN					
Prismática 1			Prismática 2		
f_{R,LOP}	10,31	MPa	f_{R,LOP}	11,08	MPa
f_{R,1}	17,79	MPa	f_{R,1}	20,09	MPa
f_{R,2}	13,04	MPa	f_{R,2}	11,57	MPa
f_{R,3}	4,63	MPa	f_{R,3}	6,10	MPa
f_{R,4}	-	MPa	f_{R,4}	-	MPa

Figura VI.1. Ficha tipo de materiales

VI.1.2. Ficha de instrumentación

Para cada elemento se completa una segunda ficha que recoge las medidas reales que tiene el soporte una vez fabricado, incluyendo las medidas de la ferralla y del recubrimiento de hormigón ejecutado. Además se representan distintos croquis y el posicionamiento real de la instrumentación empleada, tanto la referida a las bandas extensométricas como a los captadores de desplazamiento. Ambos tipos de instrumentación se han descrito con mayor detalle en el capítulo anterior.

En la Figura VI.2 se muestra un ejemplo de este tipo de ficha.

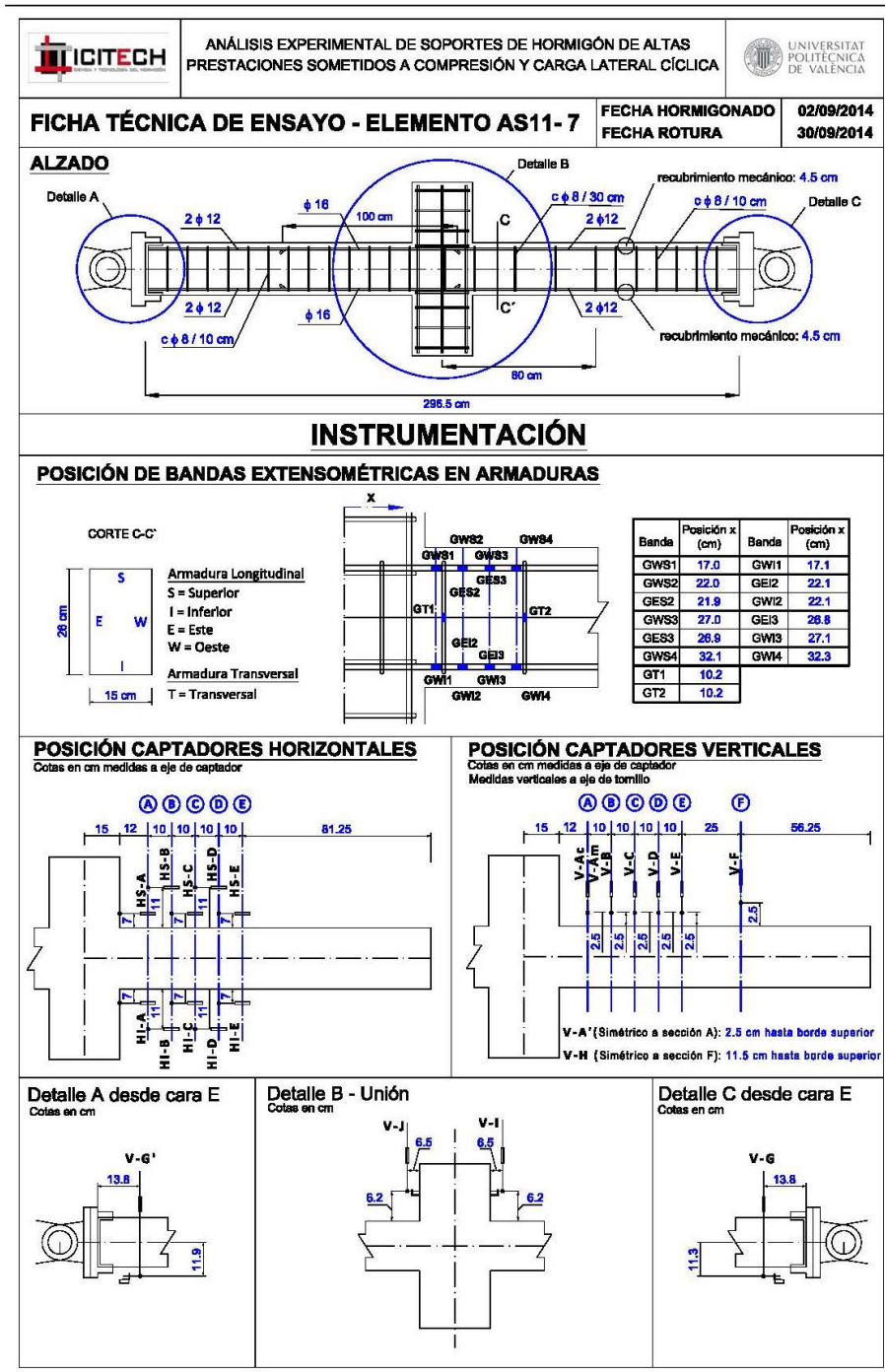


Figura VI.2. Ficha tipo de instrumentación

VI.2. Resultados del ensayo del elemento

Del ensayo del elemento se recogen diversos resultados así como parámetros de cada uno de los elementos. Para un mejor tratamiento de la información se realizan tres tipos de fichas, una donde se recogen datos y observaciones directas de la fase de ensayo, otra donde se representan las gráficas de medidas directas adquiridas por la instrumentación dispuesta y, por último, una gráficas por elemento donde, de manera tratada no directa, se obtienen parámetros de comportamiento necesarios para el posterior análisis.

VI.2.1. Ficha de la rotura

En esta ficha se recoge información directamente observada sobre el elemento en la fase de ensayo, así como los mapas de fisuras de la zona crítica vista desde ambas caras del elemento, así como, diversa documentación fotográfica de instantes clave (caída en subida y bajada del 20 % de la carga lateral y el estado final del elemento en rotura).

En la Figura VI.3 se muestra un ejemplo de lo anteriormente comentado.

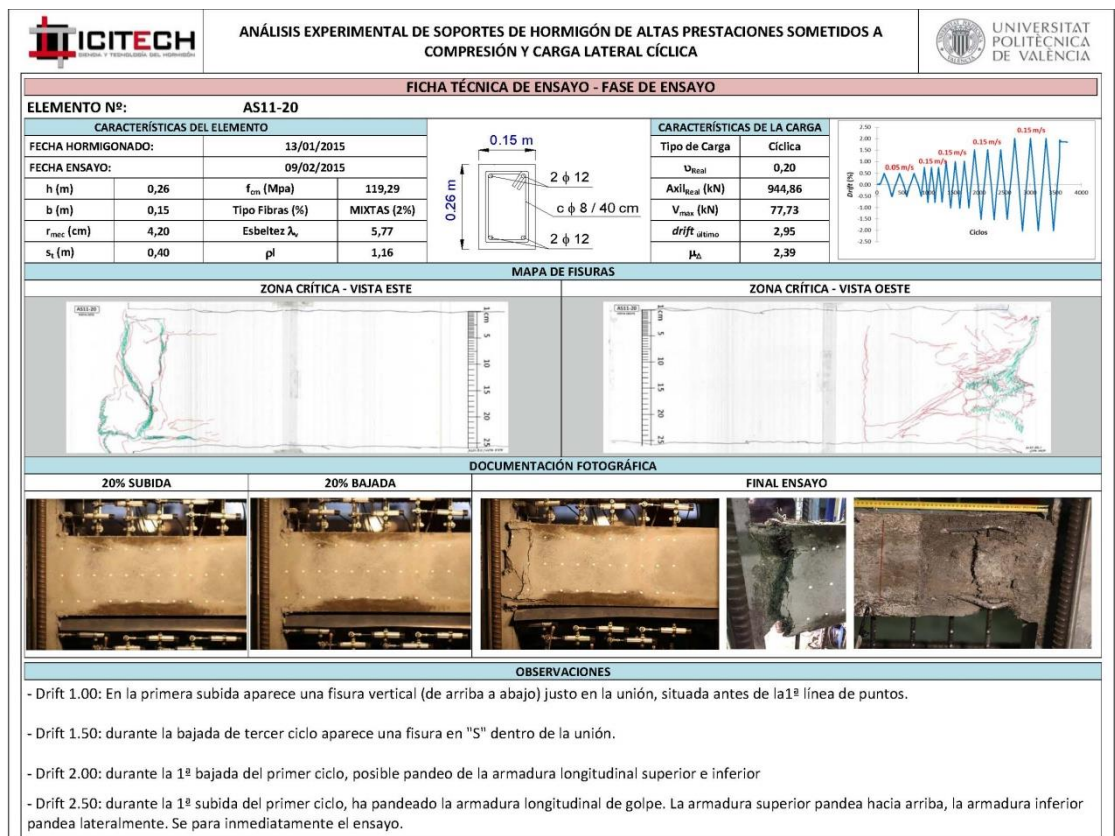


Figura VI.3. Ficha tipo rotura

VI.2.2. Ficha de gráficas directas

De los datos adquiridos de cada elemento se han seleccionado los más representativos y se han recogido en esta ficha tipo, representados mediante gráficas de medida directa.

Todas las gráficas de esta ficha representan los distintos datos frente a la carga lateral, en kN, aplicada al elemento.

Hay dos grupos de gráficas: uno correspondiente a los captadores de desplazamiento, y otro a las bandas extensométricas, ambos seleccionados dentro de la zona crítica de rotura. Un ejemplo se puede ver en la Figura VI.4.

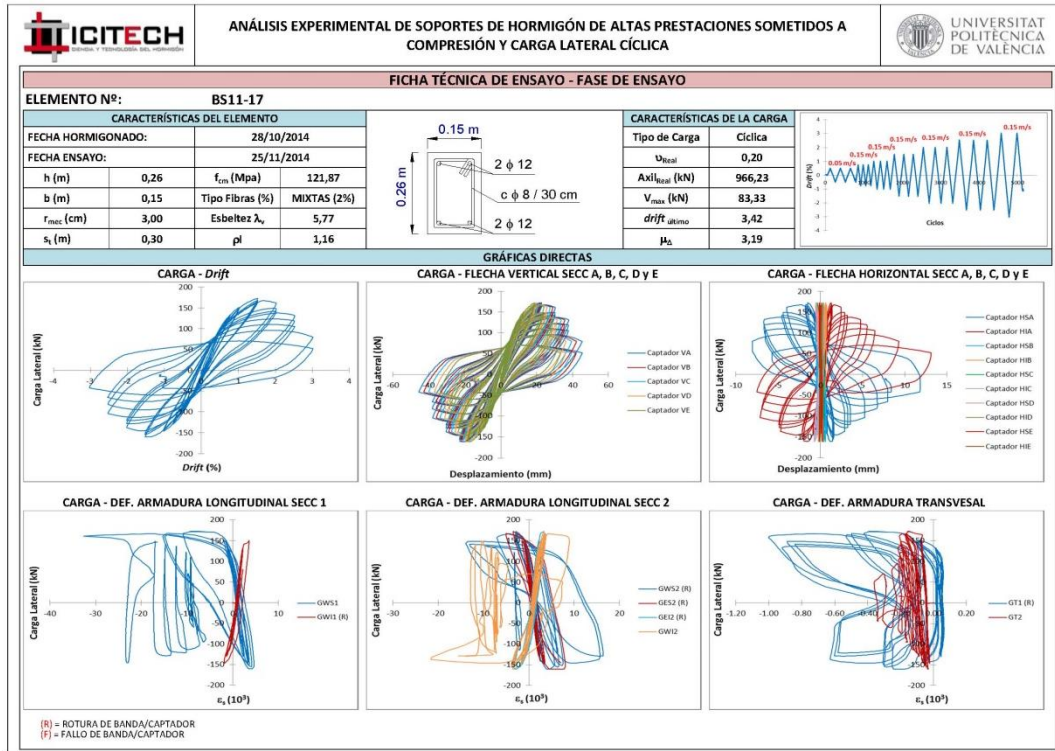


Figura VI.4. Ficha tipo Gráficas Directas

VI.2.3. Ficha de parámetros de comportamiento

Después de un proceso de tratamiento de datos, en esta última ficha se recogen los parámetros más generales de comportamiento del elemento.

Los parámetros representados son:

- Cortante reducido frente al *Drift*
- Momento flector reducido frente a la Curvatura.
- Energía disipada frente al número de Ciclo.
- Flecha frente a la Longitud del elemento.
- Curvatura frente a la Longitud de plastificación.
- Curvatura frente a la Longitud del elemento.

A continuación, en las Figuras VI.5 y VI.6 se muestra como ejemplo la ficha tipo realizada, formada por dos páginas por elemento.

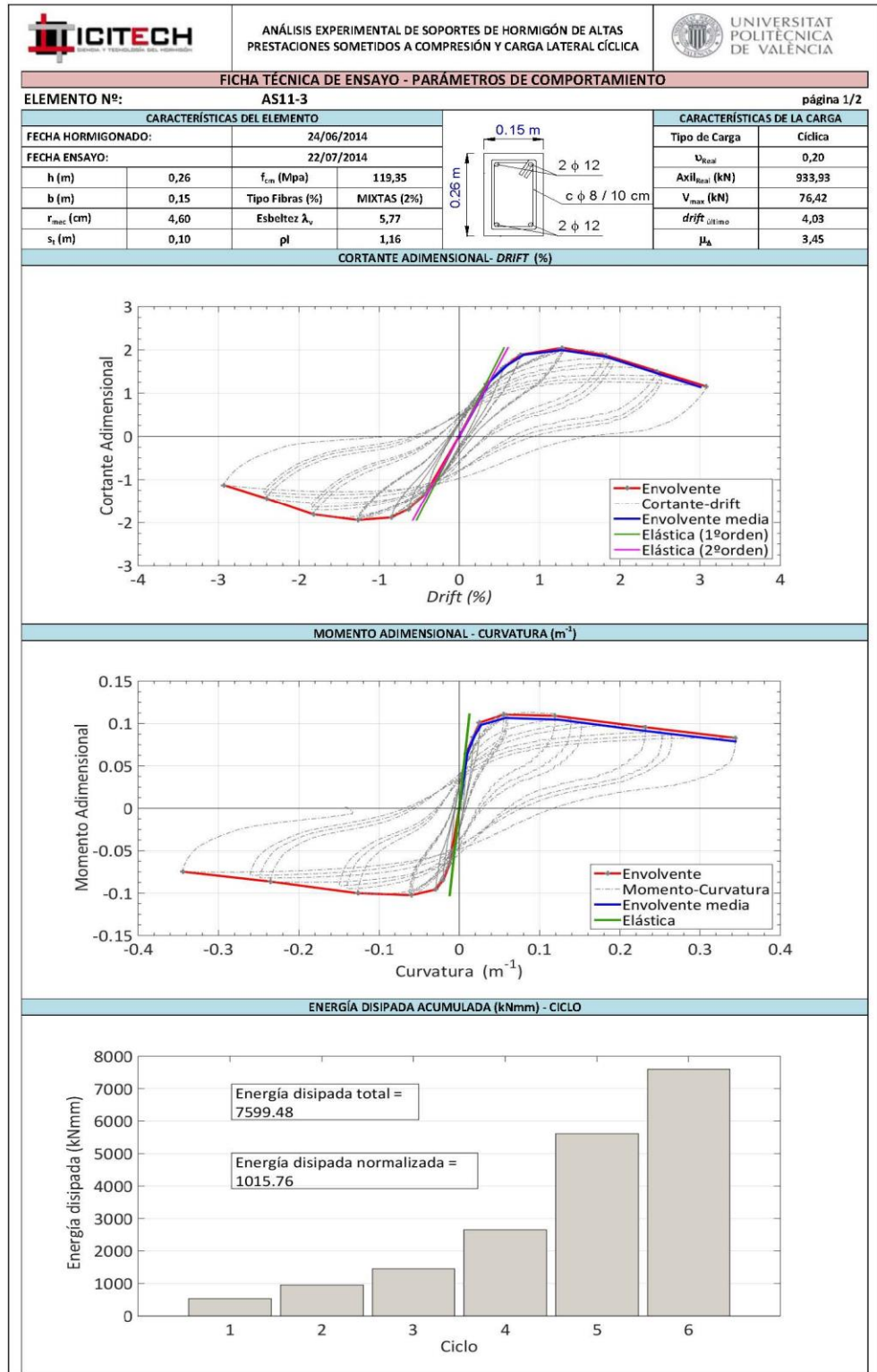


Figura VI.5. Ficha tipo parámetros de comportamiento (1 de 2)

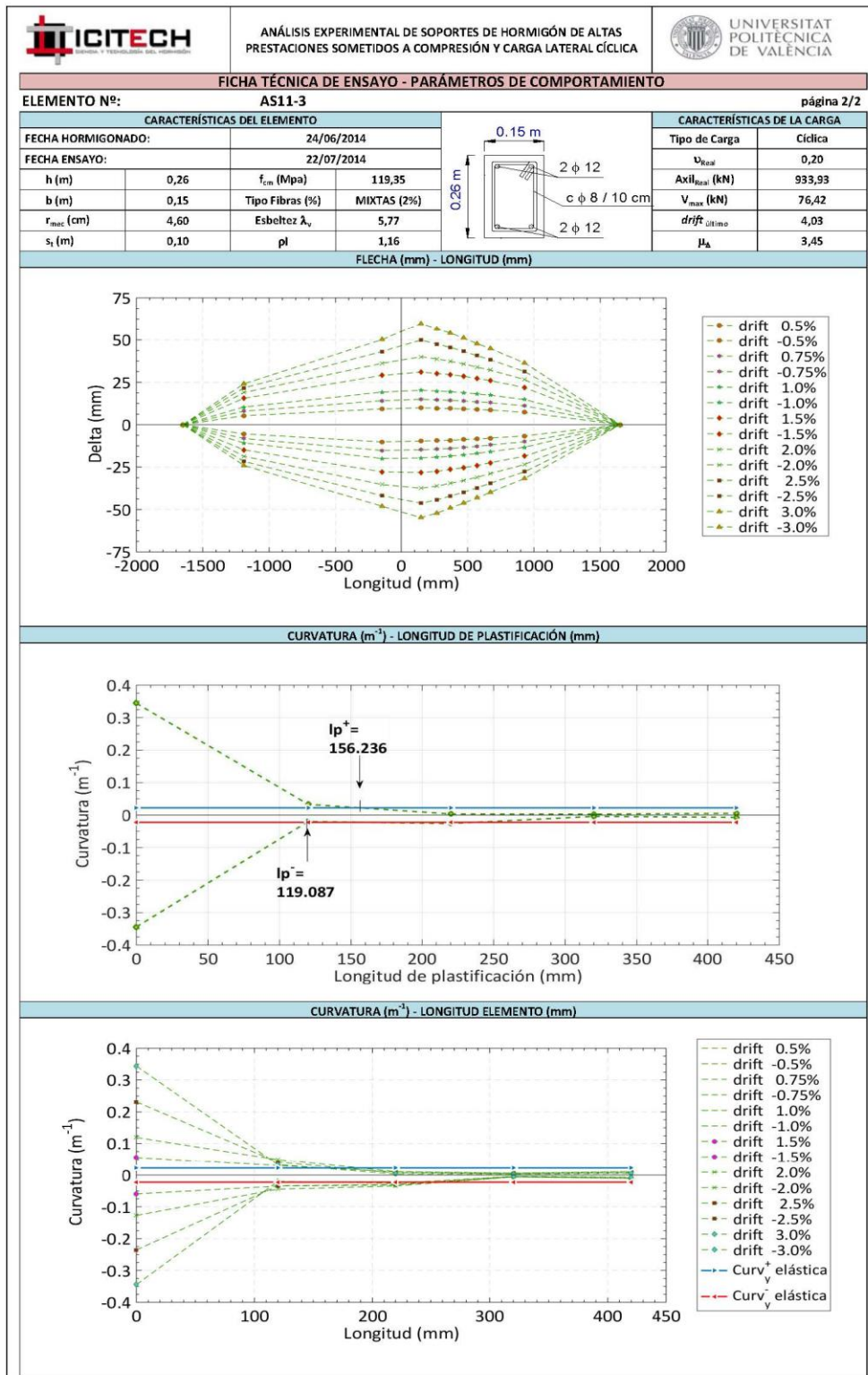


Figura VI.6. Ficha tipo parámetros de comportamiento (2 de 2).

CAPÍTULO VII

Observaciones experimentales y resultados directos

En este capítulo se recopilan las observaciones experimentales directamente recogidas en fase de realización y finalización del ensayo de los soportes. Se incluyen los mapas de fisuras correspondientes a ambas caras de los elementos ensayados, así como las gráficas de las medidas directas efectuadas por el sistema de adquisición de datos a través de la instrumentación dispuesta en los elementos.

VII.1. Comportamiento observado durante el ensayo

VII.1.1. Modo de fallo observado

Durante la fase de ensayo y remate del mismo, se ha efectuado la observación física y directa del comportamiento de cada elemento correspondiente a la campaña experimental recogida en esta tesis doctoral.

Los posibles modos de fallo que se esperaba visualizar son: el salto de recubrimiento, el pandeo de las armaduras longitudinales, el tipo de rotura cuando se alcanza la carga última, y la longitud y posición de la zona crítica de daño.

Para cada soporte se ha realizado una ficha donde se recoge tanto el patrón de fisuración observado al finalizar el ensayo como algunas fotografías correspondientes a aplicaciones de carga significativas y las anotaciones plasmadas durante la fase del ensayo del mismo. En el Anejo A se encuentran la totalidad de las fichas elaboradas.

En las distintas roturas observadas en los ensayos realizados cabe destacar que, aunque exista un gran daño y deformación por aplastamiento del hormigón, no se aprecia un fallo por salto de recubrimiento. Cabe destacar que en casi todos los ensayos se observa una multifisuración que se asocia al efecto de cosido de las fibras metálicas integrantes del material.

En la Figura VII.1 se muestra un ejemplo de las fisuración observada a la que se hace referencia en el párrafo anterior.

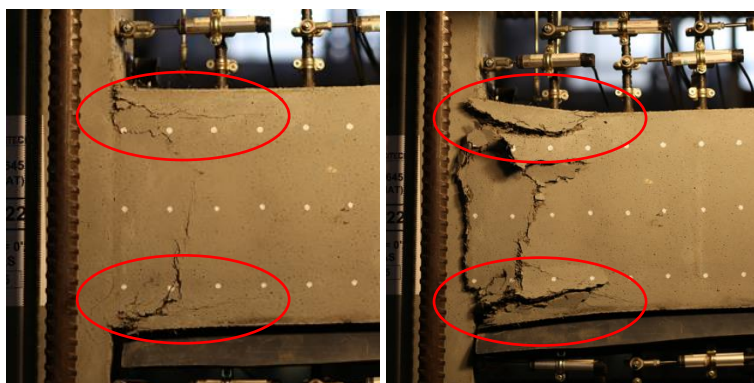


Figura VII.1. Fisuración del elemento AS11-22. La vista de la izquierda corresponde con la caída de carga del 20%, la de la derecha con el final del ensayo

VII.1.2. Patrón de fisuración y longitud crítica de daño

En la bibliografía consultada para la realización de esta tesis doctoral se han encontrado investigaciones que definen y evalúan la longitud crítica de daño para soportes. En particular, son significativos los trabajos realizados por Pam and Ho (2009) [89]. Estos investigadores proponen dos métodos directos para obtener la longitud de la zona crítica; uno de ellos consiste en la medida directa de la observación visual y es el método empleado en este punto en el presente trabajo (Figura VII.2).

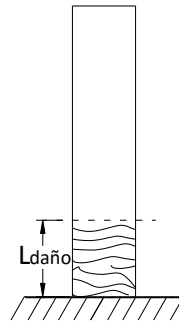


Figura VII.2. Longitud de la zona de daño visual

Para una mayor facilidad de la medida de la longitud crítica de daño se ha dibujado un patrón de fisuración sobre el elemento. Esta herramienta será complementaria a la observación directa visual y la realizada mediante medios fotográficos.

El hormigón empleado para fabricar los soportes es un hormigón de altas prestaciones cuyo comportamiento frente a la fisuración difiere bastante del hormigón convencional. De forma general, la fisuración se produce mediante una red de multifisuras difíciles de detectar mediante observación directa. Es por ello que para facilitar la toma de datos del patrón de fisuración, se procede a pintar con un barniz hidrófugo la cara designada como W, de forma que, una vez finalizado el ensayo, al empapar la zona barnizada con agua, se revelen las fisuras, como se explicó en el Capítulo V en la Fase de ensayo a rotura.

Para obtener el patrón de fisuración se fija un papel de acetato transparente al elemento, se pintan con un rotulador indeleble y se escanea para su posterior archivo y análisis.

En la Figura VII.3 se muestra un ejemplo de cómo se han obtenido las longitudes de daño para los distintos soportes. Se identifica la zona dañada y se marca para poder medir sobre sus correspondientes mapas de fisuras. Para el resto de soportes ensayados esta información se puede encontrar en el Anejo B.

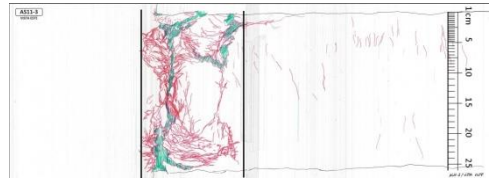
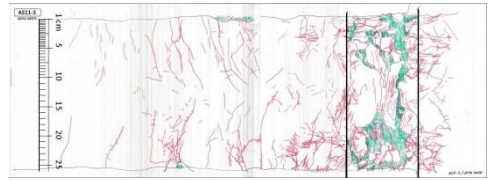
AS11-3 (E)	AS11-3 (W)	Ldaño_med
 <p style="text-align: center;">16.47 cm</p>	 <p style="text-align: center;">12.02 cm</p>	14.25 cm

Figura VII.3. Ejemplo de medida de la longitud de daño por cara (E, W) y su longitud media de daño ($L_{daño_med}$)

En su trabajo Pam and Ho (2009) [89] proponen una longitud crítica esperada de daño en función del nivel de axil de compresión aplicado (ν) y de la mayor dimensión de la sección transversal (h).

- Si $v \in (0, 0.1)$ ----- $L_{daño}=1.0 \cdot h$
- Si $v \in (0.1, 0.3)$ ----- $L_{daño}=1.5 \cdot h$
- Si $v \in (0.3, 0.65)$ ----- $L_{daño}=2.0 \cdot h$

Recapitulando los valores observados en los distintos elementos y comparándolos con la expresión propuesta por la bibliografía comentada se obtiene lo siguiente:

Tabla VII.1.Valores observados y valores teóricos según Pam and Ho [89] por series

Serie 1: Separación de Ast	b_0 (m)	h (m)	λ_v	Tipo fibra	V_f (%)	s_t (m)	ρ_l	r/h	Axil reducido (v)	VISUAL $L_{daño}$ (m)	VISUAL $L_{daño}/h$	Pam & Ho $L_{daño}/h$
AS11-3	0,15	0,26	5,77	I	2,00%	0,10	1,16%	0,15	0,20	0,143	0,55	1,50
AS11-2R	0,15	0,26	5,77	I	2,00%	0,20	1,16%	0,15	0,20	0,184	0,71	1,50
AS11-1	0,15	0,26	5,77	I	2,00%	0,30	1,16%	0,15	0,20	0,143	0,55	1,50
AS11-22	0,15	0,26	5,77	I	2,00%	0,30	1,16%	0,15	0,20	0,183	0,70	1,50
AS11-20	0,15	0,26	5,77	I	2,00%	0,40	1,16%	0,15	0,20	0,130	0,50	1,50
AS11-21	0,15	0,26	5,77	I	2,00%	0,50	1,16%	0,15	0,20	0,127	0,49	1,50

Serie 1: Tipo de fibras	b_0 (m)	h (m)	λ_v	Tipo fibra	V_f (%)	s_t (m)	ρ_l	r/h	Axil reducido (v)	VISUAL $L_{daño}$ (m)	VISUAL $L_{daño}/h$	Pam & Ho $L_{daño}/h$
AS11-3	0,15	0,26	5,77	I	2,00%	0,10	1,16%	0,15	0,20	0,143	0,55	1,50
AS11-2R	0,15	0,26	5,77	I	2,00%	0,20	1,16%	0,15	0,20	0,184	0,71	1,50
AS11-1	0,15	0,26	5,77	I	2,00%	0,30	1,16%	0,15	0,20	0,143	0,55	1,50
AS11-22	0,15	0,26	5,77	I	2,00%	0,30	1,16%	0,15	0,20	0,183	0,70	1,50
AS11-6	0,15	0,26	5,77	II	2,00%	0,10	1,16%	0,15	0,20	0,168	0,65	1,50
AS11-5	0,15	0,26	5,77	II	2,00%	0,20	1,16%	0,15	0,20	0,154	0,59	1,50
AS11-4	0,15	0,26	5,77	II	2,00%	0,30	1,16%	0,15	0,20	0,160	0,62	1,50

Serie 1: Volumen de fibras	b_0 (m)	h (m)	λ_v	Tipo fibra	V_f (%)	s_t (m)	ρ_l	r/h	Axil reducido (v)	VISUAL $L_{daño}$ (m)	VISUAL $L_{daño}/h$	Pam & Ho $L_{daño}/h$
AS11-3	0,15	0,26	5,77	I	2,00%	0,10	1,16%	0,15	0,20	0,143	0,55	1,50
AS11-2R	0,15	0,26	5,77	I	2,00%	0,20	1,16%	0,15	0,20	0,184	0,71	1,50
AS11-1	0,15	0,26	5,77	I	2,00%	0,30	1,16%	0,15	0,20	0,143	0,55	1,50
AS11-22	0,15	0,26	5,77	I	2,00%	0,30	1,16%	0,15	0,20	0,183	0,70	1,50
AS11-9	0,15	0,26	5,77	I	1,00%	0,10	1,16%	0,15	0,20	0,168	0,64	1,50
AS11-8	0,15	0,26	5,77	I	1,00%	0,20	1,16%	0,15	0,20	0,181	0,70	1,50
AS11-7	0,15	0,26	5,77	I	1,00%	0,30	1,16%	0,15	0,20	0,220	0,85	1,50

Serie 2: Esbeltez	b_0 (m)	h (m)	λ_v	Tipo fibra	V_f (%)	s_t (m)	ρ_l	r/h	Axil reducido (v)	VISUAL $L_{daño}$ (m)	VISUAL $L_{daño}/h$	Pam & Ho $L_{daño}/h$
AS11-2R	0,15	0,26	5,77	I	2,00%	0,20	1,16%	0,15	0,20	0,184	0,71	1,50
AS21-10	0,15	0,20	7,50	I	2,00%	0,20	1,05%	0,14	0,20	0,138	0,69	1,50
AS31-11	0,15	0,14	10,71	I	2,00%	0,20	0,96%	0,16	0,20	0,096	0,69	1,50

Serie 2: Nivel de axil	b_0 (m)	h (m)	λ_v	Tipo fibra	V_f (%)	s_t (m)	ρ_l	r/h	Axil reducido (v)	VISUAL $L_{daño}$ (m)	VISUAL $L_{daño}/h$	Pam & Ho $L_{daño}/h$
AS21-13	0,15	0,20	7,50	I	2,00%	0,20	1,05%	0,14	0,00	0,057	0,28	1,00
AS21-12	0,15	0,20	7,50	I	2,00%	0,20	1,05%	0,14	0,10	0,120	0,60	1,00
AS21-10	0,15	0,20	7,50	I	2,00%	0,20	1,05%	0,14	0,20	0,138	0,69	1,50
AS21-23	0,15	0,20	7,50	I	2,00%	0,20	1,05%	0,14	0,30	0,169	0,84	1,50
AS21-24	0,15	0,20	7,50	I	2,00%	0,20	1,05%	0,14	0,40	0,246	1,23	2,00

Serie 3: Cuantía As	b_0 (m)	h (m)	λ_v	Tipo fibra	V_f (%)	s_t (m)	ρ_l	r/h	Axil reducido (v)	VISUAL $L_{daño}$ (m)	VISUAL $L_{daño}/h$	Pam & Ho $L_{daño}/h$
AS21-10	0,15	0,20	7,50	I	2,00%	0,20	1,05%	0,14	0,20	0,138	0,69	1,50
AS23-14	0,15	0,20	7,50	I	2,00%	0,20	1,05%	0,14	0,30	0,130	0,65	1,50
AS24-15	0,15	0,20	7,50	I	2,00%	0,20	4,19%	0,17	0,20	0,126	0,63	1,50

Serie 4: Recubrimiento relativo	b_0 (m)	h (m)	λ_v	Tipo fibra	V_f (%)	s_t (m)	ρ_l	r/h	Axil reducido (v)	VISUAL $L_{daño}$ (m)	VISUAL $L_{daño}/h$	Pam & Ho $L_{daño}/h$
AS11-3	0,15	0,26	5,77	I	2,00%	0,10	1,16%	0,15	0,20	0,143	0,55	1,50
BS11-18	0,15	0,26	5,77	I	2,00%	0,10	1,16%	0,09	0,20	0,174	0,67	1,50
AS11-1	0,15	0,26	5,77	I	2,00%	0,30	1,16%	0,15	0,20	0,143	0,55	1,50
AS11-22	0,15	0,26	5,77	I	2,00%	0,30	1,16%	0,15	0,20	0,183	0,70	1,50
AS13-17	0,15	0,26	5,77	I	2,00%	0,30	1,16%	0,09	0,20	0,198	0,76	1,50
AS13-16	0,15	0,26	5,77	I	2,00%	0,30	2,06%	0,16	0,20	0,225	0,86	1,50
BS13-19	0,15	0,26	5,77	I	2,00%	0,30	2,06%	0,10	0,20	0,240	0,92	1,50

Serie 5: Tipo de carga	b_0 (m)	h (m)	λ_v	Tipo fibra	V_f (%)	s_t (m)	ρ_l	r/h	Axil reducido (v)	VISUAL $L_{daño}$ (m)	VISUAL $L_{daño}/h$	Pam & Ho $L_{daño}/h$
AS11-1	0,15	0,26	5,77	I	2,00%	0,30	1,16%	0,15	0,20	0,143	0,55	1,50
AS11-22	0,15	0,26	5,77	I	2,00%	0,30	1,16%	0,15	0,20	0,183	0,70	1,50
AS11-25	0,15	0,26	5,77	I	2,00%	0,30	1,16%	0,15	0,20	0,117	0,45	1,50

A la vista de los resultados obtenidos se advierte que en todos los casos la longitud de daño observada visualmente es menor que la teórica propuesta por Pam and Ho (2009) [89].

En relación a los valores obtenidos experimentalmente se observa que no depende de la separación de la armadura transversal ni del tipo de fibra empleada en la matriz del hormigón. Mientras que, a igualdad de parámetros, al disminuir el volumen de las fibras aportadas a la dosificación del hormigón se aprecia un leve aumento de la longitud de daño.

Como es esperable, al aumentar el nivel de carga axial de compresión aplicado (v) se observa claramente un aumento de la longitud crítica de daño, mientras que a medida que se incrementa la esbeltez (λ_v) del elemento disminuye la longitud de daño muy ligeramente.

Con respecto a la variación de la cuantía de la armadura longitudinal, se observa que, para una misma esbeltez ($\lambda_v=7.50$), hay un ligero aumento de la longitud de daño para una menor cuantía de armadura longitudinal.

El canto útil de la sección viene determinado por el valor de la relación r/h, el recubrimiento relativo. Constatándose cómo un menor recubrimiento relativo presenta un ligero aumento de la longitud de daño.

Con respecto al tipo de carga, se observa que no se produce más zona de daño cuando se ensaya el soporte bajo carga monotónica que cuando se aplica una carga cíclica.

VII.1.3. Efecto de la rigidez del stub

La sección de conexión entre el soporte y la zona central del elemento es la sección con mayor momento flector; se conoce a esta sección como *stub*. Según la bibliografía consultada se produce un efecto de confinamiento del *stub* que aumenta la rigidez de la zona

inmediatamente contigua a la unión, alejando la sección crítica de la sección de la conexión (Paultre (2001) [96], Barrera (2012) [15]).

A la vista de las roturas observadas en los distintos elementos ensayados en esta tesis doctoral se observa que, salvo una excepción clara, el efecto de la rigidez del *stub* es despreciable, llegando en algunos soportes a introducirse la sección crítica dentro del propio *stub*.

La excepción corresponde al soporte AS21-13, en el que la sección de rotura se produce, aproximadamente, a 18.5 cm de la conexión. Este elemento se ensaya con un nivel de axil de compresión nulo, aplicando solo carga lateral cíclica. Esto puede ser debido a que al ejecutar el soporte se ha generado una sección débil por coincidir en esta posición una armadura transversal con una barra dispuesta adicionalmente para situar la instrumentación externa.

Una posible explicación de porqué este fenómeno no se observa en este trabajo es que todos los elementos se han fabricado con hormigones de muy altas prestaciones. Este material aporta un nivel de confinamiento y rigidez que consigue hacer despreciable el confinamiento debido al efecto *stub*.

VII.1.4. Pandeo de la armadura

Con el esquema de cargas planteado sobre el elemento a ensayar se produce una tensión de compresión unidireccional en el núcleo de hormigón. Debido al efecto Poisson del material, se generan unas presiones laterales que empujan a las armaduras longitudinales que conforman la ferralla del soporte.

Puede aparecer un efecto de pandeo local en las armaduras cuando se combina la actuación de las presiones laterales con la posibilidad de que la armadura alcance su límite elástico, de modo que las barras empiecen a deformarse en el rango plástico, ya que la tensión de compresión a la que se encuentran sometidas las barras produce un momento flector de segundo orden. Los mecanismos utilizados para conseguir neutralizar ese efecto son generalmente dos: la disposición de la armadura transversal y la capa de recubrimiento de hormigón.

Las consecuencias de que se produzca este efecto de pandeo local son el salto del recubrimiento de hormigón y la pérdida de rigidez del elemento, de forma instantánea, afectando al comportamiento global del soporte.

Según las roturas observadas en los distintos ensayos no se aprecia un salto de recubrimiento como tal. En aquellos elementos en los que se produce un gran daño y deformación se mantiene el recubrimiento, si bien existe el desprendimiento de fragmentos de pequeña magnitud. Esto puede ser debido al cosido efectuado por las fibras que componen el hormigón con el que se han fabricado todos los soportes, confirmando el efecto favorable que se consigue con la adición de fibras.

Por otra parte, se ha observado el pandeo local de la armadura longitudinal en algún caso más claramente que en otros. La inspección se realiza de forma visual en la zona de daño o detectando el abombamiento de los laterales del soporte, en la zona de menor recubrimiento. En los elementos en los que no se aprecia directamente de forma visual, se acomete, en caso de ser factible, el picado de la zona de daño para visualizar el estado de la armadura.

En las imágenes de la Figura VII.4 se muestran un par de ejemplos de las visualizaciones realizadas. En la fotografía de la izquierda se muestra un soporte donde se visualizaba

claramente el pandeo local, y en la fotografía de la derecha un elemento que requirió el picado para visualizar el pandeo local.



Figura VII.4. Pandeo local de las armaduras longitudinales

En la Tabla VII.2 se muestran las observaciones visuales del pandeo local de las armaduras.

Tabla VII.2. Datos de los soportes y observación visual de existencia de pandeo local

Serie	Referencia	b_0 (m)	h (m)	s_t (m)	Tipo fibra	V_f (%)	λ_v	Axil reducido (ν)	ρ_l (%)	r/h	Tipo de carga	Pandeo local (visual)
1	AS11-1	0,15	0,26	0,30	I	2%	5,77	0,20	1,16%	0,15	Cíclica	SÍ
	AS11-22	0,15	0,26	0,30	I	2%	5,77	0,20	1,16%	0,15	Cíclica	SÍ
	AS11-2	0,15	0,26	0,20	I	2%	5,77	0,20	1,16%	0,15	Cíclica	NO
	AS11-2R	0,15	0,26	0,20	I	2%	5,77	0,20	1,16%	0,15	Cíclica	SÍ
	AS11-3	0,15	0,26	0,10	I	2%	5,77	0,20	1,16%	0,15	Cíclica	NO
	AS11-20	0,15	0,26	0,40	I	2%	5,77	0,20	1,16%	0,15	Cíclica	SÍ
	AS11-21	0,15	0,26	0,50	I	2%	5,77	0,20	1,16%	0,15	Cíclica	NO
	AS11-4	0,15	0,26	0,30	II	2%	5,77	0,20	1,16%	0,15	Cíclica	NO
	AS11-5	0,15	0,26	0,20	II	2%	5,77	0,20	1,16%	0,15	Cíclica	NO
	AS11-6	0,15	0,26	0,10	II	2%	5,77	0,20	1,16%	0,15	Cíclica	NO
	AS11-7	0,15	0,26	0,30	I	1%	5,77	0,20	1,16%	0,15	Cíclica	SÍ
AS11-8	0,15	0,26	0,20	I	1%	5,77	0,20	1,16%	0,15	Cíclica	SÍ	
AS11-9	0,15	0,26	0,10	I	1%	5,77	0,20	1,16%	0,15	Cíclica	SÍ	
2	AS21-10	0,15	0,20	0,20	I	2%	7,50	0,20	1,05%	0,14	Cíclica	NO
	AS31-11	0,15	0,14	0,20	I	2%	10,71	0,20	0,96%	0,16	Cíclica	NO
	AS21-12	0,15	0,20	0,20	I	2%	7,50	0,10	1,05%	0,14	Cíclica	SÍ
	AS21-13	0,15	0,20	0,20	I	2%	7,50	0,00	1,05%	0,14	Cíclica	NO
	AS21-23	0,15	0,20	0,20	I	2%	7,50	0,30	1,05%	0,14	Cíclica	SÍ
	AS21-24	0,15	0,20	0,20	I	2%	7,50	0,40	1,05%	0,14	Cíclica	SÍ
3	AS23-14	0,15	0,20	0,20	I	2%	7,50	0,20	2,68%	0,16	Cíclica	NO
	AS24-15	0,15	0,20	0,20	I	2%	7,50	0,20	4,19%	0,17	Cíclica	SÍ
	AS13-16	0,15	0,26	0,30	I	2%	5,77	0,20	2,06%	0,16	Cíclica	SÍ
4	BS11-17	0,15	0,26	0,30	I	2%	5,77	0,20	1,16%	0,09	Cíclica	SÍ
	BS11-18	0,15	0,26	0,10	I	2%	5,77	0,20	1,16%	0,09	Cíclica	SÍ
	BS13-19	0,15	0,26	0,30	I	2%	5,77	0,20	2,06%	0,10	Cíclica	SÍ
5	AS11-25	0,15	0,26	0,30	I	2%	5,77	0,20	1,16%	0,2	Monotónica	SÍ

En los soportes con mayor separación de armadura transversal se observa el pandeo local de la armadura, aunque llama la atención que no ocurre así en el soporte con mayor separación de estribos, AS11-21. En algún caso puede resultar curioso que no se observe de forma directa este efecto, como por ejemplo en el elemento AS11-2, mientras que en su repetición, el AS11-2R, se muestra claramente. Una posible explicación puede ser el distinto momento de fabricación de estos soportes con respecto al resto de los que conforman la serie, generando una ligera modificación en el comportamiento resistente del hormigón.

En los elementos fabricados con distinto tipo de fibras, a igualdad de volumen de las mismas, (AS11-4, AS11-5 y AS11-6) no se observa este efecto de pandeo local. En el caso de igualdad de tipo de fibras, si se varía el volumen de las mismas, el efecto se muestra claramente cuando el volumen es inferior, como se constata en los soportes AS11-7, AS11-8 y AS11-9.

Como era de esperar, respecto al nivel de axil aplicado, los elementos más comprimidos son los que muestran el pandeo local más claro. Mientras que si se analizan los elementos de distinta esbeltez no se aprecia ninguna tendencia, al igual que con la cuantía de armadura longitudinal.

Los soportes con un menor recubrimiento nominal, con respecto al resto de elementos, BS11-17, BS11-18 y BS13-19, presentan pandeo local de las armaduras como cabría esperar.

Los elementos fabricados exactamente igual y ensayados bajo distintos tipos de aplicación de carga (AS11-1, AS11-22 y AS11-25), también presentan pandeo local de las armaduras longitudinales.

VII.2. Resultados directos

Mediante la instrumentación dispuesta en los soportes, durante la ejecución del ensayo, se recogen una serie de datos que permiten tener información directa del elemento en una primera aproximación.

En este apartado se muestran los resultados directos más relevantes y en el Capítulo VIII se realiza el análisis de los mismos.

VII.2.1. Carga lateral cíclica – Drift

Una curva que define cómo se comporta el soporte durante el ensayo es la curva carga lateral-*drift*. Para poder representarla de forma sencilla se obtienen los datos de las medidas registradas por la célula de carga del actuador hidráulico, con el que se aplica la carga lateral cíclica, y del captador de desplazamiento vertical situado en la zona crítica sospechada.

Sabiendo que el *drift* nominal es la relación entre el desplazamiento del captador vertical y la distancia entre esa posición y el apoyo del soporte, se obtiene de forma sencilla su valor y es el que se indica en el protocolo de ensayo, mientras que el *drift* real es el realmente registrado en el soporte ensayado.

En la Figura VII.5 se muestra un ejemplo de este tipo de gráficas. El resto se encuentran en las correspondientes fichas de “Resultados directos” por elemento recogidas en el Anejo A.

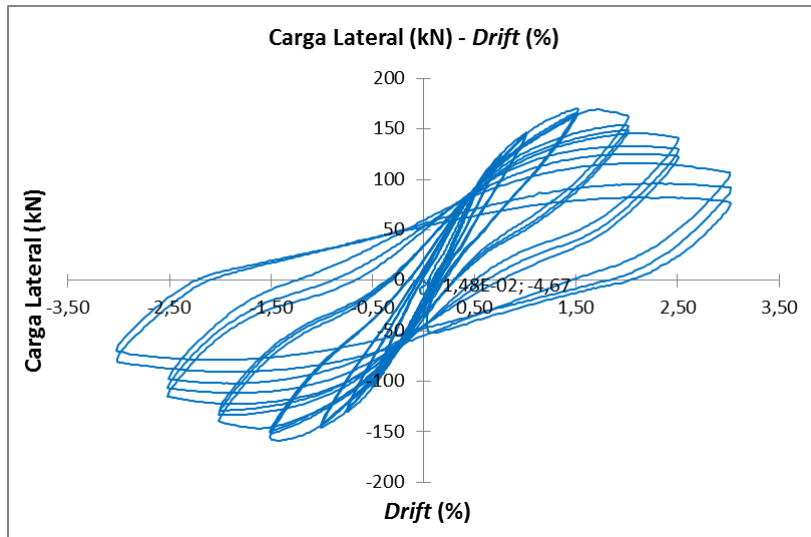


Figura VII.5. Ejemplo de curva carga Lateral – drift

VII.2.2. Deformada del elemento

Con los datos registrados por los captadores verticales se puede representar la deformada longitudinal de los elementos ensayados.

Para que la representación se ajuste a la realidad de la deformación de la pieza, los datos directamente adquiridos se corrigen con el peso propio del soporte y con los posibles movimientos del pórtico de ensayo, asistidos por los datos de sendos captadores situados en puntos estratégicos del elemento.

En todos los casos las deformadas se han obtenido a distintos niveles de *drift* nominal para una mejor interpretación de los resultados.

En general las representaciones obtenidas son similares a la mostrada en la Figura VII.6.

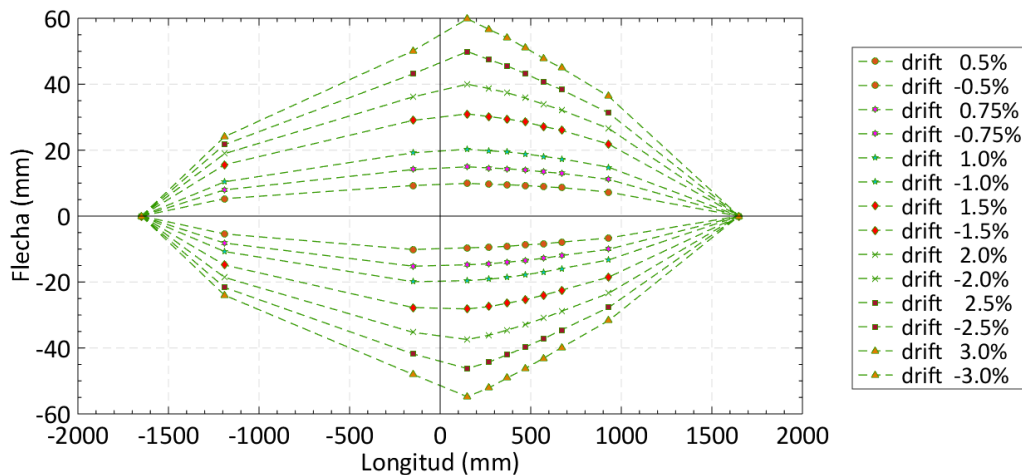


Figura VII.6. Ejemplo de Deformada del soporte para distintos niveles de *drift* nominal

Para bajos niveles de *drift* nominal, mientras la fisuración no ha comenzado o es poco apreciable, la deformada adopta una distribución que se puede aproximar a una cúbica. Una vez se desarrolla la fisuración del soporte y las flechas son mayores, aparecen diversos picos en la representación de la deformada, como se puede observar en la Figura VII.7.

Asimismo, dado su carácter singular, se muestran las deformadas de dos soportes que corresponden a un nivel de axil de compresión nulo (Figura VII.7) y máximo (Figura VII.8). En el primer caso (AS21-13) la deformada es la esperada en los ensayos de flexión simple sin axil para diferentes estados de carga, desarrollando una rótula punto. En el segundo, la de máximo axil de compresión (AS21-24), la deformada adopta una distribución que puede ser ajustada a una función polinómica.

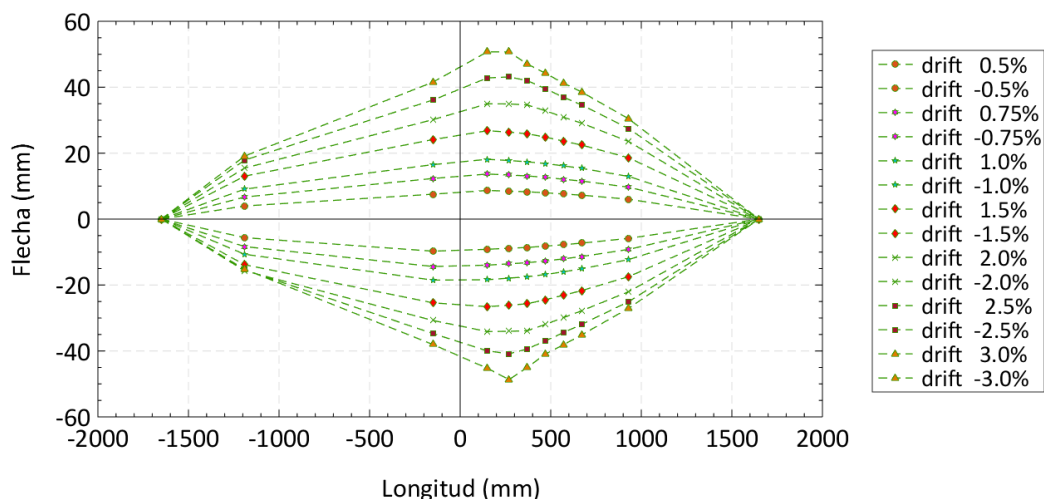


Figura VII.7. Deformada del soporte AS21-13. Axil de compresión nulo

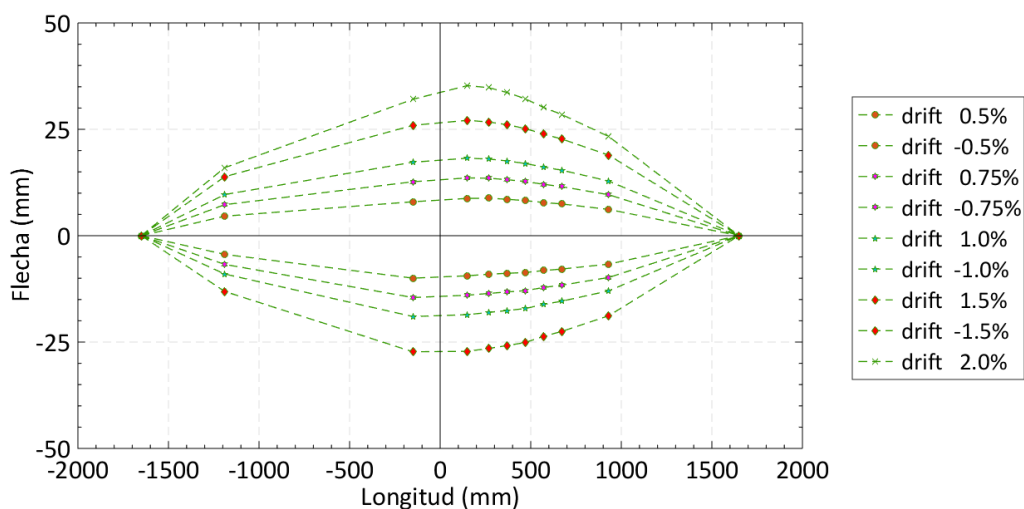


Figura VII.8. Deformada del soporte AS21-24. Axil de compresión máximo

VII.2.3. Deformación de la armadura en tracción y en compresión.

Como se comentó en el Capítulo V, se instrumenta la zona crítica del ensayo con bandas extensométricas que permiten medir las deformaciones de la armadura pasiva tanto de tracción como de compresión. La posición y disposición de estas bandas se pueden consultar en dicho capítulo.

Asumiendo la hipótesis de sección plana (hipótesis de Navier-Bernouilli), y tomando el valor de la deformación en la armadura, se pueden obtener de forma indirecta la curvatura de la sección y la deformación del hormigón en la fibra más comprimida.

A la vista de la respuesta en deformaciones que se produce en las armaduras durante el desarrollo del ensayo, se puede tener información del estado de los materiales, lo que permite identificar el comienzo de la plastificación y verificar el estado final de los mismos.

A modo de ejemplo en la Figura VII.9, con una gráfica “carga lateral- deformación”, se muestra la respuesta de las bandas dispuestas en la sección 1 de uno de los soportes ensayados. El resto de las gráficas de las distintas secciones relevantes, tanto de este ejemplo como del conjunto de los soportes que forman la campaña de ensayos, pueden consultarse en el Anejo A, en sus respectivas fichas de Gráficas Directas.

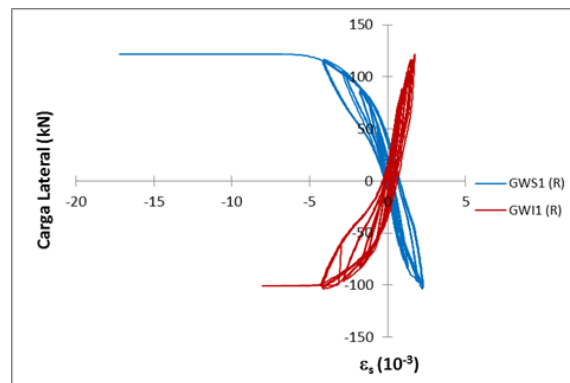


Figura VII.9. Gráfica Carga Lateral- ϵ del elemento AS23-14

VII.2.4. Modo de rotura

De manera directa también se pudo observar el modo de rotura en todos los ensayos.

Aunque en la campaña se plantean ensayos de elementos armados con grandes separaciones de armadura transversal, AS11-20 ($s_t= 0.40$ cm) y AS11-21 ($s_t= 0.50$ cm), ningún soporte presentó una forma de rotura por cortante. Todos los modos de rotura fueron por fallo de flexión.

La rotura por flexión se puede producir por agotamiento o por inestabilidad. El criterio para identificar un tipo de fallo u otro consiste en que, si el momento máximo se produce a la vez que el cortante máximo, el fallo es por agotamiento, y, si el momento máximo se produce con un descenso del cortante máximo, entonces resulta una rotura por inestabilidad.

En general, una vez observado el comportamiento hasta la rotura de todos los soportes de este trabajo, se ha producido durante el desarrollo del mismo una multifisuración que ha concluido en una fisuración discreta, generándose una única y gran fisura, dando lugar a una

longitud de daño menor que la que se hubiera desarrollado en un hormigón convencional donde el comportamiento en rotura se alcanza con una fisuración distribuida.

En la Figura VII.10 se muestran dos ejemplos de los modos de rotura observados.



Figura VII.10. Rotura de soporte AS11-2R y AS21-24

CAPÍTULO VIII

Análisis de los resultados experimentales

En este capítulo se realiza un análisis de los resultados experimentales, tanto a nivel resistente como deformacional. El capítulo comienza con la determinación de la sección crítica del soporte a partir de las deformaciones de los materiales obtenidas experimentalmente. Mediante la obtención del cortante y del momento flector último se obtienen los valores resistentes de los elementos. Se estudia el modo de fallo esperable para cada elemento. Se obtienen también las curvas experimentales cortante-desplazamiento y momento-curvatura, así como las envolventes de las mismas. Además, mediante modelos de existentes en la bibliografía, se obtienen los diagramas idealizados, y se efectúa el análisis paramétrico de los índices de ductilidad. Finalmente se efectúa una discusión sobre el módulo de deformación del hormigón, así como de la rigidez elástica efectiva y la longitud de plastificación.

VIII.1. Determinación de la sección crítica del soporte

Para determinar la posición de la sección crítica en el soporte se analizará el perfil de deformaciones de la armadura longitudinal.

VIII.1.1. Análisis de la deformación en la armadura longitudinal

En el Capítulo V se han descrito los distintos tipos de instrumentación dispuesta y su posición en cada soporte ensayado.

Con los valores obtenidos por las bandas extensométricas situadas en las armaduras longitudinales se puede representar su deformación para cada estado de carga. Para llevar a cabo el análisis de deformación, se partirá de la toma de datos de las cuatro secciones de medida de la zona crítica. Se usará el valor directamente adquirido salvo en las secciones donde se disponga de dos medidas de bandas, en donde se adoptará el valor medio obtenido de las mismas. A partir del perfil de deformaciones se puede detectar dónde se encuentra la sección crítica para cada soporte.

Ahora bien, debido a que la aplicación de la carga lateral es cíclica, la deformación de la armadura longitudinal variará en función de que el ciclo sea de subida o de bajada. Con el fin de aclarar en qué situación se encuentra la armadura, en las Figuras VIII.1 Y VIII.2 se representan, a nivel de elemento y sección, la posición deformada y las solicitaciones actuantes para ambos ciclos.

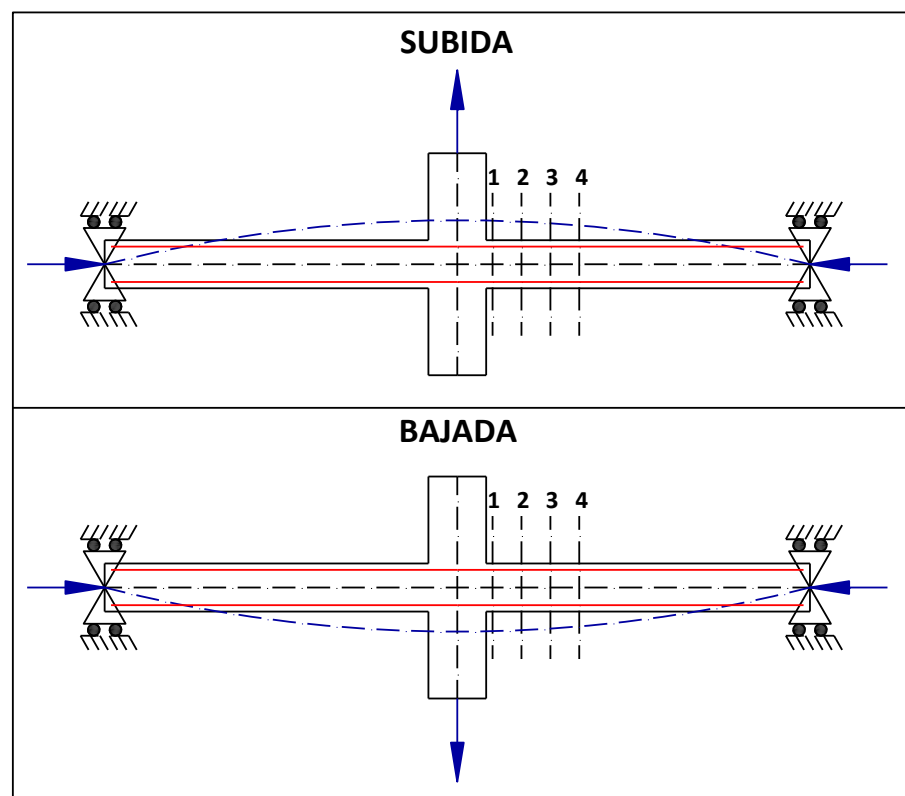


Figura VIII.1. Solicitaciones y deformada a nivel elemento. Secciones de medida de bandas extensométricas.

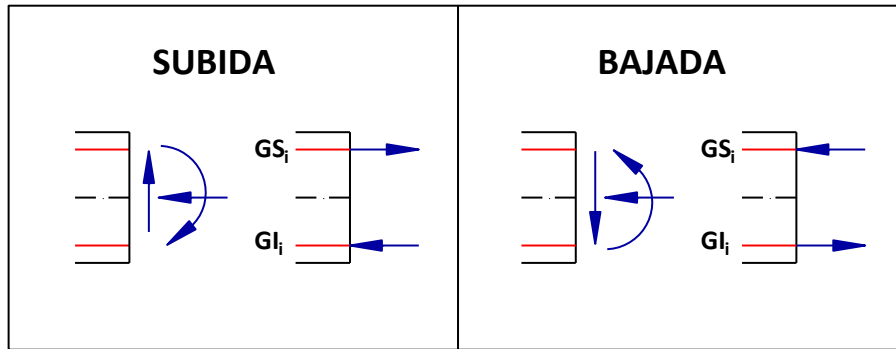


Figura VIII.2. Esfuerzos a nivel sección. Identificación de banda extensométrica en la sección “i”

Como se puede observar, en el ciclo de subida la armadura superior se encontrará traccionada y la inferior comprimida, lo contrario que sucede en el ciclo de bajada. Para poder analizar el perfil de deformaciones se va a diferenciar, para cada armadura (superior e inferior), los casos de tracción y compresión en función de la deformación registrada en cada ciclo. Además, como valor de referencia, se añade la deformación de plastificación del acero que se obtiene gracias a los ensayos de acompañamiento realizados.

Los perfiles se van a trazar para distintos niveles de carga: el valor máximo, aproximadamente el 5% previo y el 5% posterior al valor máximo.

Como resultado se representa un perfil de la deformación en la zona crítica de fallo que permite identificar la sección crítica con bastante precisión. Cuando el nivel de carga sea máximo, la sección crítica corresponde con la de máxima deformación a tracción en la armadura. En las Figuras VIII.3 y VIII.4 se puede ver un ejemplo de los perfiles obtenidos para los soportes AS11-1 y AS21-13, respectivamente. El resto de gráficas correspondientes al resto de elementos del programa experimental se pueden encontrar en el Anejo C.

Analizando los perfiles de deformación de la armadura se observa que, en general, la sección crítica se sitúa en la zona de conexión entre el soporte y el rigidizador, sección de máximo momento flector en el elemento (véase Figura VIII.3). Cabe señalar que no se ha detectado el efecto de rigidez del *stub*, en el que la sección crítica del soporte retrocede varios centímetros hacia el elemento debido al confinamiento provocado por la mayor rigidez del *stub* en las secciones inmediatamente vecinas (Barrera (2012) [15], Sheikh et al. (1994) [112], Bae (2005) [12]). Sin embargo, en el elemento AS21-13 (véase Figura VIII.4), sometido a una carga lateral cíclica con axil nulo, la sección crítica se forma a 18 cm del rigidizador. En este caso, la posición de dicha sección no es atribuida al efecto *stub* sino a la probabilidad de que se haya generado una sección débil (con menor resistencia a tracción), debido a la dificultad para poder verter de forma homogénea el hormigón en esa sección por encontrarse muy próximas la armadura transversal y la barra dispuesta para posicionar los captadores de medida.

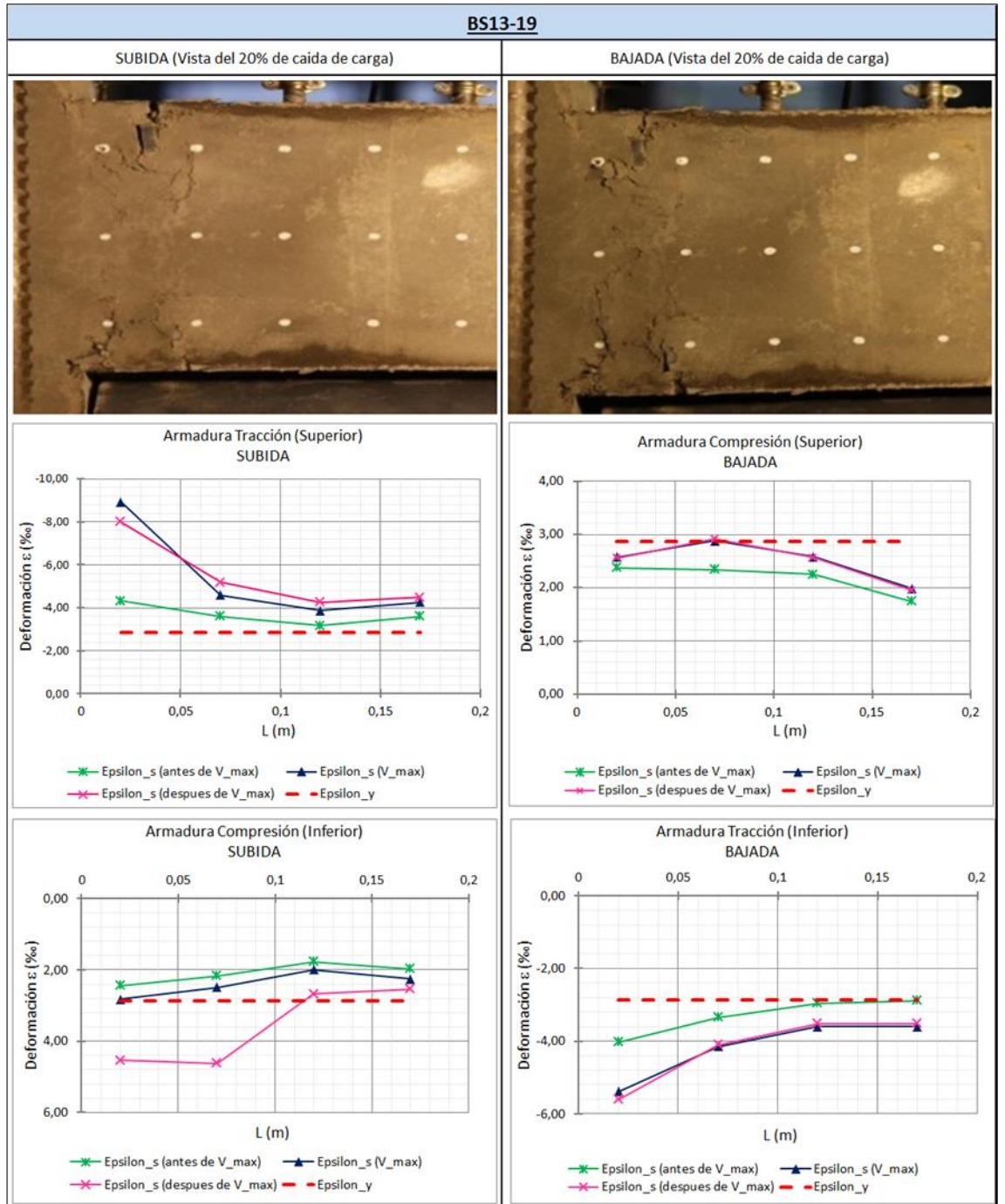


Figura VIII.3. Perfiles de deformación en subida y bajada (BS13-19)

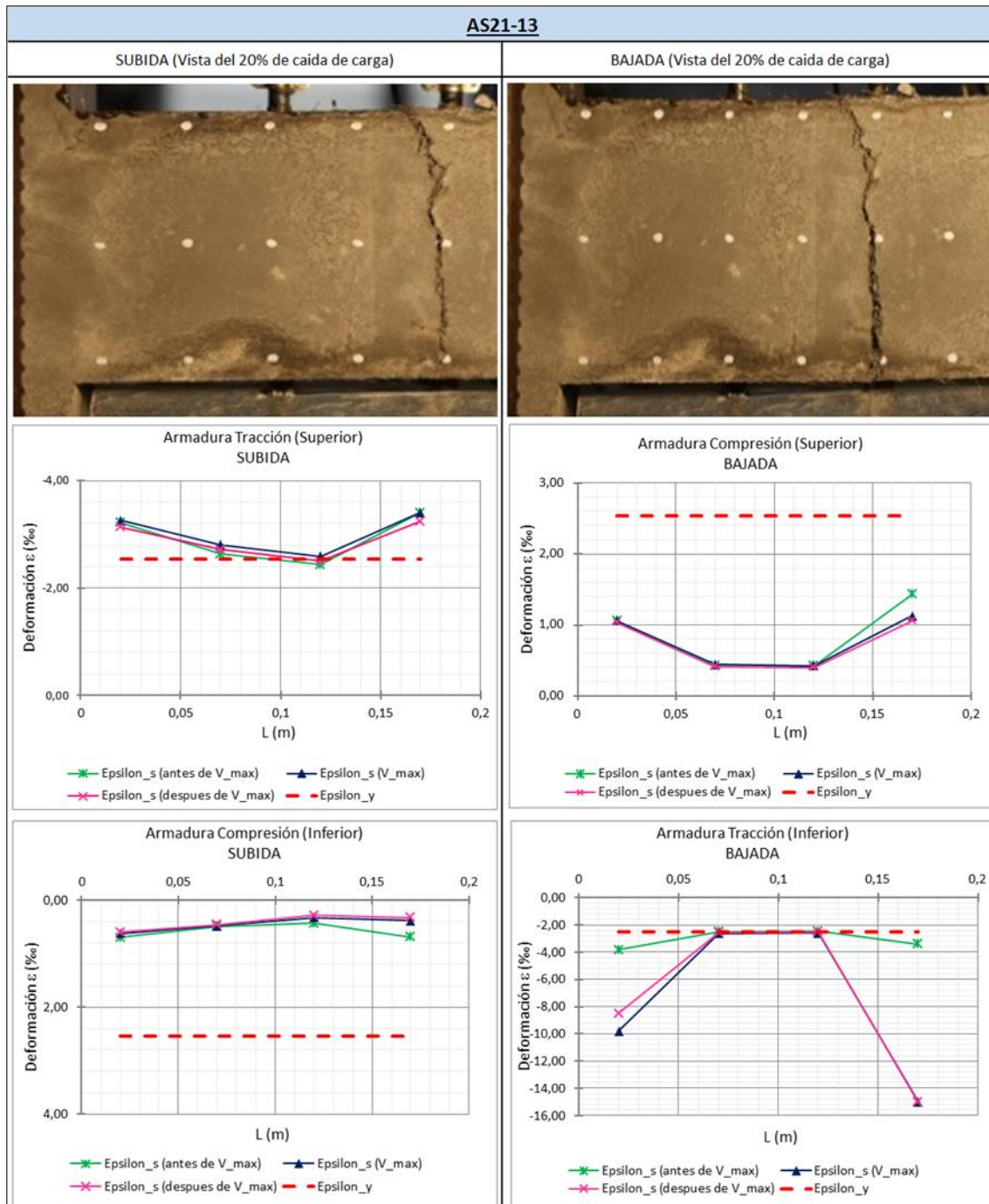


Figura VIII.4. Perfiles de deformación en subida y bajada (AS21-13)

VIII.1.2. Determinación del cortante y del momento flector de plastificación del acero

Entre los resultados del ensayo se obtienen la carga lateral aplicada (F_v) y el esfuerzo axial (N), así como el desplazamiento a lo largo del elemento (Figura VIII.5). A partir de estos resultados se puede obtener la carga vertical del soporte ménsula equivalente, el cortante (V) y el momento flector (M) en la sección crítica, teniendo en cuenta los efectos de segundo orden.

En todo caso, se ha efectuado la corrección debida al peso propio de los resultados, tanto en fuerza como en desplazamientos.

A partir de la deformación de la armadura longitudinal en la sección crítica del soporte se obtienen el momento flector de plastificación (M_y) y su cortante concomitante (V_y).

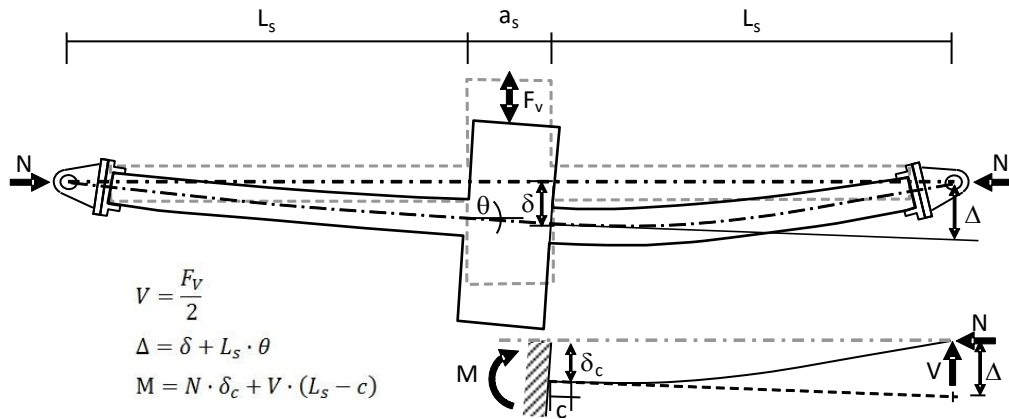


Figura VIII.5. Diagrama de comportamiento del soporte durante el ensayo, Caballero (2015) [26]

A continuación se muestran los valores correspondientes a la deformación en la armadura de tracción en la sección crítica, ε (‰), tanto en subida (Tabla VIII.1) como en bajada de carga (Tabla VIII.2), correspondiente a la situación de plastificación y en relación con el valor máximo alcanzado, tanto para el flector (M_y/M_{\max}) y el cortante actuante (V_y/V_{\max}).

Cabe destacar que no ha sido posible obtener resultados de la relación, ni de cortantes ni de momentos flectores, correspondientes a los soportes AS11-3 y AS21-24. En el primer caso debido a que se despegó la banda extensométrica en la armadura traccionada, no pudiéndose detectar el comienzo de su plastificación, y en el segundo, al ser el elemento que se encuentra sometido al mayor nivel de axil aplicado ($\nu = 0.40$), la armadura traccionada no llega a alcanzar el valor de la deformación correspondiente al límite elástico.

Tabla VIII.1. Cortante y Momento Flector correspondientes al instante en el que plastifica a tracción la armadura en subida

Referencia	SECCIÓN CRÍTICA						
	SUBIDA (Galga Traccionada)						
	ε (‰)	Vy (kN)	Vmax (kN)	Vy / Vmax	My (kNm)	Mmax (kNm)	My / Mmax
AS11-1	-2,67	76,31	86,59	0,88	-128,49	-148,27	0,87
AS11-22	-2,67	67,93	77,27	0,88	-116,63	-139,18	0,84
AS11-2R	-2,68	70,29	78,22	0,90	-122,35	-139,44	0,88
AS11-3 (**)	—	—	78,44	—	—	-137,39	—
AS11-20	-2,63	70,40	77,61	0,91	-120,86	-137,69	0,88
AS11-21	-2,72	72,24	75,07	0,96	-130,48	-134,54	0,97
AS11-4	-2,62	75,02	82,90	0,91	-132,50	-150,79	0,88
AS11-5	-2,66	72,25	78,26	0,92	-126,08	-139,73	0,90
AS11-6	-2,60	69,97	80,38	0,87	-125,54	-149,08	0,84
AS11-7	-2,65	80,05	84,75	0,94	-140,09	-150,83	0,93
AS11-8	-2,68	84,05	89,83	0,94	-144,07	-156,67	0,92
AS11-9	-2,65	87,58	92,29	0,95	-157,39	-169,94	0,93
AS21-10	-2,40	41,50	45,30	0,92	-82,38	-95,51	0,86
AS31-11	-2,61	16,85	17,07	0,99	-37,02	-43,45	0,85
AS21-12	-2,70	30,54	34,32	0,89	-52,91	-62,98	0,84
AS21-13	-2,60	12,99	16,23	0,80	-18,95	-23,10	0,82
AS21-23	-2,56	43,47	44,15	0,98	-92,09	-97,41	0,95
AS21-24 (*)	—	—	48,92	—	—	-124,96	—
AS23-14	-2,93	52,19	60,38	0,86	-101,30	-127,10	0,80
AS24-15	-2,80	50,23	60,78	0,83	-91,56	-118,47	0,77
AS13-16	-3,00	89,54	95,11	0,94	-155,22	-168,83	0,92
BS11-17	-2,63	75,04	85,76	0,88	-128,70	-151,35	0,85
BS11-18	-2,29	69,83	84,64	0,83	-118,06	-146,54	0,81
BS13-19	-2,94	84,98	96,40	0,88	-143,85	-165,84	0,87
AS11-25	—	—	—	—	—	—	—
Valor Min	-2,29	12,99	16,23	0,80	-18,95	-23,10	0,77
Valor Max	-3,00	89,54	96,40	0,99	-157,39	-169,94	0,97
Valor Medio	-2,67	63,33	70,15	0,90	-112,11	-128,03	0,87
Desviación (σ)	0,16	22,03	24,04	0,05	36,69	39,92	0,05
Coefficiente V.	5,88%	34,79%	34,27%	5,50%	32,73%	31,18%	5,78%

(*) la armadura se encuentra comprimida

(**) fallo de medida de la banda extensométrica dispuesta

Tabla VIII.2. Cortante y Momento Flector correspondientes al instante en el que plastifica a tracción la armadura en bajada

Referencia	SECCIÓN CRÍTICA						
	BAJADA (Galga Traccionada)						
	ε (10^{-3})	V_y (kN)	V_{max} (kN)	V_y / V_{max}	M_y (kNm)	M_{max} (kNm)	M_y / M_{max}
AS11-1	-2,61	-68,74	-76,41	0,90	109,43	124,62	0,88
AS11-22	-2,63	-61,83	-72,69	0,85	98,55	120,45	0,82
AS11-2R	-2,69	-68,90	-76,43	0,90	111,10	128,22	0,87
AS11-3 (**)	-2,66	-70,17	-74,39	0,94	112,22	123,99	0,91
AS11-20	-2,70	-74,01	-77,85	0,95	123,65	131,86	0,94
AS11-21	-2,65	-67,95	-76,92	0,88	110,99	130,75	0,85
AS11-4	-2,60	-71,88	-78,41	0,92	120,00	136,28	0,88
AS11-5	-2,64	-68,49	-77,51	0,88	109,73	129,76	0,85
AS11-6	-2,56	-74,77	-77,51	0,96	122,22	130,39	0,94
AS11-7	-2,62	-75,42	-80,74	0,93	124,98	138,75	0,90
AS11-8	-2,61	-75,30	-81,69	0,92	121,94	136,72	0,89
AS11-9	-2,64	-74,00	-77,64	0,95	129,04	139,36	0,93
AS21-10	-2,54	-42,15	-45,99	0,92	81,58	97,81	0,83
AS31-11	-2,60	-13,26	-13,56	0,98	31,79	36,86	0,86
AS21-12	-2,53	-29,02	-33,12	0,88	45,05	53,98	0,83
AS21-13	-2,58	-14,32	-15,43	0,93	16,01	17,43	0,92
AS21-23	-2,59	-44,20	-45,38	0,97	93,27	93,74	0,99
AS21-24 (*)	—	—	-47,15	—	—	116,31	—
AS23-14	-2,92	-48,08	-52,26	0,92	90,26	102,57	0,88
AS24-15	-2,82	-45,62	-56,49	0,81	80,80	110,31	0,73
AS13-16	-2,97	-78,81	-83,49	0,94	129,68	140,09	0,93
BS11-17	-2,65	-73,94	-80,90	0,91	118,36	133,21	0,89
BS11-18	-2,75	-76,28	-79,88	0,95	124,80	133,05	0,94
BS13-19	-2,94	-78,21	-92,61	0,84	123,57	150,33	0,82
AS11-25	-2,62	-67,24	-81,05	0,83	106,62	134,63	0,79
Valor Min	-2,53	-13,26	-13,56	0,81	16,01	17,43	0,73
Valor Max	-2,97	-78,81	-92,61	0,98	129,68	150,33	0,99
Valor Medio	-2,67	-60,94	-66,22	0,91	101,48	115,66	0,88
Desviación (σ)	0,12	19,72	21,52	0,05	30,88	33,31	0,06
Coefficiente V.	4,57%	32,36%	32,49%	5,01%	30,43%	28,80%	6,44%

(*) la armadura se encuentra comprimida

(**) fallo de medida de la banda extensométrica dispuesta

En general, con los datos obtenidos se puede observar que la plastificación de la armadura traccionada se alcanza a un 91 % del valor del cortante máximo, mientras que la relación es un poco menor con respecto al valor del momento flector máximo, 88 %.

De la Tabla VIII.3 hasta la VIII.110 y de la Figuras VIII 6 y VIII.14. se recopilan y representan los valores obtenidos por series en función de los parámetros de estudio.

Tabla VIII.3. Serie 1: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=5.77$, $v=0.20$, $s_t=variable$, $\rho_f=1.16\%$, $r/h=0.15$, cíclica

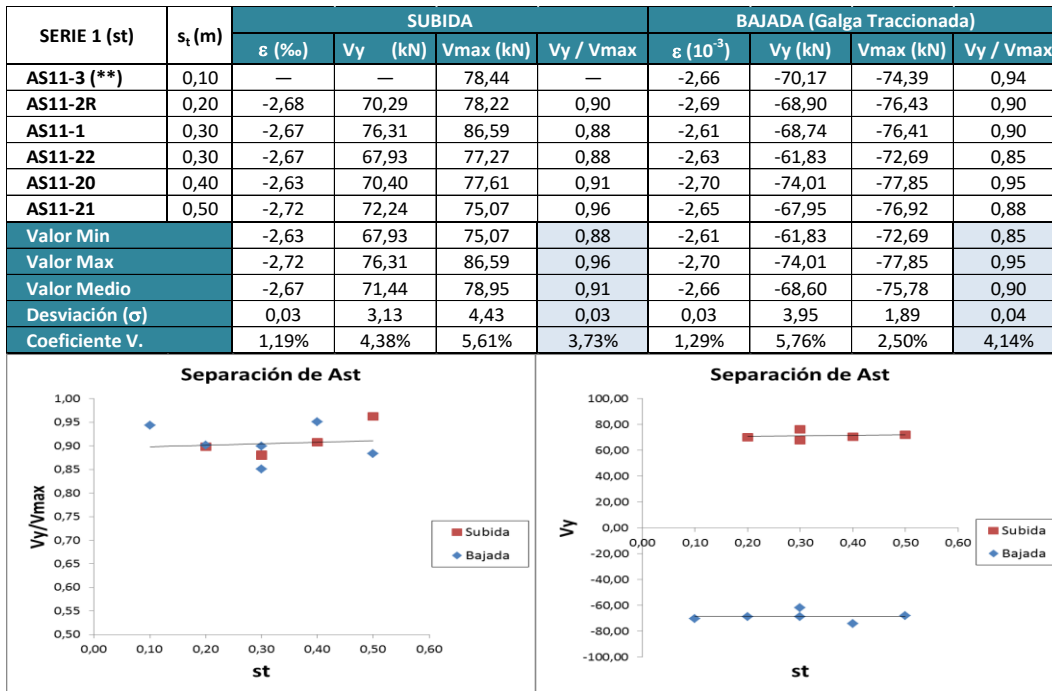


Figura VIII.6. Relación V_y/V_{max} y valor de V_y con respecto a la separación de la armadura transversal

Tabla VIII.4. SERIE 1: Tipo I y II, $V_f=2\%$, $\lambda_v=5.77$, $v=0.20$, $s_t=variable$, $\rho_f=1.16\%$, $r/h=0.15$, cíclica

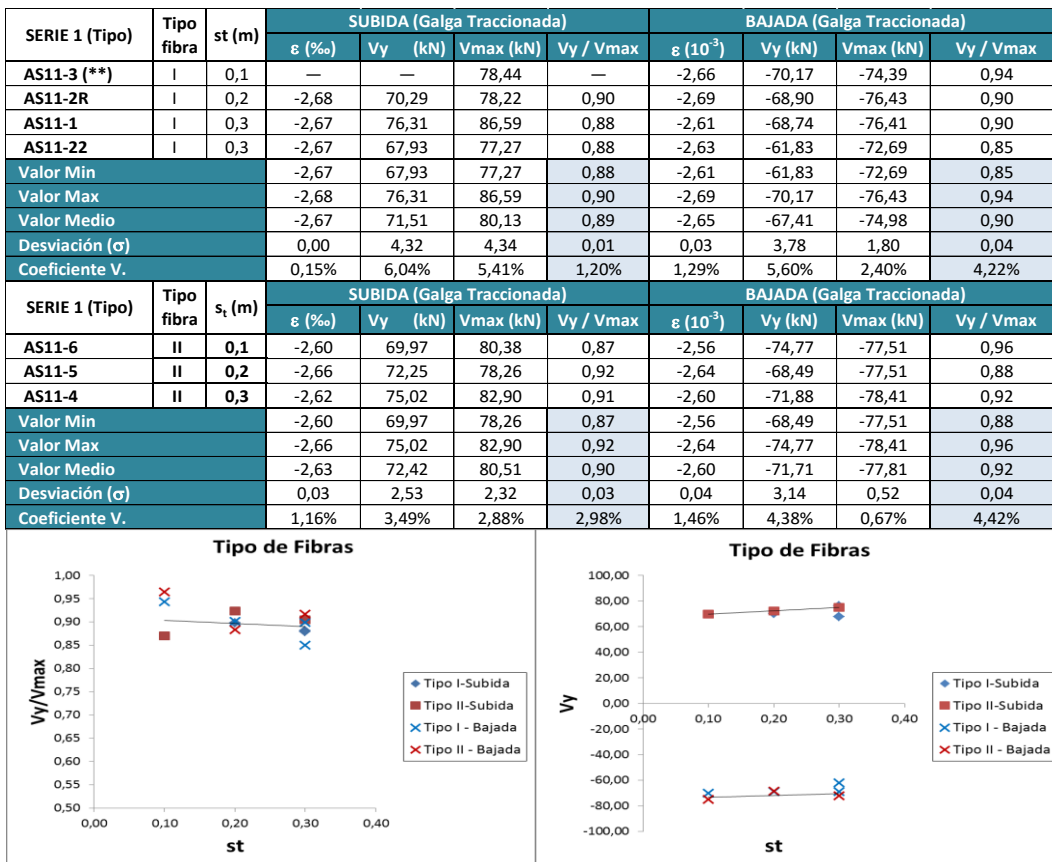


Figura VIII.7. Relación V_y/V_{max} y valor de V_y con respecto a tipo de hormigón

Tabla VIII.5. SERIE 1: Tipo I, $V_f=1$ y 2%, $\lambda_v=5.77$, $v=0.20$, $s_t=variable$, $\rho_i=1.16\%$, $r/h=0.15$, cíclica

SERIE 1 (Vol F)	Tipo fibra	st (m)	SUBIDA (Galga Traccionada)				BAJADA (Galga Traccionada)			
			ϵ (‰)	Vy (kN)	Vmax (kN)	Vy / Vmax	ϵ (10^{-3})	Vy (kN)	Vmax (kN)	Vy / Vmax
AS11-3 (**)	I	0,1	—	—	78,44	—	-2,66	-70,17	-74,39	0,94
AS11-2R	I	0,2	-2,68	70,29	78,22	0,90	-2,69	-68,90	-76,43	0,90
AS11-1	I	0,3	-2,67	76,31	86,59	0,88	-2,61	-68,74	-76,41	0,90
AS11-22	I	0,3	-2,67	67,93	77,27	0,88	-2,63	-61,83	-72,69	0,85
Valor Min			-2,67	67,93	77,27	0,88	-2,61	-61,83	-72,69	0,85
Valor Max			-2,68	76,31	86,59	0,90	-2,69	-70,17	-76,43	0,94
Valor Medio			-2,67	71,51	80,13	0,89	-2,65	-67,41	-74,98	0,90
Desviación (σ)			0,00	4,32	4,34	0,01	0,03	3,78	1,80	0,04
Coefficiente V.			0,15%	6,04%	5,41%	1,20%	1,29%	5,60%	2,40%	4,22%

SERIE 1 (Vol F)	Tipo fibra	st (m)	SUBIDA (Galga Traccionada)				BAJADA (Galga Traccionada)			
			ϵ (‰)	Vy (kN)	Vmax (kN)	Vy / Vmax	ϵ (10^{-3})	Vy (kN)	Vmax (kN)	Vy / Vmax
AS11-9	I	0,1	-2,65	87,58	92,29	0,95	-2,64	-74,00	-77,64	0,95
AS11-8	I	0,2	-2,68	84,05	89,83	0,94	-2,61	-75,30	-81,69	0,92
AS11-7	I	0,3	-2,65	80,05	84,75	0,94	-2,62	-75,42	-80,74	0,93
Valor Min			-2,65	80,05	84,75	0,94	-2,61	-74,00	-77,64	0,92
Valor Max			-2,68	87,58	92,29	0,95	-2,64	-75,42	-81,69	0,95
Valor Medio			-2,66	83,89	88,96	0,94	-2,62	-74,91	-80,02	0,94
Desviación (σ)			0,01	3,76	3,84	0,01	0,02	0,79	2,12	0,02
Coefficiente V.			0,51%	4,49%	4,32%	0,72%	0,74%	1,06%	2,65%	1,68%

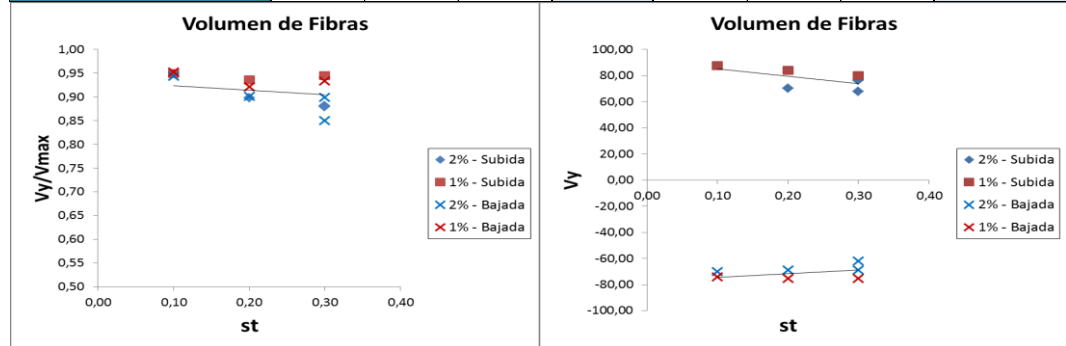


Figura VIII.8. Relación V_y/V_{max} y valor de V_y con respecto a volumen de fibras en el hormigón

Tabla VIII.6. SERIE 2: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=7.50$, $v=variable$, $s_t=0.20$, $\rho_i=1.05\%$, $r/h=0.14$, cíclica

SERIE 2 (Nivel de Axil)	v	SUBIDA (Galga Traccionada)				BAJADA (Galga Traccionada)			
		ϵ (‰)	Vy (kN)	Vmax (kN)	Vy / Vmax	ϵ (10^{-3})	Vy (kN)	Vmax (kN)	Vy / Vmax
AS21-13	0,00	-2,60	12,99	16,23	0,80	-2,58	-14,32	-15,43	0,93
AS21-12	0,10	-2,70	30,54	34,32	0,89	-2,53	-29,02	-33,12	0,88
AS21-10	0,20	-2,40	41,50	45,30	0,92	-2,54	-42,15	-45,99	0,92
AS21-23	0,30	-2,56	43,47	44,15	0,98	-2,59	-44,20	-45,38	0,97
AS21-24 (*)	0,40	—	—	48,92	—	—	—	-47,15	—
Valor Min		-2,40	12,99	16,23	0,80	-2,53	-14,32	-15,43	0,88
Valor Max		-2,70	43,47	45,30	0,98	-2,59	-44,20	-45,99	0,97
Valor Medio		-2,56	32,13	35,00	0,90	-2,56	-32,42	-34,98	0,92
Desviación (σ)		0,13	13,97	13,45	0,08	0,03	13,82	14,32	0,04
Coefficiente V.		4,92%	43,48%	38,43%	8,48%	1,11%	42,62%	40,94%	4,35%

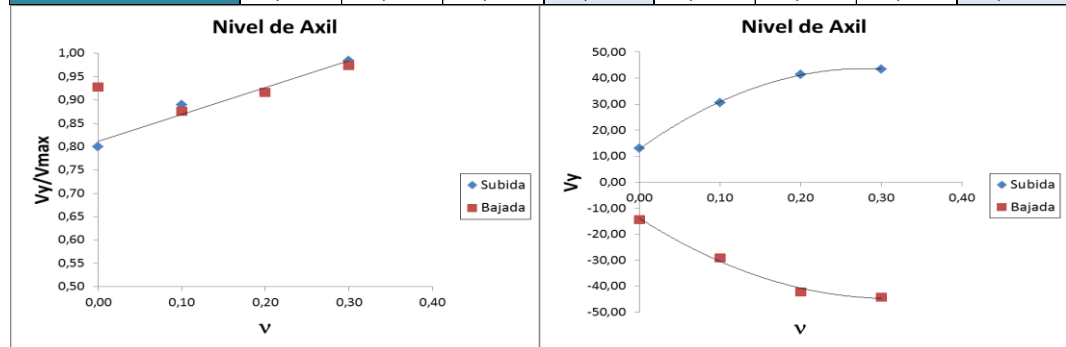


Figura VIII.9. Relación V_y/V_{max} y valor de V_y con respecto al nivel de axil aplicado

Tabla VIII.7. SERIE 2: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=variable$, $v=0.20$, $s_t=0.20$, $\rho_l=0.96$, 1.05%, $r/h=0.14$, 0.16, cíclica

SERIE 2 (Esbeltez)	λ_v	SUBIDA (Galga Traccionada)				BAJADA (Galga Traccionada)			
		ε (‰)	V_y (kN)	V_{max} (kN)	V_y / V_{max}	ε (10^{-3})	V_y (kN)	V_{max} (kN)	V_y / V_{max}
AS31-11	10,71	-2,61	16,85	17,07	0,99	-2,60	-13,26	-13,56	0,98
AS21-10	7,50	-2,40	41,50	45,30	0,92	-2,54	-42,15	-45,99	0,92
AS11-2R	5,77	-2,68	70,29	78,22	0,90	-2,69	-68,90	-76,43	0,90
Valor Min		-2,40	16,85	17,07	0,90	-2,54	-13,26	-13,56	0,90
Valor Max		-2,68	70,29	78,22	0,99	-2,69	-68,90	-76,43	0,98
Valor Medio		-2,56	55,90	61,76	0,91	-2,61	-41,44	-45,33	0,93
Desviación (σ)		0,15	20,35	23,27	0,01	0,08	27,83	31,44	0,04
Coefficiente V.		5,70%	36,41%	37,68%	1,37%	2,95%	67,16%	69,36%	4,32%

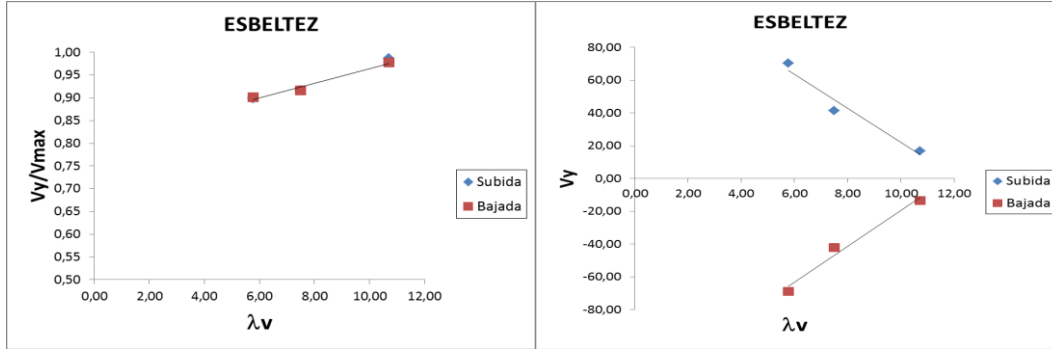


Figura VIII.10. Relación V_y/V_{max} y valor de V_y con respecto a la esbeltez a cortante

Tabla VIII.8. SERIE 3: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=7.50$, $v=0.20$, $s_t=0.20$ m, $\rho_l=variable$, $r/h=0.14$, 0.16, 0.17, cíclica

SERIE 3 (Cuantía, $s_t=0,2$ m)	ρ_l	SUBIDA (Galga Traccionada)				BAJADA (Galga Traccionada)			
		ε (‰)	V_y (kN)	V_{max} (kN)	V_y / V_{max}	ε (10^{-3})	V_y (kN)	V_{max} (kN)	V_y / V_{max}
AS21-10	1,05%	-2,40	41,50	45,30	0,92	-2,54	-42,15	-45,99	0,92
AS23-14	2,68%	-2,93	52,19	60,38	0,86	-2,92	-48,08	-52,26	0,92
AS24-15	4,19%	-2,80	50,23	60,78	0,83	-2,82	-45,62	-56,49	0,81
Valor Min		-2,40	41,50	45,30	0,83	-2,54	-42,15	-45,99	0,81
Valor Max		-2,93	52,19	60,78	0,92	-2,92	-48,08	-56,49	0,92
Valor Medio		-2,71	47,97	55,49	0,87	-2,76	-45,29	-51,58	0,88
Desviación (σ)		0,28	5,69	8,82	0,05	0,20	2,98	5,28	0,06
Coefficiente V.		10,23%	11,86%	15,90%	5,19%	7,20%	6,58%	10,24%	7,26%

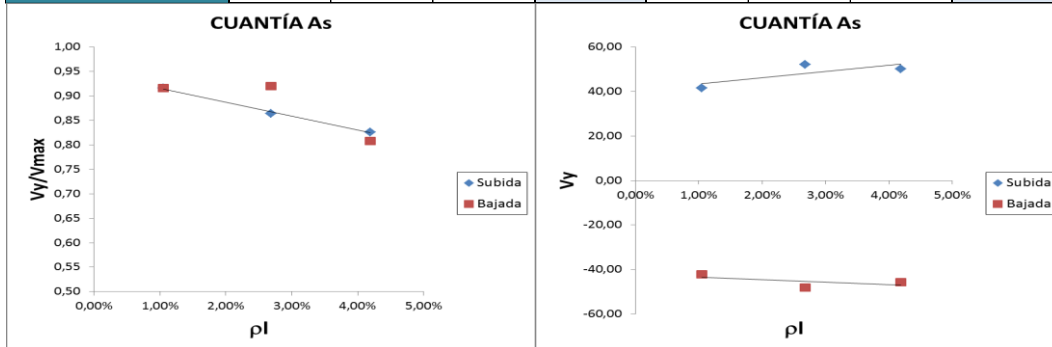


Figura VIII.11. Relación V_y/V_{max} y valor de V_y con respecto a la cuantía de la armadura longitudinal

Tabla VIII.9. SERIE 3: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=7.50$, $\nu=0.20$, $s_t=0.30$ m, $\rho_l=$ variable, $r/h=0.14, 0.16, 0.17$, cíclica

SERIE 3 (Cuantía, $s_t=0,3$ m)	ρ_l	SUBIDA (Galga Traccionada)				BAJADA (Galga Traccionada)			
		ε (‰)	V_y (kN)	V_{max} (kN)	V_y / V_{max}	ε (10^{-3})	V_y (kN)	V_{max} (kN)	V_y / V_{max}
AS11-1	1,16%	-2,67	76,31	86,59	0,88	-2,61	-68,74	-76,41	0,90
AS11-22	1,16%	-2,67	67,93	77,27	0,88	-2,63	-61,83	-72,69	0,85
AS13-16	2,06%	-3,00	89,54	95,11	0,94	-2,97	-78,81	-83,49	0,94
Valor Min		-2,67	67,93	77,27	0,88	-2,61	-61,83	-72,69	0,85
Valor Max		-3,00	89,54	95,11	0,94	-2,97	-78,81	-83,49	0,94
Valor Medio		-2,78	77,93	86,32	0,90	-2,74	-69,79	-77,53	0,90
Desviación (σ)		0,19	10,90	8,93	0,04	0,20	8,54	5,49	0,05
Coefficiente V.		6,77%	13,98%	10,34%	3,92%	7,30%	12,24%	7,08%	5,20%

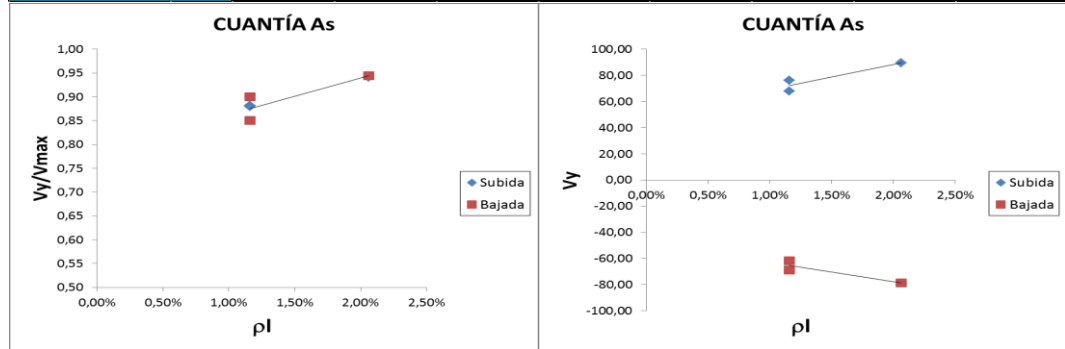


Figura VIII.12. Relación V_y/V_{max} y valor de V_y con respecto a la cuantía de la armadura longitudinal

Tabla VIII.10. SERIE 4: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=7.50$, $\nu=0.10$, $s_t=$ variable, $\rho_l=$ variable, $r/h=$ variable, cíclica

SERIE 4	s_t (m)	ϕ_l (mm)	ρ_l	r/h	SUBIDA (Galga Traccionada)				BAJADA (Galga Traccionada)			
					ε (‰)	V_y (kN)	V_{max} (kN)	V_y / V_{max}	ε (10^{-3})	V_y (kN)	V_{max} (kN)	V_y / V_{max}
BS11-17	0,30	12,00	1,16%	0,09	-2,63	75,04	85,76	0,88	-2,65	-73,94	-80,90	0,91
BS11-18	0,10	12,00	1,16%	0,09	-2,29	69,83	84,64	0,83	-2,75	-76,28	-79,88	0,95
BS13-19	0,30	16,00	2,06%	0,10	-2,94	84,98	96,40	0,88	-2,94	-78,21	-92,61	0,84
AS11-1	0,30	12,00	1,16%	0,15	-2,67	76,31	86,59	0,88	-2,61	-68,74	-76,41	0,90
AS11-22	0,30	12,00	1,16%	0,15	-2,67	67,93	77,27	0,88	-2,63	-61,83	-72,69	0,85
AS13-16	0,30	16,00	2,06%	0,16	-3,00	89,54	95,11	0,94	-2,97	-78,81	-83,49	0,94
Valor Min					-2,29	67,93	77,27	0,83	-2,61	-61,83	-72,69	0,84
Valor Max					-3,00	89,54	96,40	0,94	-2,97	-78,81	-92,61	0,95
Valor Medio					-2,70	77,27	87,63	0,88	-2,76	-72,97	-81,00	0,90
Desviación (σ)					0,25	8,47	7,12	0,04	0,16	6,57	6,82	0,05
Coefficiente V.					9,39%	10,96%	8,13%	4,19%	5,76%	9,00%	8,42%	5,12%

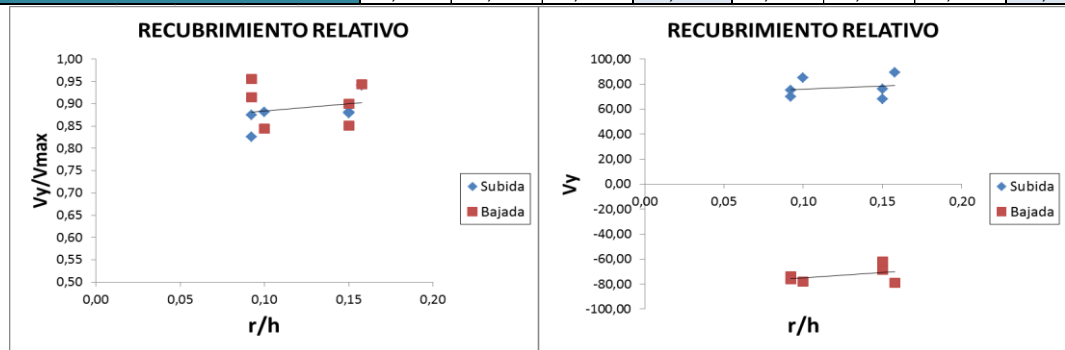


Figura VIII.13. Relación V_y/V_{max} y valor de V_y con respecto al recubrimiento relativo

Tabla VIII.11. SERIE 5: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=5.77$, $\nu=0.20$, $s_t=0.30$, $\rho_t=1.16\%$, $r/h=0.15$, **Tipo de carga=variable**

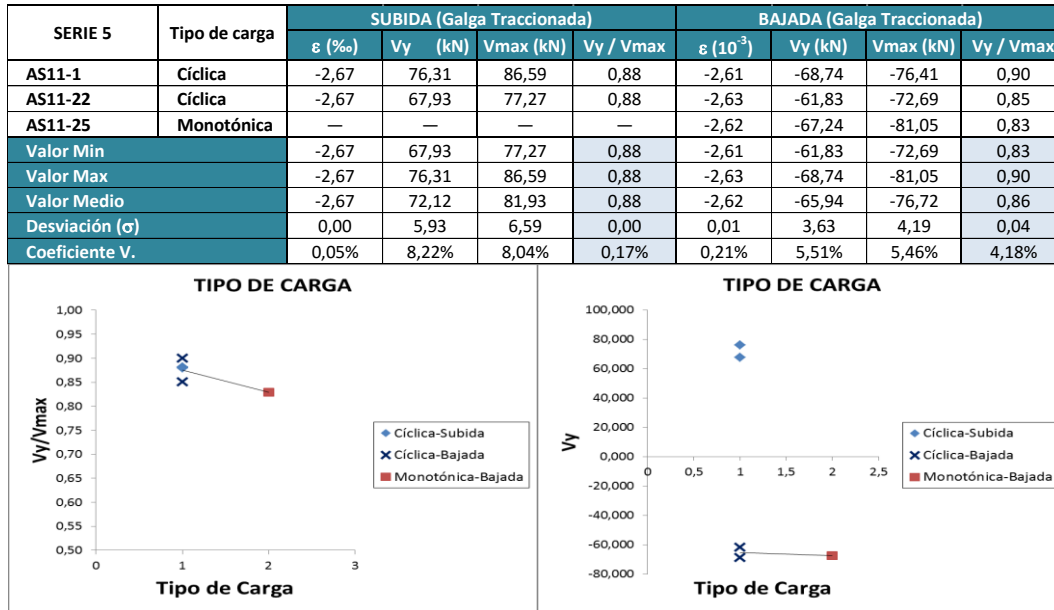


Figura VIII.14. Relación V_y/V_{max} y valor de V_y con respecto al tipo de carga

A la vista de los datos y de las representaciones, se confirma que el cortante que se corresponde con la deformada en la que se alcanza la plastificación de la armadura longitudinal depende del nivel de axil aplicado, así como de la esbeltez de la misma, de tal forma que la relación entre V_y/V_{max} aumenta, con el esfuerzo axil, de 0.80 a 0.98, para $\lambda_v=7.50$, y con la esbeltez del soporte de 0.90 a 0.99, para $\nu=0.20$. Es decir, conforme el soporte está más comprimido es necesario un mayor nivel de carga lateral para alcanzar la plastificación del soporte, y con respecto a la esbeltez, la carga de plastificación disminuye con la esbeltez. Ahora bien, con respecto a la carga máxima V_y/V_{max} aumenta puesto que los efectos de segundo orden son más importantes para la situación de carga máxima que para la situación de plastificación, invirtiéndose la tendencia.

Con respecto al resto de parámetros se observa una ligera influencia con respecto a la cuantía de la armadura longitudinal, mientras que no se observa una gran influencia del resto de las variables estudiadas.

A continuación se presentan los valores obtenidos para el momento flector diferenciados por series de estudio. Tanto para el momento flector correspondiente con la plastificación del acero, como con su relación con el valor del momento flector máximo, se aprecian tendencias similares a las comentadas previamente para el cortante. Esto se puede observar en los valores recopilados entre las Tablas VIII.12 y VIII.20 y las Figuras VIII 15y VIII.23.

Tabla VIII.12. Serie 1: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=5.77$, $v=0.20$, $s_t=variable$, $\rho_f=1.16\%$, $r/h=0.15$, cíclica

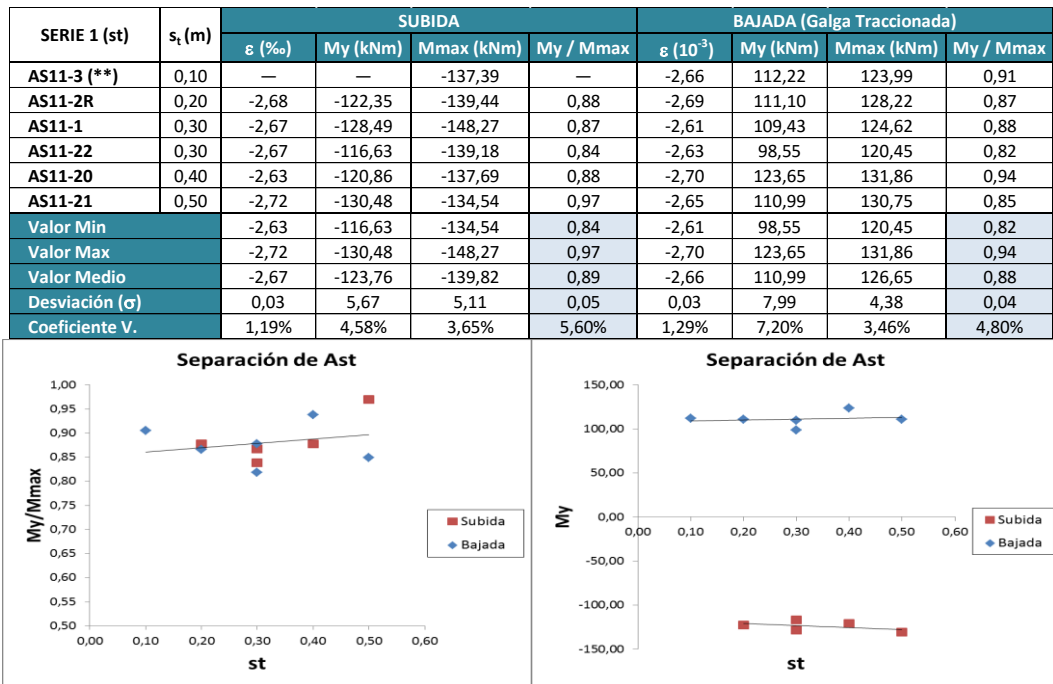


Figura VIII.15. Relación M_y/M_{max} y valor de M_y con respecto a la separación de la armadura transversal

Tabla VIII.13. SERIE 1: Tipo I y II, $V_f=2\%$, $\lambda_v=5.77$, $v=0.20$, $s_t=variable$, $\rho_f=1.16\%$, $r/h=0.15$, cíclica



Figura VIII.16. Relación M_y/M_{max} y valor de M_y con respecto a tipo de hormigón

Tabla VIII.14. SERIE 1: Tipo I, $V_f=1$ y 2%, $\lambda_v=5.77$, $v=0.20$, $s_t=variable$, $\rho_l=1.16\%$, $r/h=0.15$, cíclica

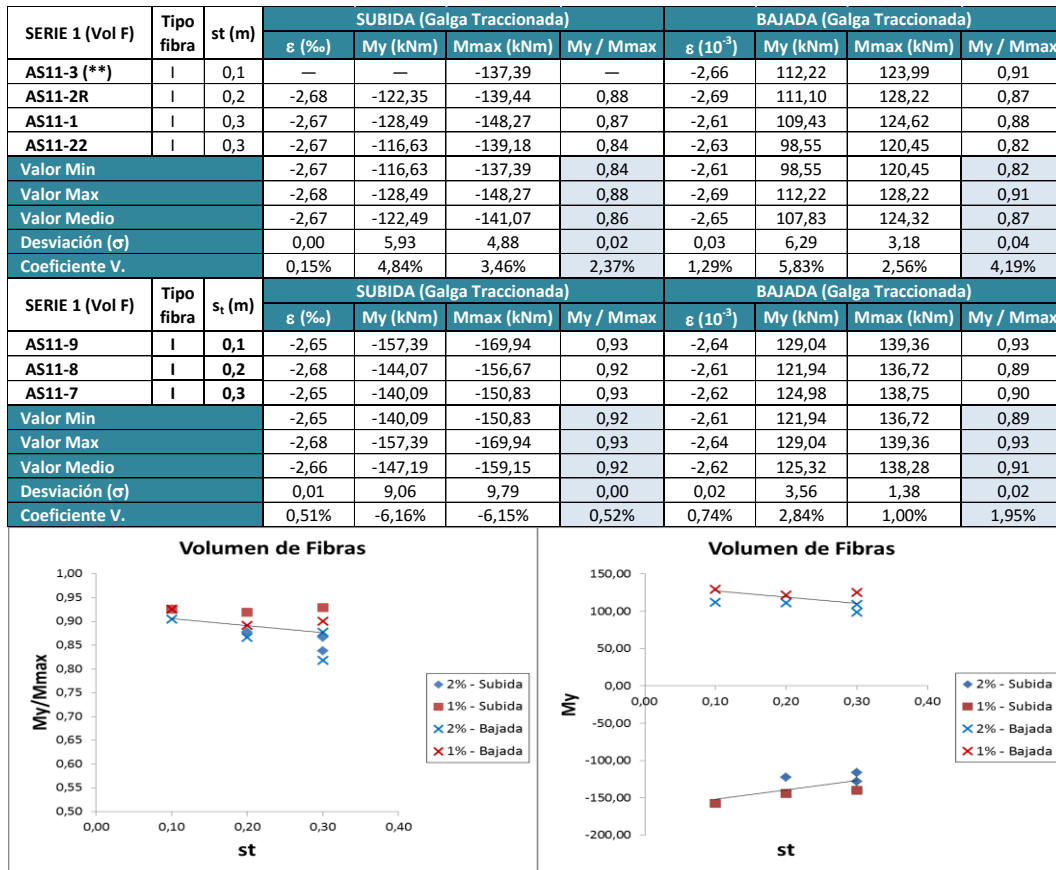


Figura VIII.17. Relación M_y/M_{max} y valor de M_y con respecto a volumen de fibras en el hormigón

Tabla VIII.15. SERIE 2: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=7.50$, $v=variable$, $s_t=0.20$, $\rho_l=1.05\%$, $r/h=0.14$, cíclica

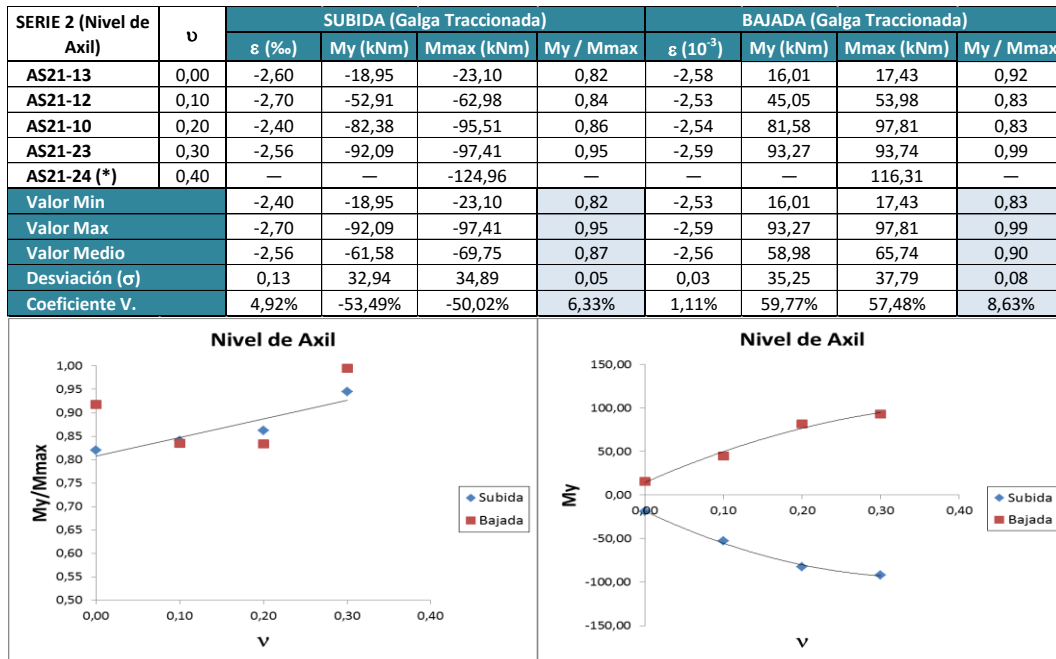


Figura VIII.18. Relación M_y/M_{max} y valor de M_y con respecto al nivel de axil aplicado

Tabla VIII.16. SERIE 2: Tipo I, $V_f=2\%$, λ_v =variable, $v=0.20$, $s_t=0.20$, $\rho_l=0.96$, 1.05%, $r/h=0.14$, 0.16, cíclica

SERIE 2 (Esbeltez)	λ_v	SUBIDA (Galga Traccionada)				BAJADA (Galga Traccionada)			
		ε (‰)	M_y (kNm)	M_{max} (kNm)	M_y / M_{max}	ε (10^{-3})	M_y (kNm)	M_{max} (kNm)	M_y / M_{max}
AS31-11	10,71	-2,61	-37,02	-43,45	0,85	-2,60	31,79	36,86	0,86
AS21-10	7,50	-2,40	-82,38	-95,51	0,86	-2,54	81,58	97,81	0,83
AS11-2R	5,77	-2,68	-122,35	-139,44	0,88	-2,69	111,10	128,22	0,87
Valor Min		-2,40	-37,02	-43,45	0,85	-2,54	31,79	36,86	0,83
Valor Max		-2,68	-122,35	-139,44	0,88	-2,69	111,10	128,22	0,87
Valor Medio		-2,56	-102,36	-117,48	0,87	-2,61	74,82	87,63	0,85
Desviación (σ)		0,15	28,27	31,06	0,01	0,08	40,09	46,52	0,02
Coefficiente V.		5,70%	-27,61%	-26,44%	1,22%	2,95%	53,58%	53,09%	2,07%

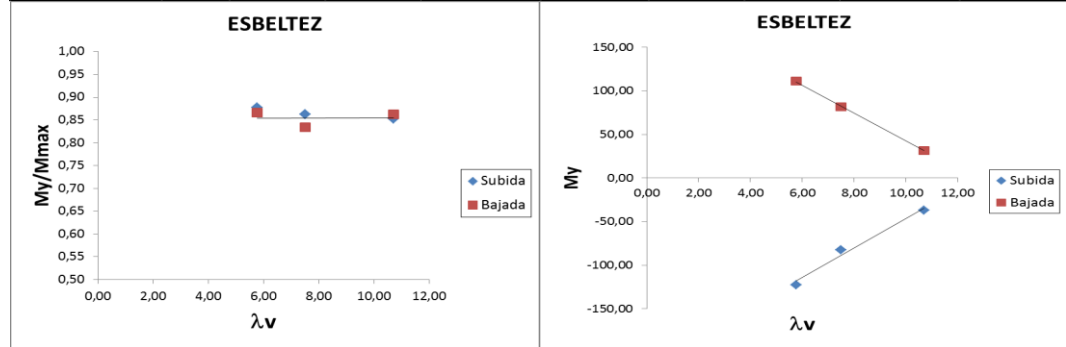


Figura VIII.19. Relación M_y/M_{max} y valor de M_y con respecto a la esbeltez a cortante

Tabla VIII.17. SERIE 3: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=7.50$, $v=0.20$, $s_t=0.20$ m, ρ_l = variable, $r/h=0.14$, 0.16, 0.17, cíclica

SERIE 3 (Cuantía, $s_t=0,2$ m)	ρ_l	SUBIDA (Galga Traccionada)				BAJADA (Galga Traccionada)			
		ε (‰)	M_y (kNm)	M_{max} (kNm)	M_y / M_{max}	ε (10^{-3})	M_y (kNm)	M_{max} (kNm)	M_y / M_{max}
AS21-10	1,05%	-2,40	-82,38	-95,51	0,86	-2,54	81,58	97,81	0,83
AS23-14	2,68%	-2,93	-101,30	-127,10	0,80	-2,92	90,26	102,57	0,88
AS24-15	4,19%	-2,80	-91,56	-118,47	0,77	-2,82	80,80	110,31	0,73
Valor Min		-2,40	-82,38	-95,51	0,77	-2,54	80,80	97,81	0,73
Valor Max		-2,93	-101,30	-127,10	0,86	-2,92	90,26	110,31	0,88
Valor Medio		-2,71	-91,75	-113,69	0,81	-2,76	84,21	103,57	0,82
Desviación (σ)		0,28	9,46	16,33	0,05	0,20	5,26	6,31	0,08
Coefficiente V.		10,23%	10,32%	14,36%	5,72%	7,20%	6,24%	6,09%	9,26%

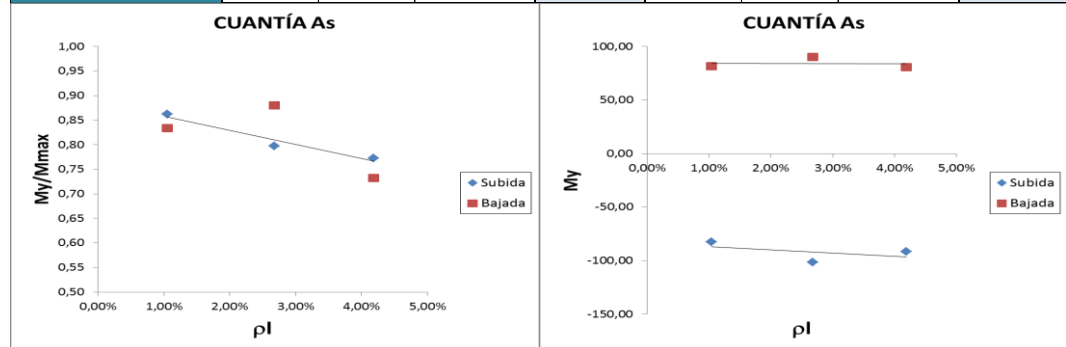


Figura VIII.20. Relación M_y/M_{max} y valor de M_y con respecto a la cuantía de la armadura longitudinal

Tabla VIII.18. SERIE 3: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=7.50$, $v=0.20$, $s_t=0.30$ m, ρ_l = variable, $r/h=0.14, 0.16, 0.17$, cíclica

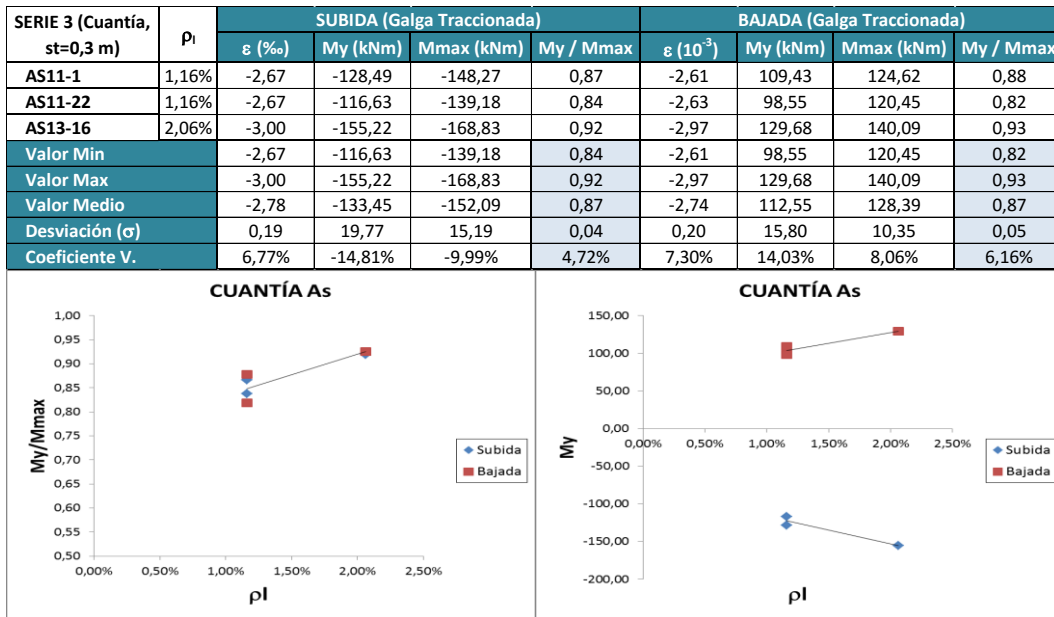


Figura VIII.21. Relación M_y/M_{max} y valor de M_y con respecto a la cuantía de la armadura longitudinal

Tabla VIII.19. SERIE 4: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=7.50$, $v=0.10$, s_t =variable, ρ_l = variable, r/h = variable, cíclica

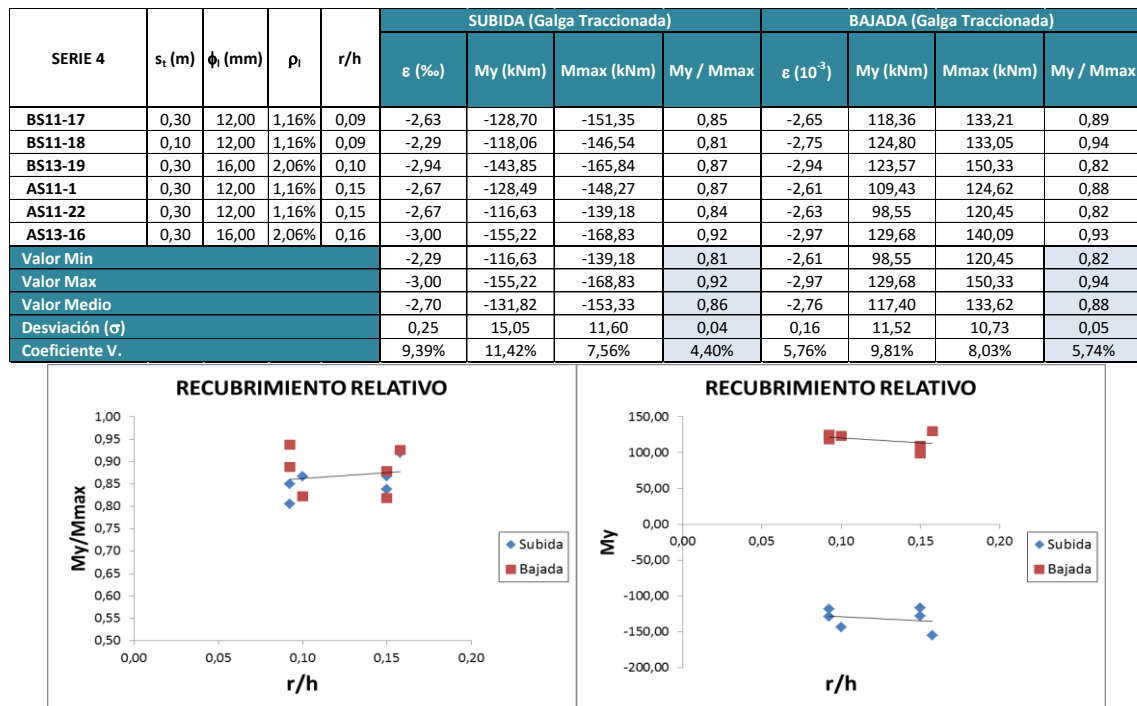


Figura VIII.22. Relación M_y/M_{max} y valor de M_y con respecto al recubrimiento relativo

Tabla VIII.20. SERIE 5: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=5.77$, $v=0.20$, $s_t=0.30$, $\rho_l=1.16\%$, $r/h=0.15$, **Tipo de carga=variable**

SERIE 5	Tipo de carga	SUBIDA (Galga Traccionada)				BAJADA (Galga Traccionada)			
		ε (‰)	M_y (kNm)	M_{max} (kNm)	M_y / M_{max}	ε (10^{-3})	M_y (kNm)	M_{max} (kNm)	M_y / M_{max}
AS11-1	Cíclica	-2,67	-128,49	-148,27	0,87	-2,61	109,43	124,62	0,88
AS11-22	Cíclica	-2,67	-116,63	-139,18	0,84	-2,63	98,55	120,45	0,82
AS11-25	Monotónica	—	—	—	—	-2,62	106,62	134,63	0,79
Valor Min		-2,67	-116,63	-139,18	0,84	-2,61	98,55	120,45	0,79
Valor Max		-2,67	-128,49	-148,27	0,87	-2,63	109,43	134,63	0,88
Valor Medio		-2,67	-122,56	-143,72	0,85	-2,62	104,87	126,56	0,83
Desviación (σ)		0,00	8,39	6,43	0,02	0,01	5,65	7,29	0,04
Coefficiente V.		0,05%	6,84%	4,47%	2,37%	0,21%	5,38%	5,76%	5,32%

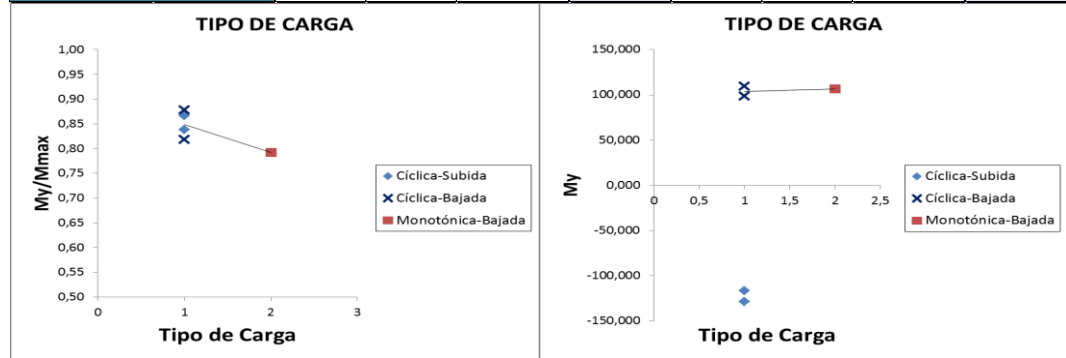


Figura VIII.23. Relación M_y/M_{max} y valor de M_y con respecto al tipo de carga

VIII.2. Definición de los diagramas cortante-desplazamiento

A partir de los datos registrados por la instrumentación dispuesta en el soporte, para las distintas series, se pueden representar los diagramas cortante-desplazamiento (Δ).

A partir de los datos registrados por los captadores verticales se obtiene el desplazamiento vertical (δ) en la sección de la conexión soporte-rigidizador. Se debe corregir esa medida con el giro que se produce en el *stub* mientras se carga la pieza, así como con el peso propio de la pieza. Para la corrección se utilizan las expresiones facilitadas por Caballero (2015) [26] y recogidas en la Figura VIII.5.

Con los datos obtenidos de cada ensayo se representa el comportamiento cíclico del cortante (V) –desplazamiento (Δ). En las Figuras (VIII.24 a VIII.31) se representan dichas gráficas, recopiladas por series. En cada una de ellas se indica cuándo se produce la plastificación de la armadura traccionada en la sección crítica del soporte, tanto para el ciclo de subida como de bajada.

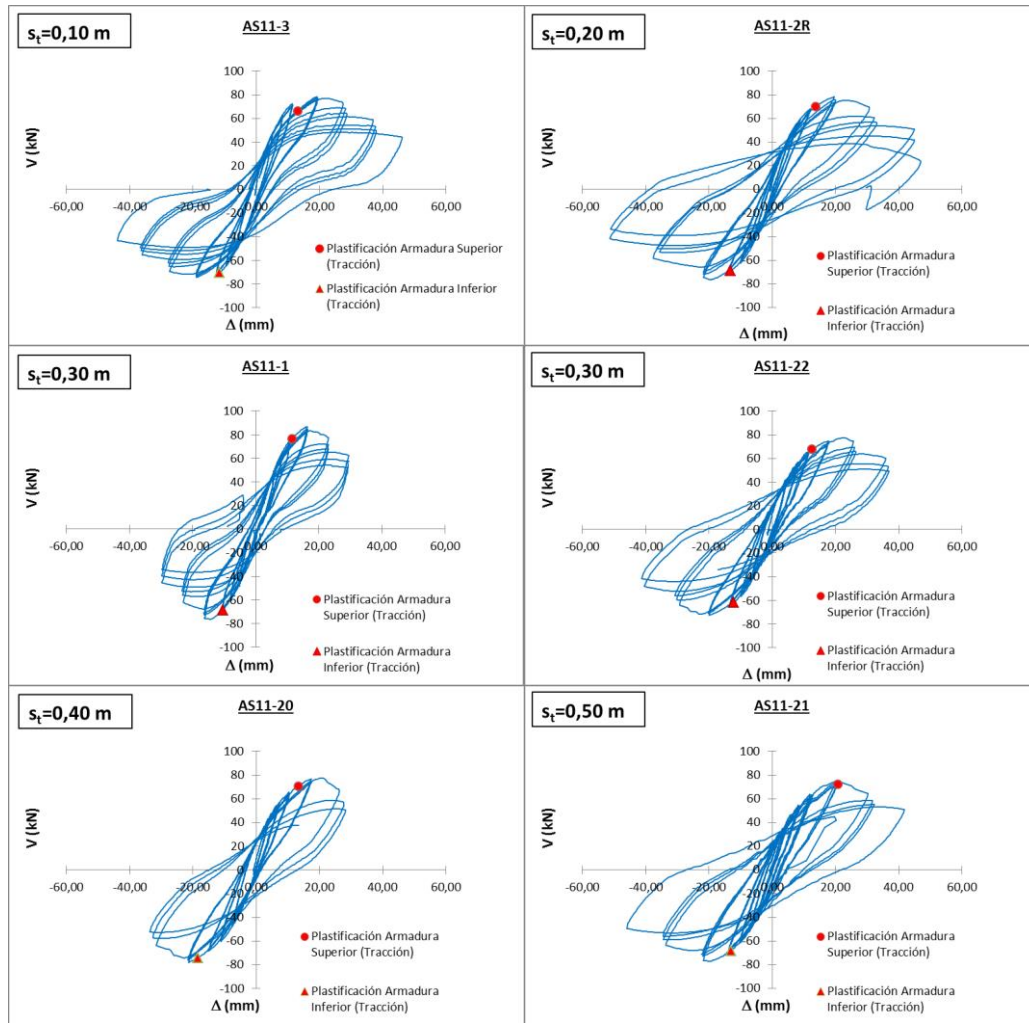


Figura VIII.24. SERIE 1: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=5.77$, $v=0.20$, s_t =variable, $\rho_t=1.16\%$, $r/h=0.15$, cíclica

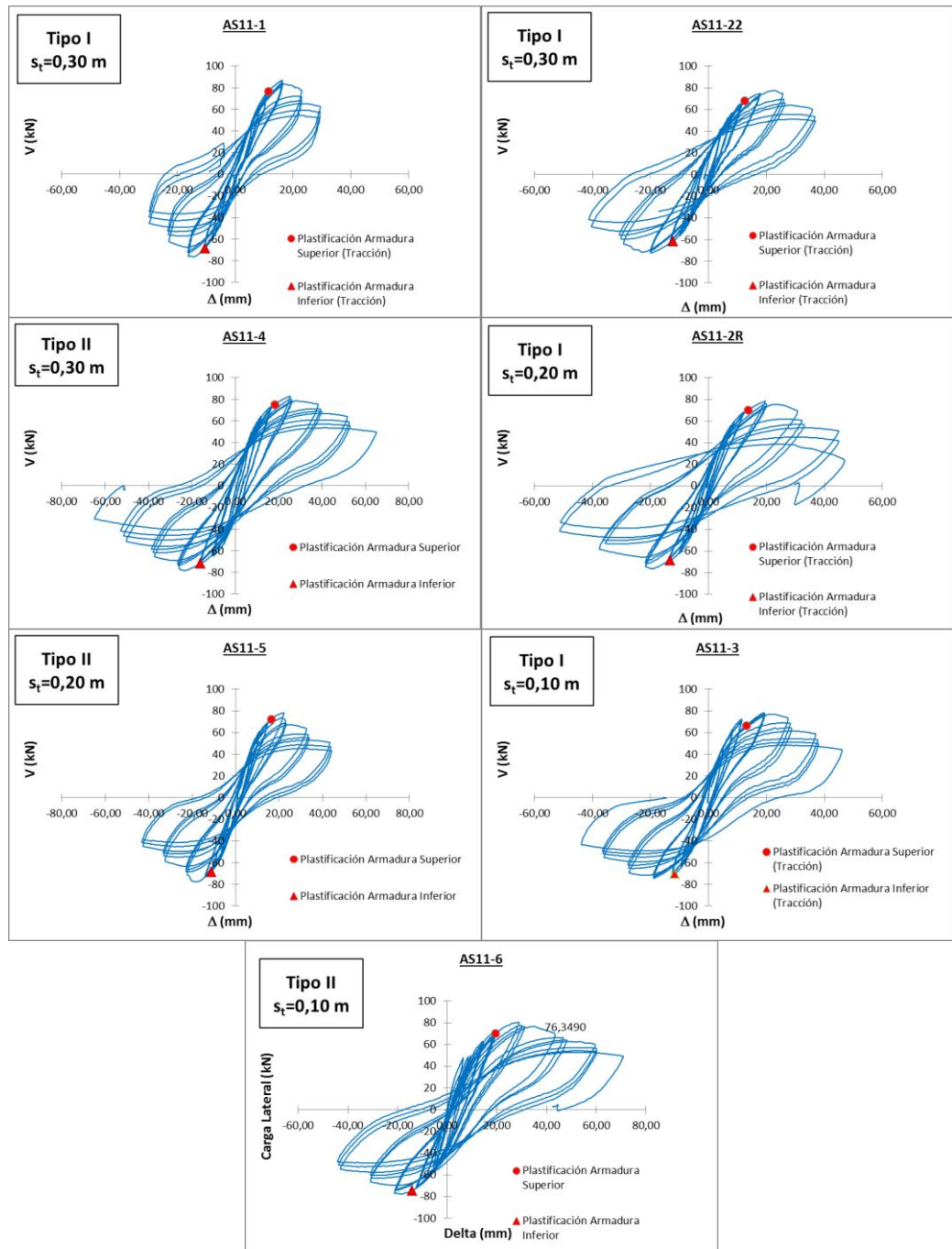


Figura VIII.25. SERIE 1: Tipo I y II, $V_f=2\%$, $\lambda_v=5.77$, $v=0.20$, $s_t=variable$, $\rho_l=1.16\%$, $r/h=0.15$, cíclica

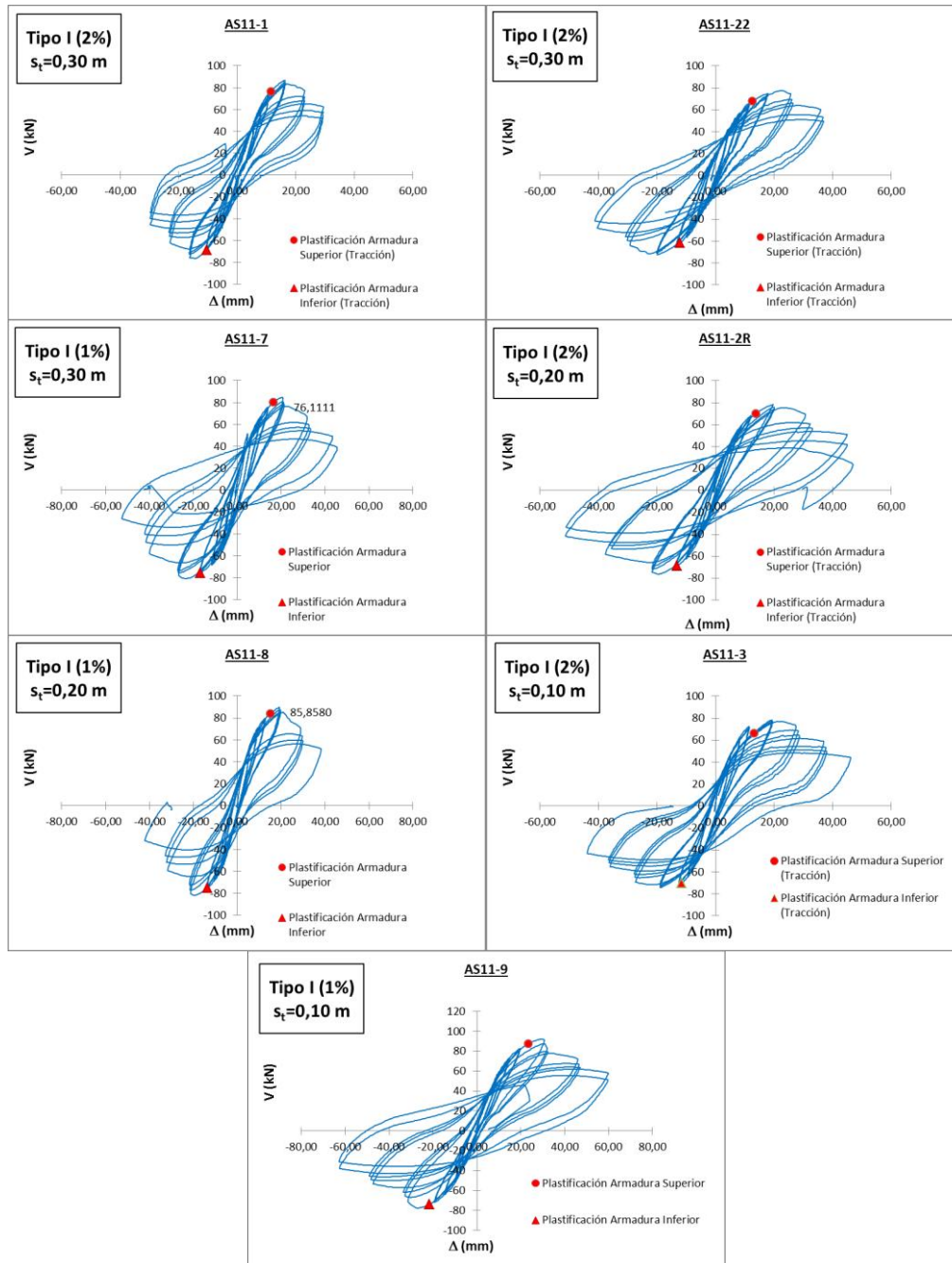


Figura VIII.26. SERIE 1: Tipo I, $V_f=1$ y 2%, $\lambda_v=5.77$, $v=0.20$, $s_t=$ variable, $\rho_f=1.16\%$, $r/h=0.15$, cíclica

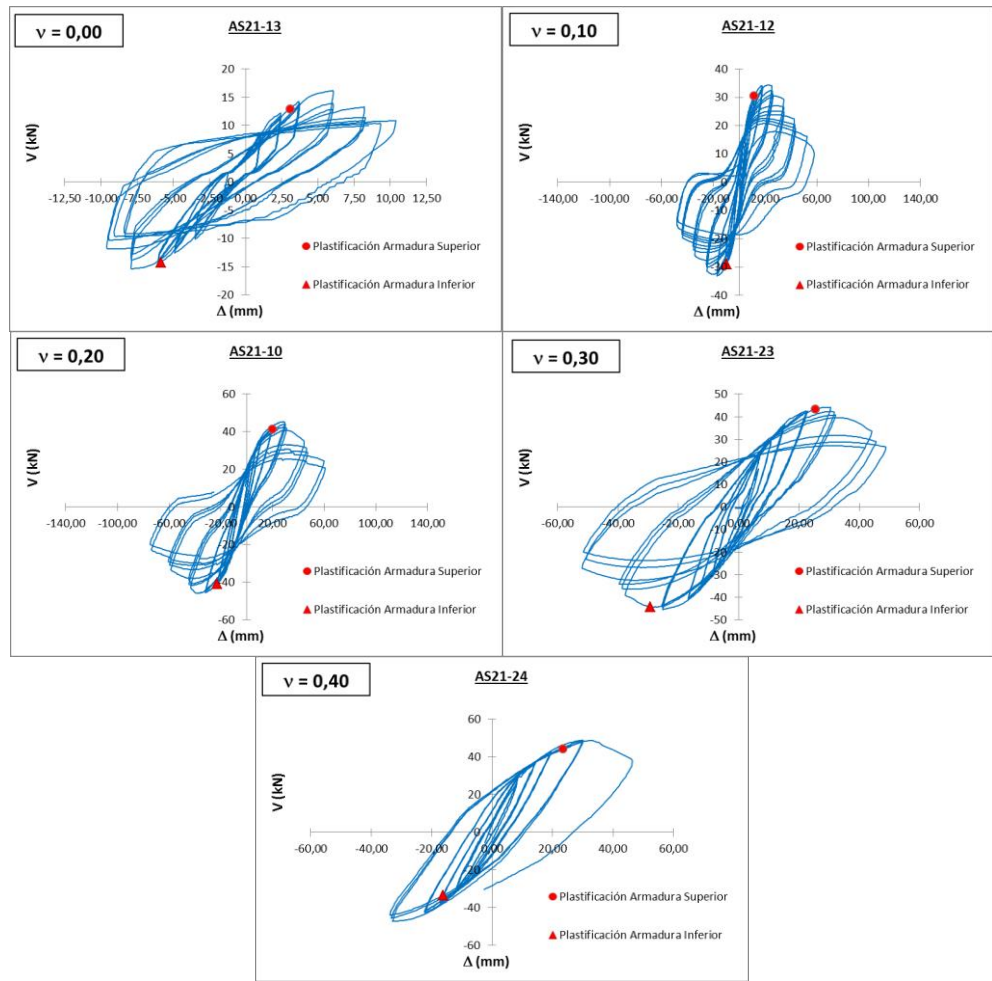


Figura VIII.27. SERIE 2: Tipo I, $V_f = 2\%$, $\lambda_v = 7.50$, $v = \text{variable}$, $s_t = 0.20$ m, $\rho_f = 1.05\%$, $r/h = 0.14$, cíclica

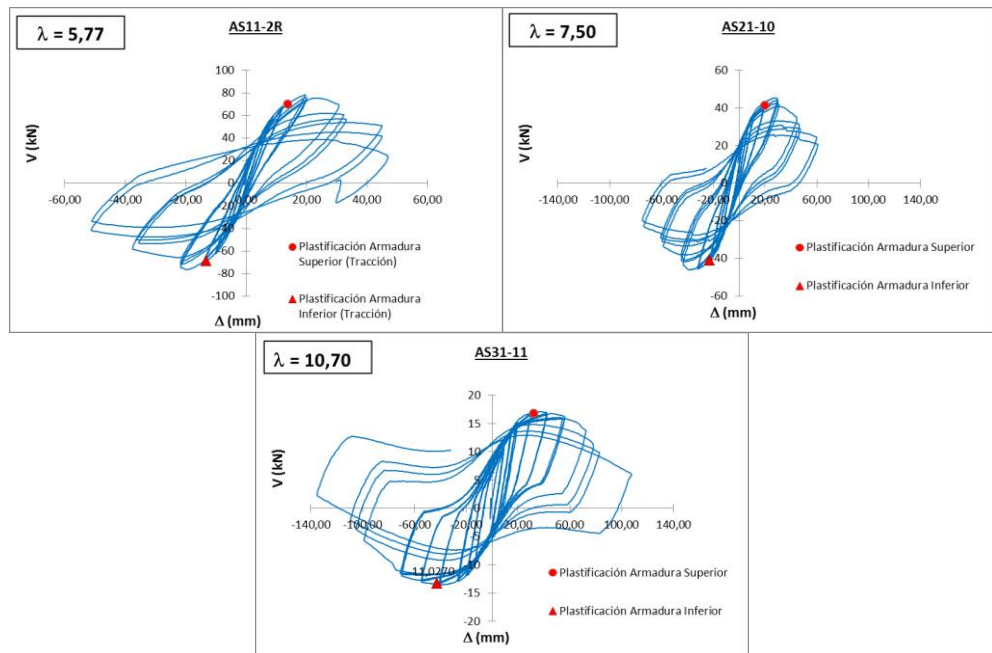


Figura VIII.28. SERIE 2: Tipo I, $V_f = 2\%$, $\lambda_v = \text{variable}$, $v = 0.20$, $s_t = 0.20$, $\rho_f = 0.96, 1.05\%$, $r/h = 0.14, 0.16$, cíclica

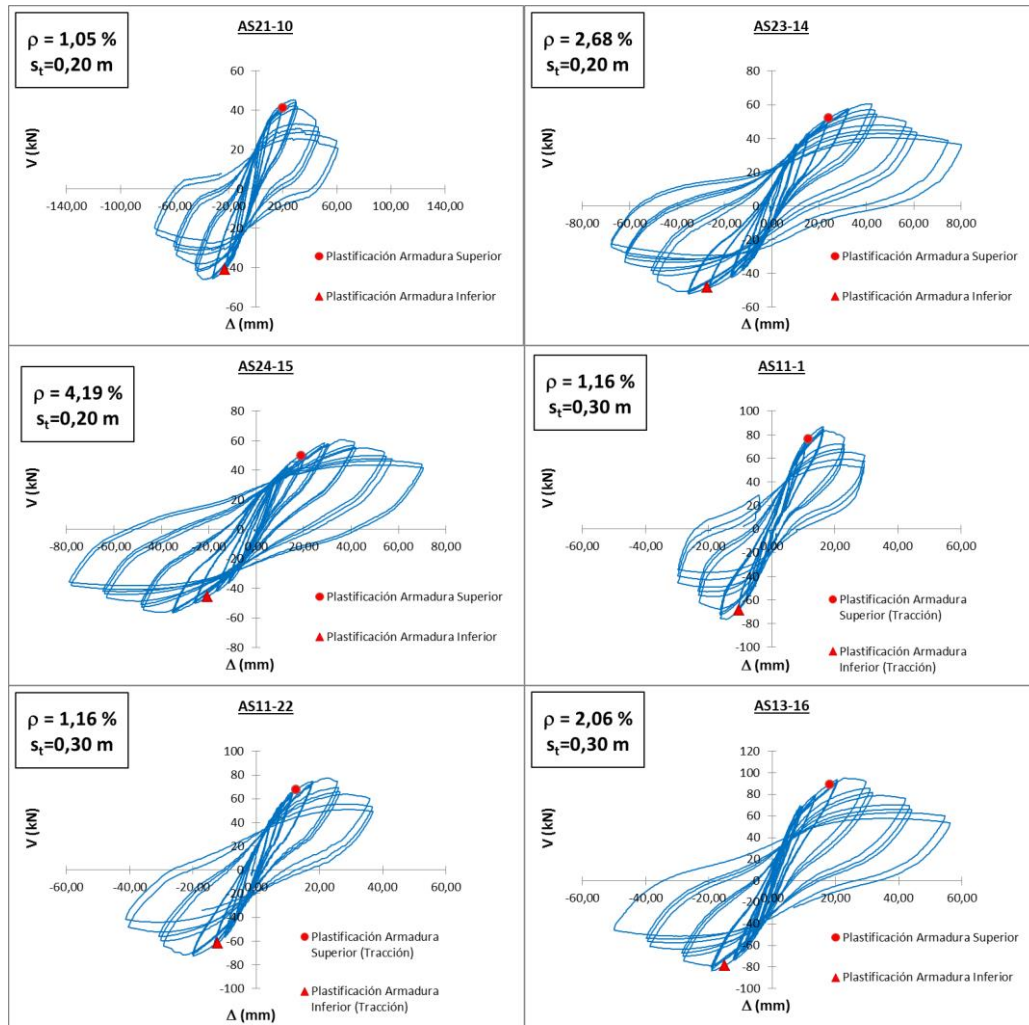


Figura VIII.29. SERIE 3: Tipo I, $V_f = 2\%$, $\lambda_v = 7.50$, $v = 0.20$, $s_t = \text{variable}$, $\rho_t = \text{variable}$, $r/h = 0.14, 0.16, 0.17$, cíclica

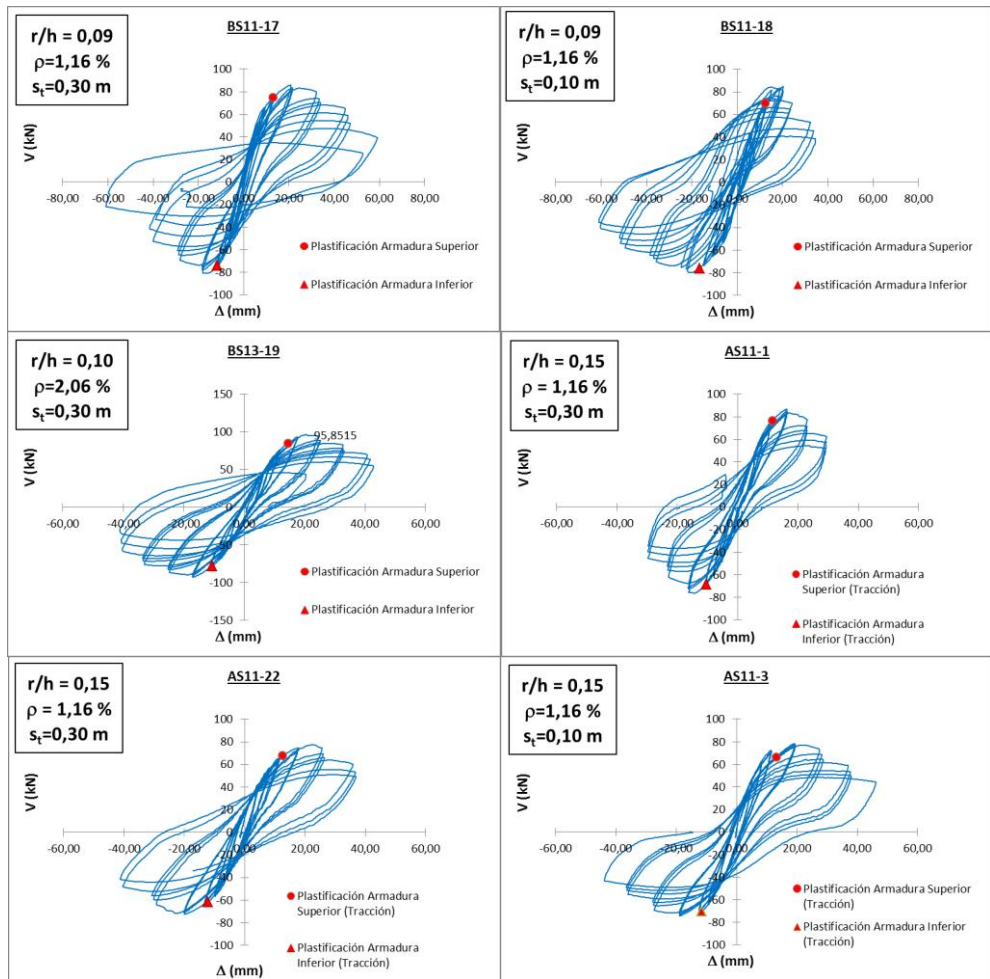


Figura VIII.30. SERIE 4: Tipo I, $V_f = 2\%$, $\lambda_v = 7.50$, $v = 0.10$, $s_t = \text{variable}$, $\rho_t = \text{variable}$, $r/h = \text{variable}$, cíclica

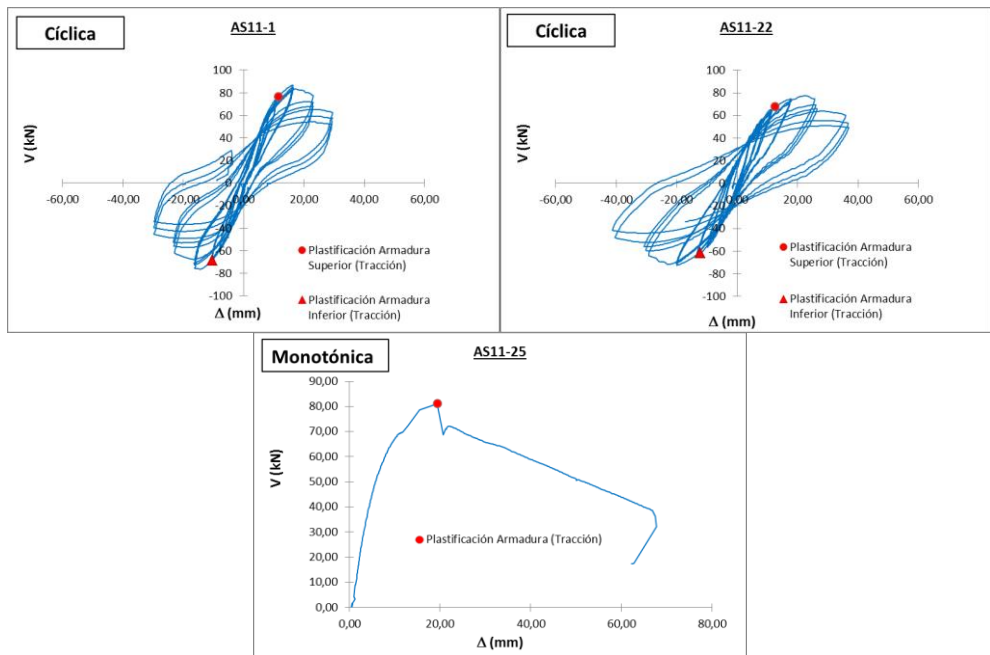


Figura VIII.31. SERIE 5: Tipo I, $V_f = 2\%$, $\lambda_v = 5.77$, $v = 0.20$, $s_t = 0.30$, $\rho_t = 1.16\%$, $r/h = 0.15$, Tipo de carga = variable

De la observación directa de estas curvas se aprecia que se ha conseguido alcanzar un porcentaje de caída de carga superior al 20 % en casi todos los soportes, salvo en el elemento AS21-24, el que se encuentra sometido al máximo nivel de axil ($v=0.40$), donde al alcanzar la carga máxima se produjo el pandeo local de la armadura longitudinal.

Para un mejor análisis de la influencia de los parámetros se van a recopilar por series los valores máximos de cortante alcanzados (Tablas VIII.21 a VIII.29 y Figuras VIII 32 a VIII.40).

Tabla VIII.21. Serie 1: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=5.77$, $v=0.20$, $s_t=variable$, $\rho_f=1.16\%$, $r/h=0.15$, cíclica

SERIE 1 (st)	s_t (m)	SUBIDA		BAJADA	
		Vmax (kN)	Vmax (adim)	Vmax (kN)	Vmax (adim)
AS11-3 (**)	0,10	78,44	2,05	-74,39	-1,94
AS11-2R	0,20	78,22	1,91	-76,43	-1,87
AS11-1	0,30	86,59	2,01	-76,41	-1,78
AS11-22	0,30	77,27	1,99	-72,69	-1,88
AS11-20	0,40	77,61	1,99	-77,85	-2,00
AS11-21	0,50	75,07	1,81	-76,92	-1,85
Valor Min		75,07	1,81	-72,69	-1,78
Valor Max		86,59	2,05	-77,85	-2,00
Valor Medio		78,87	1,96	-75,78	-1,89
Desviación (σ)		3,97	0,09	1,89	0,08
Coefficiente V.		5,03%	4,46%	2,50%	4,00%

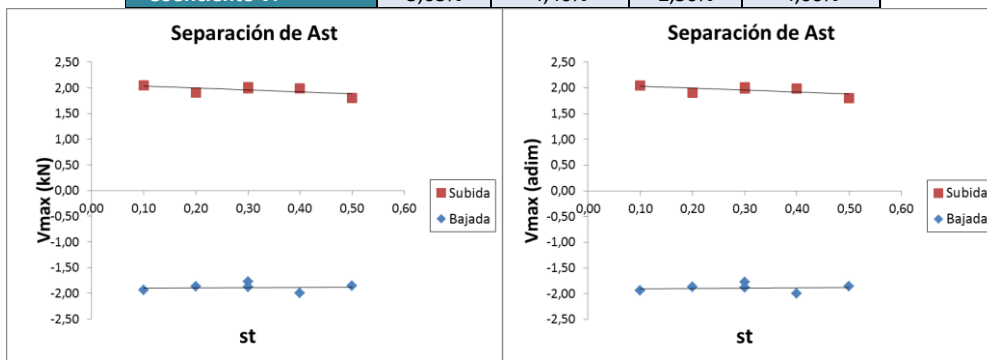


Figura VIII.32. Valor de V_{max} con respecto a la separación de la armadura transversal

Tabla VIII.22. SERIE 1: Tipo I y II, $V_f=2\%$, $\lambda_v=5.77$, $v=0.20$, $s_t=variable$, $\rho_f=1.16\%$, $r/h=0.15$, cíclica

			SUBIDA		BAJADA	
SERIE 1 (Tipo)	Tipo fibra	st (m)	Vmax (kN)	Vmax (adim)	Vmax (kN)	Vmax (adim)
AS11-3 (**)	I	0,1	78,44	2,05	-74,39	-1,94
AS11-2R	I	0,2	78,22	1,91	-76,43	-1,87
AS11-1	I	0,3	86,59	2,01	-76,41	-1,78
AS11-22	I	0,3	77,27	1,99	-72,69	-1,88
Valor Min			77,27	1,91	-72,69	-1,78
Valor Max			86,59	2,05	-76,43	-1,94
Valor Medio			80,13	1,99	-74,98	-1,87
Desviación (σ)			4,34	0,06	1,80	0,07
Coeficiente V.			5,41%	2,89%	2,40%	3,61%
SERIE 1 (Tipo)	Tipo fibra	st (m)	Vmax (kN)	Vmax (adim)	Vmax (kN)	Vmax (adim)
AS11-6	II	0,1	80,38	2,04	-77,51	-1,97
AS11-5	II	0,2	78,26	2,00	-77,51	-1,98
AS11-4	II	0,3	82,90	2,05	-78,41	-1,94
Valor Min			78,26	2,00	-77,51	-1,94
Valor Max			82,90	2,05	-78,41	-1,98
Valor Medio			80,51	2,03	-77,81	-1,96
Desviación (σ)			2,32	0,03	0,52	0,02
Coeficiente V.			2,88%	1,26%	0,67%	1,08%

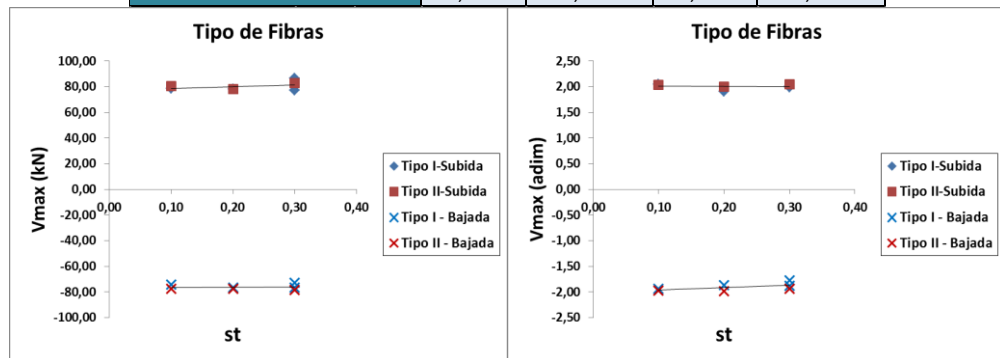


Figura VIII.33. Valor de V_{max} con respecto a tipo de hormigón

Tabla VIII.23. SERIE 1: Tipo I, $V_f=1$ y 2% , $\lambda_v=5.77$, $v=0.20$, $s_t=variable$, $\rho_f=1.16\%$, $r/h=0.15$, cíclica

				SUBIDA		BAJADA	
SERIE 1 (Vol F)	Tipo fibra	Vf (%)	st (m)	Vmax (kN)	Vmax (adim)	Vmax (kN)	Vmax (adim)
AS11-3 (**)	I	2,00%	0,1	78,44	2,05	-74,39	-1,94
AS11-2R	I	2,00%	0,2	78,22	1,91	-76,43	-1,87
AS11-1	I	2,00%	0,3	86,59	2,01	-76,41	-1,78
AS11-22	I	2,00%	0,3	77,27	1,99	-72,69	-1,88
Valor Min				77,27	1,91	-72,69	-1,78
Valor Max				86,59	2,05	-76,43	-1,94
Valor Medio				80,13	1,99	-74,98	-1,87
Desviación (σ)				4,34	0,06	1,80	0,07
Coeficiente V.				5,41%	2,89%	2,40%	3,61%
SERIE 1 (Vol F)	Tipo fibra	Vf (%)	st (m)	SUBIDA (Galga)		BAJADA (Galga)	
				Vmax (kN)	Vmax (adim)	Vmax (kN)	Vmax (adim)
AS11-9	I	1,00%	0,1	92,29	2,08	-77,64	-1,75
AS11-8	I	1,00%	0,2	89,83	2,15	-81,69	-1,96
AS11-7	I	1,00%	0,3	84,75	2,06	-80,74	-1,97
Valor Min				84,75	2,06	-77,64	-1,75
Valor Max				92,29	2,15	-81,69	-1,97
Valor Medio				88,96	2,10	-80,02	-1,89
Desviación (σ)				3,84	0,05	2,12	0,12
Coeficiente V.				4,32%	2,31%	2,65%	6,58%

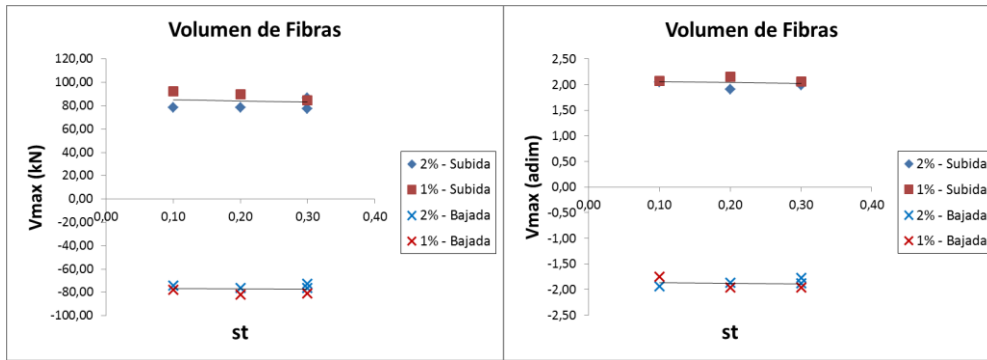


Figura VIII.34. Valor de V_{max} con respecto a volumen de fibras en el hormigón

Tabla VIII.24. SERIE 2: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=7.50$, $v=$ variable, $s_t=0.20$, $\rho_l=1.05\%$, $r/h=0.14$, cíclica

SERIE 2 (Nivel de Axil)	v	SUBIDA		BAJADA	
		Vmax (kN)	Vmax (adim)	Vmax (kN)	Vmax (adim)
AS21-13	0,00	16,23	0,47	-15,43	-0,45
AS21-12	0,10	34,32	0,95	-33,12	-0,91
AS21-10	0,20	45,30	1,17	-45,99	-1,18
AS21-23	0,30	44,15	1,46	-45,38	-1,50
AS21-24 (*)	0,40	48,92	1,48	-47,15	-1,43
Valor Min		16,23	0,47	-15,43	-0,45
Valor Max		48,92	1,48	-45,99	-1,50
Valor Medio		37,78	1,11	-34,98	-1,09
Desviación (σ)		13,21	0,42	14,32	0,43
Coefficiente V.		34,95%	37,64%	40,94%	38,98%

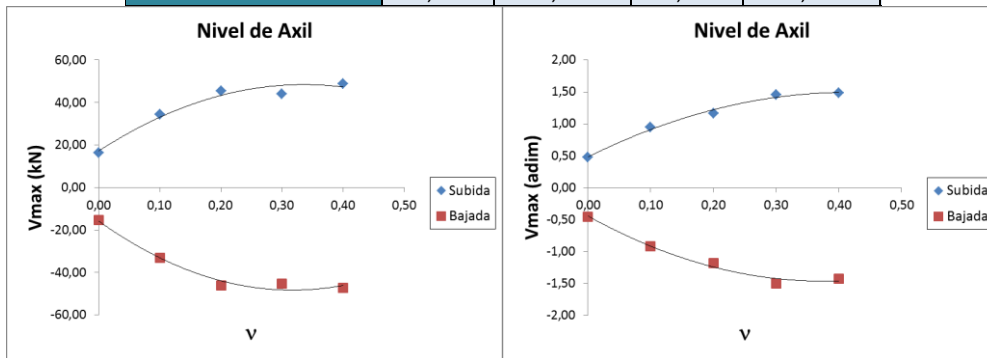


Figura VIII.35. Valor de V_{max} con respecto al nivel de axil aplicado

Tabla VIII.25. SERIE 2: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=$ variable, $v=0.20$, $s_t=0.20$, $\rho_l=0.96$, 1.05%, $r/h=0.14$, 0.16, cíclica

SERIE 2 (Esbeltez)	λ_v	SUBIDA		BAJADA	
		Vmax (kN)	Vmax (adim)	Vmax (kN)	Vmax (adim)
AS31-11	10,71	17,07	0,77	-13,56	-0,62
AS21-10	7,50	45,30	1,17	-45,99	-1,18
AS11-2R	5,77	78,22	1,91	-76,43	-1,87
Valor Min		17,07	0,77	-13,56	-0,62
Valor Max		78,22	1,91	-76,43	-1,87
Valor Medio		61,76	1,54	-45,33	-1,22
Desviación (σ)		23,27	0,53	31,44	0,63
Coefficiente V.		37,68%	34,31%	69,36%	51,35%

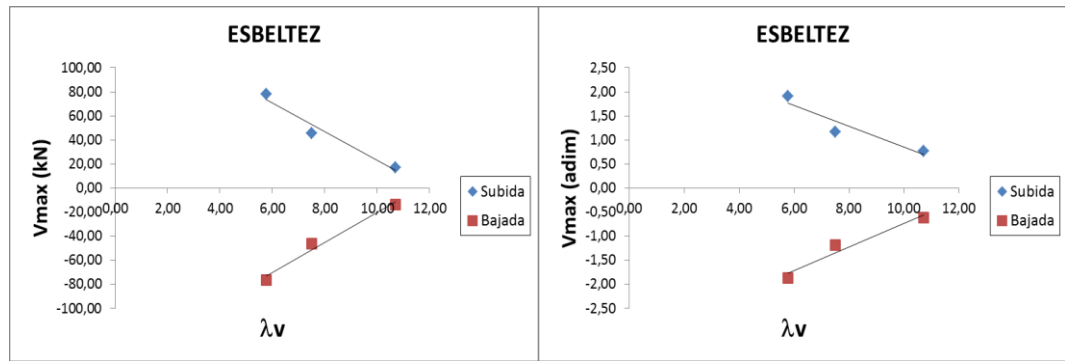


Figura VIII.36. Valor de V_{max} con respecto a la esbeltez a cortante

Tabla VIII.26. SERIE 3: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=7.50$, $\nu=0.20$, $s_t=0.20$ m, $\rho_l=$ variable, $r/h=0.14, 0.16, 0.17$, cíclica

SERIE 3 (Cuantía, $s_t=0,2$ m)	ρ_l	SUBIDA		BAJADA	
		Vmax (kN)	Vmax (adim)	Vmax (kN)	Vmax (adim)
AS21-10	1,05%	45,30	1,17	-45,99	-1,18
AS23-14	2,68%	60,38	1,67	-52,26	-1,44
AS24-15	4,19%	60,78	1,92	-56,49	-1,78
Valor Mín		45,30	1,17	-45,99	-1,18
Valor Max		60,78	1,92	-56,49	-1,78
Valor Medio		55,49	1,58	-51,58	-1,47
Desviación (σ)		8,82	0,38	5,28	0,30
Coefficiente V.		15,90%	24,23%	10,24%	20,51%

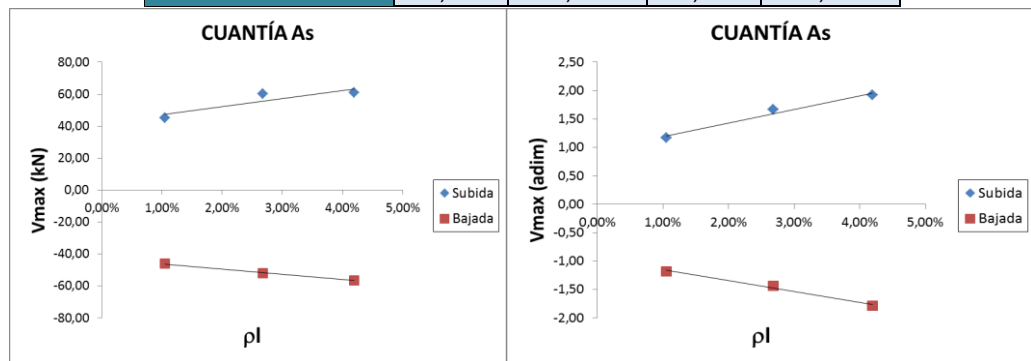


Figura VIII.37. Valor de V_{max} con respecto a la cuantía de la armadura longitudinal

Tabla VIII.27. SERIE 3: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=7.50$, $\nu=0.20$, $s_t=0.30$ m, $\rho_l=$ variable, $r/h=0.14, 0.16, 0.17$, cíclica

SERIE 3 (Cuantía, $s_t=0,3$ m)	ρ_l	SUBIDA		BAJADA	
		Vmax (kN)	Vmax (adim)	Vmax (kN)	Vmax (adim)
AS11-1	1,16%	86,59	2,01	-76,41	-1,78
AS11-22	1,16%	77,27	1,99	-72,69	-1,88
AS13-16	2,06%	95,11	2,34	-83,49	-2,06
Valor Mín		77,27	1,99	-72,69	-1,78
Valor Max		95,11	2,34	-83,49	-2,06
Valor Medio		86,32	2,12	-77,53	-1,90
Desviación (σ)		8,93	0,20	5,49	0,14
Coefficiente V.		10,34%	9,28%	7,08%	7,47%

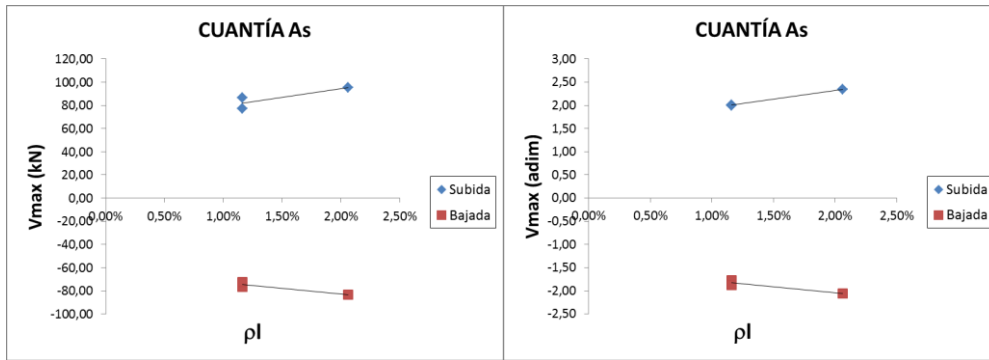


Figura VIII.38. Valor de V_{max} con respecto a la cuantía de la armadura longitudinal

Tabla VIII.28. SERIE 4: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=7.50$, $v=0.10$, $s_t=variable$, $\rho_l=variable$, $r/h=variable$, cíclica

SERIE 4	s_t (m)	ρ_l	r/h	SUBIDA		BAJADA	
				V_{max} (kN)	V_{max} (adim)	V_{max} (kN)	V_{max} (adim)
BS11-17	0,30	1,16%	0,09	85,76	2,04	-80,90	-1,92
BS11-18	0,10	1,16%	0,09	84,64	2,01	-79,88	-1,90
BS13-19	0,30	2,06%	0,10	96,40	2,27	-92,61	-2,18
AS11-1	0,30	1,16%	0,15	86,59	2,01	-76,41	-1,78
AS11-22	0,30	1,16%	0,15	77,27	1,99	-72,69	-1,88
AS13-16	0,30	2,06%	0,16	95,11	2,34	-83,49	-2,06
Valor Min				77,27	1,99	-72,69	-1,78
Valor Max				96,40	2,34	-92,61	-2,18
Valor Medio				87,63	2,11	-81,00	-1,95
Desviación (σ)				7,12	0,15	6,82	0,14
Coficiente V.				8,13%	7,25%	8,42%	7,34%

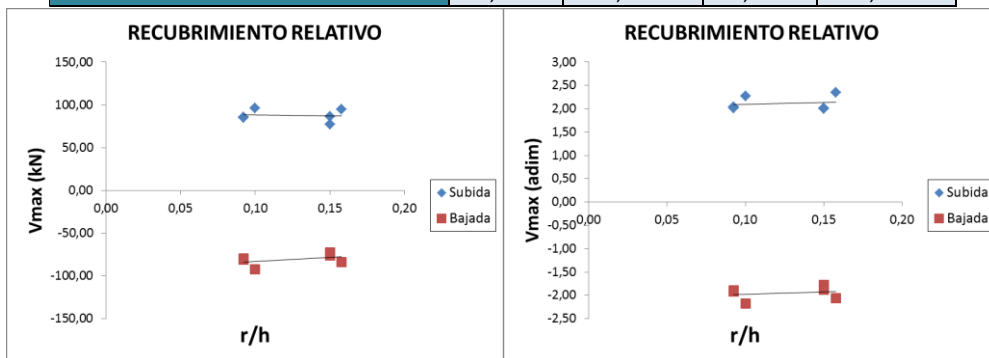


Figura VIII.39. Valor de V_{max} con respecto al recubrimiento relativo

Tabla VIII.29. SERIE 5: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=5.77$, $v=0.20$, $s_t=0.30$, $\rho_l=1.16\%$, $r/h=0.15$, Tipo de carga=variable

SERIE 5	Tipo de carga	SUBIDA		BAJADA	
		V_{max} (kN)	V_{max} (adim)	V_{max} (kN)	V_{max} (adim)
AS11-1	Cíclica	86,59	2,01	-76,41	-1,78
AS11-22	Cíclica	77,27	1,99	-72,69	-1,88
AS11-25	Monotónica	—	—	-81,05	-2,08
Valor Min		77,27	1,99	-72,69	-1,78
Valor Max		86,59	2,01	-81,05	-2,08
Valor Medio		81,93	2,00	-76,72	-1,91
Desviación (σ)		6,59	0,01	4,19	0,16
Coficiente V.		8,04%	0,71%	5,46%	8,19%

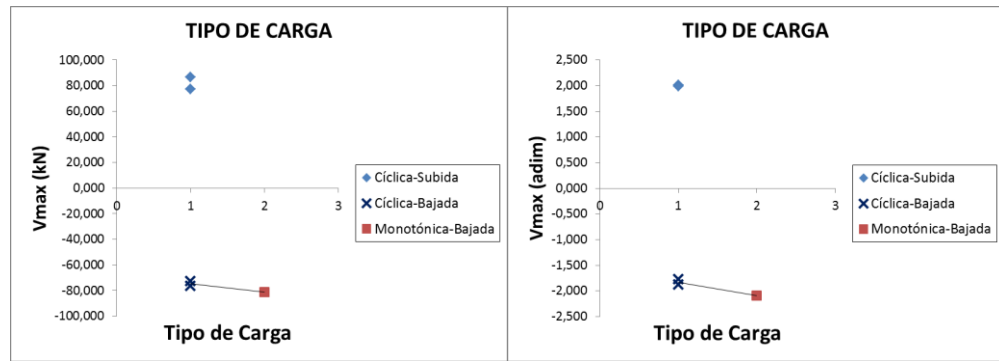


Figura VIII.40. Valor de V_{max} con respecto al tipo de carga

Tal como era de esperar, el cortante máximo, tanto en subida como en bajada, se ve influenciado por el nivel de axil y la esbeltez. Mientras el agotamiento se produce por tracción, el cortante máximo se incrementa con el esfuerzo axil, mientras que cuando el agotamiento es por compresión, el cortante máximo disminuye con el esfuerzo axil. Con respecto a la esbeltez, el nivel de cortante máximo disminuye ya que los efectos de segundo orden se incrementan con el aumento de esbeltez, reduciendo la capacidad resistente del elemento. Además, el valor del cortante máximo disminuye para soportes más esbeltos. La cuantía de la armadura longitudinal solo muestra una ligera tendencia aumentando el cortante máximo con la cuantía y el recubrimiento relativo, mientras que el resto de los parámetros parece no tener influencia.

VIII.3. Definición de los diagramas momento-curvatura

Conocido el cortante actuante en cada sección, la posición y el desplazamiento de la misma, para cada soporte se puede obtener el valor del momento flector en la sección crítica. Además, como se ha dispuesto una instrumentación horizontal con captadores de desplazamiento estratégicamente situados, es posible obtener la curvatura de la sección crítica.

Concretamente, el momento flector de la sección crítica se obtiene siguiendo las indicaciones dadas por Caballero (2015) [26] (véase Figura VIII.5). A partir de los datos registrados por las células de carga, así como los desplazamientos medidos por los captadores verticales, se obtiene el momento flector en la sección crítica con la correspondiente corrección de giro del *stub* y añadiendo el efecto del peso propio del elemento.

La curvatura de la sección crítica se calcula como la diferencia de medidas obtenidas por los captadores horizontales de la sección objeto de estudio dividida por la distancia entre ellos (VIII.1), según se muestra en la Figura VIII.41.

$$(VIII.1) \quad curvatura_{sección\ i} = \frac{medida\ capt\ superior - medida\ capt\ inferior}{distancia\ entre\ capt\ superior\ e\ inferior}$$

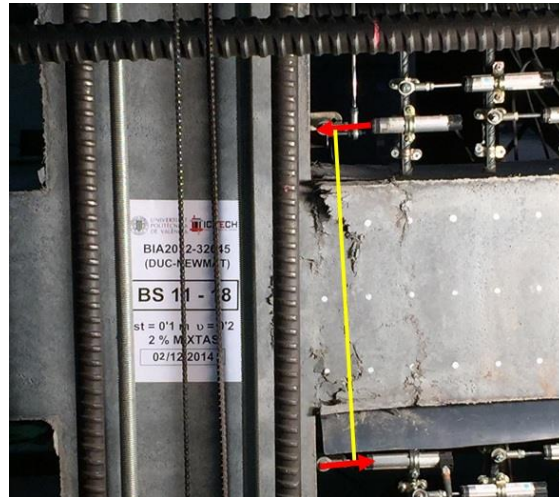


Figura VIII.41. Medidas necesarias para obtener la curvatura de la sección

Con los valores obtenidos se pueden representar las curvas momento-curvatura en la sección crítica, y analizar el comportamiento a nivel sección hasta el fallo del soporte. En las Figuras VIII.42 a VIII.49 se recopilan por series las curvas momento-curvatura obtenidas en la sección crítica de cada soporte.

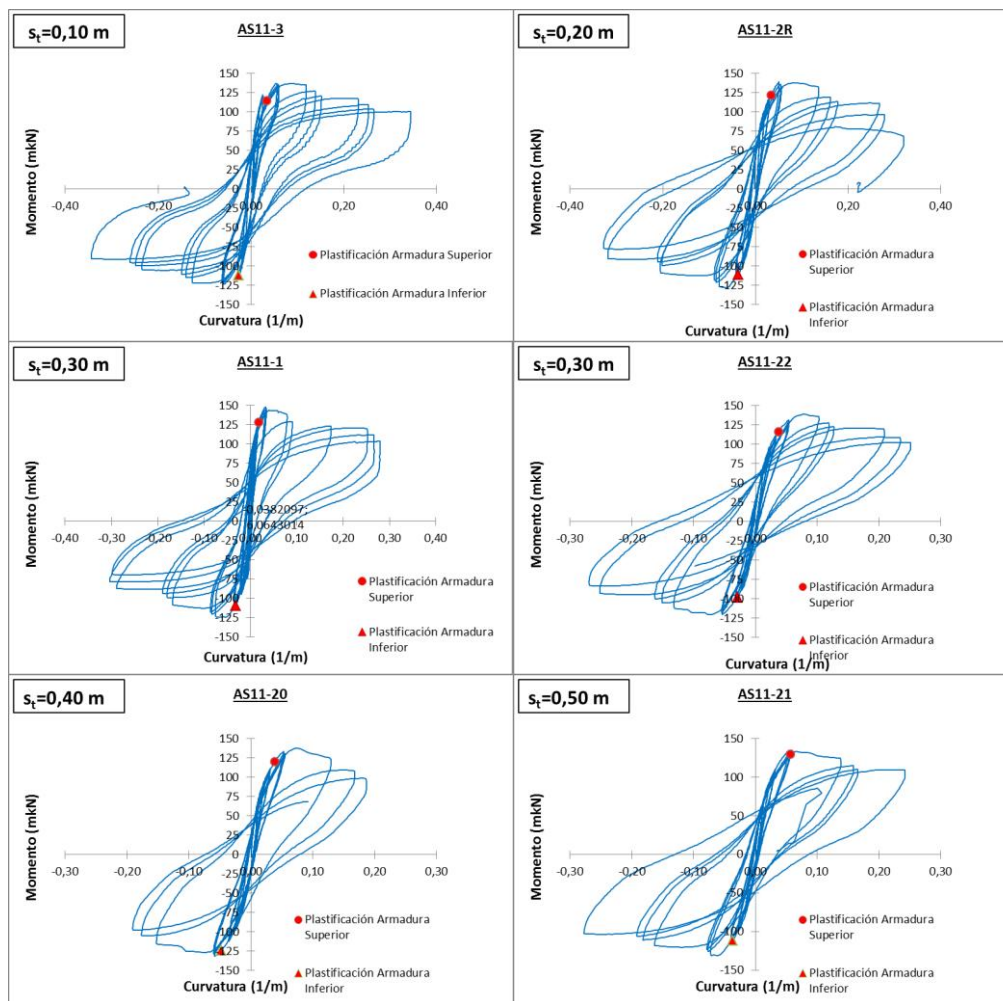


Figura VIII.42. SERIE 1: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=5.77$, $v=0.20$, $s_i=\text{variable}$, $\rho_f=1.16\%$, $r/h=0.15$, cíclica

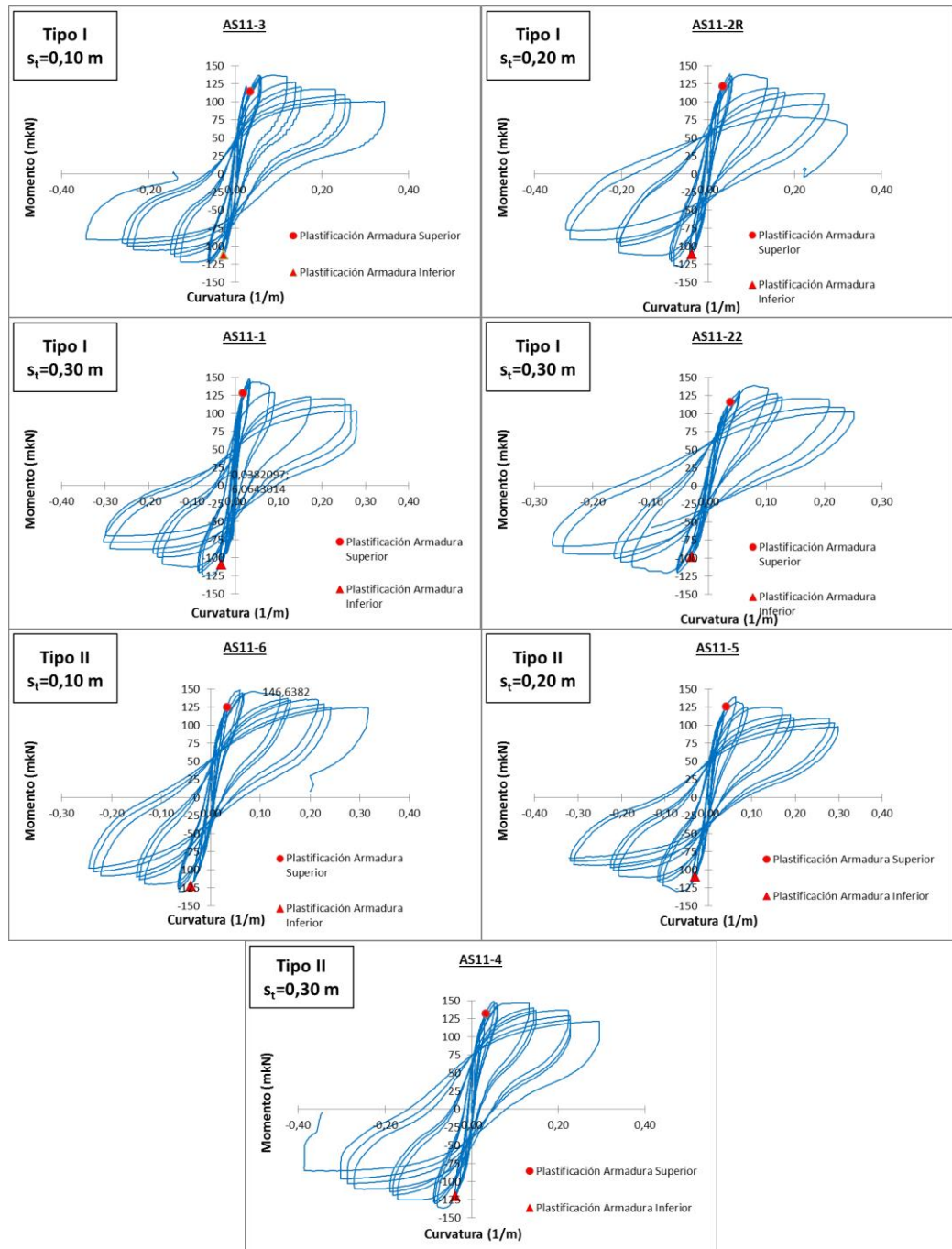


Figura VIII.43. SERIE 1: Tipo I y II, $V_f=2\%$, $\lambda_v=5.77$, $v=0.20$, $s_t=variable$, $\rho_l=1.16\%$, $r/h=0.15$, cíclica

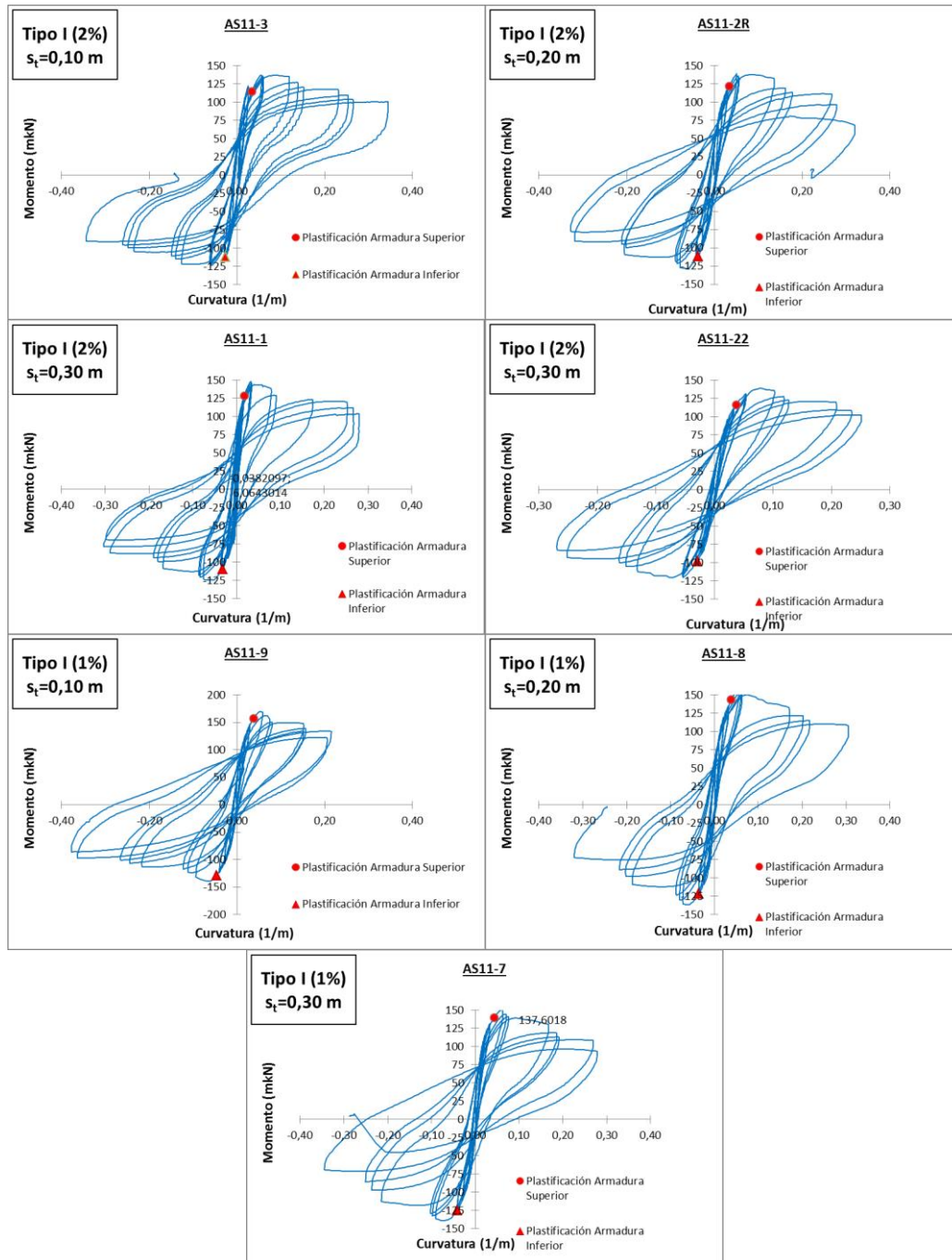


Figura VIII.44. SERIE 1: Tipo I, $V_f=1$ y 2%, $\lambda_v=5.77$, $v=0.20$, $s_t=$ variable, $\rho_f=1.16\%$, $r/h=0.15$, cíclica

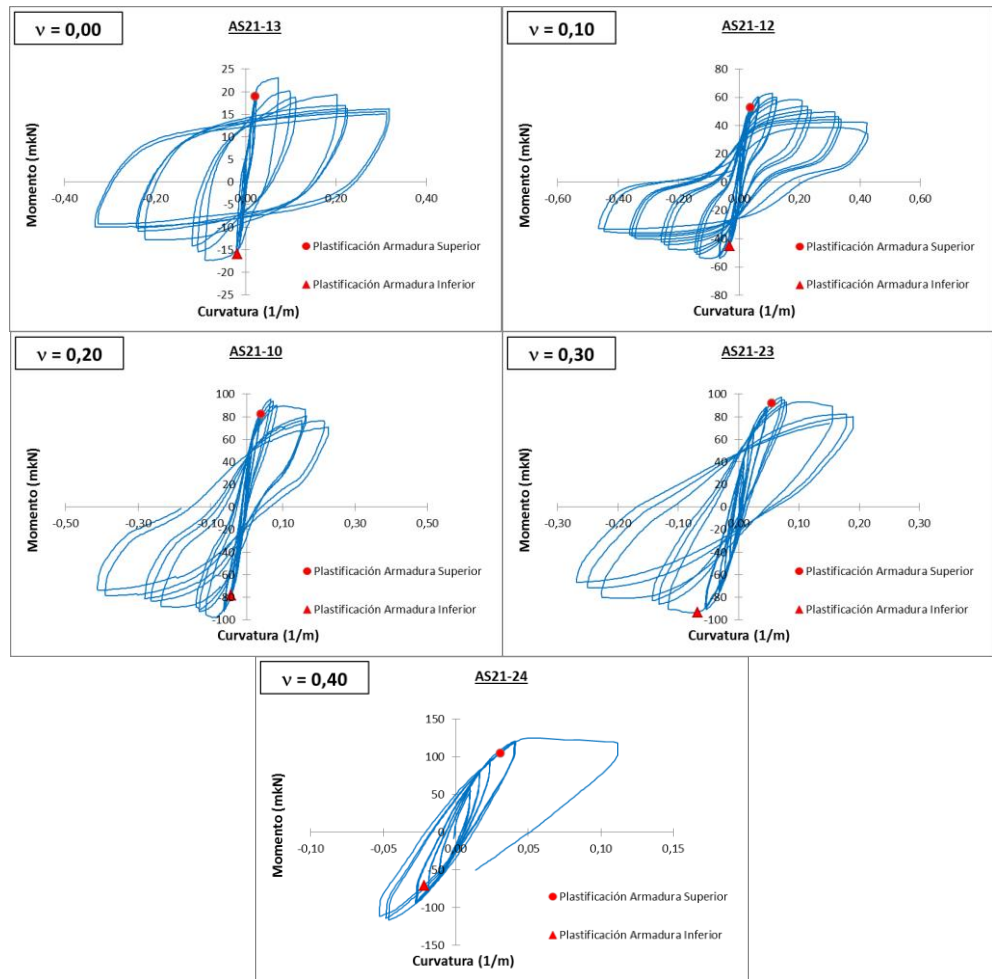


Figura VIII.45. SERIE 2: Tipo I, $V_f= 2\%$, $\lambda_v=7.50$, $v=$ variable, $s_t=0.20$ m, $\rho_f=1.05\%$, $r/h=0.14$, cíclica

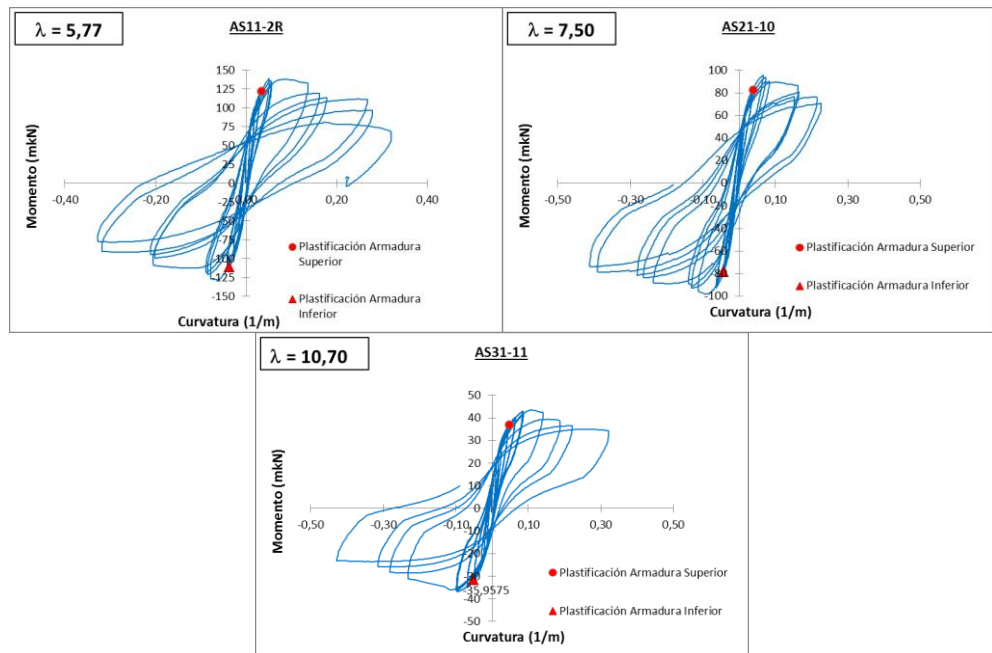


Figura VIII.46. SERIE 2: Tipo I, $V_f= 2\%$, $\lambda_v=$ variable, $v=0.20$, $s_t=0.20$, $\rho_f=0.96, 1.05\%$, $r/h=0.14, 0.16$, cíclica

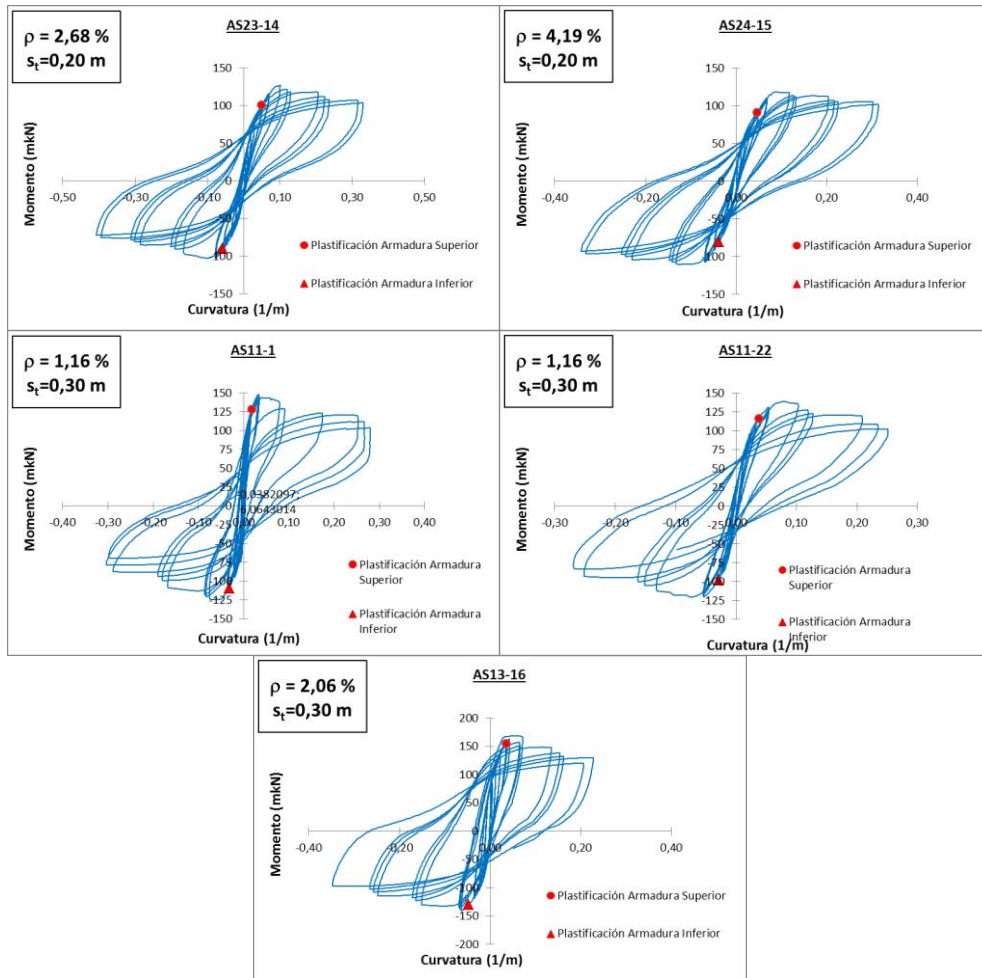


Figura VIII.47. SERIE 3: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=7.50$, $v=0.20$, $s_i=$ variable, $\rho_i=$ variable, $r/h=0.14, 0.16, 0.17$, cíclica

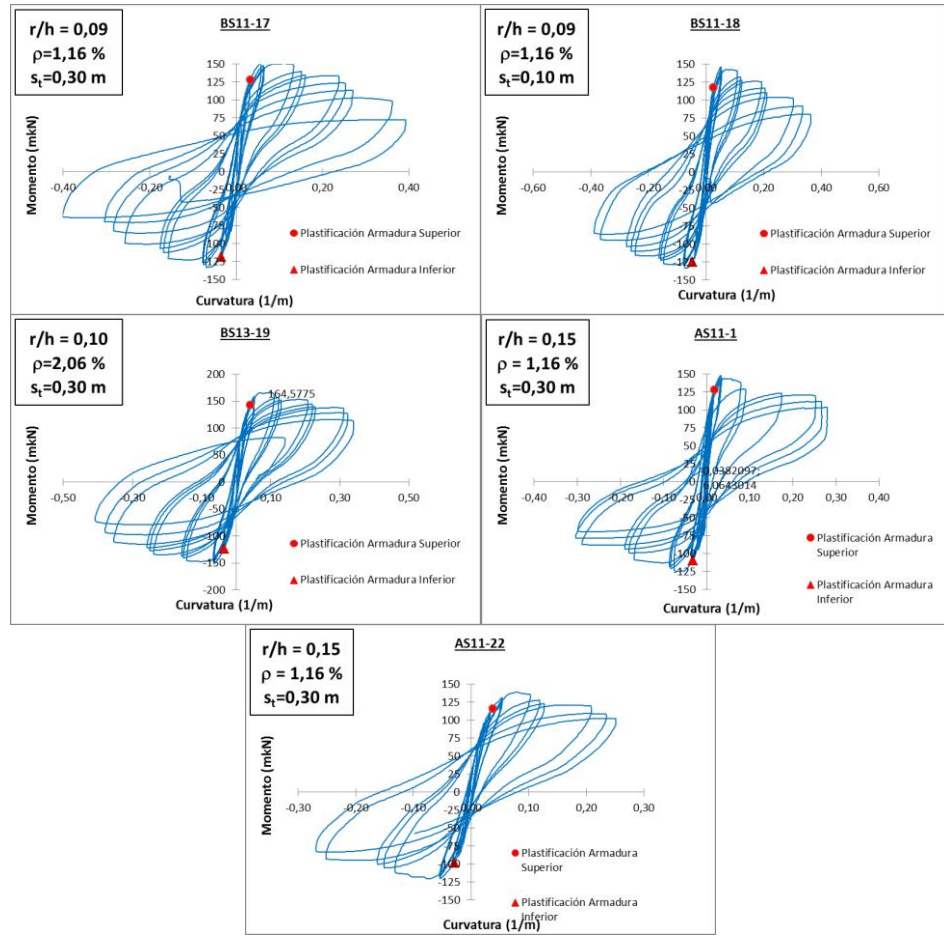


Figura VIII.48. SERIE 4: Tipo I, $V_f = 2\%$, $\lambda_v = 7.50$, $v = 0.10$, $s_t = \text{variable}$, $\rho_t = \text{variable}$, $r/h = \text{variable}$, cíclica

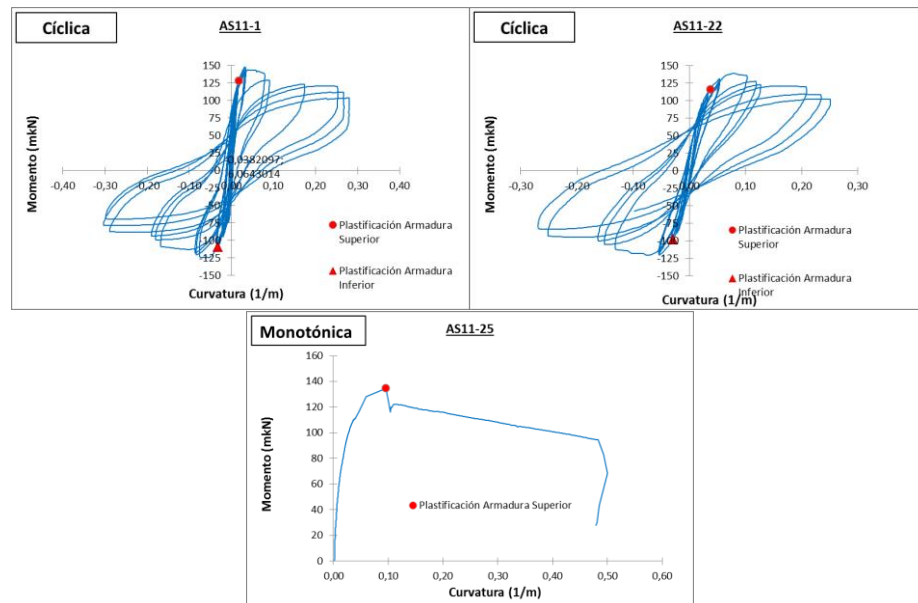


Figura VIII.49. SERIE 5: Tipo I, $V_f = 2\%$, $\lambda_v = 5.77$, $v = 0.20$, $s_t = 0.30$, $\rho_t = 1.16\%$, $r/h = 0.15$, Tipo de carga = variable

En la Tabla VIII.30 se recogen los porcentajes alcanzados del valor post-pico del momento flector al final de cada ensayo. Como se puede apreciar no ha sido posible conseguir en todos los diagramas Momento-Curvatura el 20 % de caída resistente, como se indica en las recomendaciones de la guía ACI 374.2R-13 (2013) [2].

Tabla VIII.30. Porcentaje alcanzado del valor post-pico en el momento de la rotura de los valores de las envolventes Momento-Curvatura

Referencia	% CAIDA EN M_FLECTOR (Subida)	% CAIDA EN M_FLECTOR (Bajada)
AS11-1	20,00%	20,00%
AS11-2R	20,00%	20,00%
AS11-3	20,00%	20,00%
AS11-4	20,00%	20,00%
AS11-5	20,00%	20,00%
AS11-6	9,59%	17,14%
AS11-7	20,00%	20,00%
AS11-8	20,00%	20,00%
AS11-9	20,00%	20,00%
AS21-10	20,00%	19,90%
AS31-11	20,00%	20,00%
AS21-12	20,00%	20,00%
AS21-13	20,00%	20,00%
AS23-14	20,00%	20,00%
AS24-15	16,45%	19,10%
AS13-16	20,00%	20,00%
BS11-17	20,00%	20,00%
BS11-18	20,00%	20,00%
BS13-19	17,58%	20,00%
AS11-20	10,28%	12,68%
AS11-21	18,47%	20,00%
AS11-22	18,28%	20,00%
AS21-23	11,99%	18,04%
AS21-24	0,00%	0,61%
AS11-25	-	20,00%

En los elementos donde no se alcanza el valor de caída del 20 % de la carga máxima se produjo un pandeo local, que dio lugar a la parada del ensayo. Era lo esperable en elementos sometidos a un nivel alto de axil, como el AS21-23 y AS21-24; en concreto en este último soporte se produjo una rotura explosiva.

A continuación se recogen los valores parametrizados, por series, de los valores máximos de momento flector obtenidos en la sección crítica, tanto en subida como en bajada de carga (Tablas VIII.31 a VIII.39 y Figuras VIII 50 a VIII.58).

Tabla VIII.31. Serie 1: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=5.77$, $v=0.20$, $s_t=variable$, $\rho_f=1.16\%$, $r/h=0.15$, cíclica

SERIE 1 (st)	s_t (m)	SUBIDA		BAJADA	
		Mmax (kNm)	Mmax (adim)	Mmax (kNm)	Mmax (adim)
AS11-3 (**)	0,10	-137,39	-0,11	123,99	0,10
AS11-2R	0,20	-139,44	-0,11	128,22	0,10
AS11-1	0,30	-148,27	-0,11	124,62	0,09
AS11-22	0,30	-139,18	-0,12	120,45	0,10
AS11-20	0,40	-137,69	-0,11	131,86	0,11
AS11-21	0,50	-134,54	-0,10	130,75	0,10
Valor Min		-134,54	-0,10	120,45	0,09
Valor Max		-148,27	-0,12	131,86	0,11
Valor Medio		-139,42	-0,11	126,65	0,10
Desviación (σ)		4,67	0,00	4,38	0,01
Coficiente V.		3,35%	3,60%	3,46%	5,16%

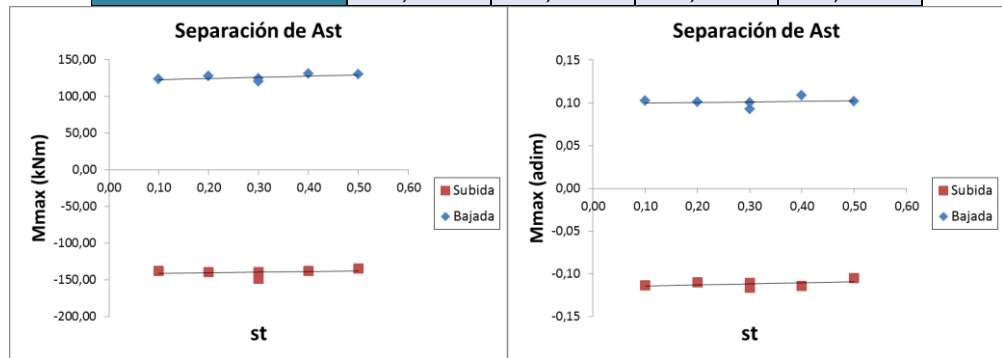


Figura VIII.50. Valor de M_{max} con respecto a la separación de la armadura transversal

Tabla VIII.32. SERIE 1: Tipo I y II, $V_f=2\%$, $\lambda_v=5.77$, $v=0.20$, $s_t=variable$, $\rho_f=1.16\%$, $r/h=0.15$, cíclica

SERIE 1 (Tipo F)	Tipo fibra	st (m)	SUBIDA		BAJADA	
			Mmax (kNm)	Mmax (adim)	Mmax (kNm)	Mmax (adim)
AS11-3 (**)	I	0,1	-137,39	-0,11	123,99	0,10
AS11-2R	I	0,2	-139,44	-0,11	128,22	0,10
AS11-1	I	0,3	-148,27	-0,11	124,62	0,09
AS11-22	I	0,3	-139,18	-0,12	120,45	0,10
Valor Min			-137,39	-0,11	120,45	0,09
Valor Max			-148,27	-0,12	128,22	0,10
Valor Medio			-141,07	-0,11	124,32	0,10
Desviación (σ)			4,88	0,00	3,18	0,00
Coficiente V.			3,46%	2,71%	2,56%	4,49%
SERIE 1 (Tipo F)	Tipo fibra	st (m)	Mmax (kNm)	Mmax (adim)	Mmax (kNm)	Mmax (adim)
AS11-6	II	0,1	-149,08	-0,12	130,39	0,11
AS11-5	II	0,2	-139,73	-0,11	129,76	0,10
AS11-4	II	0,3	-150,79	-0,12	136,28	0,11
Valor Min			-139,73	-0,11	129,76	0,10
Valor Max			-150,79	-0,12	136,28	0,11
Valor Medio			-146,53	-0,12	132,14	0,11
Desviación (σ)			5,96	0,00	3,60	0,00
Coficiente V.			4,06%	3,61%	2,72%	1,27%

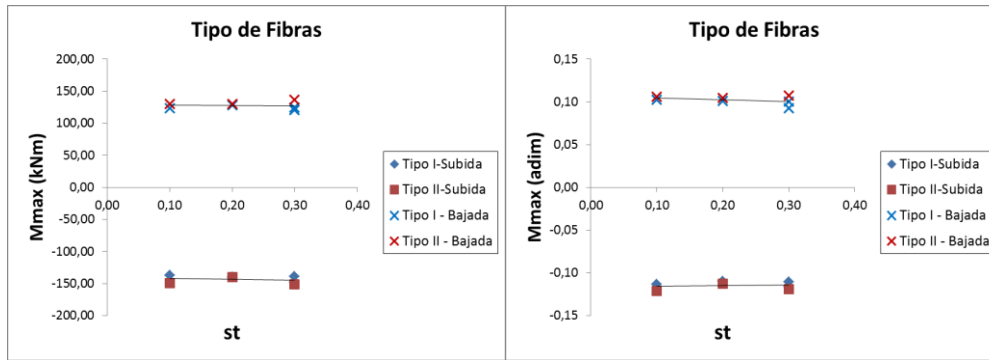


Figura VIII.51. Valor de M_{max} con respecto a tipo de hormigón

Tabla VIII.33. SERIE 1: Tipo I, $V_f=1$ y 2% , $\lambda_v=5.77$, $\nu=0.20$, $s_x=variable$, $\rho_f=1.16\%$, $r/h=0.15$, cíclica

			SUBIDA		BAJADA	
SERIE 1 (Vol F)	Vf (%)	st (m)	Mmax (kNm)	Mmax (adim)	Mmax (kNm)	Mmax (adim)
AS11-3 (**)	2,00%	0,1	-137,39	-0,11	123,99	0,10
AS11-2R	2,00%	0,2	-139,44	-0,11	128,22	0,10
AS11-1	2,00%	0,3	-148,27	-0,11	124,62	0,09
AS11-22	2,00%	0,3	-139,18	-0,12	120,45	0,10
Valor Min			-137,39	-0,11	120,45	0,09
Valor Max			-148,27	-0,12	128,22	0,10
Valor Medio			-141,07	-0,11	124,32	0,10
Desviación (σ)			4,88	0,00	3,18	0,00
Coeficiente V.			3,46%	2,71%	2,56%	4,49%
SERIE 1 (Vol F)	Vf (%)	st (m)	Mmax (kNm)	Mmax (adim)	Mmax (kNm)	Mmax (adim)
AS11-9	1,00%	0,1	-169,94	-0,12	139,36	0,10
AS11-8	1,00%	0,2	-156,67	-0,12	136,72	0,10
AS11-7	1,00%	0,3	-150,83	-0,12	138,75	0,11
Valor Min			-150,83	-0,12	136,72	0,10
Valor Max			-169,94	-0,12	139,36	0,11
Valor Medio			-159,15	-0,12	138,28	0,10
Desviación (σ)			9,79	0,00	1,38	0,00
Coeficiente V.			6,15%	3,37%	1,00%	2,72%

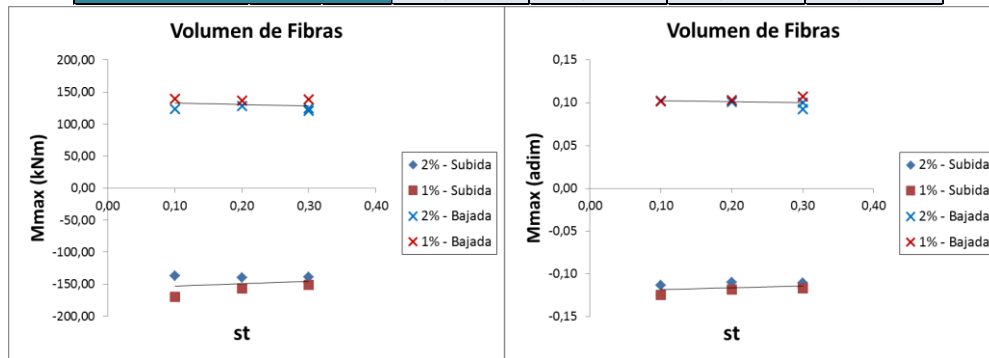


Figura VIII.52. Valor de M_{max} con respecto a volumen de fibras en el hormigón

Tabla VIII.34. SERIE 2: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=7.50$, $v=$ variable, $s_t=0.20$, $\rho_f=1.05\%$, $r/h=0.14$, cíclica

SERIE 2 (Nivel de Axil)	v	SUBIDA		BAJADA	
		Mmax (kNm)	Mmax (adim)	Mmax (kNm)	Mmax (adim)
AS21-13	0,00	-23,10	-0,03	17,43	0,02
AS21-12	0,10	-62,98	-0,07	53,98	0,06
AS21-10	0,20	-95,51	-0,11	97,81	0,11
AS21-23	0,30	-97,41	-0,13	93,74	0,13
AS21-24 (*)	0,40	-124,96	-0,16	116,31	0,15
Valor Min		-23,10	-0,03	17,43	0,02
Valor Max		-124,96	-0,16	97,81	0,15
Valor Medio		-80,79	-0,10	65,74	0,09
Desviación (σ)		39,02	0,05	37,79	0,05
Coficiente V.		48,29%	50,28%	57,48%	54,01%

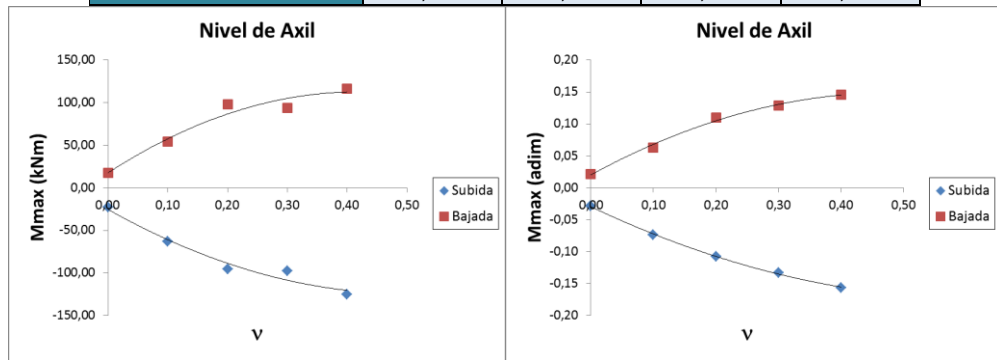


Figura VIII.53. Valor de M_{max} con respecto al nivel de axil aplicado

Tabla VIII.35. SERIE 2: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=$ variable, $v=0.20$, $s_t=0.20$, $\rho_f=0.96, 1.05\%$, $r/h=0.14, 0.16$, cíclica

SERIE 2 (Esbeltez)	λ_v	SUBIDA		BAJADA	
		Mmax (kNm)	Mmax (adim)	Mmax (kNm)	Mmax (adim)
AS31-11	10,71	-43,45	-0,11	36,86	0,10
AS21-10	7,50	-95,51	-0,11	97,81	0,11
AS11-2R	5,77	-139,44	-0,11	128,22	0,10
Valor Min		-43,45	-0,11	36,86	0,10
Valor Max		-139,44	-0,11	128,22	0,11
Valor Medio		-117,48	-0,11	87,63	0,10
Desviación (σ)		31,06	0,00	46,52	0,01
Coficiente V.		26,44%	1,58%	53,09%	6,42%

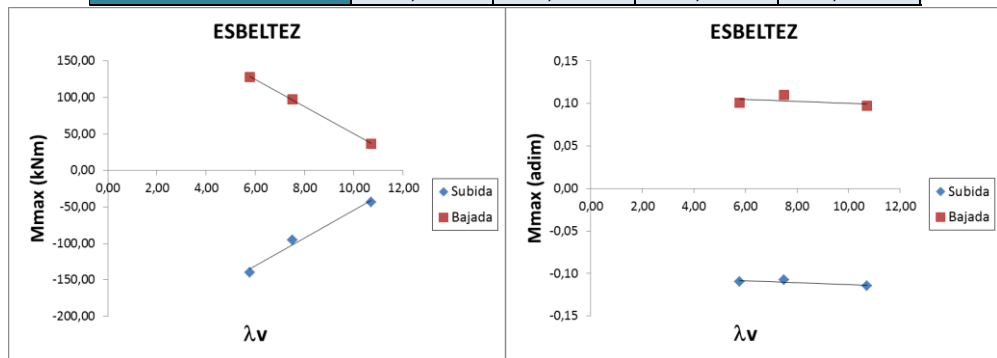


Figura VIII.54. Valor de M_{max} con respecto a la esbeltez a cortante

Tabla VIII.36. SERIE 3: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=7.50$, $v=0.20$, $s_t=0.20$ m, $\rho_l=$ variable, $r/h=0.14, 0.16, 0.17$, cíclica

SERIE 3 (Cuantía, $s_t=0,2$ m)	ρ_l	SUBIDA		BAJADA	
		Mmax (kNm)	Mmax (adim)	Mmax (kNm)	Mmax (adim)
AS21-10	1,05%	-95,51	-0,11	97,81	0,11
AS23-14	2,68%	-127,10	-0,15	102,57	0,12
AS24-15	4,19%	-118,47	-0,15	110,31	0,14
Valor Min		-95,51	-0,11	97,81	0,11
Valor Max		-127,10	-0,15	110,31	0,14
Valor Medio		-113,69	-0,14	103,57	0,12
Desviación (σ)		16,33	0,02	6,31	0,02
Coficiente V.		14,36%	18,33%	6,09%	14,28%

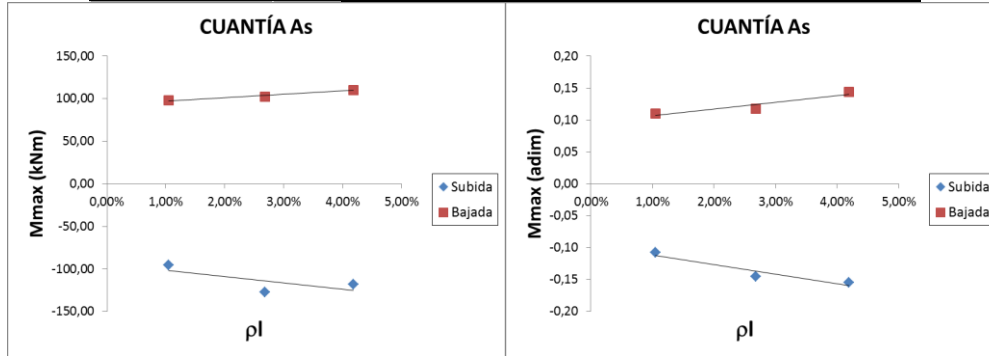


Figura VIII.55. Valor de M_{max} con respecto a la cuantía de la armadura longitudinal

Tabla VIII.37. SERIE 3: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=7.50$, $v=0.20$, $s_t=0.30$ m, $\rho_l=$ variable, $r/h=0.14, 0.16, 0.17$, cíclica

SERIE 3 (Cuantía, $s_t=0,3$ m)	ρ_l	SUBIDA		BAJADA	
		Mmax (kNm)	Mmax (adim)	Mmax (kNm)	Mmax (adim)
AS11-1	1,16%	-148,27	-0,11	124,62	0,09
AS11-22	1,16%	-139,18	-0,12	120,45	0,10
AS13-16	2,06%	-168,83	-0,13	140,09	0,11
Valor Min		-139,18	-0,11	120,45	0,09
Valor Max		-168,83	-0,13	140,09	0,11
Valor Medio		-152,09	-0,12	128,39	0,10
Desviación (σ)		15,19	0,01	10,35	0,01
Coficiente V.		9,99%	9,55%	8,06%	8,51%

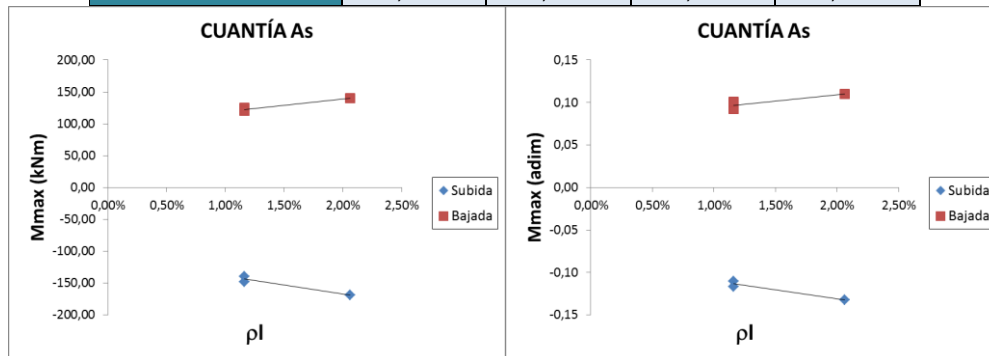


Figura VIII.56. Valor de M_{max} con respecto a la cuantía de la armadura longitudinal

Tabla VIII.38. SERIE 4: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=7.50$, $v=0.10$, s_t =variable, ρ_i = variable, **r/h = variable**, cíclica

SERIE 4	s_t (m)	ρ_i	r/h	SUBIDA		BAJADA	
				Mmax (kNm)	Mmax (adim)	Mmax (kNm)	Mmax (adim)
BS11-17	0,30	1,16%	0,09	-151,35	-0,12	133,21	0,11
BS11-18	0,10	1,16%	0,09	-146,54	-0,12	133,05	0,11
BS13-19	0,30	2,06%	0,10	-165,84	-0,13	150,33	0,12
AS11-1	0,30	1,16%	0,15	-148,27	-0,11	124,62	0,09
AS11-22	0,30	1,16%	0,15	-139,18	-0,12	120,45	0,10
AS13-16	0,30	2,06%	0,16	-168,83	-0,13	140,09	0,11
Valor Min				-139,18	-0,11	120,45	0,09
Valor Max				-168,83	-0,13	150,33	0,12
Valor Medio				-153,33	-0,12	133,62	0,11
Desviación (σ)				11,60	0,01	10,73	0,01
Coeficiente V.				7,56%	7,38%	8,03%	8,71%

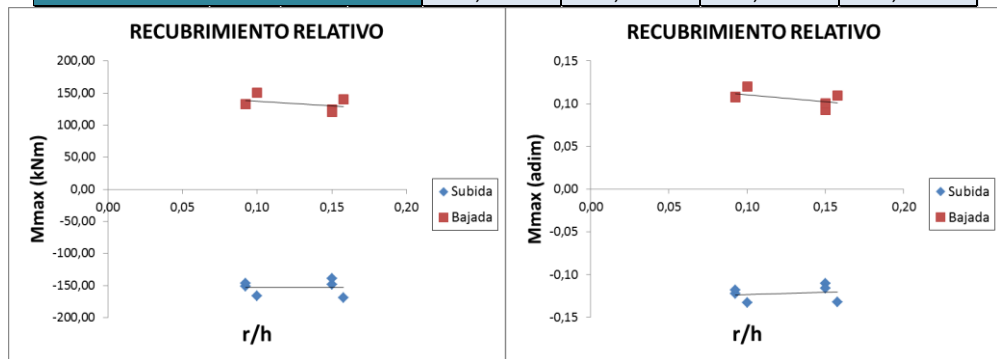


Figura VIII.57. Valor de M_{max} con respecto al recubrimiento relativo

Tabla VIII.39. SERIE 5: Tipo I, $V_f=2\%$, $\lambda_v=5.77$, $v=0.20$, $s_t=0.30$, $\rho_i=1.16\%$, $r/h=0.15$, **Tipo de carga= variable**

SERIE 5	Tipo de carga	SUBIDA		BAJADA	
		Mmax (kNm)	Mmax (adim)	Mmax (kNm)	Mmax (adim)
AS11-1	Cíclica	-148,27	-0,11	124,62	0,09
AS11-22	Cíclica	-139,18	-0,12	120,45	0,10
AS11-25	Monotónica	—	—	134,63	0,11
Valor Min		-139,18	-0,11	120,45	0,09
Valor Max		-148,27	-0,12	134,63	0,11
Valor Medio		-143,72	-0,11	126,56	0,10
Desviación (σ)		6,43	0,00	7,29	0,01
Coeficiente V.		4,47%	3,84%	5,76%	8,65%

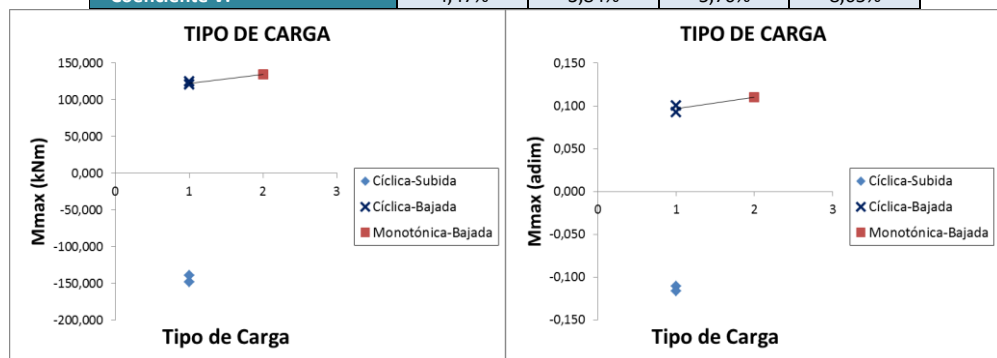


Figura VIII.58. Valor de M_{max} con respecto al tipo de carga

A la vista de las tendencias representadas se observa una influencia muy similar a la comentada para el cortante máximo, salvo en el caso de la esbeltez, siendo el valor del

momento adimensionalizado independiente de este parámetro. Respecto al nivel de axil se observa una clara influencia, aumentando el máximo momento flector mientras el agotamiento se produce por tracción y disminuyendo cuando el fallo se produce por compresión. También se aprecia un ligero aumento del máximo momento flector con la cuantía de la armadura longitudinal, no apreciándose dependencia del resto de los parámetros.

VIII.4. Modos de fallo

En las observaciones directas realizadas en la rotura de todos los soportes ensayados no se ha observado ninguna rotura por cortante; todas se efectuaron por flexocompresión, como se recoge en el Capítulo VII.

En general, en los soportes de hormigón armado sometidos a esfuerzos combinados de flexión y carga axil los modos de colapso esperables son dos: el agotamiento de la sección crítica o la inestabilidad del elemento.

Sabiendo que la capacidad última del elemento sometido a este tipo de esfuerzos depende, entre otras, de las características geométricas de la sección transversal, de las características mecánicas del material con el que se fabrica el soporte y de la esbeltez geométrica del mismo. El tipo de fallo que se produzca vendrá condicionado por la interacción de los parámetros que definen estas características, la capacidad resistente y deformacional de los materiales (sus ecuaciones constitutivas σ - ε), la cuantía de las armaduras y su disposición, la relación canto-luz, etc. En esta tesis doctoral, dentro de la campaña experimental desarrollada, se han considerado como variables fundamentales la mayoría de estos parámetros.

En un elemento de hormigón armado los modos de fallo están directamente relacionados con el desarrollo de la ductilidad. Por tanto, previamente a la realización de un análisis de la capacidad de deformación del mismo, será necesario identificar los modos de colapso del soporte.

El modo de fallo por agotamiento se produce si, al actuar los esfuerzos combinados de flexión y axil, en el elemento de hormigón armado se alcanza un nivel de deformación de agotamiento de alguno o de ambos materiales que componen el soporte, llegando a la capacidad de carga máxima, a la vez en el elemento que en la sección crítica.

Si la situación que lleva al colapso se produce porque el soporte pierde el estado de equilibrio, sin que se alcancen las deformaciones de agotamiento de ninguno de los materiales que lo componen (acero y hormigón), el modo de fallo es por inestabilidad del elemento.

En el caso del fallo por agotamiento de la sección crítica, como el fallo viene en función de la deformación de los materiales que lo componen, si se produce por el acero se identifica como agotamiento por tracción, y si es por el hormigón como agotamiento por compresión.

Para identificar el modo de fallo se aplicará el método propuesto por Barrera (2012) [15]. Para ello se analizará, por una parte, el diagrama momento-*drift* nominal de la sección crítica del soporte para identificar el tipo de fallo (agotamiento o inestabilidad) y, por otra, se analizarán las deformaciones de los materiales para las situaciones de carga lateral máxima y de momento total máximo en la sección crítica, determinando, en su caso, si la situación de agotamiento es por tracción o por compresión, o si es de inestabilidad, en el dominio elástico o si existe un predominio de deformación de alguno de los materiales.

VIII.4.1. Análisis de los diagramas de respuesta M-Drift de la sección crítica

Como se ha comentado anteriormente, con este análisis se puede identificar si el tipo de fallo es por agotamiento de la sección crítica o por inestabilidad del elemento.

Según el esquema estructural con el que se materializa el ensayo, y según las cargas actuantes, en la sección crítica se desarrolla un esfuerzo flector de primer orden ($M_{1^{\circ}orden}$) y uno de segundo orden, según Figura VIII.5. El flector de primer orden corresponde con el esfuerzo generado por la actuación de la carga lateral cíclica (VIII.2), mientras que el flector de segundo orden aparece cuando actúa una carga axial de compresión en la situación deformada del soporte debida al esfuerzo de primer orden. La suma de ambos fletores da lugar a un momento flector total (M_{Total}), (VIII.3)

$$(VIII.2) \quad M_{1^{\circ}orden} = \frac{V \cdot L_s}{2}$$

$$(VIII.3) \quad M_{Total} = M_{1^{\circ}orden} + N \cdot \Delta$$

Para cada elemento ensayado se obtienen el valor máximo del momento total, M_{Total} (VIII.3), y del momento de primer orden, $M_{1^{\circ}orden}$ (VIII.2), en función del *drift*. En caso de que, para el mismo valor de la deriva, el valor máximo del momento total coincida con el del momento de primer orden, entonces el fallo es por agotamiento de la sección crítica. Ahora bien, si una vez en la sección crítica se alcanza el máximo del momento flector de primer orden y el momento total aumenta para valores superiores de deriva, significa que el elemento ha alcanzado una situación de inestabilidad sin que en la sección crítica se haya alcanzado el agotamiento (valor máximo del momento total). Se produce una situación de inestabilidad, cuando los efectos de segundo orden ($N \cdot \Delta$) incrementan el momento total hasta que la sección alcanza el agotamiento en la sección crítica.

Con respecto al *drift* nominal o deriva (θ), se obtiene como la relación entre el desplazamiento en el *stub* (Δ), corregido con el giro del mismo, y la distancia entre éste y el extremo del soporte (L_s) (VIII.4).

$$(VIII.4) \quad \theta(\%) = \frac{\Delta}{L_s} \cdot 100$$

En las Figuras VIII.59 y VIII.60 se muestran un par de ejemplos de los diagramas de respuesta M-Drift (θ) de la sección crítica en los que se observa un fallo por agotamiento de la sección crítica y uno por inestabilidad. El conjunto de los diagramas de los ensayos de la campaña experimental se puede consultar en el Anejo D.

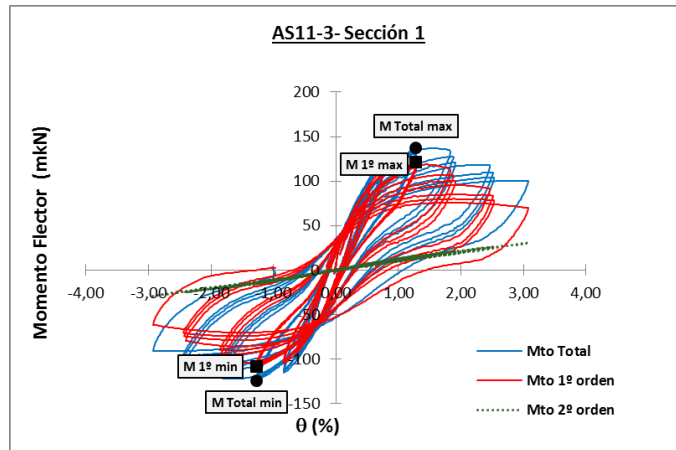


Figura VIII.59. Diagrama M-Drift del soporte AS11-3. Fallo por agotamiento de la sección crítica

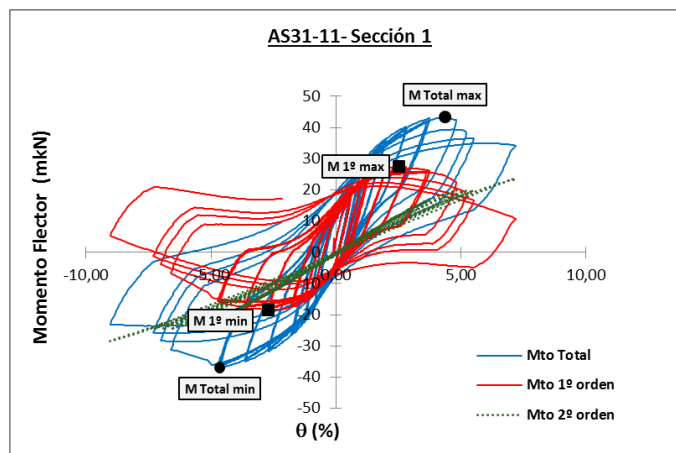


Figura VIII.60. Diagrama M-Drift del soporte AS31-11. Fallo por inestabilidad del elemento

VIII.4.2. Análisis de las deformaciones últimas de los materiales en la zona crítica

Para poder identificar el tipo de fallo se obtendrán las deformaciones de los distintos materiales cuando el esfuerzo actuante es el momento de primer orden máximo, que se corresponde con la carga lateral máxima. Además, se realizará el mismo estudio para el momento total máximo.

El análisis se realiza mediante comparación de las deformaciones obtenidas en los distintos materiales con las deformaciones unitarias últimas nominales correspondientes al acero y al hormigón. Los datos de las deformaciones de plastificación y últimas de ambos materiales han sido obtenidos mediante los correspondientes ensayos de acompañamiento normalizados efectuados; los valores se encuentran dentro del Capítulo IV de esta tesis doctoral.

Las deformaciones unitarias en el acero experimentales se obtienen mediante la lectura de la medida directa de las bandas extensométricas dispuestas en la sección de análisis para el valor del momento máximo o total o de primer orden, según corresponda.

Como no se dispone de esos datos para la fibra más comprimida correspondiente al hormigón, será necesario realizar un cálculo indirecto para obtener la deformación unitaria experimental del mismo. Admitiendo la hipótesis de Navier-Bernoulli de la ley plana de deformaciones, a partir de las medidas de deformación a la altura de la fibra correspondiente a la armadura, se puede deducir, la deformación en la fibra más comprimida del hormigón. Obviamente,

mediante este cálculo no se capta el posible deterioro del hormigón o el pandeo de la armadura longitudinal.

Con este criterio, una vez obtenidos los diagramas de deformación para el momento flector máximo, se puede observar el modo de fallo. Representando las deformaciones de los materiales frente a las deformaciones unitarias últimas de los mismos, se puede determinar si el fallo es por agotamiento del material y por cuál de ellos se ha producido el colapso. Si lo que se representa son esas deformaciones para los momentos máximos totales comparándolos con los de primer orden, se puede observar también la inestabilidad del elemento.

En el caso de que el colapso sea por un fallo de inestabilidad, analizando los valores alcanzados en los materiales, se puede concretar además si el fallo de inestabilidad se acompaña con un fallo de agotamiento a tracción o compresión o por ambos. En el caso de que no se alcance el agotamiento en ningún material, analizando el predominio de un valor sobre los otros se puede deducir si el fallo se produce por un esfuerzo de compresión, de tracción o por ambos.

Un ejemplo de los diagramas obtenidos para poder analizar el modo de fallo según este criterio se muestra a continuación en las Figuras VIII.61 y VIII.62. Los diagramas correspondientes al resto de los soportes ensayados se pueden consultar en el Anejo D.

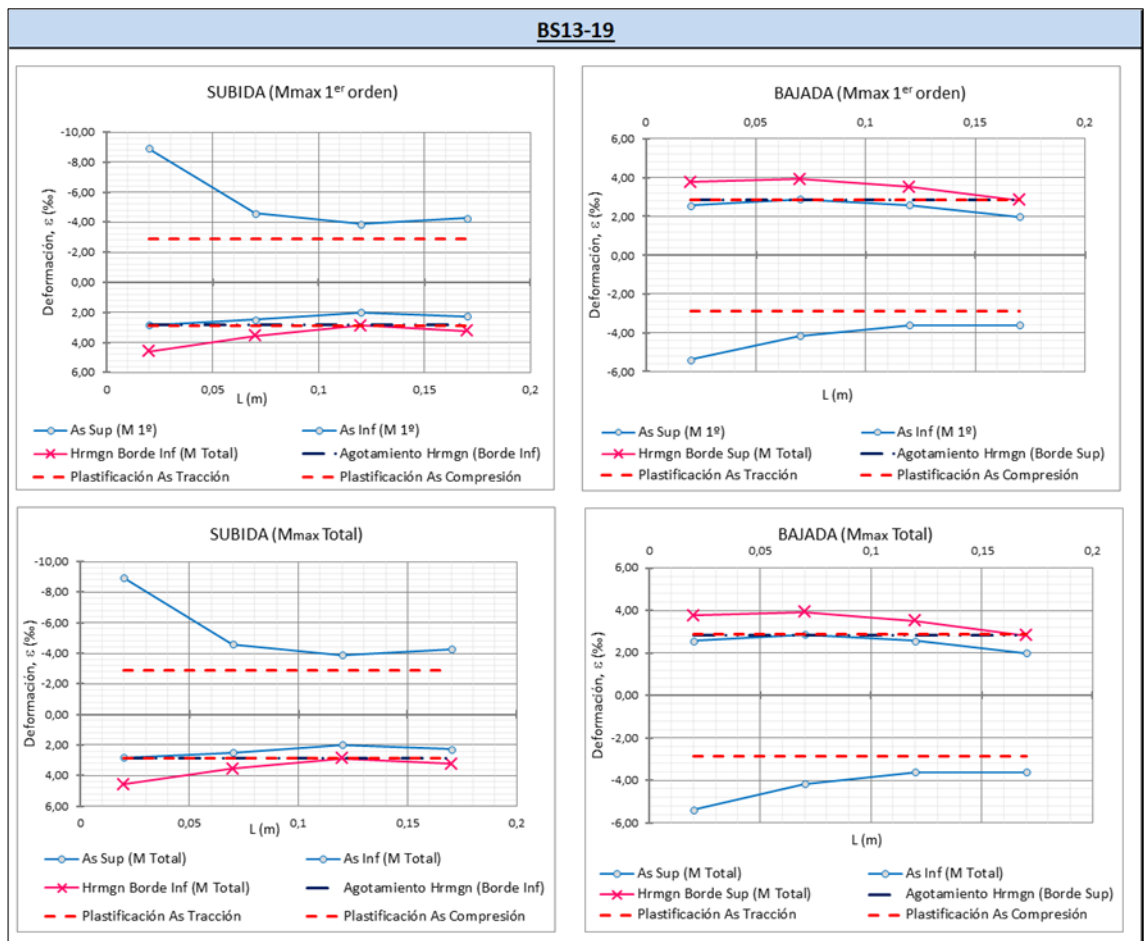


Figura VIII.61. Diagrama de deformaciones de los materiales para Momentos máximos, totales y de 1er orden, del soporte BS13-19. Fallo por agotamiento

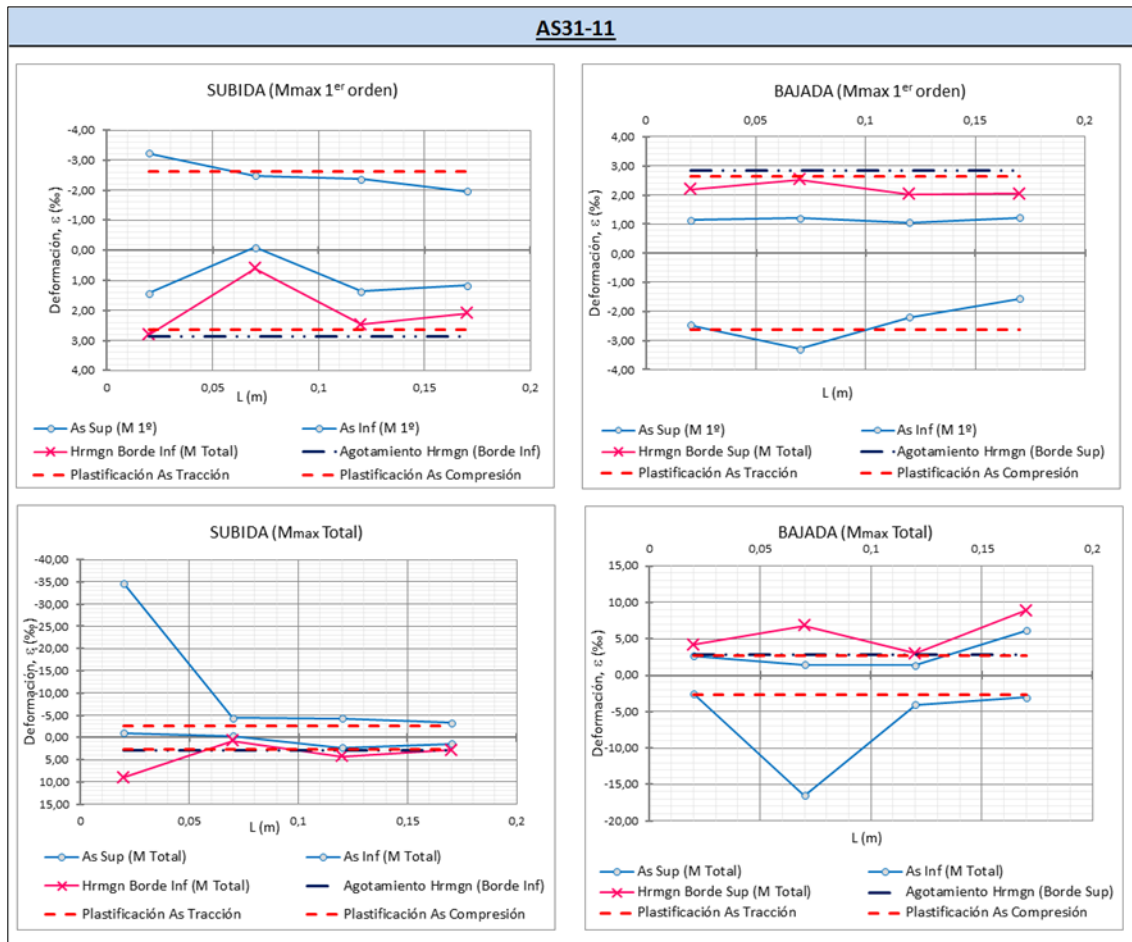


Figura VIII.62. Diagrama de deformaciones del acero del elemento AS31-11. Ejemplo de fallo por inestabilidad

Salvo el soporte AS11-25, que se ensaya bajo la actuación de una carga monotónica, el resto de elementos se ensaya bajo carga cíclica, por lo que el análisis se realiza tanto en la subida de carga como en la bajada. Para el conjunto de los elementos ensayados en la Tabla VIII.40 se resumen los tipos de fallo observados una vez efectuado el análisis del modo de fallo según los criterios comentados anteriormente. Además, también se ha tenido en cuenta la plastificación en la armadura longitudinal comprimida, con posibilidad de pandeo de la misma. Cabe comentar que en algún soporte hubo problemas de medida de las bandas extensométricas dispuestas en la sección de análisis, de ahí que se observe algún valor no válido.

Tabla VIII.40. Análisis de los modos de fallo para momento último y de 1^{er} orden

Serie	Referencia	Ciclo	Modo de fallo 1	Modo de fallo 2	Pandeo armadura comprimida	M. máximo Total (Sección crítica)					M. máximo 1 ^{er} orden (Sección crítica)				
			Momento - Drift	Deformación materiales		ϵ_s (%)	ϵ'_s (%)	ϵ_c (%)	ϵ_{ys} (%)	ϵ_{uc} (%)	ϵ_s (%)	ϵ'_s (%)	ϵ_c (%)	ϵ_{ys} (%)	ϵ_{uc} (%)
1	AS11-1	Subida (M_{tos}^{-})	A	A/T	SI	-4,31	3,09	4,99	-2,55	2,85	-4,31	3,09	4,99	-2,55	2,85
		Bajada (M_{tos}^{+})	A	A/T	SI	-13,00	2,89	6,96	-2,55	2,85	-13,00	2,89	6,96	-2,55	2,85
	AS11-22	Subida (M_{tos}^{-})	A	A/T	NO	-4,31	4,98	7,72	-3,09	2,85	-4,31	4,98	7,72	-3,09	2,85
		Bajada (M_{tos}^{+})	A	A/T	NO	-6,31	1,74	3,60	-3,09	2,85	-6,31	1,74	3,60	-3,09	2,85
	AS11-2R	Subida (M_{tos}^{-})	A	A/T	SI	-4,26	3,46	5,31	-3,09	2,85	-4,26	3,46	5,31	-3,09	2,85
		Bajada (M_{tos}^{+})	A	A/T	NO	-5,41	3,03	5,05	-3,09	2,85	-5,41	3,03	5,05	-3,09	2,85
	AS11-3	Subida (M_{tos}^{-})	A	A/T	-	-16,03	-10,47	-9,23	-2,55	2,85	-16,03	-10,47	-9,23	-2,55	2,85
		Bajada (M_{tos}^{+})	A	A/T	-	-10,82	-4,95	-3,64	-2,55	2,85	-10,82	-4,95	-3,64	-2,55	2,85
	AS11-20	Subida (M_{tos}^{-})	A	A/T	SI	-5,33	4,73	7,12	-3,09	2,85	-5,33	4,73	7,12	-3,09	2,85
		Bajada (M_{tos}^{+})	A	A/T	NO	-3,88	2,29	3,76	-3,09	2,85	-3,88	2,29	3,76	-3,09	2,85
	AS11-21	Subida (M_{tos}^{-})	A	A/C	SI	-2,83	3,39	4,82	-3,09	2,85	-2,83	3,39	4,82	-3,09	2,85
		Bajada (M_{tos}^{+})	A	A/T	SI	-6,24	5,02	7,61	-3,09	2,85	-5,01	4,42	7,61	-3,09	2,85
	AS11-4	Subida (M_{tos}^{-})	A	A/T	NO	-4,96	1,58	3,31	-2,55	3,17	-4,96	1,58	3,31	-2,55	3,17
		Bajada (M_{tos}^{+})	A	A/T	NO	-13,78	2,46	6,76	-2,55	3,17	-4,82	2,14	6,76	-2,55	3,17
	AS11-5	Subida (M_{tos}^{-})	A	A/T	NO	-7,48	2,08	4,79	-2,55	3,17	-7,48	2,08	4,79	-2,55	3,17
		Bajada (M_{tos}^{+})	A	A/T	NO	-40,41	1,83	13,79	-2,55	3,17	-5,05	1,14	13,79	-2,55	3,17
	AS11-6	Subida (M_{tos}^{-})	A	A/T	NO	-3,89	0,63	1,78	-2,55	3,17	-3,89	0,63	1,78	-2,55	3,17
		Bajada (M_{tos}^{+})	A	A/T	-	-11,86	0,03	3,07	-2,55	3,17	-5,44	-0,18	3,07	-2,55	3,17
	AS11-7	Subida (M_{tos}^{-})	A	A/T	NO	-4,68	2,05	3,83	-2,55	3,39	-4,68	2,05	3,83	-2,55	3,39
		Bajada (M_{tos}^{+})	A	A/T	NO	-12,86	2,35	6,38	-2,55	3,39	-5,13	2,10	6,38	-2,55	3,39
AS11-8	Subida (M_{tos}^{-})	A	A/T	NO	-4,18	1,29	2,84	-2,55	3,39	-4,18	1,29	2,84	-2,55	3,39	
	Bajada (M_{tos}^{+})	A	A/T	SI	-3,80	2,67	4,51	-2,55	3,39	-3,80	2,63	4,51	-2,55	3,39	
AS11-9	Subida (M_{tos}^{-})	A	A/T	NO	-3,72	2,13	3,43	-2,55	3,39	-3,72	2,13	3,43	-2,55	3,39	
	Bajada (M_{tos}^{+})	A	A/T	NO	-4,06	1,80	3,11	-2,55	3,39	-4,06	1,80	3,11	-2,55	3,39	
2	AS21-10	Subida (M_{tos}^{-})	A	A/T	NO	-4,67	1,37	2,38	-2,54	2,85	-8,93	1,35	2,38	-2,54	2,85
		Bajada (M_{tos}^{+})	A	A/T	-	-16,75	-3,33	-1,09	-2,54	2,85	-5,22	-3,36	-1,09	-2,54	2,85
	AS31-11	Subida (M_{tos}^{-})	I	A/T	-	-34,53	-0,94	8,98	-2,63	2,85	-3,23	1,43	8,98	-2,63	2,85
		Bajada (M_{tos}^{+})	I	I/T	NO	-2,59	2,65	4,20	-2,63	2,85	-2,47	1,13	4,20	-2,63	2,85
	AS21-12	Subida (M_{tos}^{-})	A	A/T	-	-4,95	-3,85	-3,62	-2,54	2,85	-4,82	-3,84	-3,62	-2,54	2,85
		Bajada (M_{tos}^{+})	A	A/T	-	-4,13	-4,70	-4,83	-2,54	2,85	-4,28	-4,78	-4,83	-2,54	2,85
	AS21-13	Subida (M_{tos}^{-})	A	A/T	NO	-3,41	0,38	1,19	-2,54	2,85	-3,41	0,38	1,19	-2,54	2,85
		Bajada (M_{tos}^{+})	A	A/T	NO	-14,97	1,13	4,58	-2,54	2,85	-14,97	1,13	4,58	-2,54	2,85
	AS21-23	Subida (M_{tos}^{-})	A	A/T	SI	-3,51	5,33	7,61	-2,54	2,85	-3,31	5,25	7,61	-2,54	2,85
		Bajada (M_{tos}^{+})	A	A/T	SI	-4,38	3,06	4,98	-2,54	2,85	-1,32	1,90	4,98	-2,54	2,85
AS21-24	Subida (M_{tos}^{-})	A	A/T	SI	5,72	6,84	10,22	-2,74	2,85	4,40	3,57	10,22	-2,74	2,85	
	Bajada (M_{tos}^{+})	A	A/C	SI	-1,10	10,81	14,02	-2,74	2,85	-1,10	10,81	14,02	-2,74	2,85	
3	AS23-14	Subida (M_{tos}^{-})	A	A/T	NO	-19,32	1,74	7,17	-2,86	2,85	-8,27	1,75	7,17	-2,86	2,85
		Bajada (M_{tos}^{+})	A	A/T	-	-3,26	-6,04	3,64	-2,86	2,85	-4,15	2,26	3,64	-2,86	2,85
	AS24-15	Subida (M_{tos}^{-})	A	A/T	NO	-5,53	1,85	3,84	-2,77	2,85	-5,53	1,85	3,84	-2,77	2,85
		Bajada (M_{tos}^{+})	A	A/T	-	-5,17	-4,35	1,78	-2,77	2,85	-3,58	1,48	1,78	-2,77	2,85
AS13-16	Subida (M_{tos}^{-})	A	A/T y A/C	NO	-1,77	0,67	1,32	-2,86	2,85	-4,29	0,09	1,32	-2,86	2,85	
	Bajada (M_{tos}^{+})	A	A/T	NO	-8,73	1,72	4,49	-2,86	2,85	-8,73	1,72	4,49	-2,86	2,85	
4	BS11-17	Subida (M_{tos}^{-})	A	A/T	-	-9,94	-190,82	-160,71	0,00	2,85	-9,94	-190,82	-160,71	0,00	2,85
		Bajada (M_{tos}^{+})	A	A/T	SI	-146,94	3,51	26,08	-2,55	2,85	-73,61	2,96	26,08	-2,55	2,85
	BS11-18	Subida (M_{tos}^{-})	A	A/T	SI	-5,38	4,82	6,35	-2,55	2,85	-5,38	4,82	6,35	-2,55	2,85
		Bajada (M_{tos}^{+})	A	A/T	SI	-5,96	3,08	4,43	-2,55	2,85	-5,59	3,07	4,43	-2,55	2,85
BS13-19	Subida (M_{tos}^{-})	A	A/T	SI	-8,92	2,82	4,58	-2,86	2,85	-8,92	2,82	4,58	-2,86	2,85	
	Bajada (M_{tos}^{+})	A	A/T	NO	-5,39	2,57	3,76	-2,86	2,85	-5,39	2,57	3,76	-2,86	2,85	
5	AS11-25	Subida (M_{tos}^{-})	A	A/T	NO	-6,62	1,67	3,87	-3,09	2,85	-6,62	1,67	3,87	-3,09	2,85

Observando los valores de la Tabla VIII.40 se aprecia que todos los soportes alcanzan la situación última de agotamiento de forma simultánea en el elemento (criterio de fallo 1) y en la sección (criterio de fallo 2) excepto el soporte AS31-11, que es el de mayor esbeltez ($\lambda_v=10.70$). En este soporte, se produce en primer el lugar el fallo a nivel del elemento por inestabilidad (criterio de fallo 1), y posteriormente, en la rama post-pico del diagrama Momento-Drift, se alcanza el agotamiento de la sección crítica (criterio de fallo 2) por agotamiento por tracción.

VIII.5. Envolventes de los diagramas del comportamiento experimental

Para poder deducir los parámetros de ductilidad con los que analizar el comportamiento a nivel sección y elemento de los distintos soportes de la campaña experimental, se necesita conocer las envolventes de los diagramas experimentales.

Las envolventes se pueden obtener a partir de los datos de los diagramas cortante-desplazamiento y momento-curvatura.

En cada ciclo de carga se realizan tres subidas y tres bajadas. Para obtener la envolventes de subida y bajada, en ambos casos se obtiene el valor promedio de la primera subida o bajada de cada ciclo.

Además de las envolventes anteriores, se puede obtener un valor medio con los datos de subida y bajada, para poder representar y conocer los valores de la envolvente media.

Por tanto, de cada soporte se tiene una envolvente de subida, otra de bajada y con ambas la envolvente media. En los apartados siguientes se agrupan por un lado las envolventes correspondientes al comportamiento cortante-desplazamiento, y por otro al de momento-curvatura.

VIII.5.1. Envolventes cortante-desplazamiento

Se representan los diagramas a partir de los valores obtenidos en la sección crítica del cortante (V) actuante y los valores correspondientes al desplazamiento (Δ). Con los valores resultantes se representan: la envolvente de subida, la de bajada y la envolvente media.

Como ejemplo se muestra en la Figura VIII.63 las envolventes experimentales obtenidas para la Serie 2, en concreto para los soportes con los que se estudia el parámetro de la esbeltez del elemento. El resto de envolventes se encuentran en el Anejo E parametrizadas por series.

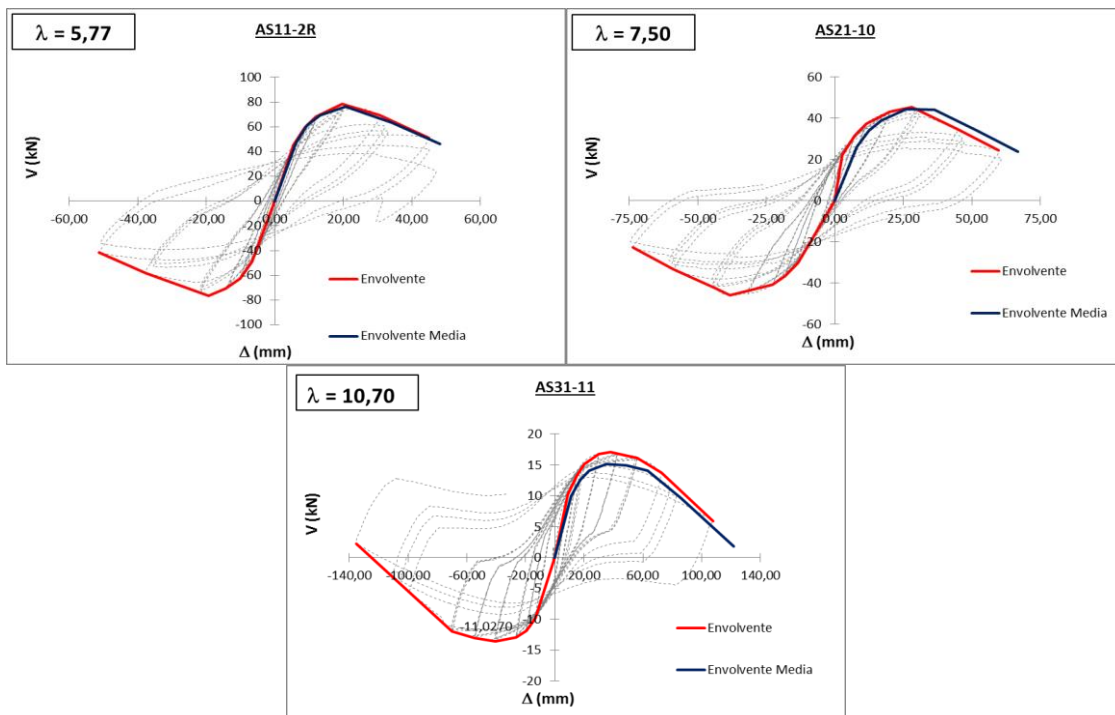


Figura VIII.63. Ejemplo de envolventes de las gráficas cortante-desplazamiento para los soportes de la Serie 2 (λ_v)

Para analizar la influencia paramétrica en los soportes ensayados se pueden representar dos tipos de gráficas: por una parte todas las envolventes correspondientes a la variable estudiada representadas respecto al cortante y desplazamiento correspondiente, y por otra la relación (V/V_{max}) frente a la deriva ($\theta = \Delta/L$). Siguiendo con el ejemplo anterior, ambas representaciones se muestran en la Figura VIII.64.

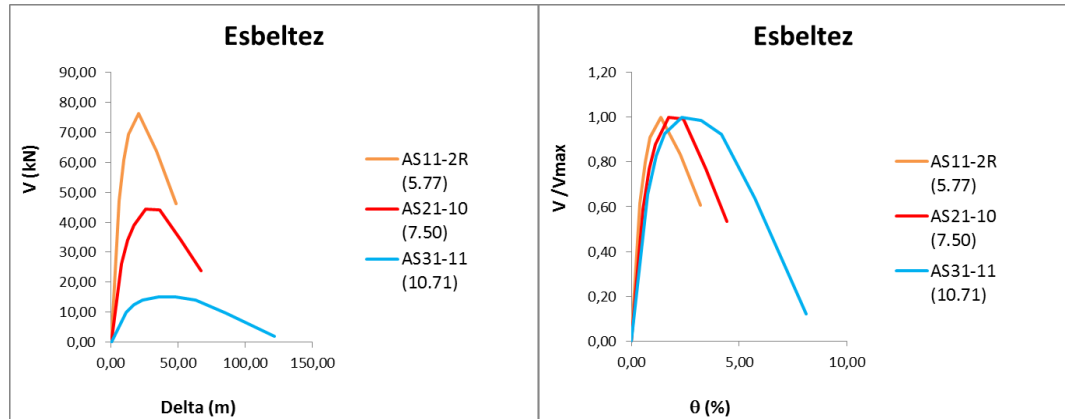


Figura VIII.64. Diagramas cortante-desplazamiento. Envolventes medias. Serie 2 (λ_v)

Como se puede observar, a una mayor esbeltez del soporte, éste presenta una menor capacidad resistente a cortante con una mayor deformación.

En la Figura VIII.65 se observa la influencia sobre el comportamiento del elemento cuando aumenta el nivel de axil aplicado, mientras que en la Figura VIII.66 no se aprecia una gran influencia del tipo de carga aplicado, lo que también sucede con el resto de los parámetros estudiados en este trabajo.

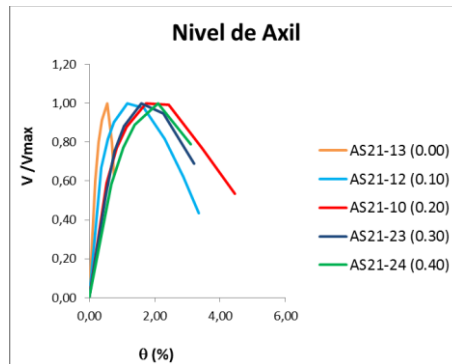


Figura VIII.65. Diagrama cortante-desplazamiento. Envolventes medias. Serie 2 (Nivel de Axil)

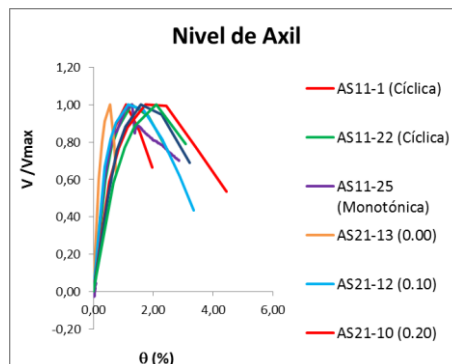


Figura VIII.66. Diagrama cortante-desplazamiento. Envolventes medias. Serie 5 (Tipo de Carga)

En un análisis posterior los resultados obtenidos experimentalmente se comparan con diferentes modelos que permiten obtener un diagrama idealizado. En general, estos modelos se obtienen a partir del valor correspondiente para la lectura del valor máximo de carga y del valor último. Para todos los elementos ensayados, en la Tabla VIII.41 se muestran los valores de cortante y desplazamiento máximo y últimos obtenidos de los diagramas de las envolventes medias comentados previamente.

Tabla VIII.41. Resultados obtenidos para las envolventes de los diagramas. V-Delta

Serie	Referencia	Ciclo	Vmax (kN)	Δ max (m)	Vu (kN)	Δ u (m)
1	AS11-1	Valor Medio	81,05	29,58	64,84	24,90
	AS11-22	Valor Medio	73,75	38,14	59,00	34,11
	AS11-2R	Valor Medio	76,37	48,24	61,10	35,20
	AS11-3	Valor Medio	76,42	45,10	61,13	33,45
	AS11-20	Valor Medio	77,22	28,94	61,77	28,94
	AS11-21	Valor Medio	75,73	43,91	60,59	34,76
	AS11-4	Valor Medio	78,99	64,94	63,20	44,05
	AS11-5	Valor Medio	74,71	53,43	59,77	31,49
	AS11-6	Valor Medio	78,62	51,30	62,90	42,98
	AS11-7	Valor Medio	79,43	47,92	63,55	33,34
	AS11-8	Valor Medio	85,15	40,22	68,12	28,30
AS11-9	Valor Medio	81,24	61,29	64,99	42,12	
2	AS31-11	Valor Medio	44,35	66,80	35,48	47,82
	AS31-11	Valor Medio	15,18	121,68	12,14	73,87
	AS21-12	Valor Medio	33,62	50,25	26,89	34,82
	AS21-13	Valor Medio	15,56	11,40	12,45	9,93
	AS21-23	Valor Medio	43,88	48,09	35,10	41,31
	AS21-24	Valor Medio	48,03	46,39	38,43	38,80
3	AS23-14	Valor Medio	55,03	85,02	44,03	55,06
	AS24-15	Valor Medio	57,51	88,07	46,01	62,70
	AS13-16	Valor Medio	88,60	52,28	70,88	38,18
4	BS11-17	Valor Medio	81,85	60,09	65,48	36,42
	BS11-18	Valor Medio	81,40	46,27	65,12	34,02
	BS13-19	Valor Medio	92,85	40,55	74,28	35,08
5	AS11-25	Subida (M_{tos})	81,05	67,69	64,84	31,88

VIII.5.2. Envolventes momento-curvatura

Se obtienen con la misma sistemática seguida en el apartado anterior, pero con los valores calculados para los momentos y las curvaturas del soporte en la sección crítica.

En la Figura VIII.67 se representa las envolventes correspondientes a la variación de la cuantía de la armadura longitudinal, como ejemplo de las curvas obtenidas. El resto de las envolventes se encuentran en el Anejo E.

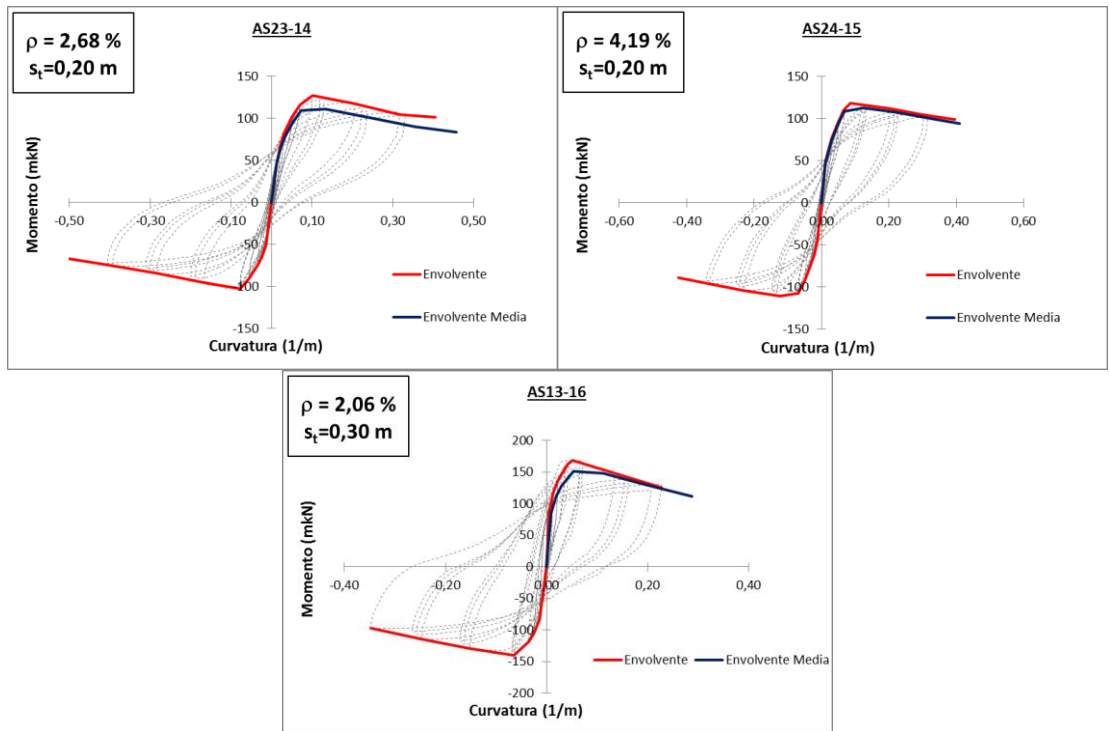


Figura VIII.67. Diagrama momento-curvatura. Envoltentes medias. Serie 3 (ρ)

Para una mejor interpretación de las curvas en la sección crítica de cada soporte, se representan las envoltentes medias parametrizadas por series, adimensionalizado tanto el momento flector como la curvatura obtenida. El momento flector se divide por el factor de adimensionalización (F_m) (VIII.5) y la curvatura multiplicándola por el canto de cada soporte (h).

$$(VIII.5) \quad F_m = b \cdot h^2 \cdot f_c$$

donde:

b es el ancho de la sección

h es el canto útil de la sección

f_c es la resistencia a compresión del hormigón

De la representación parametrizada del conjunto de las envoltentes medias, se muestran dos ejemplos en la Figura VIII.68. Sólo se observa una influencia clara en el caso del nivel de axil aplicado (Figura VIII.68, izquierda), mientras que para el resto de los parámetros estudiados o es o poco clara o es muy ligera su tendencia, como se muestra en la Figura VIII.68 (derecha) para el caso de las envoltentes correspondientes al tipo de carga aplicada.

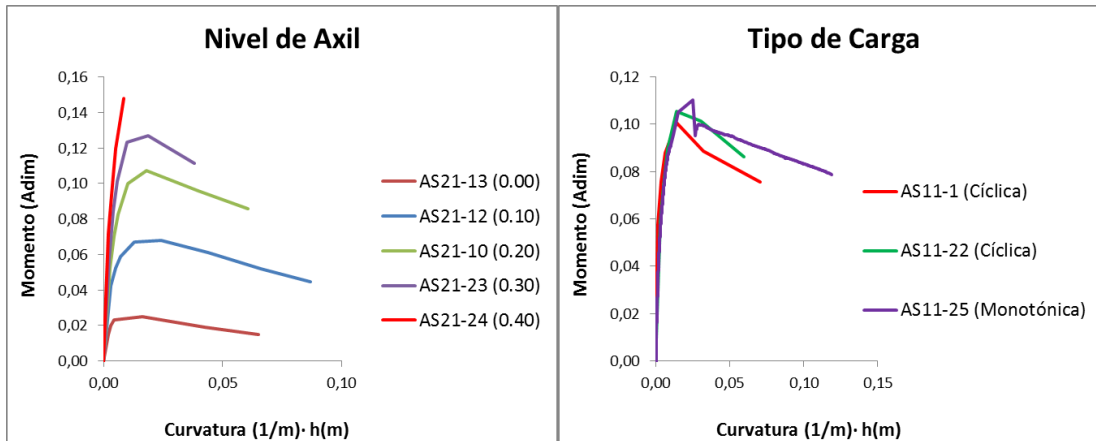


Figura VIII.68. Envoltentes medias adimensionalizadas. Nivel de axil y tipo de carga aplicada

Como era esperable, si se observan las curvas obtenidas, la curvatura aumenta a medida que disminuye el nivel de axil aplicado. Con respecto al resto de variables no se observa una tendencia clara.

Como se ha comentado previamente cuando se analizaron las envoltentes cortante-desplazamiento, se van a obtener para todos los soportes ensayados los valores máximos y últimos de los momentos flectores y de las curvaturas (Tabla VIII.42). Estos datos serán útiles en un análisis posterior, tanto de los diagramas idealizados como de los valores obtenidos mediante métodos simplificados.

Tabla VIII.42. Resultados obtenidos para las envoltentes de los diagramas. M-Curvatura

Serie	Referencia	Ciclo	Mmax (kNm)	θ_{max} (1/m)	Mu (kNm)	θ_u (1/m)
1	AS11-1	Valor Medio	135,33	0,27	108,27	0,21
	AS11-22	Valor Medio	125,98	0,23	100,78	0,22
	AS11-2R	Valor Medio	128,42	0,29	102,74	0,23
	AS11-3	Valor Medio	128,93	0,34	103,14	0,28
	AS11-20	Valor Medio	132,78	0,14	106,22	0,14
	AS11-21	Valor Medio	131,01	0,26	104,81	0,25
	AS11-4	Valor Medio	141,58	0,34	113,26	0,26
	AS11-5	Valor Medio	130,71	0,40	104,57	0,24
	AS11-6	Valor Medio	139,73	0,22	111,79	0,22
	AS11-7	Valor Medio	140,53	0,31	112,42	0,21
	AS11-8	Valor Medio	141,46	0,31	113,17	0,18
AS11-9	Valor Medio	147,87	0,29	118,30	0,20	
2	AS31-11	Valor Medio	95,42	0,30	76,34	0,30
	AS31-11	Valor Medio	39,87	0,38	31,89	0,30
	AS21-12	Valor Medio	58,09	0,44	46,47	0,30
	AS21-13	Valor Medio	19,92	0,33	15,94	0,19
	AS21-23	Valor Medio	92,79	0,19	74,23	0,19
	AS21-24	Valor Medio	118,36	0,04	94,69	0,05
3	AS23-14	Valor Medio	111,39	0,46	89,11	0,35
	AS24-15	Valor Medio	113,00	0,41	90,40	0,41
	AS13-16	Valor Medio	151,66	0,29	121,33	0,23
4	BS11-17	Valor Medio	138,36	0,38	110,69	0,25
	BS11-18	Valor Medio	138,91	0,33	111,12	0,25
	BS13-19	Valor Medio	154,32	0,33	123,45	0,31
5	AS11-25	Subida (M_{tos})	134,63	0,50	107,70	0,30

VIII.6. Idealización del diagrama carga-flecha y momento-curvatura

Para poder llevar a cabo la idealización del comportamiento de deformación mediante la envolvente de un soporte de hormigón armado sometido a flexocompresión cíclica, tanto a nivel de sección como de elemento, hay que tener presente la no-linealidad del mismo. Ahora bien, aunque el comportamiento no es elástico-plástico perfecto, se asumirá como tal para poder realizar un análisis de respuesta estructural.

Existen en la bibliografía modelos que permiten predecir la capacidad de deformación en elementos de hormigón armado sometidos a esfuerzos de flexocompresión. Estos diagramas suelen ser bilineales y, en general, se definen a partir de dos puntos clave: el punto de plastificación efectiva y el punto de fallo o rotura.

Siguiendo lo propuesto por Barrera (2012) [15], en esta tesis doctoral se van a desarrollar tres métodos distintos con los que se puede obtener el diagrama de respuesta idealizado, todos ellos utilizados en diversas investigaciones precedentes; son los siguientes:

- Método Aproximado (MA)
- Método basado en el Balance de Energía (BE)
- Método recogido en el Eurocódigo 8 (EC8)

En los tres métodos se define un diagrama idealizado bilineal a partir de los dos puntos clave: plastificación efectiva y rotura. Para todos ellos el punto de rotura viene definido por un porcentaje de caída de la resistencia. En los tres casos, en este trabajo, se adoptará el mismo porcentaje de caída.

En el desarrollo del programa experimental recogido en este trabajo, se han realizado los ensayos bajo control de desplazamiento, siguiendo las recomendaciones de la guía ACI 374.2R-13 [2]. En casi todos los elementos ensayados se ha conseguido alcanzar y superar el 20 % de caída de la carga actuante en la rama post-pico. Por tanto, se adoptará este punto como el límite del desplazamiento de la rama plástica del diagrama bilineal idealizado propuesto. En el caso de la respuesta obtenida en términos de flexión no ha sido posible conseguir en todos los diagramas momento-curvatura idealizados el 20 % de caída resistente (Tabla VIII.30). Lo que se consigue, de una forma general, en la respuesta carga-desplazamiento, salvo para el soporte sometido al máximo nivel de axil (AS21-24).

VIII.6.1. Método aproximado

En este apartado se va a utilizar el diagrama idealizado definido por Paultre et al. (2001) [96], Pam y Ho (2009) [89] y Caballero et al. (2015)[26] (2012) [27].

Es un diagrama bilineal, formado por una rama elástica que pasa por el origen y por el punto del 75 % del valor resistente máximo obtenido, ya sea momento máximo (M_{max}) o carga máxima (V_{max}), y finaliza en su valor máximo. La segunda rama que conforma el diagrama es la rama plástica, que viene definida por la recta que comienza en el punto final de la rama elástica y finaliza en el punto definido por un desplazamiento (curvatura) obtenido para una pérdida resistente del 20 % y por la carga teórica obtenida tras realizar la igualdad de áreas de las curvas idealizada y experimental.

En la Figura VIII.69 se representa el diagrama idealizado recogido por este método.

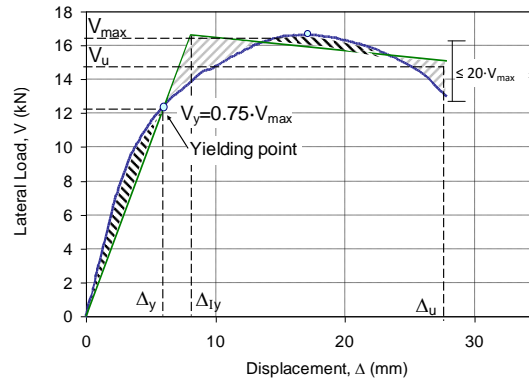


Figura VIII.69. Diagrama idealizado de comportamiento. Método aproximado (Barrera (2012) [16])

VIII.6.2. Método basado en el balance de energía

Este método se basa en el balance de energías, se ha utilizado bastante en China y lo recoge en su investigación Lam et al. (2003) [72] y Barrera et al. (2012) [16]

La curva idealizada está formada por dos rectas: la rama elástica que pasa por el origen y la rama plástica que corresponde a una recta horizontal que pasa por el punto de carga máxima (V_{max}) o de momento máximo (M_{max}).

Para obtener el punto de plastificación del diagrama, el punto común a ambas rectas (elástica y plástica), se resuelve la ecuación obtenida de igualar las áreas encerradas, desde la deformación o desplazamiento nulo hasta la deformación o desplazamiento correspondiente al V_{max} o M_{max} , respectivamente, del diagrama idealizado y la curva envolvente experimental, dando como resultado la pendiente de la rama elástica. Una vez se conoce este punto ya se tiene completamente definido el diagrama, como se puede observar en la Figura VIII.70.

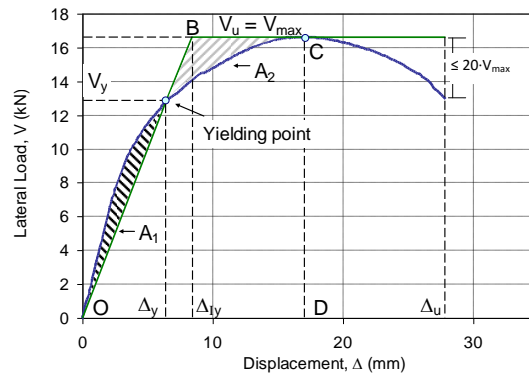


Figura VIII.70. Diagrama idealizado de comportamiento. Método del balance de energía (Barrera (2012) [16])

VIII.6.3. Método recogido en el Eurocódigo 8

El Eurocódigo 8 en la Parte 2 dedicada a Puentes [40], dentro del apartado E.3.2 del Anexo E, recoge una propuesta para definir el diagrama idealizado momento-curvatura. En concreto dice que “ ϕ_y debería evaluarse idealizando el diagrama $M-\phi$ real mediante un diagrama bilineal de igual área a partir del punto en el que se sobrepasa la primera plastificación de la armadura, tal como se muestra en la figura E.3.” (véase Figura VIII.71)

VIII.7. Aplicación de los métodos de idealización a los resultados experimentales

En este apartado se recogen los resultados obtenidos al aplicar los distintos métodos de idealización, tanto para el diagrama de respuesta a nivel elemento, $V-\Delta$, como a nivel sección, $M-\phi$. Al realizar la aplicación de la carga bajo una actuación cíclica, el cálculo se efectúa con las envolventes de subida y de bajada, así como con su valor medio.

Sabiendo que la sección crítica de los distintos elementos ensayados se produce, en general, a la altura del *stub*, será en esta sección donde se realice la comparativa entre las curvas de comportamiento experimental y las idealizadas mediante los distintos métodos explicados en el apartado anterior, salvo en la probeta AS21-13, en la que la sección de rotura no coincide con la sección del *stub* (en este caso la comparativa se realiza a la altura de su sección crítica).

Para obtener los resultados correspondientes a los tres métodos derivados de plantear el modelo propuesto por el Eurocódigo 8, dado que dependen directamente de las deformaciones de tracción del acero, de compresión del acero y del hormigón, se parte de los valores obtenidos en el control realizado a dichos materiales durante el desarrollo del programa experimental. En la Tabla VIII.43 se resumen los valores de partida.

Tabla VIII.43. Valores experimentales de las deformaciones utilizadas de los materiales

Deformación	Acero Lote 2 ($\phi 8$)	Acero Lote 2 ($\phi 10$)	Acero Lote 2 ($\phi 12$)	Acero Lote 2 ($\phi 16$)	Acero Lote 2 ($\phi 20$)	Acero Lote 3 ($\phi 10$)	Acero Lote 3 ($\phi 12$)
ε_{sy} (‰)	-2,63	-2,54	-2,55	-2,86	-2,77	-2,74	-3,09

Deformación	Hormigón Tipo 1 (2% Vol Fibras)	Hormigón Tipo 1 (1% Vol Fibras)	Hormigón Tipo 2 (2% Vol Fibras)
ε_{c1} (‰)	2,85	3,39	3,17

Con estos datos se han construido las distintas curvas idealizadas para los distintos soportes. En las gráficas siguientes se puede observar como ejemplo las curvas obtenidas, en concreto las que corresponden al elemento BS11-17 (Figuras VIII.73, VIII.74 y VIII.75). El resto de las gráficas y datos obtenidos se pueden consultar en el Anejo E.

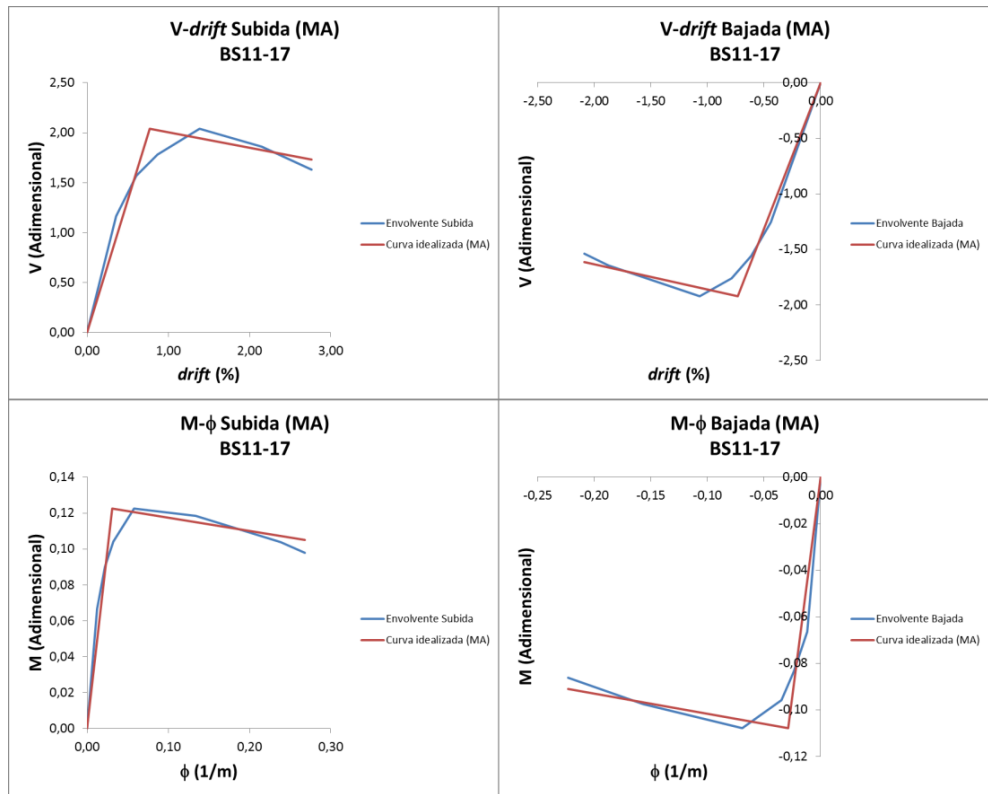


Figura VIII.73. Diagrama idealizado según el método aproximado. Elemento BS11-17

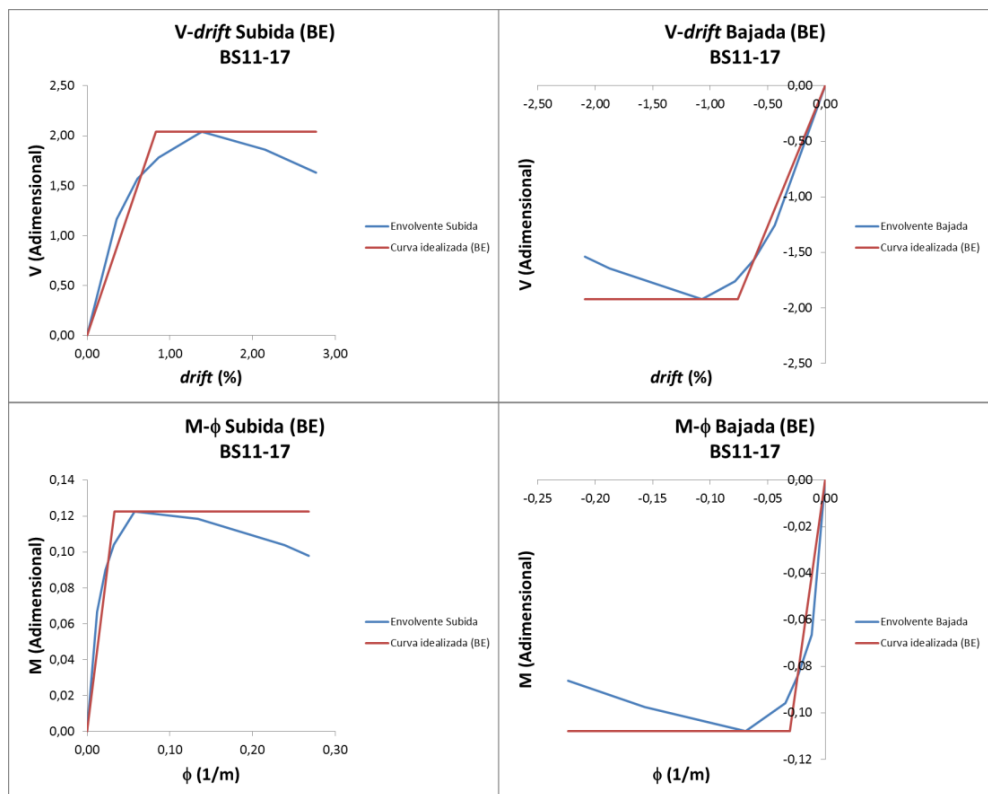


Figura VIII.74. Diagrama idealizado según el método del balance de energía. Elemento BS11-17

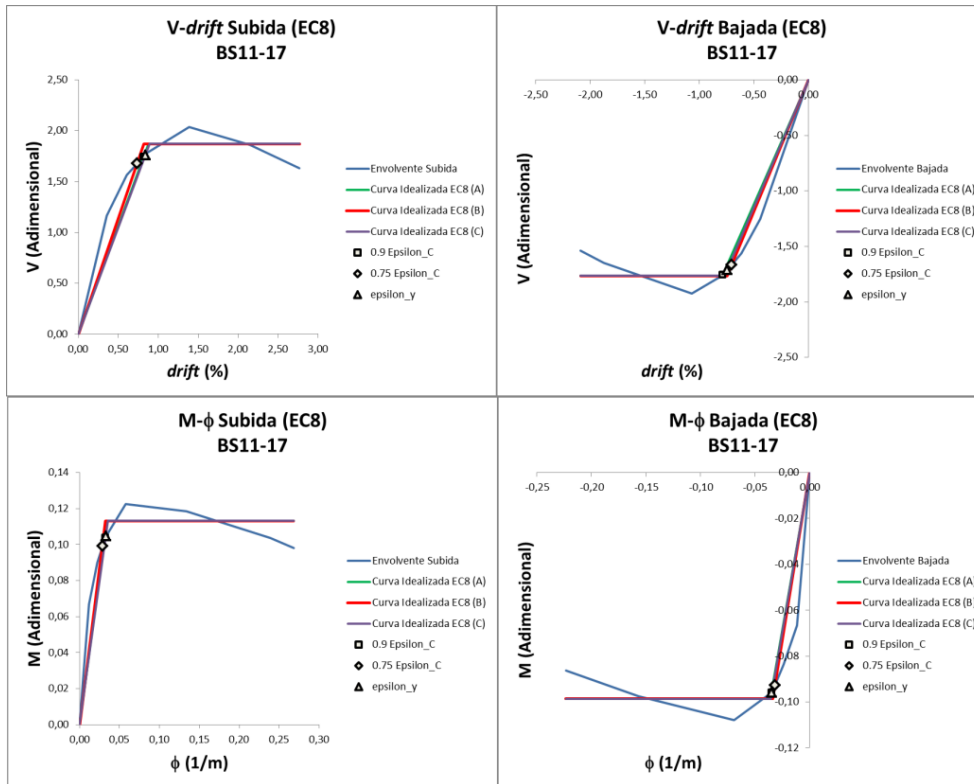


Figura VIII.75. Diagrama idealizado según el método del Eurocódigo 8. Elemento BS11-17

De la aplicación de los diversos métodos se extraen resultados correspondientes a la situación en que se alcanza el punto de plastificación idealizado. En concreto, el valor de las deformaciones experimentales de los materiales que componen la sección, así como los valores correspondientes a la carga (V_y) y al momento flector (M_y). El valor medio de estos resultados se ha recogido en las Tablas VIII.44 y VIII.45, respectivamente.

Tabla VIII.44. Valores medios obtenidos para los diagramas V-Δ correspondientes al punto de plastificación

Serie	Referencia	Método Aproximado (MA)					Método Balance de Energía (BE)					Método EC-8				
		ϵ_c (%)	ϵ_c (%) / ϵ_{c1} (%)	ϵ_s (%)	ϵ_s (%) / ϵ_{sy} (%)	V_f / V_{max}	ϵ_c (%)	ϵ_c (%) / ϵ_{c1} (%)	ϵ_s (%)	ϵ_s (%) / ϵ_{sy} (%)	V_f / V_{max}	ϵ_c (%)	ϵ_c (%) / ϵ_{c1} (%)	ϵ_s (%)	ϵ_s (%) / ϵ_{sy} (%)	V_f / V_{max}
1	AS11-1	1.04	0.37	-1.52	0.59	0.75	1.20	0.42	-1.80	0.71	0.79	1.56	0.55	-2.55	1.00	0.88
	AS11-22	1.19	0.42	-1.68	0.54	0.75	1.43	0.50	-2.02	0.65	0.80	2.08	0.73	-3.09	1.00	0.88
	AS11-2R	1.17	0.41	-1.47	0.48	0.75	1.33	0.47	-1.76	0.57	0.80	2.14	0.75	-2.95	0.95	0.91
	AS11-3	1.05	0.37	-1.50	0.59	0.75	1.16	0.41	-1.73	0.68	0.79	1.69	0.59	-2.55	1.00	0.92
	AS11-20	1.27	0.45	-1.45	0.47	0.75	1.41	0.50	-1.67	0.54	0.79	2.14	0.75	-2.68	0.87	0.89
	AS11-21	1.58	0.55	-1.65	0.53	0.75	1.78	0.63	-1.86	0.60	0.80	2.14	0.75	-2.14	0.69	0.85
	AS11-4	1.04	0.33	-1.39	0.54	0.75	1.17	0.37	-1.65	0.65	0.79	1.61	0.51	-2.55	1.00	0.90
	AS11-5	0.99	0.31	-1.31	0.51	0.75	1.20	0.38	-1.73	0.68	0.81	1.57	0.49	-2.55	1.00	0.88
	AS11-6	0.36	0.11	-0.91	0.35	0.75	0.34	0.11	-1.01	0.40	0.78	0.78	0.24	-2.55	1.00	0.92
	AS11-7	0.97	0.29	-1.26	0.49	0.75	1.09	0.32	-1.50	0.59	0.79	1.61	0.47	-2.55	1.00	0.90
	AS11-8	0.99	0.29	-1.25	0.49	0.75	1.14	0.34	-1.52	0.60	0.80	1.61	0.47	-2.55	1.00	0.91
2	AS11-9	0.91	0.27	-1.15	0.45	0.75	1.06	0.31	-1.43	0.56	0.81	1.63	0.48	-2.55	1.00	0.91
	AS21-10	1.07	0.38	-1.18	0.47	0.75	1.42	0.50	-1.38	0.54	0.79	1.71	0.73	-2.14	0.84	0.72
	AS31-11	0.62	0.22	-0.61	0.23	0.75	0.70	0.24	-0.69	0.26	0.81	1.63	0.57	-2.63	1.00	0.99
	AS21-12	0.98	0.34	-1.60	0.63	0.75	1.17	0.41	-2.06	0.81	0.82	1.39	0.49	-2.54	1.00	0.87
	AS21-13	0.91	0.32	-2.01	0.79	0.75	0.93	0.33	-2.08	0.82	0.76	1.04	0.36	-2.54	1.00	0.86
	AS21-23	0.97	0.34	-0.93	0.37	0.75	1.23	0.43	-1.15	0.45	0.82	2.14	0.75	-1.44	0.57	0.93
	AS21-24	2.02	0.71	-0.74	0.27	0.75	2.81	0.98	-0.62	0.23	0.79	2.14	0.75	0.39	-0.14	0.79
	AS23-14	1.21	0.42	-1.68	0.59	0.75	1.24	0.44	-1.72	0.60	0.76	1.92	0.67	-2.86	1.00	0.89
	AS24-15	1.04	0.36	-2.45	0.88	0.75	1.02	0.36	-2.44	0.88	0.75	1.10	0.39	-2.77	1.00	0.80
	AS13-16	1.09	0.38	-1.49	0.52	0.75	1.22	0.43	-1.71	0.60	0.79	1.52	0.53	-2.86	1.00	0.90
	4	BS11-17	1.41	0.50	-1.88	0.74	0.75	1.69	0.59	-2.10	0.82	0.80	2.50	0.88	-2.55	1.00
BS11-18		1.35	0.47	-1.75	0.69	0.75	1.84	0.64	-2.18	0.86	0.81	2.07	0.88	-2.46	0.96	0.88
BS13-19		1.46	0.51	-2.13	0.74	0.75	1.62	0.57	-2.44	0.85	0.79	1.88	0.66	-2.86	1.00	0.84
AS11-25		1.67	0.59	-1.84	0.60	0.75	2.03	0.71	-2.29	0.74	0.80	2.14	0.75	-2.42	0.78	0.81
Valor máximo		2.02	0.71	-0.61	0.88	0.75	2.81	0.98	-0.62	0.88	0.82	2.50	0.88	-1.44	1.00	0.99
Valor mínimo	0.36	0.11	-2.45	0.23	0.75	0.34	0.11	-2.44	0.23	0.75	0.78	0.24	-3.09	-0.14	0.72	
Valor medio	1.13	0.39	-1.47	0.54	0.75	1.33	0.46	-1.70	0.63	0.79	1.75	0.61	-2.56	0.90	0.88	
Percentil (5 %)	0.44	0.14	-2.35	0.24	0.75	0.44	0.15	-2.44	0.24	0.75	0.85	0.28	-3.05	0.07	0.74	
Percentil (95 %)	1.92	0.67	-0.65	0.86	0.75	2.57	0.90	-0.64	0.87	0.82	2.39	0.88	-0.16	1.00	0.97	
Desviación típica (σ)	0.33	0.12	0.43	0.15	0.00	0.47	0.17	0.48	0.17	0.02	0.41	0.16	0.32	0.24	0.05	
C. de Variación (Cv %)	29.37%	31.97%	29.10%	28.22%	0.00%	35.45%	37.90%	28.06%	27.33%	2.13%	23.18%	26.93%	12.65%	27.17%	6.15%	

Tabla VIII.45. Valores medios obtenidos para los diagramas M-φ correspondientes al punto de plastificación

Serie	Referencia	Método Aproximado				Método Balance de Energía				Método EC-8						
		ϵ_c (%)	ϵ_c (%) / ϵ_{c1} (%)	ϵ_s (%)	ϵ_s (%) / ϵ_{s1} (%)	M_y / M_{max}	ϵ_c (%)	ϵ_c (%) / ϵ_{c1} (%)	ϵ_s (%)	ϵ_s (%) / ϵ_{s1} (%)	M_y / M_{max}	ϵ_c (%)	ϵ_c (%) / ϵ_{c1} (%)	ϵ_s (%)	ϵ_s (%) / ϵ_{s1} (%)	M_y / M_{max}
1	AS11-1	1,08	0,38	-1,57	0,61	0,75	1,10	0,39	-1,60	0,63	0,75	1,59	0,56	-2,55	1,00	0,88
	AS11-22	1,29	0,45	-1,76	0,57	0,75	1,36	0,48	-1,88	0,61	0,77	2,37	0,83	-3,09	1,00	0,89
	AS11-2R	1,27	0,45	-1,65	0,53	0,75	1,29	0,45	-1,68	0,54	0,75	2,14	0,75	-2,99	0,97	0,87
	AS11-3	1,04	0,36	-1,48	0,58	0,75	1,21	0,42	-1,70	0,67	0,80	1,77	0,62	-2,55	1,00	0,91
	AS11-20	1,29	0,45	-1,45	0,47	0,75	1,45	0,51	-1,69	0,55	0,79	2,14	0,75	-2,60	0,84	0,88
	AS11-21	1,55	0,54	-1,53	0,49	0,75	1,67	0,59	-1,64	0,53	0,77	2,14	0,75	-2,12	0,69	0,84
	AS11-4	1,08	0,34	-1,45	0,57	0,75	1,09	0,34	-1,47	0,58	0,76	1,61	0,51	-2,55	1,00	0,89
	AS11-5	1,00	0,31	-1,33	0,52	0,75	1,08	0,34	-1,30	0,51	0,80	1,61	0,51	-2,55	1,00	0,88
	AS11-6	0,95	0,28	-0,91	0,36	0,75	0,92	0,32	-1,04	0,41	0,78	0,74	0,23	-2,55	1,00	0,90
	AS11-7	1,01	0,30	-1,22	0,48	0,75	1,08	0,32	-1,45	0,57	0,80	1,61	0,47	-2,55	1,00	0,90
2	AS11-8	0,92	0,27	-1,15	0,45	0,75	1,11	0,33	-1,47	0,58	0,79	1,64	0,49	-2,55	1,00	0,90
	AS11-9	1,54	0,54	-1,50	0,59	0,75	1,01	0,30	-1,33	0,52	0,78	1,64	0,48	-2,55	1,00	0,91
	AS21-10	1,06	0,37	-1,41	0,54	0,75	0,93	0,33	-1,61	0,63	0,77	3,32	1,41	-3,14	1,24	0,69
	AS31-11	1,03	0,36	-1,73	0,68	0,75	1,14	0,40	-1,58	0,60	0,77	1,62	0,57	-2,63	1,00	0,87
	AS21-12	0,87	0,31	-1,87	0,73	0,75	1,06	0,37	-2,29	0,90	0,82	1,40	0,49	-2,54	1,00	0,85
	AS21-13	1,20	0,42	-1,12	0,44	0,75	1,00	0,35	-2,46	0,97	0,89	1,03	0,36	-2,54	1,00	0,90
	AS21-23	3,52	1,23	0,15	-0,05	0,75	1,54	0,54	-1,38	0,54	0,79	2,14	0,75	-1,92	0,75	0,84
	AS21-24	1,45	0,51	-2,09	0,73	0,75	3,54	1,24	0,37	-0,13	0,76	2,14	0,75	0,50	-0,18	0,70
	AS23-14	1,11	0,39	-2,69	0,97	0,75	1,35	0,48	-1,94	0,68	0,73	1,91	0,67	-2,86	1,00	0,85
	AS13-16	1,10	0,38	-1,45	0,51	0,75	0,88	0,31	-2,19	0,79	0,70	1,07	0,38	-2,77	1,00	0,76
3	BS11-17	1,42	0,50	-1,81	0,71	0,75	1,15	0,40	-1,54	0,54	0,76	1,80	0,63	-2,86	1,00	0,91
	BS11-18	1,28	0,45	-1,73	0,68	0,75	2,17	0,76	-1,95	0,76	0,78	2,52	0,88	-2,55	1,00	0,87
	BS13-19	1,47	0,52	-2,07	0,72	0,75	1,36	0,48	-1,87	0,73	0,78	1,94	0,83	-2,86	1,12	0,88
	AS11-25	1,80	0,63	-1,98	0,64	0,75	1,46	0,51	-2,04	0,71	0,74	1,91	0,67	-2,86	1,00	0,85
	Valor máximo	1,80	0,63	-0,91	0,97	0,75	2,20	0,77	-2,50	0,81	0,78	2,14	0,75	-2,42	0,78	0,77
4	Valor mínimo	0,31	0,10	-2,69	0,36	0,75	2,20	0,77	-1,04	0,97	0,89	3,32	1,41	-1,92	1,24	0,91
	Valor medio	1,17	0,43	-1,52	0,56	0,75	1,34	0,46	-1,65	0,61	0,78	1,84	0,64	-2,51	0,93	0,86
	Percentil (5 %)	0,48	0,15	-2,51	0,07	0,75	0,49	0,16	-2,49	0,03	0,71	0,83	0,27	-3,13	0,08	0,69
	Percentil (95 %)	3,00	1,05	-0,17	0,90	0,75	3,14	1,10	-0,05	0,95	0,87	3,08	1,25	-0,22	1,20	0,91
	Desviación típica (σ)	0,30	0,11	0,38	0,13	0,00	0,39	0,15	0,37	0,13	0,03	0,53	0,23	0,27	0,11	0,05
C. de Variación (Cv %)		25,31%	26,09%	25,00%	23,37%	0,00%	29,24%	31,59%	22,39%	21,94%	4,40%	28,72%	36,19%	10,90%	12,02%	6,20%

Al aplicar el método del Eurocódigo 8 con los tres criterios planteados, se obtiene el punto de plastificación con el valor del comienzo de la no-linealidad del acero y/o del hormigón. Debido a las altas prestaciones del material empleado, el punto de plastificación de ambos materiales, acero y hormigón, se encuentran muy cercanos. A la vista de los resultados se ha observado que una mayoría de soportes alcanzan la plastificación del acero antes que la del hormigón, cosa que puede resultar favorable al previo aviso que deberían presentar las estructuras cuando se produce el cambio de comportamiento de las mismas. En concreto 16 elementos alcanzaron primero la plastificación de la armadura, 7 alcanzaron la no linealidad del hormigón antes que la del acero, y 2 de los soportes alcanzaron en subida la plastificación de un material y en bajada del otro.

Con respecto a los otros dos métodos, el método aproximado y el método del balance de energía, como en su definición no intervienen directamente los valores de la no-linealidad de los materiales, los valores que se muestran en las Tablas VIII.44 y VIII.45 representan cómo se encuentran los materiales en la situación en donde la rama elástica corta con la curva experimental.

Por tanto, como conclusión de lo observado, si se pretende realizar un modelo idealizado mediante una curva bilineal, con una rama elástica y una plástica, es importante definir ambas rectas. Para la rama elástica, como es una recta que se inicia en el origen, es fundamental ajustar correctamente la pendiente de la misma, mientras que para definir la rama plástica se deben ajustar los puntos de inicio y fin de la plastificación.

Con el método aproximado se observa un buen ajuste de la curva idealizada con la curva experimental a pesar de definir el punto de inicio de la plastificación con un criterio resistente. Con este método los materiales se encuentran con deformaciones en el rango elástico.

En el caso del método del balance de energía también se consigue un buen ajuste, aunque el proceso para encontrar el punto de inicio de la rama plástica es poco operativo frente a los otros dos métodos. Como sucede con el método aproximado, cuando comienza la rama plástica idealizada las deformaciones de los materiales están lejos de alcanzar su plastificación.

El método planteado por el Eurocódigo 8 (seleccionando el criterio más restrictivo, definido por el material que primero alcanza su plastificación) resulta el más adecuado ya que es el único que considera la deformación de los materiales que componen el soporte. Este método tiene como contrapartida que necesita del conocimiento de los valores de deformación de los materiales, pudiendo resultar un método poco útil. Resulta mucho más eficaz el uso de un modelo que sea independiente de ese dato y que se considere un dato conocido como puede ser el valor de la carga o del momento flector, como ocurre con el método aproximado.

Como en este trabajo se ha realizado una comparativa de métodos, si se observan los valores medios obtenidos por las relaciones V_y/V_{max} y M_y/M_{max} , se puede proponer que en lugar del 75% del valor resistente propuesto por el método aproximado se adopten los valores del 88% y del 86% del valor de la carga y del momento flector máximo, respectivamente. Estos valores propuestos se alcanzan con unos coeficientes de variación de aproximadamente del 6% e independientemente de los distintos parámetros que afectan al comportamiento. Así, el límite en carga se incrementa ya que el comportamiento del hormigón de altas prestaciones es más lineal para mayores niveles de carga.

VIII.7.1. Análisis a nivel sección

La capacidad de deformación de una estructura es una información muy útil para poder analizar su comportamiento.

Para los soportes de hormigón armado existen varios índices de ductilidad que miden su capacidad de deformación, ya sea a nivel del elemento, a nivel de la sección o a nivel de la rótula plástica. En este apartado y en el siguiente se realizará un análisis tanto a nivel sección como del elemento.

El diagrama idealizado de respuesta permite obtener estos índices de ductilidad. Este diagrama representa el comportamiento resistente frente a la deformación tanto en régimen elástico como plástico. Los parámetros de deformabilidad buscados se obtienen a partir de la lectura en abscisas de los puntos finales de ambas ramas, la elástica y la plástica, devolviendo sus valores elástico efectivo y último. Para poder realizar la comparativa se realiza el análisis con las lecturas obtenidas mediante la idealización del método aproximado y el del Eurocódigo 8. Los datos del balance de energía no se tienen en cuenta por su similitud con los resultados obtenidos mediante el método aproximado.

A nivel sección se pueden obtener dos índices de ductilidad, la Curvatura plástica (ϕ_p) y la Ductilidad en curvaturas (μ_ϕ).

La curvatura plástica (ϕ_p) es la diferencia entre la curvatura última (ϕ_u) y la curvatura elástica efectiva (ϕ'_y), mientras que la ductilidad en curvaturas (μ_ϕ) es el cociente entre el valor de la curvatura última y la elástica efectiva ($\mu_\phi = \phi_u / \phi'_y$).

Con el fin de interpretar los resultados obtenidos se agrupan por series, independizando los parámetros propuestos en esta tesis doctoral para poder analizar su influencia.

Para cada parámetro analizado se representarán tres tipos de gráficas. La primera de ellas corresponde al índice de ductilidad a nivel sección (μ_ϕ), y en las otras dos se recogen los valores correspondientes a las curvaturas elástica (ϕ'_y) y plástica ($\phi_p = \phi_u - \phi'_y$), con el fin de captar el comportamiento de los elementos frente a dicho parámetro, en el instante del comienzo de plastificación y en el desarrollo de la misma. Para no distorsionar el análisis con la variación del canto de la sección, se adimensionaliza el valor de las curvaturas para representarlos.

En la Tabla VIII.46 y Figura VIII.76 se representa la serie 1 (Tipo I con 2% de volumen de fibras mixtas). Se observa que a medida que aumenta la separación entre armaduras transversales menor es el índice de ductilidad. Con el aumento de la distancia entre estribos los soportes alcanzan el agotamiento antes de llegar al 20 % de la caída de carga, de ahí que el valor de la curvatura última puede no haberse alcanzado en esos elementos.

Respecto de los valores de curvatura elástica efectiva (ϕ'_y) obtenidos, se observa que son mayores los alcanzados mediante el Eurocódigo 8 (EC8) que los obtenidos con el método aproximado (MA) ya que las deformaciones de los materiales registrados en el momento del inicio de la plastificación son mayores con el método del Eurocódigo 8. Esto también será una razón por la que el índice de ductilidad de la sección, μ_ϕ , obtenido según el Eurocódigo 8 será menor que el obtenido con el método aproximado.

Para los valores de la curvatura plástica ($\phi_p = \phi_u - \phi'_y$) la tendencia observada para ambos métodos es que disminuye el valor con el aumento de la separación de estribos. Esto puede ser debido a que cuanto menor es la separación entre estribos, combinado con un hormigón de altas prestaciones que, como se ha visto anteriormente, presenta un valor de comienzo de la no-

linealidad del material muy próximo al de la armadura, aumenta considerablemente el confinamiento facilitando la deformación de la zona.

Tabla VIII.46. Valores de ductilidad a nivel sección. Separación de la armadura transversal

SEPARACIÓN A. TRANSVERSAL				MÉTODO APROXIMADO				MÉTODO EUROCÓDIGO 8			
Referencia	st	% caída subida	% caída bajada	$\phi_u \cdot h$	$\phi_y \cdot h$	$(\phi_u - \phi_y) \cdot h$	$\mu\theta$	$\phi_u \cdot h$	$\phi_y \cdot h$	$(\phi_u - \phi_y) \cdot h$	$\mu\theta$
AS11-3	0,10	20,00%	20,00%	0,072	0,006	0,066	11,96	0,072	0,007	0,065	10,05
AS11-2R	0,20	20,00%	20,00%	0,061	0,009	0,052	7,00	0,061	0,011	0,050	5,66
AS11-1	0,30	20,00%	20,00%	0,056	0,005	0,050	10,41	0,056	0,007	0,049	8,10
AS11-22	0,30	18,28%	20,00%	0,057	0,009	0,048	6,39	0,057	0,011	0,046	5,14
AS11-20	0,40	10,28%	12,68%	0,037	0,009	0,028	4,10	0,037	0,011	0,025	3,24
AS11-21 (*)	0,50	18,47%	20,00%	0,064	0,009	0,055	6,91	0,064	0,010	0,054	6,59

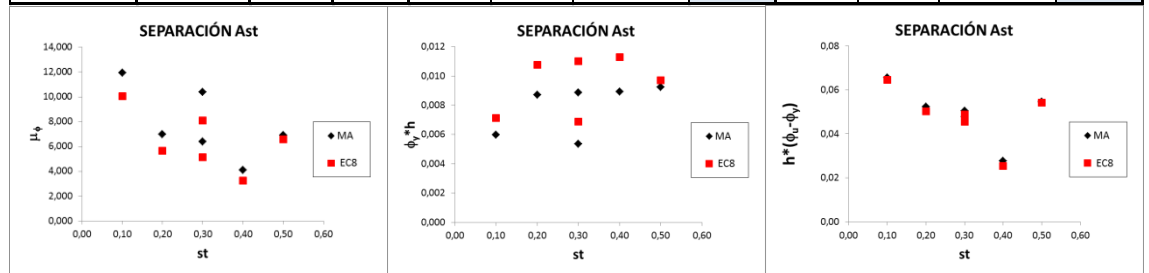


Figura VIII.76. Índice de ductilidad. Curvatura elástica y plástica. Serie 1 (s_t)

De los resultados observados previamente cabe destacar que la probeta que corresponde a la mayor separación entre estribos (AS11-21, $s_t=0.5$ m) tuvo un comportamiento anómalo. Este comportamiento no sólo se observó en esta investigación, sino también en otra línea de investigación paralela, en la que se empleó el mismo material, y también se produjo un comportamiento inesperado.

Ambos hormigones se fabricaron a la vez y fueron tratados exactamente igual. A pesar de que las probetas de control del material no arrojaron ningún resultado discordante, su comportamiento fue como si el hormigón fuera de muy altas prestaciones, muy superiores al resto de los fabricados según la misma dosificación. No se ha encontrado una explicación lógica, ya que tanto los materiales como la forma de ejecución y su almacenamiento posterior fueron similares al resto de los soportes. Por tanto, para este trabajo se tomará como un valor anómalo y no será influyente en el análisis realizado.

Siguiendo con el análisis de la Serie 1, centrado en los hormigones fabricados con distintos tipos de fibras, el Tipo I (2% de volumen de fibras mixtas) y el Tipo II (2% de volumen de fibras largas), se resumen en la Figura VIII.77 las gráficas correspondientes a los elementos AS11-3, AS11-2R, AS11-22, AS11-6, AS11-5 y AS11-4.

Tabla VIII.47. Valores de ductilidad a nivel sección. Tipo de fibra

TIPO DE FIBRAS					MÉTODO APROXIMADO				MÉTODO EUROCÓDIGO 8			
Referencia	Tipo Fibras	st	% caída subida	% caída bajada	$\phi_u \cdot h$	$\phi_y \cdot h$	$(\phi_u - \phi_y) \cdot h$	$\mu\theta$	$\phi_u \cdot h$	$\phi_y \cdot h$	$(\phi_u - \phi_y) \cdot h$	$\mu\theta$
AS11-3	I	0,10	20,00%	20,00%	0,072	0,006	0,066	11,96	0,072	0,007	0,065	10,05
AS11-2R	I	0,20	20,00%	20,00%	0,061	0,009	0,052	7,00	0,061	0,011	0,050	5,66
AS11-1	I	0,30	20,00%	20,00%	0,056	0,005	0,050	10,41	0,056	0,007	0,049	8,10
AS11-22	I	0,30	18,28%	20,00%	0,057	0,009	0,048	6,39	0,057	0,011	0,046	5,14
AS11-6	II	0,10	9,59%	17,14%	0,057	0,008	0,049	7,29	0,057	0,011	0,046	5,39
AS11-5	II	0,20	20,00%	20,00%	0,062	0,008	0,055	8,22	0,062	0,010	0,052	6,31
AS11-4	II	0,30	20,00%	20,00%	0,068	0,008	0,061	8,99	0,068	0,010	0,059	7,05

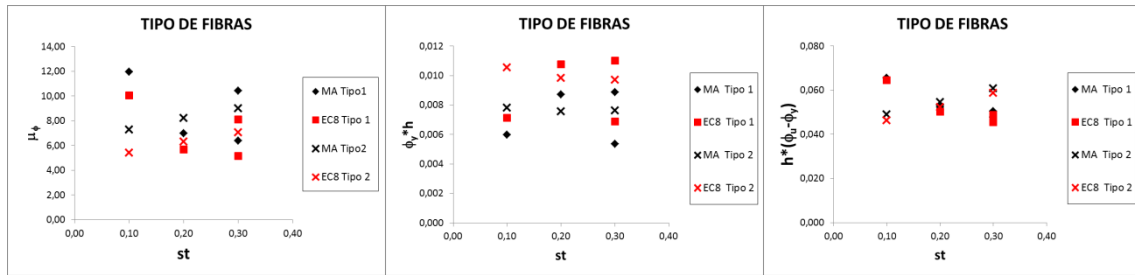


Figura VIII.77. Índice de ductilidad. Curvatura elástica y plástica. Serie 1 (Tipo de fibras)

Para ambos métodos empleados para la idealización, el método aproximado y el método del Eurocódigo 8, se puede observar que el comportamiento para $s_t = 0.20$ y $s_t = 0.30$ m es mejor en el caso del hormigón fabricado con fibras largas debido a que en el comportamiento post-pico, tanto en tracción como en compresión, es más dúctil. Ahora bien, para $s_t = 0.10$ m se observa que el hormigón fabricado exclusivamente con fibras largas (Tipo II) tiene un comportamiento dúctil peor que el de fibras mixtas (Tipo I). Esto puede ser debido a que, por el proceso de fabricación del soporte y las dimensiones del mismo, las fibras no se ajusten correctamente en el recubrimiento, distorsionando parcialmente los resultados esperables. De hecho si se revisan las recomendaciones del AFCG/SETRA (2013) [4] sobre el recubrimiento mínimo según las condiciones de hormigonado, es el valor máximo de entre los siguientes: 1.5 veces la longitud de la fibra, 1.5 veces el diámetro del árido utilizado, y el diámetro de la armadura utilizada. En este caso el valor limitante viene dado por la longitud de las fibras, que para las empleadas en el hormigón del Tipo II es de una longitud de 30 mm, lo que da lugar a un recubrimiento mínimo geométrico de 45 mm. Los recubrimientos reales para los elementos ensayados en este trabajo (≈ 40 mm) son ligeramente menores que el valor recomendado.

En todos los casos la ductilidad disminuye a medida que aumenta la separación, como ya se había detectado previamente.

De nuevo, para la curvatura elástica efectiva (ϕ'_y) no hay diferencias significativas en la separación, salvo para $s_t = 0.1$ m, por las razones anteriormente indicadas. Respecto a la curvatura plástica (ϕ_p), esta aumenta con s_t para el hormigón fabricado con fibras largas (Tipo II), mientras que para el hormigón de fibras mixtas, Tipo I, disminuye.

Finalizando con la Serie 1, se analiza el efecto del volumen de fibras para un hormigón fabricado con fibras mixtas (Tipo I) tal y como se puede observar en la Tabla VIII.48 y Figura VIII.78.

Tabla VIII.48. Valores de ductilidad a nivel sección. Volumen de fibras

VOLUMEN DE FIBRAS					MÉTODO APROXIMADO				MÉTODO EUROCÓDIGO 8			
Referencia	Volumen Fibras	st	% caída subida	% caída bajada	$\phi_u \cdot h$	$\phi_y \cdot h$	$(\phi_u - \phi_y) \cdot h$	$\mu\theta$	$\phi_u \cdot h$	$\phi_y \cdot h$	$(\phi_u - \phi_y) \cdot h$	$\mu\theta$
AS11-3	2,00%	0,10	20,00%	20,00%	0,072	0,006	0,066	11,96	0,072	0,007	0,065	10,05
AS11-2R	2,00%	0,20	20,00%	20,00%	0,061	0,009	0,052	7,00	0,061	0,011	0,050	5,66
AS11-1	2,00%	0,30	20,00%	20,00%	0,056	0,005	0,050	10,41	0,056	0,007	0,049	8,10
AS11-22	2,00%	0,30	18,28%	20,00%	0,057	0,009	0,048	6,39	0,057	0,011	0,046	5,14
AS11-9	1,00%	0,10	20,00%	20,00%	0,052	0,008	0,044	6,44	0,052	0,011	0,041	4,84
AS11-8	1,00%	0,20	20,00%	20,00%	0,047	0,007	0,040	6,67	0,047	0,010	0,037	4,76
AS11-7	1,00%	0,30	20,00%	20,00%	0,055	0,008	0,047	7,02	0,055	0,011	0,045	5,18

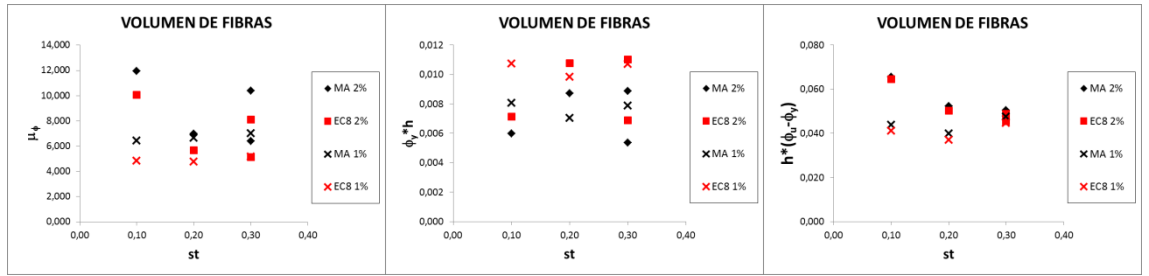


Figura VIII.78. Índice de ductilidad. Curvatura elástica y plástica. Serie 1 (Volumen de fibras)

Como es esperable, independientemente del método de idealización empleado, a nivel sección hay mayor ductilidad a mayor volumen de fibras, se entiende que por el mayor efecto de cosido que ejerce una mayor cantidad de fibras en la matriz del hormigón, así como por existir más cantidad de fibras que mejoran considerablemente las características del hormigón. Aunque a medida que aumenta la separación entre estribos ese efecto tiende a desaparecer, esto puede ser debido al menor confinamiento que existe. Al igual que en el resto de análisis de esta serie, se sigue observando la disminución de la ductilidad cuando aumenta la separación entre estribos, resultando una mayor diferencia cuanto mayor es la cantidad de fibras añadidas al hormigón.

En la Tabla VIII.49 y en la Figura VIII.79 se analiza la influencia del axil aplicado, y en la Tabla VIII.50 y en la Figura VIII.80 se analiza la esbeltez del soporte.

Tabla VIII.49. Valores de ductilidad a nivel sección. Nivel de axil aplicado

NIVEL DE AXIL				MÉTODO APROXIMADO				MÉTODO EUROCÓDIGO 8			
Referencia	ν	% caída subida	% caída bajada	$\phi_u \cdot h$	$\phi_y \cdot h$	$(\phi_u - \phi_y) \cdot h$	$\mu\theta$	$\phi_u \cdot h$	$\phi_y \cdot h$	$(\phi_u - \phi_y) \cdot h$	$\mu\theta$
AS21-13	0,00	20,00%	20,00%	0,038	0,005	0,044	9,75	0,038	0,004	0,034	8,64
AS21-12	0,10	20,00%	20,00%	0,060	0,009	0,069	9,10	0,060	0,008	0,052	7,78
AS21-10	0,20	20,00%	19,90%	0,059	0,011	0,066	7,31	0,059	0,009	0,050	6,78
AS21-23	0,30	11,99%	18,04%	0,038	0,009	0,041	5,35	0,038	0,009	0,029	4,33
AS21-24	0,40	0,00%	0,61%	0,011	0,008	0,006	1,72	0,011	0,005	0,006	2,19

Figura VIII.79. Índice de ductilidad. Curvatura elástica y plástica. Serie 2 (Nivel de axil)

Tabla VIII.50. Valores de ductilidad a nivel sección. Esbeltez

ESBELTEZ				MÉTODO APROXIMADO				MÉTODO EUROCÓDIGO 8			
Referencia	λ_v	% caída subida	% caída bajada	$\phi_u \cdot h$	$\phi_y \cdot h$	$(\phi_u - \phi_y) \cdot h$	$\mu\theta$	$\phi_u \cdot h$	$\phi_y \cdot h$	$(\phi_u - \phi_y) \cdot h$	$\mu\theta$
AS11-2R	5,77	20,00%	20,00%	0,061	0,009	0,052	7,00	0,061	0,011	0,050	5,66
AS21-10	7,50	20,00%	19,90%	0,077	0,011	0,066	7,31	0,059	0,009	0,050	6,78
AS31-11	10,70	20,00%	20,00%	0,077	0,012	0,066	6,70	0,042	0,008	0,034	5,50

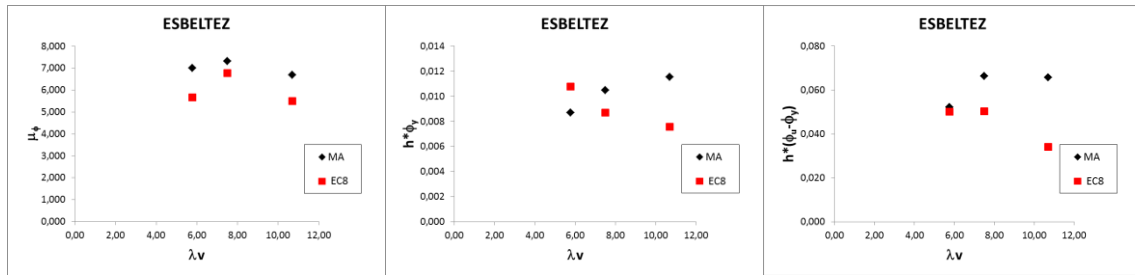


Figura VIII.80. Índice de ductilidad. Curvatura elástica y plástica. Serie 2 (Esbeltez)

Como era de esperar, a medida que aumenta el nivel de axil aplicado disminuye la ductilidad en curvaturas de la sección, independientemente del método de idealización empleado. Mientras no se alcanza la plastificación, la curvatura de la sección aumenta hasta un determinado nivel de axil ($v = 0.3$); a partir de ahí el valor disminuye bruscamente. La curvatura elástica efectiva (ϕ'_y) aumenta con el nivel de axil cuando el inicio de la plastificación se alcanza cuando plastifica el acero, mientras que la curvatura elástica disminuye para niveles de axil de 0.30 y 0.40 cuando el punto de plastificación viene definido por la plastificación del hormigón. Esto puede ser debido a que cuando la compresión aplicada es alta el acero no alcanza la plastificación por tracción, lo que conlleva a una disminución considerable del comportamiento dúctil. En este trabajo se ha observado para el mayor nivel de axil aplicado que, aun habiendo superado el comportamiento elástico del soporte, no se consigue alcanzar la plastificación de la armadura longitudinal, dando lugar a un modo de fallo por pandeo local.

A la vista de los resultados obtenidos, con respecto a la esbeltez, se aprecia una cierta independencia de la ductilidad en curvaturas. Las curvaturas elásticas obtenidas muestran un resultado contradictorio entre los dos métodos empleados. En el caso del método del Eurocódigo 8 es posible que este efecto quede enmascarado ya que se utilizan las deformaciones de los materiales en ese momento y es posible que, para mayores esbelteces, los materiales se encuentren más comprometidos. A nivel de ductilidad, se observa que a grandes esbelteces la ductilidad se bloquea (recuérdese el modo de fallo en el caso del soporte AS31-11, con $\lambda_v=10.71$, que resultó ser una inestabilidad, pudiendo ser este hecho el que esté enmascarando los resultados observados). Las diferencias observadas se deben al recubrimiento relativo de tal manera que a menor recubrimiento mayores son los valores de la ductilidad en curvaturas, la curvatura elástica y la plástica.

El parámetro que se analiza en la Serie 3 es la cuantía de la armadura longitudinal, como se muestra en la Tabla VIII.51 y en la Figura VIII.81. Se observa un ligero aumento de la ductilidad en curvaturas en función del aumento de la cuantía de la armadura longitudinal, y un claro incremento de la curvatura plástica. Con respecto a la curvatura elástica, los valores aumentan hasta alcanzar un determinado nivel de cuantía de armadura longitudinal, a partir del cual cambia de tendencia, decreciendo, ya que a mayor cuantía de armadura se necesita una carga mayor para poder llevar al comportamiento dúctil a ese material. En ambos métodos el comportamiento es muy similar, ahora bien, los del método del Eurocódigo 8 resultan más fiables por obtenerse a partir de las deformaciones de los materiales.

Tabla VIII.51. Valores de ductilidad a nivel sección. Cuantía de la armadura longitudinal

CUANTÍA As LONG.				MÉTODO APROXIMADO				MÉTODO EUROCÓDIGO 8			
Referencia	ρ	% caída subida	% caída bajada	$\phi_u \cdot h$	$\phi_y \cdot h$	$(\phi_u - \phi_y) \cdot h$	$\mu\theta$	$\phi_u \cdot h$	$\phi_y \cdot h$	$(\phi_u - \phi_y) \cdot h$	$\mu\theta$
AS21-10	1,05%	20,00%	19,90%	0,059	0,011	0,066	7,31	0,059	0,009	0,050	6,78
AS23-14	2,68%	20,00%	20,00%	0,071	0,014	0,078	6,52	0,071	0,012	0,059	6,05
AS24-15	4,19%	16,45%	19,10%	0,082	0,014	0,092	7,43	0,082	0,010	0,072	7,99

Figura VIII.81. Índice de ductilidad. Curvatura elástica y plástica. Serie 3 (ρ)

En la Tabla VIII.52 y la Figura VIII.82 se recopilan los valores obtenidos para el recubrimiento relativo. Aunque se han representado todos los valores juntos, se dividen en tres subseries, en función del valor del parámetro, de la cuantía de la armadura longitudinal y de la separación de la armadura transversal.

Tabla VIII.52. Valores de ductilidad a nivel sección. Recubrimiento relativo

RECUBRIMIENTO RELATIVO						MÉTODO APROXIMADO				MÉTODO EUROCÓDIGO 8			
Referencia	st	ρ	r/h	% caída subida	% caída bajada	$\phi_u \cdot h$	$\phi_y \cdot h$	$(\phi_u - \phi_y) \cdot h$	$\mu\theta$	$\phi_u \cdot h$	$\phi_y \cdot h$	$(\phi_u - \phi_y) \cdot h$	$\mu\theta$
AS11-3	0,10	1,16%	0,15	20,00%	20,00%	0,072	0,006	0,066	11,96	0,072	0,007	0,065	10,05
BS11-18	0,10	1,16%	0,09	20,00%	20,00%	0,066	0,008	0,058	8,11	0,066	0,010	0,056	6,52
AS11-1	0,30	1,16%	0,15	20,00%	20,00%	0,056	0,005	0,050	10,41	0,056	0,007	0,049	8,10
AS11-22	0,30	1,16%	0,15	18,28%	20,00%	0,057	0,009	0,048	6,39	0,057	0,011	0,046	5,14
BS11-17	0,30	1,16%	0,09	20,00%	20,00%	0,064	0,008	0,056	8,21	0,064	0,009	0,055	7,40
AS13-16	0,30	2,06%	0,16	20,00%	20,00%	0,059	0,007	0,051	8,09	0,059	0,011	0,048	5,54
BS13-19	0,30	2,06%	0,10	17,58%	20,00%	0,080	0,010	0,071	8,29	0,080	0,011	0,069	7,39

Figura VIII.82. Índice de ductilidad. Curvatura elástica y plástica. Serie 4 (Recubrimiento relativo (r/h))

En el caso de $s_t = 0.30$ m se observa que la ductilidad en curvaturas disminuye con la disminución del recubrimiento relativo para la menor cuantía de la armadura longitudinal. La tendencia es justo la contraria para una cuantía mayor. Con respecto a las curvaturas elástica y plástica el valor aumenta con la disminución del parámetro estudiado (r/h), independientemente de la cuantía.

En cambio, si $s_t = 0.10$ m, la ductilidad en curvaturas muestra un comportamiento menos dúctil con la disminución del recubrimiento relativo, lo que también se observa con respecto a

los valores de la curvatura plástica. Los valores de la curvatura elástica muestran una tendencia contraria a la anterior, pues aumentan al disminuir el parámetro (r/h).

En la Tabla VIII.53 y la Figura VIII.83 se muestran los valores cuando lo que se varía es el tipo de carga lateral aplicada, cíclica o monótona. La ductilidad en curvaturas y la curvatura elástica efectiva es prácticamente la misma, mientras que la curvatura última es aparentemente mayor cuando la aplicación de la carga es monotónica.

Tabla VIII.53. Valores de ductilidad a nivel sección. Tipo de carga

TIPO DE CARGA					MÉTODO APROXIMADO				MÉTODO EUROCÓDIGO 8			
Referencia	st	Tipo de Carga	% caída subida	% caída bajada	$\phi_u \cdot h$	$\phi_y \cdot h$	$(\phi_u - \phi_y) \cdot h$	μ_θ	$\phi_u \cdot h$	$\phi_y \cdot h$	$(\phi_u - \phi_y) \cdot h$	μ_θ
AS11-1	0,30	Cíclica	20,00%	20,00%	0,056	0,005	0,050	10,41	0,056	0,007	0,049	8,10
AS11-22	0,30	Cíclica	18,28%	20,00%	0,057	0,009	0,048	6,39	0,057	0,011	0,046	5,14
AS11-25	0,30	Monótona	-	20,00%	0,079	0,009	0,071	9,12	0,079	0,009	0,070	8,77

Figura VIII.83. Índice de ductilidad. Curvatura elástica y plástica. Serie 5 (Tipo de carga)

VIII.7.2. Análisis a nivel elemento

A nivel del elemento los índices de la capacidad de deformación se pueden obtener a partir de los valores de los desplazamientos elástico efectivo (Δ'_y) y último (Δ_u), y de la diferencia entre ambos: el desplazamiento plástico ($\Delta_p = \Delta_u - \Delta'_y$). Estos índices son la ductilidad en desplazamiento (μ_Δ) y la deriva, también conocida como *chord rotation* (θ) o *drift*.

En este apartado se analizará el comportamiento a partir de la ductilidad de desplazamiento (μ_Δ) al ser uno de los factores más habituales empleado por la normativa de diseño sísmico. Este factor se obtiene por el cociente entre el desplazamiento último y el elástico efectivo ($\mu_\Delta = \Delta_u / \Delta'_y$).

Al igual que en el apartado anterior, se hace un análisis a partir de las distintas series y parámetros planteados en el programa experimental. También se realiza un análisis con los datos obtenidos gracias a los dos métodos idealizados elegidos como más idóneos, el método aproximado y el método del Eurocódigo 8.

Cuando la variable que se analiza es la separación entre los cercos que conforman la armadura transversal, se obtienen los valores que se representan en las gráficas de la Figura VIII.84. Debido al comportamiento anómalo del soporte AS11-21 su valor no se tendrá en cuenta en el análisis.

A la vista de las gráficas, y para ambos métodos, a nivel elemento la ductilidad en desplazamientos disminuye con la separación de la armadura transversal. El desplazamiento elástico no depende de este parámetro, mientras que el desplazamiento plástico disminuye a medida que aumenta la separación de la armadura transversal.

Tabla VIII.54. Valores de ductilidad a nivel elemento. Separación de la armadura transversal

SEPARACIÓN A. TRANSVERSAL		MÉTODO APROXIMADO				MÉTODO EUROCÓDIGO 8			
Referencia	st	Δu (m)	Δy (m)	$(\Delta u - \Delta y)$ (m)	$\mu\Delta$	Δu (m)	Δy (m)	$(\Delta u - \Delta y)$ (m)	$\mu\Delta$
AS11-3	0,10	0,033	0,010	0,023	3,286	0,033	0,012	0,022	2,906
AS11-2R	0,20	0,035	0,012	0,024	3,019	0,035	0,014	0,021	2,475
AS11-1	0,30	0,025	0,011	0,014	2,354	0,025	0,011	0,014	2,190
AS11-22	0,30	0,034	0,012	0,022	2,859	0,034	0,014	0,020	2,411
AS11-20	0,40	0,029	0,012	0,017	2,341	0,029	0,015	0,014	1,952
AS11-21 (*)	0,50	0,035	0,012	0,023	2,861	0,035	0,013	0,022	2,776

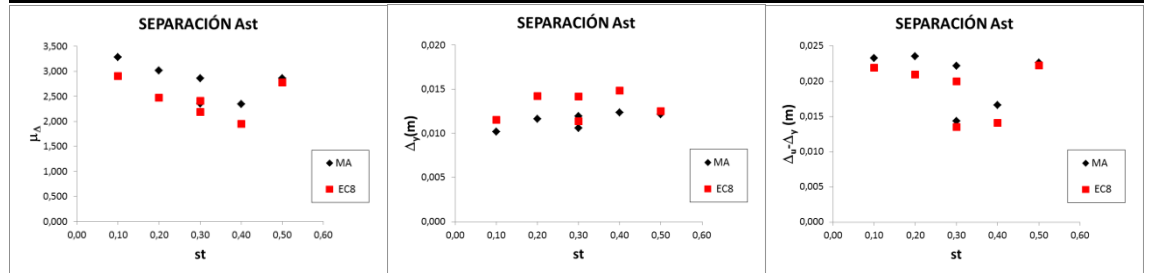


Figura VIII.84. Índice de ductilidad. Separación de armadura transversal (s_t)

Si se comparan además las distintas clases de hormigón, fabricados con distintas tipologías de fibras (véase la Tabla VIII.55 y la Figura VIII.85) el comportamiento esperado sería una mejora de la ductilidad por el uso de fibra larga (Tipo II), si bien no es así; es más, los valores correspondientes a esta clase de hormigón resultan diferentes a los valores esperables, lo que lleva a sospechar que, para las dimensiones de los soportes y la forma de ejecución, las dimensiones de la fibra larga elegida no ha resultado la adecuada. Para $s_t = 0.30$ m en hormigón del Tipo II (fibras largas) aumenta la ductilidad en desplazamientos, por lo que con esta separación no afecta el problema de una adecuada orientación y disposición de las fibras en el recubrimiento.

Tabla VIII.55. Valores de ductilidad a nivel elemento. Tipo de fibras

TIPO DE FIBRAS			MÉTODO APROXIMADO				MÉTODO EUROCÓDIGO 8			
Referencia	Tipo Fibras	st	Δu (m)	Δy (m)	$(\Delta u - \Delta y)$ (m)	$\mu\Delta$	Δu (m)	Δy (m)	$(\Delta u - \Delta y)$ (m)	$\mu\Delta$
AS11-3	I	0,10	0,033	0,010	0,023	3,286	0,033	0,012	0,022	2,906
AS11-2R	I	0,20	0,035	0,012	0,024	3,019	0,035	0,014	0,021	2,475
AS11-1	I	0,30	0,025	0,011	0,014	2,354	0,025	0,011	0,014	2,190
AS11-22	I	0,30	0,034	0,012	0,022	2,859	0,034	0,014	0,020	2,411
AS11-6	II	0,10	0,043	0,013	0,030	3,270	0,043	0,017	0,026	2,545
AS11-5	II	0,20	0,031	0,012	0,019	2,620	0,031	0,013	0,018	2,336
AS11-4	II	0,30	0,044	0,012	0,032	3,532	0,044	0,017	0,027	2,655

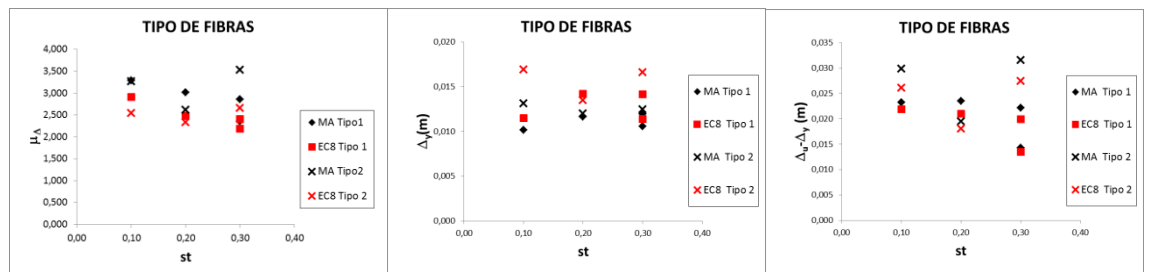


Figura VIII.85. Índice de ductilidad. Tipo de fibras

En la Tabla VIII.56 y la Figura VIII.86 se observa la influencia del volumen de fibras. La ductilidad en desplazamientos es mayor cuanto mayor es el volumen de fibras, y los valores obtenidos resultan más próximos cuando se aumenta la separación de la armadura transversal. Con respecto al desplazamiento elástico no se aprecia influencia del volumen de fibras sin embargo, el desplazamiento plástico es mayor a menor volumen de fibras aportado al hormigón.

Tabla VIII.56. Valores de ductilidad a nivel elemento. Volumen de fibras

VOLUMEN DE FIBRAS			MÉTODO APROXIMADO				MÉTODO EUROCÓDIGO 8			
Referencia	Volumen Fibras	st	Δu (m)	Δy (m)	$(\Delta u - \Delta y)$ (m)	$\mu\Delta$	Δu (m)	Δy (m)	$(\Delta u - \Delta y)$ (m)	$\mu\Delta$
AS11-3	2,00%	0,10	0,033	0,010	0,023	3,286	0,033	0,012	0,022	2,906
AS11-2R	2,00%	0,20	0,035	0,012	0,024	3,019	0,035	0,014	0,021	2,475
AS11-1	2,00%	0,30	0,025	0,011	0,014	2,354	0,025	0,011	0,014	2,190
AS11-22	2,00%	0,30	0,034	0,012	0,022	2,859	0,034	0,014	0,020	2,411
AS11-9	1,00%	0,10	0,042	0,017	0,025	2,441	0,042	0,021	0,021	1,987
AS11-8	1,00%	0,20	0,028	0,011	0,017	2,551	0,028	0,014	0,014	2,045
AS11-7	1,00%	0,30	0,033	0,013	0,021	2,662	0,033	0,016	0,018	2,117

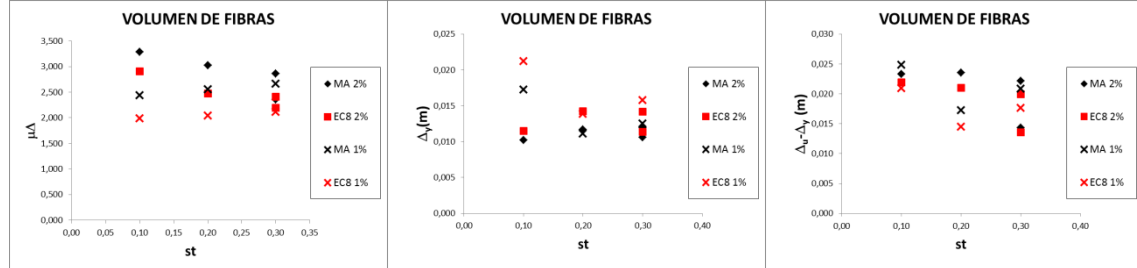


Figura VIII.86. Índice de ductilidad. Volumen de fibras

Respecto de la esbeltez a cortante, los valores se recogen en la Tabla VIII.57 y la Figura VIII.87. En cualquier caso se observa que la ductilidad del elemento disminuye al aumentar este parámetro. Esto puede deberse a la influencia que tienen los efectos de segundo orden, que dan lugar a una reducción tanto de la capacidad resistente como en la deformación. Si se observa la gráfica central de la Figura VIII.87, la correspondiente al desplazamiento elástico efectivo (Δ'_y), este valor aumenta a medida que aumenta la esbeltez, como era de esperar debido a los efectos de segundo orden.

Tabla VIII.57. Valores de ductilidad a nivel elemento. Esbeltez

ESBELTEZ		MÉTODO APROXIMADO				MÉTODO EUROCÓDIGO 8			
Referencia	λ_v	Δu (m)	Δy (m)	$(\Delta u - \Delta y)$ (m)	$\mu\Delta$	Δu (m)	Δy (m)	$(\Delta u - \Delta y)$ (m)	$\mu\Delta$
AS11-2R	5,77	0,035	0,012	0,024	3,019	0,035	0,014	0,021	2,475
AS21-10	7,50	0,048	0,017	0,031	2,801	0,048	0,021	0,027	2,282
AS31-11	10,70	0,074	0,019	0,055	3,918	0,074	0,035	0,039	2,105

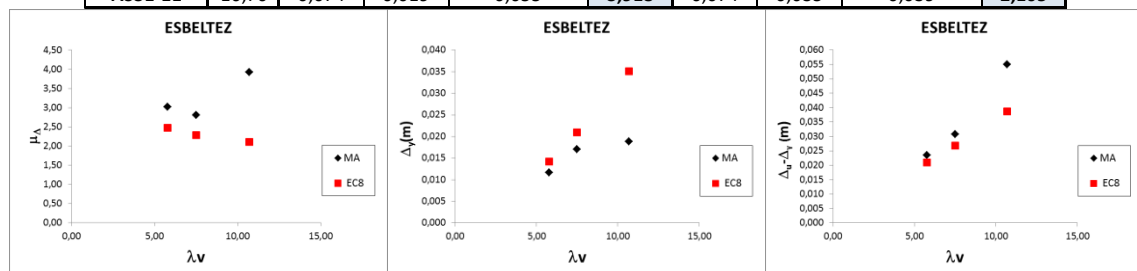


Figura VIII.87. Índice de ductilidad. Esbeltez a cortante

En la serie 2 se estudia también la influencia del axil aplicado (véase la Tabla VIII.58 y la Figura VIII.88).

Se observa un comportamiento anómalo en el soporte sometido a un nivel de axil nulo (AS21-13), que no se tendrá en cuenta en el análisis siguiente. Según los resultados obtenidos, y como es esperable, el soporte tiene una menor ductilidad a medida que aumenta el axil aplicado al mismo, y también se observa que mientras no comienza la plastificación del elemento, el desplazamiento aumenta con el nivel de axil. En concreto, para niveles de axil entre 0.10 y 0.40 se observa una disminución de la ductilidad en desplazamientos, lo que puede ser explicado por la influencia del comportamiento de los materiales que componen el soporte (al aumentar el axil aumenta la compresión en el hormigón y disminuye la tracción en el acero). El desplazamiento elástico efectivo (Δ'_y) aumenta cuando plastifica el acero y disminuye cuando el que plastifica es el hormigón.

Tabla VIII.58. Valores de ductilidad a nivel elemento. Nivel de axil aplicado

NIVEL DE AXIL		MÉTODO APROXIMADO				MÉTODO EUROCÓDIGO 8			
Referencia	ν	Δu (m)	Δy (m)	$(\Delta u - \Delta y)$ (m)	$\mu\Delta$	Δu (m)	Δy (m)	$(\Delta u - \Delta y)$ (m)	$\mu\Delta$
AS21-13	0,00	0,010	0,005	0,005	1,902	0,010	0,006	0,004	1,797
AS21-12	0,10	0,035	0,009	0,025	3,676	0,035	0,011	0,024	3,134
AS21-10	0,20	0,048	0,017	0,031	2,801	0,048	0,021	0,027	2,282
AS21-23	0,30	0,041	0,016	0,025	2,566	0,041	0,021	0,020	1,965
AS21-24	0,40	0,039	0,020	0,019	1,948	0,039	0,019	0,020	2,081

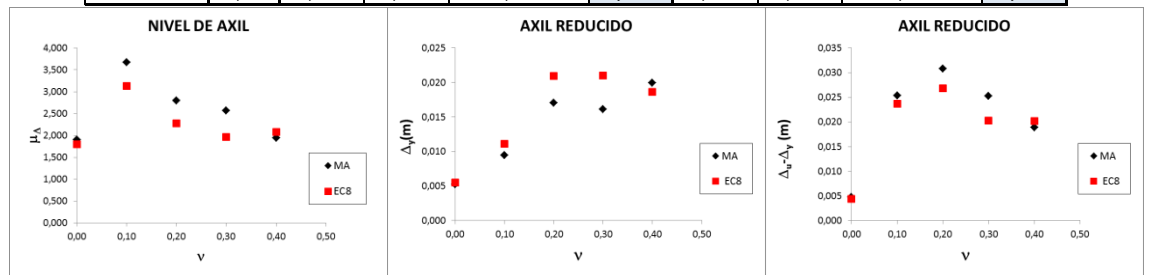


Figura VIII.88. Índice de ductilidad. Nivel de axil

En la serie 3 (Tabla VIII.59 y Figura VIII.89) se analiza la cuantía de la armadura longitudinal, en concreto tres soportes con cuantías 1.05%, 2.68% y 4.19%. A la vista de los valores obtenidos se aprecia que la ductilidad en desplazamientos aumenta ligeramente con la cuantía. Esto podría ser explicado por el hecho de que la ductilidad está directamente relacionada con la plastificación de la armadura longitudinal y, a mayor cuantía de la misma, es necesario desarrollar más esfuerzo para alcanzar el límite elástico del acero. Como el hormigón es exactamente igual en los tres elementos comparados, el agotamiento del mismo a compresión se producirá a un nivel de carga similar. Para el valor obtenido con el método aproximado, el elemento de mayor cuantía (AS24-15) presenta un menor valor del desplazamiento elástico, mientras que éste aumenta con la cuantía cuando se aplica el método del Eurocódigo 8. Esto puede explicarse porque el primer método obtiene el valor a partir de un determinado valor de carga, para un valor de deformación de la armadura muy por debajo de su plastificación, mientras que el segundo método obtiene ese valor a partir de alcanzar la plastificación bien del acero o del hormigón, siendo bastante similar para ambos materiales gracias a las altas prestaciones del hormigón empleado para fabricar los soportes.

Tabla VIII.59. Valores de ductilidad a nivel elemento. Cuantía de la armadura transversal

CUANTÍA As LONG.		MÉTODO APROXIMADO				MÉTODO EUROCÓDIGO 8			
Referencia	ρ	Δu (m)	Δy (m)	$(\Delta u - \Delta y)$ (m)	$\mu\Delta$	Δu (m)	Δy (m)	$(\Delta u - \Delta y)$ (m)	$\mu\Delta$
AS21-10	1,05%	0,048	0,017	0,031	2,801	0,048	0,021	0,027	2,282
AS23-14	2,68%	0,055	0,020	0,035	2,693	0,055	0,026	0,029	2,128
AS24-15	4,19%	0,063	0,022	0,041	2,872	0,063	0,022	0,041	2,872

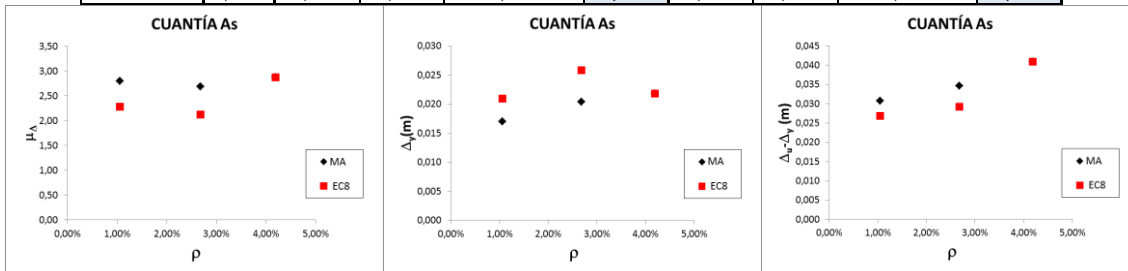


Figura VIII.89. Índice de ductilidad. Cuantía de armadura longitudinal

En la Tabla VIII.60 y la Figura VIII.90 se muestran los valores obtenidos para la serie 4, donde se estudia el recubrimiento relativo (r/h). No se aprecia un comportamiento claro de la ductilidad con la variación de este parámetro, que está directamente ligado al canto útil de la sección y al confinamiento debido a la armadura transversal. A partir de los datos arrojados para los soportes con una $s_t = 0.30$ m se observa un leve aumento de la ductilidad en desplazamientos con el aumento de la cuantía y la disminución de la relación (r/h), mientras que para una cuantía constante y una separación de la armadura transversal de 0.10 m la ductilidad presenta una ligera disminución con el parámetro estudiado. Con respecto a los desplazamientos elástico efectivo y último no hay diferencias significativas frente a este parámetro, aunque varíe la cuantía o la separación de la armadura transversal.

Tabla VIII.60. Valores de ductilidad a nivel elemento. Recubrimiento relativo

RECUBRIMIENTO RELATIVO				MÉTODO APROXIMADO				MÉTODO EUROCÓDIGO 8			
Referencia	st	ρ	r/h	Δu (m)	Δy (m)	$(\Delta u - \Delta y)$ (m)	$\mu\Delta$	Δu (m)	Δy (m)	$(\Delta u - \Delta y)$ (m)	$\mu\Delta$
AS11-3	0,10	1,16%	0,15	0,033	0,010	0,023	3,286	0,033	0,012	0,022	2,906
BS11-18	0,10	1,16%	0,09	0,034	0,013	0,021	2,673	0,034	0,014	0,020	2,405
AS11-1	0,30	1,16%	0,15	0,025	0,011	0,014	2,354	0,025	0,011	0,014	2,190
AS11-22	0,30	1,16%	0,15	0,034	0,012	0,022	2,859	0,034	0,014	0,020	2,411
BS11-17	0,30	1,16%	0,09	0,036	0,011	0,025	3,230	0,036	0,012	0,025	3,099
AS13-16	0,30	2,06%	0,16	0,038	0,012	0,026	3,132	0,038	0,015	0,023	2,492
BS13-19	0,30	2,06%	0,10	0,035	0,013	0,022	2,768	0,035	0,013	0,022	2,679

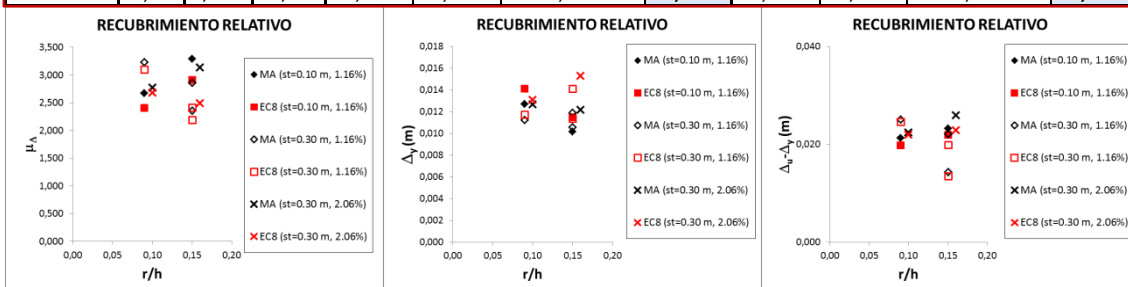


Figura VIII.90. Índice de ductilidad. Recubrimiento relativo

Para finalizar con el análisis del comportamiento a nivel elemento, en la serie 5 (véanse la Tabla VIII.61 y la Figura VIII.91), donde se estudia el tipo de carga aplicada, cíclica o monótonica, no se aprecia una gran influencia de este parámetro en los valores obtenidos de la ductilidad en desplazamientos ni en los desplazamientos elástico efectivo y último.

Tabla VIII.61. Valores de ductilidad a nivel elemento. Tipo de carga

TIPO DE CARGA			MÉTODO APROXIMADO				MÉTODO EUROCÓDIGO 8			
Referencia	st	Tipo de Carga	Δu (m)	Δy (m)	$(\Delta u - \Delta y)$ (m)	$\mu\Delta$	Δu (m)	Δy (m)	$(\Delta u - \Delta y)$ (m)	$\mu\Delta$
AS11-1	0,30	Cíclica	0,025	0,011	0,014	2,354	0,025	0,011	0,014	2,190
AS11-22	0,30	Cíclica	0,034	0,012	0,022	2,859	0,034	0,014	0,020	2,411
AS11-25	0,30	Monótona	0,032	0,011	0,021	2,973	0,032	0,010	0,021	3,067

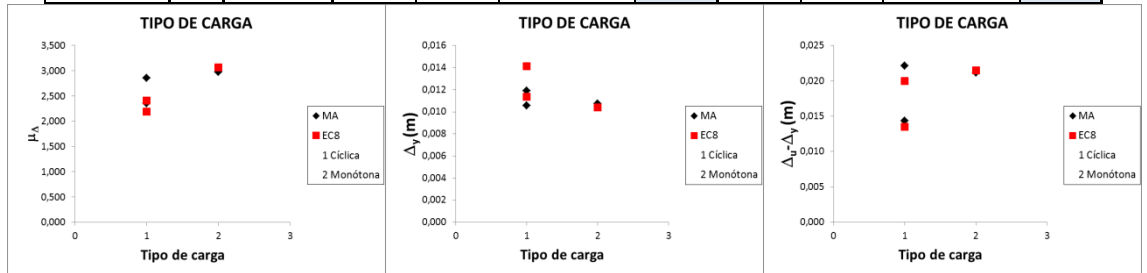


Figura VIII.91. Índice de ductilidad. Tipo de carga

VIII.7.3. Energía de disipación

En el diseño sísmico, la deformación inelástica se cuantifica generalmente por los parámetros de ductilidad y por la capacidad de disipación de energía. En este apartado se va a realizar un análisis de la energía disipada por cada elemento ensayado en este trabajo con los criterios definidos por el método aproximado para idealizar el comportamiento de cada soporte.

Según Paultre y Legeron (2001) [96] la energía disipada correspondiente a cada ciclo carga-descarga se define según la Figura VIII.92 y la expresión (VIII.6).

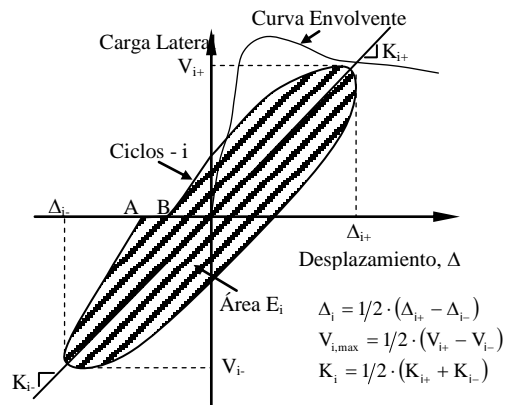


Figura VIII.92. Definición de la energía disipada por ciclo (Caballero (2015) [26])

$$(VIII.6) \quad E_i = \oint_A^B V d\Delta$$

El sumatorio de la energía disipada por el conjunto de ciclos hasta alcanzar el momento del fallo, que en este trabajo corresponde con el 20 % de caída de carga post-pico, (VIII.7), es la energía total disipada (E_{hist}).

$$(VIII.7) \quad E_{hist} = \sum_{i=1}^n E_i$$

siendo n el número de ciclos aplicados hasta alcanzar el fallo del soporte.

Para poder comparar los resultados obtenidos para los distintos elementos, se obtiene la energía disipada normalizada mediante la expresión facilitada por Paultre y LeGERON (2001) [96] (VIII.8).

$$(VIII.8) \quad E_N = \frac{1}{V_{max} \cdot \Delta I_y} \sum_{i=1}^n E_i$$

donde:

V_{max} es el valor medio del cortante máximo

ΔI_y es el desplazamiento elástico del soporte según el método aproximado

Para cada uno de los soportes se han obtenido los valores correspondientes a la energía disipada por ciclos, así como la acumulada y la normalizada. En la Figura VIII. 93 se muestra como ejemplo la que corresponde con el soporte AS21-10, el resto de gráficas se puede consultar en el Anejo F.

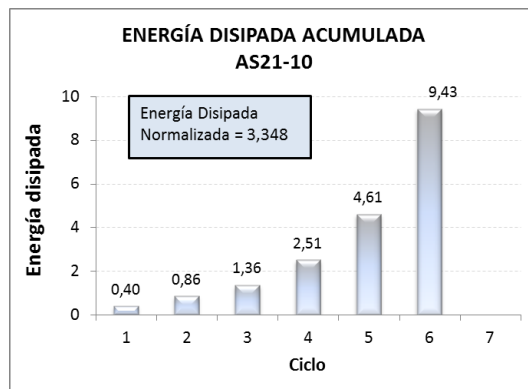


Figura VIII.93. Energía disipada, soporte AS21-10

En la Tabla VIII.62 se recopilan los valores de la energía disipada acumulada y la energía normalizada para cada soporte ensayado bajo la aplicación de carga cíclica.

A la vista de los resultados obtenidos se observa que con respecto a la separación de la armadura transversal, si no se considera el valor del soporte AS11-1, a partir de una separación de 0.20 m la energía parece que no depende, mientras que sí se advierte que el soporte AS11-3 ($s_t=0.10$ m) disipa menos energía que el resto de la serie.

Con respecto al tipo de fibras empleadas y al porcentaje de fibras añadido a la matriz de hormigón, aunque se esperaba que las del Tipo II (largas) o las de menor volumen de fibra (1 %) disipasen más cantidad de energía que las del Tipo I (mixtas) o mayor volumen de fibras (2%), sólo se observa esa tendencia cuando la separación de la armadura transversal es de 0.10 m.

En relación con la esbeltez sí se aprecia un aumento hasta un determinado valor a partir del cual decrece probablemente debido a la influencia de los efectos de 2º orden. Mientras que si

lo que varía es el nivel de axil aplicado o la cuantía de la armadura longitudinal, la energía disipada crece hasta un cierto valor en el cual decrece, esto puede explicarse, en el caso de aumentar el axil se produce un incremento de la compresión en el hormigón, disminuyendo la tracción en el acero, de forma que la energía disipada aumenta mientras se alcanza la plastificación del acero y, por el contrario, disminuye cuando lo que plastifica es el hormigón. En el caso de aumentar la cuantía de la armadura longitudinal, se disipa mayor cantidad de energía cuando se alcanza la plastificación del acero y disminuye en el soporte donde no se alcanza la plastificación la armadura longitudinal (AS13-16). De los valores obtenidos para la serie que analiza el recubrimiento relativo (r/h) no se observan tendencias claras.

En resumen, con los resultados obtenidos parece existir una dependencia del nivel de axil, la esbeltez y la cuantía de armadura longitudinal. Mientras que del resto de los parámetros analizados no se pueden obtener conclusiones claras.

Tabla VIII.62. Energía disipada acumulada y la energía normalizada por series

SERIE	Referencia	E_{hist} (kN·m)	E_N
1	AS11-1	5,46	0,71
	AS11-22	8,07	1,24
	AS11-2R	8,79	1,30
	AS11-3	7,60	1,02
	AS11-20	7,61	1,19
	AS11-21	7,62	1,19
	AS11-4	10,87	1,65
	AS11-5	6,75	0,99
	AS11-6	8,15	1,28
	AS11-7	8,84	1,22
	AS11-8	7,41	0,96
AS11-9	10,39	1,93	
2	AS21-10	9,43	3,35
	AS31-11	3,93	2,83
	AS21-12	3,99	1,13
	AS21-13	0,49	0,16
	AS21-23	9,50	3,31
	AS21-24	4,90	2,04
3	AS23-14	11,33	3,84
	AS24-15	15,78	5,66
	AS13-16	11,16	1,49
4	BS11-17	8,44	1,11
	BS11-18	11,80	1,84
	BS13-19	10,97	1,43

Entre las Figuras VIII.94 y VIII.96 se representan los valores de la energía normalizada obtenida por series.

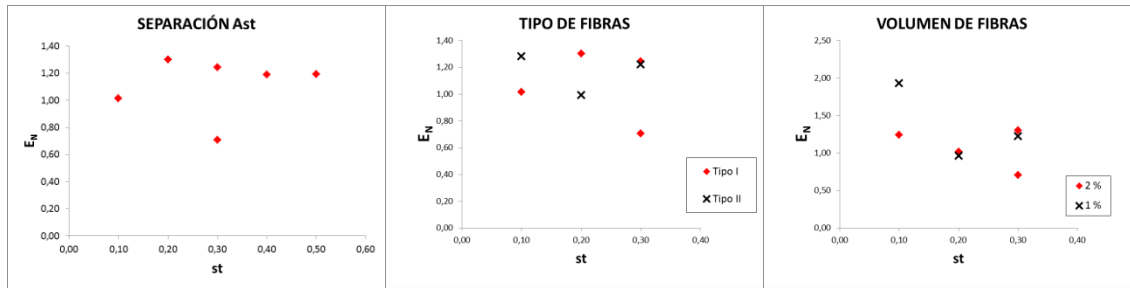


Figura VIII.94. Energía normalizada.Serie 1

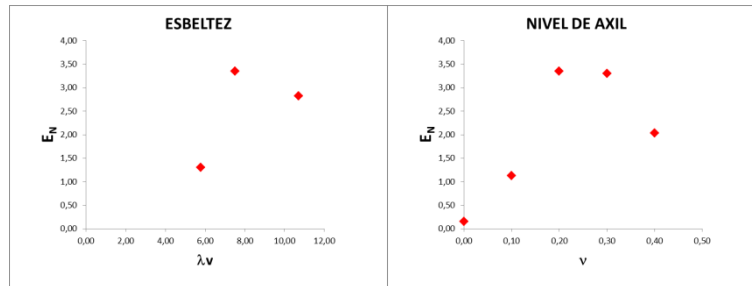


Figura VIII.95. Energía normalizada.Serie 2

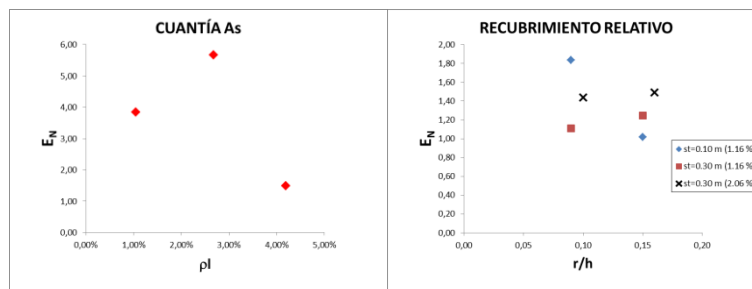


Figura VIII.96. Energía normalizada.Serie 3 y serie 4

VIII.8. Módulo de deformación del hormigón

El hormigón empleado en este trabajo es de altas prestaciones y se ha realizado un seguimiento exhaustivo del mismo, a través de las probetas de control del material, tanto de su resistencia a compresión simple como de su módulo de deformación.

A la vista del valor medio de la resistencia a compresión conseguido (128.01 MPa) y sabiendo que las normativas existentes no incluyen directamente este tipo de material, en este apartado se busca proponer una expresión que permita predecir el módulo de deformación para este tipo de hormigones.

Con los datos obtenidos en esta investigación y la formulación recogida por dichas normativas se podría proponer una expresión a partir de su resistencia a compresión simple.

Las normativas más cercanas al tipo de material utilizado son el Eurocódigo 2 [38], el Código Modelo 2010 [55] y las recogidas por las Recomendaciones para hormigones UHPFR AFGC/SETRA [4]. Las dos primeras se centran en hormigones que no superan 105 MPa, como se recoge en el Anejo Nacional [41], mientras que las recomendaciones para UHPFR son para hormigones de resistencia a compresión de más de 150 MPa y hasta un máximo de 250 MPa.

Por tanto, como el hormigón empleado en este trabajo se encuentra en un valor intermedio entre ambas recomendaciones, se procede a utilizar las expresiones del Módulo de Elasticidad (E_c) en MPa a 28 días recogidas en dichos documentos por corresponder con una cota superior e inferior, que es donde se encontrarían los hormigones de altas prestaciones. Son las siguientes:

- Para el Código Modelo 2010 [55]

$$(VIII.9) \quad E_{ci} = 21.5 \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{\frac{1}{3}}$$

- Para el Eurocódigo 2 (2010) [38]

$$(VIII.10) \quad E_{cm} = 22 \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0.3}$$

- Para el AFGC/SETRA (2013) [4]

$$(VIII.11) \quad E_{cm} = k_0 \cdot (f_{cm})^{\frac{1}{3}}$$

donde:

f_{cm} es el valor de la resistencia media a compresión simple en MPa

k_0 es el parámetro que relaciona el módulo de elasticidad con la resistencia media a compresión.

Si se aplican las expresiones teóricas (VIII.9, VIII.10 y VIII.11) a los hormigones con los que se han fabricado los elementos ensayados, se obtienen los valores medios para los distintos tipos dosificados que se recogen en las Tablas VIII.63, VIII.64 y VIII.65, mientras que en la tabla VIII.66 se recogen para todos los hormigones de este trabajo:

Tabla VIII.63. Valores medios teóricos para el hormigón Tipo I (2% de volumen de fibras)

Hormigón Tipo I (2% Vol de Fibras)	f_c (Mpa)	E_{c_exp} (Mpa)	$E_{c_teo_CM10}$ (Mpa)	$E_{c_teo_EC2}$ (Mpa)	$E_{c_teo_AFGC}$ (Mpa)	$E_{c_teo_CM10}/E_{c_exp}$	$E_{c_teo_EC2}/E_{c_exp}$	$E_{c_teo_AFGC}/E_{c_exp}$
Valor máximo	148,07	50882,00	52794,57	49380,83	52215,72	1,20	1,13	1,19
Valor mínimo	117,94	40950,00	48939,61	46123,52	48403,02	1,02	0,96	1,01
Valor medio	128,32	44788,45	50310,89	47284,05	49759,27	1,13	1,06	1,11
Desviación típica (σ)	8,77	2754,63	1125,91	951,48	1113,57	4,98%	4,82%	4,92%
C.de Variación (Cv)	6,84%	6,15%	2,24%	2,01%	2,24%	4,42%	4,55%	4,42%

Tabla VIII.64. Valores medios teóricos para el hormigón Tipo II (2% de volumen de fibras)

Hormigón Tipo II (2% Vol de Fibras)	f_c (Mpa)	E_{c_exp} (Mpa)	$E_{c_teo_CM10}$ (Mpa)	$E_{c_teo_EC2}$ (Mpa)	$E_{c_teo_AFGC}$ (Mpa)	$E_{c_teo_CM10}/E_{c_exp}$	$E_{c_teo_EC2}/E_{c_exp}$	$E_{c_teo_AFGC}/E_{c_exp}$
Valor máximo	134,71	47486,00	51156,58	47999,80	50595,69	1,65	1,54	1,63
Valor mínimo	127,37	31097,00	50209,80	47199,53	49659,29	1,07	1,00	1,05
Valor medio	130,89	46327,00	50420,58	47377,78	49867,76	1,09	1,02	1,08
Desviación típica (σ)	3,68	1639,07	298,08	252,08	294,81	0,03	0,03	0,03
C.de Variación (Cv)	2,81%	3,54%	0,59%	0,53%	0,59%	2,95%	3,01%	2,95%

Tabla VIII.65. Valores medios teóricos para el hormigón Tipo I (1% de volumen de fibras)

Hormigón Tipo I (1% Vol de Fibras)	fc (Mpa)	Ec_exp (Mpa)	Ec_teo_CM10 (Mpa)	Ec_teo_EC2 (Mpa)	Ec_teo_AFGC (Mpa)	Ec_teo_CM10/Ec_exp	Ec_teo_EC2/Ec_exp	Ec_teo_AFGC/Ec_exp
Valor máximo	125,19	45170,00	49922,92	46956,76	49375,56	1,15	1,08	1,13
Valor mínimo	121,63	43592,00	49444,58	46551,63	48902,46	1,09	1,03	1,08
Valor medio	123,03	44217,67	49632,18	46710,52	49088,00	1,12	1,06	1,11
Desviación típica (σ)	1,90	838,19	255,31	216,22	252,51	0,03	0,02	0,03
C.de Variación (Cv)	1,55%	1,90%	0,51%	0,46%	0,51%	2,30%	2,25%	2,30%

Tabla VIII.66. Valores medios teóricos para el todos los tipos y dosificaciones de hormigón empleados en este trabajo

Hormigón (Todos los tipos y dosificaciones)	fc (Mpa)	Ec_exp (Mpa)	Ec_teo_CM10 (Mpa)	Ec_teo_EC2 (Mpa)	Ec_teo_AFGC (Mpa)	Ec_teo_CM10/Ec_exp	Ec_teo_EC2/Ec_exp	Ec_teo_AFGC/Ec_exp
Valor máximo	148,07	50882,00	52794,57	49380,83	52215,72	1,20	1,13	1,19
Valor mínimo	117,94	40950,00	48939,61	46123,52	48403,02	1,02	0,96	1,01
Valor medio	127,74	44843,04	50238,22	47222,72	49687,40	1,12	1,06	1,11
Desviación típica (σ)	8,04	2532,30	1032,37	872,46	1021,05	0,05	0,04	0,05
C.de Variación (Cv)	6,29%	5,65%	2,05%	1,85%	2,05%	4,14%	4,26%	4,14%

Aunque el número de muestras de las que se dispone para los hormigones del Tipo II y del Tipo I con un 1% de volumen de fibras es bastante limitado, se procede a hacer el mismo análisis que el realizado para el hormigón del Tipo I con un 2% de volumen de fibras, del que se dispone de una muestra de valores más representativa. Cabe comentar también que el valor del módulo de deformación de uno de los hormigones del Tipo II resultó bastante anómalo comparado con el resto, por lo que se va a desechar en este análisis.

Para un mejor ajuste y a la vista de las ecuaciones anteriores, (VIII.9), (VIII.10) y (VIII.11), se plantea la búsqueda del valor del coeficiente que debería multiplicar la relación $\left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0.3}$ y $(f_{cm})^{\frac{1}{3}}$, para los hormigones ensayados.

En las Tablas VIII.67, VIII.68, VIII.69 y VIII.70 se obtiene el valor medio para los distintos tipos de hormigones y el conjunto de ellos, respectivamente.

Tabla VIII.67. Valores medios experimentales para el hormigón Tipo I (2% de volumen de fibras)

Hormigón Tipo I (2% Vol de Fibras)	Ec_exp/(fc/10) ^{0,3}	Ec_exp/(fc ^{1/3})	Ec_exp_EC2-CM10 (Mpa)	Ec_exp_AFGC (Mpa)	Ec_exp_EC2-CM10/Ec_exp	Ec_exp_AFGC/Ec_exp
Valor máximo	23520,88	9746,60	52539,67	46972,68	1,20	1,07
Valor mínimo	23343,21	8288,47	49074,00	43542,82	1,02	0,91
Valor medio	23407,32	8878,94	50308,76	44762,89	1,13	1,00
Desviación típica (σ)	51,95	399,33	1012,35	1001,75	0,05	0,04
C.de Variación (Cv)	0,22%	4,50%	2,01%	2,24%	4,55%	4,42%

Tabla VIII.68. Valores medios experimentales para el hormigón Tipo II (2% de volumen de fibras)

Hormigón Tipo II (2% Vol de Fibras)	Ec_exp/(fc/10) ^{0,3}	Ec_exp/(fc ^{1/3})	Ec_exp_EC2-CM10 (Mpa)	Ec_exp_AFGC (Mpa)	Ec_exp_EC2-CM10/Ec_exp	Ec_exp_AFGC/Ec_exp
Valor máximo	23446,86	9359,47	51082,46	46999,15	1,64	1,51
Valor mínimo	23403,10	6066,28	50230,80	46129,32	1,07	0,98
Valor medio	23412,89	9168,40	50420,50	46322,96	1,09	1,00
Desviación típica (σ)	13,84	270,21	268,27	273,86	0,03	0,03
C.de Variación (Cv)	0,06%	2,95%	0,53%	0,59%	3,01%	2,95%

Tabla VIII.69. Valores medios experimentales para el hormigón Tipo I (1% de volumen de fibras)

Hormigón Tipo I (1% Vol de Fibras)	$E_{c_exp}/(f_c/10)^{0,3}$	$E_{c_exp}/(f_c)^{1/3}$	$E_{c_exp_EC2-CM10}$ (Mpa)	$E_{c_exp_AFGC}$ (Mpa)	$E_{c_exp_EC2-CM10}/E_{c_exp}$	$E_{c_exp_AFGC}/E_{c_exp}$
Valor máximo	23389,70	9116,68	49893,73	44479,68	1,14	1,02
Valor mínimo	23367,19	8713,89	49463,27	44053,49	1,10	0,98
Valor medio	23376,02	8891,33	49632,10	44220,64	1,12	1,00
Desviación típica (σ)	12,01	205,62	229,75	227,47	0,03	0,02
C.de Variación (Cv)	0,05%	2,31%	0,46%	0,51%	2,25%	2,30%

Tabla VIII.70. Valores medios experimentales para el todos los hormigones de este trabajo

Hormigón (Todos los tipos y dosificaciones)	$E_{c_exp}/(f_c/10)^{0,3}$	$E_{c_exp}/(f_c)^{1/3}$	$E_{c_exp_EC2-CM10}$ (Mpa)	$E_{c_exp_AFGC}$ (Mpa)	$E_{c_exp_EC2-CM10}/E_{c_exp}$	$E_{c_exp_AFGC}/E_{c_exp}$
Valor máximo	23520,88	9746,60	52532,24	47103,05	1,20	1,07
Valor mínimo	23343,21	8288,47	49067,06	42062,88	1,02	0,91
Valor medio	23404,01	8903,59	50214,21	44407,85	1,12	0,99
Desviación típica (σ)	47,65	373,06	935,64	1336,06	0,05	0,05
C.de Variación (Cv)	0,20%	4,19%	1,86%	3,01%	4,27%	4,83%

A la vista de los resultados, utilizando expresiones similares a las empleadas por las recomendaciones, se proponen las siguientes ecuaciones:

- Para hormigones Tipo I con un 2% de volumen de fibras

$$(VIII.12) \quad E_{cm} = 23407 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0,3} \quad (\text{C.V.: } 0.22\%)$$

$$(VIII.13) \quad E_{cm} = 8879 \cdot (f_{cm})^{\frac{1}{3}} \quad (\text{C.V.: } 4.50 \%)$$

- Para hormigones Tipo II con un 2% de volumen de fibras

$$(VIII.14) \quad E_{cm} = 23413 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0,3} \quad (\text{C.V.: } 0.06\%)$$

$$(VIII.15) \quad E_{cm} = 9168 \cdot (f_{cm})^{\frac{1}{3}} \quad (\text{C.V.: } 2.95 \%)$$

- Para hormigones Tipo I con un 1% de volumen de fibras

$$(VIII.16) \quad E_{cm} = 23376 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0,3} \quad (\text{C.V.: } 0.05\%)$$

$$(VIII.17) \quad E_{cm} = 8891 \cdot (f_{cm})^{\frac{1}{3}} \quad (\text{C.V.: } 2.31\%)$$

- Para todos los hormigones de este trabajo

$$(VIII.18) \quad E_{cm} = 23404 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0,3} \quad (\text{C.V.: } 0.20\%)$$

$$(VIII.19) \quad E_{cm} = 8904 \cdot (f_{cm})^{\frac{1}{3}} \quad (\text{C.V.: } 4.19\%)$$

La expresión recomendada por el AFGC/SETRA (2013) [4] es para hormigones con fibras mientras que en la recogida en el Eurocódigo 2 [38] no se tiene en cuenta el efecto de las mismas en el cálculo del módulo de deformación. Ahora bien, una vez aplicadas ambas expresiones a los hormigones que se han fabricado en esta tesis doctoral, por los coeficientes de variación obtenidos se observa que se ajusta mejor la expresión definida en el Eurocódigo 2, (VIII.12), (VIII.14), (VIII.16) y (VIII.18)).

En el Anejo G se pueden encontrar los valores del cálculo efectuado para cada uno de los hormigones fabricados.

VIII.9. Rigidez efectiva

En el diagrama carga-desplazamiento ($V-\Delta$) se representa la respuesta del elemento suponiendo un comportamiento elástico y lineal de los materiales (sin fisuración) y teniendo en cuenta la no-linealidad de la geometría (Chen y Lui (1987) [33])

$$(VIII.20) \quad \Delta = \frac{V \cdot L_s^3}{3 \cdot EI_e} \left(\frac{1}{1 - \frac{N}{N_{cr}}} \right)$$

donde:

V es el cortante actuante en el soporte ménsula equivalente

N es la carga axial de compresión aplicada

L_s es la distancia entre las secciones de momento máximo y nulo en el soporte ménsula equivalente

N_{cr} es el axial crítico, $N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot EI_e}{(2L_s)^2}$

EI es la rigidez elástica de la sección:

$$(VIII.21) \quad EI = E_c I_c + E_s I_s$$

siendo:

E_c es el módulo de deformación del hormigón obtenido experimentalmente para cada soporte

I_c es el momento de inercia de la sección de hormigón, $I_c = \frac{1}{12} bh^3 - \sum A_{si} z_{si}^2$

E_s es el módulo de elasticidad obtenido experimentalmente para cada acero empleado

I_s es el momento de inercia de las armaduras en la sección, $I_s = \sum A_{si} z_{si}^2$

z_{si} es la posición desde el centro de gravedad de la sección homogénea al centro de gravedad de la armadura

A_{si} es el área de cada una de las armaduras

Con los datos obtenidos de forma experimental se obtiene el comportamiento elástico a nivel elemento, que incluye los efectos de segundo orden. Este comportamiento se representa en el diagrama $V-\Delta$, mostrándose un ejemplo del mismo en la Figura VIII.97. El resto se pueden consultar en el Anejo H.

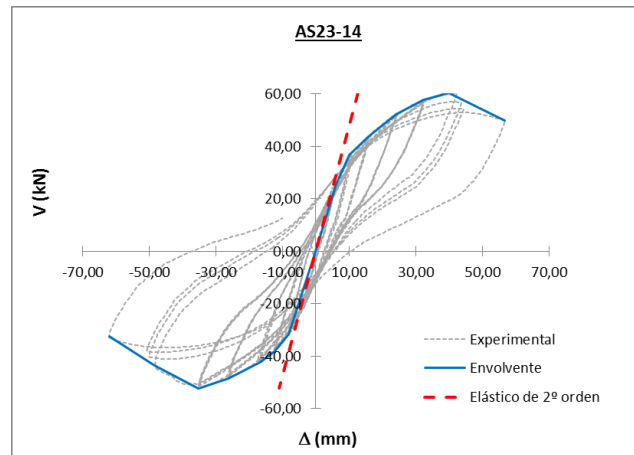


Figura VIII.97. Diagrama V-Δ. Comportamiento elástico de 2º orden

Además, suponiendo un comportamiento elástico y lineal, también se puede representar la respuesta de la sección a partir de los resultados obtenidos experimentalmente mediante el diagrama M-φ.

$$(VIII.22) \quad M = EI \cdot \phi'$$

donde:

M es el momento flector actuante

φ' es la curvatura obtenida para cada nivel de flector

EI es la rigidez elástica de la sección (VIII.21)

En la Figura VIII.98 se puede observar un ejemplo de la recta que representa la rigidez elástica en el comportamiento a nivel sección en un diagrama momento-curvatura (M-φ) obtenido experimentalmente. En el Anejo H se encuentra el resto de diagramas.

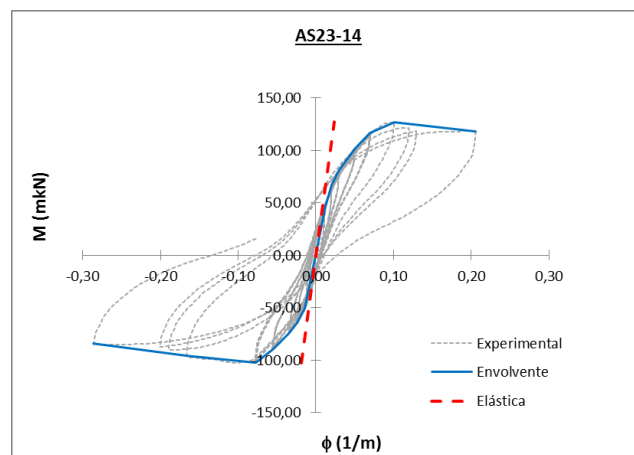


Figura VIII.98. Diagrama M-φ. Comportamiento elástico

En este apartado, se empleará el subíndice “e” para identificar el factor de rigidez obtenido del análisis a nivel elemento (α_e), y el subíndice “s” para el factor de rigidez a nivel sección (α_s).

A partir de los diagramas idealizados de las envolventes V-Δ ó M-φ puede deducirse la rigidez elástica efectiva a nivel elemento (EI_e) o a nivel sección (EI_s), respectivamente. Para los tres métodos aplicados: método aproximado (MA), balance de energía (BE) y el recogido en el Eurocódigo 8 (EC8).

En este apartado se analizará la diferencia entre la rigidez de la sección o del elemento en sección integra y la rigidez elástica efectiva a partir de la evaluación del factor de rigidez, tanto a nivel sección (α_s) como a nivel elemento (α_e), que tiene en cuenta los efectos de comportamiento no-lineal de los materiales correspondientes a la rama de ascenso, como son la fisuración y el efecto *tension-stiffening*, entre otros.

Los factores de rigidez, α_s y α_e , se deducen a partir de las expresiones (VIII.23) y (VIII.24), donde EI_e y EI_s son valores experimentales, y $E_c I_c$ y $E_s I_s$ son los valores teóricos de la rigidez del hormigón y del acero, respectivamente.

Con una simple igualdad de rigideces se puede obtener dicho factor.

$$(VIII.23) \quad EI_e = \alpha_e \cdot E_c I_c + E_s I_s$$

$$(VIII.24) \quad EI_s = \alpha_s \cdot E_c I_c + E_s I_s$$

donde:

E_c es el módulo de deformación del hormigón

I_c es el momento de inercia de la sección de hormigón respecto al centro de gravedad de la sección, $I_c = \frac{1}{12}bh^3 - \sum A_{si}z_{si}^2$

E_s es el módulo de elasticidad del acero

I_s es el momento de inercia de las armaduras respecto al centro de gravedad de la sección, $I_s = \sum A_{si}z_{si}^2$

z_{si} es la posición desde el centro de gravedad de la sección homogénea al centro de gravedad de la armadura

A_{si} es el área de cada una de las armaduras

Para este análisis se han utilizado los módulos de los materiales que se han obtenido mediante los ensayos de control de los mismos realizados en fase de ensayo. Los valores están recogidos tanto en las Fichas de materiales (Anejo A) como en el Capítulo IV (Tablas IV.11, IV.12, y IV.13).

A nivel elemento, el modelo estructural empleado en el programa experimental permite analizar el comportamiento del soporte como si fuese un soporte en ménsula (Figura VIII.99).

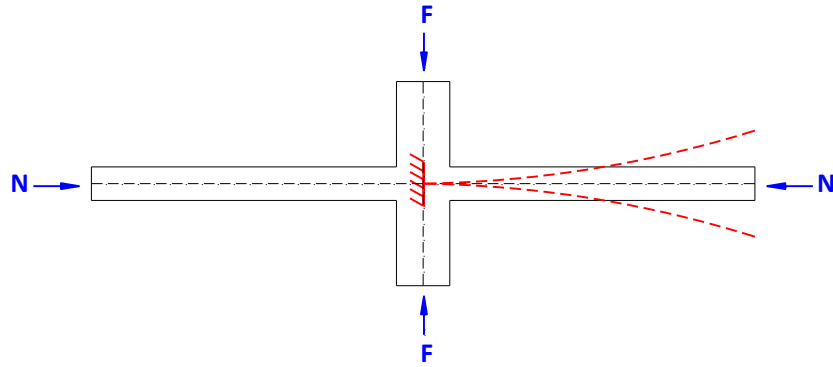


Figura VIII.99. Esquema estructural empleado

Si se consideran despreciables los efectos de segundo orden, el desplazamiento elástico efectivo se deduce teóricamente a partir de la expresión (VIII.25), de donde se puede obtener la rigidez elástica efectiva del elemento (EI_e).

$$(VIII.25) \quad \Delta_y = \frac{V \cdot L_s^3}{3 \cdot EI_e}$$

Ahora bien, esta expresión no tiene en cuenta los efectos de segundo orden (P- Δ) que aparecen debido a la actuación de un esfuerzo axial de compresión en la posición deformada, tal y como se representa en la Figura VIII.100.

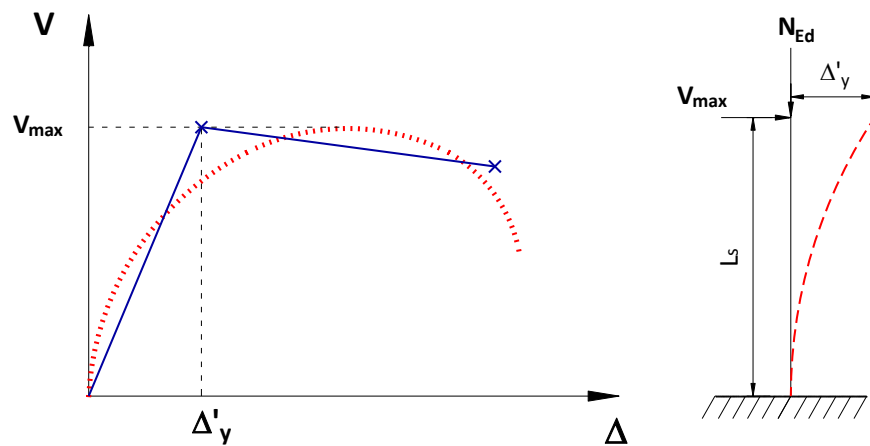


Figura VIII.100. Esquema del soporte en ménsula en posición deformada

En este trabajo se ha seleccionado un rango tanto para el parámetro de esbeltez, λ_v (5.77, 10.7), como para el axil reducido, ν (0, 0.4), de modo que no se pueden despreciar los efectos de segundo orden debido a este motivo.

Para tenerlo en cuenta se incrementa el valor del desplazamiento elástico con un factor de amplificación, función del axil aplicado y del axil crítico del elemento, que es a su vez función de la rigidez del mismo (Chen y Lui (1987) [33]).

$$(VIII.26) \quad \Delta'_y = \frac{V_{max} \cdot L_s^3}{3 \cdot EI_e} \cdot \left(\frac{1}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_B}} \right)$$

donde:

N_{Ed} es el axil aplicado en el extremo del soporte

N_B es el axil crítico, en el caso del soporte en ménsula; se obtiene a partir de la siguiente expresión, donde l_0 es la longitud de pandeo del soporte ($l_0 = 2 \cdot L_s$):

$$(VIII.27) \quad N_B = \frac{\pi^2 \cdot EI_e}{(l_0)^2}$$

Despejando de la ecuación (VIII.26) el valor de la rigidez elástica efectiva del elemento resulta la ecuación (VIII.28).

$$(VIII.28) \quad EI_e = \frac{V_{max} \cdot L_s^3 \cdot \pi^2 + 12 \cdot \Delta'_y \cdot N_{Ed} \cdot L_s^2}{\Delta'_y \cdot 3 \cdot \pi^2}$$

Conocido este valor para cada soporte y en cada método idealizado se obtendrá el factor de rigidez del elemento (α_e) sin más que despejarlo de la ecuación (VIII.23).

$$(VIII.29) \quad \alpha_e = \frac{EI_e - E_s I_s}{E_c I_c}$$

En la Tabla VIII.71 se recopilan los valores obtenidos.

Tabla VIII.71. Valores del factor de rigidez a nivel elemento (α_e) obtenidos experimentalmente para cada método de idealización

Referencia	MA $EI_e(\text{kN}\cdot\text{m}^2)$	MA α_e	BE $EI_e(\text{kN}\cdot\text{m}^2)$	BE α_e	EC8 $EI_e(\text{kN}\cdot\text{m}^2)$	EC8 α_e
AS11-1	9616,86	0,91	9258,37	0,87	8361,41	0,78
AS11-2R	8365,42	0,83	7979,54	0,79	6519,04	0,63
AS11-3	9298,79	0,87	8961,90	0,84	7846,36	0,73
AS11-4	8433,77	0,82	7731,20	0,75	5940,44	0,56
AS11-5	8348,49	0,81	7747,05	0,75	6947,85	0,66
AS11-6	8259,63	0,77	7904,98	0,74	5878,08	0,53
AS11-7	8343,80	0,78	8083,37	0,76	6361,41	0,58
AS11-8	9627,90	0,87	9073,87	0,82	7361,96	0,65
AS11-9	6497,76	0,85	6183,81	0,81	5097,66	0,65
AS21-10	4125,94	0,78	4031,32	0,76	3093,58	0,56
AS31-11	1419,08	0,90	1357,25	0,86	977,81	0,60
AS21-12	4434,82	0,82	4004,16	0,73	3580,08	0,65
AS21-13	3746,47	0,72	3603,16	0,69	3257,37	0,62
AS23-14	3918,33	0,69	3832,54	0,67	3062,27	0,51
AS24-15	3741,49	0,66	3757,20	0,66	3490,28	0,59
AS13-16	9141,52	0,85	8473,88	0,78	7032,44	0,62
BS11-17	9192,94	0,84	8750,91	0,80	8197,00	0,74
BS11-18	8212,87	0,77	7646,92	0,71	6848,45	0,63
BS13-19	9417,13	0,86	9035,11	0,82	8445,19	0,76
AS11-20	8086,86	0,82	7716,73	0,78	6394,71	0,64
AS11-21	7946,49	0,81	7623,28	0,77	7137,21	0,72
AS11-22	7953,72	0,82	7416,28	0,76	6341,61	0,64
AS21-23	4180,30	0,93	3988,72	0,89	3271,56	0,72
AS21-24	4168,58	0,90	4063,29	0,87	4015,08	0,86
AS11-25	9367,93	0,94	8805,73	0,88	8628,29	0,86
Valor máximo	9627,90	0,94	9258,37	0,89	8628,29	0,86
Valor mínimo	1419,08	0,66	1357,25	0,66	977,81	0,51
Valor medio	7033,88	0,83	6681,22	0,78	5763,49	0,66
Percentil (5 %)	2115,81	0,67	2031,02	0,66	1603,15	0,52
Percentil (95 %)	9624,59	0,94	9203,02	0,89	8573,36	0,86
Desviación típica (σ)	2469,39	0,07	2318,07	0,06	2101,58	0,09
C. de Variación (Cv %)	35,11%	8,50%	34,70%	8,22%	36,46%	13,91%

MA: Método Aproximado; BE: Balance de Energía; EC8: Eurocódigo 8

A nivel sección, la expresión para obtener la rigidez elástica efectiva en la sección crítica (EI_s) es más directa (véase la ecuación (VIII.30)). Dicha rigidez se obtiene a partir del valor máximo del momento flector y de la curvatura elástica.

$$(VIII.30) \quad EI_s = \frac{M}{\phi_y}$$

Aplicados los métodos de idealización a los distintos soportes, se obtienen los factores de rigidez efectiva a nivel sección (α_s).

$$(VIII.31) \quad \alpha_s = \frac{EI_s - E_s I_s}{E_c I_c}$$

En la Tabla VIII.72 se pueden encontrar los valores del factor de rigidez α_s .

Tabla VIII.72. Valores del factor de rigidez a nivel sección (α_s) obtenidos experimentalmente para cada método de idealización

Referencia	MA Els (kN·m ²)	MA α_s	BE Els (kN·m ²)	BE α_s	EC8 Els (kN·m ²)	EC8 α_s
AS11-1	7142,33	0,66	7021,90	0,65	5032,70	0,44
AS11-2R	4143,21	0,38	4072,58	0,37	2995,19	0,25
AS11-3	5667,49	0,51	5305,27	0,47	4382,04	0,38
AS11-4	4979,37	0,46	4928,60	0,45	3558,21	0,31
AS11-5	4630,49	0,42	4191,30	0,37	3246,78	0,27
AS11-6	4650,75	0,41	4414,51	0,38	3146,47	0,25
AS11-7	4831,46	0,43	4361,74	0,38	3214,82	0,26
AS11-8	5430,66	0,47	4984,60	0,42	3506,56	0,28
AS11-9	5229,27	0,67	4902,99	0,62	3429,87	0,40
AS21-10	2523,87	0,44	2568,69	0,45	1726,45	0,28
AS31-11	908,27	0,56	865,10	0,53	673,44	0,40
AS21-12	1784,90	0,29	1505,33	0,23	1401,74	0,21
AS21-13	1049,89	0,15	862,31	0,11	844,43	0,11
AS23-14	2104,52	0,31	2199,19	0,33	1768,81	0,23
AS24-15	2071,80	0,25	2233,01	0,29	2049,06	0,24
AS13-16	5800,62	0,49	5596,76	0,47	3538,67	0,26
BS11-17	4748,97	0,39	4475,21	0,36	3943,36	0,31
BS11-18	4530,60	0,38	4333,00	0,36	3435,17	0,27
BS13-19	4243,97	0,30	4279,80	0,30	3483,55	0,21
AS11-20	3920,45	0,36	3672,22	0,33	2822,18	0,24
AS11-21	3731,06	0,34	3608,37	0,33	3191,80	0,28
AS11-22	3812,15	0,36	3684,54	0,34	2795,52	0,24
AS21-23	2671,87	0,57	2431,09	0,51	2031,83	0,42
AS21-24	3951,77	0,85	3908,79	0,84	4238,44	0,91
AS11-25	4028,75	0,37	3324,75	0,29	3388,05	0,30
Valor máximo	7142,33	0,85	7021,90	0,84	5032,70	0,91
Valor mínimo	908,27	0,15	862,31	0,11	673,44	0,11
Valor medio	3943,54	0,43	3749,27	0,41	2953,81	0,31
Percentil (5 %)	950,76	0,18	863,15	0,15	724,74	0,14
Percentil (95 %)	6739,82	0,79	6594,36	0,78	4837,51	0,77
Desviación típica (σ)	1545,27	0,15	1483,47	0,15	1077,44	0,15
C. de Variación (Cv %)	39,18%	34,26%	39,57%	35,88%	36,48%	47,15%

MA: Método Aproximado; BE: Balance de Energía; EC8: Eurocódigo 8

Tal y como puede observarse, el factor de rigidez a nivel elemento (α_e) es superior al de la sección (α_s). Dicha diferencia se explica por el diferente comportamiento que tiene el soporte en servicio y a partir de la plastificación de los materiales. Experimentalmente, para las cargas de servicio se observa una fisuración distribuida (multifisuración), mientras que al plastificar se produce una fisuración discreta (en su sección crítica) pero siendo distribuida en el resto de las secciones. La diferencia entre la rigidez a nivel elemento y a nivel sección dependerá de la concentración de las deformaciones de los materiales en la zona de daño del elemento que se sitúa alrededor de la sección crítica del soporte. Así, si se representa la relación de ambos factores de rigidez (α_s/α_e) frente a la longitud de daño (l_{cr}) visualmente observada, adimensionalizada con el canto de la sección, se observa que a menor longitud de daño es mayor la diferencia entre los factores de rigidez (Figura VIII.101). Ello significa que en el caso en que el daño del soporte se concentre en una zona muy reducida, la rigidez del elemento tiende a la del comportamiento en sección íntegra, y viceversa, a mayor longitud de daño la rigidez del elemento tiende al del comportamiento en sección fisurada. Esto se puede explicar a partir del método general de cálculo de flechas (Figura VIII.102, (VIII.32)).

$$(VIII.32) \quad \Delta = \int_0^L \bar{M} \cdot \phi \, dz = \int_0^L \bar{M} \cdot \phi_e \, dz + \int_0^{l_{cr}} \bar{M} \cdot \phi_p \, dz$$

donde:

\bar{M} es el momento correspondiente a una carga lateral unitaria situada en el extremo del soporte

ϕ_e y ϕ_p son las curvaturas elástica y plástica

l_{cr} es la longitud crítica

L es la longitud del soporte

Si la longitud crítica de daño es muy pequeña, el segundo término de la expresión (VIII.32) tiene muy poco peso y, en consecuencia, la rigidez del elemento tiende a la de la sección íntegra.

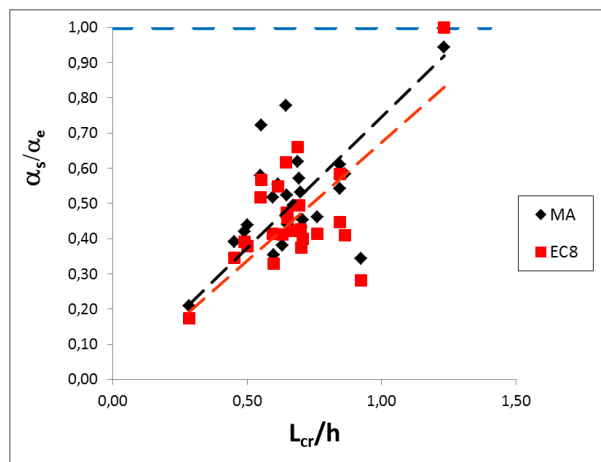


Figura VIII.101. Comparativa de los factores de rigidez frente a la longitud de daño

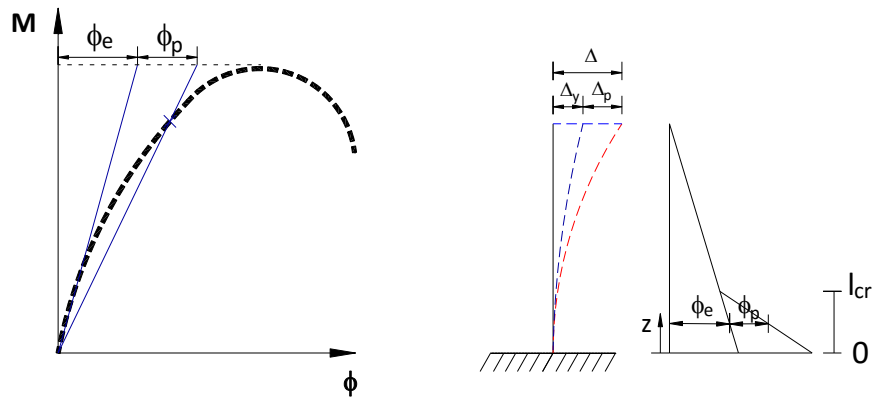


Figura VIII.102. Comportamiento y distribución de curvaturas

Aunque los cálculos de los factores de rigidez que arroja la idealización mediante el método del balance de energía se han incluido en este apartado, no se van a tener en cuenta en el análisis de este factor, ya que son bastante parecidos a los obtenidos mediante el método aproximado.

A continuación, se va a analizar la influencia en los factores de rigidez, tanto a nivel elemento como a nivel sección, de los parámetros de estudio planteados en esta tesis doctoral. Dichos parámetros son: la separación de la armadura transversal (s_t), el tipo de fibras añadido a la dosificación del hormigón (Tipo I y II), el volumen de fibras de la masa de hormigón (V_f), la esbeltez del soporte (λ_v), el nivel de axil aplicado (v), la cuantía de la armadura longitudinal (ρ_l) y el recubrimiento relativo (r/h).

Se realiza este análisis para los métodos idealizados mediante el método aproximado y el recogido en el Eurocódigo 8, el primero por su facilidad de aplicación y, el segundo por definir el comienzo de la no-linealidad a partir de la plastificación de los materiales, lo que aporta información muy directa sobre el estado del soporte. Para cada parámetro anteriormente comentado se han calculado los valores del factor de rigidez y se han representado tanto a nivel sección como a nivel elemento.

Cuando lo que se varía es la separación entre la armadura transversal (Tabla VIII.73, Figura VIII.103), el factor de rigidez elástica α tiene una variación muy leve, lo que se plasma tanto a nivel sección como a nivel elemento en una ligera disminución de su valor.

Tabla VIII.73. Valores del factor α . Separación de la armadura transversal (s_t)

SEPARACIÓN A. TRANSVERSAL		MÉTODO APROXIMADO		MÉTODO EUROCÓDIGO 8	
Referencia	s_t	α_e	α_s	α_e	α_s
AS11-3	0,1	0,87	0,51	0,73	0,38
AS11-2R	0,2	0,83	0,38	0,63	0,25
AS11-1	0,3	0,91	0,66	0,78	0,44
AS11-22	0,3	0,82	0,36	0,64	0,24
AS11-20	0,4	0,82	0,36	0,64	0,24
AS11-21	0,5	0,81	0,34	0,72	0,28

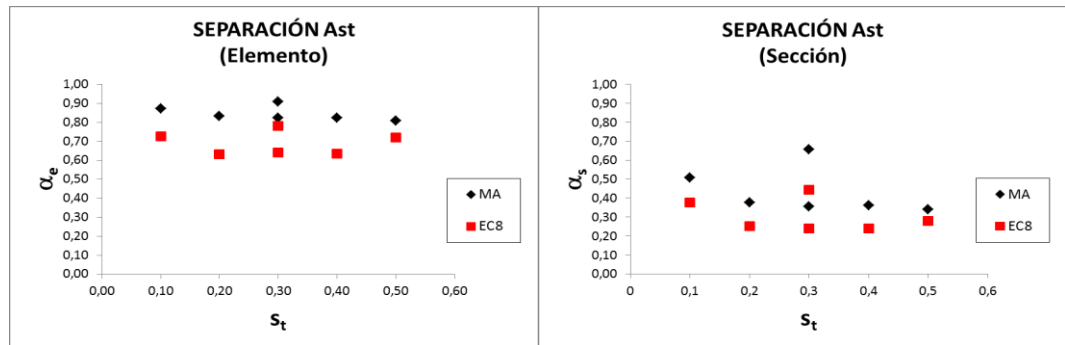


Figura VIII.103. Factor de Rigidez. Separación de armadura transversal

En la Tabla VIII.74 y en la Figura VIII.104 se analiza el efecto del tipo de fibras empleadas en la dosificación. Se observa que este parámetro no influye en la rigidez elástica efectiva, tanto del elemento como de la sección, puesto que el tipo de fibras tiene influencia en el comportamiento post-pico y no en la rama ascendente.

Siguiendo con la dosificación del hormigón, si se mantiene constante el tipo de las mismas, las mixtas (Tipo I), y lo que se varía es la cantidad de fibras en la matriz del hormigón, con un 2% y un 1 % de volumen (Tabla VIII.75, Figura VIII.105), el factor de rigidez es independiente de este parámetro, tanto a nivel elemento como a nivel sección.

El efecto del tipo de fibras y el del volumen de fibras de acero aportadas a la matriz están incluidos en el módulo de deformación, de ahí que no se observe ninguna dependencia.

Tabla VIII.74. Valores del factor α . Tipo de Fibras

TIPO DE FIBRA			MÉTODO APROXIMADO		MÉTODO EUROCÓDIGO 8	
Referencia	Tipo Fibras	s_t	α_e	α_s	α_e	α_s
AS11-3	I	0,1	0,87	0,51	0,73	0,38
AS11-2R	I	0,2	0,83	0,38	0,63	0,25
AS11-1	I	0,3	0,91	0,66	0,78	0,44
AS11-22	I	0,3	0,82	0,36	0,64	0,24
AS11-6	II	0,1	0,77	0,41	0,53	0,25
AS11-5	II	0,2	0,81	0,42	0,66	0,27
AS11-4	II	0,3	0,82	0,46	0,56	0,31

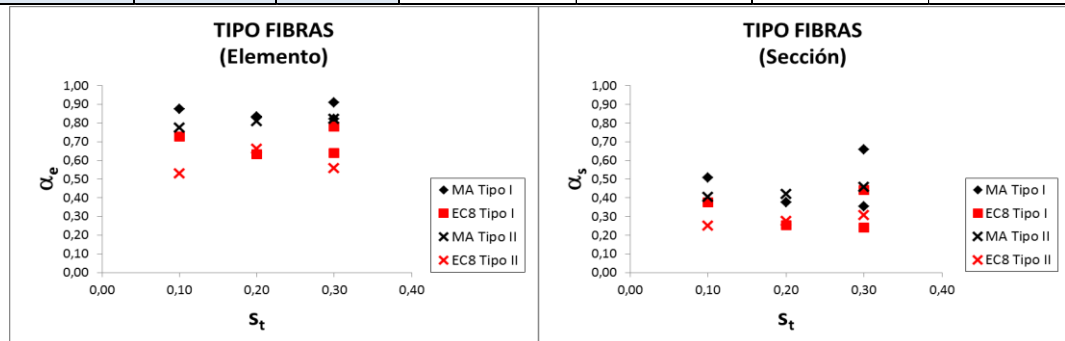


Figura VIII.104. Factor de Rigidez. Tipo de Fibras

Tabla VIII.75. Valores del factor α . Volumen de Fibras

VOLUMEN DE FIBRAS			MÉTODO APROXIMADO		MÉTODO EUROCÓDIGO 8	
Referencia	Vol Fibras	s_t	α_e	α_s	α_e	α_s
AS11-3	2%	0,1	0,87	0,51	0,73	0,38
AS11-2R	2%	0,2	0,83	0,38	0,63	0,25
AS11-1	2%	0,3	0,91	0,66	0,78	0,44
AS11-22	2%	0,3	0,82	0,36	0,64	0,24
AS11-9	1%	0,1	0,85	0,67	0,65	0,40
AS11-8	1%	0,2	0,87	0,47	0,65	0,28
AS11-7	1%	0,3	0,78	0,43	0,58	0,26

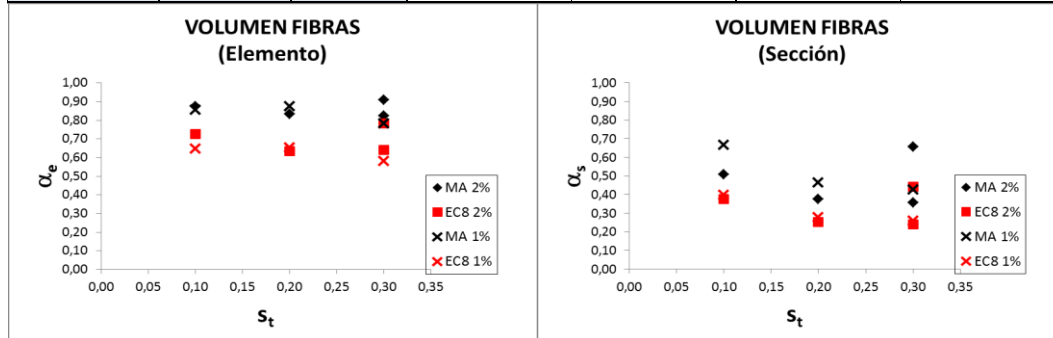


Figura VIII.105. Factor de Rigidez. Volumen de Fibras

La Tabla VIII.76 y la Figura VIII.106 muestran los valores obtenidos para la esbeltez a cortante. A nivel elemento se ha independizado el cálculo del factor de rigidez (α_e) de los efectos de segundo orden P- Δ , y en consecuencia la rigidez del elemento no depende de la esbeltez. A nivel sección, que es independiente de la esbeltez, la tendencia observada se corresponde con la diferencia del recubrimiento relativo entre los soportes.

Tabla VIII.76. Valores del factor α . Esbeltez (λ_v)

ESBELTEZ		MÉTODO APROXIMADO		MÉTODO EUROCÓDIGO 8	
Referencia	λ_v	α_e	α_s	α_e	α_s
AS11-2R	5,77	0,83	0,38	0,63	0,25
AS21-10	7,5	0,78	0,44	0,56	0,34
AS31-11	10,7	0,90	0,56	0,60	0,40

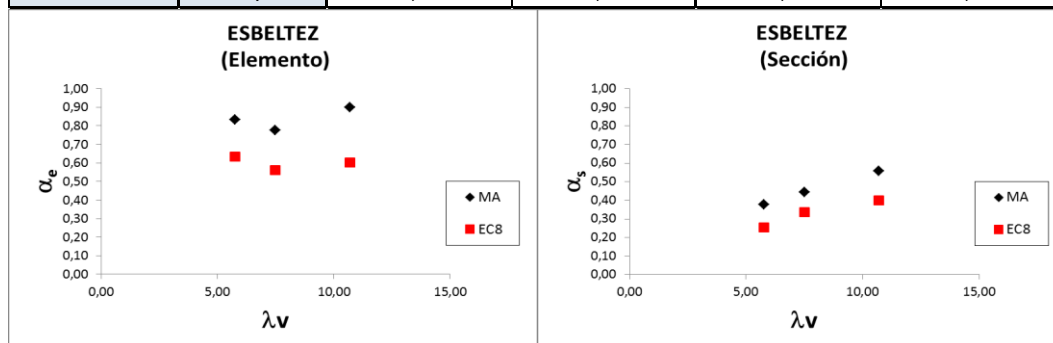


Figura VIII.106. Factor de Rigidez. Esbeltez

Donde se aprecia una tendencia clara es cuando se analiza el factor de rigidez para distintos niveles de axil (Tabla VIII.77, Figura VIII.107). Como cabría esperar, a nivel sección, se observa un aumento de rigidez, asociado al aumento del nivel de axil de compresión aplicado. A nivel

elemento, se observa que cuando el nivel de axil es bajo el factor de rigidez parece no verse afectado; ahora bien, superado un cierto umbral de axil de compresión, la rigidez va aumentando gradualmente con el nivel de compresión, como era previsible. Esto se observa más claramente con los valores obtenidos idealizando la envolvente con el modelo recogido por el Eurocódigo 8, frente al observado por la idealizada mediante el método aproximado.

Tabla VIII.77. Valores del factor α . Nivel de axil aplicado (v)

NIVEL DE AXIL		MÉTODO APROXIMADO		MÉTODO EUROCÓDIGO 8	
Referencia	v	α_e	α_s	α_e	α_s
AS21-13	0	0,72	0,15	0,62	0,11
AS21-12	0,1	0,82	0,29	0,65	0,21
AS21-10	0,2	0,78	0,44	0,56	0,34
AS21-23	0,3	0,93	0,57	0,72	0,42
AS21-24	0,4	0,90	0,85	0,86	0,91

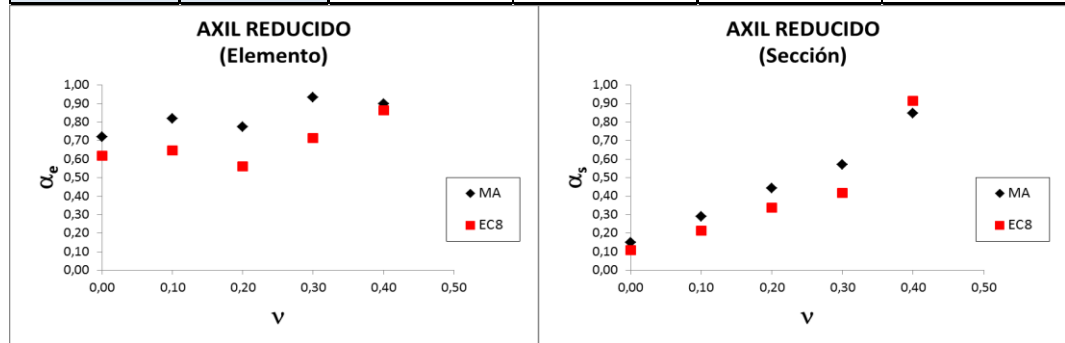


Figura VIII.107. Factor de Rigidez. Axil Reducido

En la Tabla VIII.78, y en la Figura VIII.108, se recopila la Serie 3 que reúne a los soportes con distinta cuantía de armadura longitudinal. En este caso, a nivel elemento no se observa una gran influencia del factor de rigidez, pues su influencia en la rigidez ya se tiene en cuenta en la rigidez de la armadura ($E_s I_s$), mientras que a nivel sección se aprecia una disminución del factor con respecto a la cuantía.

Tabla VIII.78. Valores del factor α . Cuantía de armadura longitudinal (ρ)

CUANTÍA A_s (A. LONG.)		MÉTODO APROXIMADO		MÉTODO EUROCÓDIGO 8	
Referencia	ρ	α_e	α_s	α_e	α_s
AS21-10	1,05	0,78	0,44	0,56	0,34
AS23-14	2,68	0,69	0,31	0,51	0,23
AS24-15	4,19	0,66	0,25	0,59	0,24

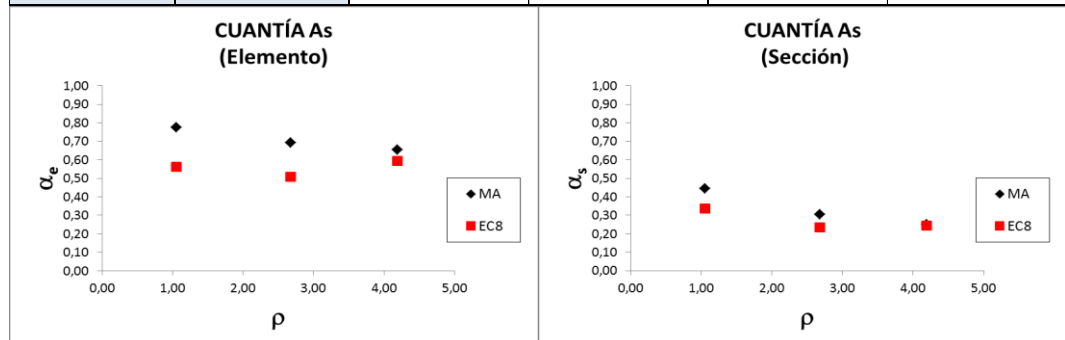


Figura VIII.108. Factor de Rigidez. Cuantía de Armadura longitudinal

En la Tabla VIII.79 y en la Figura VIII.109 se muestran los valores de los factores de rigidez obtenidos a nivel elemento y sección para el recubrimiento relativo (r/h). Tanto en un caso como en otro, no se observan tendencias claras. Aunque un menor recubrimiento relativo da lugar a un mayor canto útil de la sección y, en consecuencia, se debería observar un aumento de la rigidez, solo se aprecia esa tendencia en el factor de rigidez a nivel elemento, cuando la separación de la armadura transversal es de 0.30 m y la cuantía de la armadura longitudinal es del 2.06 %.

Tabla VIII.79. Valores del factor α . Recubrimiento relativo (r/h)

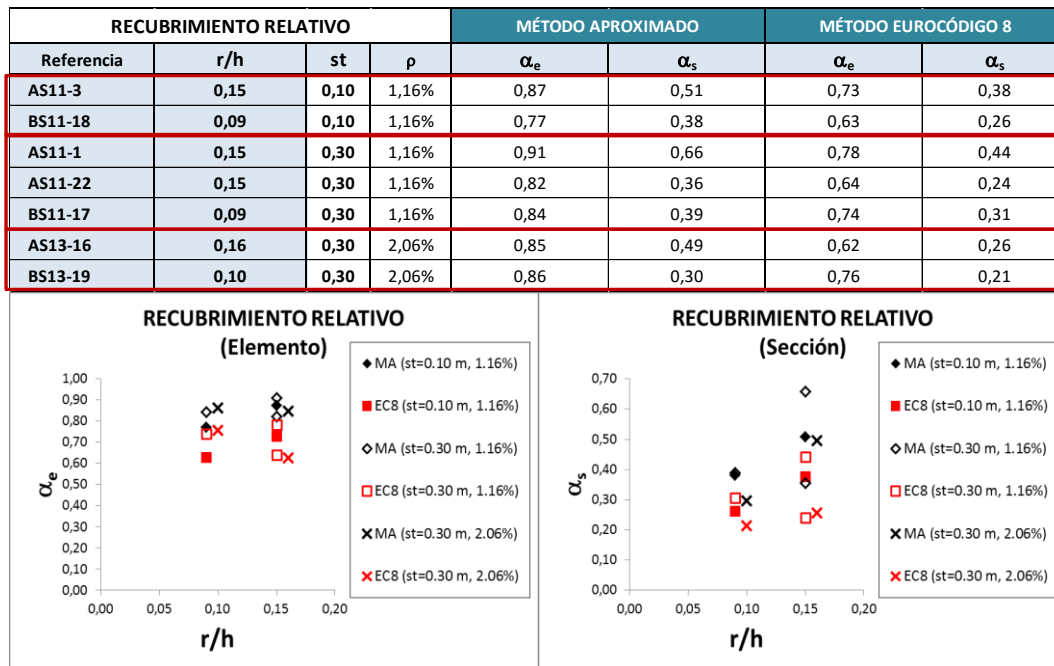


Figura VIII.109. Factor de Rigidez. Recubrimiento Relativo

Por último, se analiza el factor de rigidez frente al tipo de carga lateral aplicada (Tabla VIII.80, Figura VIII.110). A la vista de los resultados obtenidos bajo la actuación de una carga monótonica, la rigidez a nivel sección es levemente inferior a la obtenida en los soportes ensayados bajo la actuación de carga cíclica.

Tabla VIII.80. Valores del factor α . Tipo de carga

TIPO DE CARGA		MÉTODO APROXIMADO		MÉTODO EUROCÓDIGO 8	
Referencia	Tipo de Carga	α_e	α_s	α_e	α_s
AS11-1	Cíclica	0,91	0,66	0,78	0,44
AS11-22	Cíclica	0,82	0,36	0,64	0,24
AS11-25	Monotónica	0,94	0,37	0,86	0,30

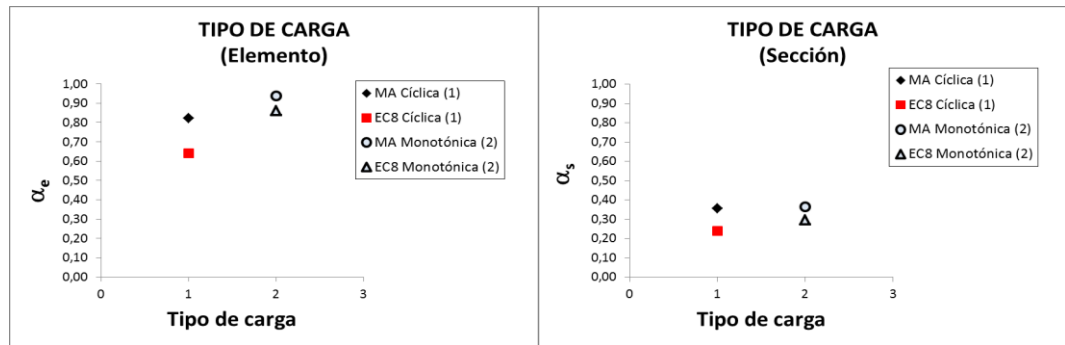


Figura VIII.110. Factor de Rigidez. Tipo de carga

A la vista de todos los resultados se puede concluir que, a nivel elemento, el factor de rigidez (α_e) depende en gran medida del nivel de axil y se muestra prácticamente independiende del resto de los parámetros. Por dicha razón, en esta tesis doctoral se va proponer una primera aproximación a una expresión que permita relacionar el factor de rigidez del elemento con el nivel de axil aplicado.

A la vista de la gráfica representada en la Figura VIII.107 se observa que hasta un axil reducido de 0.2 el valor del factor α_e es más o menos constante. Se procede a ajustar la propuesta con el Eurocódigo 8 ya que arroja una tendencia más clara que la obtenida mediante el método aproximado.

Se adopta el valor medio correspondiente a los niveles iniciales de axil ($\alpha_e = 0.60$) para niveles de v entre 0 y 0.2. A partir de ese punto se ajusta una recta (VIII.33) de modo que α_e aumenta de forma lineal con v .

$$(VIII.33) \quad \alpha_e = 1.27 \cdot v + 0.35 \nless 0.60 \quad (0 \leq v \leq 0.40)$$

En la Tabla VIII.81 y en la Figura VIII.111 se puede observar el resultado del ajuste de esta primera aproximación.

Tabla VIII.81. Propuesta del Factor de Rigidez, α_e

PROPUESTA		MÉTODO EUROCÓDIGO 8	
Referencia	v	α_e	α_e Propuesto
AS21-13	0	0,62	0,61
AS21-12	0,1	0,65	0,61
AS21-10	0,2	0,56	0,61
AS21-23	0,3	0,72	0,73
AS21-24	0,4	0,86	0,86
Pendiente	0,5	-	0,99

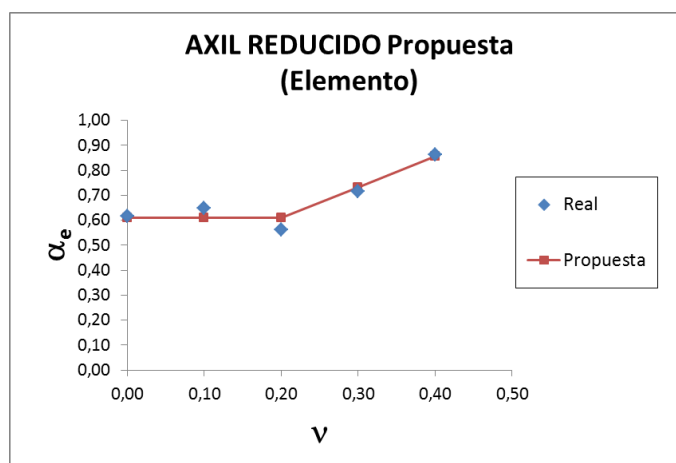


Figura VIII.111. Propuesta para el Factor de Rigidez (α_e). Nivel de axil

En esta tesis doctoral se ha alcanzado como nivel máximo de axil de compresión el que corresponde a $\nu=0.4$. Es por ello que se considera oportuno que futuras investigaciones aborden niveles de axil superiores para el mismo elemento, ya que la propuesta planteada debe tener una cota superior bloqueando el factor de rigidez del nivel de compresiones aplicado. Se apunta que dicho valor de ν estará un poco por encima de $\nu = 0.5$, pues para ese valor de ν se alcanza la situación cercana a la que el factor tiende a 1, siendo este el mayor valor posible que puede alcanzar, bloqueando el comportamiento. Evidentemente, esto es solo un acercamiento, y se debería realizar una investigación más exhaustiva que corrobore y ajuste mejor esta propuesta.

VIII.10. Longitud equivalente de la rótula plástica

En elementos de hormigón armado sometidos a esfuerzos de flexión, la deformación está localizada en una pequeña zona que se conoce como rótula plástica, donde se produce la plastificación del elemento.

Dentro de la literatura científica existen distintos términos y conceptos para definir la zona crítica y la rótula plástica (Pam y Ho (2009) [89]). Se puede definir la longitud de la zona de daño mediante tres longitudes (Figura VIII.112):

- La longitud de daño visual ($L_{\text{daño}}$)
- La longitud de plastificación, definida como la distancia definida por el corte de la curvatura del elemento con la curvatura elástica (L_p)
- La longitud equivalente de la rótula plástica, donde se acumula toda la curvatura plástica (l_p ó L_p^{equiv})

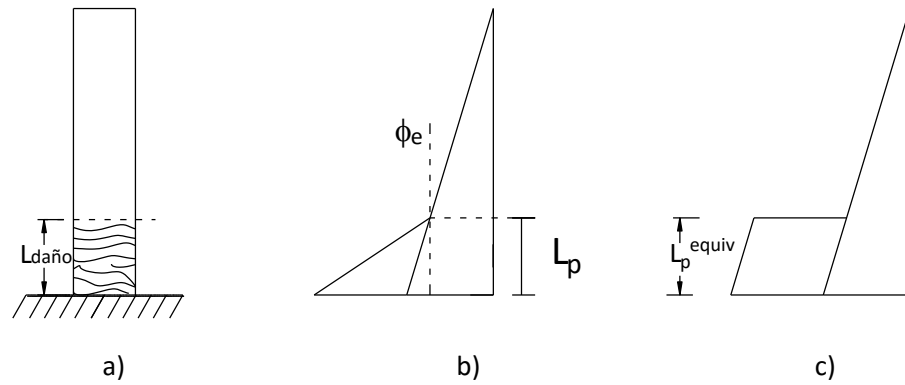


Figura VIII.112. Logitud de la zona de daño. Tipos

La generación de esta rótula plástica está directamente relacionada con la carga actuante y la capacidad de deformación del elemento. El conocimiento de dónde y en qué longitud se produce dicha zona ha sido, y es, de gran interés en la comunidad investigadora del campo del hormigón, resultando, por tanto, la longitud de plastificación, un parámetro de diseño muy importante. Ahora bien, el estudio de su comportamiento es complejo fundamentalmente debido a la alta no-linealidad de los materiales que conforman el elemento y a su interacción, y a la localización de esas deformaciones.

Para elementos tipo soportes, en la campo de la ductilidad, es habitual relacionar los índices de ductilidad, tanto a nivel elemento como a nivel sección, a través de la longitud de la rótula plástica, aunque según se puede corroborar en la bibliografía, existe varias propuestas relativas a los valores a adoptar por este parámetro.

En esta línea existen modelos analíticos simplificados que permiten determinar el desplazamiento último del extremo de un soporte en ménsula sometido a flexión a partir de la capacidad de deformación de la sección y de la longitud de la rótula plástica.

Un ejemplo es el propuesto por varias investigaciones, entre ellas la de Priestley y Park (1987) [102], donde a partir del comportamiento a nivel sección se puede deducir la longitud de la rótula plástica; y viceversa, si se conocen mediante el cálculo seccional las curvaturas elástica y última, así como un valor de la longitud de la rótula plástica, se puede deducir mediante una simple expresión (VIII.34), el desplazamiento último del soporte (Figura VIII.113).

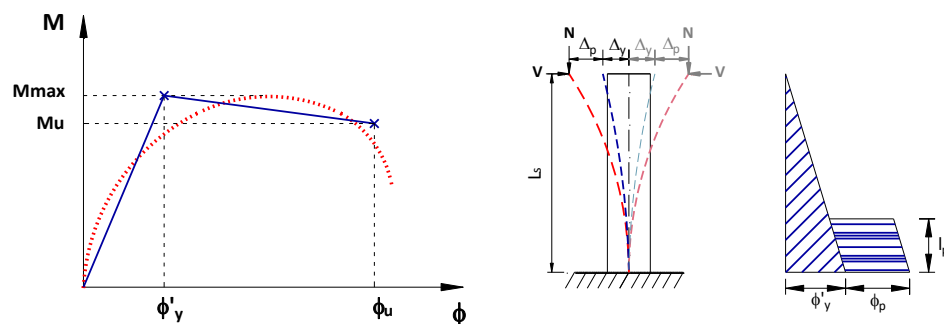


Figura VIII.113. Modelo en ménsula. Priestley y Park [102]

$$(VIII.34) \quad \Delta_u = \Delta_y + \Delta_p = \frac{\phi'_y \cdot L_s^2}{3} + (\phi_u - \phi'_y) \cdot l_p \cdot (L_s - 0.5 \cdot l_p)$$

donde:

Δ_y , Δ_p y Δ_u son los desplazamientos elástico, plástico y último, respectivamente.

ϕ'_y , ϕ_p y ϕ_u son la curvatura elástica, plástica y última, respectivamente.

L_s es la longitud del soporte en ménsula equivalente

l_p es la longitud equivalente de la rótula plástica

En los apartados siguientes se va a calcular el valor de la longitud de la rótula plástica (l_p), despejando de la ecuación (VIII.34), para los distintos métodos de idealización de la envolvente (método aproximado, método del balance de energía y el método recogido en el Eurocódigo 8).

Con los valores obtenidos se realizará un análisis de la influencia de los diversos parámetros de estudio propuestos en el Capítulo IV, así como la comparativa con los valores obtenidos mediante expresiones existentes en la bibliografía, la normativa existente y la realmente observada a la hora de realizar los ensayos.

VIII.10.1. Análisis paramétrico de los resultados experimentales obtenidos

De los modelos planteados para idealizar las envolventes de comportamiento, tanto a nivel elemento como a nivel sección, se pueden obtener los valores de los desplazamientos y curvaturas tanto elásticas como últimas. Por ello, para esos valores es sencillo obtener un valor de la longitud equivalente de la rótula plástica, sin más que despejar ese parámetro de la expresión (VIII.34) y resolver la siguiente ecuación de segundo grado (VIII.35).

$$(VIII.35) \quad 0.5 \cdot l_p^2 - 1.5 \cdot l_p + \frac{(\Delta_u - \Delta'_y)}{(\phi_u - \phi_y)} = 0$$

Cabría destacar aquí que el valor obtenido de l_p no está independizado del efecto de segundo orden debido al efecto P- Δ y a que los valores obtenidos por la instrumentación son en la posición deformada del soporte. En la Tabla VIII.82 se muestran los resultados obtenidos para los distintos métodos de análisis.

Tabla VIII.82. Valores de la longitud de la rótula plástica y su relación con el canto de la sección (l_p/h) para el Método Aproximado (MA), Método del Balance de Energía (BE) y Método del Eurocódigo 8 (EC8).

Referencia	20 % caída en carga y flectores					
	l_p (m) MA	l_p/h MA	l_p (m) BE	l_p/h BE	l_p (m) EC8	l_p/h EC8
AS11-1	0,050	0,194	0,049	0,187	0,049	0,189
AS11-22	0,083	0,321	0,080	0,309	0,079	0,302
AS11-25	0,053	0,204	0,052	0,202	0,054	0,208
AS11-2R	0,081	0,310	0,079	0,302	0,075	0,287
AS11-3	0,063	0,241	0,062	0,238	0,060	0,231
AS11-20	0,108	0,417	0,107	0,410	0,100	0,386
AS11-21	0,073	0,283	0,072	0,277	0,073	0,280
AS11-4	0,093	0,359	0,090	0,346	0,083	0,320
AS11-5	0,063	0,243	0,061	0,234	0,061	0,234
AS11-6	0,110	0,422	0,110	0,423	0,101	0,390
AS11-7	0,078	0,300	0,077	0,297	0,070	0,268
AS11-8	0,077	0,298	0,075	0,289	0,070	0,269
AS11-9	0,102	0,390	0,098	0,378	0,091	0,349
AS21-10	0,094	0,470	0,092	0,459	0,080	0,402
AS31-11 (*)	0,155	1,105	0,151	1,081	0,110	0,788
AS21-12	0,065	0,326	0,064	0,319	0,062	0,311
AS21-13	0,018	0,092	0,018	0,092	0,017	0,087
AS21-23	0,118	0,588	0,115	0,573	0,102	0,508
AS21-24 (*)	0,755	3,775	0,710	3,548	0,578	2,891
AS23-14	0,080	0,399	0,078	0,389	0,067	0,335
AS24-15	0,079	0,394	0,078	0,391	0,078	0,390
AS13-16	0,095	0,365	0,091	0,350	0,089	0,341
BS11-17	0,079	0,304	0,078	0,299	0,079	0,303
BS11-18	0,062	0,239	0,058	0,225	0,061	0,233
BS13-19	0,056	0,216	0,054	0,210	0,056	0,215
AS11-25	0,053	0,204	0,052	0,202	0,054	0,208

(*) Valor anómalo

Al observar los valores de la tabla llama la atención los valores obtenidos de los soportes AS31-11 y AS21-24, aparentemente anómalos. Esto podría explicarse porque son los casos que corresponden al soporte más esbelto y al sometido a la máxima compresión, respectivamente. En el caso del más esbelto (AS31-11), como el valor obtenido de l_p tienen cuenta el incremento de desplazamiento debido a los efectos de segundo orden, el resultado es superior al esperado. En el caso del elemento más comprimido, además de que la armadura nunca alcanzó la plastificación por tracción, es uno de los pocos ensayos en los que no se consiguió alcanzar el umbral de caída de carga deseado, con lo que la curvatura última (ϕ_u) se infravalora, no debiéndose considerar.

A continuación se va a realizar un estudio frente a los parámetros de los que depende la longitud de plastificación, adimensionalizándolo con el canto de la sección, (l_p/h). Para cada serie planteada en el programa experimental se va a mostrar una tabla recopilatoria de los valores obtenidos con los métodos de idealización empleados, y además una representación

gráfica de la influencia del parámetro estudiado. Para una mejor interpretación de los resultados se omiten los valores obtenidos mediante el método del balance de energía, por ser similares a los del método aproximado.

A la vista de los resultados de la Tabla VIII.83 y la Figura VIII. 114, se observa que la longitud de plastificación aumenta con la separación de la armadura transversal, si se obvia el valor de la probeta AS11-20 y AS11-20, en el primer caso por estar muy lejos de alcanzar en rotura el 20 % de caída post-pico, y en el segundo caso, como se ha puntualizado anteriormente, porque el hormigón con el que se fabricó arrojó resultados inesperados.

Tabla VIII.83. Valores de la longitud de la rótula plástica (l_p) y su relación con el canto de la sección (h). Separación de la armadura transversal (s_t)

SEPARACIÓN A. TRANSVERSAL				M. APROXIMADO		M. B.ENERGÍA		M. EUROCÓDIGO 8	
Referencia	s_t	% caída subida	% caída bajada	l_p (m)	l_p/h	l_p (m)	l_p/h	l_p (m)	l_p/h
AS11-3	0,10	20,00%	20,00%	0,063	0,24	0,062	0,24	0,060	0,23
AS11-2R	0,20	20,00%	20,00%	0,081	0,31	0,079	0,30	0,075	0,29
AS11-1	0,30	20,00%	20,00%	0,050	0,19	0,049	0,19	0,049	0,19
AS11-22	0,30	18,28%	20,00%	0,083	0,32	0,080	0,31	0,079	0,30
AS11-20	0,40	10,28%	12,68%	0,108	0,42	0,107	0,41	0,100	0,39
AS11-21 (*)	0,50	18,47%	20,00%	0,073	0,28	0,072	0,28	0,073	0,28

(*) Valor anómalo

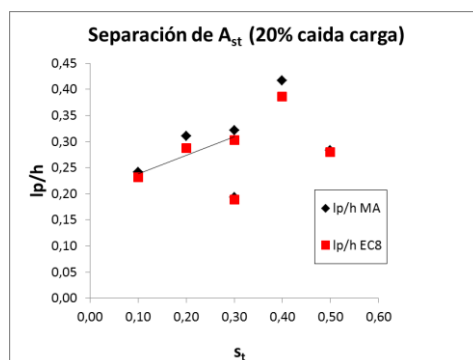


Figura VIII.114. Relación l_p/h . Separación de la armadura transversal

En la Tabla VIII.84 y en la Figura VIII.115 se pueden observar los valores obtenidos para los distintos tipos de hormigón, el fabricado con fibras mixtas (Tipo I) y con fibras largas (Tipo II). A partir de los resultados experimentales no se observa un comportamiento claro, si bien para una separación $s_t=0.10$ m la longitud l_p es claramente mayor en las Tipo II (largas) y para separaciones de 0.20 y 0.30 no se muestra la misma tendencia.

Tabla VIII.84. Valores de la longitud de la rótula plástica (l_p) y su relación con el canto de la sección (h). Tipo de hormigón

TIPO DE FIBRAS					M. APROXIMADO		M. B.ENERGÍA		M. EUROCÓDIGO 8	
Referencia	Tipo Fibras	s_t	% caída subida	% caída bajada	l_p (m)	l_p/h	l_p (m)	l_p/h	l_p (m)	l_p/h
AS11-3	I	0,10	20,00%	20,00%	0,063	0,24	0,062	0,24	0,060	0,23
AS11-2R	I	0,20	20,00%	20,00%	0,081	0,31	0,079	0,30	0,075	0,29
AS11-1	I	0,30	20,00%	20,00%	0,050	0,19	0,049	0,19	0,049	0,19
AS11-22	I	0,30	18,28%	20,00%	0,083	0,32	0,080	0,31	0,079	0,30
AS11-6	II	0,10	9,59%	17,14%	0,110	0,42	0,110	0,42	0,101	0,39
AS11-5	II	0,20	20,00%	20,00%	0,063	0,24	0,061	0,23	0,061	0,23
AS11-4	II	0,30	20,00%	20,00%	0,093	0,36	0,090	0,35	0,083	0,32

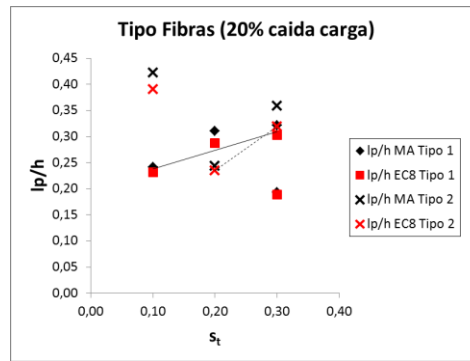


Figura VIII.115. Relación l_p/h . Tipo de fibras

Con respecto al volumen de fibras, los resultados se recopilan en la Tabla VIII.85 y en la Figura VIII.116. Cuando la separación de la armadura transversal es mayor o igual que 0.20 m, la longitud l_p no depende del volumen de fibras, mientras que para una separación menor (0.10 m) se aprecia una mayor longitud equivalente de plastificación cuando el volumen de fibras es menor.

Tabla VIII.85. Valores de la longitud de la rótula plástica (l_p) y su relación con el canto de la sección (h). Volumen de fibras en la masa de hormigón

VOLUMEN DE FIBRAS					M. APROXIMADO		M. B.ENERGÍA		M. EUROCÓDIGO 8	
Referencia	Volumen Fibras	st	% caída subida	% caída bajada	l_p (m)	l_p/h	l_p (m)	l_p/h	l_p (m)	l_p/h
AS11-3	2,00%	0,10	20,00%	20,00%	0,063	0,24	0,062	0,24	0,060	0,23
AS11-2R	2,00%	0,20	20,00%	20,00%	0,081	0,31	0,079	0,30	0,075	0,29
AS11-1	2,00%	0,30	20,00%	20,00%	0,050	0,19	0,049	0,19	0,049	0,19
AS11-22	2,00%	0,30	18,28%	20,00%	0,083	0,32	0,080	0,31	0,079	0,30
AS11-9	1,00%	0,10	20,00%	20,00%	0,102	0,39	0,098	0,38	0,091	0,35
AS11-8	1,00%	0,20	20,00%	20,00%	0,077	0,30	0,075	0,29	0,070	0,27
AS11-7	1,00%	0,30	20,00%	20,00%	0,078	0,30	0,077	0,30	0,070	0,27

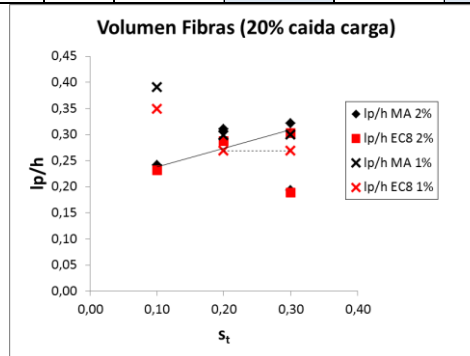


Figura VIII.116. Relación l_p/h . Volumen de fibras

En ambos métodos los valores calculados (Tabla VIII.86 y Figura VIII.117) muestran claramente el aumento de la longitud de la rótula plástica al aumentar la esbeltez.

Tabla VIII.86. Valores de la longitud de la rótula plástica (l_p) y su relación con el canto de la sección (h). Esbeltez (λ_v)

ESBELTEZ				M. APROXIMADO		M. B.ENERGÍA		M. EUROCÓDIGO 8	
Referencia	λ_v	% caída subida	% caída bajada	l_p (m)	l_p/h	l_p (m)	l_p/h	l_p (m)	l_p/h
AS11-2R	5,77	20,00%	20,00%	0,081	0,31	0,079	0,30	0,075	0,29
AS21-10	7,50	20,00%	19,90%	0,094	0,47	0,092	0,46	0,080	0,40
AS31-11	10,70	20,00%	20,00%	0,155	1,10	0,151	1,08	0,110	0,79

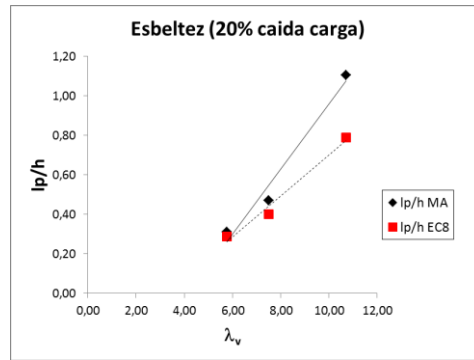


Figura VIII.117. Relación l_p/h . Esbeltez

Para el nivel de axil aplicado (v), Tabla VIII.87 y Figura VIII.118, se observa sin lugar a duda que la longitud de plastificación aumenta con el parámetro. El soporte AS21-24, que se encuentra sometido al mayor nivel de axil, presenta una deformación mínima, arrojando un valor anómalo. En el momento de la rotura estuvo muy lejos de alcanzar el 20 % de la caída de carga post-pico, y, por tanto, el valor de la curvatura última a ese nivel de carga no pudo ser obtenida. El método de cálculo empleado para obtener la longitud equivalente de la rótula plástica depende del valor de la curvatura última cuando el nivel de carga es el de caída al 20% (véase ecuación (VIII.35)), de ahí que, en este caso, el valor obtenido no sea correcto. Para una mejor interpretación de los resultados se representan en la Figura VIII.118 dos gráficas, una incluyendo el valor correspondiente a la probeta AS21-24 (izquierda) y otras sin ella (derecha).

Tabla VIII.87. Valores de la longitud de la rótula plástica (l_p) y su relación con el canto de la sección (h). Nivel de carga axil (v)

NIVEL DE AXIL				M. APROXIMADO		M. B.ENERGÍA		M. EUROCÓDIGO 8	
Referencia	v	% caída subida	% caída bajada	l_p (m)	l_p/h	l_p (m)	l_p/h	l_p (m)	l_p/h
AS21-13	0,00	20,00%	20,00%	0,018	0,09	0,018	0,09	0,017	0,09
AS21-12	0,10	20,00%	20,00%	0,065	0,33	0,064	0,32	0,062	0,31
AS21-10	0,20	20,00%	19,90%	0,094	0,47	0,092	0,46	0,080	0,40
AS21-23	0,30	11,99%	18,04%	0,118	0,59	0,115	0,57	0,102	0,51
AS21-24	0,40	0,00%	0,61%	0,755	3,78	0,710	3,55	0,578	2,89

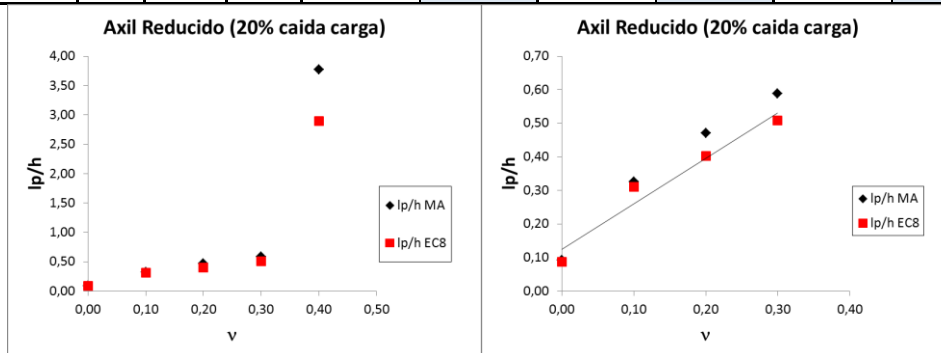


Figura VIII.118. Relación l_p/h . Axil reducido. Valores incluyendo $v = 0.4$ (ver izquierda) y sin $v = 0.4$ (ver derecha)

Si aumenta la cuantía de armadura longitudinal (Tabla VIII.88), la rótula plástica debería tener una menor longitud ya que no se cuenta con el aviso correspondiente a la plastificación de la armadura longitudinal, por no alcanzarse ese valor fácilmente. Esto es lo que muestran los resultados representados en la Figura VIII.119. Se aprecia que la tendencia es que a mayor cuantía se produce una menor longitud equivalente de la rótula plástica. El valor obtenido de

la probeta AS24-15 no resulta válido por no alcanzar el porcentaje de caída post-pico que define la rotura del elemento.

Tabla VIII.88. Valores de la longitud de la rótula plástica (l_p) y su relación con el canto de la sección (h). Cuantía de la armadura longitudinal (ρ_l)

CUANTÍA As LONG.				M. APROXIMADO		M. B.ENERGÍA		M. EUROCÓDIGO 8	
Referencia	ρ	% caída subida	% caída bajada	l_p (m)	l_p/h	l_p (m)	l_p/h	l_p (m)	l_p/h
AS21-10	1,05%	20,00%	19,90%	0,094	0,47	0,092	0,46	0,080	0,40
AS23-14	2,68%	20,00%	20,00%	0,080	0,40	0,078	0,39	0,067	0,34
AS24-15	4,19%	16,45%	19,10%	0,079	0,39	0,078	0,39	0,078	0,39

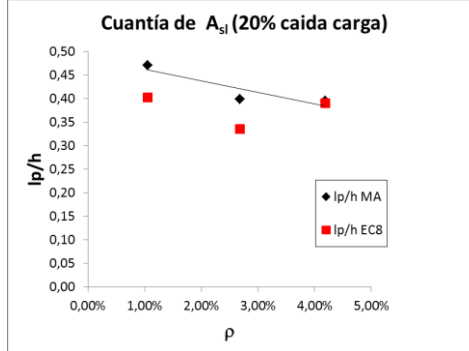


Figura VIII.119. Relación l_p/h . Cuantía de la armadura longitudinal

A un menor recubrimiento relativo se dispone de un trabajo más efectivo de la sección resistente, no sólo por el aumento del canto útil de la misma sino por mejorar el confinamiento de la armadura transversal. En la Tabla VIII.89 y en la Figura VIII.120, se recogen las subseries en las que se puede observar que la relación (l_p/h) en general tiene la misma tendencia en todas las subseries.

Tabla VIII.89. Valores de la longitud de la rótula plástica (l_p) y su relación con el canto de la sección (h). Recubrimiento relativo (r/h)

RECUBRIMIENTO RELATIVO						M. APROXIMADO		M. B.ENERGÍA		M. EUROCÓDIGO 8	
Referencia	st	ρ	r/h	% caída subida	% caída bajada	l_p (m)	l_p/h	l_p (m)	l_p/h	l_p (m)	l_p/h
AS11-3	0,10	1,16%	0,15	20,00%	20,00%	0,063	0,24	0,062	0,24	0,060	0,23
BS11-18	0,10	1,16%	0,09	20,00%	20,00%	0,062	0,24	0,058	0,22	0,061	0,23
AS11-1	0,30	1,16%	0,15	20,00%	20,00%	0,050	0,19	0,049	0,19	0,049	0,19
AS11-22	0,30	1,16%	0,15	18,28%	20,00%	0,083	0,32	0,080	0,31	0,079	0,30
BS11-17	0,30	1,16%	0,09	20,00%	20,00%	0,079	0,30	0,078	0,30	0,079	0,30
AS13-16	0,30	2,06%	0,16	20,00%	20,00%	0,095	0,37	0,091	0,35	0,089	0,34
BS13-19	0,30	2,06%	0,10	17,58%	20,00%	0,056	0,22	0,054	0,21	0,056	0,22

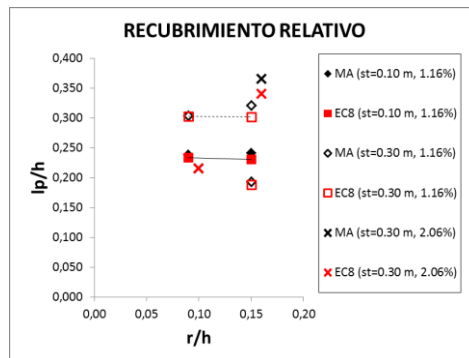


Figura VIII.120. Relación l_p/h . Recubrimiento relativo

En la Tabla VIII.90 y en la Figura VIII.121 se pueden ver los valores obtenidos para distintos tipos de aplicación de carga, cíclica y monótonica. A la vista de los resultados obtenidos no se observa una tendencia clara, aunque, si no se da por válido el resultado del soporte AS11-22, por no haber alcanzado en la rotura el 20 % de caída post-pico de carga, se observa que la longitud equivalente muestra un ligero aumento, casi despreciable, cuando el tipo de carga es monótonica.

Tabla VIII.90. Valores de la longitud de la rótula plástica (l_p) y su relación con el canto de la sección (h). Tipo de carga

TIPO DE CARGA					M. APROXIMADO		M. B.ENERGÍA		M. EUROCÓDIGO 8	
Referencia	st	Tipo de Carga	% caída subida	% caída bajada	l_p (m)	l_p/h	l_p (m)	l_p/h	l_p (m)	l_p/h
AS11-1	0,30	Cíclica	20,00%	20,00%	0,050	0,19	0,049	0,19	0,049	0,19
AS11-22	0,30	Cíclica	18,28%	20,00%	0,083	0,32	0,080	0,31	0,079	0,30
AS11-25	0,30	Monótona	-	20,00%	0,053	0,20	0,052	0,20	0,054	0,21

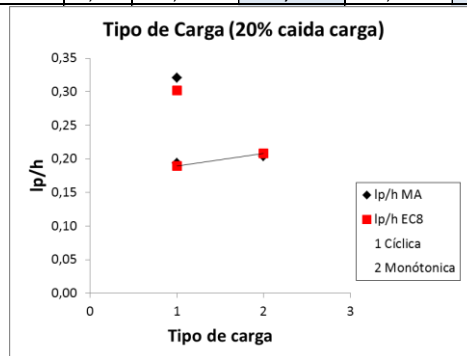


Figura VIII.121. Relación l_p/h . Tipo de Carga

VIII.10.2. Comparación de la longitud equivalente de plastificación con expresiones existentes en la bibliografía

Existen distintos modelos empíricos que permiten determinar la longitud de la rótula plástica, si bien generan una amplia variedad de resultados. Como se ha visto en el apartado anterior, a lo largo de la historia se han efectuado investigaciones que, apoyándose en modelos simplificados, obtienen la longitud de plastificación (L_p) de un soporte en ménsula a partir de expresiones empíricas basadas en resultados de ensayos experimentales en los cuales se conoce tanto el comportamiento de la sección como del elemento.

En este apartado se van a seleccionar, de las ecuaciones existentes, no sólo las más recientes, sino las que se correspondan con un modelo tipo soporte y que tengan en cuenta o no parámetros como los estudiados en este trabajo, como son la esbeltez, el nivel de carga axil aplicada, etc.

Uno de los primeros investigadores que introduce el nivel de carga axil en su propuesta de expresión es Baker (Barrera (2012) [15]), aunque posteriormente modifica dicha expresión y desestima la influencia del axil.

Varios investigadores como Priestley y Park (1987) [102], Panagiotakos y Fardis (2001) [91] o Lehman et al. (2004) [73] definen la longitud de la rótula plástica diferenciando dos longitudes, la que corresponde a la longitud plástica debida a los efectos de flexión y la debida al efecto

del deslizamiento de la armadura en el extremo fijo del soporte. Estos investigadores trabajan analizando la siguiente ecuación, donde el primer y el segundo sumando corresponden, respectivamente, a las longitudes comentadas previamente.

$$(VIII.36) \quad L_p = L_s \cdot \frac{(M_{max} - M_y)}{M_{max}} + C_t = L_s \cdot \alpha + C_t$$

donde:

L_s es la longitud del soporte

M_{max} es el momento flector máximo

M_y es el momento flector en el instante de plastificación

C_t es el término que recoge el deslizamiento de la armadura en el extremo del soporte

Los valores determinados por estos investigadores para α son:

- **Priestley y Park** $\alpha=0.08$ [102] (ensayos bajo carga cíclica)
- **Panagiotakos y Fardis** $\alpha=0.12$ [91] (ensayos bajo carga cíclica y monotónica)
- **Lehman y Moehle** $\alpha=0.5 \cdot \frac{(M_{max} - M_y)}{M_{max}}$ (ensayos bajo carga monotónica)

Para la comparativa realizada en este apartado se ha seleccionado parte de las expresiones comentadas anteriormente, concretamente las que corresponden a ensayos bajo carga cíclica, ya que en esta tesis doctoral es el tipo de aplicación de carga de todos los soportes menos uno (AS11-25). Se añaden las expresiones de investigaciones más recientes que tienen en cuenta parámetros como el nivel de axil, la esbeltez y la resistencia del hormigón. A continuación se resumen las expresiones utilizadas en la comparativa.

Priestley y Park (1987) [102]

En esta investigación, a partir de los resultados obtenidos en los ensayos experimentales bajo carga cíclica de pilas de gran escala de puentes, deducen una expresión para determinar la longitud de plastificación.

$$(VIII.37) \quad L_p = 0.08 \cdot L_s + 6 \cdot \phi_l$$

donde:

L_s es la longitud total de la pila

ϕ_l es el diámetro de la armadura longitudinal

En esta ecuación el primer término incluye la longitud de plastificación debida a la flexión y en el segundo la correspondiente al deslizamiento de la armadura longitudinal en la zona de anclaje.

Sheikh y Khoury (1993) [111]

A partir de los ensayos realizados en soportes sometidos a altos niveles de axil, proponen que

la medida de la longitud de plastificación es aproximadamente el valor del canto de la sección (h).

$$(VIII.38) \quad L_p = 1 \cdot h$$

El hecho de que la investigación se realice con ensayos bajo altos niveles de carga axial resulta interesante para la presente comparativa.

Panagiotakos y Fardis (2001) [91]

Las investigaciones realizadas por estos autores en este ámbito han dado lugar a modelos que han sido incluidos con ciertos ajustes en la normativa europea, Eurocódigo 8 [39][40] [37].

Las expresiones propuestas se han obtenido basándose en los principios de análisis teóricos de elementos de hormigón armado. El método propuesto se calibra con más de 1000 ensayos de elementos tipo viga o soporte con rotura por flexión, tanto bajo la aplicación de la carga de forma cíclica como monotónica.

En las ecuaciones propuestas para obtener la longitud de plastificación se incluyen los efectos de fisuración diagonal por cortante, así como el deslizamiento de la armadura por pérdida de adherencia en la zona de anclaje.

Las expresiones propuestas son:

Para carga cíclica,

$$(VIII.39) \quad L_{p,cíclica} = 0.12 \cdot L_s + 0.014 \cdot a_{sl} d_b f_y$$

Para carga monotónica,

$$(VIII.40) \quad L_{p,monot} = 0.18 \cdot L_s + 0.02 \cdot a_{sl} d_b f_y = 1.5 \cdot L_{p,cíclica}$$

donde:

L_s es la longitud de soporte

a_{sl} adopta el valor 1 ó 0, si la armadura se ancla más allá de la sección de máximo momento, o si ello no es posible

d_b es el diámetro de la armadura longitudinal en mm

f_y es el límite elástico de la armadura longitudinal en MPa

Fardis y Biskinis (2003) [53]

Posteriormente al planteamiento realizado por Panagiotakos y Fardis (2001) [91], Fardis y Biskinis (2003) [53] presentaron la siguiente ecuación para obtener este parámetro.

$$(VIII.41) \quad L_p = 0.07 \cdot L_s + 0.125 + \frac{a_{sl} d_b f_y}{40}$$

donde:

L_s es la longitud de soporte

a_{sl} adopta el valor 1 ó 0, si la armadura se ancla más allá de la sección de máximo momento, o no es posible

d_b es el diámetro de la armadura longitudinal en mm

f_y es el límite elástico de la armadura longitudinal en MPa

Ceroni et al. (2003) (Barrera (2012) [15])

En esta investigación se realizó un amplio programa de ensayos numéricos, con el propósito de evaluar la rotación plástica desarrollada en soportes de hormigón armado, bajo carga axil y flexión monotónica.

La expresión propuesta para la longitud de la rótula plástica a partir de la rotación plástica de flexión es:

$$(VIII.42) \quad L_p = 6.1 \left(\frac{L}{h}\right)^{0.43} \cdot \left(\frac{f_{su}}{f_y} - 1\right)^{0.65} \cdot \varepsilon_{su}^{-0.32} (1 + \nu)^{-1.83}$$

donde:

L es la longitud de soporte

h es el canto de la sección

f_u es la tensión última de la armadura longitudinal

f_y es el límite elástico de la armadura longitudinal

ε_{su} es la deformación de la carga última del acero

ν es el axil reducido igual a $\nu = N / (A_c \cdot f_c)$

siendo:

N el axil aplicado en el soporte

A_c el área de la sección de hormigón

f_c la resistencia a compresión simple del hormigón

Bae y Bayrak (2008) [13]

A diferencia de los métodos planteados en las investigaciones comentadas previamente, estos autores emplean un método no convencional para obtener la longitud de plastificación, denominado método de la deformación de compresión.

Consiste en obtener la distribución de deformación de la fibra superior del núcleo confinado a lo largo del soporte, que es igual a la deformación de la armadura de compresión. La longitud del tramo del soporte en el que la deformación de la armadura comprimida está plastificada es la longitud de plastificación.

Mediante un análisis de sensibilidad planteado tanto para actuación de carga cíclica como para hormigones de alta resistencia y convencionales, Bae y Bayrak determinan que los parámetros clave que influyen en la longitud de plastificación son el nivel de carga axil (N/N_u), la esbeltez (L/h) y la cuantía de la armadura longitudinal.

A partir del ajuste correspondiente los autores proponen la siguiente expresión:

$$(VIII.43) \quad \frac{L_p}{h} = \left[0.3 \cdot \left(\frac{N}{N_u}\right) + 3 \cdot \left(\frac{A_s}{A_g}\right) - 0.1 \right] \left(\frac{L}{h}\right) + 0.25 \geq 0.25$$

Para realizar el análisis comparativo se añaden, a las expresiones recopiladas en las investigaciones referidas previamente, las recogidas en la normativa consultada.

Eurocódigo 8 (2012) [40]

Dentro del Eurocódigo 8, en la parte 2 donde se recogen especificaciones para el proyecto de estructuras sismorresistentes, en concreto para puentes, se presenta en el Anexo E la ecuación para la obtención de la longitud de plastificación.

$$(VIII.45) \quad L_p = 0.10 \cdot L + 0.05 \cdot d_b \cdot f_{yk}$$

donde:

L es la longitud de la pila

d_b es el diámetro de la armadura

f_{yk} es el límite elástico característico de la armadura

Código Modelo (2010) [56]

De acuerdo con el Volumen 2 del Código Modelo para cargas cíclicas y columnas rectangulares, la longitud de la rótula plástica se puede estimar a partir de:

$$(VIII.46) \quad L_p = 0.2 \cdot h + \frac{L}{15}$$

donde:

h es el canto de la sección

L es la longitud del soporte

ACI 318 (2014) y ASCE41 (2013) [1] [8]

En ambas recomendaciones se señala que se adopte el canto de la sección como la longitud de la "región de la rótula plástica".

$$(VIII.47) \quad L_p = h$$

En la Tabla VIII.91 se recogen los valores obtenidos tanto por la observación visual del daño como por la aplicación de los métodos y normativas anteriormente comentadas. A los valores obtenidos según los métodos recogidos por la bibliografía se añaden los valores de la relación (L_p/h) calculados a partir de las envolventes idealizadas según el método aproximado (MA) y el método del Eurocódigo 8 (EC8).

Cabe apuntar que, como los elementos ensayados en este trabajo no presentan fisuración diagonal por cortante, y la armadura longitudinal dispuesta no tiene solapes por ser continua, se va a despreciar su contribución en la longitud de plastificación en las expresiones que así lo contemplan.

Tabla VIII.91. Valores obtenidos tras aplicar los métodos experimentales y la normativa

Referencia	NORMATIVA					EXPERIMENTAL							
	Lp_EC8 (Lp/h)	ACI 318 (Lp/h)	CM-2010 (Lp/h)	MA (*) (Lp/h)	EC8 (*) (Lp/h)	Daño visual (*) (Lp/h)	Pam y Ho (*) (Lp/h)	Priestley y Park (Lp/h)	Sheikh y Khoury (Lp/h)	Panagiotakos y Fardis (Lp/h)	Fardis y Biskinis (Lp/h)	Ceroni (Lp/h)	Bae (Lp/h)
AS11-1	0,58	1,00	0,58	0,19	0,19	0,55	0,44	0,46	1,00	0,69	0,88	1,31	0,28
AS11-22	0,58	1,00	0,58	0,32	0,30	0,70	0,41	0,46	1,00	0,69	0,88	1,20	0,29
AS11-25	0,58	1,00	0,58	0,20	0,21	0,45	0,44	0,46	1,00	1,04	0,88	1,23	0,28
AS11-2R	0,58	1,00	0,58	0,31	0,29	0,71	0,43	0,46	1,00	0,69	0,88	1,22	0,29
AS11-3	0,58	1,00	0,58	0,24	0,23	0,55	0,52	0,46	1,00	0,69	0,88	1,32	0,28
AS11-20	0,58	1,00	0,58	0,42	0,39	0,50	0,40	0,46	1,00	0,69	0,88	1,21	0,29
AS11-21	0,58	1,00	0,58	0,28	0,28	0,49	0,41	0,46	1,00	0,69	0,88	1,22	0,29
AS11-4	0,58	1,00	0,58	0,36	0,32	0,62	0,52	0,46	1,00	0,69	0,88	1,31	0,28
AS11-5	0,58	1,00	0,58	0,24	0,23	0,59	0,43	0,46	1,00	0,69	0,88	1,30	0,29
AS11-6	0,58	1,00	0,58	0,42	0,39	0,65	0,56	0,46	1,00	0,69	0,88	1,31	0,29
AS11-7	0,58	1,00	0,58	0,30	0,27	0,85	0,42	0,46	1,00	0,69	0,88	1,31	0,28
AS11-8	0,58	1,00	0,58	0,30	0,27	0,70	0,43	0,46	1,00	0,69	0,88	1,32	0,28
AS11-9	0,58	1,00	0,58	0,39	0,35	0,64	0,57	0,46	1,00	0,69	0,88	1,30	0,29
AS21-10	0,75	1,00	0,70	0,47	0,40	0,69	0,54	0,60	1,00	0,90	1,15	1,14	0,27
AS31-11	1,07	1,00	0,91	1,10	0,79	0,69	0,79	0,86	1,00	1,29	1,64	2,02	0,26
AS21-12	0,75	1,00	0,70	0,33	0,31	0,60	0,58	0,60	1,00	0,90	1,15	3,91	0,25
AS21-13	0,75	1,00	0,70	0,09	0,09	0,28	1,08	0,60	1,00	0,90	1,15	0,06	0,25
AS21-23	0,75	1,00	0,70	0,59	0,51	0,84	0,58	0,60	1,00	0,90	1,15	0,55	0,56
AS21-24	0,75	1,00	0,70	3,78	2,89	1,23	0,46	0,60	1,00	0,90	1,15	0,42	0,79
AS23-14	0,75	1,00	0,70	0,40	0,34	0,65	0,55	0,60	1,00	0,90	1,15	1,52	0,63
AS24-15	0,75	1,00	0,70	0,39	0,39	0,63	0,55	0,60	1,00	0,90	1,15	1,71	0,98
AS13-16	0,58	1,00	0,58	0,37	0,34	0,86	0,42	0,46	1,00	0,69	0,88	1,02	0,44
BS11-17	0,58	1,00	0,58	0,30	0,30	0,76	0,40	0,46	1,00	0,69	0,88	1,29	0,29
BS11-18	0,58	1,00	0,58	0,24	0,23	0,67	0,43	0,46	1,00	0,69	0,88	1,30	0,29
BS13-19	0,58	1,00	0,58	0,22	0,22	0,92	0,42	0,46	1,00	0,69	0,88	1,02	0,44
AS11-25	0,58	1,00	0,58	0,20	0,21	0,45	0,44	0,46	1,00	1,04	0,88	1,23	0,28

(*) Valores obtenidos con los datos experimentales del presente trabajo

A continuación, se van a representar los valores obtenidos por series con el fin de clarificar este tema. Como se ha comentado, ya que la longitud de plastificación depende de una gran variedad de parámetros, muchos de ellos no son considerados en las expresiones existentes, y los resultados muestran una gran dispersión (véanse las Figuras VIII.123 a VIII.129). Además, se presentan dos gráficas: la de la izquierda contiene todos los valores obtenidos para todas las expresiones planteadas; la de la derecha muestra los valores obtenidos exclusivamente con las envolventes idealizadas, las medidas observadas directamente, la longitud obtenida mediante el método de los perfiles de curvatura de Pam y Ho (2009) [89], añadiendo los métodos empíricos y los recogidos por las normativas que más se aproximan a estos valores experimentales.

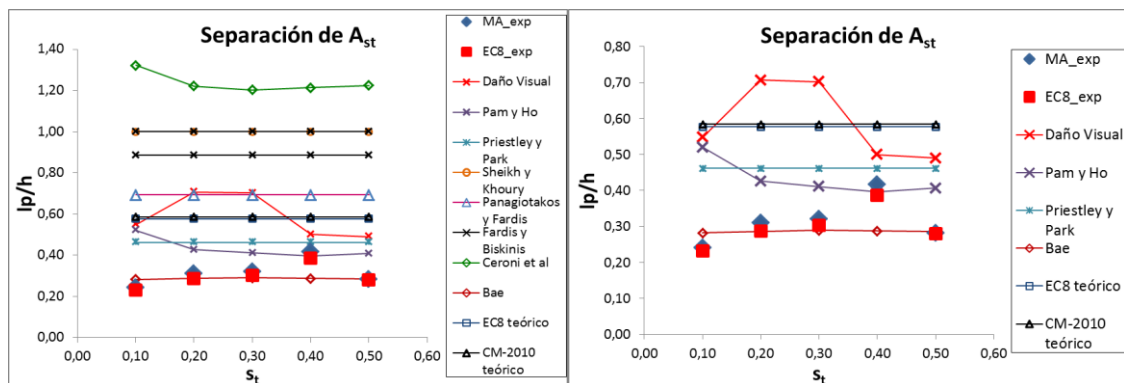


Figura VIII.123. Comparación de la relación (Lp/h) calculada por los métodos idealizados, observada directamente y según los métodos recogidos por la bibliografía. Separación de la armadura transversal

A la vista de los resultados observados, el método propuesto por Pam y Ho (2009) [89], así como la expresión presentada por Bae y Bayrak (2008) [13], son las que mejor se ajustan a los valores obtenidos en este trabajo. La referencia del daño observado directamente no resulta un valor muy adecuado, no solo debido a la subjetividad del observador, sino también porque en algunos soportes se realiza la medida superado el 20% de caída de carga.

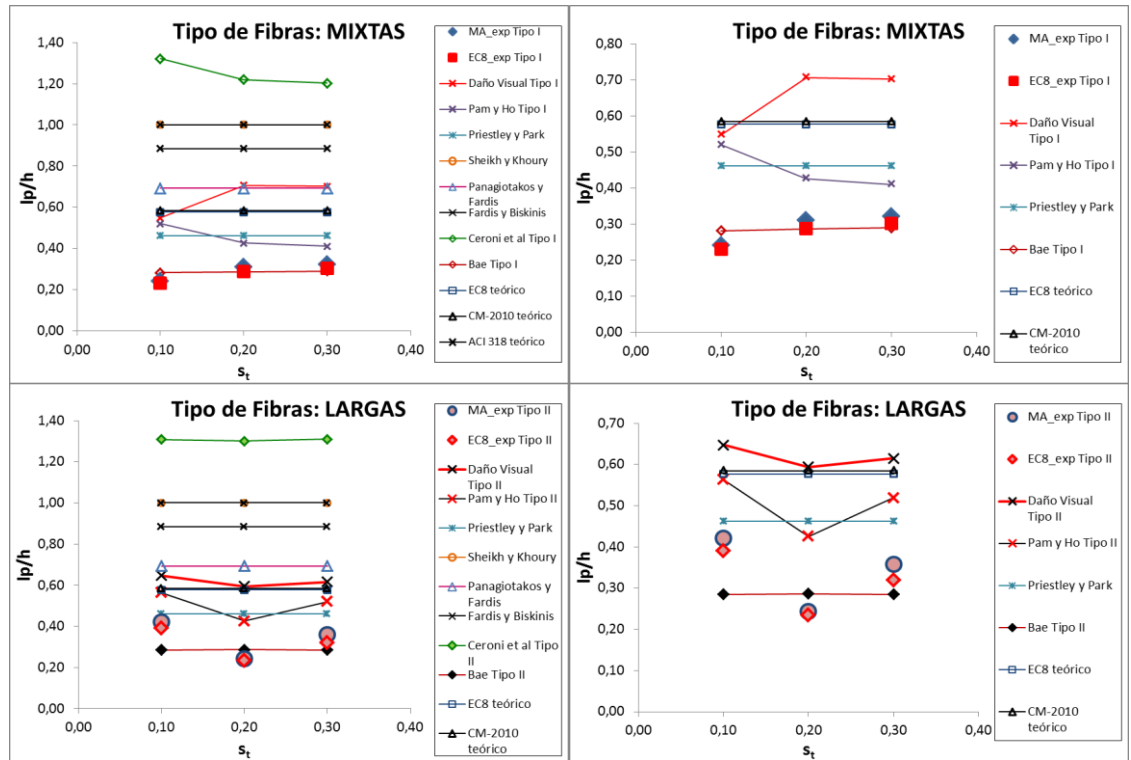


Figura VIII.124. Comparación de la relación (L_p/h) calculada por los métodos idealizados, observada directamente y según los métodos recogidos por la bibliografía. Tipo de fibras

Cuando se observan los resultados calculados para los distintos tipos de hormigón (Figura VIII.124), se aprecia que no existen grandes diferencias, resultando el método de Bae y Bayrak (2008) [13] el que mejor se ajusta. En este caso se puede observar cómo las normativas europeas son una cota superior adecuada. Esto también se observa si lo que se varía no es el tipo de fibras sino el volumen de fibras para un mismo tipo de hormigón, como se aprecia en la Figura VIII.125.

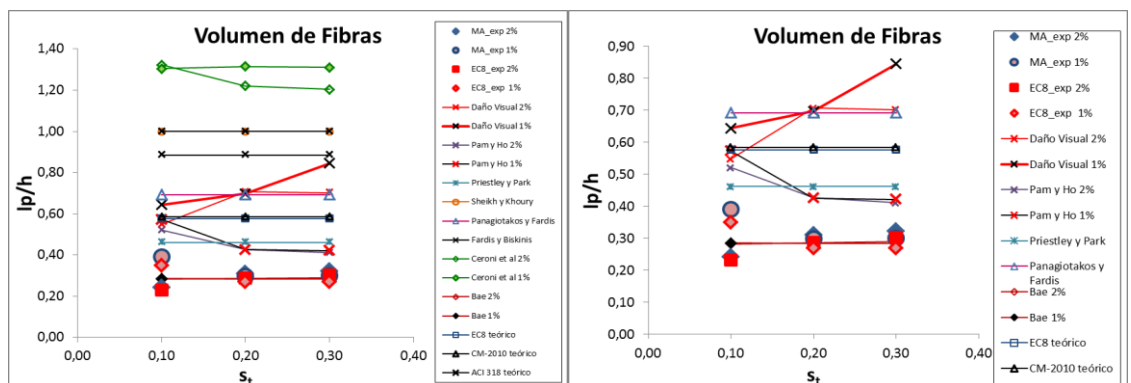


Figura VIII.125. Comparación de la relación (L_p/h) calculada por los métodos idealizados, observada directamente y según los métodos recogidos por la bibliografía. Volumen de fibras

En la Figura VIII.126 se muestran los valores obtenidos cuando se varía la esbeltez del soporte. Como se aprecia, en general los resultados obtenidos a partir de las expresiones varían en función de este parámetro, al igual que los resultados experimentales de los soportes que conforman esta serie. Se confirma que la esbeltez es un parámetro que influye directamente en el valor de la longitud de la rótula plástica. Se puede observar que la pendiente de la recta definida por los valores calculados según el Código Modelo (2010) [56] es casi paralela a la obtenida experimentalmente mediante Pam y Ho (2009) [89], resultando ambas muy similares a su vez con los valores alcanzados mediante la envolvente idealizada de acuerdo con el método del Eurocódigo 8 (2012) [40].

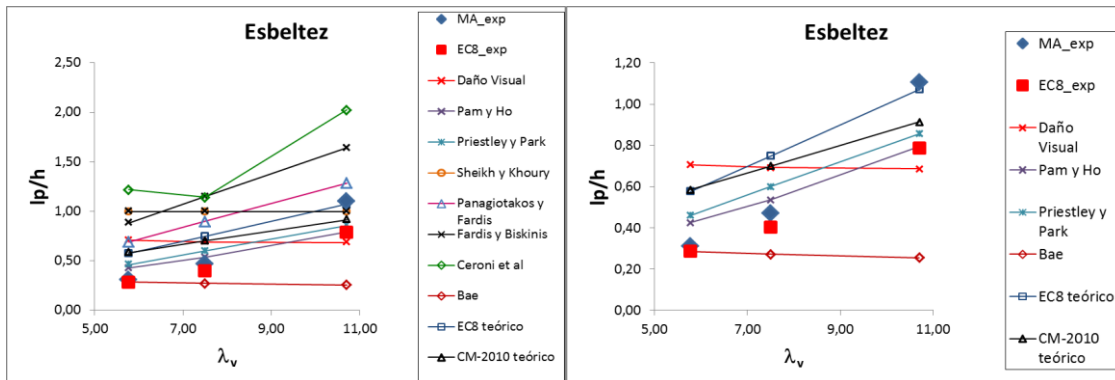


Figura VIII.126. Comparación de la relación (L_p/h) calculada por los métodos idealizados, observada directamente y según los métodos recogidos por la bibliografía. Esbeltez

Respecto de los resultados correspondientes a la variación del axil aplicado — y desestimando los valores obtenidos con los métodos de idealización del soporte AS21-24— según los valores deducidos se aprecia que la expresión de Bae (2012) [11] queda del lado de la inseguridad cuando los valores de axil aplicado son bajos, casi al contrario de lo que devuelven los valores de la ecuación de Ceroni et al. (Barrera (2012) [15]) (véase Figura VIII.127). En cambio, el método de Pam y Ho (2009) [89] parece, quedando del lado de la seguridad, el que mejor se ajusta a los valores experimentales obtenidos en este trabajo.

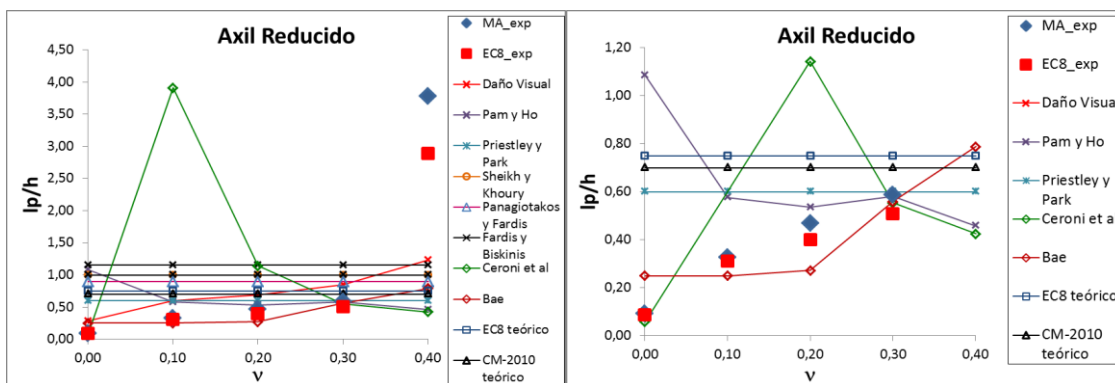


Figura VIII.127. Comparación de la relación (L_p/h) calculada por los métodos idealizados, observada directamente y según los métodos recogidos por la bibliografía. Nivel de axil

En el caso de la variación de la cuantía de la armadura longitudinal (Figura VIII.128), el método de Pam y Ho no presenta una clara tendencia, y los valores están demasiado ajustados a los obtenidos con las envolventes idealizadas.

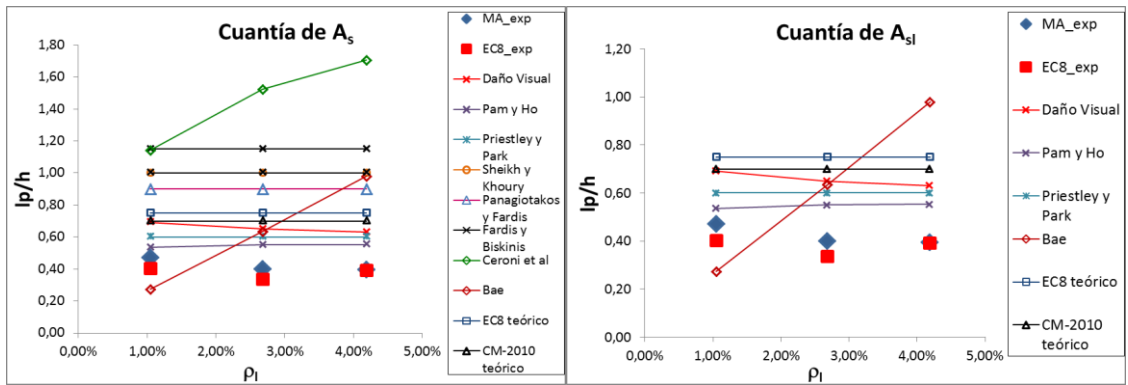


Figura VIII.128. Comparación de la relación (L_p/h) calculada por los métodos idealizados, observada directamente y según los métodos recogidos por la bibliografía. Cuantía de la armadura longitudinal

Una vez más, para el recubrimiento realivo se aprecia que la expresiones de Pam y Ho [89], así como la de Bae y Bayrak [13], son las que más se ajustan, tanto por la cercanía de los valores obtenidos como por las pendientes conseguidas (Figura VIII.129).

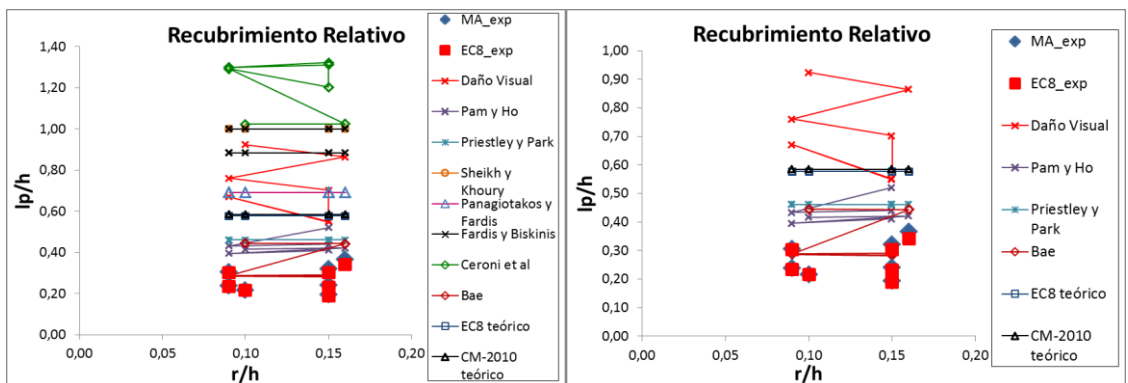


Figura VIII.129. Comparación de la relación (L_p/h) calculada por los métodos idealizados, observada directamente y según los métodos recogidos por la bibliografía. Recubrimiento relativo

En la Figura VIII.130 se representan los valores que permiten comparar, para dos soportes exactamente iguales, las variaciones observadas con respecto a la relación (L_p/h) cuando se aplica la carga sobre el elemento de forma cíclica o monotónica.

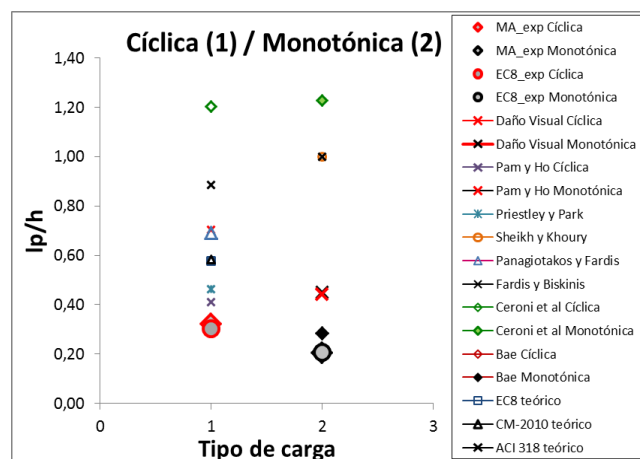


Figura VIII.130. Comparación de la relación (L_p/h) calculada por los métodos idealizados, observada directamente y según los métodos recogidos por la bibliografía. Tipo de aplicación de la carga

Tanto el daño visual observado directamente como el valor obtenido por el método de los perfiles de curvatura (Pam y Ho [89]) son muy similares, independientemente de que la aplicación de la carga se realice de forma cíclica o monotónica, siendo además muy parecidos a los valores obtenidos con las expresiones para ensayos de carga cíclica.

En cambio en los valores calculados a partir de las envolventes idealizadas, se observa un muy sutil tendencia similar a la recogida por la bibliografía en la que resulta un valor mayor de la relación (L_p/h) cuando la aplicación de la carga se realiza de forma monotónica que cuando se aplica cíclicamente (Panagiotakos y Fardis [91]). Asimismo estos autores proponían para la longitud de la rótula plástica un valor 1.5 veces mayor que el valor obtenido bajo carga cíclica. Aunque es aventurado ofrecer un valor con tan pocos resultados, en el caso recogido en este trabajo, el valor de la relación (L_p/h) parece resultar muy similar para ambos tipos de carga, ahora bien, sería conveniente analizar una muestra de elementos más amplia para corroborar los resultados obtenidos.

VIII.10.3. Comparativa con los resultados experimentales existentes en otras investigaciones

Para la relación de la longitud de plastificación con el canto de la sección del soporte (L_p/h), en este apartado se va a realizar una comparativa entre los valores obtenidos y los existentes en la bibliografía propuestos por otros investigadores.

Con este objetivo se recopilan en una base de datos los valores a comparar. Resulta de gran ayuda el trabajo previo realizado por Barrera [15], que ha sido utilizado como base de partida para esta comparativa.

Para realizar el análisis se contrastan los datos recopilados en las bases de datos con los valores obtenidos en esta tesis doctoral. Se independizará en función de los parámetros estudiados que parecen tener más influencia en el valor de la longitud de la rótula plástica.

De los valores obtenidos en este trabajo, sólo se cotejan los más adecuados a la realidad del comportamiento del soporte, esto es, los datos calculados mediante las envolventes idealizadas por el método aproximado y el método del Eurocódigo, así como los obtenidos al aplicar el método de los perfiles de curvatura propuesto por Pam y Ho [89].

Con el fin de poder observar la influencia del tipo de aplicación de la carga en la relación estudiada (L_p/h), los valores se van a clasificar en dos grupos: en uno se incluyen los que corresponden a elementos sometidos a la aplicación de una carga cíclica, y en el otro se recogen los ensayados bajo carga monotónica. Todos los datos recopilados se pueden encontrar en el Anejo I.

Respecto del primer grupo, los correspondientes a la carga cíclica, seguidamente se presentan cronológicamente los trabajos realizados.

Baker, A.L.L. (1956) [14]

Los resultados se obtienen de 4 soportes de hormigón convencional, con resistencias a compresión entre 23.60 y 28.50 MPa. Adopta un valor constante para la esbeltez de 4.00. Varía la cuantía de la armadura, tanto longitudinal como transversal, siendo los valores máximos y mínimos 2.43 %, 1.51 % y 2.83 % y 0.7 %, respectivamente. El nivel de axil varía desde 0.20 hasta 0.56.

Park et al. (1982) [92]

Ensayan 4 soportes de hormigón convencional, variando la resistencia a compresión del hormigón de 21.40 MPa hasta 41.40 MPa. La esbeltez es igual para todos los elementos y es de 2.19. Mantienen constante la cuantía de armadura longitudinal (1.79 %) y varían la transversal, de 1.50 % a 3.50 %. El nivel de axil aplicado es variable entre 0.21 y 0.60.

Mander, J.B. (1984) [79]

Presenta los resultados de 4 soportes de hormigón convencional, de 26 MPa, y de esbeltez 4.27, donde se varía sólo el nivel de axil, entre 0.10 y 0.50.

Zahn, F.A. (1986) [123]

Ocho elementos de hormigón convencional conforman los resultados recopilados en la base de datos. Todos ellos tienen una esbeltez de 4.00, donde la resistencia a compresión varía entre un valor mínimo de 27.00 MPa hasta un máximo de 40.10 MPa. La cuantía de la armadura longitudinal adopta dos valores, 1.51 % y 2.43 %; la transversal varía desde 0.61 % hasta 2.89 %. El nivel de axil aplicado también es variable, entre 0.13 y 0.58.

Bayrak et al. (1997) [19]

Los soportes ensayados en esta investigación se fabrican con hormigón de alta resistencia, entre 71.10 MPa y 72.10 MPa, casi constante. La cuantía de armadura longitudinal y la esbeltez no varían, siendo de 2.58 % y 6.00, respectivamente. La cuantía de la armadura transversal dispuesta varía entre 2.84 % y 5.12 %, y el nivel de axil aplicado adopta valores de 0.36 y 0.50.

Bae, S. (2005) [12]

Obtiene valores de la relación a partir del ensayo de 4 soportes de hormigón convencional (f_c entre 36.50 MPa y 43.40 MPa), donde mantiene constante la cuantía de la armadura longitudinal (1.25 %) y la esbeltez (6.00). El nivel de axil aplicado es 0.50 ó 0.20 y la cuantía de armadura transversal va desde 0.72 % hasta 2.04 %.

Una vez recopilados los valores de los elementos ensayados bajo carga cíclica, y para poder observar mejor su influencia en la relación (L_p/h), se representan diferenciándolos según los parámetros estudiados. En la Figura VIII.131 se muestra esa influencia.

A la vista de los resultados obtenidos, comparados con los existentes de otras investigaciones, se observa que, en general, los valores obtenidos en este trabajo se encuentran dentro del rango medio, ajustándose más a ese rango los valores de la relación obtenidos mediante el método de los perfiles de curvatura y el recogido por las investigaciones de Pam y Ho [89]

Los resultados existentes, como se puede comprobar, corresponden fundamentalmente a hormigones convencionales, muy lejos de los valores de resistencia elegidos en el presente trabajo. Se constata claramente en la gráfica donde el parámetro estudiado es la resistencia del hormigón, cómo a medida que aumenta la resistencia disminuye considerablemente la longitud de la rótula plástica.

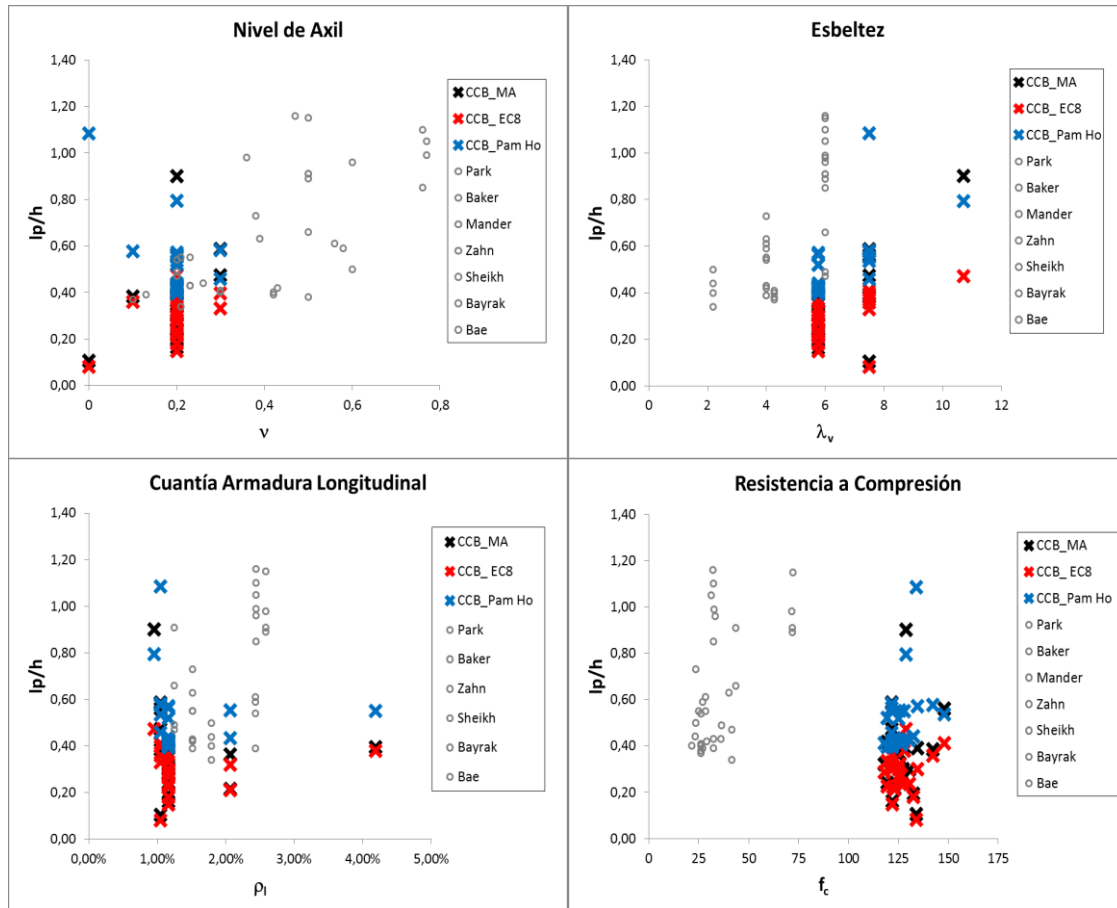


Figura VIII.131. Valores de (L_p/h) recopilados en la bibliografía (soportes- carga cíclica). Parámetros analizados: nivel de axil, esbeltez, cuantía de la armadura longitudinal y resistencia a compresión del hormigón.

Respecto del grupo de los soportes ensayados bajo carga monotónica, los trabajos recopilados cronológicamente son los siguientes:

Bayrak et al. (1998) [18]

Recopila valores de 20 soportes ensayados bajo carga monotónica fabricados con hormigón de alta resistencia con valores mínimos y máximos de 56.20 MPa y 112.20 MPa, respectivamente. La cuantía de la armadura longitudinal adopta dos valores, 2.58 % y 2.74 %. Con respecto a la cuantía de la armadura transversal, la variación es mayor que la longitudinal, encontrándose entre 1.83 % y 6.74 %. El nivel de axil aplicado está entre 0.31 y 0.53. Presenta tres valores de esbeltez, 5.25, 6.00 y 7.35.

Pendyala et al. (1994) [97] (1996) [98]

Ensayan 8 soportes de hormigón de valores de resistencia a compresión máxima de 65.20 MPa y mínima de 32.70 MPa. La esbeltez es contante de valor 3.42. La cuantía de armadura longitudinal utilizada es de 3.84 % y 4.61 %, con un nivel variable de axil aplicado que se encuentra entre 0.06 y 0.23.

Mendis, P. (2001) [83]

Los valores se obtienen con 4 soportes de 57.90 MPa, de cuantía de armadura longitudinal de 4.61 %, esbeltez de 4.14 y nivel de axil aplicado que va desde un valor mínimo de 0.07 hasta un máximo de 0.25.

Barrera, A. (2012) [15]

La investigación se centra en 38 soportes de hormigón convencional y de alta resistencia. Dado que se obtienen valores de la relación (L_p/h) para distintas soluciones idealizadas, en la base de datos se incluyen todas las obtenidas. Los soportes ensayados en esta investigación están fabricados con hormigones entre un mínimo de 30.10 MPa hasta un máximo de 100.40 MPa de resistencia a compresión. Sólo utilizan dos cuantías de armadura longitudinal, 1.40 % y 3.20 %. La cuantía de la armadura transversal va desde 0.80 % hasta 3.10 %. Los soportes tienen esbelteces de 7.50 y de 10.50, y los niveles de axil varían desde 0.00 hasta 0.51.

En la Figura VIII.132 se representa la influencia de los distintos parámetros en la relación estudiada, al igual que se ha hecho con los datos recopilados correspondientes al caso de carga cíclica.

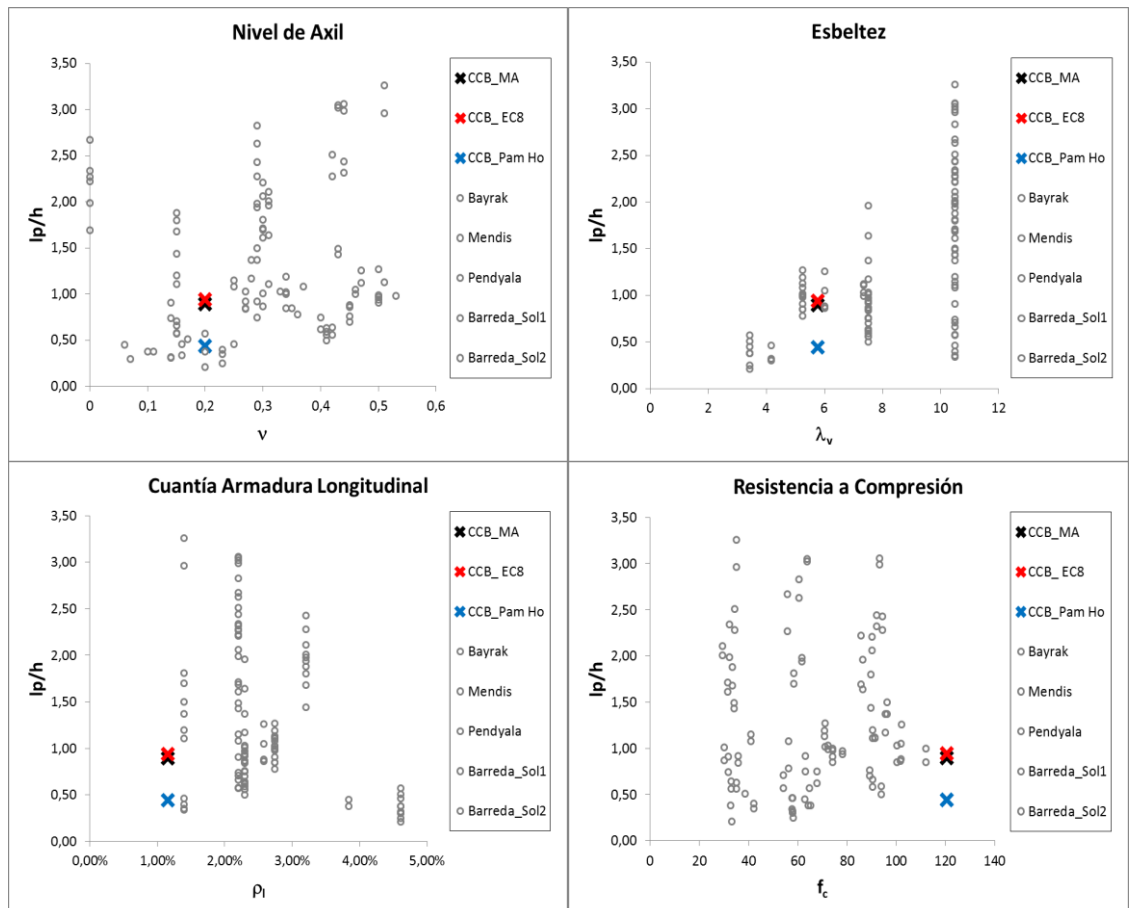


Figura VIII.132. Valores de (L_p/h) recopilados en la bibliografía (soportes- carga cíclica). Parámetros analizados: nivel de axil, esbeltez, cuantía de la armadura longitudinal y resistencia a compresión del hormigón.

Los resultados obtenidos en este trabajo no permiten conformar una serie representativa debido al escaso número de determinaciones; eso sí, cabe destacar que los valores obtenidos se encuentran dentro de los rangos de las investigaciones existentes.

Finalmente, aunque no resulte más que anecdótica la comparativa, se representan todos los valores considerados en el análisis bajo carga cíclica frente a todos los datos bajo carga monotónica (Figura VIII.133).

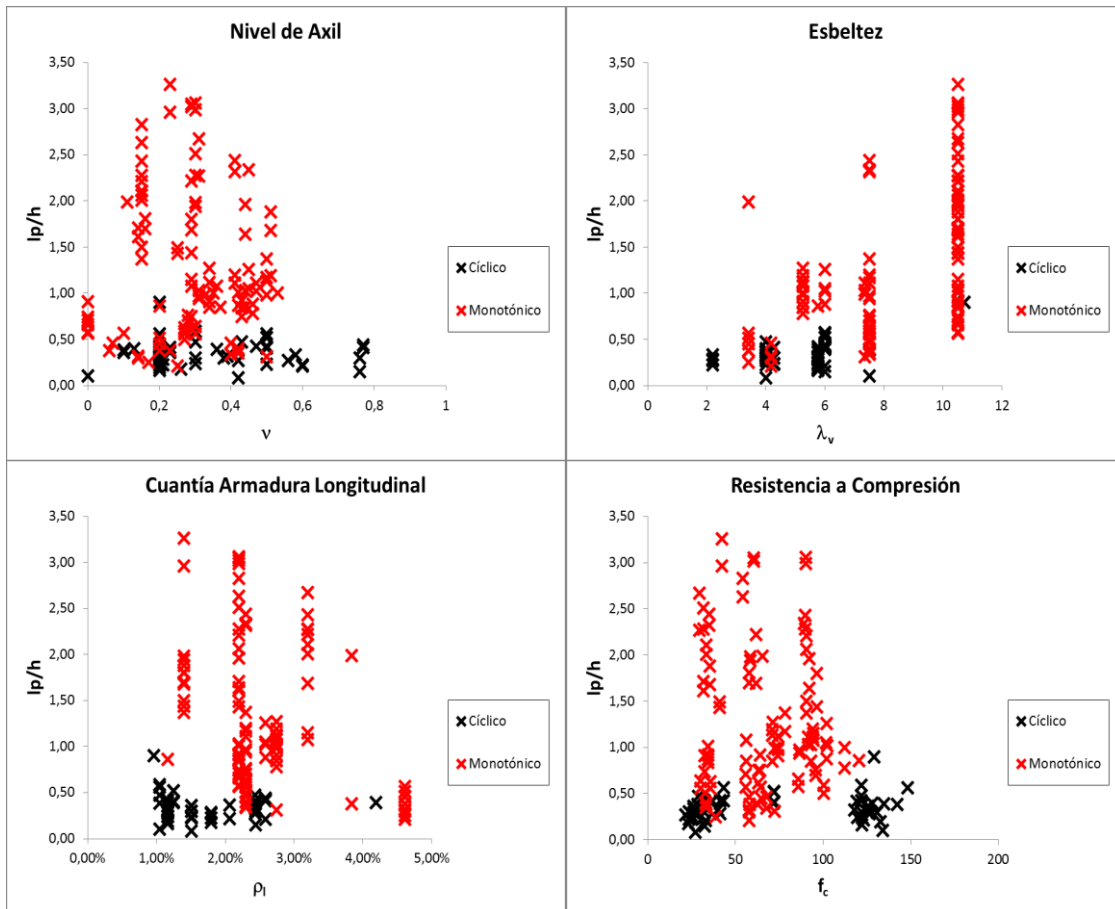


Figura VIII.133. Valores de (L_p/h) recopilados en la bibliografía (soportes- carga cíclica). Parámetros analizados: nivel de axil, esbeltez, cuantía de la armadura longitudinal y resistencia a compresión del hormigón.

En el caso de carga monotónica, tanto para el nivel de axil, la esbeltez, la cuantía de la armadura longitudinal y la resistencia del hormigón, se confirma que la longitud de plastificación resulta ser mayor que la obtenida bajo carga cíclica.

CAPÍTULO IX

Comprobación estructural mediante métodos de cálculo

En este capítulo se acomete el análisis tras realizar una comprobación estructural mediante modelos de cálculo numéricos y métodos simplificados existentes en la bibliografía tanto a nivel resistente como deformacional.

IX.1. Métodos generales

IX.1.1. Determinación de las ecuaciones constitutivas de los materiales

Previa a la comprobación estructural es necesario aproximar teóricamente las ecuaciones constitutivas de los materiales.

Como se vio en el Capítulo IV, se ha realizado un control exhaustivo de los materiales con los que se han fabricado los soportes ensayados. A partir de los datos obtenidos mediante los ensayos normalizados de las probetas de acompañamiento de cada elemento (véase Capítulo IV), se pueden ajustar unas curvas teóricas de comportamiento tanto del acero como del hormigón. En los apartados siguientes se explica cómo se ha efectuado el ajuste de las curvas tensión-deformación de los materiales.

IX.1.1.1. Ecuación constitutiva tensión-deformación del acero (σ_s - ε_s)

Sabiendo que el comportamiento tenso-deformacional del acero esperado estará definido por una curva con la forma que se muestra en la Figura IX.1, a partir de los datos experimentales se ajustan las ecuaciones de los distintos tramos que definen la curva.

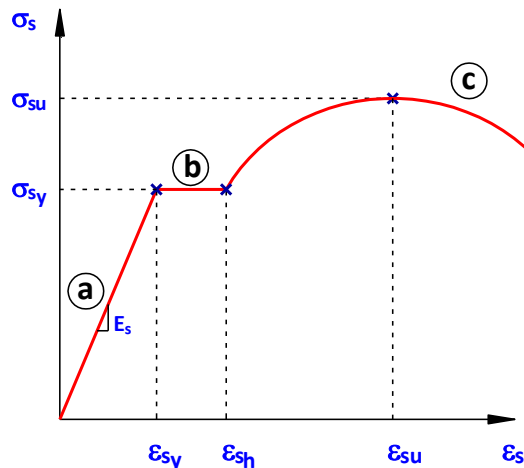


Figura IX.1. Diagrama Tensión-Deformación teórico del acero (σ_s - ε_s)

Las ecuaciones utilizadas para ajustar el comportamiento experimental son las siguientes:

- Rama elástica, ecuación del tramo "a" ($0 \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sy}$)

$$(IX.1) \sigma_s = E_s \varepsilon_s$$

- Rama de cedencia, ecuación del tramo "b" ($\varepsilon_{sy} \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sh}$)

$$(IX.2) \sigma_s = \sigma_{sy} + E_{sh} (\varepsilon_s - \varepsilon_{sy})$$

- Rama no-lienal/inelástica, ecuación del tramo "c" ($\varepsilon_{sh} \leq \varepsilon_s$)

$$(IX.3) \sigma_s = \sigma_{su} - (\sigma_{su} - \sigma_{sy}) \cdot \left(\frac{\varepsilon_{su} - \varepsilon_s}{\varepsilon_{su} - \varepsilon_{sh}} \right)^p$$

donde:

σ_s es la tensión del acero

ϵ_s es la deformación del acero

E_s es el módulo de elasticidad del acero

σ_{sy} es la tensión correspondiente al límite elástico

σ_{sy} es la tensión correspondiente al límite elástico

ϵ_{sy} es la deformación correspondiente al límite elástico

ϵ_{sh} es la deformación de cedencia

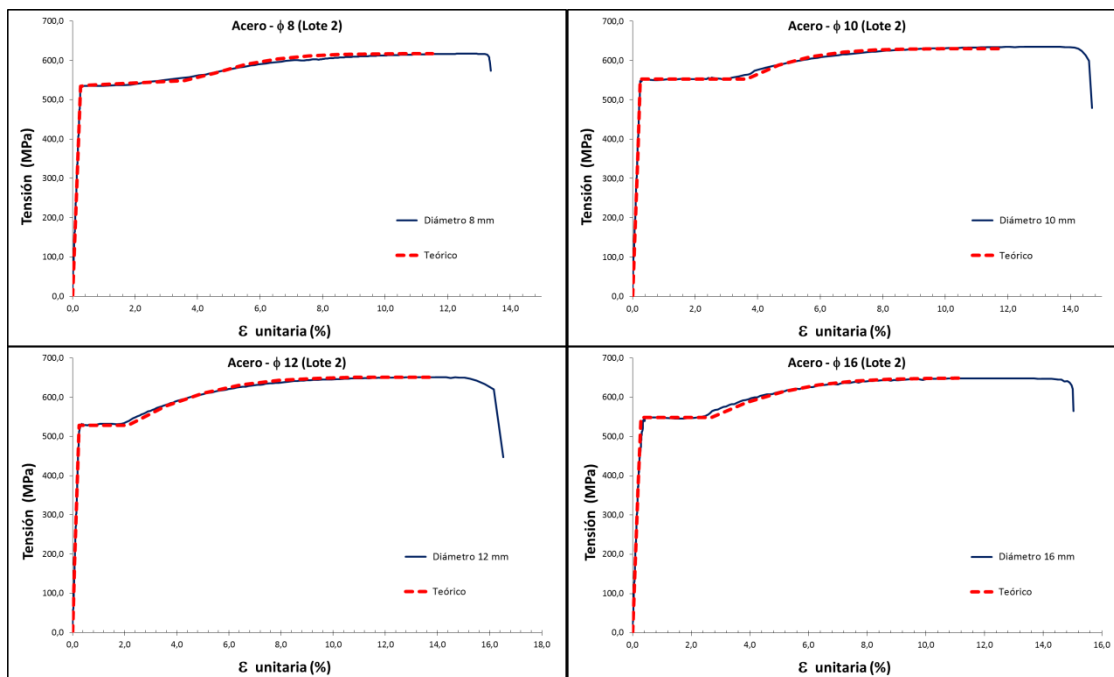
σ_{su} es la tensión máxima

ϵ_{sy} es la deformación correspondiente a la tensión máxima

p se obtiene a partir de la siguiente expresión, $p = (E_{sh}) \frac{(\epsilon_{su} - \epsilon_{sh})}{(\sigma_{su} - \sigma_y)}$

E_{sh} es el módulo de deformación tangente de la rama plástica, cuyo valor ajustado experimentalmente es: $E_{sh} = \frac{E_s}{50}$

En la relación de gráficas siguientes (Figura IX.2) se puede observar la comparativa entre los valores obtenidos experimentalmente frente a los calculados mediante las ecuaciones teóricas propuestas. A la vista de los resultados se puede apreciar el buen ajuste conseguido con la formulación planteada. Los valores obtenidos para todos los diámetros de las barras de acero según los lotes se pueden consultar en las Tablas IV.14 y IV.15 (Capítulo IV).



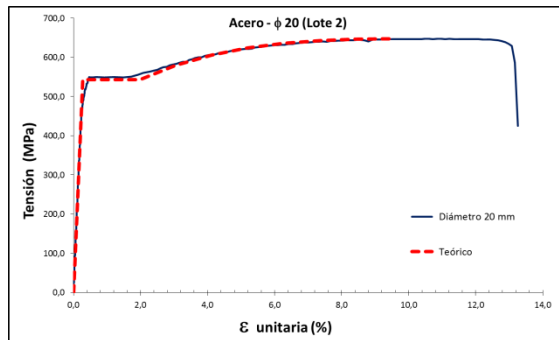


Figura IX.2. Comparativa de las curvas teóricas y experimentales

A efectos de cálculo, para compresión se adoptará el mismo diagrama que en tracción.

IX.1.1.2. Ecuación constitutiva tensión-deformación del hormigón (σ_c - ϵ_c)

Al igual que se ha realizado con el acero, en este apartado se determinan las curvas constitutivas empleadas para definir el comportamiento tenso-deformacional del hormigón. A diferencia del acero, este material tiene un comportamiento muy diferente si trabaja frente a esfuerzos de tracción o compresión, por lo que se van a definir las curvas en función de que el esfuerzo sea uno u otro.

Comportamiento a compresión

Frente a esfuerzos de compresión se va trabajar con un diagrama teórico que se encuentra definido en las recomendaciones de AFGC-SETRA (2013) [4] (Figura IX.3). Este diagrama tiene en cuenta la inclusión de fibras en la matriz del hormigón. Además, estas recomendaciones corrigen esta ley para tener en cuenta el confinamiento del hormigón alcanzando mayores resistencias a compresión y mayores deformaciones críticas.

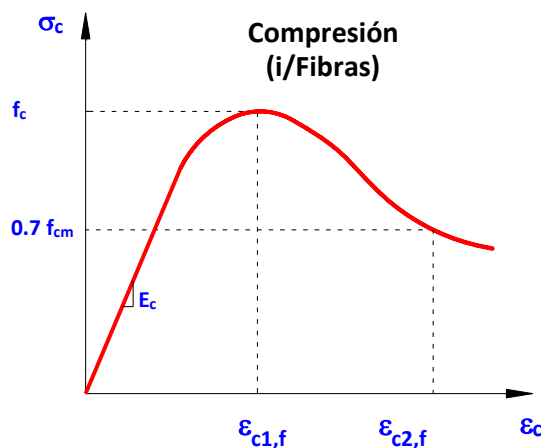


Figura IX.3. Diagrama a compresión Tensión-Deformación teórico del hormigón (σ_c - ϵ_c)

La ley analítica se obtiene utilizando la curva definida por Popovics, que viene definida por la siguiente expresión:

$$(IX.4) \sigma_c = f_{cm} \cdot \frac{\eta \cdot (\varepsilon_c / \varepsilon_{c1,f})}{\eta - 1 + (\varepsilon_c / \varepsilon_{c1,f})^{\eta}}$$

donde:

$$\eta = k / (k - 1)$$

$$k = E_c \varepsilon_{c1,f} / f_{cm}$$

$$X = \varepsilon_{c2,f} / \varepsilon_{c1,f}$$

$$y = \sigma_c / f_{cm}$$

$\varphi = 1$ en la rama ascendente

$\varphi = \ln(1 - \eta + \eta X / 0.7) / (\eta \cdot \ln X)$ en la rama descendente a obtener $y = 0.7$ en $x = X$

Se obtienen la deformadas $\varepsilon_{c1,f}$ (IX.5) y $\varepsilon_{c2,f}$ (IX.6) correspondientes con la tensión pico teniendo en cuenta el efecto de confinamiento de las fibras, y con la deformada del 70 % del f_{cm} de la rama descendente, respectivamente.

$$(IX.5) \varepsilon_{c1,f} = \left[1 + 4 \frac{f_{ctf}}{f_c} \right] \cdot \varepsilon_{c1}$$

$$(IX.6) \varepsilon_{c2,f} = \left[1 + 15 \frac{f_{ctf}}{f_c} \right] \cdot \varepsilon_{c2}$$

donde:

$$\varepsilon_{c1} \text{ es la deformación unitaria para tensión máxima, } \varepsilon_{c1} = \left[1 + 0.16 \frac{k_0}{f_c^2 + 800} \right] \frac{f_c^{2/3}}{k_0}$$

ε_{c2} es la deformación unitaria correspondiente a una caída del 30 % de la máxima tensión, y se obtiene a partir de ε_{c1} , $\varepsilon_{c2} = \left[1 + \frac{20}{f_c} \right] \cdot \varepsilon_{c1}$

siendo:

k_0 es el factor que relaciona el módulo de deformación del hormigón (E_c) con la resistencia a compresión (f_c), como se dispone de los valores experimentales se obtiene el factor para cada elemento despejándolo de la ecuación:

$$E_c = k_0 \cdot (f_c)^{\frac{1}{3}}$$

f_c es la resistencia a compresión del hormigón de cada soporte

E_c es el módulo de deformación de cada soporte

f_{ctf} es la resistencia a tracción obtenida a partir de los valores experimentales

La Tabla IX.1 recoge, para cada soporte ensayado, los valores experimentales utilizados para definir el comportamiento tensión-deformación del hormigón

Tabla IX.1. Valores experimentales utilizados para definir el comportamiento tensión-deformación del hormigón

Tipo I - Mixtas (2%)				Tipo II - Largas (2%)			
Referencia	f_c (MPa)	k_0	f_{ctf} (MPa)	Referencia	f_c (MPa)	k_0	f_{ctf} (MPa)
AS11-1	132,66	8887,64	19,09	AS11-4	125,19	8713,89	18,04
AS11-2	130,41	9353,09	19,07	AS11-5	122,25	8843,43	18,19
AS11-3	119,35	9269,01	18,88	AS11-6	121,63	9116,68	20,40
AS21-10	148,07	9278,03	17,53	Tipo I - Mixtas (1%)			
AS31-11	128,95	8692,19	15,53				
AS21-12	142,28	9746,60	13,59	Referencia	f_c (MPa)	k_0	f_{ctf} (MPa)
AS21-13	133,98	9389,41	16,20	AS11-7	127,37	8977,34	12,36
AS23-15	145,53	9253,18	13,08	AS11-8	130,60	9359,47	13,09
AS24-15	127,93	8633,34	18,74	AS11-9	134,71		14,27
AS13-16	125,79	8843,13	19,73				
BS11-17	121,87	9179,26	21,72				
BS11-18	122,04	8836,10	16,88				
BS13-19	123,21	8677,02	19,83				
AS11-20	119,29	8489,57	17,65				
AS11-21	126,44	8288,47	19,91				
AS11-22	117,94	8350,23	16,52				
AS21-23	121,70	8501,88	24,61				
AS21-24	133,32	8627,48	25,51				
AS11-25	120,56	8721,83	22,56				
AS11-2R	125,09	8561,37	23,70				

Comportamiento a tracción

A partir de los valores obtenidos de las probetas de acompañamiento ensayadas a flexotracción (véase Capítulo IV) se va a definir el comportamiento a tracción del hormigón mediante un análisis inverso. Para ello se ajusta la ley de comportamiento tenso-deformacional mediante un cálculo numérico a partir del ensayo carga-abertura de fisura [36].

De forma general, para el análisis inverso, el primer paso es suponer una ley de comportamiento del material; a partir de ahí se simula numéricamente el ensayo experimental tomando como variables la deformación de la fibra más traccionada (ϵ_s) y la curvatura (ϕ) de la sección, y teniendo en cuenta las ecuaciones de equilibrio frente a sollicitaciones normales (N, M) y admitiendo como hipótesis básicas la ley plana de deformaciones, se puede obtener analíticamente la expresión del flector resistido teórico. Comparando el valor del flector obtenido experimentalmente y ajustándolo mediante mínimos cuadrados, es posible obtener los valores buscados para cada rama de la ley de comportamiento tensión-deformación en tracción inicialmente supuesta.

La ejecución del ensayo se realizó siguiendo las indicaciones de la norma UNE-EN 14651 (2008) [36], en el que se obtienen los valores del desplazamiento en el borde de la fisura (CMOD) en función de la carga aplicada.

En este ensayo se realiza una entalla de 25 mm de profundidad en el borde inferior de la sección central de la probeta, dejando una sección resistente efectiva de canto 125 mm. El captador de desplazamiento se sitúa en la parte inferior de la probeta a 5 mm del borde inferior. Teniendo en cuenta la corrección del desplazamiento del borde de la fisura en el caso de no coincidir la parte superior de la entalla en la probeta y la línea de medición y, de acuerdo con el artículo 9.1 de la norma UNE-EN 14651 (2008) [36] (IX.7), se obtiene el desplazamiento equivalente, w_i , en el borde inferior de la sección.

$$(IX.7) w_i = CMOD_y \cdot \frac{125}{(150+5)}$$

A partir del valor corregido, siguiendo la expresión facilitada por las recomendaciones de AFGC-SETRA [4], la deformación en el borde más traccionado de la sección resistente efectiva se obtiene a partir de la ecuación (IX.8) que tiene dos términos. El primero corresponde al valor de la rama elástica y el segundo es la deformación obtenida a partir de la abertura de fisura medida (w_i).

$$(IX.8) \varepsilon_{ci} = \frac{f_{ci}}{E_c} + \frac{w_i}{l_c}$$

donde:

ε_{ci} es la deformada del hormigón en la fibra más traccionada

f_{ci} es la carga aplicada

w_i es la abertura de fisura medida en la posición de referencia

l_c es la longitud característica, definida según AFGC-SETRA (2013) [4], como $l_c = (2/3)h$

h es el canto de la sección resistente efectiva (125 mm en este caso)

Una vez aclarado cómo obtener las deformaciones en la fibra más traccionada de la sección, ya se puede proceder a realizar el análisis inverso. Para ello lo primero es partir de una ley de comportamiento tensión-deformación supuesta. A la vista de las curvas obtenidas cuando se realizaron los ensayos de flexotracción, en una primera aproximación se planteó una ley de comportamiento a tracción definido por tres ramas (Figura IX.4 izquierda). Una vez resuelto el análisis inverso se comprobó que no se ajustaba correctamente con las curvas experimentales, lo que llevó a considerar un comportamiento definido por un diagrama poligonal de 4 ramas (Figura IX.4 derecha). En los dos casos se ha supuesto un comportamiento elástico y lineal del hormigón en compresión.

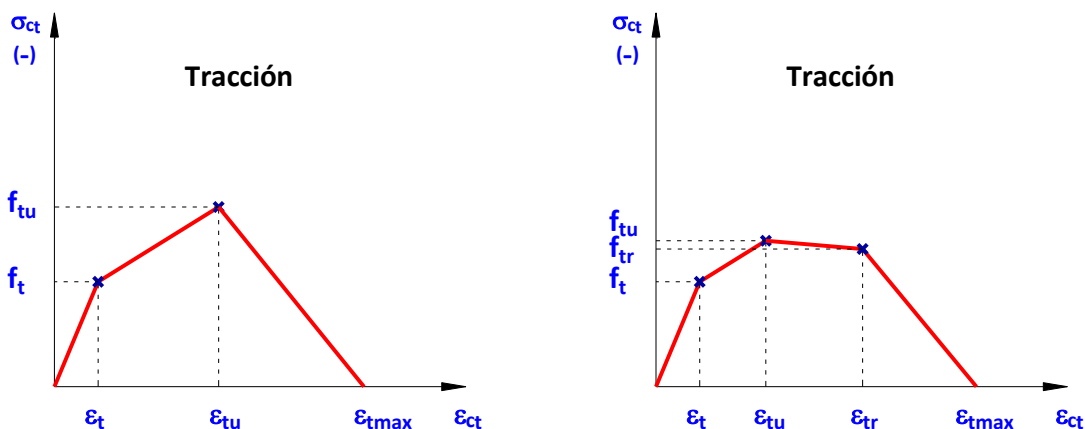


Figura IX.4. Diagrama supuesto para el comportamiento Tensión-Deformación a tracción

Suponiendo las hipótesis previamente comentadas, y planteando las ecuaciones de equilibrio correspondientes para cada situación deformada, a continuación se formulan las expresiones que permiten resolver los distintos estados de deformación de la sección. En la Figura IX.5 se muestra la geometría de la sección y las dos incógnitas buscadas: la curvatura de la sección y el momento resistente de la probeta.

A partir de la ecuación de equilibrio del esfuerzo axial, conocida la deformación ε_2 , se deduce la curvatura, ϕ . A continuación, con la ecuación de equilibrio del esfuerzo flector se deduce el momento resistente de la sección, M_R .

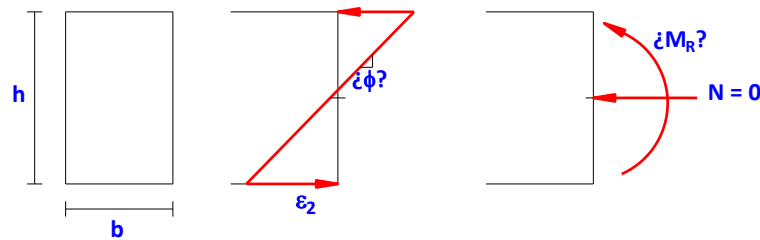


Figura IX.5. Geometría de la sección y diagrama deformacional

Estado I

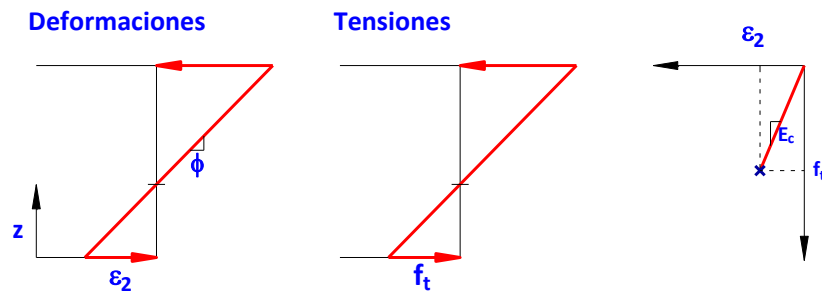


Figura IX.6. Diagrama de tensiones y deformaciones de la sección, Estado I

En este estado se supone que el módulo de deformación en tracción es el mismo que el del hormigón a compresión (E_c).

Planteando las ecuaciones de equilibrio para axil nulo y aceptando la hipótesis de la ley plana de deformaciones (IX.9), se obtienen las expresiones (IX.12) y (IX.13) en función de ε_2 , para este estado. Por el carácter repetitivo de la ecuación (IX.9) en todos los estados planteados, sólo se muestra en éste.

$$(IX.9) \quad \varepsilon = \varepsilon_2 + \phi \cdot z$$

$$(IX.10) \quad N = 0 = \int_0^h E_c \cdot (\varepsilon_2 + \phi \cdot z) \cdot b \, dz$$

$$(IX.11) \quad M_R = \int_0^h E_c \cdot (\varepsilon_2 + \phi \cdot z) \cdot b \cdot z \, dz$$

$$(IX.12) \quad \phi = -\frac{2\varepsilon_2}{h}$$

$$(IX.13) \quad M_R = -\frac{E_c \cdot \varepsilon_2 \cdot b \cdot h}{6}$$

Estado II

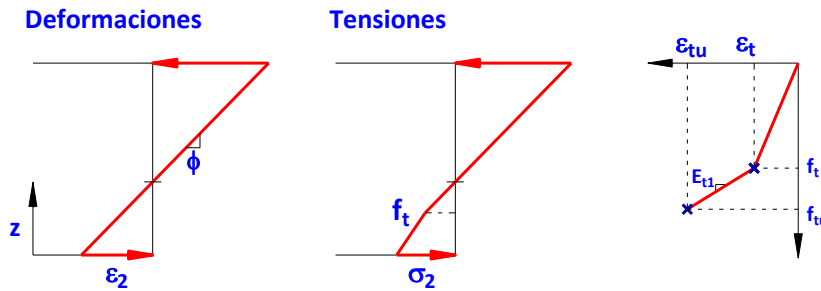


Figura IX.7. Diagrama de tensiones y deformaciones de la sección, Estado II

Las ecuaciones de equilibrio de axiles y momentos son:

$$(IX.14) N = 0 = \int_0^{(\varepsilon_t - \varepsilon_2)/\phi} (-f_t + E_{t1} \cdot (\varepsilon_2 + \phi \cdot z - \varepsilon_t)) \cdot b \, dz + \int_{(\varepsilon_t - \varepsilon_2)/\phi}^h E_c \cdot (\varepsilon_2 + \phi \cdot z) \cdot b \, dz$$

$$(IX.15) M_R = \int_0^{(\varepsilon_t - \varepsilon_2)/\phi} (-f_t + E_{t1} \cdot (\varepsilon_2 + \phi \cdot z - \varepsilon_t)) \cdot b \cdot z \, dz + \int_{(\varepsilon_t - \varepsilon_2)/\phi}^h E_c \cdot (\varepsilon_2 + \phi \cdot z) \cdot b \cdot z \, dz$$

A partir de este estado, el desarrollo de la formulación da lugar a la resolución de ecuaciones de segundo grado; para no hacer farragosa la lectura se omite este desarrollo en éste y en los próximos estados comentados, si bien cabe indicar que de las dos soluciones que arroja la resolución de una ecuación de segundo grado se escoge la correspondiente al intervalo considerado.

Estado III

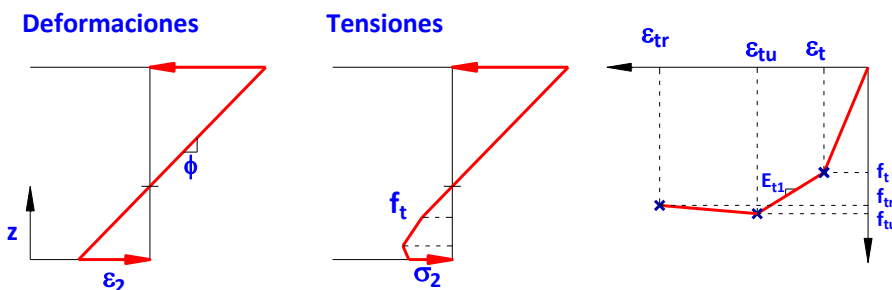
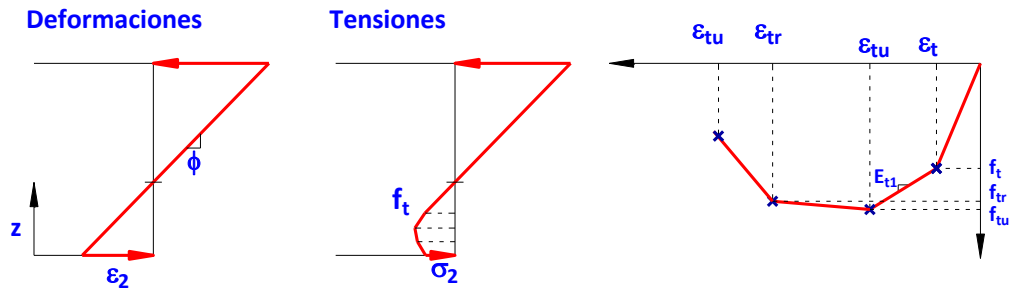


Figura IX.8. Diagrama de tensiones y deformaciones de la sección, Estado III

Para este estado el planteamiento de las ecuaciones de equilibrio son las siguientes:

$$(IX.16) N = \int_0^{(\varepsilon_{tu} - \varepsilon_2)/\phi} (-f_{tu} + E_{t2} \cdot (\varepsilon_2 + \phi \cdot z - \varepsilon_{tu})) \cdot b \, dz + \int_{(\varepsilon_{tu} - \varepsilon_2)/\phi}^{(\varepsilon_t - \varepsilon_2)/\phi} (-f_t + E_{t1} \cdot (\varepsilon_2 + \phi \cdot z - \varepsilon_t)) \cdot b \, dz + \int_{(\varepsilon_t - \varepsilon_2)/\phi}^h E_c \cdot (\varepsilon_2 + \phi \cdot z) \cdot b \, dz = 0$$

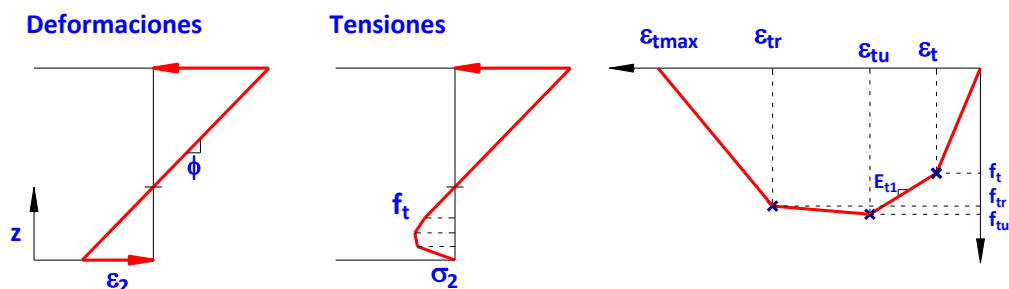
$$(IX.17) M_R = \int_0^{(\varepsilon_{tu}-\varepsilon_2)/\phi} (-f_{tu} + E_{t2} \cdot (\varepsilon_2 + \phi \cdot z - \varepsilon_{tu})) \cdot b \cdot z \, dz + \int_{(\varepsilon_{tu}-\varepsilon_2)/\phi}^{(\varepsilon_t-\varepsilon_2)/\phi} (-f_t + E_{t1} \cdot (\varepsilon_2 + \phi \cdot z - \varepsilon_t)) \cdot b \cdot z \, dz + \int_{(\varepsilon_t-\varepsilon_2)/\phi}^h E_c \cdot (\varepsilon_2 + \phi \cdot z) \cdot b \cdot z \, dz$$

Estado IV

Figura IX.9. Diagrama de tensiones y deformaciones de la sección, Estado IV

En este estado se alcanza la solución resolviendo las siguientes expresiones:

$$(IX.18) N = \int_0^{(\varepsilon_{tr}-\varepsilon_2)/\phi} (-f_{tr} + E_{t3} \cdot (\varepsilon_2 + \phi \cdot z - \varepsilon_{tr})) \cdot b \, dz + \int_{(\varepsilon_{tr}-\varepsilon_2)/\phi}^{(\varepsilon_{tu}-\varepsilon_2)/\phi} (-f_{tu} + E_{t2} \cdot (\varepsilon_2 + \phi \cdot z - \varepsilon_{tu})) \cdot b \, dz + \int_{(\varepsilon_{tu}-\varepsilon_2)/\phi}^{(\varepsilon_t-\varepsilon_2)/\phi} (-f_t + E_{t1} \cdot (\varepsilon_2 + \phi \cdot z - \varepsilon_t)) \cdot b \, dz + \int_{(\varepsilon_t-\varepsilon_2)/\phi}^h E_c \cdot (\varepsilon_2 + \phi \cdot z) \cdot b \, dz = 0$$

$$(IX.19) M_R = \int_0^{(\varepsilon_{tr}-\varepsilon_2)/\phi} (-f_{tr} + E_{t3} \cdot (\varepsilon_2 + \phi \cdot z - \varepsilon_{tr})) \cdot b \cdot z \, dz + \int_{(\varepsilon_{tr}-\varepsilon_2)/\phi}^{(\varepsilon_{tu}-\varepsilon_2)/\phi} (-f_{tu} + E_{t2} \cdot (\varepsilon_2 + \phi \cdot z - \varepsilon_{tu})) \cdot b \cdot z \, dz + \int_{(\varepsilon_{tu}-\varepsilon_2)/\phi}^{(\varepsilon_t-\varepsilon_2)/\phi} (-f_t + E_{t1} \cdot (\varepsilon_2 + \phi \cdot z - \varepsilon_t)) \cdot b \cdot z \, dz + \int_{(\varepsilon_t-\varepsilon_2)/\phi}^h E_c \cdot (\varepsilon_2 + \phi \cdot z) \cdot b \cdot z \, dz$$

Estado V

Figura IX.10. Diagrama de tensiones y deformaciones de la sección, Estado V

Y para el último estado las expresiones son:

$$(IX.20) N = \int_{(\varepsilon_{tmax}-\varepsilon_2)/\phi}^{(\varepsilon_{tr}-\varepsilon_2)/\phi} (-f_{tr} + E_{t3} \cdot (\varepsilon_2 + \phi \cdot z - \varepsilon_{tr})) \cdot b dz + \int_{(\varepsilon_{tr}-\varepsilon_2)/\phi}^{(\varepsilon_{tu}-\varepsilon_2)/\phi} (-f_{tu} + E_{t2} \cdot (\varepsilon_2 + \phi \cdot z - \varepsilon_{tu})) \cdot b dz + \int_{(\varepsilon_{tu}-\varepsilon_2)/\phi}^{(\varepsilon_t-\varepsilon_2)/\phi} (-f_t + E_{t1} \cdot (\varepsilon_2 + \phi \cdot z - \varepsilon_t)) \cdot b dz + \int_{(\varepsilon_t-\varepsilon_2)/\phi}^h E_c \cdot (\varepsilon_2 + \phi \cdot z) \cdot b dz = 0$$

$$(IX.21) M_R = \int_{(\varepsilon_{tmax}-\varepsilon_2)/\phi}^{(\varepsilon_{tr}-\varepsilon_2)/\phi} (-f_{tr} + E_{t3} \cdot (\varepsilon_2 + \phi \cdot z - \varepsilon_{tr})) \cdot b \cdot z dz + \int_{(\varepsilon_{tr}-\varepsilon_2)/\phi}^{(\varepsilon_{tu}-\varepsilon_2)/\phi} (-f_{tu} + E_{t2} \cdot (\varepsilon_2 + \phi \cdot z - \varepsilon_{tu})) \cdot b \cdot z dz + \int_{(\varepsilon_{tu}-\varepsilon_2)/\phi}^{(\varepsilon_t-\varepsilon_2)/\phi} (-f_t + E_{t1} \cdot (\varepsilon_2 + \phi \cdot z - \varepsilon_t)) \cdot b \cdot z dz + \int_{(\varepsilon_t-\varepsilon_2)/\phi}^h E_c \cdot (\varepsilon_2 + \phi \cdot z) \cdot b \cdot z dz$$

Una vez planteadas las ecuaciones para los 5 estados, mediante un proceso de ajuste por mínimos cuadrados se pueden obtener los valores buscados, obteniendo como resultado el comportamiento tenso-deformacional a tracción para cada uno de los hormigones fabricados según se muestra en la Figura IX.11.

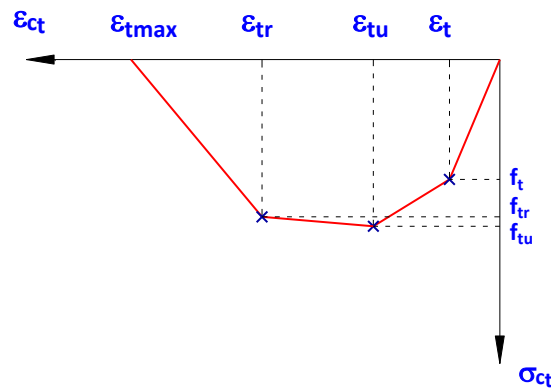


Figura IX.11. Diagrama teórico Tensión-Deformación modelizado para el hormigón

En las Tablas IX.2, IX.3 y IX.4 se muestran los valores obtenidos tras el análisis inverso realizado. Se presentan sólo los datos del diagrama poligonal de 4 ramas.

Tabla IX.2. Definición del diagrama σ - ε en tracción.Tipo I (2% volumen de fibras)

	Análisis inverso - tensión-deformación polilínea (4 ramas)					
Referencia	f_t (MPa)	f_{tu} (MPa)	f_{tr} (MPa)	ε_{tu} (‰)	ε_{tr} (‰)	$\varepsilon_{tmáx}$ (%)
AS11-1	5,85	8,42	7,51	1,00	10,50	1,42
AS11-2	6,82	8,03	8,12	0,96	8,17	1,27
AS11-3	6,52	8,63	7,20	2,50	9,00	1,35
AS21-10	4,78	7,99	6,60	2,88	9,48	1,32
AS31-11	4,05	6,95	5,62	2,00	10,11	1,17
AS21-12	3,51	6,23	4,50	2,47	9,30	1,28
AS21-13	3,58	7,27	6,15	1,89	10,02	1,40
AS23-15	3,42	5,53	5,13	2,04	10,00	1,20
AS24-15	4,34	8,66	6,93	1,97	11,90	1,49
AS13-16	4,37	8,96	7,49	1,28	10,28	1,44
BS11-17	4,48	10,50	6,86	1,63	12,10	5,27
BS11-18	2,54	7,80	6,03	1,86	14,00	4,00
BS13-19	3,64	8,75	7,30	1,66	15,13	5,23
AS11-20	3,19	8,50	5,73	1,56	13,50	4,75
AS11-21	3,60	9,23	8,00	1,96	10,00	4,75
AS11-22	2,04	7,96	5,85	1,97	10,47	4,16
AS21-23	3,45	9,93	8,24	1,97	10,47	4,16
AS21-24	3,50	11,75	9,07	1,11	19,37	5,29
AS11-25	1,68	10,00	9,00	0,82	11,13	6,07
AS11-2R	9,26	10,31	8,45	1,27	19,00	5,24
Valor medio	4,23	8,57	6,99	1,74	11,70	3,11
Desviación típica (σ)	1,76	1,49	1,28	0,55	3,09	1,88
C. de Variación (Cv %)	41,65%	17,36%	18,36%	31,41%	26,39%	60,44%

Tabla IX.3. Definición del diagrama σ - ε en tracción.Tipo II (2% volumen de fibras)

	Análisis inverso - tensión-deformación polilínea (4 ramas)					
Referencia	f_t (MPa)	f_{tu} (MPa)	f_{tr} (MPa)	ε_{tu} (‰)	ε_{tr} (‰)	$\varepsilon_{tmáx}$ (%)
AS11-4	5,55	8,25	6,52	2,25	11,00	2,64
AS11-5	6,50	7,75	7,00	3,00	15,00	1,88
AS11-6	7,45	8,75	7,35	3,15	19,50	2,10
Valor medio	6,50	8,25	6,96	2,80	15,17	2,21
Desviación típica (σ)	0,95	0,50	0,42	0,48	4,25	0,40
C. de Variación (Cv %)	14,62%	6,06%	6,03%	17,22%	28,04%	17,92%

Tabla IX.4. Definición del diagrama σ - ε en tracción. Tipo I (1% volumen de fibras)

	Análisis inverso - tensión-deformación polilineal (4 ramas)					
Referencia	f_t (MPa)	f_{tu} (MPa)	f_{tr} (MPa)	ε_{tu} (‰)	ε_{tr} (‰)	ε_{tmax} (‰)
AS11-7	3,93	5,05	4,84	3,55	9,00	1,26
AS11-8	3,78	5,34	5,05	2,98	7,51	1,31
AS11-9	4,61	6,50	5,75	3,89	9,00	1,00
Valor medio	4,10	5,63	5,21	3,47	8,50	1,19
Desviación típica (σ)	0,44	0,77	0,48	0,46	0,86	0,17
C. de Variación (Cv %)	10,74%	13,62%	9,17%	13,32%	10,11%	14,00%

En la Figura IX.12 se puede observar el resultado teórico conseguido tras esta modelización frente al comportamiento obtenido experimentalmente. Los puntos que se señalan en la figura corresponden cuando la deformación ε_2 es igual a las cuatro deformaciones que delimitan las cuatro ramas del diagrama poligonal en tracción (ε_t , ε_{tu} , ε_{tr} y ε_{tmax}). Con el fin de comprobar el buen ajuste conseguido se han elaborado las gráficas comparativas para todas las probetas prismáticas que se fabricaron para cada uno de los soportes, pudiéndose consultar en el Anejo J.

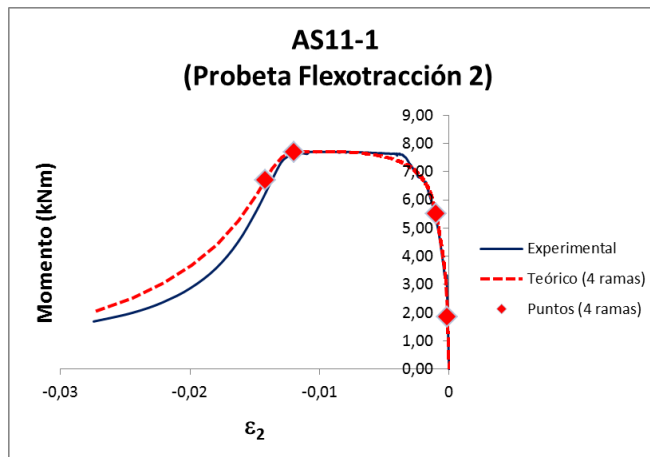


Figura IX.12. Diagrama de ajuste experimental/teórico

IX.1.2. Análisis del diagrama Momento-Curvatura

Para determinar teóricamente la resistencia del momento último de la sección transversal de los soportes ensayados, se aceptan las siguientes hipótesis:

- la ley plana de deformaciones
- la existencia de compatibilidad de deformaciones entre el acero y el hormigón, tanto en compresiones como en tracciones
- las tensiones en el hormigón se derivan del diagrama tensión-deformación de cálculo, visto en el apartado IX.1.1.2.

- las tensiones en el acero se obtienen del diagrama tensión-deformación de cálculo, visto en el apartado IX.1.1.1.

Planteando como datos la geometría de la sección de cálculo, en este caso la sección crítica del soporte, y las curvas constitutivas de los materiales, tanto en tracción como en compresión, y aceptando las hipótesis comentadas previamente, se puede resolver numéricamente el problema seccional, obteniendo el momento último teórico resistido por la sección. Este comportamiento seccional teórico, en términos de momento-curvatura, se puede comparar con el realmente resistido por la sección a partir de los valores obtenidos experimentalmente.

Para resolver el problema se plantean las ecuaciones de equilibrio, en función de la curvatura (ϕ) y el alargamiento unitario en el centro de referencia de esfuerzos (ε_0).

$$(IX.22) \quad N = N_u(\varepsilon_0, \phi)$$

$$(IX.23) \quad M = M_u(\varepsilon_0, \phi)$$

El procedimiento de resolución parte de la ecuación de equilibrio del esfuerzo axial (IX.22), para un valor constante y conocido, como ocurre en los ensayos experimentales, de modo que se busca el alargamiento ε_0 para una curvatura dada ϕ . Así, dado un valor de curvatura, se aplican incrementos graduales de la misma, y mediante el método de Newton-Raphson, que permite resolver las ecuaciones no-lineales del sistema, se obtienen, para cada incremento, la deformada y por ende el flector que actúa en la sección gracias a la ecuación del equilibrio (IX.23).

El método para resolver las ecuaciones no lineales (IX.22 y IX.23) se encuentra implementado en el programa SEC3D, desarrollado por el grupo de investigación al que pertenece la autora del presente trabajo, y ha sido utilizado para la búsqueda de la solución. Cabe señalar que no se han tenido en cuenta los efectos no-lineales debidos a la aplicación de una carga lateral cíclica, como es la degradación de la rigidez del hormigón debido a las cargas cíclicas, los modelos de carga-descarga del hormigón en compresión y tracción, y el efecto Bauschinger en las armaduras, entre otros. En consecuencia, mediante esta simulación se obtiene el comportamiento noval de la sección para una carga monotónica.

En la Figura IX.13 se muestran dos ejemplos en los que se comparan los diagramas momento-curvatura experimental y el teórico calculado mediante el método numérico explicado previamente.

Como se puede apreciar, el comportamiento conseguido mediante el método teórico se ajusta, de manera bastante aceptable, al que realmente se obtuvo con el ensayo del soporte, dándole validez al método empleado para el análisis. De los 26 soportes, en muy pocos casos no fue todo lo aproximado que se esperaba, por ejemplo en el soporte ensayado a flexión simple, sin ninguna carga axial aplicada. El resto de curvas obtenidas se puede consultar en el Anejo E. Se ha obtenido un ajuste del modelo admisible puesto que el daño en estos soportes se encuentra muy concentrado, siendo la degradación de la rigidez del hormigón poco importante en comparación con los soportes de hormigón tradicional (Caballero et al. (2012) [27]).

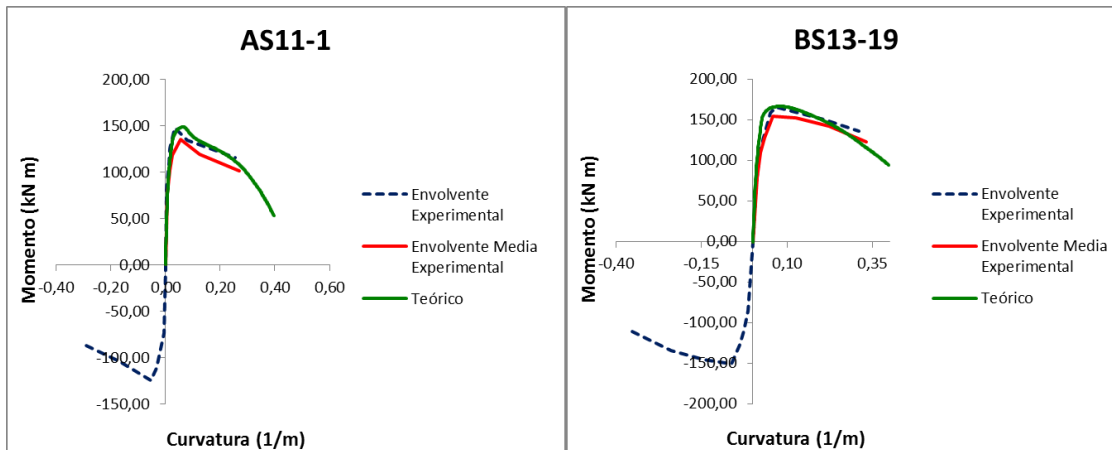


Figura IX.13. Comparativa de los diagramas momento-curvatura experimental y obtenido numéricamente

En la Tabla IX.5 se comparan los valores máximos del esfuerzo flector obtenido numéricamente frente al valor obtenido experimentalmente. A la vista de los valores obtenidos, el modelo numérico se sitúa ligeramente del lado de la inseguridad, lo que se puede explicar por no haber tenido en cuenta en el cálculo la degradación del material debida a la carga cíclica.

Tabla IX.5. Valores experimentales y numéricos del esfuerzo flector máximo. Relación entre ambos

REFERENCIA	EXPERIMENTAL		MODELO NUMÉRICO	Mmax_EXP/Mmax_NUM
	N (kN)	Mmax_EXP (mkN)	Mmax_NUM (mkN)	
AS11-1	1042,63	135,33	149,06	0,91
AS11-2	1020,24	156,05	146,17	1,07
AS11-2R	987,85	128,42	151,25	0,85
AS11-3	933,93	128,93	136,93	0,94
AS11-4	985,00	141,58	141,43	1,00
AS11-5	965,90	130,71	140,02	0,93
AS11-6	957,88	139,73	142,49	0,98
AS11-7	1001,61	140,53	135,78	1,03
AS11-8	1024,80	141,46	137,51	1,03
AS11-9	1062,08	147,87	142,29	1,04
AS21-10	901,80	95,42	95,11	1,00
AS31-11	551,07	41,96	39,85	1,05
AS21-12	433,39	58,09	60,70	0,96
AS21-13	0,00	19,92	30,81	0,65
AS23-14	875,92	111,39	106,38	1,05
AS24-15	776,90	113,00	118,20	0,96
AS13-16	996,55	151,66	161,36	0,94
BS11-17	966,23	138,36	146,48	0,94
BS11-18	964,31	138,91	142,21	0,98
BS13-19	977,16	154,32	166,83	0,92
AS11-20	944,86	132,78	139,50	0,95
AS11-21	996,90	131,01	148,43	0,88
AS11-22	939,12	125,98	137,38	0,92
AS21-23	1136,49	92,79	99,00	0,94
AS21-24	1590,83	118,36	113,83	1,04
AS11-25	948,60	134,63	145,66	0,92
			Promedio	0,96
			C.V.	9%
			Percentil 5%	0,86
			Percentil 95%	1,05

Con el mismo criterio definido en el método aproximado se pueden obtener los valores de las curvaturas elástica y última de cada soporte, y a partir de estos valores obtener el índice de ductilidad en curvaturas teórico, μ_{ϕ} . Comparando los índices de ductilidad teóricos con los obtenidos experimentalmente mediante dicho método de idealización se consiguen los valores recogidos en la Tabla IX.6. A la vista de los resultados se puede ver cómo en ductilidades el comportamiento teórico se aleja de los valores experimentales, quedando, salvo en casos muy concretos, del lado de la inseguridad. Según la metodología empleada los valores de la curvatura elástica se obtienen, entre otros condicionantes, a partir del valor máximo del esfuerzo flector; por tanto, si el valor teóricamente obtenido del flector no se ajusta lo suficiente al experimental, la curvatura elástica teórica tampoco lo hará. En el caso de que el valor de la curvatura última se ajuste a la experimental, la relación entre ambas, se ve afectada cuando se compara con el índice de ductilidad experimental.

Tabla IX.6. Valores teóricos y experimentales de la curvatura. Relación de los índices de ductilidad en curvatura obtenidos

Referencia	ϕ_y _teorico	ϕ_u _teorico	μ_{ϕ} _teórico	ϕ_y _exp	ϕ_u _exp	μ_{ϕ} _exp (MA)	μ_{ϕ} _exp (MA)/ μ_{ϕ} _teórico
AS11-1	0,022	0,220	10,219	0,021	0,214	10,407	1,02
AS11-22 ^(*)	0,024	0,239	10,004	0,034	0,218	6,388	0,64
AS11-2R ^(*)	0,024	0,288	12,179	0,034	0,234	6,996	0,57
AS11-3	0,021	0,216	10,460	0,023	0,276	11,955	1,14
AS11-20 ^(*)	0,023	0,246	10,621	0,034	0,141	4,103	0,39
AS11-21 ^(*)	0,025	0,264	10,548	0,036	0,246	6,914	0,66
AS11-4	0,022	0,228	10,356	0,029	0,263	8,990	0,87
AS11-5	0,022	0,219	9,920	0,029	0,239	8,216	0,83
AS11-6 ^(*)	0,022	0,229	10,559	0,030	0,219	7,291	0,69
AS11-7	0,021	0,178	8,548	0,030	0,213	7,016	0,82
AS11-8	0,020	0,178	8,786	0,027	0,180	6,673	0,76
AS11-9 ^(*)	0,027	0,286	10,695	0,031	0,200	6,444	0,60
AS21-10 ^(*)	0,028	0,259	9,288	0,040	0,295	7,310	0,79
AS31-11	0,040	0,374	9,351	0,044	0,298	6,698	0,72
AS21-12 ^(*)	0,023	0,400	17,723	0,033	0,298	9,098	0,51
AS21-13	0,020	0,092	4,590	0,019	0,190	9,746	2,12
AS21-23 ^(*)	0,033	0,243	7,421	0,036	0,192	5,353	0,72
AS21-24 ^(*)	0,033	0,170	5,136	0,031	0,053	1,722	0,34
AS23-14	0,032	0,235	7,344	0,054	0,355	6,516	0,89
AS24-15 ^(*)	0,035	0,365	10,313	0,055	0,410	7,431	0,72
AS13-16	0,024	0,246	10,131	0,028	0,226	8,087	0,80
BS11-17	0,021	0,263	12,660	0,030	0,246	8,211	0,65
BS11-18	0,022	0,227	10,472	0,031	0,253	8,108	0,77
BS13-19 ^(*)	0,024	0,274	11,321	0,037	0,309	8,286	0,73
AS11-25	0,024	0,282	11,909	0,033	0,305	9,115	0,77
Valor medio	0,03	0,26	10,25	0,03	0,25	7,39	0,84
Desviación típica (σ)	0,01	0,06	2,28	0,01	0,07	2,01	0,13
C. Variación (Cv %)	21,07%	22,61%	22,24%	24,20%	29,12%	27,19%	16,01%
Percentil (5 %)	0,02	0,12	4,75	0,02	0,08	2,44	0,35
Percentil (95 %)	0,04	0,39	16,20	0,05	0,39	11,49	1,83

^(*) estos valores no se tienen en cuenta en la comparativa por corresponder o con soportes que no han alcanzado el 20 % de caída post-pico

IX.1.3. Análisis del comportamiento estructural mediante un modelo teórico de referencia

Para el análisis del comportamiento estructural se aplica un modelo teórico de referencia, mediante el método de los elementos finitos; en concreto se ha utilizado el definido por Bonet [23].

Este método numérico incluye las siguientes hipótesis principales:

- El elemento finito 1-D con curvatura no constante: el elemento tiene 13 grados de libertad. Este elemento tiene tres nodos, con de 6 grados de libertad; en los nodos inicial y final (tres rotaciones y tres desplazamientos), mientras que en la mitad del tramo hay sólo un nodo con un solo grado de libertad en la dirección del axil para capturar la curvatura variable del elemento, como se observa en la Figura IX.14.

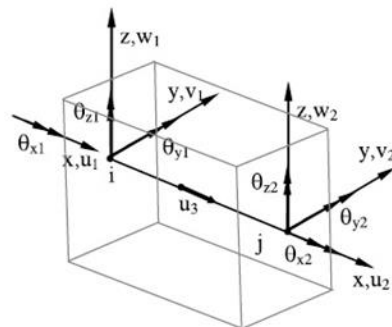


Figura IX.14. Modelo de elementos finitos, Bonet et al. (2011) [24]

- Se realiza la integración numérica de la sección transversal usando el teorema de Green, siguiendo el método de integración propuesto por Bonet et al. (2004) [25] (véase Figura IX.15) modificado con 7 bandas de integración, 4 bandas para considerar el diagrama polilineal de 4 ramas en tracción y 3 bandas de integración para el diagrama a compresión (Figura IX.16).

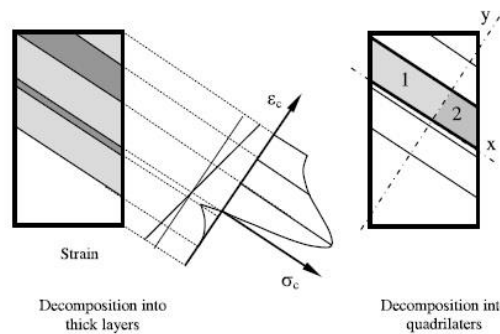


Figura IX.15. Integración de la sección, Bonet et al. (2004) [25]

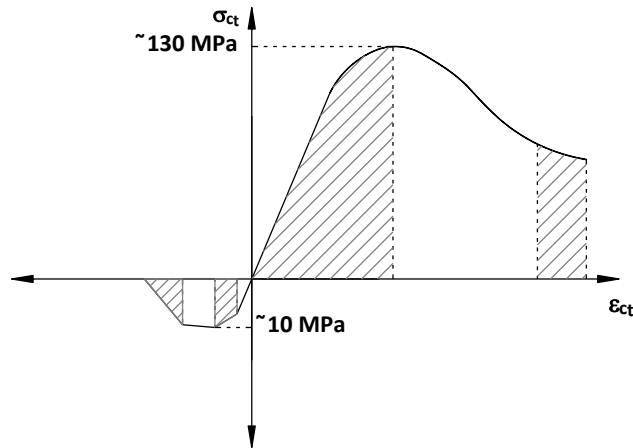


Figura IX.16. Descomposición en capas finas

- Comportamiento no-lineal del acero y del hormigón: se han considerado las mismas ecuaciones constitutivas que en el apartado IX.1.2.
- No-linealidad geométrica: mediante la matriz de rigidez geométrica y la actualización de los desplazamientos.

Este método no considera los efectos debidos a la aplicación de una carga cíclica, y en consecuencia se obtiene la rama noval teórica de comportamiento cortante-desplazamiento. Aunque se ha comparado la diferencia de comportamiento del soporte sometido a una carga lateral monótonica y cíclica con un único experimento, observándose que la envolvente media es semejante al comportamiento monótonico, así como los resultados obtenidos en la comparación de los diagramas momento-curvatura, es de esperar que el modelo teórico de referencia muestre un comportamiento aceptable.

Así, para todos los soportes se ha obtenido la respuesta estructural teórica y se ha comparado con la respuesta experimental de cada uno de ellos. En la Figura IX.17 se muestra un ejemplo de los resultados obtenidos; el resto de gráficas comparativas cortante-desplazamiento están disponibles en el Anejo E. Puede observarse que el modelo teórico de referencia se comporta aceptablemente.

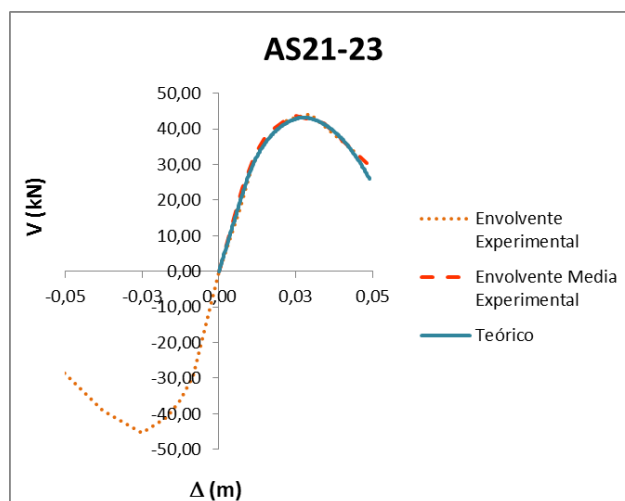


Figura IX.17. Comparativa de envolventes experimental y teórica AS21-23

Para confirmar el buen ajuste los valores obtenidos teóricamente con los experimentales, se recopilan en la Tabla IX.7 los valores obtenidos para cada soporte. Como sucedía en el comportamiento momento-curvatura, aunque el ajuste es aceptable, se encuentra ligeramente del lado de la inseguridad, lo que puede ser debido a que en el cálculo no se considera la degradación del material debida a la carga cíclica.

Tabla IX.7. Valores experimentales y numéricos del esfuerzo cortante máximo. Relación entre ambos

REFERENCIA	EXPERIMENTAL	MODELO NUMÉRICO	Vmax_EXP/Vmax_NUM
	Vmax_EXP (kN)	Vmax_NUM (kN)	
AS11-1	81,05	85,97	0,94
AS11-2	79,46	85,42	0,93
AS11-2R	76,37	86,65	0,88
AS11-3	76,42	80,47	0,95
AS11-4	78,99	81,78	0,97
AS11-5	74,71	80,40	0,93
AS11-6	78,62	82,53	0,95
AS11-7	79,43	78,43	1,01
AS11-8	85,15	80,02	1,06
AS11-9	81,24	78,55	1,03
AS21-10	44,35	47,96	0,92
AS31-11	15,18	13,37	1,14
AS21-12	33,62	35,01	0,96
AS21-13	15,56	21,28	0,73
AS23-14	55,03	54,71	1,01
AS24-15	57,51	63,48	0,91
AS13-16	88,60	94,25	0,94
BS11-17	81,85	86,65	0,94
BS11-18	81,40	82,76	0,98
BS13-19	92,85	98,09	0,95
AS11-20	77,22	80,48	0,96
AS11-21	75,73	84,37	0,90
AS11-22	73,75	78,94	0,93
AS21-23	43,88	43,27	1,01
AS21-24	48,03	42,67	1,13
AS11-25	81,05	83,53	0,97
		Promedio	0,96
		C.V.	8%
		Percentil 5%	0,89
		Percentil 95%	1,11

(*) estos valores no se tienen en cuenta en la comparativa por corresponder o con soportes que no han alcanzado el 20 % de caída post-pico o por devolver una envolvente teórica anómala

Con los valores obtenidos y aplicando el método aproximado se pueden obtener los valores de los desplazamientos elástico y último teóricos de cada soporte. La relación entre el desplazamiento último y el elástico es el índice de ductilidad en desplazamientos. Si se realiza la comparación de los valores experimentalmente obtenidos con los teóricos se aprecia que, a diferencia de lo que sucedía con el índice de ductilidad en curvaturas, en este caso el ajuste es bastante aceptable quedando del lado de la seguridad y resultando el valor promedio levemente por encima de la unidad.

Tabla IX.8. Valores teóricos y experimentales del desplazamiento. Relación de los índices de ductilidad en desplazamiento obtenidos

Referencia	$\Delta y_{\text{teorico}}$	$\Delta u_{\text{teorico}}$	$\mu\Delta_{\text{teórico}}$	Δy_{exp}	Δu_{exp}	$\mu\Delta_{\text{exp (MA)}}$	$\mu\Delta_{\text{exp (MA)}/\mu\Delta_{\text{teórico}}$
AS11-1	0,013	0,033	2,626	0,011	0,025	2,354	0,90
AS11-22	0,013	0,040	3,014	0,012	0,034	2,859	0,95
AS11-2R	0,013	0,044	3,431	0,012	0,035	3,019	0,88
AS11-3	0,011	0,031	2,741	0,010	0,033	3,286	1,20
AS11-20	0,013	0,040	3,102	0,012	0,029	2,341	0,75
AS11-21	0,014	0,043	3,100	0,012	0,035	2,861	0,92
AS11-4	0,012	0,037	3,033	0,012	0,044	3,532	1,16
AS11-5	0,012	0,036	3,037	0,012	0,031	2,620	0,86
AS11-6	0,012	0,037	3,170	0,013	0,043	3,270	1,03
AS11-7	0,011	0,033	2,942	0,013	0,033	2,662	0,90
AS11-8	0,011	0,032	2,944	0,011	0,028	2,551	0,87
AS11-9	0,015	0,040	2,594	0,017	0,042	2,441	0,94
AS21-10	0,014	0,038	2,713	0,017	0,048	2,801	1,03
AS31-11	0,015	0,044	2,980	0,019	0,074	3,918	1,31
AS21-12	0,011	0,033	2,923	0,009	0,035	3,676	1,26
AS21-13 (*)	0,014	0,025	1,839	0,005	0,010	1,902	1,03
AS21-23	0,017	0,043	2,555	0,016	0,041	2,566	1,00
AS21-24 (*)	0,018	0,040	2,231	0,020	0,039	1,948	0,87
AS23-14	0,017	0,043	2,534	0,020	0,055	2,693	1,06
AS24-15	0,021	0,048	2,269	0,022	0,063	2,872	1,27
AS13-16	0,014	0,036	2,590	0,012	0,038	3,132	1,21
BS11-17	0,012	0,039	3,146	0,011	0,036	3,230	1,03
BS11-18	0,012	0,039	3,125	0,013	0,034	2,673	0,86
BS13-19	0,014	0,044	3,060	0,013	0,035	2,768	0,90
AS11-25	0,013	0,043	3,327	0,011	0,032	2,973	0,89
Valor medio	0,01	0,04	2,88	0,01	0,04	2,85	1,01
Desviación típica (σ)	0,00	0,00	0,31	0,00	0,01	3,15	0,16
C. Variación (Cv %)	17,95%	11,48%	10,81%	25,77%	28,43%	110,31%	15,47%
Percentil (5 %)	0,01	0,03	1,96	0,01	0,01	2,22	0,78
Percentil (95 %)	0,02	0,05	3,40	0,02	0,07	3,29	1,30

IX.2. Métodos simplificados

En este apartado se van a realizar dos evaluaciones mediante métodos existentes simplificados a nivel resistente y deformacional.

IX.2.1. Evaluación de la capacidad resistente

Se va a realizar una comparación resistente tanto a nivel sección como a nivel estructural.

Para el cálculo de los valores resistentes se van a utilizar los métodos simplificados descritos en las recomendaciones de AFGC-SETRA (2013) [4] y las siguientes normas: EHE-08 (2011) [35], Eurocódigo 2 (2013) [41] y ACI-318 (2014) [1]. El campo de validez de las normas estudiadas no corresponde con el de un hormigón de altas prestaciones (VHPC) entre 100 y 150 MPa, unas por exceso como las recomendaciones de AFGC-SETRA (2013) (a partir de 150 MPa) y el resto por defecto (menor de 100 MPa).

Sólo se ha considerado la resistencia a tracción del hormigón en el caso de las recomendaciones del AFGC-SETRA (2013), por considerar que es la normativa que más se debería adecuar al tipo de hormigón objeto de este estudio. El resto de normas se analizan

para cuantificar la diferencia entre el resultado teórico y el experimental, de cara a justificar la posible necesidad de una normativa que considere este tipo de hormigón.

De nuevo, los modelos simplificados están calibrados para una carga monotónica, no cíclica. Sin embargo, a la vista de los resultados de los apartados anteriores no se prevén diferencias significativas.

A continuación se realiza la evaluación resistente tanto a nivel sección como a nivel elemento.

IX.2.1.1. Comparativa del momento máximo teórico y experimental

En la sección crítica se ha calculado el momento máximo teórico mediante los métodos simplificados de la normativa comentada previamente; se resumen a continuación.

AFGC-SETRA [4]

Estas recomendaciones proponen, para los Estados Límite Últimos, diagramas de comportamiento tensión-deformación para el hormigón, tanto a compresión como a tracción. En este trabajo se han realizado las siguientes modificaciones: se adopta para el comportamiento a compresión el diagrama propuesto por esta normativa (Figura IX.18 izquierda) tomando el valor experimental del módulo de deformación (E_c), mientras que para el comportamiento a tracción se aplica el diagrama obtenido en el análisis inverso del presente trabajo (Figura IX.18 derecha).

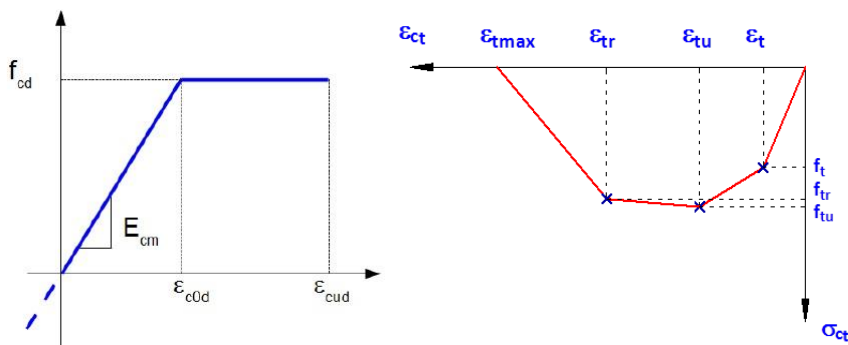


Figura IX.18. Diagrama a compresión AFGC-SETRA(2013) [4] y Diagrama a tracción propuesto

EHE-08 [35]

En esta normativa se definen dos diagramas tensión-deformación de comportamiento del hormigón, el bloque rectangular (EHE-BR) y el parábola-rectángulo (EHE-PR). En este trabajo se obtienen en la sección crítica los valores de los flectores para ambos diagramas, con los coeficientes de seguridad de los materiales igual a la unidad. En la Figura IX.19 se muestran ambos diagramas de cálculo para el hormigón a compresión; para consultar las expresiones que lo definen se remite a la lectura del artículo 39.5 de dicha normativa. En el cálculo realizado no se tiene en cuenta la resistencia a tracción del material.

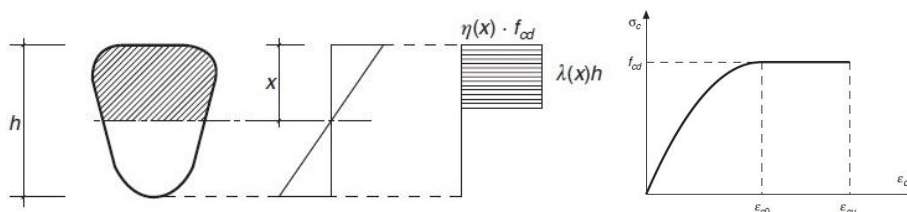


Figura IX.19. Diagrama bloque rectangular y Diagrama parábola rectángulo, EHE-08 [35]

EC-2 [41]

De los diagramas de cálculo a compresión del hormigón se ha utilizado el parábola-rectángulo, que es similar al recogido en la EHE-08; su formulación se puede consultar en el apartado 3.1.7. de dicha normativa.

ACI-318 [1]

En el caso de esta normativa se ha aplicado un diagrama rectangular equivalente para el hormigón.

En la Tabla IX.9 se recopilan los métodos empleados para el cálculo seccional según las normativas empleadas.

Tabla IX.9. Descripción de los métodos y nomenclaturas empleadas en el cálculo seccional

Norma	Modelo simplificado para el cálculo seccional	Nomenclatura
AFGC/SETRA	Parábola-Rectángulo	SETRA
EHE-08	Bloque-Rectangular	_BRE
EHE-08	Parábola-Rectángulo	_PR
EC-2	Parábola-Rectángulo	EC2
ACI-318	Bloque-Rectangular	ACI-318

En la Tabla IX.10 se recogen los resultados obtenidos después de aplicar los métodos simplificados y en la Tabla IX.11 se muestran los valores estadísticos de la relación entre el momento experimental último y el obtenido para cada uno de los métodos planteados.

Tabla IX.10. Valores de los Momentos flectores últimos experimental y teóricos

REFERENCIA	EXPERIMENTAL		MODELOS SIMPLIFICADOS				
	N (kN)	Mmax (mkN)	SETRA	EHE-08		EC2	ACI-318
			Mu (mkN)	Mu BRE (mkN)	Mu PR (mkN)	Mu (mkN)	Mu (mkN)
AS11-1	1042,63	136,44	141,11	96,87	39,47	123,90	120,21
AS11-2	1020,24	156,49	135,18	96,10	38,86	121,08	117,96
AS11-2R	987,85	133,83	147,71	95,24	38,54	118,27	115,99
AS11-3	933,93	130,69	126,74	93,64	36,22	109,36	109,17
AS11-4	985,00	143,53	137,46	95,35	38,06	116,04	114,25
AS11-5	965,90	134,74	136,96	94,37	37,21	112,85	111,84
AS11-6	957,88	139,73	139,51	94,90	37,35	112,52	111,73
AS11-7	1001,61	144,79	128,96	95,72	38,51	118,38	115,92
AS11-8	1024,80	146,70	130,68	95,72	38,72	121,19	117,92
AS11-9	1062,08	154,65	134,67	98,32	122,57	126,76	122,86
AS21-10	901,80	96,66	90,73	59,50	80,70	81,81	78,96
AS31-11	551,07	40,16	36,68	26,84	10,97	33,78	32,84
AS21-12	433,39	58,48	57,09	45,17	48,78	48,03	49,44
AS21-13	0,00	20,26	27,81	15,11	12,98	13,26	15,82
AS23-14	875,92	114,83	97,60	61,55	90,59	92,56	86,38
AS24-15	776,90	114,39	103,07	64,71	21,21	93,20	84,54
AS13-16	996,55	154,46	148,47	100,52	38,38	130,52	126,21
BS11-17	966,23	142,28	143,24	99,24	39,82	115,89	115,20
BS11-18	964,31	139,79	139,61	99,19	39,74	115,85	115,11
BS13-19	977,16	158,08	160,40	107,24	41,51	132,97	131,85
AS11-20	944,86	134,78	135,36	94,08	37,13	112,24	111,47
AS11-21	996,90	132,64	144,69	95,71	38,91	119,89	117,38
AS11-22	939,12	129,81	133,30	94,19	37,07	111,36	110,94
AS21-23	1136,49	95,58	97,58	61,54	33,56	78,96	76,61
AS21-24	1590,83	120,64	114,61	55,63	87,26	98,70	87,85
AS11-25	948,60	134,63	142,05	93,41	36,86	112,62	111,15

Tabla IX.11. Resumen de la variables estadísticas obtenidas para la relación $M_{u \text{ experimental}}/M_{u \text{ teórico}}$

	MÉTODOS SIMPLIFICADOS				
	SETRA	EHE-08		EC2	ACI-318
		EHE-BR	EHE-PR		
	Exp/Modelo	Exp/Modelo	Exp/Modelo	Exp/Modelo	Exp/Modelo
Promedio	1,02	1,52	3,16	1,21	1,23
C.V.	9%	12%	35%	6%	5%
Percentil 5%	0,91	1,35	1,21	1,11	1,14
Percentil 95%	1,16	1,84	4,03	1,28	1,35

A la vista de los resultados se puede apreciar que en todos los modelos planteados se obtienen valores por debajo de los valores obtenidos experimentalmente, dando resultados por encima de la unidad, y por tanto todos ellos cuentan con un margen de seguridad.

Como era de esperar el método simplificado del AFGC/SETRA, modificado en el diagrama de tracción del hormigón, registra la mejor aproximación. El valor promedio del error se sitúa del lado de la seguridad con un coeficiente de variación aceptable. Sin embargo, en el resto de

métodos en donde no se ha tenido en cuenta la resistencia a tracción se registran resultados más marcadamente del lado de la seguridad, siendo el método del EC2 el que presenta una mejor precisión, y el método propuesto por la EHE-08 (Bloque Rectangular) el peor.

IX.2.1.2. Comparativa de la carga lateral máxima teórica y experimental

El valor de la carga lateral máxima teórica se obtiene a partir de los valores de los momentos flectores últimos de la sección. Se han aplicado distintos métodos simplificados que consideran los efectos de segundo orden en soportes esbeltos. Según la normativa utilizada se recogen dos formas de tener en cuenta estos efectos de segundo orden: mediante una amplificación de momentos (EC2 y ACI-318) u obteniendo una excentricidad adicional (EC2 y EHE-08). La recomendación del AFGC/SETRA no recoge en ningún artículo cómo se han de considerar los efectos de segundo orden en soportes esbeltos de UHPC. En este caso, se han supuesto las expresiones del factor de amplificación de momentos (δ_s) y de la excentricidad adicional del EC2 para deducir la carga lateral teórica a partir del esfuerzo de agotamiento del esfuerzo flector obtenido mediante el cálculo seccional con esta normativa.

El proceso de cálculo para obtener el valor de la carga lateral máxima comienza por obtener el momento flector máximo total para una carga axil dada mediante el cálculo seccional. Adicionalmente, se evalúan los efectos de segundo orden, que según el método simplificado utilizado, se realizará mediante el factor de amplificación del flector o mediante la excentricidad adicional. A partir del valor máximo total obtenido del cálculo seccional, y conocido el efecto de segundo orden, se puede despejar el valor del momento flector de primer orden. El valor de la carga lateral teórica se obtiene de acuerdo con (IX.24) a partir del valor del momento de primer orden obtenido previamente.

$$(IX.24) V = \frac{2 \cdot M_{1o}}{L_s}$$

donde:

M_{1o} es el flector de primer orden según las ecuaciones (IX.25) o (IX.26) dependiendo del método y la normativa empleada:

Si se obtiene mediante un factor de amplificación de momentos flectores (EC2 o ACI-318)

$$(IX.25) M_{1o} = \frac{M_T}{\delta_s}$$

Si se obtiene mediante una excentricidad adicional (EC2 o EHE-08)

$$(IX.26) M_{1o} = M_T - N \cdot e_a$$

donde:

M_T es el momento total obtenido mediante el cálculo seccional

N es la carga axil actuante

δ_s es el factor de amplificación según el método simplificado recogido en la normativa (EC2 o ACI-318)

e_a es la excentricidad equivalente obtenida según la normativa correspondiente (EC2, EHE-08 y AFGC/SETRA)

En la Tabla IX.12 se recopilan los métodos simplificados utilizados para la obtención de los efectos de segundo orden.

Tabla IX.12. Descripción de los métodos y nomenclaturas empleadas en el cálculo de los efectos de 2º orden

Norma	Modelo para el cálculo de los efectos de 2º orden	Nomenclatura
AFGC/SETRA	Amplificación de momentos	_dns
AFGC/SETRA	Excentricidad adicional	_ea
EHE-08	Excentricidad adicional (BR)	BREHE
EHE-08	Excentricidad adicional (PR)	PREHE
EC-2	Amplificación de momentos	_dns
EC-2	Excentricidad adicional	_ea
ACI-318	Amplificación de momentos sin i / la rigidez de la armadura ($EI=0.4 E_c I_c$)	ACIsEIs
ACI-318	Amplificación de momentos i / la rigidez de la armadura ($EI=0.2 E_c I_c + E_s I_s$)	ACIcEIs

En la Tabla IX.3 se recogen los resultados obtenidos después de aplicar los métodos simplificados.

Tabla IX.13. Valores de la Carga lateral última experimental y la obtenida mediante los métodos teóricos

REFERENCIA	EXPERIMENTAL Vmax (kN)	MODELOS SIMPLIFICADOS							
		SETRA		EHE-08		EC2		ACI-318	
		Vu_dns	Vu_ea	VuBREHE	VuPREHE	Vu_dns	Vu_ea	VuACIeIs	VuACIcEIs
AS11-1	81,50	75,00	79,43	48,11	12,84	65,86	67,96	64,12	53,53
AS11-2	79,89	71,96	75,73	47,95	12,67	64,45	66,32	63,13	52,79
AS11-2R	77,32	78,61	81,85	44,66	10,59	62,94	62,22	62,25	52,20
AS11-3	76,42	67,77	71,25	47,51	11,98	58,48	59,66	59,05	49,95
AS11-4	80,65	73,25	77,74	47,92	12,54	61,83	63,46	61,36	51,58
AS11-5	77,89	72,92	77,54	47,57	12,22	60,08	61,47	60,18	50,49
AS11-6	78,95	74,49	79,55	48,00	12,42	60,08	61,57	60,20	50,93
AS11-7	82,74	68,66	71,84	47,95	12,62	63,03	64,79	62,14	52,09
AS11-8	85,76	69,43	72,51	47,63	12,57	64,39	66,19	63,05	52,43
AS11-9	84,96	71,63	75,15	48,77	64,44	67,42	69,88	65,36	54,90
AS21-10	45,65	39,95	44,81	22,14	35,23	36,03	38,86	33,72	21,87
AS31-11	15,32	8,22	8,70	4,05	3,55	7,57	6,76	6,87	
AS21-12	33,72	31,35	30,28	20,98	23,31	26,37	24,24	27,15	23,27
AS21-13	15,83								
AS23-14	56,32	44,17	46,49	21,73	39,69	41,89	43,12	37,31	27,31
AS24-15	58,64	48,38	52,46	25,99	2,26	43,74	45,87	37,58	31,52
AS13-16	89,30	79,86	83,05	49,25	11,33	70,21	71,08	67,64	59,07
BS11-17	83,33	77,06	82,81	50,69	13,76	62,34	64,57	61,96	54,03
BS11-18	82,26	75,16	80,41	50,68	13,73	62,36	64,57	61,95	54,05
BS13-19	94,51	87,57	92,40	53,85	13,28	72,60	74,12	70,81	64,72
AS11-20	77,73	72,18	74,34	44,60	10,24	59,86	58,93	60,12	50,76
AS11-21	76,00	77,03	79,76	44,80	10,70	63,83	63,23	62,94	52,83
AS11-22	74,98	71,09	73,14	44,78	10,29	59,39	58,51	59,84	50,66
AS21-23	44,77	32,89	44,14	19,97	5,37	26,61	33,31	25,55	8,02
AS21-24	48,03	28,08	44,23	9,94	26,35	24,18	36,67	19,43	
AS11-25	81,05	75,69	78,49	44,13	10,07	60,02	58,88	59,97	50,30

Para obtener el grado de precisión se evalúa el cociente entre la carga lateral máxima experimental y la obtenida mediante el cálculo teórico (Tabla IX.14). Si los resultados de este cociente son superiores a la unidad significa que se encuentra del lado de la seguridad.

Tabla IX.14. Resumen de las variables estadísticas obtenidas para la relación $V_{\max \text{ experimental}}/V_u \text{ teórico}$

	MODELOS SIMPLIFICADOS						
	SETRA		EHE-08		EC2		ACI-318
	Exp/Modelo_dns	Exp/Modelo_ea	Exp/Modelo_BR	Exp/Modelo_PR	Exp/Modelo_dns	Exp/Modelo_ea	Exp/Modelo
Promedio	1,17	1,08	2,00	6,48	1,36	1,32	1,42
C.V.	17%	14%	37%	72%	16%	16%	21%
Percentil 5%	1,00	0,96	1,61	1,34	1,23	1,20	1,24
Percentil 95%	1,64	1,21	3,55	8,28	1,93	1,39	2,13

Al igual que se observó en el análisis del momento flector, en todos los casos el valor teórico es menor que el valor experimental obtenido, existiendo un margen de seguridad por estar la relación por encima de la unidad. El valor obtenido mediante el AFGC/SETRA es el que más se aproxima al valor real, en concreto si se aplican las expresiones de la excentricidad adicional

propuestas por el EC2. Cabe señalar que con el EC2 se obtiene una aproximación aceptable dado que no tiene en cuenta el efecto de las fibras de acero en el comportamiento a compresión y a tracción del hormigón.

IX.2.2. Evaluación de la capacidad de deformación

Para poder evaluar la capacidad de deformación de los soportes se han utilizado dos métodos simplificados conocidos y comúnmente empleados por los investigadores de la materia. En este apartado se van a comparar los resultados experimentales obtenidos para los elementos ensayados con los calculados teóricamente.

Estos métodos están bien definidos en la bibliografía. El primero de ellos es un modelo analítico descrito por Panagiotakos y Fardis (2001) [91], y el segundo es un método totalmente empírico, obtenido a partir de resultados experimentales, y que está incluido en el Eurocódigo 8 (2012) [40] (2010) [37]. Estos modelos se han descrito previamente en el Capítulo II de la presente tesis doctoral (apartados II.4.3.2 y II.4.4, respectivamente). Ahora bien, se van a recordar las expresiones empleadas y particularizadas para este trabajo.

Con ambos métodos simplificados, introduciendo alguna modificación para ajustarlos a este trabajo, se evalúa la capacidad de deformación de los soportes ensayados a nivel sección y a nivel elemento.

IX.2.2.1. Capacidad de deformación a nivel sección

Para evaluar de forma teórica la capacidad de deformación a nivel sección se obtiene el comportamiento Momento-Curvatura con el modelo teórico propuesto por Panagiotakos y Fardis (2001) [91]. Ambos métodos simplificados (Panagiotakos y Fardis (2001) y Eurocódigo 8) utilizan este modelo teórico, de ahí que sólo se realice un único cálculo en este trabajo.

El procedimiento para obtener el momento elástico (M_v), la curvatura elástica (ϕ_v) y la curvatura última (ϕ_u) se puede consultar en el Capítulo II (apartado II.4.3.2).

Cabe comentar que sabiendo que los valores de la curvatura elástica (ϕ_v) se obtienen a partir de la geometría de la sección y de las características del material que la conforman, el acero y el hormigón, el primer material que alcance el inicio de la no-linealidad definirá el valor de esta curvatura. En el caso del hormigón la no-linealidad se producirá cuando se alcance en la fibra más comprimida de la sección la deformación límite del material, que en los modelos propuestos se ha supuesto para un valor del 90 % de la tensión pico (f_c), y con respecto al acero, se considerará cuando en la armadura traccionada se alcance la deformación elástica del material (ε_v). En este trabajo, aunque se disponía del valor experimental del módulo de deformación para los distintos tipos de hormigones empleados, se ha utilizado la expresión teórica (IX.27) recogida en el Eurocódigo 2 (2010) [38], dejando pendiente la verificación con los valores obtenidos del material.

$$(IX.27) E_{cm} = 22 \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0.3}$$

Por el contrario, sí se ha considerado para la deformación elástica del acero (ε_v) la realmente obtenida con los ensayos de acompañamiento (véase Capítulo IV).

La rigidez elástica efectiva a nivel sección (EI_s) se puede obtener mediante la expresión (IX.28) a partir de los valores teóricos del momento elástico (M_v) y de la curvatura elástica (ϕ_v).

$$(IX.28) EI_s = \frac{M_y}{\phi_y}$$

Comparativa a nivel sección

En la Tabla IX.15 se recogen los valores obtenidos con el modelo propuesto por Panagiotakos y Fardis (2001) [91] para el momento elástico (M_y), la curvatura elástica (ϕ_y), última (ϕ_u) y la rigidez elástica efectiva (EI_s). Con estos valores teóricos se comparan los valores obtenidos experimentalmente tras realizar la idealización con los métodos aproximado y el recogido por el Eurocódigo 8. En esta tabla sólo se recogen los valores estadísticos del conjunto de los soportes ensayados en esta tesis doctoral; para consultar los datos de cada elemento se remite al Anejo K.

A la vista de los valores obtenidos, se observa que se alcanzan valores aceptables para la curvatura elástica teórica y para la rigidez elástica efectiva de la sección, devolviendo un mejor ajuste cuando se compara con los valores del método aproximado. Con respecto a la curvatura última teórica, el modelo no devuelve resultados válidos, quedándose muy lejos del valor experimental. Por tanto, para un hormigón de altas prestaciones, de las características del usado en este trabajo, este modelo simplificado no resulta óptimo para obtener el valor de la curvatura última, proponiéndose en un futuro estudio o la modificación del método o la definición de uno que ajuste mejor ese valor para este tipo de hormigones.

Tabla IX.15. Valores obtenidos a nivel sección mediante el método simplificado y los obtenidos experimentalmente.

COMPARATIVA MÉTODO SIMPLIFICADO PANAGIOTAKOS Y FARDIS CON MÉTODO APROXIMADO				
	M_y (Modelo)/ M_y (MA)	ϕ_y (Modelo)/ ϕ_y (MA)	ϕ_u (Modelo)/ ϕ_u (MA)	EI (Modelo)/ EI (MA)
Valor medio	1,02	0,75	0,21	1,01
Desviación típica (σ)	0,22	0,18	0,13	0,23
Coefficiente de Variación (Cv %)	21,28%	24,48%	64,82%	22,49%
Percentil (5 %)	0,81	0,50	0,09	0,56
Percentil (95 %)	1,72	1,18	0,55	1,46

COMPARATIVA MÉTODO SIMPLIFICADO PANAGIOTAKOS Y FARDIS CON MÉTODO EC8				
	M_y (Modelo)/ M_y (EC8)	ϕ_y (Modelo)/ ϕ_y (EC8)	ϕ_u (Modelo)/ ϕ_u (EC8)	EI (Modelo)/ EI (EC8)
Valor medio	0,88	0,61	0,21	1,33
Desviación típica (σ)	0,23	0,15	0,13	0,29
Coefficiente de Variación (Cv %)	25,53%	24,96%	64,82%	21,53%
Percentil (5 %)	0,72	0,40	0,09	0,73
Percentil (95 %)	1,64	1,00	0,55	1,92

En las Figuras IX.20 y IX.21 se representan los valores teóricos de las curvaturas, elástica y última, frente a los experimentales. Se añade en las gráficas una recta a 45°, de manera que se puede observar con facilidad cómo el método simplificado puede resultar aceptable para obtener la curvatura elástica teórica, mientras que se queda muy lejos de los valores experimentales para la curvatura última.

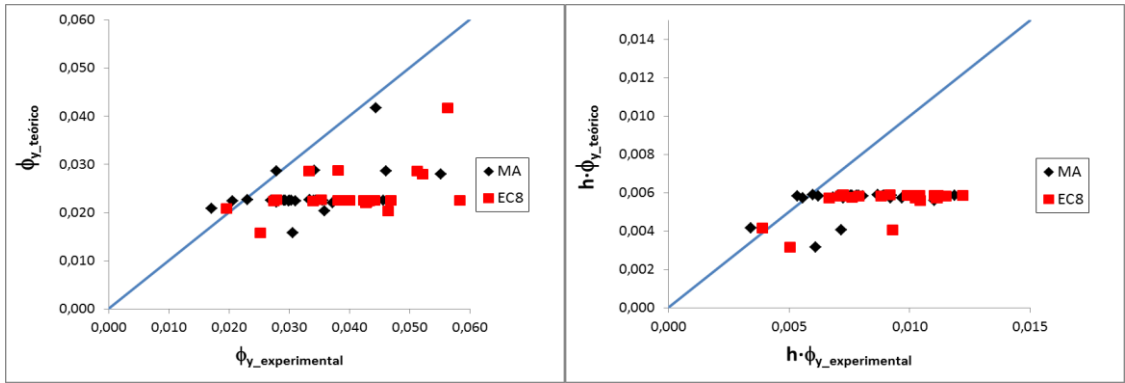


Figura IX.20. Curvatura elástica teórica frente a la obtenida mediante los métodos de idealización

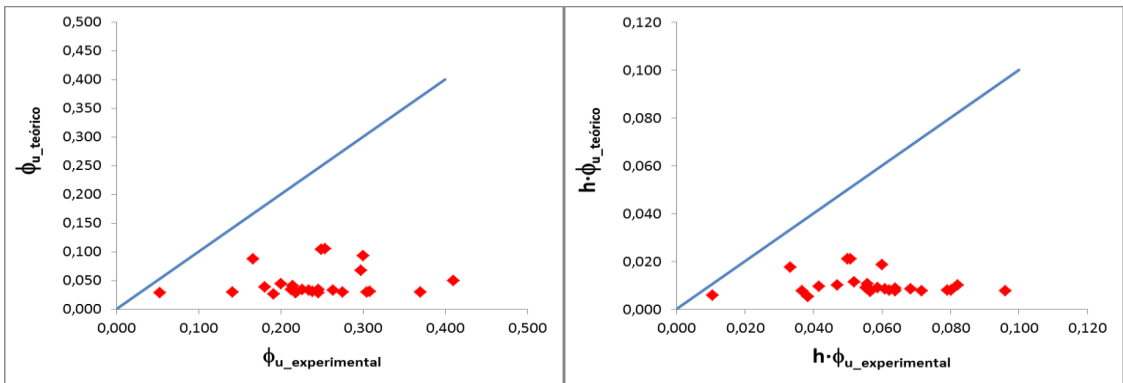


Figura IX.21. Curvatura última teórica frente a la obtenida mediante los métodos de idealización

IX.2.2.2. Capacidad de deformación a nivel elemento

La capacidad de deformación a nivel elemento vendrá definida por los valores de las derivas elástica (θ_y) y última (θ_u) teóricas.

A partir del modelo del soporte en voladizo y su comportamiento a nivel sección, suponiendo la distribución de la curvatura plástica concentrada en una longitud equivalente de rótula plástica (L_p) y asumiendo un comportamiento elástico en el resto de la longitud del elemento, se puede determinar la deriva última (θ_u) con la expresión (IX.29) (Panagiotakos y Fardis (2001) [91]).

$$(IX.29) \theta_u = \theta_y + \theta_p = \theta_y + (\phi_u - \phi_y) \cdot L_p \cdot \left(1 - \frac{0.5 \cdot L_p}{L_s}\right)$$

El uso de esta expresión conlleva el cálculo previo de la curvatura de la sección crítica tanto al inicio de la plastificación (ϕ_y) como al final de la misma en el momento último (ϕ_u), así como de la longitud equivalente de la rótula plástica (L_p).

En este apartado se empleará la expresión (IX.29) para obtener el valor de la deriva última, donde serán comunes los valores obtenidos a nivel sección en ambos métodos simplificados (ϕ_y y ϕ_u), como se ha visto previamente.

En el caso de la deriva elástica ($\theta_y = \Delta_y / L_s$) se utiliza la inicialmente propuesta por ambos métodos, eliminando el término que corresponde al deslizamiento de la armadura longitudinal ya que en este caso es continua y no existirá deslizamiento en la sección cercana al extremo fijo del elemento.

$$(IX.30) \theta_y = \phi_y \frac{L_s}{3}$$

donde:

ϕ_y es la curvatura elástica

L_s es la distancia entre las secciones de momento máximo y nulo

Cabe destacar que en esta expresión no se ha tenido en cuenta el efecto P- Δ . Para tener en cuenta este efecto se propone amplificar la expresión de la deriva elástica utilizando la expresión (IX.31). En este trabajo, con el fin de realizar la comparativa con los métodos existentes, no se ha tenido en cuenta la corrección; ahora bien, se propone la comprobación con dicho factor para un futuro análisis.

$$(IX.31) \theta_y = \phi_y \frac{L_s}{3} \left(\frac{1}{1 - \frac{N}{N_{cr}}} \right)$$

donde:

N es la carga axial de compresión aplicada

N_{cr} es el axil crítico, $N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(2L_s)^2}$

siendo:

L_s es la distancia entre las secciones de momento máximo y nulo

EI es la rigidez del soporte

A partir de los valores teóricos del momento elástico (M_y) y la deriva elástica (θ_y) se puede obtener la rigidez efectiva del elemento fisurado mediante la ecuación (IX.32).

$$(IX.32) EI_e = \frac{M_y L_s}{3 \cdot \theta_y}$$

En el caso del método simplificado del Eurocódigo 8, al valor de la deriva elástica obtenida por la expresión (IX.30) se le añade un término que tiene en cuenta el esfuerzo cortante. Además, este método ofrece dos alternativas para obtener esta deriva, (IX.33 y IX.34), si bien en este trabajo sólo se va a utilizar la ecuación (IX.34) en la comparativa. Esta decisión se adopta con el fin de buscar un mejor ajuste con los soportes ensayados, ya que estos tienen una mayor rigidez a cortante.

$$(IX.33) \theta_y = \phi_y \frac{L_v + a_v z}{3} + 0.00135 \left(1 + 1.5 \frac{h}{L_v} \right)$$

$$(IX.34) \theta_y = \phi_y \frac{L_v + a_v z}{3} + 0.0013 \left(1 + 1.5 \frac{h}{L_v} \right)$$

donde:

ϕ_y es la curvatura elástica de la sección

$a_v z$ es el cambio del diagrama de momentos debido a las fisuras inclinadas, EC-2 (2010) [38]

z es el brazo mecánico de la sección

L_v es la distancia entre la sección de momento máximo y la sección de momento nulo

a_v es igual a 1.0 si se espera que la fisuración de cortante preceda a la flexión elástica en la sección, esto es, cuando el momento elástico de la sección excede L_v veces la

resistencia de cortante del elemento sin considerar la armadura de cortante $V_{R,c}$; α_v es 0 en el resto de casos, esto es, si $M_y < L_v V_{R,c}$

En el caso de la deriva última, para ambos métodos se utiliza la expresión (IX.29). El método de Panagiotakos y Fardis utiliza el valor de la longitud de la rótula plástica que devuelve la expresión (IX.35) donde sólo se ha tenido en cuenta el término que depende de la longitud del vano de cortante de la ecuación propuesta por los autores (véase Capítulo 2, II.4.3.2).

$$(IX.35) L_p = 0.18 \cdot L_s$$

donde:

L_s es la distancia entre la sección de momento máximo y la sección de momento nulo

En el método simplificado del Eurocódigo 8 se proponen dos posibilidades para obtener la longitud de plastificación teórica (véase Capítulo 2, II.4.4), escogiéndose la ecuación (IX.36) por ser la que arroja un valor teórico menor de la longitud de plastificación, ajustándose más a la situación observada.

$$(IX.36) L_{p2} = \frac{L_v}{30} + 0.2h$$

donde:

L_v es la distancia entre la sección de momento máximo y la sección de momento nulo

h es el canto de la sección transversal

Con el fin de sintetizar el procedimiento de cálculo seguido en este apartado, en la Tabla IX.16 se recapitulan las expresiones utilizadas.

Tabla IX.16. Ecuaciones según el método simplificado utilizadas para el análisis a nivel elemento

MÉTODO SIMPLIFICADO	θ_y	EI_e	L_p	θ_u
Panagiotakos y Fardis	$\theta_y = \phi_y \frac{L_s}{3}$	$EI_e = \frac{M_y L_s}{3 \cdot \theta_y}$	$L_p = 0.18 \cdot L_s$	$\theta_u = \theta_y + (\phi_u - \phi_y) L_p \left(1 - \frac{0.5 \cdot L_p}{L_s}\right)$
Eurocódigo 8	$\theta_y \phi_y \frac{L_v + a_v z}{3} + 0.0013 \left(1 + 1.5 \frac{h}{L_v}\right)$	$EI_e = \frac{M_y L_s}{3 \cdot \theta_y}$	$L_p = \frac{L_v}{30} + 0.2h$	$\theta_u = \theta_y + (\phi_u - \phi_y) L_p \left(1 - \frac{0.5 \cdot L_p}{L_s}\right)$

Comparativa a nivel elemento

Al igual que se ha hecho a nivel sección, se comparan los resultados teóricos obtenidos mediante los dos métodos simplificados, Panagiotakos y Fardis (2001) [91] y el del Eurocódigo 8 (2012) [40], con los obtenidos de la idealización de los valores experimentales. Las comparativas se recogen en las Tablas IX.17 a IX.20. En estas tablas sólo se incluyen los valores

estadísticos del conjunto de los soportes ensayados en esta tesis doctoral; para consultar los datos de cada elemento se remite al Anejo K.

Observando los valores obtenidos se comprueba que, para el cálculo teórico de los valores últimos, ambos métodos simplificados no son óptimos, quedando muy lejos de los valores experimentales. Ahora bien, se obtienen valores aceptables para la deriva elástica teórica y para la rigidez elástica efectiva del elemento, de nuevo, devolviendo un mejor ajuste cuando se compara con los valores del método aproximado.

Salvo en los valores correspondientes a la deriva última, para todas las comparativas realizadas los valores devueltos están del lado de la seguridad, lo que anima a trabajar, en una futura línea de investigación, en la adaptación de los métodos existentes a los hormigones de altas prestaciones con el fin de encontrar un mejor ajuste.

Tabla IX.17. Comparación entre el Método simplificado de Panagiotakos y Fardis y el de idealización mediante el método aproximado

	θ_y (Modelo)/ θ_y (MA)	θ_u (Modelo)/ θ_u (MA)	EI (Modelo)/EI (MA)
Valor medio	1,42	0,70	1,01
Desviación típica (σ)	0,452	0,564	0,227
Coefficiente de Variación (Cv %)	31,75%	80,28%	22,49%
Percentil (5 %)	0,70	0,40	0,56
Percentil (95 %)	2,77	2,65	1,46

Tabla IX.18. Comparación entre el método simplificado de Panagiotakos y Fardis y el de idealización mediante el método del Eurocódigo 8

	θ_y (Modelo)/ θ_y (EC8)	θ_u (Modelo)/ θ_u (EC8)	EI (Modelo)/EI (EC8)
Valor medio	1,11	0,11	1,28
Desviación típica (σ)	0,417	0,052	0,391
Coefficiente de Variación (Cv %)	37,45%	49,07%	30,60%
Percentil (5 %)	0,58	0,05	0,19
Percentil (95 %)	2,28	0,26	1,92

Tabla IX.19. Comparación entre el método simplificado del Eurocódigo 8 y el de idealización mediante el método aproximado

	θ_y (Modelo)/ θ_y (MA)	θ_u (Modelo)/ θ_u (MA)	EI (Modelo)/EI (MA)
Valor medio	1,62	0,69	0,88
Desviación típica (σ)	0,512	0,374	0,195
Coefficiente de Variación (Cv %)	31,62%	54,38%	22,07%
Percentil (5 %)	0,82	0,43	0,49
Percentil (95 %)	3,16	1,95	1,28

Tabla IX.20. Comparacion entre los métodos simplificado y de idealización del Eurocódigo 8

	θ_y (Modelo)/ θ_y (EC8)	θ_u (Modelo)/ θ_u (EC8)	EI (Modelo)/EI (EC8)
Valor medio	1,27	0,11	1,17
Desviación típica (σ)	0,478	0,050	0,246
Coefficiente de Variación (Cv %)	37,61%	46,54%	21,12%
Percentil (5 %)	0,68	0,06	0,64
Percentil (95 %)	2,60	0,27	1,68

Con el fin de observar la idoneidad de los resultados obtenidos se representan los valores teóricos frente a los experimentales (Figuras IX.22 y IX.23). Como se puede apreciar los valores teóricos de la deriva elástica resultan aceptables mientras que no ocurre lo mismo con los de la deriva última.

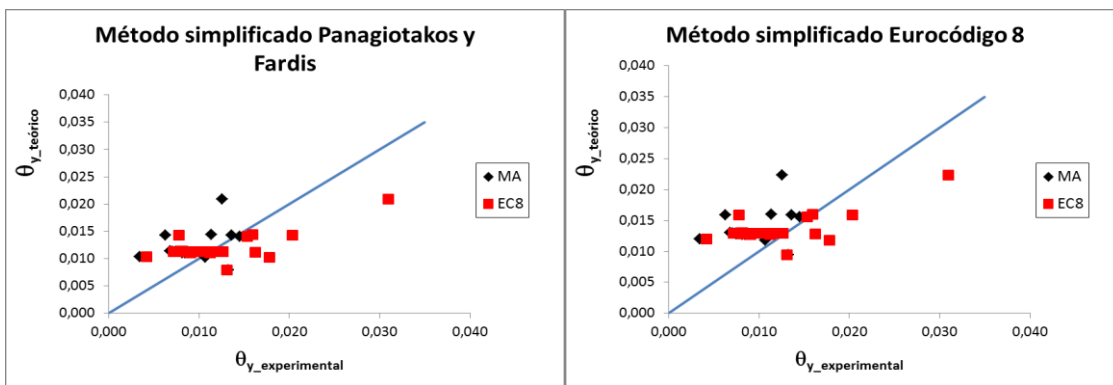


Figura IX.22. Deriva elástica teórica frente a la obtenida mediante los métodos de idealización

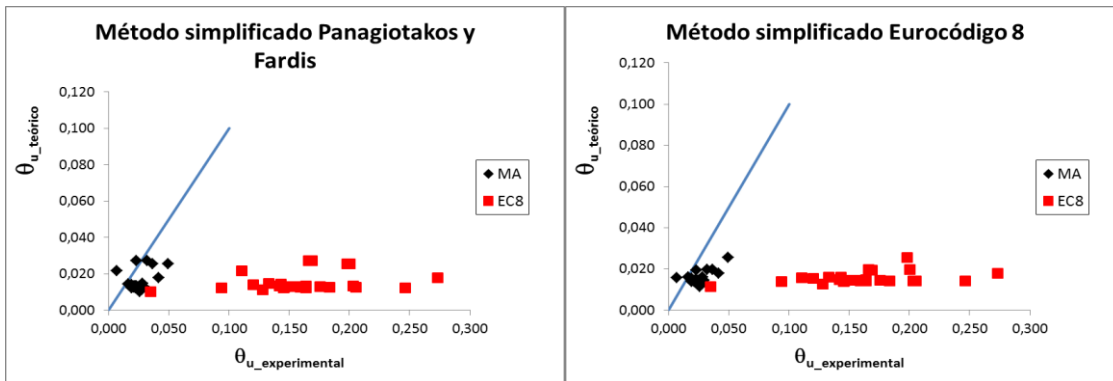


Figura IX.23. Deriva última teórica frente a la obtenida mediante los métodos de idealización

CAPÍTULO X

Síntesis, conclusiones y futuras líneas de investigación

En este capítulo se presenta una síntesis del trabajo desarrollado así como las conclusiones obtenidas y las futuras líneas de investigación propuestas.

X.1. Síntesis y principales contribuciones al estado del arte

En el Capítulo II se ha analizado el estado del conocimiento haciendo una revisión bibliográfica de las investigaciones experimentales, así como de las normas y métodos existentes en el campo de la ductilidad estructural en soportes fabricados con hormigones de altas prestaciones sometidos, a la actuación de carga cíclica a flexo-compresión. El principal resultado obtenido con esta revisión es la constatación de la necesidad de cubrir el vacío existente tanto en el desarrollo de investigaciones como en la metodología a seguir y su inclusión en la normativa, en lo que se refiere a los soportes fabricados con hormigón de altas prestaciones.

Se ha planteado el desarrollo de un programa experimental para el análisis de soportes de hormigón sometidos a esfuerzos de flexo-compresión. Para ello se ha concebido un ensayo experimental capaz de reproducir el comportamiento del elemento ensayado sometido a este tipo de esfuerzos, bajo la actuación de carga cíclica o monotónica.

En este trabajo se han ensayado 26 soportes de hormigón de altas prestaciones variando la separación de la armadura transversal (s_t), el tipo de fibras de acero aportadas a la matriz del hormigón, el volumen de las mismas (V_f), la esbeltez a cortante (λ_v), el nivel de axil aplicado (v), la cuantía de la armadura longitudinal (ρ_l), el recubrimiento relativo (r/h) y el tipo de carga aplicada al elemento. Se ha proporcionado información acerca de la resistencia y de la capacidad de deformación de los elementos incluidos en el programa experimental.

Se ha realizado un análisis de los resultados obtenidos en los ensayos experimentales, que incluye: la determinación de la sección crítica del elemento, el comportamiento en situación de carga máxima y última del soporte, la identificación del modo de fallo y la obtención, con los valores experimentales y mediante la aplicación de diversos métodos de idealización, de las envolventes del cortante y momento flector para cada soporte. A partir de estos resultados se ha podido analizar la capacidad de deformación a nivel de la sección y del elemento. Además, se ha propuesto una expresión que permite calcular el módulo de deformación del hormigón, se ha evaluado la rigidez elástica efectiva a nivel sección y del elemento, y finalmente, se ha obtenido la longitud equivalente de la rótula plástica experimental, comparándola con los valores existentes en la bibliografía. En todos los análisis realizados se hace un estudio de la influencia de los distintos parámetros planteados en el presente trabajo.

Por último, se ha realizado una comparación estructural, tanto a nivel resistente como deformacional, mediante modelos teóricos y métodos simplificados recogidos en la normativa y en la bibliografía consultada. Con el análisis de los resultados experimentales recopilados, así como con la comparativa con los métodos simplificados existentes, se ha llevado a cabo un análisis estadístico para determinar el error y el ajuste de los modelos planteados, lo que lleva a una serie de conclusiones y a establecer futuras líneas de investigación.

X.2. Conclusiones

X.2.1. Conclusiones relativas a la revisión bibliográfica realizada

Una vez realizada la revisión del estado del conocimiento se llega a las siguientes conclusiones:

- La mayoría de los trabajos experimentales existentes en la literatura científica, tanto a nivel de estudio del material como del comportamiento estructural, centran su estudio

en hormigones que, o bien no superan la resistencia a compresión de 100 MPa, o bien se encuentran por encima de 150 MPa, siendo escasos los trabajos desarrollados en un rango intermedio de resistencias.

- En comparación con estos trabajos desarrollados por la comunidad científica, son escasos los estudios experimentales sobre soportes, bajo la actuación de carga cíclica a flexo-compresión, fabricados con hormigones de altas prestaciones con fibras de acero ($100 \text{ MPa} < f_c < 150 \text{ MPa}$), existiendo un vacío importante en ese campo y concretamente en lo que respecta a los parámetros que intervienen en la ductilidad de un elemento de hormigón armado.
- La mayoría de los códigos de diseño existentes han sido desarrollados para hormigones convencionales. En el caso de los hormigones de altas prestaciones, cuyo comportamiento con respecto al hormigón convencional cambia considerablemente, está totalmente justificada la investigación en ese campo, para corroborar la validez de los métodos existentes y, en su defecto, trabajar en la definición de nuevos métodos más acordes con el nuevo comportamiento.
- La franja de resistencias a compresión de 100 a 150 MPa permite disponer de hormigones altamente competentes, que ofrecen un campo muy interesante de posibilidades, ya que alcanzan resistencias a flexión y a compresión más que óptimas para las exigencias reales de la estructura y resultan más que recomendables teniendo en cuenta el peso, la durabilidad, la resistencia a la abrasión y el coste, lo que requiere continuar investigando.

X.2.2. Conclusiones relativas a las observaciones experimentales y resultados directos

De los resultados directos obtenidos del trabajo experimental, así como de las observaciones realizadas en el desarrollo del mismo, se puede concluir que:

- La longitud visual crítica de daño no depende de la separación de la armadura transversal ni del tipo de fibra empleado, mientras que sí aumenta al disminuir el volumen de las mismas aportado a la matriz del hormigón. Sí se observa una dependencia clara con respecto al nivel de axil aplicado, resultando una mayor longitud de daño a mayor nivel de axil. Con respecto a la esbeltez a cortante (λ_v) se aprecia cómo al aumentar su valor disminuye la longitud de daño. Se observa esta misma tendencia, aunque menos marcada, con respecto a la cuantía de la armadura longitudinal (ρ_l). Si lo que se varía es el recubrimiento relativo (r/h), se aprecia cómo la longitud de daño aumenta al disminuir éste. Y, por último, a igualdad de parámetros, no se observa que exista una mayor zona de daño cuando la aplicación de la carga sobre el elemento se realiza de forma monótonica y no cíclica.
- Todos los elementos ensayados, salvo el sometido a un nivel de axil nulo (AS21-13), han desarrollado la sección crítica en la conexión entre el soporte y la zona central que simula la viga, lo que se puede explicar por el nivel de confinamiento y rigidez que consigue hacer despreciable el confinamiento debido al efecto *stub*. Ahora bien, con respecto al soporte que no desarrolló su sección crítica en la misma zona que el resto, AS21-13, cabe destacar la sospecha de haber generado una sección débil por la disposición del armado y ejecución del mismo.

- Bajo cargas cíclicas el pandeo local de la armadura depende del recubrimiento nominal, observándose lo que cabría esperar: a menor recubrimiento aumenta la aparición del pandeo local, sucediendo lo mismo cuando aumenta la separación de la armadura transversal, disminuye el volumen de fibras aportado, o aumenta el nivel de axil aplicado. Con respecto a la esbeltez a cortante y a la cuantía de la armadura longitudinal no se aprecia ninguna tendencia. En el caso del tipo de fibras no se observa este efecto, lo que puede ser debido a una no adecuada elección de las dimensiones de las fibras (Tipo II). Y, finalmente, sí se observa un pandeo local de la armadura longitudinal independientemente de que la aplicación de la carga sea cíclica o monotónica.
- En general, una vez observado el comportamiento hasta la rotura de todos los soportes de este trabajo, se constata que durante el desarrollo de los ensayos se ha producido una multifisuración que ha derivado en una fisuración discreta, generándose una única y gran fisura, dando lugar a una longitud de daño menor que la que se hubiera desarrollado en un hormigón convencional donde el comportamiento en rotura se alcanza con una fisuración distribuida.

X.2.3. Conclusiones relativas al análisis de los resultados experimentales

Respecto a las conclusiones relativas a los resultados experimentales analizados, cabe comentar que:

- En este tipo de elementos la sección crítica se sitúa, en general, en el empotramiento del soporte con el rigidizador *stub*, lo que se ha comprobado con el análisis de la deformación de los materiales en las secciones próximas a la unión para cada soporte. No se ha observado el efecto *stub* tal y como sí lo han hecho otros autores (Barrera (2012) [15], Caballero (2015) [26]). Además, se ha obtenido el valor del esfuerzo cortante y momento flector correspondiente al instante en el que plastifica la armadura traccionada y su relación con el valor máximo. Con respecto a la relación de cortantes (V_y/V_{max}) analizada se observa que depende del nivel de axil aplicado y de la esbeltez de la pieza, así como que presenta una ligera influencia de la cuantía de la armadura longitudinal, mientras que para el resto de los parámetros es prácticamente inexistente. Respecto a la relación de momentos flectores, M_y/M_{max} , se observan tendencias similares a las comentadas previamente.
- Para el caso de la carga lateral se ha conseguido alcanzar experimentalmente el porcentaje de caída de carga del 20 % definido como carga última, salvo en un caso, el soporte sometido al mayor nivel de axil (AS21-24), donde al alcanzar la carga máxima se produjo el pandeo local de la armadura longitudinal. Como era de esperar, sobre la carga lateral cabe comentar que el cortante máximo se ve influenciado por el nivel de axil aplicado y por la esbeltez del elemento. Con respecto al resto de los parámetros sólo se aprecia una leve tendencia con la cuantía de la armadura longitudinal y el recubrimiento relativo, aumentando ligeramente su valor cuando aumenta el del parámetro estudiado.
- Para el momento de agotamiento obtenido experimentalmente se observa que, en este caso, no es posible alcanzar en todos los elementos el valor post-pico que determina el momento último (20% de caída). En los elementos que no se alcanzó este valor se ocasionó una parada del ensayo debido al pandeo local de la armadura

longitudinal. Con respecto a los parámetros estudiados, el momento máximo depende del nivel de axil aplicado y, ligeramente, de la cuantía de la armadura longitudinal, no siendo dependiente del resto de las variables.

- Se ha aplicado el método propuesto por Barrera (2012) [15] para identificar los modos de fallo a partir de combinar criterios basados en fuerzas y en deformaciones. Con ambos criterios se concluye que en la mayoría de los soportes el fallo se produce por agotamiento por tracción, aunque existe algún caso aislado de agotamiento por compresiones (AS21-24). Sólo se ha presentado un elemento que, según ambos criterios, presenta un fallo por inestabilidad producida por el agotamiento a tracción, que corresponde con el soporte más esbelto (AS31-11).
- Se ha analizado la aplicación de tres métodos para idealizar la curva envolvente carga-desplazamiento o momento-curvatura.
 - a) Respecto al Eurocódigo 8 (EC8), tiene como ventaja que define un criterio en deformaciones de los materiales para determinar el punto de inicio de la plastificación, ajustando el comportamiento idealizado al que realmente debe presentar el elemento. Ahora bien, como desventaja, no resulta práctico de aplicar ya que para definir el punto de plastificación se requiere de un esfuerzo importante y del conocimiento del valor de las deformaciones tanto del acero como del hormigón, lo que a veces es bastante impredecible en el uso de nuevos materiales.
 - b) Con respecto a la idealización con el método aproximado (MA), aunque resulta más práctico de aplicar que el modelo propuesto por el EC-8, los valores obtenidos están alejados de los resultados del EC-8. Se propone modificar el criterio en fuerzas para el punto de plastificación, obteniendo el valor de plastificación a partir del 85 % del valor máximo de carga o de momento flector para este tipo de hormigones.
 - c) El modelo propuesto por el balance de energías (BE) es práctico al igual que el método aproximado pero resulta menos funcional que éste. Los resultados obtenidos mediante este método son similares a los del método aproximado, pero están más alejados de los obtenidos por el EC-8.
- Cabe destacar que los resultados obtenidos de curvatura elástica efectiva (ϕ'_y) y de desplazamiento elástico efectivo (Δ'_y) resultan menores para la idealización propuesta por el Eurocódigo 8 (EC8) que por el modelo del método aproximado (MA).
- Analizando por series el índice de ductilidad en curvaturas (μ_ϕ) se concluye que:
 - a) De los valores obtenidos de la Serie 1, para hormigones del Tipo I (mixtas), con el mismo volumen de fibras, cuando aumenta la separación de la armadura transversal disminuye el índice de ductilidad en curvaturas, lo que puede ser debido a que cuanto menor es la separación entre estribos, combinado con un hormigón de altas prestaciones que presenta un valor de comienzo de la no-linealidad muy próximo al de la armadura, aumenta el confinamiento facilitando la deformación de la zona. Si lo que se varía es el tipo de fibra (Tipo II, largas) empleado en la matriz del hormigón se observa un comportamiento inesperado: aumenta el índice de ductilidad en curvaturas al aumentar la separación de la armadura transversal, explicándose esta distorsión del resultado por una no

adecuada elección del tamaño de la fibra con respecto al recubrimiento mínimo del soporte. Finalizando con la variación del volumen de fibras aportadas en la dosificación del hormigón, existe mayor ductilidad en curvaturas a mayor volumen de fibras, más evidente a menor separación de la armadura transversal, lo que se entiende por el mayor efecto de cosido que ejerce una mayor cantidad de fibras dentro de la matriz del hormigón. El valor de la curvatura elástica obtenida para todas las opciones planteadas en la Serie 1 muestra que este valor es independiente de la separación de la armadura transversal, del tipo de fibra y del volumen de las mismas utilizadas en la dosificación del hormigón.

- b) Respecto a la Serie 2, para distintos niveles de axil aplicado, se analiza el índice de ductilidad en curvaturas y se puede concluir que disminuye claramente con el aumento del nivel de axil aplicado, como era de esperar, lo que también sucede con la curvatura plástica obtenida. A la vista de los valores de la curvatura elástica se puede concluir que mientras el nivel de axil aplicado permita alcanzar en la armadura su nivel de plastificación esta curvatura aumenta; ahora bien, a partir de un determinado nivel de axil, no es posible alcanzar la plastificación del acero, dando lugar a una “plastificación” del hormigón, lo que provoca una disminución en el valor de la curvatura elástica. Si se mantiene constante el nivel de axil aplicado y se varía la esbeltez de la pieza, entonces la ductilidad en curvaturas es independiente de este parámetro, quedando enmascarados los resultados obtenidos por los distintos recubrimientos correspondientes a estos elementos.
 - c) Si lo que varía es la cuantía de la armadura longitudinal (Serie 3), se concluye que el índice de ductilidad en curvaturas aumenta muy ligeramente con el aumento de la cuantía, lo mismo que se aprecia en el caso de la curvatura plástica. Con respecto a la curvatura elástica, aumenta también levemente con la cuantía hasta un determinado nivel donde se aprecia un cierto bloqueo.
 - d) Para el caso del recubrimiento relativo, Serie 4, según las subseries planteadas se observa que, a una mayor separación de la armadura transversal, la ductilidad en curvaturas aumenta cuando disminuye el recubrimiento relativo, tendencia que también se puede observar en la curvatura plástica obtenida. Con respecto a la curvatura elástica, no se aprecia una influencia clara.
 - e) Al aplicar una carga lateral sobre el soporte de forma cíclica o de forma monotónica se observa que la curvatura elástica es muy similar, mientras que la curvatura última resulta mayor para el caso de ensayar el soporte bajo la actuación de una carga monotónica.
- El índice de ductilidad en desplazamientos (μ_{Δ}) analizado muestra que:
 - a) La ductilidad en desplazamientos disminuye cuando aumenta la separación entre armaduras transversales, al igual que sucede cuando lo que se obtiene es el desplazamiento plástico del soporte. El valor del desplazamiento elástico no resulta dependiente de este parámetro. En el caso de variar el tipo de fibra empleada en la fabricación del hormigón, en la ductilidad en desplazamientos, se vuelve a detectar el comportamiento inesperado comentado previamente, debido probablemente a la dimensión no adecuada elegida de fibra larga. Si lo que varía es el volumen de fibras aportado a la matriz del hormigón, la ductilidad en desplazamientos es menor cuanto menor es el volumen de fibras; ahora bien, los

valores obtenidos se aproximan al aumentar la separación entre armaduras, observándose la misma tendencia para el desplazamiento último, mientras que el desplazamiento elástico no resulta dependiente del volumen de fibras.

- b) De los resultados obtenidos del estudio de la Serie 2, se concluye que el índice de ductilidad en desplazamientos disminuye con el aumento del nivel de axil aplicado, mientras que el desplazamiento elástico aumenta cuando se produce la plastificación de la armadura longitudinal y disminuye cuando el que “plastifica” es el hormigón. Con respecto a la esbeltez a cortante, la ductilidad del elemento disminuye con el aumento del nivel de axil aplicado, lo que puede deberse a la influencia de los efectos de segundo orden, que reducen tanto la capacidad resistente como deformativa. El desplazamiento elástico crece con el aumento de la esbeltez, como era de esperar por los efectos de segundo orden. Para el caso del desplazamiento último el valor también aumenta con la esbeltez, aunque con un menor incremento que el que se observa en el desplazamiento elástico, ya que los efectos de segundo orden dan lugar a que la rama de descenso tenga una mayor pendiente y, en consecuencia, fragilizan el comportamiento del soporte con el aumento de la esbeltez.
 - c) En la Serie 3 se concluye que el índice de ductilidad en desplazamientos aumenta muy ligeramente con el aumento de la cuantía. La misma tendencia se observa en los desplazamientos plástico y último, observándose en el índice de ductilidad en desplazamientos que el desplazamiento elástico aumenta hasta una determinada cuantía, a partir de la cual decrece.
 - d) Para el caso del recubrimiento relativo (Serie 4) se observa que, cuando la separación de la armadura transversal es de 0.30 m, con la disminución del recubrimiento relativo, lo que corresponde con un aumento del canto útil de la sección, los valores obtenidos mediante el EC8 muestran un aumento de la ductilidad en curvaturas, mientras que disminuyen los valores del desplazamiento elástico, y no se aprecia una tendencia clara para el desplazamiento plástico.
 - e) En la Serie 5, donde se analiza el tipo de carga aplicada, la ductilidad en desplazamientos muestra una ligera tendencia creciente cuando la carga aplicada se hace de forma monótona. Ahora bien, frente a los desplazamientos elástico y último no se observa una tendencia clara.
- Para un hormigón de altas prestaciones fabricado con fibras metálicas se propone una expresión para el cálculo del módulo de deformación basada en las recogidas en el Eurocódigo 2 (2010) [38] y en las recomendaciones del AGFC-SETRA (2013) [4]. Aunque la expresión sugerida por el Eurocódigo 2 no incluye el efecto de las fibras, a diferencia de la del AGFC-SETRA que está recomendada para hormigones con fibras de muy alta resistencia a compresión, el módulo de deformación del hormigón de altas prestaciones presentado en este trabajo se ajusta mejor a la expresión de Eurocódigo 2.
 - Se ha analizado la rigidez elástica efectiva del elemento y de la sección, y para ello se ha calculado el factor de rigidez del elemento (α_e) y de la sección (α_s), obteniéndose las siguientes conclusiones:
 - a) Los valores obtenidos para los distintos elementos ensayados arrojan un valor de α_s mucho menor que el de α_e . Esto puede ser debido a que la rigidez elástica

efectiva del elemento depende de la longitud de daño y, a mayor longitud más se aproximan los valores obtenidos de las rigideces del elemento y de la sección y viceversa.

- b) El factor de rigidez del elemento, α_e , no depende de la separación de la armadura transversal, ni del tipo de fibras de acero, ni del volumen dispuesto en la matriz del hormigón, lo que tiene lógica, ya que se encuentran incluidos en el módulo de deformación del hormigón. Como en la obtención del desplazamiento elástico se han incluido los efectos de segundo orden, este factor es independiente de la esbeltez a cortante. Donde sí hay una tendencia clara es con respecto al nivel de axil aplicado: mientras este nivel es bajo (< 0.20) el factor de rigidez del elemento no se ve afectado, mientras que cuando se supera ese umbral, el factor aumenta con el nivel de compresión. Para la variación de la cuantía de la armadura longitudinal, del recubrimiento relativo y del tipo de carga aplicada no se aprecian tendencias claras del factor de rigidez del elemento, no resultando concluyentes.
- c) Con respecto al factor de rigidez de la sección, α_s , se observa que no depende de la separación de la armadura transversal ni del tipo de fibras acero empleado. Ahora bien, como era esperable, a menor volumen de fibras en el hormigón resulta menos rígida la sección. Por otro lado, α_s aumenta con el aumento del nivel de axil aplicado. Para el resto de los parámetros no se observa una tendencia clara de este factor.
- Se ha propuesto una expresión para el cálculo de la rigidez a nivel elemento (EI_e) para soportes cuyo nivel de axil reducido es igual o inferior a 0.4:

$$EI_e = \alpha_e E_c I_c + E_s I_s$$

donde:

$$\alpha_e = 1.27 \cdot v + 0.35 \leq 0.60$$

- De la longitud equivalente de la rótula plástica y su relación con el canto de la sección (l_p/h) se concluye que:
 - a) La relación aumenta con la separación de la armadura transversal.
 - b) Respecto al tipo de fibras los valores obtenidos no resultan concluyentes.
 - c) Si lo que se analiza es la cantidad de fibras aportadas a la masa de hormigón, solo se aprecia una tendencia clara cuando la separación de la armadura transversal es de 0.10 m, aumentando la longitud equivalente de la rótula plástica cuando disminuye el volumen de fibras.
 - d) Si lo que se varía es la esbeltez a cortante, para todos los métodos de idealización empleados, el valor de la relación (l_p/h) y de la longitud equivalente de la rótula (l_p) aumenta claramente al aumentar la esbeltez.
 - e) En el caso de los valores obtenidos con el modelo de idealización propuesto por el EC-8 se observa que la longitud equivalente de la rótula plástica aumenta para valores de nivel de axil aplicado menores e iguales a 0.10; para niveles de axil mayor la relación es aproximadamente constante, hasta alcanzar el nivel de 0.40. Para los valores obtenidos mediante el método aproximado el cambio de tendencia se produce para un nivel de axil de 0.20. Para ambos métodos se

obtiene un valor anómalo del soporte sometido a un mayor nivel de axil (AS21-24), lo que se explica por el valor de curvatura última obtenido que está lejos del que correspondería a la caída del 20% por tratarse de un soporte que está lejos de alcanzar ese valor resistente.

- f) Si se varía la cuantía de la armadura longitudinal, al aumentar ésta disminuye la longitud equivalente de la rótula plástica, ya que no se cuenta con el aviso correspondiente asociado a la plastificación de la armadura.
- g) Para el recubrimiento relativo, aunque hay un trabajo más efectivo de la sección, por el aumento del canto útil y la mejora del confinamiento de la armadura transversal, no se muestra una tendencia clara en los resultados obtenidos.
- h) Si la aplicación de la carga es monotónica frente a la aplicación cíclica no es mayor la relación para el primero que para el segundo, no resultando concluyente.
- i) Se han comparado los valores obtenidos experimentalmente con métodos simplificados existentes en la bibliografía. En general se observa que los métodos simplificados sobrevaloran la longitud equivalente de la rótula plástica. De la comparativa con los métodos simplificados se puede concluir que:
 - (1) El método propuesto por Pam y Ho mediante observación directa es difícil de aplicar, puesto que el ensayo no finaliza al 20 % de la caída de carga, si no que continua mientras el elemento es estable en su equilibrio dentro del pórtico de ensayo, imposibilitando la medición real para esa caída de carga.
 - (2) El método que mejor se ajusta es el de Bae y Bayrak, excepto para la variación de la esbeltez, donde la tendencia es contraria a la del resto de métodos simplificados, y para bajos niveles de axil aplicado donde este valor se infravalora.
- j) Se han representado los valores de la relación (l_p/h) obtenidos experimentalmente en este trabajo, tanto los correspondientes a la aplicación de carga cíclica como para el soporte sometido a una carga monotónica, frente a los conseguidos por otros investigadores que se encuentran en la bibliografía consultada. En general se observa que los valores obtenidos se encuentran dentro del rango medio, ajustándose más los valores obtenidos por la aplicación del método de los perfiles de curvatura definido por Pam y Ho (2009) [89]. Si se representan, independientemente del tipo de carga, la totalidad de los valores, los propios de esta investigación y los recopilados en la bibliografía, se confirma que la longitud de plastificación en el caso de elementos sometidos a la aplicación de carga monotónica es bastante mayor que si la aplicación de la carga es cíclica.

X.2.4. Conclusiones relativas a la comprobación estructural mediante métodos de cálculo

- A partir de los resultados experimentales obtenidos mediante los ensayos de acompañamiento y control de los materiales se han determinado las ecuaciones constitutivas de los materiales que conforman los soportes ensayados. En el caso del hormigón, para definir el comportamiento a tracción se ha realizado un análisis inverso a partir de los datos obtenidos de las probetas de flexotracción. El comportamiento a compresión se trabaja con un diagrama teórico que tiene en cuenta la inclusión de las

fibras, donde el valor de la resistencia a compresión y el del módulo de deformación es el obtenido experimentalmente para cada soporte. En ambos casos, tanto para el acero como para el hormigón, se ha verificado el resultado teórico con los obtenidos experimentalmente, comprobando el buen ajuste de ambos.

- Mediante un método teórico de cálculo seccional se han obtenido los diagramas momento-curvatura para todos los soportes y se han comparado con los diagramas experimentales. Aunque en el método teórico no se han tenido en cuenta los efectos no-lineales correspondientes a una sección sometida a carga cíclica, la pérdida de la rigidez por el tipo de carga aplicada, efecto Bauschinger en las armaduras, entre otros, se ha obtenido un ajuste del modelo aceptable puesto que el daño en estos soportes se encuentra muy concentrado, siendo la degradación de la rigidez del hormigón poco importante en comparación con un hormigón convencional. Si se compara la relación entre los valores máximo experimental frente al teórico casi todos los valores están bastante cercanos a la unidad (0.96), con un C.V. del 9 % resultando bastante admisible.
- Se ha aplicado un modelo teórico de referencia mediante el método de elementos finitos para obtener la respuesta estructural, de igual forma aunque no se consideran los efectos no-lineales correspondiente a un elemento sometido a carga cíclica, si se comparan los diagramas cortante-desplazamiento teóricos y experimentales, se concluye que el modelo teórico de referencia se comporta de forma aceptable (0.96 y C.V. del 8%). Como sucedía en el comportamiento momento-curvatura, aunque el ajuste es aceptable, se encuentra ligeramente del lado de la inseguridad, lo que puede ser debido a la no inclusión de los efectos no-lineales debidos a la aplicación de la carga cíclica.
- Para realizar la comprobación estructural se ha abordado un cálculo resistente y deformacional, a nivel sección y del elemento, mediante métodos simplificados recopilados de la normativa y de la bibliografía consultada. Para el cálculo de los valores resistentes se han utilizado los métodos simplificados, con algunas modificaciones, descritos en la recomendaciones del AFGC-SETRA (2013) [4], la EHE-08 (2011) [35], Eurocódigo 2 (2010) [38] y el ACI-318 (2014) [1]. En el caso del análisis de la capacidad de deformación se utilizan los modelos propuestos por Panagiotakos y Fardis (2001) [91] y el recogido por el Eurocódigo 8 (2011) [37] [41], con las siguientes conclusiones:
 - a) Del cálculo resistente a nivel sección se puede concluir que, como era de esperar, el método simplificado del AFGC-SETRA, en donde se ha modificado el diagrama de comportamiento a tracción del hormigón, es el que más se aproxima al valor obtenido experimentalmente, teniendo un valor promedio del error del lado de la seguridad (1.02) y con un coeficiente de variación aceptable (C.V.:9%). Sin embargo, el resto de métodos, donde no se ha tenido en cuenta la resistencia a tracción, se obtienen resultados del lado de la seguridad, de entre estos métodos, el del Eurocódigo 2 presenta una mejor precisión (1.21 y C.V. del 6%) y el método propuesto por la EHE-08 (Bloque Rectangular) muestra el peor resultado (1.52 y C.V. del 12%).
 - b) Del comportamiento resistente a nivel elemento, teniendo en cuenta los efectos de segundo orden según las distintas indicaciones de las normativas utilizadas, se desprende que el valor teórico en todos los casos es menor que el valor

experimental, existiendo un margen de seguridad. El método que mejor se ajusta a los valores experimentales es el de las recomendaciones del AFGC-SETRA, que se ha complementado con la aplicación de las expresiones de la excentricidad adicional propuestas por el EC2 (1.08 y C.V. del 14%). Cabe señalar que con el EC 2 se obtiene una aproximación aceptable (1.32 y C.V. del 16%) dado que no tiene en cuenta el efecto de las fibras de acero en el comportamiento a compresión y a tracción del hormigón.

- c) Obteniendo la capacidad de deformación a nivel sección con el modelo propuesto por Panagiotakos y Fardis, se observa que se obtienen valores aceptables para la curvatura elástica teórica y para la rigidez elástica efectiva, devolviendo un mejor ajuste cuando se compara con los valores experimentales del método aproximado. Con respecto a la curvatura última teórica, el modelo no devuelve resultados válidos, quedándose muy lejos del valor experimental. Por tanto, para un hormigón de altas prestaciones, de las características del usado en este trabajo, este modelo simplificado no resulta óptimo para obtener el valor de la curvatura.
- d) A nivel elemento la capacidad de deformación se obtiene a partir de dos métodos simplificados, el del Eurocódigo 8 y el propuesto por Panagiotakos y Fardis. Comparando ambos métodos con los valores experimentales obtenidos por el método aproximado y el Eurocódigo 8, se concluye que en todos los casos la deriva elástica, y en casi todos la rigidez elástica efectiva, devuelven valores del lado de la seguridad, mientras que en el caso de la deriva última ambos modelos simplificados arrojan valores mucho menores que los obtenidos experimentalmente.

X.2.5. Conclusiones globales del trabajo realizado

- Con la realización de este trabajo se contribuye a un mejor conocimiento del comportamiento estructural, tanto a nivel resistente como deformacional de los soportes de hormigón armado de altas prestaciones sometidos a compresión y carga lateral cíclica.
- Con la información recopilada y las conclusiones alcanzadas, esta tesis doctoral pretende ser un punto de partida para futuras investigaciones y ser de utilidad para la mejora de los modelos que permitan predecir el comportamiento estructural de estos elementos.

X.3. Futuras líneas de investigación

En este apartado se indican posibles líneas de trabajos futuros en relación con la investigación desarrollada:

- Los resultados existentes corresponden fundamentalmente a hormigones convencionales, muy lejos de los valores de resistencia elegidos en el presente trabajo. Con los resultados obtenidos en esta tesis doctoral, se corrobora que la ductilidad aumenta y la longitud efectiva de la rótula plástica disminuye cuando aumenta la resistencia del hormigón. Los datos obtenidos, son claramente, un punto de partida

para seguir investigando sobre el comportamiento deformacional de los soportes de hormigón armado cuya resistencia a compresión se encuentra entre 100 y 150 MPa sometidos a carga monotónica o cíclica.

- Los métodos existentes, en la bibliografía y en las actuales normas, para evaluar la capacidad resistente y de deformación de elementos de hormigón sometidos a compresión y flexión monotónica o cíclica, no son todo lo adecuados que debieran para hormigones con resistencias a compresión en el rango entre 100 y 150 MPa, por lo que es conveniente llevar a cabo nuevos estudios centrados en este tipo de elementos para poder proponer nuevos métodos que permitan evaluar, adecuadamente, la capacidad estructural. En este trabajo se hace una especial mención, por la poca idoneidad de los modelos existentes, a la necesidad de definir un modelo que permita obtener un valor teórico del comportamiento deformacional último, tanto a nivel sección como a nivel elemento, para hormigones de altas prestaciones. Adicionalmente, también se deberían incluir los efectos de segundo orden a la hora de obtener los valores teóricos a nivel elemento.
- Plantear la aplicación de un nivel de axil reducido mayor que 0.40, en soportes de hormigón de altas prestaciones con fibras de acero sometidos a compresión y flexión cíclica, con el fin de ajustar y verificar la expresión propuesta en este trabajo.
- Otra propuesta derivada de este trabajo es el estudio del comportamiento resistente y deformacional de soportes sometidos a compresión y flexión monotónica o cíclica fabricados con hormigones de altas prestaciones con distintos tipos de fibras, como por ejemplo de vidrio, poliméricas o de carbono, así como con diferentes tipos de adiciones y aditivos de altas prestaciones.
- A parte de las posibles modificaciones en la masa del hormigón propuestas en el punto anterior, partiendo del comportamiento observado mediante los resultados experimentales, otra futura línea consistiría en plantear combinaciones de materiales más eficientes con el objetivo de alcanzar la máxima ductilidad y el menor daño posible en la zona crítica, teniendo en cuenta la componente económica.
- Otro tema a estudiar sería la influencia de la incorporación de nuevos materiales en el comportamiento de las conexiones tipo soporte-viga y soporte-cimentación, como son los materiales con memoria de forma y súper-elasticidad (barras SMAs (*Shape Memory Alloys*)) o la inclusión de mallas en el recubrimiento del hormigón, tanto en elementos ejecutados con hormigón convencional como de alta resistencia y de altas prestaciones.

Referencias

En este apartado se recopilan las referencias consultadas para el desarrollo de la presente tesis doctoral.

-
- [1] ACI Committee 318, ACI 318-14 - Building Code Requirements for Structural Concrete, American Concrete Institute, Detroit, 2014.
 - [2] ACI Committee 374, ACI 374.2R-13 - Guide for Testing Reinforced Concrete Structural Elements under Slowly Applied Simulated Seismic Loads, American Concrete Institute, Detroit, 2013.
 - [3] ACI Committee 374, ACI 374.1-05 - Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing and Commentary, American Concrete Institute, Detroit, 2014.
 - [4] AFGC/SETRA Groupe de travail BFUP, Betons fibres a ultra-hautes performances Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes Recommendations, AFGC/SETRA, Francia, 2013.
 - [5] J. Al-jeabory, Ultimate Capacity of Reinforced Self Compacting Concrete Columns Subjected to Transverse Cyclic Loads, Journal of Babylon University. 21 (2013) 907–918.
 - [6] H. Aoude, W.D. Cook, D. Mitchell, Behavior of Columns Constructed with Fibers and Self-Consolidating Concrete, ACI Structural Journal. 106 (2009) 349–357.
 - [7] G. Arslan, Shear strength of Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC) slender beams, KSCE Journal of Civil Engineering. 18 (2014) 587–594.
 - [8] ASCE/SEI 41-13, Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings, American Society of Civil Engineers (ASCE), Virginia, 2013.
 - [9] A. Aviram, High-Performance Fiber-Reinforced Concrete Bridge Columns under Bidirectional Cyclic Loading, ACI Structural Journal. (2014) 303–312.
 - [10] F. Baby, P. Marchand, F. Toutlemonde, Shear Behavior of Ultrahigh Performance Fiber-Reinforced Concrete Beams. II: Analysis and Design Provisions, Journal of Structural Engineering. 140 (2013) 1–11.
 - [11] B. Bae, H. Choi, C. Choi, FE analysis of behavior of steel fibre reinforced Ultra-high strength concrete columns under reversed cyclic loading, in: 15h World Conference on Earthquake Engineering, Lisboa, 2012: pp. 1–8.
 - [12] S. Bae, Seismic Performance of Full-Scale Reinforced Concrete Columns, Tesis Doctoral, University of Texas at Austin, 2005.
 - [13] S. Bae, O. Bayrak, Plastic hinge length of reinforced concrete columns, ACI Structural Journal. 105 (2008) 290–300.
 - [14] A.L.L. Baker, The ultimate-load theory applied to the design of reinforced & prestressed concrete frames, Concrete Publications Ltd., London, 1956.
 - [15] A.C. Barrera, Estudio experimental y numérico de la capacidad de deformación de soportes esbeltos de hormigón armado, Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de València, 2012.
 - [16] A.C. Barrera, J.L. Bonet, M.L. Romero, M.A. Fernández, Ductility of slender reinforced concrete columns under monotonic flexure and constant axial load, Engineering Structures. 40 (2012) 398–412.
 - [17] O. Bayrak, Seismic Performance of Rectilinearly Confined High Strength Concrete Columns, Tesis Doctoral, University of Toronto, 1998.
 - [18] O. Bayrak, S.A. Sheikh, Confinement Reinforcement Design Considerations for Ductile

HSC Columns, *Journal of Structural Engineering*. 124 (1998) 999–1010.

- [19] O. Bayrak, S. Sheikhh, High-strength concrete columns under simulated earthquake loading, *ACI Structural Journal*. 94 (1997) 708–722.
- [20] H. Bechtoula, S. Kono, F. Watanabe, Y. Mehani, A. Kibboua, M. Naili, Performance of HSC columns under severe cyclic loading, *Bulletin of Earthquake Engineering*. 13 (2015) 503–538.
- [21] I. Bedirhanoglu, A. Ilki, N. Kumbasar, Precast fiber reinforced cementitious composites for seismic retrofit of deficient RC joints – A pilot study, *Engineering Structures*. 52 (2013) 192–206.
- [22] M. Berry, M. Parrish, PEER Structural Performance Database User’s Manual (Version 1.0), Pacific Earthquake Engineering Research Center. University of California, Berkeley, 2004.
- [23] J.L. Bonet, Método simplificado de cálculo de soportes esbeltos de hormigón armado de sección rectangular sometidos a compresión y flexión biaxial, Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de València, Valencia, 2001.
- [24] J.L. Bonet, M.L. Romero, P.F. Miguel, Effective flexural stiffness of slender reinforced concrete columns under axial forces and biaxial bending, *Engineering Structures*. 33 (2011) 881–893.
- [25] J.L. Bonet, M.L. Romero, P.F. Miguel, M.A. Fernandez, A fast stress integration algorithm for reinforced concrete sections with axial loads and biaxial bending, *Computers and Structures*. 82 (2004) 213–225.
- [26] K.E. Caballero-Morrison, Estudio teórico-experimental de soportes esbeltos de hormigón armado con fibras de acero sometidos a compresión y carga lateral cíclica, Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de València, 2015.
- [27] K.E. Caballero-Morrison, J.L. Bonet, J. Navarro-Gregori, J.R. Martí-Vargas, Behaviour of steel-fibre-reinforced normal-strength concrete slender columns under cyclic loading, *Engineering Structures*. 39 (2012) 162–175.
- [28] K.E. Caballero-Morrison, J.L. Bonet, J. Navarro-Gregori, P. Serna-Ros, An experimental study of steel fiber-reinforced high-strength concrete slender columns under cyclic loading, *Engineering Structures*. 57 (2013) 565–577.
- [29] C.G. Cai, Z.X. Wei, X.P. Yang, An Experimental Study on Ductility of Fiber-Strengthening Concrete, *Advanced Materials Research*. 535-537 (2012) 1907–1912.
- [30] E. Camacho, Dosage optimization and bolted connections for UHPFRC ties, Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de València, 2013.
- [31] G. Campione, M. Fossetti, M. Papia, Behavior of fiber-reinforced concrete columns under axially and eccentrically compressive loads, *ACI Structural Journal*. 107 (2010) 272–281.
- [32] C.E. Chalioris, Steel fibrous RC beams subjected to cyclic deformations under predominant shear, *Engineering Structures*. 49 (2013) 104–118.
- [33] W. Chen, E. Lui, *Structural Stability: Theory and Implementation*, Elsevier Science, 1987.
- [34] C.-G. Cho, Y.-Y. Kim, L. Feo, D. Hui, Cyclic responses of reinforced concrete composite

- columns strengthened in the plastic hinge region by HPFRC mortar, *Composite Structures*. 94 (2012) 2246–2253.
- [35] Comisión Permanente del Hormigón, EHE-08 - Instrucción de Hormigón Estructural, 5ª Edición, Ministerio de Fomento, Madrid, 2011.
- [36] Comité Técnico AEN/CNT 127, UNE-EN 14651:2007+A1 - Método de ensayo para hormigón con fibras metálicas. Determinación de la resistencia a la tracción por flexión (límite de proporcionalidad (LOP), resistencia residual), AENOR, Madrid, 2008.
- [37] Comité Técnico AEN/CNT 140, UNE-EN 1998-3 - Eurocódigo 8: Parte 3: Evaluación y rehabilitación de edificios, AENOR, Madrid, 2010.
- [38] Comité Técnico AEN/CNT 140, UNE-EN 1992-1-1 - Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación, AENOR, Madrid, 2010.
- [39] Comité Técnico AEN/CNT 140, UNE-EN 1998-1 - Eurocódigo 8: Proyecto de estructuras sismorresistentes. Parte 1: Reglas generales, acciones sísmicas y reglas para edificación, AENOR, Madrid, 2011.
- [40] Comité Técnico AEN/CNT 140, UNE-EN 1998-2 - Eurocódigo 8: Proyecto de estructuras sismorresistentes. Parte 2: Puentes, AENOR, Madrid, 2012.
- [41] Comité Técnico AEN/CNT 140, AN/UNE-EN 1992-1-1 Anejo Nacional. Eurocódigo 2: Proyecto de Estructuras de hormigón, AENOR, Madrid, 2013.
- [42] Comité Técnico AEN/CNT 7, UNE-EN ISO 6892-1 - Materiales metálicos. Ensayo de tracción. Parte 1: Método de ensayo a temperatura ambiente., AENOR, Madrid, 2010.
- [43] Comité Técnico AEN/CNT 83, UNE 83504 - Hormigones con Fibras. Fabricación y conservación de probetas para los ensayos de laboratorio, AENOR, Madrid, 2004.
- [44] Comité Técnico AEN/CNT 83, UNE 83507 - Hormigones con Fibras. Rotura por compresión, AENOR, Madrid, 2004.
- [45] Comité Técnico AEN/CNT 83, UNE 83506 - Hormigones con Fibras. Refrentado de probetas con mortero de azufre, AENOR, Madrid, 2004.
- [46] Comité Técnico AEN/CNT 83, UNE-83361 Hormigón autocompactante. Caracterización de la fluidez. Ensayo de escurrimiento, AENOR, Madrid, 2007.
- [47] Comité Técnico AEN/CNT 83, UNE-EN 12390-13 - Ensayos de hormigón endurecido. Parte 13: Determinación del módulo secante de elasticidad en compresión, AENOR, Madrid, 2014.
- [48] Commission 7-Seismic Design, FIB Bulletin 25: Displacement-based seismic design of reinforced concrete buildings, fib - Fédération internationale du béton, Lausanne, 2003.
- [49] Concrete Committee, Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks (HPFRCC), Japan Society of Civil Engineers, 2008.
- [50] Y. Ding, Yining, Z. You, S. Jalali, The composite effect of steel fibres and stirrups on the shear behaviour of beams using self-consolidating concrete, *Engineering Structures*. 33 (2011) 107–117.
- [51] Y. Ding, F. Zhang, F. Torgal, Y. Zhang, Shear behaviour of steel fibre reinforced self-

-
- consolidating concrete beams based on the modified compression field theory, *Composite Structures*. 94 (2012) 2440–2449.
- [52] H. Dong, S. Feng, Reinforcement and Fiber to Induce Ductile Behavior of UHPSFC, *Applied Mechanics and Materials*. 351-352 (2013) 199–202.
- [53] M.N. Fardis, D.E. Biskinis, Deformation capacity of RC members as controlled by flexure or shear, in: *Otani Symposium, Tokio, 2003*: pp. 511–530.
- [54] FECYT, Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología, [Www.recursoscientificos.fecyt.es](http://www.recursoscientificos.fecyt.es). (2015).
- [55] Fédération Internationale du Béton, CEB-FIP Model Code 2010 Volumen 1, International Federation for Structural Concrete (fib), Lausanne, 2010.
- [56] Fédération Internationale du Béton, CEB-FIP Model Code 2010 Volumen 2, International Federation for Structural Concrete (fib), Lausanne, 2010.
- [57] E. Fehling, Desing Relevant Properties of Hardened Ultra High Performance Concrete, in: *Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, University of Kassel, Germany, Kassel, 2004: p. 884.
- [58] E. Fehling, M. Schmidt, J.C. Walraven, T. Leutbecher, S. Fröhlich, *Ultra-High Performance Concrete UHPC*, Ernst & Sohn, Berlin, 2014.
- [59] G. Fischer, H. Fukuyama, V. Li, Effect of matrix ductility on the performance of reinforced ECC column members under reversed cyclic loading conditions, in: *Proc. JCI International Workshop on Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites (DFRCC)*, Takayama, Japan, 2002: pp. 269–278.
- [60] S.J. Foster, On Behavior of High-Strength Concrete Columns: Cover, *ACI Structural Journal*. 98 (2001) 583–589.
- [61] F. Germano, G.A. Plizzari, G. Tiberti, Experimental Study on the Behavior of Sfrc Columns Under Seismic Loads, in: *VIII International Conference on Fracture Mechanics of Concrete Structures FraMCoS-8*, Framcos.Org, Toledo, Spain, 2013: pp. 1–12.
- [62] R. Green, C.T. Hsu, D.D. Lee, J.G. Macgregor, P. Paultre, F.N. Rad, et al., *ACI 441R-96 High-Strength Concrete Columns: State of the Art Reported by joint*, American Concrete Institute, 1997.
- [63] M.N.S. Hadi, M. Asce, H. Zhao, Experimental Study of High-Strength Concrete Columns Confined with Different Types of Mesh under Eccentric and Concentric Loads, *Journal of Materials*. 23 (2011) 823–832.
- [64] M. Hamrat, B. Boulekbache, M. Chemrouk, S. Amziane, Transverse Reinforcement Effects on the Loading Behaviour of High Performances Concrete Beams, in: *VIII International Conference on Fracture Mechanics of Concrete Structures FraMCoS-8*, Toledo, Spain, 2013: pp. 1–16.
- [65] L. Hsu, C.T. Hsu, Stress-Strain Behavior of Steel-Fiber High-Strength Concrete under Compression, *ACI Structural Journal*. 91 (1995) 448–457.
- [66] M. Hussein, M. Kunieda, H. Nakamura, Strength and ductility of RC beams strengthened with steel-reinforced strain hardening cementitious composites, *Cement and Concrete Composites*. 34 (2012) 1061–1066.

-
- [67] S.-K. Hwang, H.-D. Yun, Effects of transverse reinforcement on flexural behaviour of high-strength concrete columns, *Engineering Structures*. 26 (2003) 1–12.
- [68] M.M. Kamal, M.A. Safan, Z.A. Etman, R. a. Salama, Behavior and strength of beams cast with ultra high strength concrete containing different types of fibers, *HBRC Journal*. 10 (2013) 55–63.
- [69] K. Khayat, G. De Schutter, State-of-the-Art Report on the Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete (SCC), Missouri (USA) y Ghent (Bélgica), 2014.
- [70] C.-S. Kim, H.H.-G. Park, K.K.-S. Chung, I.-R.I. Choi, Eccentric Axial Load Capacity of High Strength Steel-Concrete Composite Columns of Various Sectional Shapes, *Journal of Structural Engineering*. 140 (2013) 12.
- [71] Y.Y. Kim, B.Y. Lee, J.-W. Bang, B.-C. Han, L. Feo, C.-G. Cho, Flexural performance of reinforced concrete beams strengthened with strain-hardening cementitious composite and high strength reinforcing steel bar, *Composites Part B: Engineering*. 56 (2014) 512–519.
- [72] S.S.E. Lam, B. Wu, Y.L. Wong, Z.Y. Wang, Z.Q. Liu, C.S. Li, Drift Capacity of Rectangular Reinforced Concrete Columns with Low Lateral Confinement and High-Axial Load, *Journal of Structural Engineering*. 129 (2003) 733–742.
- [73] D. Lehman, J. Moehle, S. Mahin, A. Calderone, L. Henry, Experimental Evaluation of the Seismic Performance of Reinforced Concrete Bridge Columns, *Journal of Structural Engineering*. 130 (2004) 869–879.
- [74] D.E. Lehman, J.P. Moehle, Seismic performance of well-confined concrete bridge columns, University of California, Berkeley, 2000.
- [75] W. Liao, S. Chao, S. Park, A.E. Naaman, Self-Consolidating High Performance Fiber Reinforced Concrete (SCHPFRC) – Preliminary Investigation, Department of Civil and Environmental Engineering. Universidad de Michigan, Ann Arbor, 2006.
- [76] C. Lin, S. Lin, Flexural Behavior of High-Workability Concrete Columns Under Cyclic Loading, *ACI Structural Journal*. 102 (2006) 412–421.
- [77] J.A. López, Adaptación del Modelo de Comportamiento del Ultra High Performance Concrete (UHPC) para el Estudio de la Respuesta Estructural y Análisis Numérico de una Celosía, Tesina de Máster. Universitat Politècnica de València, 2012.
- [78] T. Makita, Bending fatigue test of R-UHPFRC – RC composite beams Doctoral assistant Tohru Makita Professor Eugen Brühwiler Lausanne, February 2014, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2014.
- [79] J.B. Mander, Seismic desing of bridge piers, Tesis Doctoral, University of Canterbury, 1984.
- [80] J.B. Mander, M.J.N. Priestley, R. Park, Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, *Journal of Structural Engineering*. 114 (1989) 1804–1826.
- [81] L.F. Maya, C. Zanuy, L. Albajar, C. Lopez, J. Portabella, Experimental assessment of connections for precast concrete frames using ultra high performance fibre reinforced concrete, *Construction and Building Materials*. 48 (2013) 173–186.
- [82] J. Melo, H. Varum, T. Rossetto, Experimental cyclic behaviour of RC columns with plain bars and proposal for Eurocode 8 formula improvement, *Engineering Structures*. 88
-

(2015) 22–36.

- [83] P. Mendis, Plastic Hinge Lengths of Normal and High-Strength Concrete in Flexure, *Advances in Structural Engineering*. 4 (2001) 189–195.
- [84] A.E. Naaman, H.W. Reinhardt, Proposed classification of HPFRC composites based on their tensile response, *Materials and Structures*. 39 (2007) 547–555.
- [85] B. Nematollahi, R. R. M.S. Jaafar, Y.L. Voo, A review on ultra high performance “ductile” concrete (UHPdC) technology, *International Journal of Civil and Structural Engineering*. 2 (2012) 1003–1018.
- [86] T. Noshiravani, E. Brühwiler, Experimental Investigation on Reinforced Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete Composite Beams Subjected to Combined Bending and Shear, *ACI Structural Journal*. 110 (2013) 251–261.
- [87] T. Noshiravani, E. Brühwiler, Rotation capacity and stress redistribution ability of R-UHPFRC–RC composite continuous beams: an experimental investigation, *Materials and Structures*. 46 (2013) 2013–2028.
- [88] L. Osorio, P. Paultre, R. Eid, J. Proulx, Seismic Behavior of Synthetic Fiber-Reinforced Circular Columns, *ACI Structural Journal*. 111 (2014) 189–200.
- [89] H.J. Pam, J.C.M. Ho, Length of critical region for confinement steel in limited ductility high-strength reinforced concrete columns, *Engineering Structures*. 31 (2009) 2896–2908.
- [90] J. Pan, F. Yuan, Seismic Behaviors of Ecc/Concrete Composite Beam-Column Joints Under Reversed Cyclic Loading, in: *VIII International Conference on Fracture Mechanics of Concrete Structures FraMCoS-8*, Toledo, Spain, 2013: p. 13.
- [91] T.B. Panagiotakos, M.N. Fardis, Deformation of reinforced concrete at yielding and ultimate., *ACI Structural Journal*. 98 (2001) 135–147.
- [92] R. Park, Ductility of Square-Confined Concrete Columns, *Journal of the Structural Division*. 108 (1982) 929–950.
- [93] R. Park, T. Paulay, *Estructura de Concreto Reforzado*, Editorial Limusa S.A., Mexico, 1978.
- [94] G.J. Parra-Montesinos, High-Performance Fiber-Reinforced Cement Composites: An Alternative for Seismic Design of Structures, *ACI Structural Journal*. 102 (2005) 668–675.
- [95] P. Paultre, M. Asce, R. Eid, Y. Langlois, Y. Lévesque, Behavior of Steel Fiber-Reinforced High-Strength Concrete Columns under Uniaxial Compression, *American Society of Civil Engineers*. 136 (2010) 1225–1235.
- [96] P. Paultre, F. Légeron, D. Mongeau, Influence of concrete strength and transverse reinforcement yield strength on behavior of high-strength concrete columns, *ACI Structural Journal*. 98 (2001) 490–501.
- [97] R.S. Pendyala, P.A. Mendis, I. Patnaikuni, Softening of plastic hinges in high-strength concrete structures, *Transactions of the Institution of Engineers, Australia. Civil Engineering*. 36 (1994) 51–55.
- [98] R.S. Pendyala, P.A. Mendis, I. Patnaikuni, Full-Range Behavior of High-Strength Concrete Flexural Members: Comparison of Ductility Parameters of High and Normal-Strength

- Concrete Members, *ACI Structural Journal*. 93 (1996) 30–35.
- [99] J. Pereiro, J.L. Bonet, J. Navarro-Gregori, Modelo mixto para la determinación teórica de la carga crítica de pandeo de las armaduras pasivas en compresión, in: VI Congreso Internacional de Estructuras, Asociación Científico Técnica del Hormigón Estructural (ACHE), Madrid, 2014: p. 688.
- [100] M. Popa, O. Corbu, Z. Kiss, R. Zagon, Achieving Mixtures of Ultra-High Performance Concrete, *CONSTRUCTII*. 1 (2013) 40–46.
- [101] M. Popa, Z. Kiss, C. Țibea, G. Bolca, Experimental Analysis And Numerical Simulation Of Ultra-High Performance And Normal Concrete Compound Columns., *Buletinul Institutului Politehnic Din Iasi*. LIX (LXIII) (2013) 17–25.
- [102] M.J.N. Priestley, R. Park, Strength and Ductility of Concrete Bridge Columns under Seismic Loading, *ACI Struc. J.* 84 (1987) 61–67.
- [103] J.M. Rautenberg, S. Pujol, H. Tavallali, A. Lepage, Reconsidering the use of high-strength reinforcement in concrete columns, *Engineering Structures*. 37 (2012) 135–142.
- [104] K. Rodsin, M. Sappakittipakorn, Seismic Performance Enhancement of Non-ductile RC Columns using Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC), 747 (2013) 773–776.
- [105] C. Röhm, B. Novák, S. Sasmal, R. Karusala, V. Srinivas, Behaviour of fibre reinforced beam-column sub-assemblages under reversed cyclic loading, *Construction and Building Materials*. 36 (2012) 319–329.
- [106] A. Romero-García, J.L. Bonet, J.R. Martí-Vargas, J. Navarro-Gregori, Behaviour of precast columns to-foundation connections under cyclic loading, in: 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisboa, 2012: pp. 24–28.
- [107] G. Russel, B.A. Graybeal, Ultra-High Performance Concrete: A State-of-the-Art Report for the Bridge Community, (2013) 176.
- [108] H. Russel, G. B. a. Graybeal, Ultra-High Performance Concrete : A State-of-the-Art Report for the Bridge Community, Federal Highway Administration, Washington, 2013.
- [109] M.S. Saiidi, M. O'Brien, M. Sadrossadat-zadeh, M.O. Brien, M. Sadrossadat-zadeh, Cyclic Response of Concrete Bridge Columns Using Superelastic Nitinol and Bendable Concrete, *ACI Structural Journal*. 106 (2009) 69–77.
- [110] P. Serna, J.A. Lopez, E. Camacho, UHPFRC : De los componentes a la estructura, in: ANAIS DO 54º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2012 – 54CBC, 2012: pp. 1–21.
- [111] S. a. Sheikh, S.S. Khoury, Confined concrete columns with stubs, *ACI Structural Journal*. 90 (1993) 414–431.
- [112] S.A. Sheikh, D. V. Shah, S.S. Khoury, Confinement of High-Strength Concrete Columns, *ACI Structural Journal*, Technical Paper. 1 (1994) 100–111.
- [113] M. Shin, Y.-Y. Choi, I.-H. Kim, K. Lee, Effectiveness of low-cost fiber-reinforced cement composites in hollow columns under cyclic loading, *Construction and Building Materials*. 47 (2013) 623–635.
- [114] A. Spasojevic, Structural Implications of Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete in Bridge Design, Tesis Doctoral. Escuela Politecnica Federal de Lausanne,

2008.



- [115] Subcomisión Permanente de Normas Sismorresistentes, NCSP-07 Norma de Construcción Sismorresistente: Puentes, Ministerio de Fomento, 2008.
- [116] H. Takatsu, H. Kimura, Y. Ishikawa, Experimental Study of Steel Fiber-Reinforced Ultra High-Strength Concrete Columns, in: 2^o International Congress- FIB, Napoles, Italia, 2006: p. 10.
- [117] H. Tavallali, A. Lepage, J. Rautenberg, S. Pujol, Drift Limits of Concrete Frame Members Reinforced with High-performance Steel Bars and Fibers, High Performance Fiber. (2012) 329–337.
- [118] Y.L. Voo, W.K. Poon, S.J. Foster, Shear Strength of Steel Fiber-Reinforced Ultrahigh-Performance Concrete Beams without Stirrups, Journal of Structural Engineering. 136 (2010) 1393–1400.
- [119] J.C. Walraven, High performance fiber reinforced concrete: progress in knowledge and design codes, Materials and Structures. 42 (2009) 1247–1260.
- [120] T. Yamamoto, Short- and Long-term Deformations of Ultra-high Strength Reinforced Concrete Columns Subjected to Severe Seismic Loading, in: 15h World Conference on Earthquake Engineering, Lisboa, 2012: pp. 1–9.
- [121] I.H. Yang, C. Joh, B. Kim, I. Hwan, C. Joh, B. Kim, Structural behavior of ultra high performance concrete beams subjected to bending, Engineering Structures. 32 (2010) 3478–3487.
- [122] S.Y. Yin, T. Wu, T.C. Liu, S.A. Sheikh, R. Wang, Interlocking Spiral Confinement for Rectangular Columns, Concrete International. 33 (2011) 38–45.
- [123] F.A. Zahn, Design of reinforced concrete bridge columns for strength and ductility., Canterbury, 1986.
- [124] Y.Y. Zhang, K.A. Harries, W.C. Yuan, Experimental and numerical investigation of the seismic performance of hollow rectangular bridge piers constructed with and without steel fiber reinforced concrete, Engineering Structures. 48 (2013) 373–388.
- [125] P. Zohrevand, M. Asce, A. Mirmiran, F. Asce, Cyclic Behavior of Hybrid Columns Made of Ultra High Performance Concrete and Fiber Reinforced Polymers, Journal of Composites for Construction. 16 (2012) 91–99.
- [126] Ultra-High Performance Concrete and Nanotechnology in Contrucción, in: Hipermat 2012 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials, University of Kassel, Germany, Kassel, 2012: p. 1059.

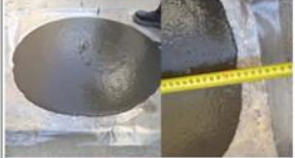
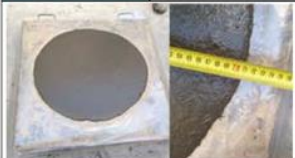
ANEJO A

Anejo A: Fichas de los elementos ensayados

En este anejo se recopilan los distintos tipos de fichas realizados para cada uno de los soportes ensayados: ficha de materiales, ficha de instrumentación, ficha de rotura, ficha de gráficas directas y la ficha de los parámetros de comportamiento.



Fichas de Materiales

	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE SOPORTES DE HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES SOMETIDOS A COMPRESIÓN Y CARGA LATERAL CÍCLICA										
	ELEMENTO Nº: AS11-1										
ARMADURA PASIVA: LOTE Nº 2											
HORMIGÓN											
<table border="1"> <thead> <tr> <th>fc nominal:</th> <th>Fecha</th> <th>Tipo Fibra</th> <th>% Fibra</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>130 Mpa</td> <td>17/06/2014</td> <td>MIXTAS</td> <td>2%</td> </tr> </tbody> </table>	fc nominal:	Fecha	Tipo Fibra	% Fibra	130 Mpa	17/06/2014	MIXTAS	2%			
fc nominal:	Fecha	Tipo Fibra	% Fibra								
130 Mpa	17/06/2014	MIXTAS	2%								
DOSIFICACIÓN PREVISTA (kg) con cemento y arenas (ensacados)		AMASADA 1	AMASADA 2								
Componentes:	Volúmen (m³): 1	0.105	0.105								
CEM 42.5 R-SR	1000.00	105.00	105.00								
Agua	184.00	19.32	18.44								
Humo de Sílice 940 D	150.00	15.75	15.75								
Arena sílicea (AF-T-0/4-5)	310.00	32.55	32.55								
Arena sílicea (AF-T-0/8-5)	575.00	60.38	60.38								
Sika 20 HE	28.50	2.99	2.99								
Fibras cortas (Straight) 13/0.5	90.00	9.45	9.45								
Fibras largas (Hook End) 80/30	60.00	6.30	6.30								

			---	-------		Amasada	1		Slump Flow	72 cm					Amasada	2		Slump Flow	71 cm							**OBSERVACIONES:** Amasada 2: se corrige agua quitando al agua de la 1ª amasada 0.88 kg																																																													
DATOS PREVIOS ROTURA SOPORTE																																																																																							
				----------------	------------		Fecha Amasado:	17/06/2014		Fecha Rotura:	15/07/2014		Días:	28			PROBETAS COMPRESIÓN							----------------------	----------	-----	------------------	--------	-----		Cilíndrica 1	129.99	MPa	Cúbica 1	160.87	MPa		Cilíndrica 2	140.95	MPa	Cúbica 2	154.28	MPa		Cilíndrica 3	127.04	MPa	Cúbica 3	138.32	MPa		E	45328.00	MPa	Cúbica 4	151.43	MPa		$f_{cm_cilíndrica}$	132.66	MPa	$f_{cm_cúbica}$	151.23	MPa																							
	AXIL APLICADO (N):				---------------------	---------	-------		v	b (m)	h (m)		0.20	0.15	0.26		N Teórico (kN):	1034.75			N Aplicado (kN):	1034.96			N Real Medido (kN):	1042.63				PROBETAS FLEXOTRACCIÓN							------------------------	--------------	-----	--------------	-------	-----			Prismática 1		Prismática 2				$f_{R,LOP}$	10.31	MPa	$f_{R,LOP}$	11.08	MPa		$f_{R,1}$	17.79	MPa	$f_{R,1}$	20.09	MPa		$f_{R,2}$	13.04	MPa	$f_{R,2}$	11.57	MPa		$f_{R,3}$	4.63	MPa	$f_{R,3}$	6.10	MPa		$f_{R,4}$	-	MPa	$f_{R,4}$	-	MPa			
OBSERVACIONES:																																																																																							

ELEMENTO Nº: AS11-2
ARMADURA PASIVA: LOTE Nº 2
HORMIGÓN

fc nominal:	Fecha	Tipo Fibra	% Fibra
130 Mpa	19/06/2014	MIXTAS	2%
DOSIFICACIÓN PREVISTA (kg) con cemento y arenas (ensacados)		AMASADA 1	AMASADA 2
Componentes:	Volúmen (m ³):	1	0.105
CEM 42.5 R-SR	1000.00	105.00	105.00
Agua	184.00	19.32	18.05
Humo de Sílice 940 D	150.00	15.75	15.75
Arena silicea (AF-T-0/4-S)	310.00	32.55	32.55
Arena silicea (AF-T-0/8-S)	575.00	60.38	60.38
Sika 20 HE	28.50	2.99	2.99
Fibras cortas (Straight) 13/0.5	90.00	9.45	9.45
Fibras largas (Hook End) 80/30	60.00	6.30	6.30

Amasada	1
Slump Flow	
	
Amasada	2
Slump Flow	63 cm
	

OBSERVACIONES:

Amasada 2: se corrige agua quitando al agua de la 1ª amasada 1.27 kg

DATOS PREVIOS ROTURA SOPORTE

Fecha Amasado:	19/06/2014
Fecha Rotura:	17/07/2014
Días:	28



AXIL APLICADO (N):		
v	b (m)	h (m)
0.20	0.15	0.26
N Teórico (kN):	1017.22	
N Aplicado (kN):	1020.24	
N Real Medido (kN):		

OBSERVACIONES:
PROBETAS COMPRESIÓN

Cilíndrica 1	131.69	MPa	Cúbica 1	147.01	MPa
Cilíndrica 2	133.50	MPa	Cúbica 2	153.55	MPa
Cilíndrica 3	126.05	MPa	Cúbica 3	151.47	MPa
E _c	47431.00	MPa	Cúbica 4	153.85	MPa
f _{cm_cilíndrica}	130.41	MPa	f _{cm_cúbica}	151.47	MPa

PROBETAS FLEXOTRACCIÓN

Prismática 1		Prismática 2			
f _{R,LOP}	8.16	MPa	f _{R,LOP}	12.02	MPa
f _{R,1}	17.68	MPa	f _{R,1}	19.23	MPa
f _{R,2}	9.20	MPa	f _{R,2}	11.10	MPa
f _{R,3}	5.10	MPa	f _{R,3}	5.40	MPa
f _{R,4}	3.80	MPa	f _{R,4}	3.90	MPa

	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE SOPORTES DE HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES SOMETIDOS A COMPRESIÓN Y CARGA LATERAL CÍCLICA		
	ELEMENTO Nº: AS11-2 (R)		
ARMADURA PASIVA:		LOTE Nº 3	
HORMIGÓN			
fc nominal:	Fecha	Tipo Fibra	% Fibra
130 Mpa	27/01/2015	MIXTAS	2%
DOSIFICACIÓN PREVISTA (kg) con cemento y arenas (ensacados)		AMASADA 1	AMASADA 2
Componentes:	Volúmen (m³):	1	0.108
CEM 42.5 R-SR	1000.00	108.00	108.00
Agua	172.00	19.15	18.45
Humo de Sílice 940 D	150.00	16.20	16.20
Arena silíceo (AF-T-0/4-S)	310.00	33.48	33.48
Arena silíceo (AF-T-0/8-S)	575.00	62.10	62.10
Sika 20 HE	28.50	3.08	3.08
Fibras cortas (Straight) 13/0.5	90.00	9.72	9.72
Fibras largas (Hook End) 80/30	60.00	6.48	6.48

Amasada	1
Slump Flow	
/	
Amasada	2
Slump Flow	
/	

OBSERVACIONES:	
<u>Amasada 1:</u> se corrige agua añadiendo 0.575 kg	



DATOS PREVIOS ROTURA SOPORTE	
Fecha Amasado:	27/01/2015
Fecha Rotura:	24/02/2015
Días:	28


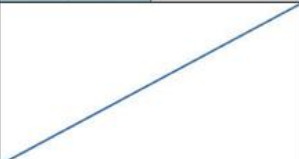
AXIL APLICADO (N):		
v	b (m)	h (m)
0.20	0.15	0.26
N Teórico (kN):	975.71	
N Aplicado (kN):	976.10	
N Real Medido (kN):	987.87	

PROBETAS COMPRESIÓN					
Cilíndrica 1	127.00	MPa	Cúbica 1	150.29	MPa
Cilíndrica 2	123.52	MPa	Cúbica 2	151.17	MPa
Cilíndrica 3	124.76	MPa	Cúbica 3	145.74	MPa
E_c	42187.00	MPa	Cúbica 4	141.86	MPa
f_{cm_cilíndrica}	125.09	MPa	f_{cm_cúbica}	147.27	MPa





PROBETAS FLEXOTRACCIÓN					
Prismática 1			Prismática 2		
f_{R,LOP}	11.37	MPa	f_{R,LOP}	13.03	MPa
f_{R,1}	21.29	MPa	f_{R,1}	23.22	MPa
f_{R,2}	22.56	MPa	f_{R,2}	24.70	MPa
f_{R,3}	20.30	MPa	f_{R,3}	22.89	MPa
f_{R,4}	16.60	MPa	f_{R,4}	18.36	MPa

OBSERVACIONES:	
-----------------------	--

	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE SOPORTES DE HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES SOMETIDOS A COMPRESIÓN Y CARGA LATERAL CÍCLICA										
	ELEMENTO Nº: AS11-3										
ARMADURA PASIVA: LOTE Nº 2											
HORMIGÓN											
<table border="1"> <thead> <tr> <th>fc nominal:</th> <th>Fecha</th> <th>Tipo Fibra</th> <th>% Fibra</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>130 Mpa</td> <td>24/06/2014</td> <td>MIXTAS</td> <td>2%</td> </tr> </tbody> </table>	fc nominal:	Fecha	Tipo Fibra	% Fibra	130 Mpa	24/06/2014	MIXTAS	2%			
fc nominal:	Fecha	Tipo Fibra	% Fibra								
130 Mpa	24/06/2014	MIXTAS	2%								
DOSIFICACIÓN PREVISTA (kg) con cemento y arenas (ensacados)		AMASADA 1	AMASADA 2								
Componentes:	Volúmen (m³): 1	0.105	0.105								
CEM 42.5 R-SR	1000.00	105.00	105.00								
Agua	184.00	19.32	18.05								
Humo de Sílice 940 D	150.00	15.75	15.75								
Arena silícea (AF-T-0/4-S)	310.00	32.55	32.55								
Arena silícea (AF-T-0/8-S)	575.00	60.38	60.38								
Sika 20 HE	28.50	2.99	2.99								
Fibras cortas (Straight) 13/0.5	90.00	9.45	9.45								
Fibras largas (Hook End) 80/30	60.00	6.30	6.30								

 | | | |--|-------| | Amasada | 1 | | Slump Flow | 68 cm | |  | | | Amasada | 2 | | Slump Flow | | |  | | | || **OBSERVACIONES:** | | | |
| Amasada 2: se corrige agua quitando al agua de la 1ª amasada 1.27 kg | | | |

DATOS PREVIOS ROTURA SOPORTE		PROBETAS COMPRESIÓN			
Fecha Amasado:	24/06/2014	Cilíndrica 1	121.42 MPa	Cúbica 1	149.58 MPa
Fecha Rotura:	22/07/2014	Cilíndrica 2	120.80 MPa	Cúbica 2	153.42 MPa
Días:	28	Cilíndrica 3	115.83 MPa	Cúbica 3	152.82 MPa
		E _c	45636.00 MPa	Cúbica 4	150.37 MPa
		f _{cm_cilíndrica}	119.35 MPa	f _{cm_cúbica}	151.55 MPa
AXIL APLICADO (N):		PROBETAS FLEXOTRACCIÓN			
v	b (m)	h (m)			
0.20	0.15	0.26			
N Teórico (kN):	930.93				
N Aplicado (kN):	931.95				
N Real Medido (kN):	933.93				
OBSERVACIONES:					

	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE SOPORTES DE HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES SOMETIDOS A COMPRESIÓN Y CARGA LATERAL CÍCLICA																																																														
	ELEMENTO Nº: AS11-4																																																														
ARMADURA PASIVA:		LOTE Nº 2																																																													
HORMIGÓN																																																															
<table border="1"> <thead> <tr> <th>fc nominal:</th> <th>Fecha</th> <th>Tipo Fibra</th> <th>% Fibra</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>130 Mpa</td> <td>26/06/2014</td> <td>LARGAS</td> <td>2%</td> </tr> </tbody> </table>	fc nominal:	Fecha	Tipo Fibra	% Fibra	130 Mpa	26/06/2014	LARGAS	2%	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">DOSIFICACIÓN PREVISTA (kg) con cemento y arenas (ensacados)</th> </tr> <tr> <th>Componentes:</th> <th>Volúmen (m³):</th> <th>1</th> <th>0.105</th> <th>0.105</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>CEM 42.5 R-SR</td> <td>1000.00</td> <td>105.00</td> <td>105.00</td> <td>105.00</td> </tr> <tr> <td>Agua</td> <td>184.00</td> <td>19.32</td> <td>19.32</td> <td>19.32</td> </tr> <tr> <td>Humo de Silice 940 D</td> <td>150.00</td> <td>15.75</td> <td>15.75</td> <td>15.75</td> </tr> <tr> <td>Arena sílicea (AF-T-0/4-S)</td> <td>310.00</td> <td>32.55</td> <td>32.55</td> <td>32.55</td> </tr> <tr> <td>Arena sílicea (AF-T-0/8-S)</td> <td>575.00</td> <td>60.38</td> <td>60.38</td> <td>60.38</td> </tr> <tr> <td>Sika 20 HE</td> <td>28.50</td> <td>2.99</td> <td>2.99</td> <td>2.99</td> </tr> <tr> <td>Fibras cortas (Straight) 13/0.5</td> <td>0.00</td> <td>0.00</td> <td>0.00</td> <td>0.00</td> </tr> <tr> <td>Fibras largas (Hook End) 80/30</td> <td>150.00</td> <td>15.75</td> <td>15.75</td> <td>15.75</td> </tr> </tbody> </table>			DOSIFICACIÓN PREVISTA (kg) con cemento y arenas (ensacados)				Componentes:	Volúmen (m ³):	1	0.105	0.105	CEM 42.5 R-SR	1000.00	105.00	105.00	105.00	Agua	184.00	19.32	19.32	19.32	Humo de Silice 940 D	150.00	15.75	15.75	15.75	Arena sílicea (AF-T-0/4-S)	310.00	32.55	32.55	32.55	Arena sílicea (AF-T-0/8-S)	575.00	60.38	60.38	60.38	Sika 20 HE	28.50	2.99	2.99	2.99	Fibras cortas (Straight) 13/0.5	0.00	0.00	0.00	0.00	Fibras largas (Hook End) 80/30	150.00	15.75	15.75	15.75			
fc nominal:	Fecha	Tipo Fibra	% Fibra																																																												
130 Mpa	26/06/2014	LARGAS	2%																																																												
DOSIFICACIÓN PREVISTA (kg) con cemento y arenas (ensacados)																																																															
Componentes:	Volúmen (m ³):	1	0.105	0.105																																																											
CEM 42.5 R-SR	1000.00	105.00	105.00	105.00																																																											
Agua	184.00	19.32	19.32	19.32																																																											
Humo de Silice 940 D	150.00	15.75	15.75	15.75																																																											
Arena sílicea (AF-T-0/4-S)	310.00	32.55	32.55	32.55																																																											
Arena sílicea (AF-T-0/8-S)	575.00	60.38	60.38	60.38																																																											
Sika 20 HE	28.50	2.99	2.99	2.99																																																											
Fibras cortas (Straight) 13/0.5	0.00	0.00	0.00	0.00																																																											
Fibras largas (Hook End) 80/30	150.00	15.75	15.75	15.75																																																											
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Amasada</th> <th>1</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Slump Flow</td> <td>71.5 cm</td> </tr> </tbody> </table>  <table border="1"> <thead> <tr> <th>Amasada</th> <th>2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Slump Flow</td> <td>69.5 cm</td> </tr> </tbody> </table> 				Amasada	1	Slump Flow	71.5 cm	Amasada	2	Slump Flow	69.5 cm																																																				
Amasada	1																																																														
Slump Flow	71.5 cm																																																														
Amasada	2																																																														
Slump Flow	69.5 cm																																																														
OBSERVACIONES:																																																															
DATOS PREVIOS ROTURA SOPORTE																																																															
<table border="1"> <tbody> <tr> <td>Fecha Amasado:</td> <td>26/06/2014</td> </tr> <tr> <td>Fecha Rotura:</td> <td>24/07/2014</td> </tr> <tr> <td>Días:</td> <td>28</td> </tr> </tbody> </table>		Fecha Amasado:	26/06/2014	Fecha Rotura:	24/07/2014	Días:	28	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">PROBETAS COMPRESIÓN</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Cilíndrica 1</td> <td>131.51</td> <td>MPa</td> <td>Cúbica 1</td> <td>137.98</td> <td>MPa</td> </tr> <tr> <td>Cilíndrica 2</td> <td>123.80</td> <td>MPa</td> <td>Cúbica 2</td> <td>143.13</td> <td>MPa</td> </tr> <tr> <td>Cilíndrica 3</td> <td>120.27</td> <td>MPa</td> <td>Cúbica 3</td> <td>140.77</td> <td>MPa</td> </tr> <tr> <td>E_c</td> <td>43592.00</td> <td>MPa</td> <td>Cúbica 4</td> <td>146.35</td> <td>MPa</td> </tr> <tr> <td>f_{cm_cilíndrica}</td> <td>125.19</td> <td>MPa</td> <td>f_{cm_cúbica}</td> <td>142.06</td> <td>MPa</td> </tr> </tbody> </table>		PROBETAS COMPRESIÓN				Cilíndrica 1	131.51	MPa	Cúbica 1	137.98	MPa	Cilíndrica 2	123.80	MPa	Cúbica 2	143.13	MPa	Cilíndrica 3	120.27	MPa	Cúbica 3	140.77	MPa	E _c	43592.00	MPa	Cúbica 4	146.35	MPa	f _{cm_cilíndrica}	125.19	MPa	f _{cm_cúbica}	142.06	MPa																				
Fecha Amasado:	26/06/2014																																																														
Fecha Rotura:	24/07/2014																																																														
Días:	28																																																														
PROBETAS COMPRESIÓN																																																															
Cilíndrica 1	131.51	MPa	Cúbica 1	137.98	MPa																																																										
Cilíndrica 2	123.80	MPa	Cúbica 2	143.13	MPa																																																										
Cilíndrica 3	120.27	MPa	Cúbica 3	140.77	MPa																																																										
E _c	43592.00	MPa	Cúbica 4	146.35	MPa																																																										
f _{cm_cilíndrica}	125.19	MPa	f _{cm_cúbica}	142.06	MPa																																																										
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">AXIL APLICADO (N):</th> </tr> <tr> <th>v</th> <th>b (m)</th> <th>h (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.20</td> <td>0.15</td> <td>0.26</td> </tr> <tr> <td>N Teórico (kN):</td> <td colspan="2">976.52</td> </tr> <tr> <td>N Aplicado (kN):</td> <td colspan="2">981.00</td> </tr> <tr> <td>N Real Medido (kN):</td> <td colspan="2">985.00</td> </tr> </tbody> </table>		AXIL APLICADO (N):			v	b (m)	h (m)	0.20	0.15	0.26	N Teórico (kN):	976.52		N Aplicado (kN):	981.00		N Real Medido (kN):	985.00		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="6">PROBETAS FLEXOTRACCIÓN</th> </tr> <tr> <th colspan="3">Prismática 1</th> <th colspan="3">Prismática 2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>f_{R,LOP}</td> <td>6.65</td> <td>MPa</td> <td>f_{R,LOP}</td> <td>9.46</td> <td>MPa</td> </tr> <tr> <td>f_{R,1}</td> <td>16.56</td> <td>MPa</td> <td>f_{R,1}</td> <td>19.06</td> <td>MPa</td> </tr> <tr> <td>f_{R,2}</td> <td>14.75</td> <td>MPa</td> <td>f_{R,2}</td> <td>17.83</td> <td>MPa</td> </tr> <tr> <td>f_{R,3}</td> <td>8.85</td> <td>MPa</td> <td>f_{R,3}</td> <td>9.75</td> <td>MPa</td> </tr> <tr> <td>f_{R,4}</td> <td>5.91</td> <td>MPa</td> <td>f_{R,4}</td> <td>6.45</td> <td>MPa</td> </tr> </tbody> </table>		PROBETAS FLEXOTRACCIÓN						Prismática 1			Prismática 2			f _{R,LOP}	6.65	MPa	f _{R,LOP}	9.46	MPa	f _{R,1}	16.56	MPa	f _{R,1}	19.06	MPa	f _{R,2}	14.75	MPa	f _{R,2}	17.83	MPa	f _{R,3}	8.85	MPa	f _{R,3}	9.75	MPa	f _{R,4}	5.91	MPa	f _{R,4}	6.45	MPa
AXIL APLICADO (N):																																																															
v	b (m)	h (m)																																																													
0.20	0.15	0.26																																																													
N Teórico (kN):	976.52																																																														
N Aplicado (kN):	981.00																																																														
N Real Medido (kN):	985.00																																																														
PROBETAS FLEXOTRACCIÓN																																																															
Prismática 1			Prismática 2																																																												
f _{R,LOP}	6.65	MPa	f _{R,LOP}	9.46	MPa																																																										
f _{R,1}	16.56	MPa	f _{R,1}	19.06	MPa																																																										
f _{R,2}	14.75	MPa	f _{R,2}	17.83	MPa																																																										
f _{R,3}	8.85	MPa	f _{R,3}	9.75	MPa																																																										
f _{R,4}	5.91	MPa	f _{R,4}	6.45	MPa																																																										
OBSERVACIONES:																																																															

ELEMENTO Nº: AS11-5
ARMADURA PASIVA:
LOTE Nº 2
HORMIGÓN

fc nominal:	Fecha	Tipo Fibra	% Fibra
130 Mpa	30/06/2014	LARGAS	2%
DOSIFICACIÓN PREVISTA (kg) con cemento y arenas (ensacados)		AMASADA 1	AMASADA 2
Componentes:	Volúmen (m ³):	1	0.105
CEM 42.5 R-SR	1000.00	105.00	105.00
Agua	184.00	19.32	19.32
Humo de Sílice 940 D	150.00	15.75	15.75
Arena silicea (AF-T-0/4-S)	310.00	32.55	32.55
Arena silicea (AF-T-0/8-S)	575.00	60.38	60.38
Sika 20 HE	28.50	2.99	2.99
Fibras cortas (Straight) 13/0.5	0.00	0.00	0.00
Fibras largas (Hook End) 80/30	150.00	15.75	15.75

Amasada	1
Slump Flow	70.5 cm



Amasada	2
Slump Flow	67 cm


OBSERVACIONES:

Se observó a la hora de verter las fibras dentro de la amasadora que las fibras estaban muy apretadas y apelotonadas dentro del saco.

DATOS PREVIOS ROTURA SOPORTE

Fecha Amasado:	30/06/2014
Fecha Rotura:	28/07/2014
Días:	28




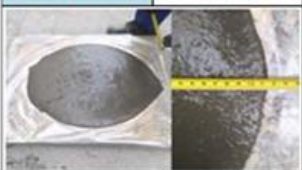

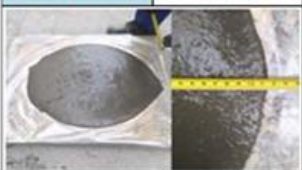

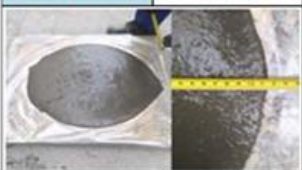
AXIL APLICADO (N):		
v	b (m)	h (m)
0.20	0.15	0.26
N Teórico (kN):	953.58	
N Aplicado (kN):	961.38	
N Real Medido (kN):	965.94	

OBSERVACIONES:
PROBETAS COMPRESIÓN

Probeta	f _c (MPa)	E _c (MPa)	f _{cm} (MPa)		
Cilíndrica 1	113.43	MPa	Cúbica 1	141.33	MPa
Cilíndrica 2	122.88	MPa	Cúbica 2	147.00	MPa
Cilíndrica 3	130.45	MPa	Cúbica 3	145.76	MPa
E _c	43891.00	MPa	Cúbica 4	145.96	MPa
f _{cm_cilíndrica}	122.25	MPa	f _{cm_cúbica}	145.01	MPa

PROBETAS FLEXOTRACCIÓN

	Prismática 1		Prismática 2		
f _{R,LOP}	8.77	MPa	f _{R,LOP}	8.07	MPa
f _{R,1}	16.77	MPa	f _{R,1}	17.13	MPa
f _{R,2}	17.44	MPa	f _{R,2}	18.55	MPa
f _{R,3}	7.84	MPa	f _{R,3}	10.45	MPa
f _{R,4}	4.21	MPa	f _{R,4}	5.24	MPa

	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE SOPORTES DE HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES SOMETIDOS A COMPRESIÓN Y CARGA LATERAL CÍCLICA																																																
	ELEMENTO Nº: AS11-6																																																
ARMADURA PASIVA: LOTE Nº 2																																																	
HORMIGÓN																																																	
<table border="1"> <thead> <tr> <th>fc nominal:</th> <th>Fecha</th> <th>Tipo Fibra</th> <th>% Fibra</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>130 Mpa</td> <td>02/07/2014</td> <td>LARGAS</td> <td>2%</td> </tr> </tbody> </table>	fc nominal:	Fecha	Tipo Fibra	% Fibra	130 Mpa	02/07/2014	LARGAS	2%																																									
fc nominal:	Fecha	Tipo Fibra	% Fibra																																														
130 Mpa	02/07/2014	LARGAS	2%																																														
DOSIFICACIÓN PREVISTA (kg) con cemento y arenas (ensacados)		<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>AMASADA 1</th> <th>AMASADA 2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Componentes:</td> <td>Volúmen (m³): 1</td> <td></td> </tr> <tr> <td>CEM 42.5 R-SR</td> <td>1000.00</td> <td>105.00</td> </tr> <tr> <td>Agua</td> <td>184.00</td> <td>19.32</td> </tr> <tr> <td>Humo de Sílice 940 D</td> <td>150.00</td> <td>15.75</td> </tr> <tr> <td>Arena silíceas (AF-T-0/4-S)</td> <td>310.00</td> <td>32.55</td> </tr> <tr> <td>Arena silíceas (AF-T-0/8-S)</td> <td>575.00</td> <td>60.38</td> </tr> <tr> <td>Sika 20 HE</td> <td>28.50</td> <td>2.99</td> </tr> <tr> <td>Fibras cortas (Straight) 13/0.5</td> <td>0.00</td> <td>0.00</td> </tr> <tr> <td>Fibras largas (Hook End) 80/30</td> <td>150.00</td> <td>15.75</td> </tr> </tbody> </table>		AMASADA 1	AMASADA 2	Componentes:	Volúmen (m ³): 1		CEM 42.5 R-SR	1000.00	105.00	Agua	184.00	19.32	Humo de Sílice 940 D	150.00	15.75	Arena silíceas (AF-T-0/4-S)	310.00	32.55	Arena silíceas (AF-T-0/8-S)	575.00	60.38	Sika 20 HE	28.50	2.99	Fibras cortas (Straight) 13/0.5	0.00	0.00	Fibras largas (Hook End) 80/30	150.00	15.75																	
	AMASADA 1	AMASADA 2																																															
Componentes:	Volúmen (m ³): 1																																																
CEM 42.5 R-SR	1000.00	105.00																																															
Agua	184.00	19.32																																															
Humo de Sílice 940 D	150.00	15.75																																															
Arena silíceas (AF-T-0/4-S)	310.00	32.55																																															
Arena silíceas (AF-T-0/8-S)	575.00	60.38																																															
Sika 20 HE	28.50	2.99																																															
Fibras cortas (Straight) 13/0.5	0.00	0.00																																															
Fibras largas (Hook End) 80/30	150.00	15.75																																															
		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Amasada</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Slump Flow</td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">  </td> </tr> <tr> <th>Amasada</th> <th></th> </tr> <tr> <td>2</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Slump Flow</td> <td>71.5 cm</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">  </td> </tr> </tbody> </table>		Amasada		1		Slump Flow				Amasada		2		Slump Flow	71.5 cm																																
Amasada																																																	
1																																																	
Slump Flow																																																	
																																																	
Amasada																																																	
2																																																	
Slump Flow	71.5 cm																																																
																																																	
OBSERVACIONES:																																																	
<p>Se observó a la hora de verter el cemento que se encontraba algo meteorizado.</p>																																																	
DATOS PREVIOS ROTURA SOPORTE																																																	
<table border="1"> <tbody> <tr> <td>Fecha Amasado:</td> <td>02/07/2014</td> </tr> <tr> <td>Fecha Rotura:</td> <td>30/07/2014</td> </tr> <tr> <td>Días:</td> <td>28</td> </tr> </tbody> </table>		Fecha Amasado:	02/07/2014	Fecha Rotura:	30/07/2014	Días:	28	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">PROBETAS COMPRESIÓN</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Cilíndrica 1</td> <td>124.00 MPa</td> <td>Cúbica 1</td> <td>136.37 MPa</td> </tr> <tr> <td>Cilíndrica 2</td> <td>119.26 MPa</td> <td>Cúbica 2</td> <td>143.57 MPa</td> </tr> <tr> <td>Cilíndrica 3</td> <td>110.98 MPa</td> <td>Cúbica 3</td> <td>137.58 MPa</td> </tr> <tr> <td>E</td> <td>45170.00 MPa</td> <td>Cúbica 4</td> <td>146.13 MPa</td> </tr> <tr> <td>f_{cm_cilíndrica}</td> <td>118.08 MPa</td> <td>f_{cm_cúbica}</td> <td>140.91 MPa</td> </tr> </tbody> </table>		PROBETAS COMPRESIÓN				Cilíndrica 1	124.00 MPa	Cúbica 1	136.37 MPa	Cilíndrica 2	119.26 MPa	Cúbica 2	143.57 MPa	Cilíndrica 3	110.98 MPa	Cúbica 3	137.58 MPa	E	45170.00 MPa	Cúbica 4	146.13 MPa	f _{cm_cilíndrica}	118.08 MPa	f _{cm_cúbica}	140.91 MPa																
Fecha Amasado:	02/07/2014																																																
Fecha Rotura:	30/07/2014																																																
Días:	28																																																
PROBETAS COMPRESIÓN																																																	
Cilíndrica 1	124.00 MPa	Cúbica 1	136.37 MPa																																														
Cilíndrica 2	119.26 MPa	Cúbica 2	143.57 MPa																																														
Cilíndrica 3	110.98 MPa	Cúbica 3	137.58 MPa																																														
E	45170.00 MPa	Cúbica 4	146.13 MPa																																														
f _{cm_cilíndrica}	118.08 MPa	f _{cm_cúbica}	140.91 MPa																																														
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">AXIL APLICADO (N):</th> </tr> <tr> <th>v</th> <th>b (m)</th> <th>h (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.20</td> <td>0.15</td> <td>0.26</td> </tr> <tr> <td>N Teórico (kN):</td> <td colspan="2">948.71</td> </tr> <tr> <td>N Aplicado (kN):</td> <td colspan="2">961.38</td> </tr> <tr> <td>N Real Medido (kN):</td> <td colspan="2">957.88</td> </tr> </tbody> </table>		AXIL APLICADO (N):			v	b (m)	h (m)	0.20	0.15	0.26	N Teórico (kN):	948.71		N Aplicado (kN):	961.38		N Real Medido (kN):	957.88		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">PROBETAS FLEXOTRACCIÓN</th> </tr> <tr> <th colspan="2">Prismática 1</th> <th colspan="2">Prismática 2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>f_{R,LOP}</td> <td>8.69 MPa</td> <td>f_{R,LOP}</td> <td>9.53 MPa</td> </tr> <tr> <td>f_{R,1}</td> <td>17.20 MPa</td> <td>f_{R,1}</td> <td>20.37 MPa</td> </tr> <tr> <td>f_{R,2}</td> <td>18.91 MPa</td> <td>f_{R,2}</td> <td>21.80 MPa</td> </tr> <tr> <td>f_{R,3}</td> <td>17.80 MPa</td> <td>f_{R,3}</td> <td>11.11 MPa</td> </tr> <tr> <td>f_{R,4}</td> <td>7.95 MPa</td> <td>f_{R,4}</td> <td>6.30 MPa</td> </tr> </tbody> </table>		PROBETAS FLEXOTRACCIÓN				Prismática 1		Prismática 2		f _{R,LOP}	8.69 MPa	f _{R,LOP}	9.53 MPa	f _{R,1}	17.20 MPa	f _{R,1}	20.37 MPa	f _{R,2}	18.91 MPa	f _{R,2}	21.80 MPa	f _{R,3}	17.80 MPa	f _{R,3}	11.11 MPa	f _{R,4}	7.95 MPa	f _{R,4}	6.30 MPa
AXIL APLICADO (N):																																																	
v	b (m)	h (m)																																															
0.20	0.15	0.26																																															
N Teórico (kN):	948.71																																																
N Aplicado (kN):	961.38																																																
N Real Medido (kN):	957.88																																																
PROBETAS FLEXOTRACCIÓN																																																	
Prismática 1		Prismática 2																																															
f _{R,LOP}	8.69 MPa	f _{R,LOP}	9.53 MPa																																														
f _{R,1}	17.20 MPa	f _{R,1}	20.37 MPa																																														
f _{R,2}	18.91 MPa	f _{R,2}	21.80 MPa																																														
f _{R,3}	17.80 MPa	f _{R,3}	11.11 MPa																																														
f _{R,4}	7.95 MPa	f _{R,4}	6.30 MPa																																														
OBSERVACIONES:																																																	

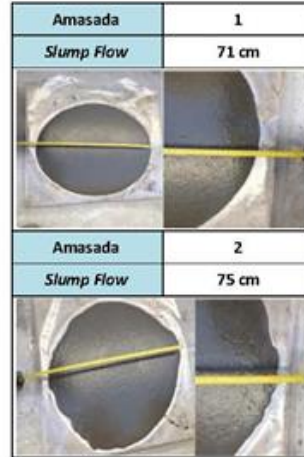


ELEMENTO Nº: AS11-7

ARMADURA PASIVA: LOTE Nº 2

HORMIGÓN

fc nominal:	Fecha	Tipo Fibra	% Fibra
130 Mpa	02/09/2014	MIXTAS	1%
DOSIFICACIÓN PREVISTA (kg) con cemento y arenas (ensacados)		AMASADA 1	AMASADA 2
Componentes:	Volúmen (m ³):	1	0.105
CEM 42.5 R-SR	1000.00	105.00	105.00
Agua	165.00	17.33	17.33
Humo de Sílice 940 D	150.00	15.75	15.75
Arena sílicea (AF-T-0/4-S)	310.00	32.55	32.55
Arena sílicea (AF-T-0/8-S)	575.00	60.38	60.38
Sika 20 HE	28.50	2.99	2.99
Fibras cortas (Straight) 13/0.5	45.00	4.73	4.73
Fibras largas (Hook End) 80/30	30.00	3.15	3.15



OBSERVACIONES:

Falto material para completar las dos amasadas. Se opta por no hacer dos probetas cúbicas y una cilíndrica.

DATOS PREVIOS ROTURA SOPORTE

Fecha Amasado:	02/09/2014
Fecha Rotura:	30/09/2014
Días:	28



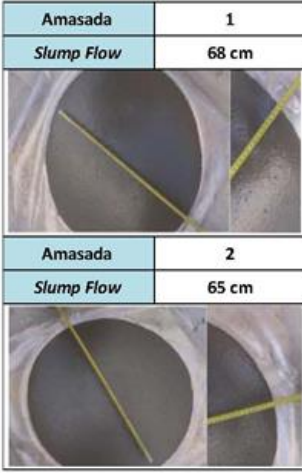
AXIL APLICADO (N):		
v	b (m)	h (m)
0.20	0.15	0.26
N Teórico (kN):	993.45	
N Aplicado (kN):	1000.62	
N Real Medido (kN):	1001.61	




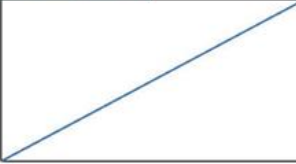

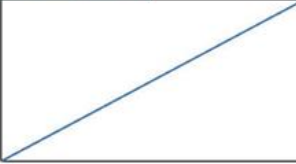

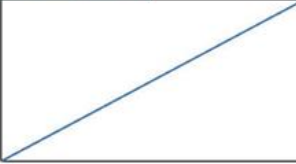
PROBETAS COMPRESIÓN					
Cilíndrica 1	127.70	MPa	Cúbica 1	146.80	MPa
Cilíndrica 2	127.03	MPa	Cúbica 2	147.83	MPa
Cilíndrica 3	-	MPa	Cúbica 3	-	MPa
E	45170.00	MPa	Cúbica 4	-	MPa
f _{cm,cilíndrica}	127.37	MPa	f _{cm,cúbica}	147.32	MPa





PROBETAS FLEXOTRACCIÓN					
Prismática 1			Prismática 2		
f _{R,LOP}	7.24	MPa	f _{R,LOP}	7.79	MPa
f _{R,1}	10.63	MPa	f _{R,1}	12.22	MPa
f _{R,2}	6.90	MPa	f _{R,2}	5.45	MPa
f _{R,3}	3.65	MPa	f _{R,3}	2.10	MPa
f _{R,4}	2.40	MPa	f _{R,4}	-	MPa



OBSERVACIONES:


Sólo hay dos probetas cilíndricas, dos cúbicas y dos prismáticas. Durante la rotura de la 2ª probeta cúbica se observa una curva muy rara.


	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE SOPORTES DE HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES SOMETIDOS A COMPRESIÓN Y CARGA LATERAL CÍCLICA		 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA																																																									
	ELEMENTO Nº: AS11-8																																																											
ARMADURA PASIVA:		LOTE Nº 2																																																										
HORMIGÓN																																																												
<table border="1"> <thead> <tr> <th>fc nominal:</th> <th>Fecha</th> <th>Tipo Fibra</th> <th>% Fibra</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>130 Mpa</td> <td>04/09/2014</td> <td>MIXTAS</td> <td>1%</td> </tr> </tbody> </table>	fc nominal:	Fecha	Tipo Fibra	% Fibra	130 Mpa	04/09/2014	MIXTAS	1%	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">DOSIFICACIÓN PREVISTA (kg) con cemento y arenas (ensacados)</th> </tr> <tr> <th>Componentes:</th> <th>Volúmen (m³):</th> <th>1</th> <th>AMASADA 1</th> <th>AMASADA 2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>CEM 42.5 R-SR</td> <td>1000.00</td> <td>108.00</td> <td>108.00</td> <td>108.00</td> </tr> <tr> <td>Agua</td> <td>165.00</td> <td>17.82</td> <td>17.07</td> <td>17.07</td> </tr> <tr> <td>Humo de Sílice 940 D</td> <td>150.00</td> <td>16.20</td> <td>16.20</td> <td>16.20</td> </tr> <tr> <td>Arena sílicea (AF-T-0/4-S)</td> <td>310.00</td> <td>33.48</td> <td>33.48</td> <td>33.48</td> </tr> <tr> <td>Arena sílicea (AF-T-0/8-S)</td> <td>575.00</td> <td>62.10</td> <td>62.10</td> <td>62.10</td> </tr> <tr> <td>Sika 20 HE</td> <td>28.50</td> <td>3.08</td> <td>3.08</td> <td>3.08</td> </tr> <tr> <td>Fibras cortas (Straight) 13/0.5</td> <td>45.00</td> <td>4.86</td> <td>4.86</td> <td>4.86</td> </tr> <tr> <td>Fibras largas (Hook End) 80/30</td> <td>30.00</td> <td>3.24</td> <td>3.24</td> <td>3.24</td> </tr> </tbody> </table>			DOSIFICACIÓN PREVISTA (kg) con cemento y arenas (ensacados)				Componentes:	Volúmen (m ³):	1	AMASADA 1	AMASADA 2	CEM 42.5 R-SR	1000.00	108.00	108.00	108.00	Agua	165.00	17.82	17.07	17.07	Humo de Sílice 940 D	150.00	16.20	16.20	16.20	Arena sílicea (AF-T-0/4-S)	310.00	33.48	33.48	33.48	Arena sílicea (AF-T-0/8-S)	575.00	62.10	62.10	62.10	Sika 20 HE	28.50	3.08	3.08	3.08	Fibras cortas (Straight) 13/0.5	45.00	4.86	4.86	4.86	Fibras largas (Hook End) 80/30	30.00	3.24	3.24	3.24
fc nominal:	Fecha	Tipo Fibra	% Fibra																																																									
130 Mpa	04/09/2014	MIXTAS	1%																																																									
DOSIFICACIÓN PREVISTA (kg) con cemento y arenas (ensacados)																																																												
Componentes:	Volúmen (m ³):	1	AMASADA 1	AMASADA 2																																																								
CEM 42.5 R-SR	1000.00	108.00	108.00	108.00																																																								
Agua	165.00	17.82	17.07	17.07																																																								
Humo de Sílice 940 D	150.00	16.20	16.20	16.20																																																								
Arena sílicea (AF-T-0/4-S)	310.00	33.48	33.48	33.48																																																								
Arena sílicea (AF-T-0/8-S)	575.00	62.10	62.10	62.10																																																								
Sika 20 HE	28.50	3.08	3.08	3.08																																																								
Fibras cortas (Straight) 13/0.5	45.00	4.86	4.86	4.86																																																								
Fibras largas (Hook End) 80/30	30.00	3.24	3.24	3.24																																																								
OBSERVACIONES:																																																												
<p>Primera amasada muy fluida, se quita agua (-0.75 kg) para la segunda amasada y sale mejor. Sigue siendo escaso el hormigón, se quedó una probeta cilíndrica sin terminar de llenar</p>																																																												
DATOS PREVIOS ROTURA SOPORTE																																																												
<table border="1"> <tbody> <tr> <td>Fecha Amasado:</td> <td>04/09/2014</td> </tr> <tr> <td>Fecha Rotura:</td> <td>02/10/2014</td> </tr> <tr> <td>Días:</td> <td>28</td> </tr> </tbody> </table>		Fecha Amasado:	04/09/2014	Fecha Rotura:	02/10/2014	Días:	28	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">PROBETAS COMPRESIÓN</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Cilíndrica 1</td> <td>133.56</td> <td>MPa</td> <td>Cúbica 1</td> <td>140.66</td> <td>MPa</td> </tr> <tr> <td>Cilíndrica 2</td> <td>127.64</td> <td>MPa</td> <td>Cúbica 2</td> <td>159.28</td> <td>MPa</td> </tr> <tr> <td>Cilíndrica 3</td> <td>-</td> <td>MPa</td> <td>Cúbica 3</td> <td>160.66</td> <td>MPa</td> </tr> <tr> <td>E_c</td> <td>47486.00</td> <td>MPa</td> <td>Cúbica 4</td> <td>148.68</td> <td>MPa</td> </tr> <tr> <td>f_{cm_cilíndrica}</td> <td>130.60</td> <td>MPa</td> <td>f_{cm_cúbica}</td> <td>152.32</td> <td>MPa</td> </tr> </tbody> </table>		PROBETAS COMPRESIÓN				Cilíndrica 1	133.56	MPa	Cúbica 1	140.66	MPa	Cilíndrica 2	127.64	MPa	Cúbica 2	159.28	MPa	Cilíndrica 3	-	MPa	Cúbica 3	160.66	MPa	E _c	47486.00	MPa	Cúbica 4	148.68	MPa	f _{cm_cilíndrica}	130.60	MPa	f _{cm_cúbica}	152.32	MPa																	
Fecha Amasado:	04/09/2014																																																											
Fecha Rotura:	02/10/2014																																																											
Días:	28																																																											
PROBETAS COMPRESIÓN																																																												
Cilíndrica 1	133.56	MPa	Cúbica 1	140.66	MPa																																																							
Cilíndrica 2	127.64	MPa	Cúbica 2	159.28	MPa																																																							
Cilíndrica 3	-	MPa	Cúbica 3	160.66	MPa																																																							
E _c	47486.00	MPa	Cúbica 4	148.68	MPa																																																							
f _{cm_cilíndrica}	130.60	MPa	f _{cm_cúbica}	152.32	MPa																																																							
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">AXIL APLICADO (N):</th> </tr> <tr> <th>v</th> <th>b (m)</th> <th>h (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.20</td> <td>0.15</td> <td>0.26</td> </tr> <tr> <td>N Teórico (kN):</td> <td colspan="2">1018.68</td> </tr> <tr> <td>N Aplicado (kN):</td> <td colspan="2">1020.24</td> </tr> <tr> <td>N Real Medido (kN):</td> <td colspan="2">1024.80</td> </tr> </tbody> </table>		AXIL APLICADO (N):			v	b (m)	h (m)	0.20	0.15	0.26	N Teórico (kN):	1018.68		N Aplicado (kN):	1020.24		N Real Medido (kN):	1024.80		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">PROBETAS FLEXOTRACCIÓN</th> </tr> <tr> <th colspan="2">Prismática 1</th> <th colspan="2">Prismática 2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>f_{R,LOP}</td> <td>7.34</td> <td>MPa</td> <td>f_{R,LOP}</td> <td>7.21</td> <td>MPa</td> </tr> <tr> <td>f_{R,1}</td> <td>13.76</td> <td>MPa</td> <td>f_{R,1}</td> <td>11.12</td> <td>MPa</td> </tr> <tr> <td>f_{R,2}</td> <td>7.80</td> <td>MPa</td> <td>f_{R,2}</td> <td>5.05</td> <td>MPa</td> </tr> <tr> <td>f_{R,3}</td> <td>4.35</td> <td>MPa</td> <td>f_{R,3}</td> <td>2.65</td> <td>MPa</td> </tr> <tr> <td>f_{R,4}</td> <td>3.11</td> <td>MPa</td> <td>f_{R,4}</td> <td>-</td> <td>MPa</td> </tr> </tbody> </table>		PROBETAS FLEXOTRACCIÓN				Prismática 1		Prismática 2		f _{R,LOP}	7.34	MPa	f _{R,LOP}	7.21	MPa	f _{R,1}	13.76	MPa	f _{R,1}	11.12	MPa	f _{R,2}	7.80	MPa	f _{R,2}	5.05	MPa	f _{R,3}	4.35	MPa	f _{R,3}	2.65	MPa	f _{R,4}	3.11	MPa	f _{R,4}	-	MPa	
AXIL APLICADO (N):																																																												
v	b (m)	h (m)																																																										
0.20	0.15	0.26																																																										
N Teórico (kN):	1018.68																																																											
N Aplicado (kN):	1020.24																																																											
N Real Medido (kN):	1024.80																																																											
PROBETAS FLEXOTRACCIÓN																																																												
Prismática 1		Prismática 2																																																										
f _{R,LOP}	7.34	MPa	f _{R,LOP}	7.21	MPa																																																							
f _{R,1}	13.76	MPa	f _{R,1}	11.12	MPa																																																							
f _{R,2}	7.80	MPa	f _{R,2}	5.05	MPa																																																							
f _{R,3}	4.35	MPa	f _{R,3}	2.65	MPa																																																							
f _{R,4}	3.11	MPa	f _{R,4}	-	MPa																																																							
OBSERVACIONES:																																																												
<p>Faltó hormigón para una probeta cilíndrica, por eso sólo disponemos de dos resultados.</p>																																																												

		ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE SOPORTES DE HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES SOMETIDOS A COMPRESIÓN Y CARGA LATERAL CÍCLICA		 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA																																																																															
ELEMENTO Nº:		AS11-9																																																																																	
ARMADURA PASIVA:		LOTE Nº 2																																																																																	
HORMIGÓN																																																																																			
fc nominal:	Fecha	Tipo Fibra	% Fibra																																																																																
130 Mpa	09/09/2014	MIXTAS	1%																																																																																
DOSIFICACIÓN PREVISTA (kg) con cemento y arenas (ensacados)		AMASADA 1	AMASADA 2																																																																																
Componentes:	Volúmen (m³):	1	0.108	0.108																																																																															
CEM 42.5 R-SR	1000.00	108.00	108.00																																																																																
Agua	165.00	17.82	17.07																																																																																
Humo de Sílice 940 D	150.00	16.20	16.20																																																																																
Arena sílicea (AF-T-0/4-S)	310.00	33.48	33.48																																																																																
Arena sílicea (AF-T-0/8-S)	575.00	62.10	62.10																																																																																
Sika 20 HE	28.50	3.08	3.08																																																																																
Fibras cortas (Straight) 13/0.5	45.00	4.86	4.86																																																																																
Fibras largas (Hook End) 80/30	30.00	3.24	3.24																																																																																
OBSERVACIONES:		<table border="1"> <tr> <td>Amasada</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Slump Flow</td> <td>69 cm</td> </tr> <tr> <td colspan="2">  </td> </tr> <tr> <td>Amasada</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>Slump Flow</td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="2">  </td> </tr> </table>				Amasada	1	Slump Flow	69 cm			Amasada	2	Slump Flow																																																																					
Amasada	1																																																																																		
Slump Flow	69 cm																																																																																		
																																																																																			
Amasada	2																																																																																		
Slump Flow																																																																																			
																																																																																			
OBSERVACIONES:		Segunda amasada se quita agua (-0.75 kg).																																																																																	
DATOS PREVIOS ROTURA SOPORTE		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="6">PROBETAS COMPRESIÓN</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Cilíndrica 1</td> <td>137.21</td> <td>MPa</td> <td>Cúbica 1</td> <td>149.20</td> <td>MPa</td> </tr> <tr> <td>Cilíndrica 2</td> <td>137.04</td> <td>MPa</td> <td>Cúbica 2</td> <td>147.74</td> <td>MPa</td> </tr> <tr> <td>Cilíndrica 3</td> <td>129.87</td> <td>MPa</td> <td>Cúbica 3</td> <td>145.65</td> <td>MPa</td> </tr> <tr> <td>E_c</td> <td>31097.00</td> <td>MPa</td> <td>Cúbica 4</td> <td>132.99</td> <td>MPa</td> </tr> <tr> <td>f_{cm_cilíndrica}</td> <td>134.71</td> <td>MPa</td> <td>f_{cm_cúbica}</td> <td>143.90</td> <td>MPa</td> </tr> <tr> <th colspan="6">PROBETAS FLEXOTRACCIÓN</th> </tr> <tr> <th colspan="3">Prismática 1</th> <th colspan="3">Prismática 2</th> </tr> <tr> <td>f_{R,LOP}</td> <td>7.21</td> <td>MPa</td> <td>f_{R,LOP}</td> <td>-</td> <td>MPa</td> </tr> <tr> <td>f_{R,1}</td> <td>13.56</td> <td>MPa</td> <td>f_{R,1}</td> <td>-</td> <td>MPa</td> </tr> <tr> <td>f_{R,2}</td> <td>6.70</td> <td>MPa</td> <td>f_{R,2}</td> <td>-</td> <td>MPa</td> </tr> <tr> <td>f_{R,3}</td> <td>3.35</td> <td>MPa</td> <td>f_{R,3}</td> <td>-</td> <td>MPa</td> </tr> <tr> <td>f_{R,4}</td> <td>-</td> <td>MPa</td> <td>f_{R,4}</td> <td>-</td> <td>MPa</td> </tr> </tbody> </table>				PROBETAS COMPRESIÓN						Cilíndrica 1	137.21	MPa	Cúbica 1	149.20	MPa	Cilíndrica 2	137.04	MPa	Cúbica 2	147.74	MPa	Cilíndrica 3	129.87	MPa	Cúbica 3	145.65	MPa	E _c	31097.00	MPa	Cúbica 4	132.99	MPa	f _{cm_cilíndrica}	134.71	MPa	f _{cm_cúbica}	143.90	MPa	PROBETAS FLEXOTRACCIÓN						Prismática 1			Prismática 2			f _{R,LOP}	7.21	MPa	f _{R,LOP}	-	MPa	f _{R,1}	13.56	MPa	f _{R,1}	-	MPa	f _{R,2}	6.70	MPa	f _{R,2}	-	MPa	f _{R,3}	3.35	MPa	f _{R,3}	-	MPa	f _{R,4}	-	MPa	f _{R,4}	-	MPa
PROBETAS COMPRESIÓN																																																																																			
Cilíndrica 1	137.21	MPa	Cúbica 1	149.20	MPa																																																																														
Cilíndrica 2	137.04	MPa	Cúbica 2	147.74	MPa																																																																														
Cilíndrica 3	129.87	MPa	Cúbica 3	145.65	MPa																																																																														
E _c	31097.00	MPa	Cúbica 4	132.99	MPa																																																																														
f _{cm_cilíndrica}	134.71	MPa	f _{cm_cúbica}	143.90	MPa																																																																														
PROBETAS FLEXOTRACCIÓN																																																																																			
Prismática 1			Prismática 2																																																																																
f _{R,LOP}	7.21	MPa	f _{R,LOP}	-	MPa																																																																														
f _{R,1}	13.56	MPa	f _{R,1}	-	MPa																																																																														
f _{R,2}	6.70	MPa	f _{R,2}	-	MPa																																																																														
f _{R,3}	3.35	MPa	f _{R,3}	-	MPa																																																																														
f _{R,4}	-	MPa	f _{R,4}	-	MPa																																																																														
Fecha Amasado:	09/09/2014																																																																																		
Fecha Rotura:	07/10/2014																																																																																		
Días:	28																																																																																		
AXIL APLICADO (N):																																																																																			
v	b (m)	h (m)																																																																																	
0.20	0.15	0.26																																																																																	
N Teórico (kN):	1050.71																																																																																		
N Aplicado (kN):	1059.48																																																																																		
N Real Medido (kN):	1062.08																																																																																		
OBSERVACIONES:																																																																																			
El Ec de compresión simple sale un valor muy raro.																																																																																			
No existen resultados de la segunda probeta prismática.																																																																																			

		ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE SOPORTES DE HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES SOMETIDOS A COMPRESIÓN Y CARGA LATERAL CÍCLICA			
ELEMENTO Nº:		AS21-10			
ARMADURA PASIVA:		LOTE Nº 2			
HORMIGÓN					
fc nominal:	Fecha	Tipo Fibra	% Fibra		
130 Mpa	16/09/2014	MIXTAS	2%		
DOSIFICACIÓN PREVISTA (kg) con cemento y arenas (ensacados)		AMASADA 1	AMASADA 2		
Componentes:	Volúmen (m³):	1	0.100	0.085	
CEM 42.5 R-SR	1000.00	100.00	85.00		
Agua	184.00	18.40	14.94		
Humo de Sílice 940 D	150.00	15.00	12.75		
Arena silícea (AF-T-0/4-S)	310.00	31.00	26.35		
Arena silícea (AF-T-0/8-S)	575.00	57.50	48.88		
Sika 20 HE	28.50	2.85	2.42		
Fibras cortas (Straight) 13/0.5	90.00	9.00	7.65		
Fibras largas (Hook End) 80/30	60.00	6.00	5.10		
Amasada		1			
Slump Flow		71 cm			
					
Amasada		2			
Slump Flow		75.5 cm			
					
OBSERVACIONES:					
Amasada 2: se corrige agua quitando al agua de la 1ª amasada 0.7 kg. Además, faltó hormigón para una probeta cilíndrica entera.					
Se decide fabricar una probeta cilíndrica con material sobrante de la primera amasada, se marca adecuadamente para tenerla identificada.					
DATOS PREVIOS ROTURA SOPORTE					
Fecha Amasado:	16/09/2014				
Fecha Rotura:	14/10/2014				
Días:	28				
AXIL APLICADO (N):					
v	b (m)	h (m)			
0.20	0.15	0.2			
N Teórico (kN):	888.39				
N Aplicado (kN):	892.71				
N Real Medido (kN):	901.80				
OBSERVACIONES:					
A la vista de los resultados, se descarta el valor de la probeta cilíndrica rellena con material sobrante.					
PROBETAS COMPRESIÓN					
Cilíndrica 1	149.36	MPa	Cúbica 1	154.77	MPa
Cilíndrica 2	146.77	MPa	Cúbica 2	145.44	MPa
Cilíndrica 3	110.48	MPa	Cúbica 3	148.61	MPa
E	49084.00	MPa	Cúbica 4	153.57	MPa
f_{cm_cilíndrica}	148.07	MPa	f_{cm_cúbica}	150.60	MPa
PROBETAS FLEXOTRACCIÓN					
Prismática 1			Prismática 2		
f_{R,LOP}	8.11	MPa	f_{R,LOP}	10.87	MPa
f_{R,1}	13.97	MPa	f_{R,1}	19.98	MPa
f_{R,2}	9.10	MPa	f_{R,2}	10.13	MPa
f_{R,3}	3.65	MPa	f_{R,3}	5.04	MPa
f_{R,4}	-	MPa	f_{R,4}	-	MPa

	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE SOPORTES DE HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES SOMETIDOS A COMPRESIÓN Y CARGA LATERAL CÍCLICA		
ELEMENTO Nº: AS31-11			
ARMADURA PASIVA:		LOTE Nº 2	
HORMIGÓN			
fc nominal:	Fecha	Tipo Fibra	% Fibra
130 Mpa	17/10/2014	MIXTAS	2%
DOSIFICACIÓN PREVISTA (kg) con cemento y arenas (ensacados)		AMASADA 1	AMASADA 2
Componentes:	Volúmen (m ³):	1	0.055
CEM 42.5 R-SR	1000.00	105.00	55.00
Agua	173.00	18.17	9.17
Humo de Sílice 940 D	150.00	15.75	8.25
Arena sílice (AF-T-0/4-S)	310.00	32.55	17.05
Arena sílice (AF-T-0/8-S)	575.00	60.38	31.63
Sika 20 HE	28.50	2.99	1.57
Fibras cortas (Straight) 13/0.5	90.00	9.45	4.95
Fibras largas (Hook End) 80/30	60.00	6.30	3.30

Amasada	1
Slump Flow	71.5 cm
	

Amasada	2
Slump Flow	70 cm
	

OBSERVACIONES:

Con respecto a la dosificación inicial (Junio 2014) se corrige la humedad por el cambio en la temperatura ambiente.

Amasada 2: se corrige agua quitando al agua de la 1ª amasada 0.35 kg.

DATOS PREVIOS ROTURA SOPORTE		
Fecha Amasado:	17/10/2014	
Fecha Rotura:	14/11/2014	
Días:	28	
AXIL APUCADO (N):		
v	b (m)	h (m)
0.20	0.15	0.14
N Teórico (kN):	541.59	
N Aplicado (kN):	549.36	
N Real Medido (kN):	551.07	

PROBETAS COMPRESIÓN					
Cilíndrica 1	130.48	MPa	Cúbica 1	160.54	MPa
Cilíndrica 2	129.76	MPa	Cúbica 2	161.70	MPa
Cilíndrica 3	126.61	MPa	Cúbica 3	159.08	MPa
E	43914.00	MPa	Cúbica 4	157.05	MPa
f _{cm,cilíndrica}	128.95	MPa	f _{cm,cúbica}	159.59	MPa

PROBETAS FLEXOTRACCIÓN					
Prismática 1		Prismática 2			
f _{R,LOP}	7.85	MPa	f _{R,LOP}	8.37	MPa
f _{R,1}	13.52	MPa	f _{R,1}	16.98	MPa
f _{R,2}	7.65	MPa	f _{R,2}	10.78	MPa
f _{R,3}	3.84	MPa	f _{R,3}	4.81	MPa
f _{R,4}	-	MPa	f _{R,4}	-	MPa

OBSERVACIONES:



ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE SOPORTES DE HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES SOMETIDOS A COMPRESIÓN Y CARGA LATERAL CÍCLICA

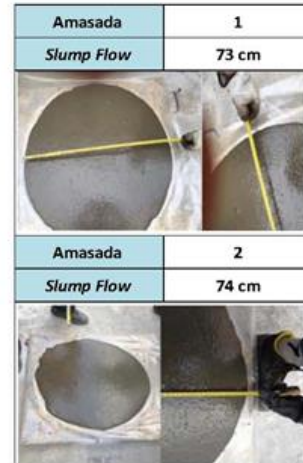


ELEMENTO Nº: AS21-12

ARMADURA PASIVA: LOTE Nº 2

HORMIGÓN

fc nominal:	Fecha	Tipo Fibra	% Fibra
130 Mpa	18/09/2014	MIXTAS	2%
DOSIFICACIÓN PREVISTA (kg) con cemento y arenas (ensacados)		AMASADA 1	AMASADA 2
Componentes:	Volúmen (m ³):	1	
CEM 42.5 R-SR	1000.00	100.00	95.00
Agua	184.00	18.40	16.78
Humo de Sílice 940 D	150.00	15.00	14.25
Arena silícea (AF-T-0/4-S)	310.00	31.00	29.45
Arena silícea (AF-T-0/8-S)	575.00	57.50	54.63
Sika 20 HE	28.50	2.85	2.71
Fibras cortas (Straight) 13/0.5	90.00	9.00	8.55
Fibras largas (Hook End) 80/30	60.00	6.00	5.70



OBSERVACIONES:

Amasada 2: se corrige agua quitando al agua de la 1ª amasada 0.7 kg.

Se fabricó una probeta cilíndrica extra con hormigón de la primera amasada por control de valores.

DATOS PREVIOS ROTURA SOPORTE

Fecha Amasado:	18/09/2014
Fecha Rotura:	17/10/2014
Días:	29

AXIL APLICADO (N):		
v	b (m)	h (m)
0.10	0.15	0.2
N Teórico (kN):	426.83	
N Aplicado (kN):	431.64	
N Real Medido (kN):	433.39	

OBSERVACIONES:

PROBETAS COMPRESIÓN

Probeta	Valor	Unidad	Prob. 2	Valor	Unidad
Cilíndrica 1	140.78	MPa	Cúbica 1	160.46	MPa
Cilíndrica 2	140.02	MPa	Cúbica 2	151.20	MPa
Cilíndrica 3	146.03	MPa	Cúbica 3	159.04	MPa
E.	50882.00	MPa	Cúbica 4	156.75	MPa
f _{cm_cilíndrica}	142.28	MPa	f _{cm_cúbica}	156.86	MPa

PROBETAS FLEXOTRACCIÓN

Prismática 1		Prismática 2	
f _{R,LOP}	7.33 MPa	f _{R,LOP}	7.98 MPa
f _{R,1}	13.20 MPa	f _{R,1}	13.70 MPa
f _{R,2}	7.16 MPa	f _{R,2}	6.74 MPa
f _{R,3}	3.55 MPa	f _{R,3}	3.12 MPa
f _{R,4}	- MPa	f _{R,4}	- MPa

ELEMENTO Nº: AS21-13
ARMADURA PASIVA: LOTE Nº 2
HORMIGÓN

fc nominal:	Fecha	Tipo Fibra	% Fibra
130 Mpa	23/09/2014	MIXTAS	2%
DOSIFICACIÓN PREVISTA (kg) con cemento y arenas (ensacados)		AMASADA 1	AMASADA 2
Componentes:	Volúmen (m ³):	1	0.100
CEM 42.5 R-SR	1000.00	100.00	95.00
Agua	184.00	18.40	16.78
Humo de Sílice 940 D	150.00	15.00	14.25
Arena sílicea (AF-T-0/4-S)	310.00	31.00	29.45
Arena sílicea (AF-T-0/8-S)	575.00	57.50	54.63
Sika 20 HE	28.50	2.85	2.71
Fibras cortas (Straight) 13/0.5	90.00	9.00	8.55
Fibras largas (Hook End) 80/30	60.00	6.00	5.70

Amasada	1
Slump Flow	70 cm



Amasada	2
Slump Flow	81 cm


OBSERVACIONES:

Amasada 2, se corrigió agua quitando al agua de la 1ª amasada 0.7 kg.

DATOS PREVIOS ROTURA SOPORTE

Fecha Amasado:	23/09/2014
Fecha Rotura:	21/10/2014
Días:	28

AXIL APLICADO (N):

v	b (m)	h (m)
0.00	0.15	0.2
N Teórico (kN):	0.00	
N Aplicado (kN):	0.00	
N Real Medido (kN):	0.00	

PROBETAS COMPRESIÓN

Cilíndrica 1	134.97 MPa	Cúbica 1	149.97 MPa
Cilíndrica 2	134.36 MPa	Cúbica 2	150.08 MPa
Cilíndrica 3	132.60 MPa	Cúbica 3	156.86 MPa
E _c	48045.00 MPa	Cúbica 4	131.11 MPa
f _{cm_cilíndrica}	133.98 MPa	f _{cm_cúbica}	147.01 MPa

PROBETAS FLEXOTRACCIÓN

Prismática 1		Prismática 2	
f _{R,LOP}	8.68 MPa	f _{R,LOP}	9.85 MPa
f _{R,1}	14.87 MPa	f _{R,1}	16.30 MPa
f _{R,2}	9.55 MPa	f _{R,2}	10.80 MPa
f _{R,3}	4.78 MPa	f _{R,3}	5.40 MPa
f _{R,4}	3.05 MPa	f _{R,4}	4.02 MPa

OBSERVACIONES:



ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE SOPORTES DE HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES SOMETIDOS A COMPRESIÓN Y CARGA LATERAL CÍCLICA



ELEMENTO Nº: AS23-14

ARMADURA PASIVA: LOTE Nº 2

HORMIGÓN

fc nominal:	Fecha	Tipo Fibra	% Fibra
130 Mpa	25/09/2014	MIXTAS	2%
DOSIFICACIÓN PREVISTA (kg) con cemento y arenas (ensacados)		AMASADA 1	AMASADA 2
Componentes:	Volúmen (m ³):	1	
CEM 42.5 R-SR	1000.00	100.00	95.00
Agua	173.00	17.30	15.74
Humo de Sílice 940 D	150.00	15.00	14.25
Arena silícea (AF-T-0/4-S)	310.00	31.00	29.45
Arena silícea (AF-T-0/8-S)	575.00	57.50	54.63
Sika 20 HE	28.50	2.85	2.71
Fibras cortas (Straight) 13/0.5	90.00	9.00	8.55
Fibras largas (Hook End) 80/30	60.00	6.00	5.70

Amasada	1
Slump Flow	78 cm



Amasada	2
Slump Flow	78 cm



OBSERVACIONES:

Con respecto a la dosificación inicial (Junio 2014) se corrige la humedad por el cambio en la temperatura ambiente.

Amasada 2: se corrige agua quitando al agua de la 1ª amasada 0.7 kg.

DATOS PREVIOS ROTURA SOPORTE



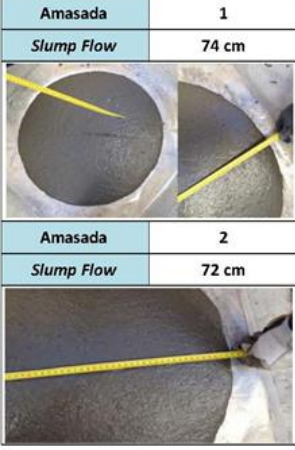
Fecha Amasado:	25/09/2014
Fecha Rotura:	24/10/2014
Días:	29

AXIL APLICADO (N):		
v	b (m)	h (m)
0.20	0.15	0.2
N Teórico (kN):	873.15	
N Aplicado (kN):	873.09	
N Real Medido (kN):	875.92	

PROBETAS COMPRESIÓN					
Cilíndrica 1	147.27	MPa	Cúbica 1	171.90	MPa
Cilíndrica 2	143.78	MPa	Cúbica 2	153.09	MPa
Cilíndrica 3	118.29	MPa	Cúbica 3	160.73	MPa
E	48671.00	MPa	Cúbica 4	165.12	MPa
f _{cm_cilíndrica}	145.53	MPa	f _{cm_cúbica}	162.71	MPa
PROBETAS FLEXOTRACCIÓN					
Prismática 1		Prismática 2			
f _{R,LOP}	7.56	MPa	f _{R,LOP}	7.67	MPa
f _{R,1}	12.59	MPa	f _{R,1}	12.38	MPa
f _{R,2}	10.97	MPa	f _{R,2}	4.98	MPa
f _{R,3}	5.11	MPa	f _{R,3}	-	MPa
f _{R,4}	3.32	MPa	f _{R,4}	-	MPa

OBSERVACIONES:

A la vista de los resultados, se descarta el valor de la 3ª probeta cilíndrica.

	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE SOPORTES DE HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES SOMETIDOS A COMPRESIÓN Y CARGA LATERAL CÍCLICA																																																										
	ELEMENTO Nº: AS24-15																																																										
ARMADURA PASIVA:		LOTE Nº 2																																																									
HORMIGÓN																																																											
<table border="1"> <thead> <tr> <th>fc nominal:</th> <th>Fecha</th> <th>Tipo Fibra</th> <th>% Fibra</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>130 Mpa</td> <td>08/10/2014</td> <td>MIXTAS</td> <td>2%</td> </tr> </tbody> </table>	fc nominal:	Fecha	Tipo Fibra	% Fibra	130 Mpa	08/10/2014	MIXTAS	2%	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">DOSIFICACIÓN PREVISTA (kg) con cemento y arenas (ensacados)</th> <th>AMASADA 1</th> <th>AMASADA 2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Componentes:</td> <td>Volúmen (m³):</td> <td>1</td> <td></td> </tr> <tr> <td>CEM 42.5 R-SR</td> <td>1000.00</td> <td>100.00</td> <td>95.00</td> </tr> <tr> <td>Agua</td> <td>173.00</td> <td>17.30</td> <td>15.74</td> </tr> <tr> <td>Humo de Sílice 940 D</td> <td>150.00</td> <td>15.00</td> <td>14.25</td> </tr> <tr> <td>Arena silicea (AF-T-0/4-S)</td> <td>310.00</td> <td>31.00</td> <td>29.45</td> </tr> <tr> <td>Arena silicea (AF-T-0/8-S)</td> <td>575.00</td> <td>57.50</td> <td>54.63</td> </tr> <tr> <td>Sika 20 HE</td> <td>28.50</td> <td>2.85</td> <td>2.71</td> </tr> <tr> <td>Fibras cortas (Straight) 13/0.5</td> <td>90.00</td> <td>9.00</td> <td>8.55</td> </tr> <tr> <td>Fibras largas (Hook End) 80/30</td> <td>60.00</td> <td>6.00</td> <td>5.70</td> </tr> </tbody> </table>			DOSIFICACIÓN PREVISTA (kg) con cemento y arenas (ensacados)		AMASADA 1	AMASADA 2	Componentes:	Volúmen (m ³):	1		CEM 42.5 R-SR	1000.00	100.00	95.00	Agua	173.00	17.30	15.74	Humo de Sílice 940 D	150.00	15.00	14.25	Arena silicea (AF-T-0/4-S)	310.00	31.00	29.45	Arena silicea (AF-T-0/8-S)	575.00	57.50	54.63	Sika 20 HE	28.50	2.85	2.71	Fibras cortas (Straight) 13/0.5	90.00	9.00	8.55	Fibras largas (Hook End) 80/30	60.00	6.00	5.70								
fc nominal:	Fecha	Tipo Fibra	% Fibra																																																								
130 Mpa	08/10/2014	MIXTAS	2%																																																								
DOSIFICACIÓN PREVISTA (kg) con cemento y arenas (ensacados)		AMASADA 1	AMASADA 2																																																								
Componentes:	Volúmen (m ³):	1																																																									
CEM 42.5 R-SR	1000.00	100.00	95.00																																																								
Agua	173.00	17.30	15.74																																																								
Humo de Sílice 940 D	150.00	15.00	14.25																																																								
Arena silicea (AF-T-0/4-S)	310.00	31.00	29.45																																																								
Arena silicea (AF-T-0/8-S)	575.00	57.50	54.63																																																								
Sika 20 HE	28.50	2.85	2.71																																																								
Fibras cortas (Straight) 13/0.5	90.00	9.00	8.55																																																								
Fibras largas (Hook End) 80/30	60.00	6.00	5.70																																																								
																																																											
OBSERVACIONES: Con respecto a la dosificación inicial (Junio 2014) se corrige la humedad por el cambio en la temperatura ambiente. Amasada 2: se corrige agua quitando al agua de la 1ª amasada 0.7 kg.																																																											
DATOS PREVIOS ROTURA SOPORTE																																																											
<table border="1"> <tr> <td>Fecha Amasado:</td> <td>08/10/2014</td> </tr> <tr> <td>Fecha Rotura:</td> <td>05/11/2014</td> </tr> <tr> <td>Días:</td> <td>28</td> </tr> </table>		Fecha Amasado:	08/10/2014	Fecha Rotura:	05/11/2014	Días:	28	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">PROBETAS COMPRESIÓN</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Cilíndrica 1</td> <td>129.61</td> <td>MPa</td> <td>Cúbica 1</td> <td>148.13</td> <td>MPa</td> </tr> <tr> <td>Cilíndrica 2</td> <td>126.76</td> <td>MPa</td> <td>Cúbica 2</td> <td>129.95</td> <td>MPa</td> </tr> <tr> <td>Cilíndrica 3</td> <td>127.41</td> <td>MPa</td> <td>Cúbica 3</td> <td>154.15</td> <td>MPa</td> </tr> <tr> <td>E_c</td> <td>43501.00</td> <td>MPa</td> <td>Cúbica 4</td> <td>152.52</td> <td>MPa</td> </tr> <tr> <td>f_{cm_cilíndrica}</td> <td>127.93</td> <td>MPa</td> <td>f_{cm_cúbica}</td> <td>146.19</td> <td>MPa</td> </tr> </tbody> </table>		PROBETAS COMPRESIÓN				Cilíndrica 1	129.61	MPa	Cúbica 1	148.13	MPa	Cilíndrica 2	126.76	MPa	Cúbica 2	129.95	MPa	Cilíndrica 3	127.41	MPa	Cúbica 3	154.15	MPa	E _c	43501.00	MPa	Cúbica 4	152.52	MPa	f _{cm_cilíndrica}	127.93	MPa	f _{cm_cúbica}	146.19	MPa																
Fecha Amasado:	08/10/2014																																																										
Fecha Rotura:	05/11/2014																																																										
Días:	28																																																										
PROBETAS COMPRESIÓN																																																											
Cilíndrica 1	129.61	MPa	Cúbica 1	148.13	MPa																																																						
Cilíndrica 2	126.76	MPa	Cúbica 2	129.95	MPa																																																						
Cilíndrica 3	127.41	MPa	Cúbica 3	154.15	MPa																																																						
E _c	43501.00	MPa	Cúbica 4	152.52	MPa																																																						
f _{cm_cilíndrica}	127.93	MPa	f _{cm_cúbica}	146.19	MPa																																																						
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">AXIL APLICADO (N):</th> </tr> <tr> <th>v</th> <th>b (m)</th> <th>h (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.20</td> <td>0.15</td> <td>0.2</td> </tr> <tr> <td>N Teórico (kN):</td> <td colspan="2">767.56</td> </tr> <tr> <td>N Aplicado (kN):</td> <td colspan="2">774.99</td> </tr> <tr> <td>N Real Medido (kN):</td> <td colspan="2">776.90</td> </tr> </tbody> </table>		AXIL APLICADO (N):			v	b (m)	h (m)	0.20	0.15	0.2	N Teórico (kN):	767.56		N Aplicado (kN):	774.99		N Real Medido (kN):	776.90		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">PROBETAS FLEXOTRACCIÓN</th> </tr> <tr> <th colspan="2">Prismática 1</th> <th colspan="2">Prismática 2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>f_{R,LOP}</td> <td>10.35</td> <td>MPa</td> <td>f_{R,LOP}</td> <td>9.42</td> <td>MPa</td> </tr> <tr> <td>f_{R,1}</td> <td>18.83</td> <td>MPa</td> <td>f_{R,1}</td> <td>17.88</td> <td>MPa</td> </tr> <tr> <td>f_{R,2}</td> <td>14.25</td> <td>MPa</td> <td>f_{R,2}</td> <td>16.48</td> <td>MPa</td> </tr> <tr> <td>f_{R,3}</td> <td>6.20</td> <td>MPa</td> <td>f_{R,3}</td> <td>5.90</td> <td>MPa</td> </tr> <tr> <td>f_{R,4}</td> <td>4.01</td> <td>MPa</td> <td>f_{R,4}</td> <td>3.82</td> <td>MPa</td> </tr> </tbody> </table>		PROBETAS FLEXOTRACCIÓN				Prismática 1		Prismática 2		f _{R,LOP}	10.35	MPa	f _{R,LOP}	9.42	MPa	f _{R,1}	18.83	MPa	f _{R,1}	17.88	MPa	f _{R,2}	14.25	MPa	f _{R,2}	16.48	MPa	f _{R,3}	6.20	MPa	f _{R,3}	5.90	MPa	f _{R,4}	4.01	MPa	f _{R,4}	3.82	MPa
AXIL APLICADO (N):																																																											
v	b (m)	h (m)																																																									
0.20	0.15	0.2																																																									
N Teórico (kN):	767.56																																																										
N Aplicado (kN):	774.99																																																										
N Real Medido (kN):	776.90																																																										
PROBETAS FLEXOTRACCIÓN																																																											
Prismática 1		Prismática 2																																																									
f _{R,LOP}	10.35	MPa	f _{R,LOP}	9.42	MPa																																																						
f _{R,1}	18.83	MPa	f _{R,1}	17.88	MPa																																																						
f _{R,2}	14.25	MPa	f _{R,2}	16.48	MPa																																																						
f _{R,3}	6.20	MPa	f _{R,3}	5.90	MPa																																																						
f _{R,4}	4.01	MPa	f _{R,4}	3.82	MPa																																																						
OBSERVACIONES:																																																											



ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE SOPORTES DE HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES SOMETIDOS A COMPRESIÓN Y CARGA LATERAL CÍCLICA



ELEMENTO Nº: AS13-16

ARMADURA PASIVA:

LOTE Nº 2

HORMIGÓN

fc nominal:	Fecha	Tipo Fibra	% Fibra
130 MPa	24/10/2014	MIXTAS	2%
DOSIFICACIÓN PREVISTA (kg) con cemento y arenas (ensacados)		AMASADA 1	AMASADA 2
Componentes:	Volúmen (m ³):	1	0.108
CEM 42.5 R-SR	1000.00	108.00	108.00
Agua	173.00	18.68	17.98
Humo de Sílice 940 D	150.00	16.20	16.20
Arena silicea (AF-T-0/4-S)	310.00	33.48	33.48
Arena silicea (AF-T-0/8-S)	575.00	62.10	62.10
Sika 20 HE	28.50	3.08	3.08
Fibras cortas (Straight) 13/0.5	90.00	9.72	9.72
Fibras largas (Hook End) 80/30	60.00	6.48	6.48

Amasada	1
Slump Flow	71 cm



Amasada	2
Slump Flow	72 cm



OBSERVACIONES:

Con respecto a la dosificación inicial (Junio 2014) se corrige la humedad por el cambio en la temperatura ambiente.

Amasada 2: se corrige agua quitando al agua de la 1ª amasada 0.7 kg.

DATOS PREVIOS ROTURA SOPORTE

Fecha Amasado:	24/10/2014
Fecha Rotura:	21/11/2014
Días:	28

AXIL APLICADO (N):		
v	b (m)	h (m)
0.20	0.15	0.26
N Teórico (kN):	981.19	
N Aplicado (kN):	990.81	
N Real Medido (kN):	996.55	

PROBETAS COMPRESIÓN

Cilíndrica	f _{cm}	MPa	Cúbica	f _{cm}	MPa
Cilíndrica 1	122.90	MPa	Cúbica 1	143.99	MPa
Cilíndrica 2	131.00	MPa	Cúbica 2	152.02	MPa
Cilíndrica 3	123.48	MPa	Cúbica 3	136.18	MPa
E	44309.00	MPa	Cúbica 4	145.90	MPa
f _{cm_cilíndrica}	125.79	MPa	f _{cm_cúbica}	144.52	MPa

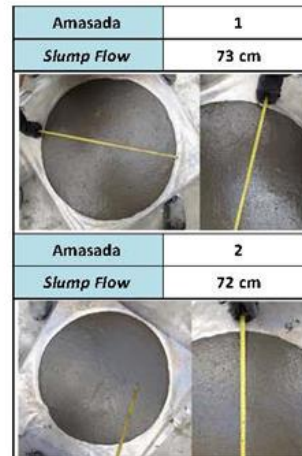
PROBETAS FLEXOTRACCIÓN

Prismática 1		Prismática 2	
f _{R,LOP}	MPa	f _{R,LOP}	MPa
f _{R,1}	11.10	f _{R,1}	10.43
f _{R,2}	19.64	f _{R,2}	18.52
f _{R,3}	13.70	f _{R,3}	13.01
f _{R,4}	6.38	f _{R,4}	6.25
f _{R,5}	4.18	f _{R,5}	4.39

OBSERVACIONES:

ELEMENTO Nº: BS11-17
ARMADURA PASIVA:
LOTE Nº 2
HORMIGÓN

fc nominal:	Fecha	Tipo Fibra	% Fibra
130 Mpa	28/10/2014	MIXTAS	2%
DOSIFICACIÓN PREVISTA (kg) con cemento y arenas (ensacados)		AMASADA 1	AMASADA 2
Componentes:	Volúmen (m ³):	1	0.108
CEM 42.5 R-SR	1000.00	108.00	108.00
Agua	173.00	18.68	17.98
Humo de Sílice 940 D	150.00	16.20	16.20
Arena sílicea (AF-T-0/4-S)	310.00	33.48	33.48
Arena sílicea (AF-T-0/8-S)	575.00	62.10	62.10
Sika 20 HE	28.50	3.08	3.08
Fibras cortas (Straight) 13/0.5	90.00	9.72	9.72
Fibras largas (Hook End) 80/30	60.00	6.48	6.48


OBSERVACIONES:

Con respecto a la dosificación inicial (Junio 2014) se corrige la humedad por el cambio en la temperatura ambiente.

Amasada 2: se corrige agua quitando al agua de la 1ª amasada 0.7 kg.

DATOS PREVIOS ROTURA SOPORTE

Fecha Amasado:	28/10/2014
Fecha Rotura:	25/11/2014
Días:	28

AXIL APLICADO (N):

v	b (m)	h (m)
0.20	0.15	0.26
N Teórico (kN):	950.59	
N Aplicado (kN):	951.57	
N Real Medido (kN):	966.23	

PROBETAS COMPRESIÓN

Cilíndrica 1	119.84	MPa	Cúbica 1	159.38	MPa
Cilíndrica 2	123.35	MPa	Cúbica 2	147.59	MPa
Cilíndrica 3	122.42	MPa	Cúbica 3	147.21	MPa
E _i	45510.00	MPa	Cúbica 4	162.13	MPa
f _{cm_cilíndrica}	121.87	MPa	f _{cm_cúbica}	154.08	MPa

PROBETAS FLEXOTRACCIÓN

Prismática 1			Prismática 2		
f _{R,LOP}	11.24	MPa	f _{R,LOP}	-	MPa
f _{R,1}	21.09	MPa	f _{R,1}	-	MPa
f _{R,2}	20.81	MPa	f _{R,2}	-	MPa
f _{R,3}	17.48	MPa	f _{R,3}	-	MPa
f _{R,4}	13.91	MPa	f _{R,4}	-	MPa

OBSERVACIONES:

No se localizan los datos de una de las probetas prismáticas.



ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE SOPORTES DE HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES SOMETIDOS A COMPRESIÓN Y CARGA LATERAL CÍCLICA



ELEMENTO Nº: BS11-18

ARMADURA PASIVA:	LOTE Nº 2
-------------------------	------------------

HORMIGÓN

fc nominal:	Fecha	Tipo Fibra	% Fibra
130 Mpa	04/11/2014	MIXTAS	2%
DOSIFICACIÓN PREVISTA (kg) con cemento y arenas (ensacados)		AMASADA 1	AMASADA 2
Componentes:	Volúmen (m³): 1	0.108	0.108
CEM 42.5 R-SR	1000.00	108.00	108.00
Agua	173.00	18.68	17.98
Humo de Silice 940 D	150.00	16.20	16.20
Arena sílicea (AF-T-0/4-S)	310.00	33.48	33.48
Arena sílicea (AF-T-0/8-S)	575.00	62.10	62.10
Sika 20 HE	28.50	3.08	3.08
Fibras cortas (Straight) 13/0.5	90.00	9.72	9.72
Fibras largas (Hook End) 90/30	60.00	6.48	6.48

Amasada	1
Slump Flow	73.5 cm



Amasada	2
Slump Flow	71 cm



OBSERVACIONES:

Con respecto a la dosificación inicial (Junio 2014) se corrige la humedad por el cambio en la temperatura ambiente.
Amasada 2: se corrige agua quitando al agua de la 1ª amasada 0.7 kg.

DATOS PREVIOS ROTURA SOPORTE



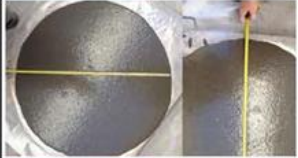

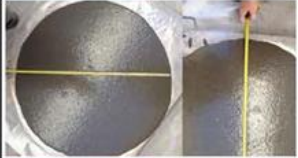

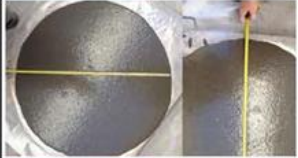

Fecha Amasado:	04/11/2014
Fecha Rotura:	02/12/2014
Días:	28



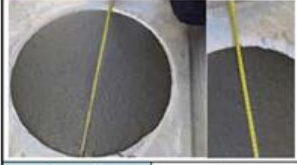

AXIL APLICADO (N):		
v	b (m)	h (m)
0.20	0.15	0.26
N Teórico (kN):	951.91	
N Aplicado (kN):	961.38	
N Real Medido (kN):	964.31	

PROBETAS COMPRESIÓN					
Cilíndrica 1	122.61	MPa	Cúbica 1	148.60	MPa
Cilíndrica 2	121.98	MPa	Cúbica 2	151.38	MPa
Cilíndrica 3	121.53	MPa	Cúbica 3	151.49	MPa
E _c	43829.00	MPa	Cúbica 4	147.33	MPa
f _{cm_cilíndrica}	122.04	MPa	f _{cm_cúbica}	149.70	MPa
PROBETAS FLEXOTRACCIÓN					
Prismática 1			Prismática 2		
f _{R,LOP}	2.03	MPa	f _{R,LOP}	8.92	MPa
f _{R,1}	5.59	MPa	f _{R,1}	16.56	MPa
f _{R,2}	5.64	MPa	f _{R,2}	16.64	MPa
f _{R,3}	17.48	MPa	f _{R,3}	12.31	MPa
f _{R,4}	13.91	MPa	f _{R,4}	9.57	MPa

OBSERVACIONES:

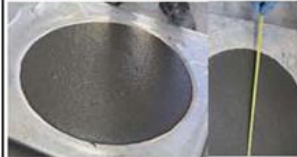

Se descartan los valores de la probeta prismática nº1, son valores incoherentes.

	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE SOPORTES DE HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES SOMETIDOS A COMPRESIÓN Y CARGA LATERAL CÍCLICA																																																		
	ELEMENTO Nº: BS13-19																																																		
ARMADURA PASIVA:		LOTE Nº 2																																																	
HORMIGÓN																																																			
<table border="1"> <thead> <tr> <th>fc nominal:</th> <th>Fecha</th> <th>Tipo Fibra</th> <th>% Fibra</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>130 Mpa</td> <td>06/11/2014</td> <td>MIXTAS</td> <td>2%</td> </tr> </tbody> </table>	fc nominal:	Fecha	Tipo Fibra	% Fibra	130 Mpa	06/11/2014	MIXTAS	2%	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">DOSIFICACIÓN PREVISTA (kg) con cemento y arenas (ensacados)</th> <th>AMASADA 1</th> <th>AMASADA 2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Componentes:</td> <td>Volumen (m³):</td> <td>1</td> <td></td> </tr> <tr> <td>CEM 42.5 R-SR</td> <td>1000.00</td> <td>108.00</td> <td>108.00</td> </tr> <tr> <td>Agua</td> <td>173.00</td> <td>18.68</td> <td>17.98</td> </tr> <tr> <td>Humo de Silice 940 D</td> <td>150.00</td> <td>16.20</td> <td>16.20</td> </tr> <tr> <td>Arena sílicea (AF-T-0/4-S)</td> <td>310.00</td> <td>33.48</td> <td>33.48</td> </tr> <tr> <td>Arena sílicea (AF-T-0/8-S)</td> <td>575.00</td> <td>62.10</td> <td>62.10</td> </tr> <tr> <td>Sika 20 HE</td> <td>28.50</td> <td>3.08</td> <td>3.08</td> </tr> <tr> <td>Fibras cortas (Straight) 13/0.5</td> <td>90.00</td> <td>9.72</td> <td>9.72</td> </tr> <tr> <td>Fibras largas (Hook End) 80/30</td> <td>60.00</td> <td>6.48</td> <td>6.48</td> </tr> </tbody> </table>			DOSIFICACIÓN PREVISTA (kg) con cemento y arenas (ensacados)		AMASADA 1	AMASADA 2	Componentes:	Volumen (m³):	1		CEM 42.5 R-SR	1000.00	108.00	108.00	Agua	173.00	18.68	17.98	Humo de Silice 940 D	150.00	16.20	16.20	Arena sílicea (AF-T-0/4-S)	310.00	33.48	33.48	Arena sílicea (AF-T-0/8-S)	575.00	62.10	62.10	Sika 20 HE	28.50	3.08	3.08	Fibras cortas (Straight) 13/0.5	90.00	9.72	9.72	Fibras largas (Hook End) 80/30	60.00	6.48	6.48
fc nominal:	Fecha	Tipo Fibra	% Fibra																																																
130 Mpa	06/11/2014	MIXTAS	2%																																																
DOSIFICACIÓN PREVISTA (kg) con cemento y arenas (ensacados)		AMASADA 1	AMASADA 2																																																
Componentes:	Volumen (m³):	1																																																	
CEM 42.5 R-SR	1000.00	108.00	108.00																																																
Agua	173.00	18.68	17.98																																																
Humo de Silice 940 D	150.00	16.20	16.20																																																
Arena sílicea (AF-T-0/4-S)	310.00	33.48	33.48																																																
Arena sílicea (AF-T-0/8-S)	575.00	62.10	62.10																																																
Sika 20 HE	28.50	3.08	3.08																																																
Fibras cortas (Straight) 13/0.5	90.00	9.72	9.72																																																
Fibras largas (Hook End) 80/30	60.00	6.48	6.48																																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Amasada</th> <th>Slump Flow</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>75.5 cm</td> </tr> <tr> <td colspan="2">  </td> </tr> <tr> <th>Amasada</th> <th>Slump Flow</th> </tr> <tr> <td>2</td> <td>71 cm</td> </tr> <tr> <td colspan="2">  </td> </tr> </tbody> </table>				Amasada	Slump Flow	1	75.5 cm			Amasada	Slump Flow	2	71 cm																																						
Amasada	Slump Flow																																																		
1	75.5 cm																																																		
																																																			
Amasada	Slump Flow																																																		
2	71 cm																																																		
																																																			
OBSERVACIONES: Con respecto a la dosificación inicial (Junio 2014) se corrige la humedad por el cambio en la temperatura ambiente. Amasada 2: se corrige agua quitando al agua de la 1ª amasada 0.7 kg.																																																			
DATOS PREVIOS ROTURA SOPORTE																																																			
<table border="1"> <tbody> <tr> <td>Fecha Amasado:</td> <td>06/11/2014</td> </tr> <tr> <td>Fecha Rotura:</td> <td>04/12/2014</td> </tr> <tr> <td>Días:</td> <td>28</td> </tr> </tbody> </table>				Fecha Amasado:	06/11/2014	Fecha Rotura:	04/12/2014	Días:	28																																										
Fecha Amasado:	06/11/2014																																																		
Fecha Rotura:	04/12/2014																																																		
Días:	28																																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">AXIL APLICADO (N):</th> </tr> <tr> <th>v</th> <th>b (m)</th> <th>h (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.20</td> <td>0.15</td> <td>0.26</td> </tr> <tr> <td>N Teórico (kN):</td> <td colspan="2">961.04</td> </tr> <tr> <td>N Aplicado (kN):</td> <td colspan="2">971.19</td> </tr> <tr> <td>N Real Medido (kN):</td> <td colspan="2">977.16</td> </tr> </tbody> </table>				AXIL APLICADO (N):			v	b (m)	h (m)	0.20	0.15	0.26	N Teórico (kN):	961.04		N Aplicado (kN):	971.19		N Real Medido (kN):	977.16																															
AXIL APLICADO (N):																																																			
v	b (m)	h (m)																																																	
0.20	0.15	0.26																																																	
N Teórico (kN):	961.04																																																		
N Aplicado (kN):	971.19																																																		
N Real Medido (kN):	977.16																																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">PROBETAS COMPRESIÓN</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Cilíndrica 1</td> <td>122.19 MPa</td> <td>Cúbica 1</td> <td>149.39 MPa</td> </tr> <tr> <td>Cilíndrica 2</td> <td>124.23 MPa</td> <td>Cúbica 2</td> <td>150.00 MPa</td> </tr> <tr> <td>Cilíndrica 3</td> <td>112.32 MPa</td> <td>Cúbica 3</td> <td>146.59 MPa</td> </tr> <tr> <td>E</td> <td>43177.00 MPa</td> <td>Cúbica 4</td> <td>143.05 MPa</td> </tr> <tr> <td>f_{cm,cilíndrica}</td> <td>123.21 MPa</td> <td>f_{cm,cúbica}</td> <td>147.26 MPa</td> </tr> </tbody> </table>				PROBETAS COMPRESIÓN				Cilíndrica 1	122.19 MPa	Cúbica 1	149.39 MPa	Cilíndrica 2	124.23 MPa	Cúbica 2	150.00 MPa	Cilíndrica 3	112.32 MPa	Cúbica 3	146.59 MPa	E	43177.00 MPa	Cúbica 4	143.05 MPa	f _{cm,cilíndrica}	123.21 MPa	f _{cm,cúbica}	147.26 MPa																								
PROBETAS COMPRESIÓN																																																			
Cilíndrica 1	122.19 MPa	Cúbica 1	149.39 MPa																																																
Cilíndrica 2	124.23 MPa	Cúbica 2	150.00 MPa																																																
Cilíndrica 3	112.32 MPa	Cúbica 3	146.59 MPa																																																
E	43177.00 MPa	Cúbica 4	143.05 MPa																																																
f _{cm,cilíndrica}	123.21 MPa	f _{cm,cúbica}	147.26 MPa																																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">PROBETAS FLEXOTRACCIÓN</th> </tr> <tr> <th colspan="2">Prismática 1</th> <th colspan="2">Prismática 2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>f_{R,LOP}</td> <td>11.55 MPa</td> <td>f_{R,LOP}</td> <td>8.84 MPa</td> </tr> <tr> <td>f_{R,1}</td> <td>22.62 MPa</td> <td>f_{R,1}</td> <td>14.74 MPa</td> </tr> <tr> <td>f_{R,2}</td> <td>23.97 MPa</td> <td>f_{R,2}</td> <td>15.01 MPa</td> </tr> <tr> <td>f_{R,3}</td> <td>22.28 MPa</td> <td>f_{R,3}</td> <td>11.95 MPa</td> </tr> <tr> <td>f_{R,4}</td> <td>18.96 MPa</td> <td>f_{R,4}</td> <td>8.18 MPa</td> </tr> </tbody> </table>				PROBETAS FLEXOTRACCIÓN				Prismática 1		Prismática 2		f _{R,LOP}	11.55 MPa	f _{R,LOP}	8.84 MPa	f _{R,1}	22.62 MPa	f _{R,1}	14.74 MPa	f _{R,2}	23.97 MPa	f _{R,2}	15.01 MPa	f _{R,3}	22.28 MPa	f _{R,3}	11.95 MPa	f _{R,4}	18.96 MPa	f _{R,4}	8.18 MPa																				
PROBETAS FLEXOTRACCIÓN																																																			
Prismática 1		Prismática 2																																																	
f _{R,LOP}	11.55 MPa	f _{R,LOP}	8.84 MPa																																																
f _{R,1}	22.62 MPa	f _{R,1}	14.74 MPa																																																
f _{R,2}	23.97 MPa	f _{R,2}	15.01 MPa																																																
f _{R,3}	22.28 MPa	f _{R,3}	11.95 MPa																																																
f _{R,4}	18.96 MPa	f _{R,4}	8.18 MPa																																																
OBSERVACIONES: Se descartan los valores de la probeta cilíndrica nº3.																																																			

		ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE SOPORTES DE HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES SOMETIDOS A COMPRESIÓN Y CARGA LATERAL CÍCLICA			
ELEMENTO N.º:		AS11-20			
ARMADURA PASIVA:		LOTE N.º 3			
HORMIGÓN					
fc nominal:	Fecha	Tipo Fibra	% Fibra		
130 MPa	13/01/2015	MIXTAS	2%		
DOSIFICACIÓN PREVISTA (kg) con cemento y arenas (ensacados)		AMASADA 1	AMASADA 2		
Componentes:	Volúmen (m³):	1	0.108	0.108	
CEM 42.5 R-SR	1000.00	108.00	108.00		
Agua	172.00	19.15	18.45		
Humo de Sílice 940 D	150.00	16.20	16.20		
Arena sílicea (AF-T-0/4-S)	310.00	33.48	33.48		
Arena sílicea (AF-T-0/8-S)	575.00	62.10	62.10		
Sika 20 HE	28.50	3.08	3.08		
Fibras cortas (Straight) 13/0.5	90.00	9.72	9.72		
Fibras largas (Hook End) 80/30	60.00	6.48	6.48		
AMASADA 1		AMASADA 2			
Slump Flow		70 cm			
					
AMASADA 2		AMASADA 1			
Slump Flow		68 cm			
					
OBSERVACIONES:					
Con respecto a la dosificación inicial (Junio 2014) se corrige la humedad por el cambio en la temperatura ambiente.					
Amasada 1: se corrige agua añadiendo 0.575 kg. Amasada 2: se corrige agua quitando al agua de la 1ª amasada 0.7 kg.					
DATOS PREVIOS ROTURA SOPORTE					
Fecha Amasado:	13/01/2015				
Fecha Rotura:	09/02/2015				
Días:	27				
AXIL APLICADO (N):					
v	b (m)	h (m)			
0.20	0.15	0.26			
N Teórico (kN):	930.44				
N Aplicado (kN):	931.95				
N Real Medido (kN):	944.86				
OBSERVACIONES:					
PROBETAS COMPRESIÓN					
Cilíndrica 1	119.77	MPa	Cúbica 1	135.18	MPa
Cilíndrica 2	118.24	MPa	Cúbica 2	130.16	MPa
Cilíndrica 3	119.85	MPa	Cúbica 3	118.82	MPa
E	41791.00	MPa	Cúbica 4	125.44	MPa
f_{cm_cilíndrica}	119.29	MPa	f_{cm_cúbica}	127.40	MPa
PROBETAS FLEXOTRACCIÓN					
Prismática 1			Prismática 2		
f_{R,LOP}	9.19	MPa	f_{R,LOP}	9.32	MPa
f_{R,1}	17.18	MPa	f_{R,1}	16.19	MPa
f_{R,2}	16.97	MPa	f_{R,2}	15.95	MPa
f_{R,3}	12.96	MPa	f_{R,3}	11.83	MPa
f_{R,4}	9.51	MPa	f_{R,4}	9.38	MPa

ELEMENTO Nº: AS11-21
ARMADURA PASIVA:
LOTE Nº 3
HORMIGÓN

fc nominal:	Fecha	Tipo Fibra	% Fibra
130 Mpa	15/01/2015	MIXTAS	2%
DOSIFICACIÓN PREVISTA (kg) con cemento y arenas (ensacados)		AMASADA 1	AMASADA 2
Componentes:	Volúmen (m ³):	1	
CEM 42.5 R-SR	1000.00	108.00	108.00
Agua	172.00	19.15	18.45
Humo de Sílice 940 D	150.00	16.20	16.20
Arena sílicea (AF-T-0/4-S)	310.00	33.48	33.48
Arena sílicea (AF-T-0/8-S)	575.00	62.10	62.10
Sika 20 HE	28.50	3.08	3.08
Fibras cortas (Straight) 13/0.5	90.00	9.72	9.72
Fibras largas (Hook End) 80/30	60.00	6.48	6.48

Amasada	1
Slump Flow	68 cm
	
Amasada	2
Slump Flow	65 cm
	

OBSERVACIONES:

Con respecto a la dosificación inicial (Junio 2014) se corrige la humedad por el cambio en la temperatura ambiente.

Amasada 1: se corrige agua añadiendo 0.575 kg. Amasada 2: se corrige agua quitando al agua de la 1ª amasada 0.7 kg.

DATOS PREVIOS ROTURA SOPORTE

Fecha Amasado:	15/01/2015
Fecha Rotura:	11/02/2015
Días:	27

AXIL APLICADO (N):		
v	b (m)	h (m)
0.20	0.15	0.26
N Teórico (kN):	986.24	
N Aplicado (kN):	990.81	
N Real Medido (kN):	996.90	



PROBETAS COMPRESIÓN

Cilíndrica 1	123.71 MPa	Cúbica 1	147.72 MPa
Cilíndrica 2	125.99 MPa	Cúbica 2	123.13 MPa
Cilíndrica 3	129.62 MPa	Cúbica 3	131.36 MPa
E _c	41601.00 MPa	Cúbica 4	129.11 MPa
f _{cm_cilíndrica}	126.44 MPa	f _{cm_cúbica}	132.83 MPa


PROBETAS FLEXOTRACCIÓN

Prismática 1		Prismática 2	
f _{R,LOP}	9.68 MPa	f _{R,LOP}	10.85 MPa
f _{R,1}	17.27 MPa	f _{R,1}	20.56 MPa
f _{R,2}	17.20 MPa	f _{R,2}	21.76 MPa
f _{R,3}	13.26 MPa	f _{R,3}	19.48 MPa
f _{R,4}	10.19 MPa	f _{R,4}	14.05 MPa


OBSERVACIONES:

	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE SOPORTES DE HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES SOMETIDOS A COMPRESIÓN Y CARGA LATERAL CÍCLICA		
	ELEMENTO Nº: AS11-22		
ARMADURA PASIVA:		LOTE Nº 3	
HORMIGÓN			
fc nominal:	Fecha	Tipo Fibra	% Fibra
130 Mpa	20/01/2015	MIXTAS	2%
DOSIFICACIÓN PREVISTA (kg) con cemento y arenas (ensacados)		AMASADA 1	AMASADA 2
Componentes:	Volúmen (m³):	1	0.108
CEM 42.5 R-SR	1000.00	108.00	108.00
Água	172.00	19.15	18.45
Humo de Sílice 940 D	150.00	16.20	16.20
Arena sílicea (AF-T-0/4-5)	310.00	33.48	33.48
Arena sílicea (AF-T-0/8-5)	575.00	62.10	62.10
Sika 20 HE	28.50	3.08	3.08
Fibras cortas (Straight) 13/0.5	90.00	9.72	9.72
Fibras largas (Hook End) 90/30	60.00	6.48	6.48

Amasada	1
Slump Flow	71 cm



Amasada	2
Slump Flow	73 cm



OBSERVACIONES:

Con respecto a la dosificación inicial (Junio 2014) se corrige la humedad por el cambio en la temperatura ambiente.
 Amasada 1: se corrige agua añadiendo 0.575 kg. Amasada 2: se corrige agua quitando al agua de la 1ª amasada 0.7 kg.

DATOS PREVIOS ROTURA SOPORTE	
Fecha Amasado:	20/01/2015
Fecha Rotura:	16/02/2015
Días:	27

AXIL APLICADO (N):		
v	b (m)	h (m)
0.20	0.15	0.26
N Teórico (kN):	919.94	
N Aplicado (kN):	922.14	
N Real Medido (kN):	939.12	

PROBETAS COMPRESIÓN					
Cilíndrica 1	114.60	MPa	Cúbica 1	127.92	MPa
Cilíndrica 2	118.61	MPa	Cúbica 2	142.15	MPa
Cilíndrica 3	120.61	MPa	Cúbica 3	140.61	MPa
E _s	40950.00	MPa	Cúbica 4	137.59	MPa
f _{cm_cilíndrica}	117.94	MPa	f _{cm_cúbica}	137.07	MPa

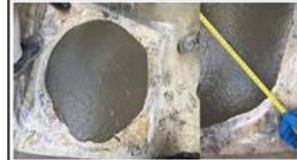
PROBETAS FLEXOTRACCIÓN					
Prismática 1		Prismática 2			
f _{R,LOP}	9.77	MPa	f _{R,LOP}	4.21	MPa
f _{R,1}	17.57	MPa	f _{R,1}	15.01	MPa
f _{R,2}	17.39	MPa	f _{R,2}	12.52	MPa
f _{R,3}	14.31	MPa	f _{R,3}	8.61	MPa
f _{R,4}	11.13	MPa	f _{R,4}	6.01	MPa

OBSERVACIONES:

ELEMENTO Nº: AS21-23
ARMADURA PASIVA: LOTE Nº 2
HORMIGÓN

fc nominal:	Fecha	Tipo Fibra	% Fibra
130 Mpa	16/12/2014	MIXTAS	2%
DOSIFICACIÓN PREVISTA (kg) con cemento y arenas (ensacados)		AMASADA 1	AMASADA 2
Componentes:	Volúmen (m ³):	1	
CEM 42.5 R-SR	1000.00	0.100	0.095
Agua	172.00	17.78	16.34
Humo de Sílice 940 D	150.00	15.00	14.25
Arena sílicea (AF-T-0/4-S)	310.00	31.00	29.45
Arena sílicea (AF-T-0/8-S)	575.00	57.50	54.63
Sika 20 HE	28.50	2.85	2.71
Fibras cortas (Straight) 13/0.5	90.00	9.00	8.55
Fibras largas (Hook End) 80/30	60.00	6.00	5.70

Amasada	1
Slump Flow	74 cm



Amasada	2
Slump Flow	73 cm


OBSERVACIONES:

Con respecto a la dosificación inicial (Junio 2014) se corrige la humedad por el cambio en la temperatura ambiente.

Amasada 1: se corrige agua añadiendo 0.575 kg.

DATOS PREVIOS ROTURA SOPORTE

Fecha Amasado:	16/12/2014
Fecha Rotura:	13/01/2015
Días:	28

AXIL APLICADO (N):		
v	b (m)	h (m)
0.30	0.15	0.2
N Teórico (kN):	1109.70	
N Aplicado (kN):	1128.15	
N Real Medido (kN):	1136.49	

PROBETAS COMPRESIÓN

Cilíndrica 1	118.55 MPa	Cúbica 1	139.87 MPa
Cilíndrica 2	121.70 MPa	Cúbica 2	134.00 MPa
Cilíndrica 3	124.90 MPa	Cúbica 3	141.03 MPa
E _c	42132.00 MPa	Cúbica 4	143.47 MPa
f _{cm,cilíndrica}	123.30 MPa	f _{cm,cúbica}	139.59 MPa



PROBETAS FLEXOTRACCIÓN



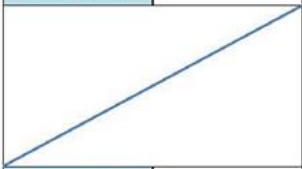
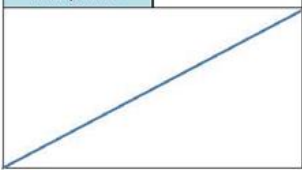
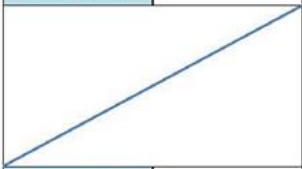
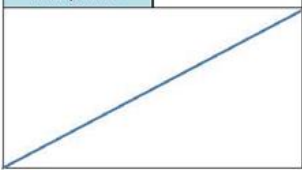
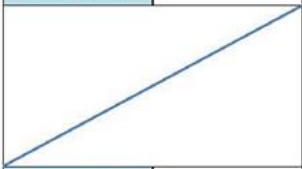
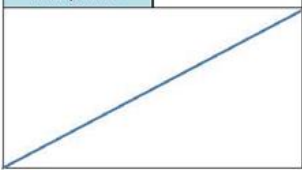
Prismática 1		Prismática 2	
f _{R,LOP}	20.27 MPa	f _{R,LOP}	- MPa
f _{R,1}	- MPa	f _{R,1}	- MPa
f _{R,2}	- MPa	f _{R,2}	- MPa
f _{R,3}	- MPa	f _{R,3}	- MPa
f _{R,4}	- MPa	f _{R,4}	- MPa

OBSERVACIONES:

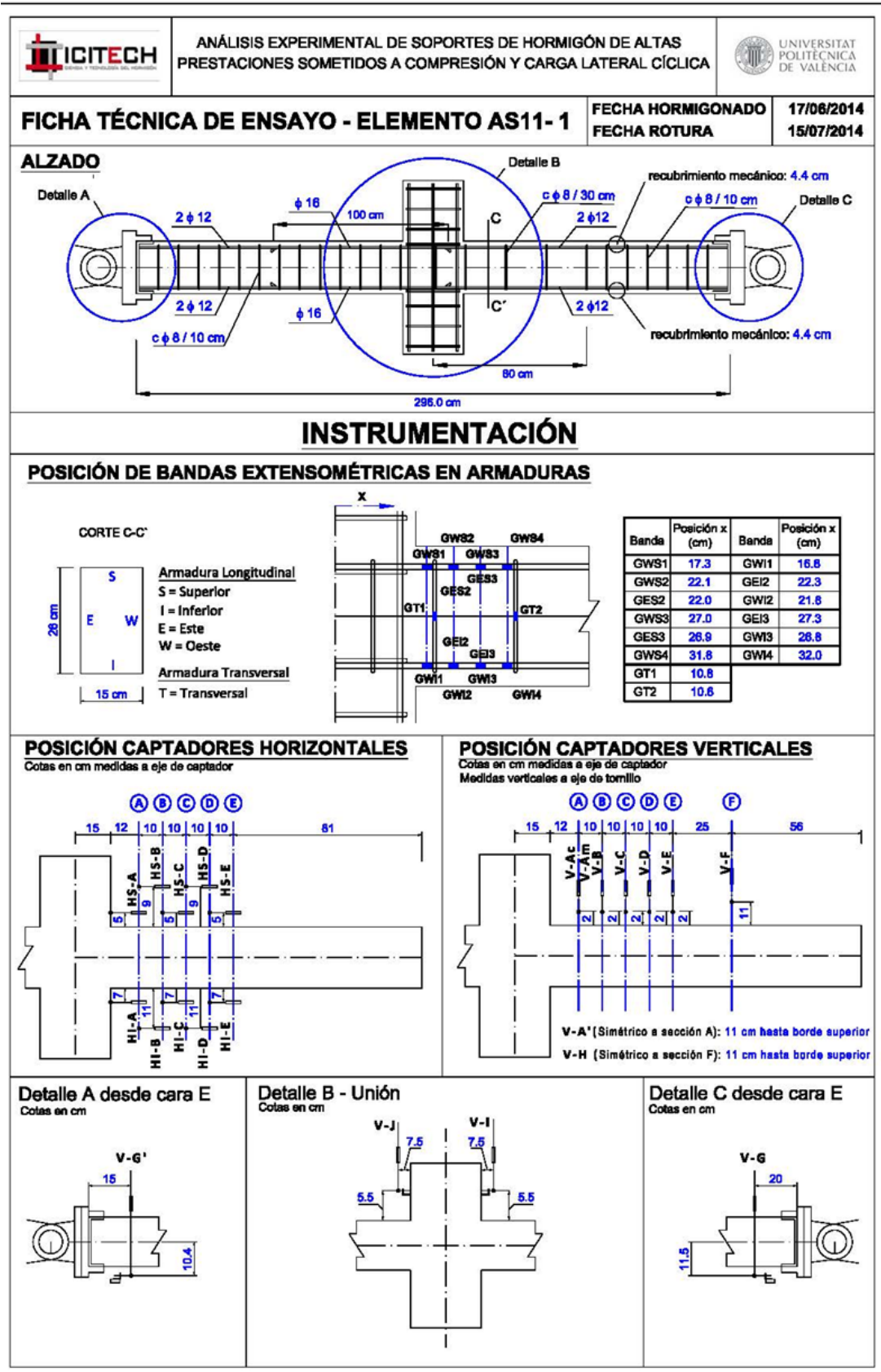
Se ha efectuado el ensayo de Flexotracción con control de desplazamiento, por duración del ensayo se obtienen solo el f_{R,LOP}.

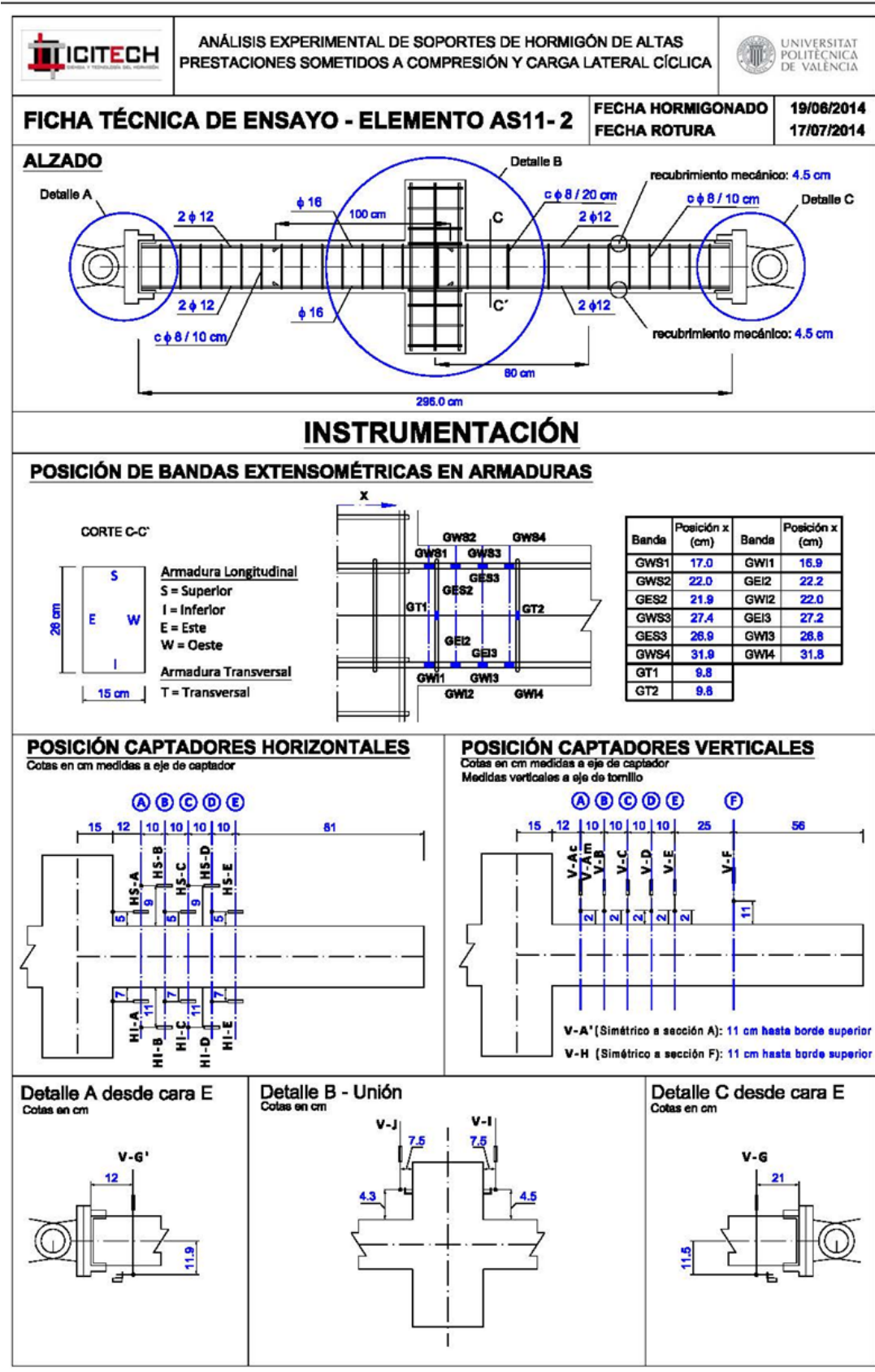
Sólo hay datos de una de las probetas prismáticas.


	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE SOPORTES DE HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES SOMETIDOS A COMPRESIÓN Y CARGA LATERAL CÍCLICA																																																										
	ELEMENTO Nº: AS21-24																																																										
ARMADURA PASIVA:		LOTE Nº 3																																																									
HORMIGÓN																																																											
<table border="1"> <thead> <tr> <th>fc nominal:</th> <th>Fecha</th> <th>Tipo Fibra</th> <th>% Fibra</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>130 Mpa</td> <td>29/01/2015</td> <td>MIXTAS</td> <td>2%</td> </tr> </tbody> </table>	fc nominal:	Fecha	Tipo Fibra	% Fibra	130 Mpa	29/01/2015	MIXTAS	2%	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">DOSIFICACIÓN PREVISTA (kg) con cemento y arenas (ensacados)</th> <th>AMASADA 1</th> <th>AMASADA 2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2">Componentes:</td> <td>Volúmen (m³): 1</td> <td></td> </tr> <tr> <td>CEM 42.5 R-SR</td> <td>1000.00</td> <td>100.00</td> <td>95.00</td> </tr> <tr> <td>Agua</td> <td>173.00</td> <td>17.30</td> <td>15.74</td> </tr> <tr> <td>Humo de Sílice 940 D</td> <td>150.00</td> <td>15.00</td> <td>14.25</td> </tr> <tr> <td>Arena sílicea (AF-T-0/4-S)</td> <td>310.00</td> <td>31.00</td> <td>29.45</td> </tr> <tr> <td>Arena sílicea (AF-T-0/8-S)</td> <td>575.00</td> <td>57.50</td> <td>54.63</td> </tr> <tr> <td>Sika 20 HE</td> <td>28.50</td> <td>2.85</td> <td>2.71</td> </tr> <tr> <td>Fibras cortas (Straight) 13/0.5</td> <td>90.00</td> <td>9.00</td> <td>8.55</td> </tr> <tr> <td>Fibras largas (Hook End) 80/30</td> <td>60.00</td> <td>6.00</td> <td>5.70</td> </tr> </tbody> </table>			DOSIFICACIÓN PREVISTA (kg) con cemento y arenas (ensacados)		AMASADA 1	AMASADA 2	Componentes:		Volúmen (m³): 1		CEM 42.5 R-SR	1000.00	100.00	95.00	Agua	173.00	17.30	15.74	Humo de Sílice 940 D	150.00	15.00	14.25	Arena sílicea (AF-T-0/4-S)	310.00	31.00	29.45	Arena sílicea (AF-T-0/8-S)	575.00	57.50	54.63	Sika 20 HE	28.50	2.85	2.71	Fibras cortas (Straight) 13/0.5	90.00	9.00	8.55	Fibras largas (Hook End) 80/30	60.00	6.00	5.70								
fc nominal:	Fecha	Tipo Fibra	% Fibra																																																								
130 Mpa	29/01/2015	MIXTAS	2%																																																								
DOSIFICACIÓN PREVISTA (kg) con cemento y arenas (ensacados)		AMASADA 1	AMASADA 2																																																								
Componentes:		Volúmen (m³): 1																																																									
CEM 42.5 R-SR	1000.00	100.00	95.00																																																								
Agua	173.00	17.30	15.74																																																								
Humo de Sílice 940 D	150.00	15.00	14.25																																																								
Arena sílicea (AF-T-0/4-S)	310.00	31.00	29.45																																																								
Arena sílicea (AF-T-0/8-S)	575.00	57.50	54.63																																																								
Sika 20 HE	28.50	2.85	2.71																																																								
Fibras cortas (Straight) 13/0.5	90.00	9.00	8.55																																																								
Fibras largas (Hook End) 80/30	60.00	6.00	5.70																																																								
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Amasada</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Slump Flow</td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">/</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Slump Flow</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>				Amasada		1		Slump Flow		/		2		Slump Flow																																													
Amasada																																																											
1																																																											
Slump Flow																																																											
/																																																											
2																																																											
Slump Flow																																																											
OBSERVACIONES: Con respecto a la dosificación inicial (Junio 2014) se corrige la humedad por el cambio en la temperatura ambiente. Amasada 2: se corrige agua quitando al agua de la 1ª amasada 0.7 kg.																																																											
DATOS PREVIOS ROTURA SOPORTE																																																											
<table border="1"> <tbody> <tr> <td>Fecha Amasado:</td> <td>29/01/2015</td> </tr> <tr> <td>Fecha Rotura:</td> <td>27/02/2015</td> </tr> <tr> <td>Días:</td> <td>29</td> </tr> </tbody> </table>		Fecha Amasado:	29/01/2015	Fecha Rotura:	27/02/2015	Días:	29	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">PROBETAS COMPRESIÓN</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Cilíndrica 1</td> <td>134.94</td> <td>MPa</td> <td>Cúbica 1</td> <td>154.82</td> <td>MPa</td> </tr> <tr> <td>Cilíndrica 2</td> <td>134.84</td> <td>MPa</td> <td>Cúbica 2</td> <td>140.09</td> <td>MPa</td> </tr> <tr> <td>Cilíndrica 3</td> <td>130.18</td> <td>MPa</td> <td>Cúbica 3</td> <td>148.90</td> <td>MPa</td> </tr> <tr> <td>E</td> <td>44074.00</td> <td>MPa</td> <td>Cúbica 4</td> <td>-</td> <td>MPa</td> </tr> <tr> <td>f_{cm_cilíndrica}</td> <td>133.32</td> <td>MPa</td> <td>f_{cm_cúbica}</td> <td>147.94</td> <td>MPa</td> </tr> </tbody> </table>		PROBETAS COMPRESIÓN				Cilíndrica 1	134.94	MPa	Cúbica 1	154.82	MPa	Cilíndrica 2	134.84	MPa	Cúbica 2	140.09	MPa	Cilíndrica 3	130.18	MPa	Cúbica 3	148.90	MPa	E	44074.00	MPa	Cúbica 4	-	MPa	f _{cm_cilíndrica}	133.32	MPa	f _{cm_cúbica}	147.94	MPa																
Fecha Amasado:	29/01/2015																																																										
Fecha Rotura:	27/02/2015																																																										
Días:	29																																																										
PROBETAS COMPRESIÓN																																																											
Cilíndrica 1	134.94	MPa	Cúbica 1	154.82	MPa																																																						
Cilíndrica 2	134.84	MPa	Cúbica 2	140.09	MPa																																																						
Cilíndrica 3	130.18	MPa	Cúbica 3	148.90	MPa																																																						
E	44074.00	MPa	Cúbica 4	-	MPa																																																						
f _{cm_cilíndrica}	133.32	MPa	f _{cm_cúbica}	147.94	MPa																																																						
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">AXIL APLICADO (N):</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>v</td> <td>b (m)</td> <td>h (m)</td> </tr> <tr> <td>0.40</td> <td>0.15</td> <td>0.2</td> </tr> <tr> <td>N Teórico (kN):</td> <td colspan="2">1599.84</td> </tr> <tr> <td>N Aplicado (kN):</td> <td colspan="2">1569.60</td> </tr> <tr> <td>N Real Medido (kN):</td> <td colspan="2">1590.83</td> </tr> </tbody> </table>		AXIL APLICADO (N):			v	b (m)	h (m)	0.40	0.15	0.2	N Teórico (kN):	1599.84		N Aplicado (kN):	1569.60		N Real Medido (kN):	1590.83		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">PROBETAS FLEXOTRACCIÓN</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2">Prismática 1</td> <td colspan="2">Prismática 2</td> </tr> <tr> <td>f_{R,LOP}</td> <td>11.95</td> <td>MPa</td> <td>f_{R,LOP}</td> <td>12.60</td> <td>MPa</td> </tr> <tr> <td>f_{R,1}</td> <td>24.59</td> <td>MPa</td> <td>f_{R,1}</td> <td>24.39</td> <td>MPa</td> </tr> <tr> <td>f_{R,2}</td> <td>25.34</td> <td>MPa</td> <td>f_{R,2}</td> <td>25.27</td> <td>MPa</td> </tr> <tr> <td>f_{R,3}</td> <td>24.28</td> <td>MPa</td> <td>f_{R,3}</td> <td>21.10</td> <td>MPa</td> </tr> <tr> <td>f_{R,4}</td> <td>21.12</td> <td>MPa</td> <td>f_{R,4}</td> <td>17.47</td> <td>MPa</td> </tr> </tbody> </table>		PROBETAS FLEXOTRACCIÓN				Prismática 1		Prismática 2		f _{R,LOP}	11.95	MPa	f _{R,LOP}	12.60	MPa	f _{R,1}	24.59	MPa	f _{R,1}	24.39	MPa	f _{R,2}	25.34	MPa	f _{R,2}	25.27	MPa	f _{R,3}	24.28	MPa	f _{R,3}	21.10	MPa	f _{R,4}	21.12	MPa	f _{R,4}	17.47	MPa
AXIL APLICADO (N):																																																											
v	b (m)	h (m)																																																									
0.40	0.15	0.2																																																									
N Teórico (kN):	1599.84																																																										
N Aplicado (kN):	1569.60																																																										
N Real Medido (kN):	1590.83																																																										
PROBETAS FLEXOTRACCIÓN																																																											
Prismática 1		Prismática 2																																																									
f _{R,LOP}	11.95	MPa	f _{R,LOP}	12.60	MPa																																																						
f _{R,1}	24.59	MPa	f _{R,1}	24.39	MPa																																																						
f _{R,2}	25.34	MPa	f _{R,2}	25.27	MPa																																																						
f _{R,3}	24.28	MPa	f _{R,3}	21.10	MPa																																																						
f _{R,4}	21.12	MPa	f _{R,4}	17.47	MPa																																																						
OBSERVACIONES:																																																											

	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE SOPORTES DE HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES SOMETIDOS A COMPRESIÓN Y CARGA LATERAL CÍCLICA																																																		
	ELEMENTO Nº: AS11-25																																																		
ARMADURA PASIVA:		LOTE Nº 3																																																	
HORMIGÓN																																																			
<table border="1"> <thead> <tr> <th>fc nominal:</th> <th>Fecha</th> <th>Tipo Fibra</th> <th>% Fibra</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>130 Mpa</td> <td>22/01/2015</td> <td>MXTAS</td> <td>2%</td> </tr> </tbody> </table>	fc nominal:	Fecha	Tipo Fibra	% Fibra	130 Mpa	22/01/2015	MXTAS	2%	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">DOSIFICACIÓN PREVISTA (kg) con cemento y arenas (ensacados)</th> <th>AMASADA 1</th> <th>AMASADA 2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Componentes:</td> <td>Volúmen (m³):</td> <td>1</td> <td></td> </tr> <tr> <td>CEM 42.5 R-SR</td> <td>1000.00</td> <td>108.00</td> <td>108.00</td> </tr> <tr> <td>Agua</td> <td>172.00</td> <td>19.15</td> <td>18.45</td> </tr> <tr> <td>Humo de Sílice 940 D</td> <td>150.00</td> <td>16.20</td> <td>16.20</td> </tr> <tr> <td>Arena silicea (AF-T-0/4-S)</td> <td>310.00</td> <td>33.48</td> <td>33.48</td> </tr> <tr> <td>Arena silicea (AF-T-0/8-S)</td> <td>575.00</td> <td>62.10</td> <td>62.10</td> </tr> <tr> <td>Sika 20 HE</td> <td>28.50</td> <td>3.08</td> <td>3.08</td> </tr> <tr> <td>Fibras cortas (Straight) 13/0.5</td> <td>90.00</td> <td>9.72</td> <td>9.72</td> </tr> <tr> <td>Fibras largas (Hook End) 80/30</td> <td>60.00</td> <td>6.48</td> <td>6.48</td> </tr> </tbody> </table>			DOSIFICACIÓN PREVISTA (kg) con cemento y arenas (ensacados)		AMASADA 1	AMASADA 2	Componentes:	Volúmen (m³):	1		CEM 42.5 R-SR	1000.00	108.00	108.00	Agua	172.00	19.15	18.45	Humo de Sílice 940 D	150.00	16.20	16.20	Arena silicea (AF-T-0/4-S)	310.00	33.48	33.48	Arena silicea (AF-T-0/8-S)	575.00	62.10	62.10	Sika 20 HE	28.50	3.08	3.08	Fibras cortas (Straight) 13/0.5	90.00	9.72	9.72	Fibras largas (Hook End) 80/30	60.00	6.48	6.48
fc nominal:	Fecha	Tipo Fibra	% Fibra																																																
130 Mpa	22/01/2015	MXTAS	2%																																																
DOSIFICACIÓN PREVISTA (kg) con cemento y arenas (ensacados)		AMASADA 1	AMASADA 2																																																
Componentes:	Volúmen (m³):	1																																																	
CEM 42.5 R-SR	1000.00	108.00	108.00																																																
Agua	172.00	19.15	18.45																																																
Humo de Sílice 940 D	150.00	16.20	16.20																																																
Arena silicea (AF-T-0/4-S)	310.00	33.48	33.48																																																
Arena silicea (AF-T-0/8-S)	575.00	62.10	62.10																																																
Sika 20 HE	28.50	3.08	3.08																																																
Fibras cortas (Straight) 13/0.5	90.00	9.72	9.72																																																
Fibras largas (Hook End) 80/30	60.00	6.48	6.48																																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Amasada</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Slump Flow</td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">  </td> </tr> <tr> <td>2</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Slump Flow</td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">  </td> </tr> </tbody> </table>				Amasada		1		Slump Flow				2		Slump Flow																																					
Amasada																																																			
1																																																			
Slump Flow																																																			
																																																			
2																																																			
Slump Flow																																																			
																																																			
OBSERVACIONES: Con respecto a la dosificación inicial (Junio 2014) se corrige la humedad por el cambio en la temperatura ambiente. <u>Amasada 1:</u> se corrige agua añadiendo 0.575 kg. <u>Amasada 2:</u> se corrige agua quitando al agua de la 1ª amasada 0.7 kg.																																																			
DATOS PREVIOS ROTURA SOPORTE																																																			
<table border="1"> <tbody> <tr> <td>Fecha Amasado:</td> <td>22/01/2015</td> </tr> <tr> <td>Fecha Rotura:</td> <td>18/02/2015</td> </tr> <tr> <td>Días:</td> <td>27</td> </tr> </tbody> </table>		Fecha Amasado:	22/01/2015	Fecha Rotura:	18/02/2015	Días:	27	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">PROBETAS COMPRESIÓN</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Cilíndrica 1</td> <td>117.69 MPa</td> <td>Cúbica 1</td> <td>146.27 MPa</td> </tr> <tr> <td>Cilíndrica 2</td> <td>121.20 MPa</td> <td>Cúbica 2</td> <td>146.65 MPa</td> </tr> <tr> <td>Cilíndrica 3</td> <td>122.80 MPa</td> <td>Cúbica 3</td> <td>136.81 MPa</td> </tr> <tr> <td>E_c</td> <td>43087.00 MPa</td> <td>Cúbica 4</td> <td>134.15 MPa</td> </tr> <tr> <td>$f_{cm_cilíndrica}$</td> <td>120.56 MPa</td> <td>$f_{cm_cúbica}$</td> <td>140.97 MPa</td> </tr> </tbody> </table>		PROBETAS COMPRESIÓN				Cilíndrica 1	117.69 MPa	Cúbica 1	146.27 MPa	Cilíndrica 2	121.20 MPa	Cúbica 2	146.65 MPa	Cilíndrica 3	122.80 MPa	Cúbica 3	136.81 MPa	E_c	43087.00 MPa	Cúbica 4	134.15 MPa	$f_{cm_cilíndrica}$	120.56 MPa	$f_{cm_cúbica}$	140.97 MPa																		
Fecha Amasado:	22/01/2015																																																		
Fecha Rotura:	18/02/2015																																																		
Días:	27																																																		
PROBETAS COMPRESIÓN																																																			
Cilíndrica 1	117.69 MPa	Cúbica 1	146.27 MPa																																																
Cilíndrica 2	121.20 MPa	Cúbica 2	146.65 MPa																																																
Cilíndrica 3	122.80 MPa	Cúbica 3	136.81 MPa																																																
E_c	43087.00 MPa	Cúbica 4	134.15 MPa																																																
$f_{cm_cilíndrica}$	120.56 MPa	$f_{cm_cúbica}$	140.97 MPa																																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">AXIL APLICADO (N):</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>v</td> <td>b (m)</td> <td>h (m)</td> </tr> <tr> <td>0.20</td> <td>0.15</td> <td>0.26</td> </tr> <tr> <td>N Teórico (kN):</td> <td colspan="2">940.39</td> </tr> <tr> <td>N Aplicado (kN):</td> <td colspan="2">941.76</td> </tr> <tr> <td>N Real Medido (kN):</td> <td colspan="2">948.60</td> </tr> </tbody> </table>		AXIL APLICADO (N):			v	b (m)	h (m)	0.20	0.15	0.26	N Teórico (kN):	940.39		N Aplicado (kN):	941.76		N Real Medido (kN):	948.60		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">PROBETAS FLEXOTRACCIÓN</th> </tr> <tr> <th colspan="2">Prismática 1</th> <th colspan="2">Prismática 2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>$f_{R,LOP}$</td> <td>10.46 MPa</td> <td>$f_{R,LOP}$</td> <td>- MPa</td> </tr> <tr> <td>$f_{R,1}$</td> <td>20.41 MPa</td> <td>$f_{R,1}$</td> <td>- MPa</td> </tr> <tr> <td>$f_{R,2}$</td> <td>22.22 MPa</td> <td>$f_{R,2}$</td> <td>- MPa</td> </tr> <tr> <td>$f_{R,3}$</td> <td>20.81 MPa</td> <td>$f_{R,3}$</td> <td>- MPa</td> </tr> <tr> <td>$f_{R,4}$</td> <td>18.03 MPa</td> <td>$f_{R,4}$</td> <td>- MPa</td> </tr> </tbody> </table>		PROBETAS FLEXOTRACCIÓN				Prismática 1		Prismática 2		$f_{R,LOP}$	10.46 MPa	$f_{R,LOP}$	- MPa	$f_{R,1}$	20.41 MPa	$f_{R,1}$	- MPa	$f_{R,2}$	22.22 MPa	$f_{R,2}$	- MPa	$f_{R,3}$	20.81 MPa	$f_{R,3}$	- MPa	$f_{R,4}$	18.03 MPa	$f_{R,4}$	- MPa		
AXIL APLICADO (N):																																																			
v	b (m)	h (m)																																																	
0.20	0.15	0.26																																																	
N Teórico (kN):	940.39																																																		
N Aplicado (kN):	941.76																																																		
N Real Medido (kN):	948.60																																																		
PROBETAS FLEXOTRACCIÓN																																																			
Prismática 1		Prismática 2																																																	
$f_{R,LOP}$	10.46 MPa	$f_{R,LOP}$	- MPa																																																
$f_{R,1}$	20.41 MPa	$f_{R,1}$	- MPa																																																
$f_{R,2}$	22.22 MPa	$f_{R,2}$	- MPa																																																
$f_{R,3}$	20.81 MPa	$f_{R,3}$	- MPa																																																
$f_{R,4}$	18.03 MPa	$f_{R,4}$	- MPa																																																
OBSERVACIONES: CARGA MONOTÓNICA No se tienen datos de una probeta prismática.																																																			


Ficha de instrumentación







ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE SOPORTES DE HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES SOMETIDOS A COMPRESIÓN Y CARGA LATERAL CÍCLICA

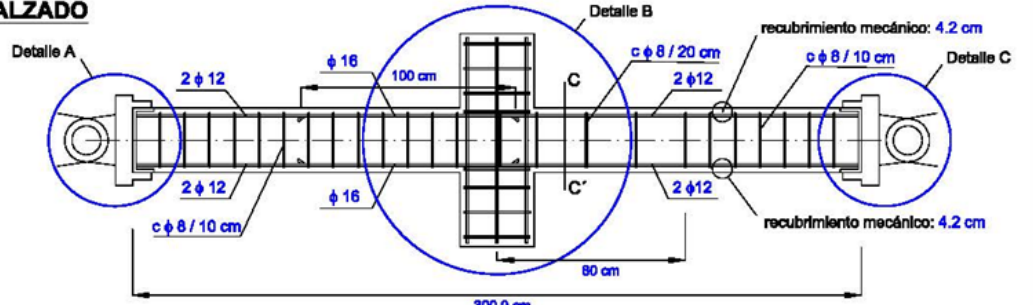


UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

FICHA TÉCNICA DE ENSAYO-ELEMENTO AS11-2(R)

FECHA HORMIGONADO 27/01/2015
FECHA ROTURA 24/02/2015

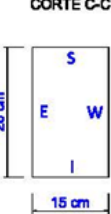
ALZADO



INSTRUMENTACIÓN

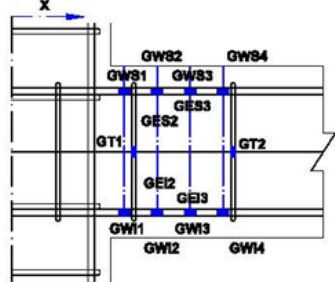
POSICIÓN DE BANDAS EXTENSOMÉTRICAS EN ARMADURAS

CORTE C-C'



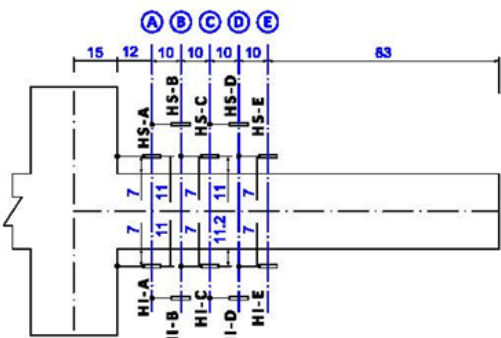
Armadura Longitudinal
 S = Superior
 I = Inferior
 E = Este
 W = Oeste

Armadura Transversal
 T = Transversal

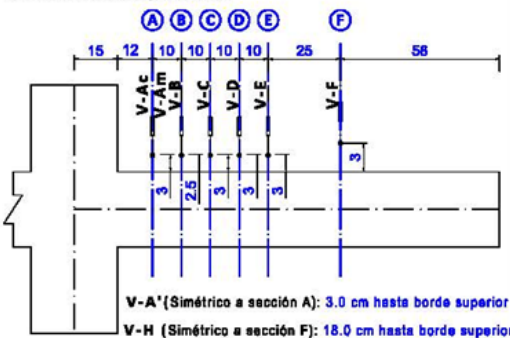


Banda	Posición x (cm)	Banda	Posición x (cm)
GWS1	17.0	GWI1	17.0
GWS2	22.0	GEI2	22.0
GES2	21.9	GWI2	22.0
GWS3	28.9	GEI3	27.0
GES3	27.0	GWI3	27.1
GWS4	31.9	GWI4	32.0
GT1	10.0		
GT2	10.0		

POSICIÓN CAPTADORES HORIZONTALES
 Cotas en cm medidas a eje de captador

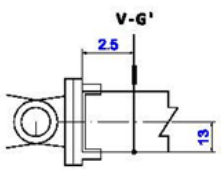


POSICIÓN CAPTADORES VERTICALES
 Cotas en cm medidas a eje de captador
 Medidas verticales a eje de tornillo

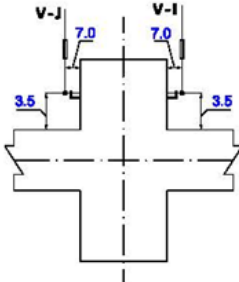


V-A' (Simétrico a sección A): 3.0 cm hasta borde superior
 V-H (Simétrico a sección F): 18.0 cm hasta borde superior

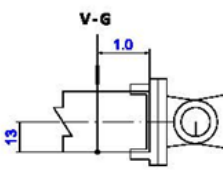
Detalle A desde cara E
 Cotas en cm

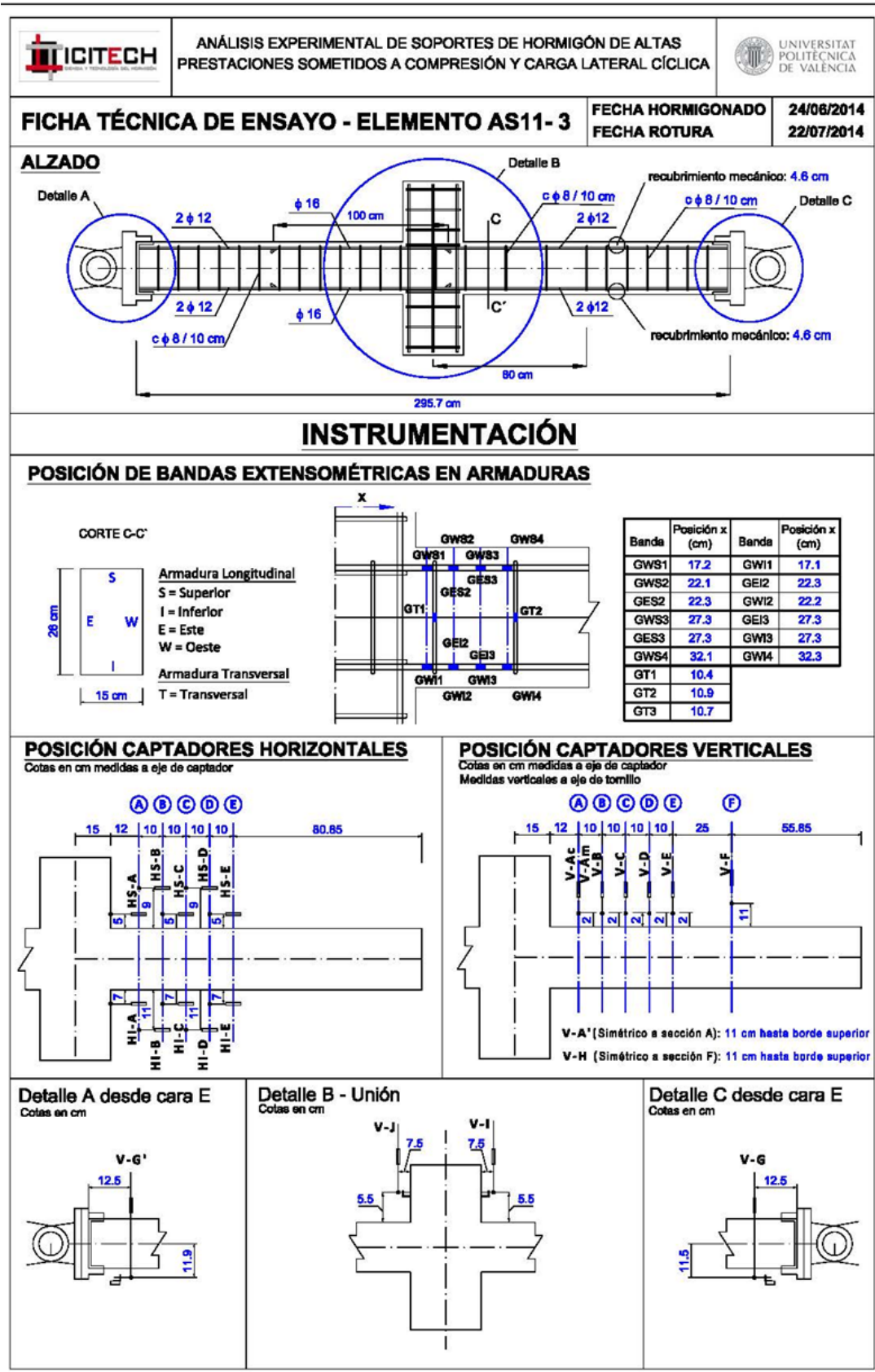




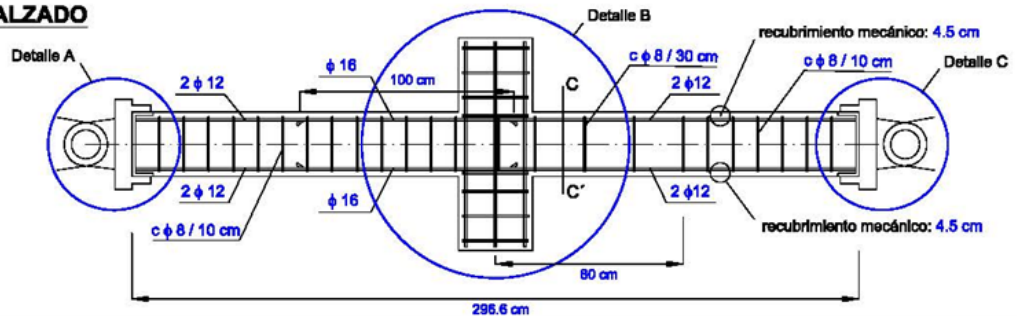

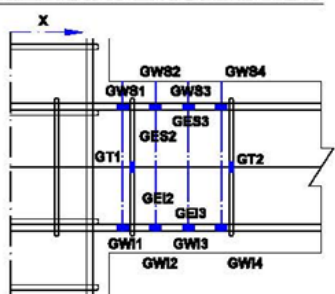
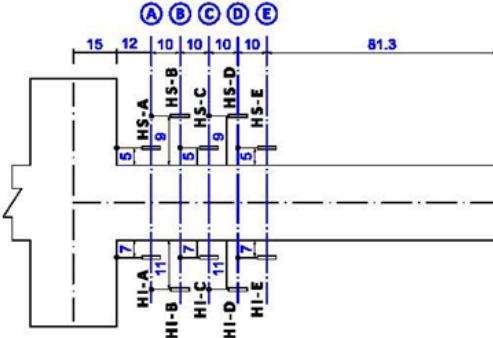
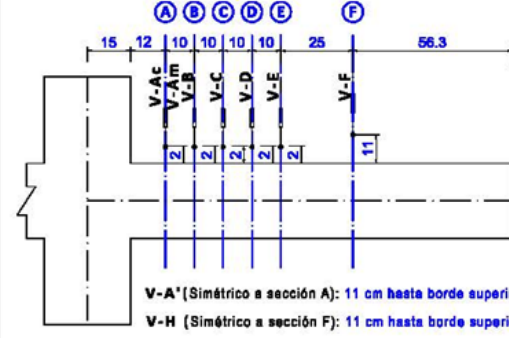
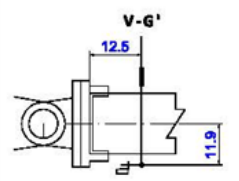
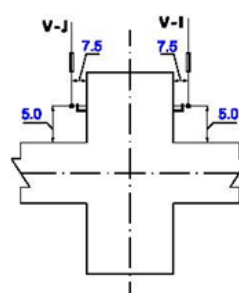
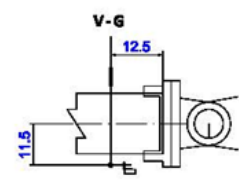
Detalle B - Unión
 Cotas en cm

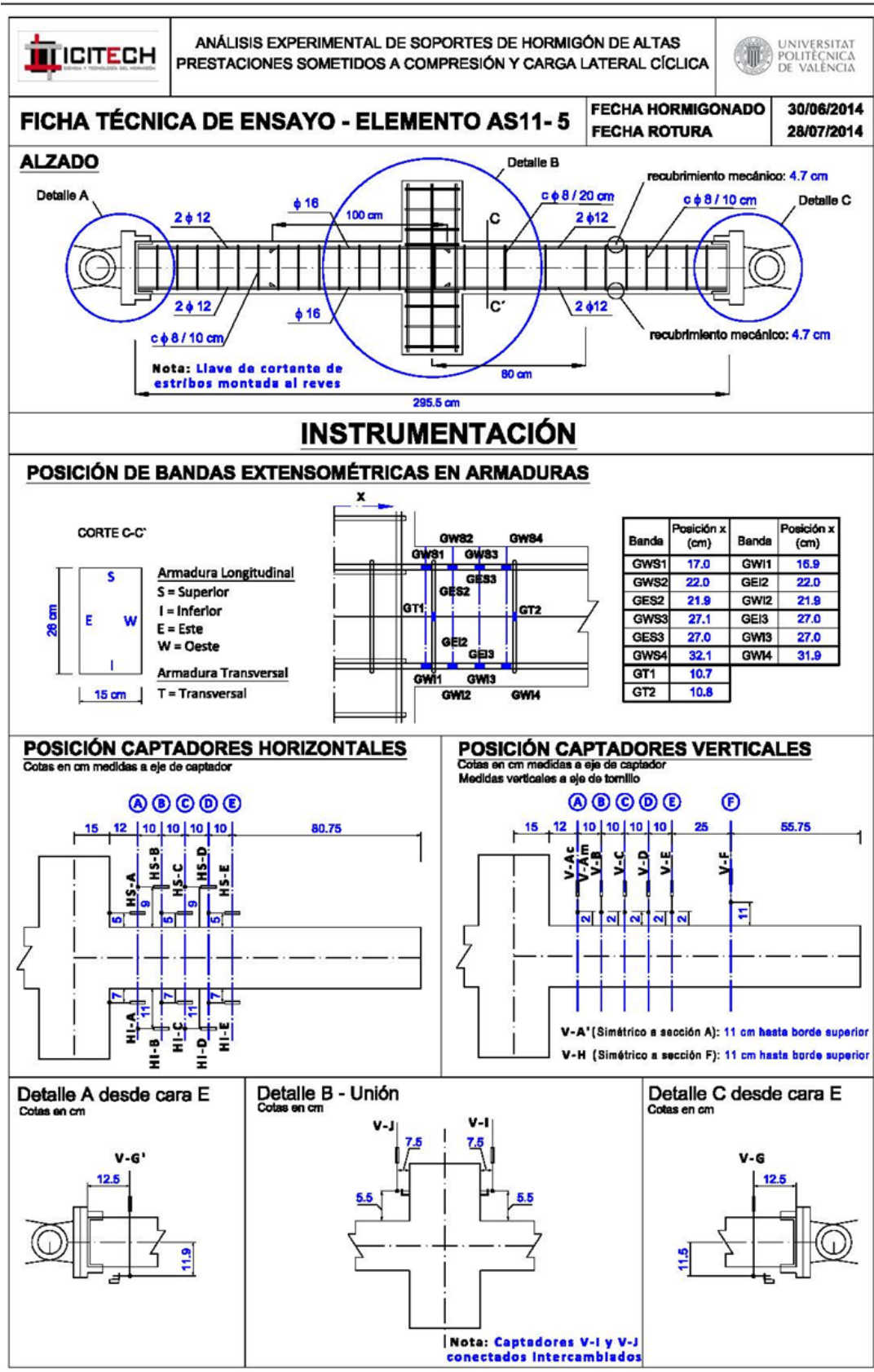



Detalle C desde cara E
 Cotas en cm






	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE SOPORTES DE HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES SOMETIDOS A COMPRESIÓN Y CARGA LATERAL CÍCLICA																																					
FICHA TÉCNICA DE ENSAYO - ELEMENTO AS11-4		FECHA HORMIGONADO 26/06/2014 FECHA ROTURA 24/07/2014																																				
ALZADO																																						
																																						
INSTRUMENTACIÓN																																						
POSICIÓN DE BANDAS EXTENSOMÉTRICAS EN ARMADURAS																																						
<p>CORTE C-C'</p> 		<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Banda</th> <th>Posición x (cm)</th> <th>Banda</th> <th>Posición x (cm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>GWS1</td> <td>17.0</td> <td>GWI1</td> <td>17.1</td> </tr> <tr> <td>GWS2</td> <td>22.0</td> <td>GEI2</td> <td>22.1</td> </tr> <tr> <td>GES2</td> <td>21.9</td> <td>GWI2</td> <td>22.1</td> </tr> <tr> <td>GWS3</td> <td>27.0</td> <td>GEI3</td> <td>26.8</td> </tr> <tr> <td>GES3</td> <td>26.9</td> <td>GWI3</td> <td>27.1</td> </tr> <tr> <td>GWS4</td> <td>32.1</td> <td>GWI4</td> <td>32.3</td> </tr> <tr> <td>GT1</td> <td>10.2</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>GT2</td> <td>10.2</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Banda	Posición x (cm)	Banda	Posición x (cm)	GWS1	17.0	GWI1	17.1	GWS2	22.0	GEI2	22.1	GES2	21.9	GWI2	22.1	GWS3	27.0	GEI3	26.8	GES3	26.9	GWI3	27.1	GWS4	32.1	GWI4	32.3	GT1	10.2			GT2	10.2		
Banda	Posición x (cm)	Banda	Posición x (cm)																																			
GWS1	17.0	GWI1	17.1																																			
GWS2	22.0	GEI2	22.1																																			
GES2	21.9	GWI2	22.1																																			
GWS3	27.0	GEI3	26.8																																			
GES3	26.9	GWI3	27.1																																			
GWS4	32.1	GWI4	32.3																																			
GT1	10.2																																					
GT2	10.2																																					
<p>POSICIÓN CAPTADORES HORIZONTALES Cotas en cm medidas a eje de captador</p> 	<p>POSICIÓN CAPTADORES VERTICALES Cotas en cm medidas a eje de captador Medidas verticales a eje de tornillo</p>  <p>V-A' (Simétrico a sección A): 11 cm hasta borde superior V-H (Simétrico a sección F): 11 cm hasta borde superior</p>																																					
<p>Detalle A desde cara E Cotas en cm</p> 	<p>Detalle B - Unión Cotas en cm</p> 	<p>Detalle C desde cara E Cotas en cm</p> 																																				





ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE SOPORTES DE HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES SOMETIDOS A COMPRESIÓN Y CARGA LATERAL CÍCLICA

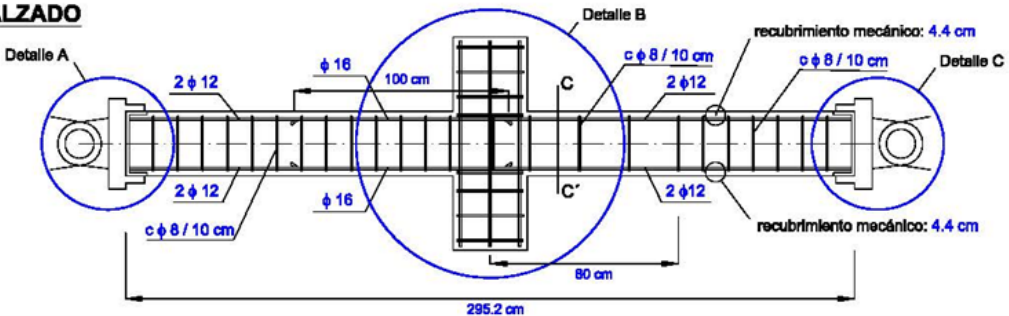


UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

FICHA TÉCNICA DE ENSAYO - ELEMENTO AS11-6

FECHA HORMIGONADO 02/07/2014
FECHA ROTURA 30/07/2014

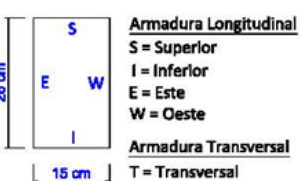
ALZADO

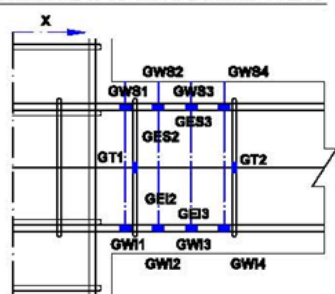


INSTRUMENTACIÓN

POSICIÓN DE BANDAS EXTENSOMÉTRICAS EN ARMADURAS

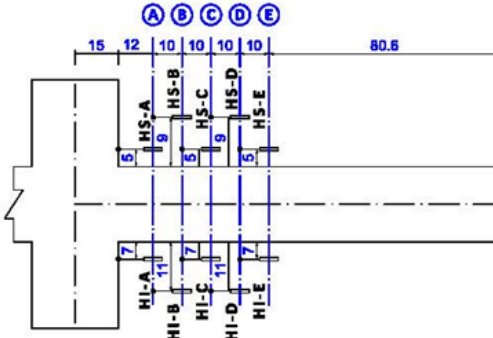
CORTE C-C'



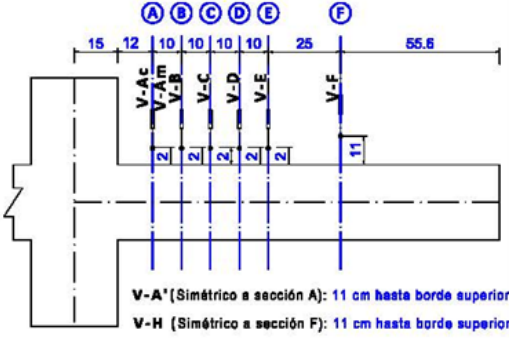


Banda	Posición x (cm)	Banda	Posición x (cm)
GWS1	17.0	GWI1	17.1
GWS2	22.1	GEI2	22.1
GES2	22.0	GWI2	22.1
GWS3	27.1	GEI3	27.1
GES3	27.0	GWI3	27.0
GWS4	32.1	GWI4	31.9
GT1	10.1		
GT2	10.1		
GT3	9.8		

POSICIÓN CAPTADORES HORIZONTALES
Cotas en cm medidas a eje de captador

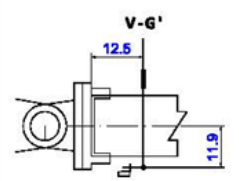


POSICIÓN CAPTADORES VERTICALES
Cotas en cm medidas a eje de captador
Medidas verticales a eje de tornillo

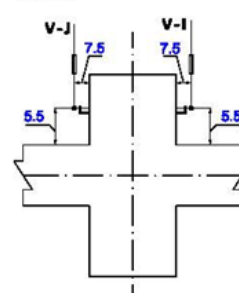


V-A' (Simétrico a sección A): 11 cm hasta borde superior
V-H (Simétrico a sección F): 11 cm hasta borde superior

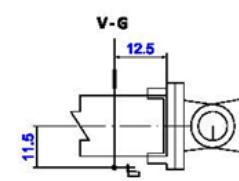
Detalle A desde cara E
Cotas en cm

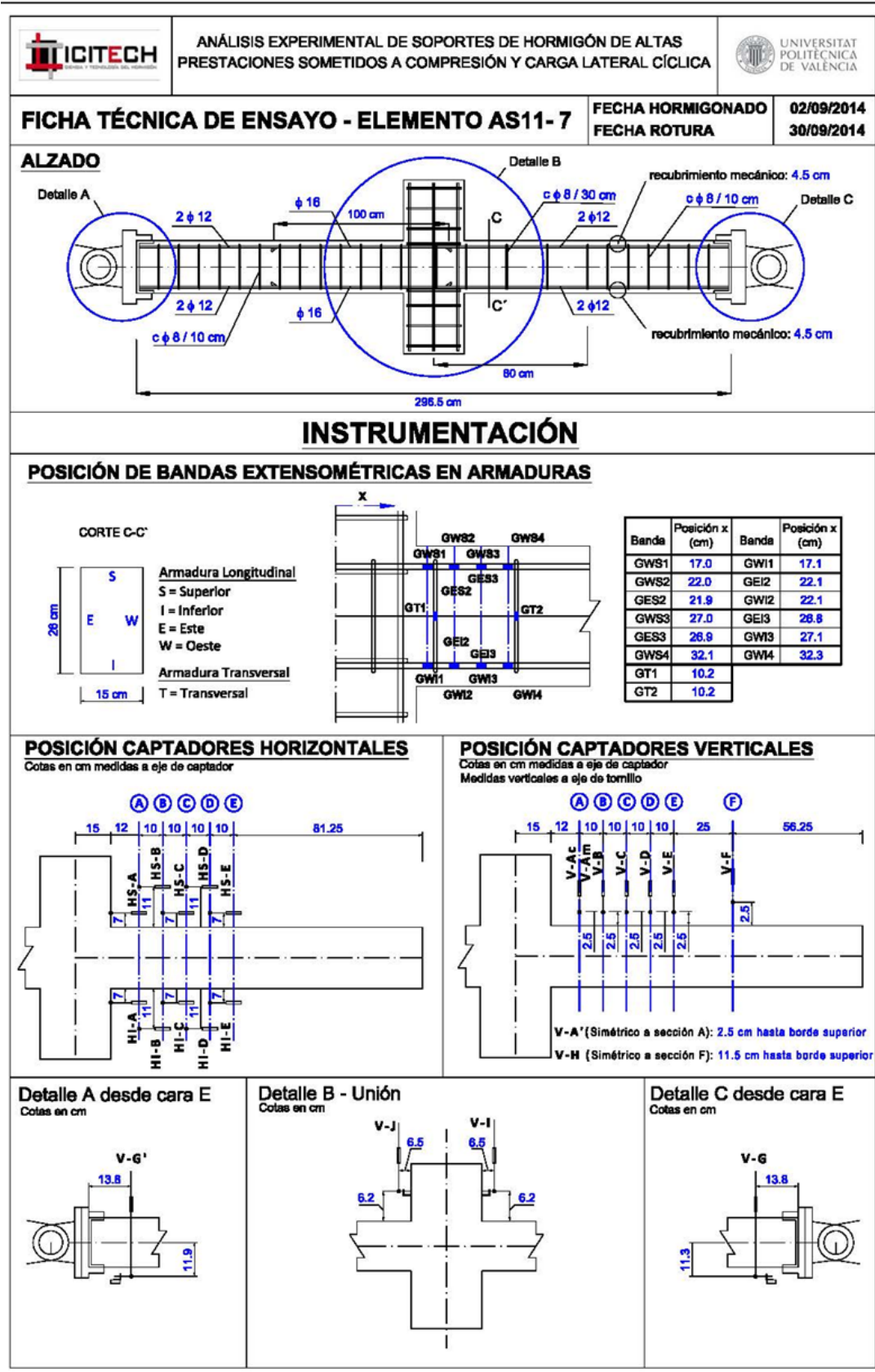



Detalle B - Unión
Cotas en cm




Detalle C desde cara E
Cotas en cm







ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE SOPORTES DE HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES SOMETIDOS A COMPRESIÓN Y CARGA LATERAL CÍCLICA

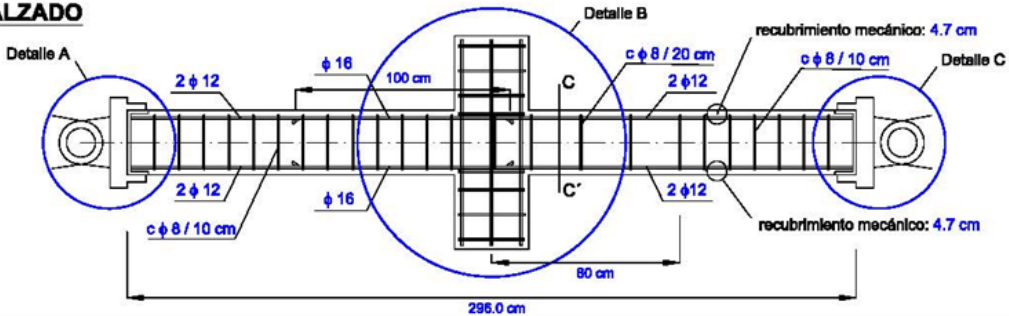


UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

FICHA TÉCNICA DE ENSAYO - ELEMENTO AS11- 8

FECHA HORMIGONADO 04/09/2014
FECHA ROTURA 02/10/2014

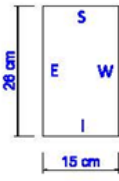
ALZADO



INSTRUMENTACIÓN

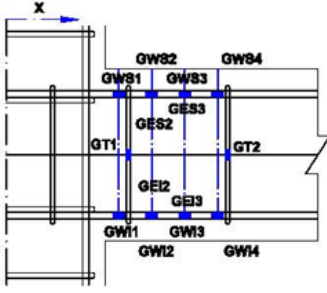
POSICIÓN DE BANDAS EXTENSOMÉTRICAS EN ARMADURAS

CORTE C-C'



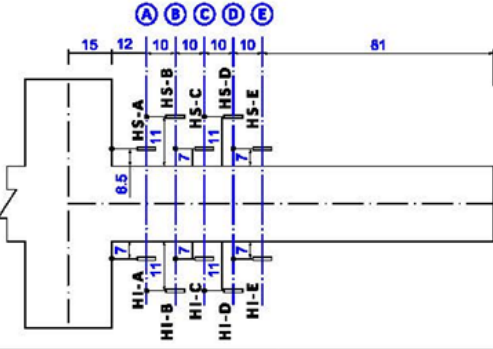
Armadura Longitudinal
S = Superior
I = Inferior
E = Este
W = Oeste

Armadura Transversal
T = Transversal

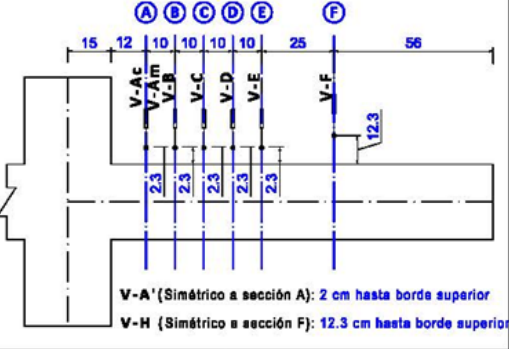


Banda	Posición x (cm)	Banda	Posición x (cm)
GWS1	17.2	GW1	17.0
GWS2	22.2	GEI2	22.0
GES2	22.0	GW2	22.0
GWS3	27.2	GEI3	28.9
GES3	28.9	GW3	27.1
GWS4	32.1	GW4	32.1
GT1	10.6		
GT2	10.1		

POSICIÓN CAPTADORES HORIZONTALES
Cotas en cm medidas a eje de captador

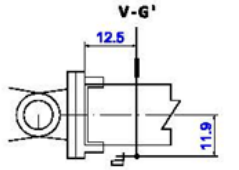


POSICIÓN CAPTADORES VERTICALES
Cotas en cm medidas a eje de captador
Medidas verticales a eje de tornillo

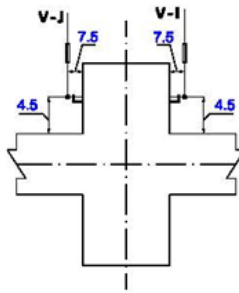


V-A' (Simétrico a sección A): 2 cm hasta borde superior
V-H (Simétrico a sección F): 12.3 cm hasta borde superior

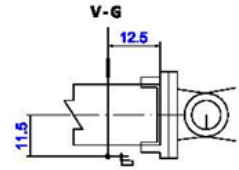
Detalle A desde cara E
Cotas en cm

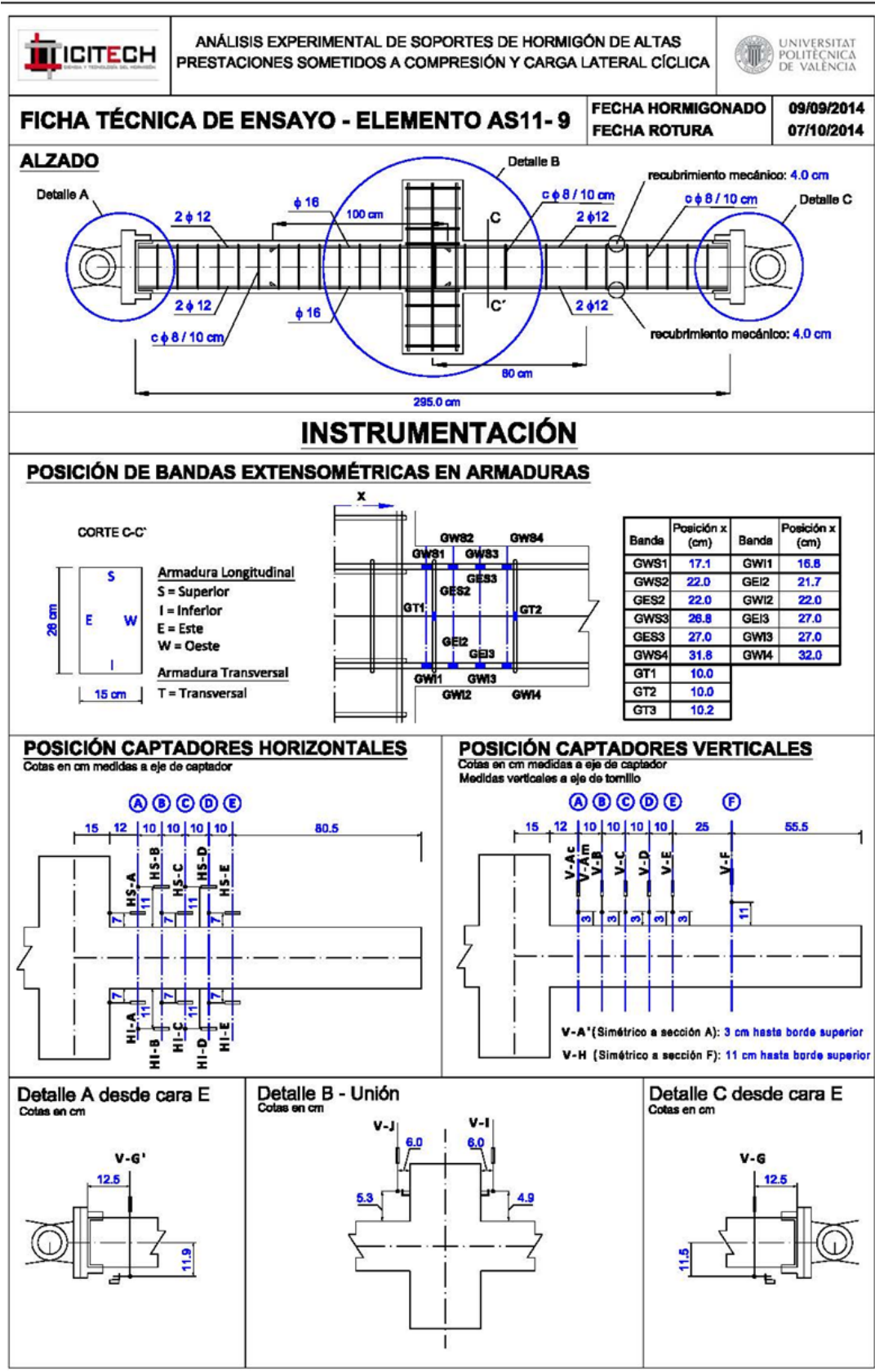


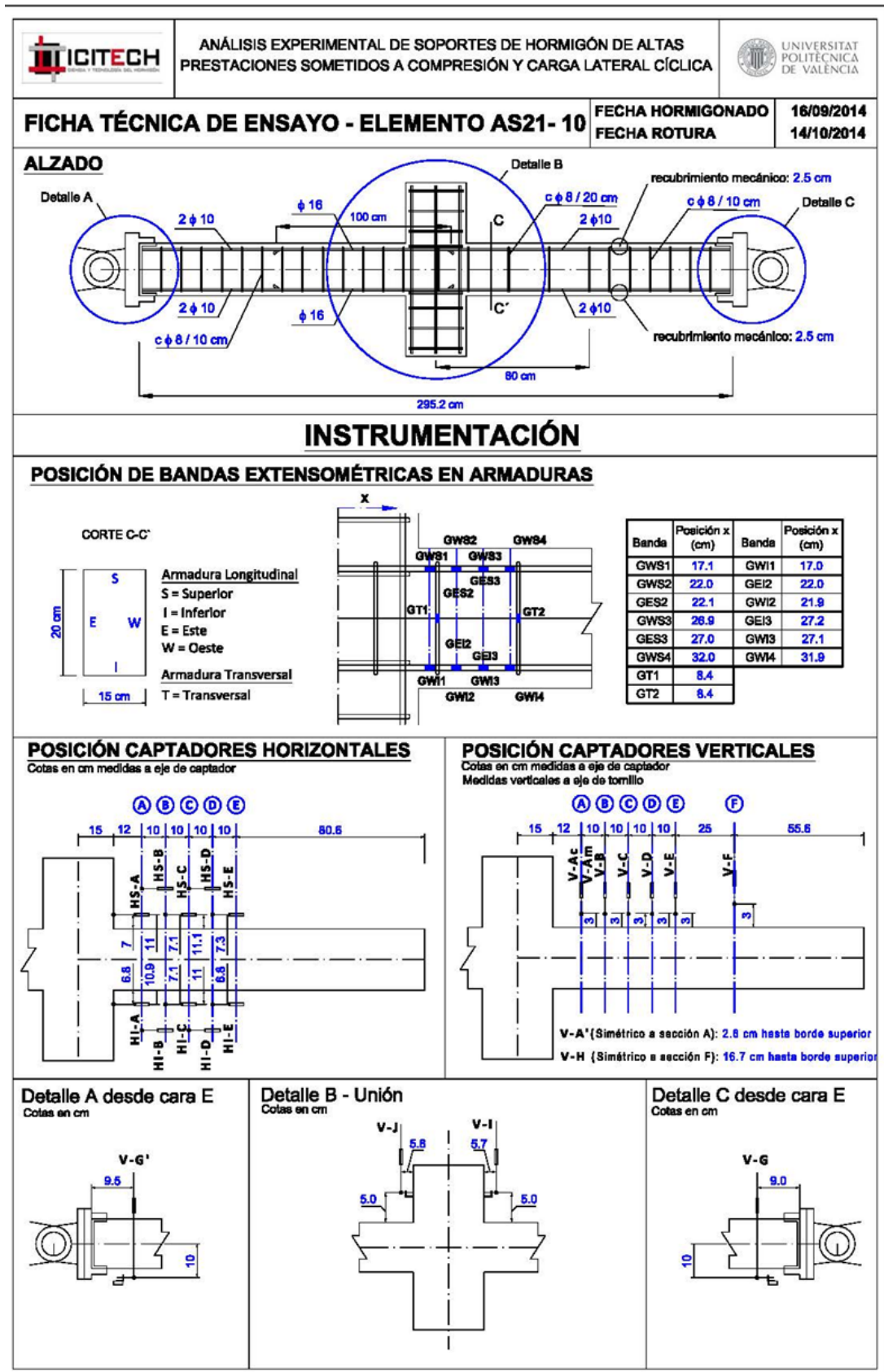
Detalle B - Unión
Cotas en cm

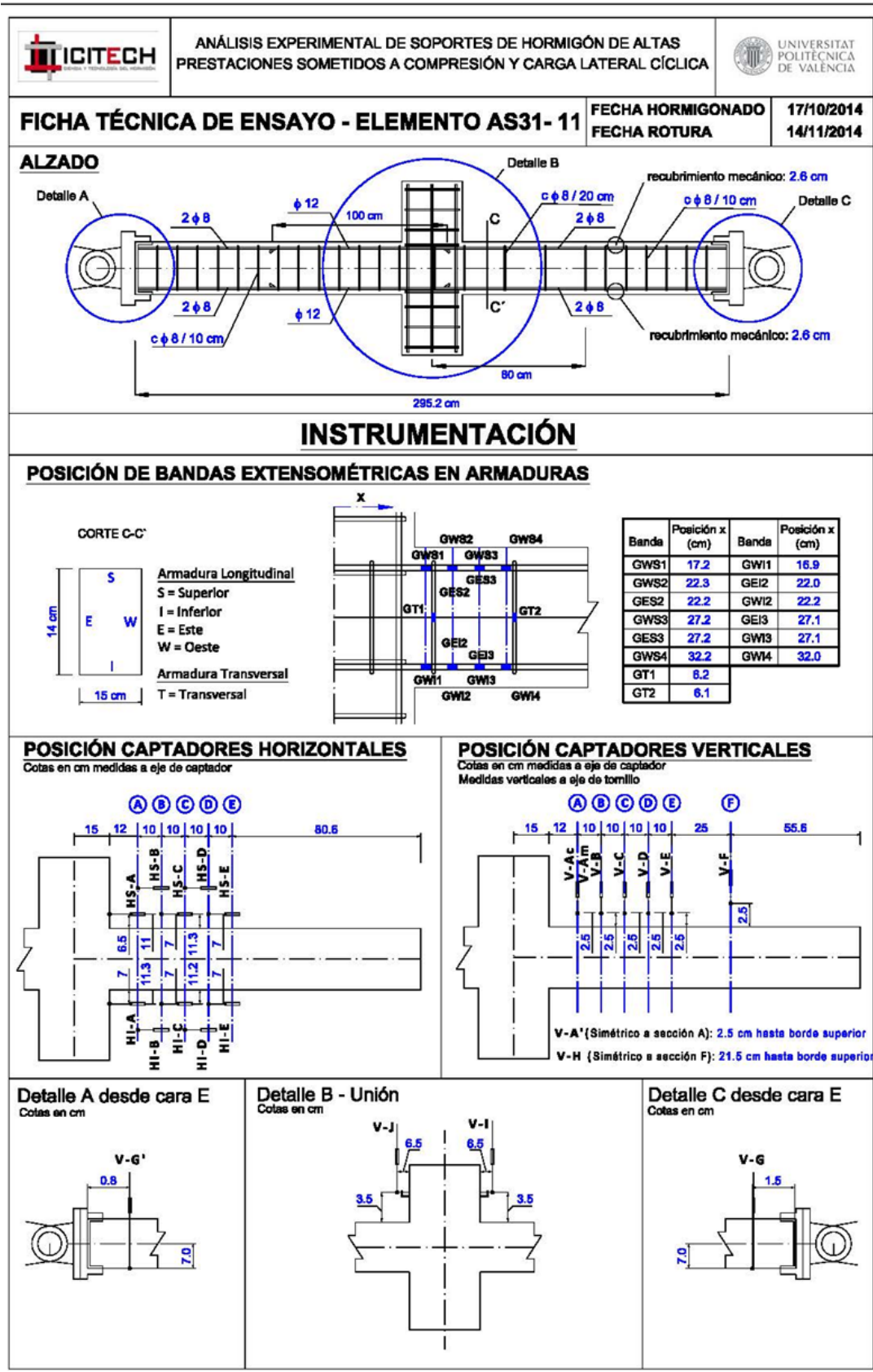



Detalle C desde cara E
Cotas en cm












ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE SOPORTES DE HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES SOMETIDOS A COMPRESIÓN Y CARGA LATERAL CÍCLICA

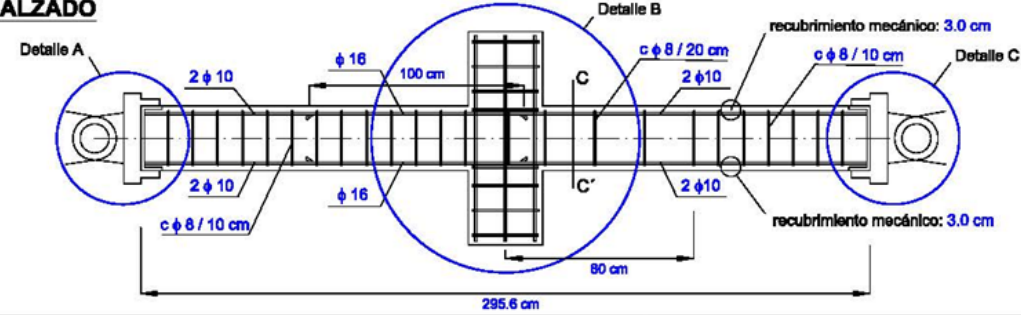


UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

FICHA TÉCNICA DE ENSAYO - ELEMENTO AS21- 12

FECHA HORMIGONADO 18/09/2014
FECHA ROTURA 17/10/2014

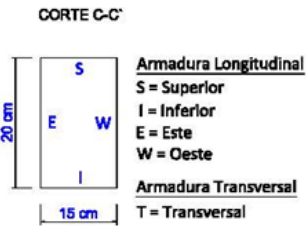
ALZADO

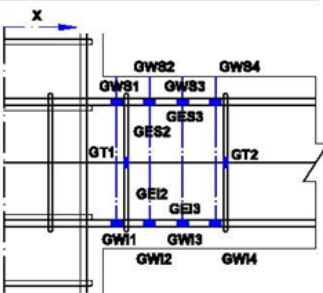


INSTRUMENTACIÓN

POSICIÓN DE BANDAS EXTENSOMÉTRICAS EN ARMADURAS

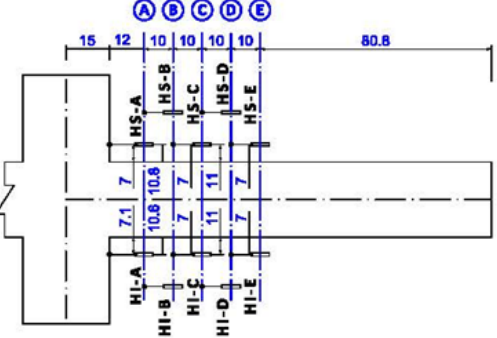
CORTE C-C'



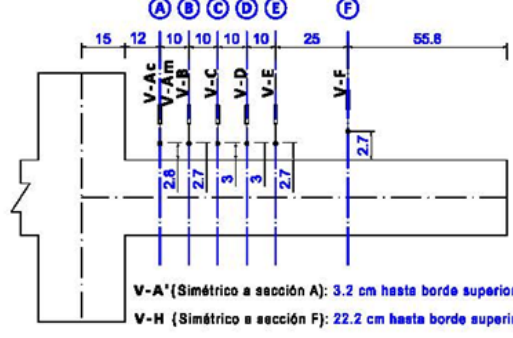


Banda	Posición x (cm)	Banda	Posición x (cm)
GWS1	17.3	GWI1	16.8
GWS2	22.1	GEI2	21.9
GES2	21.9	GWI2	21.9
GWS3	27.1	GEI3	27.0
GES3	26.9	GWI3	27.1
GWS4	32.1	GWI4	32.0
GT1	8.6		
GT2	8.5		

POSICIÓN CAPTADORES HORIZONTALES
Cotas en cm medidas a eje de captador

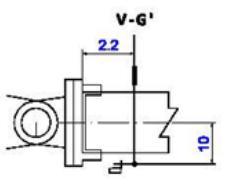


POSICIÓN CAPTADORES VERTICALES
Cotas en cm medidas a eje de captador
Medidas verticales a eje de tornillo

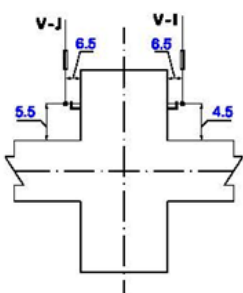


V-A* (Simétrico a sección A): 3.2 cm hasta borde superior
V-H (Simétrico a sección F): 22.2 cm hasta borde superior

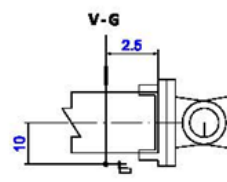
Detalle A desde cara E
Cotas en cm

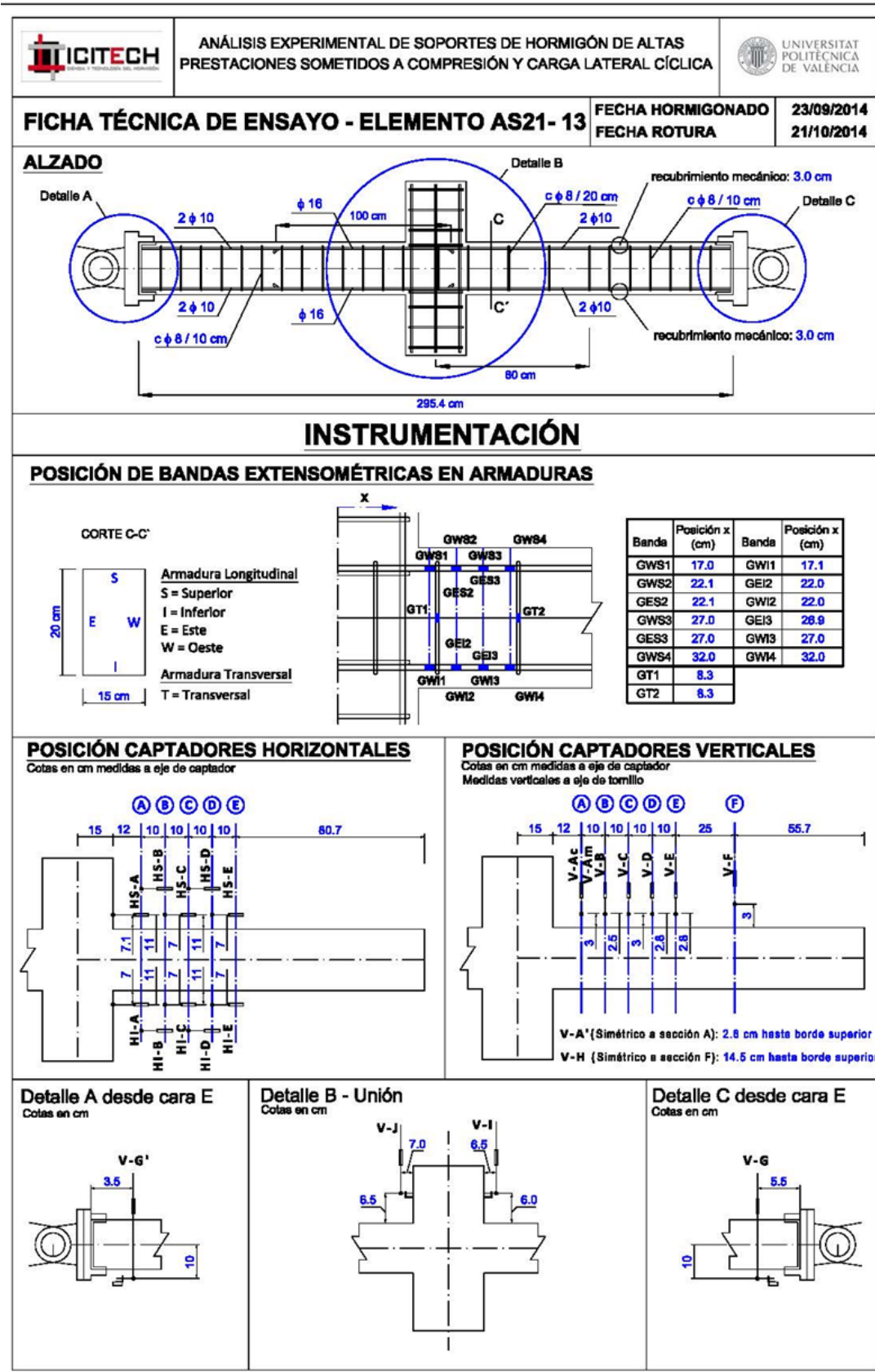


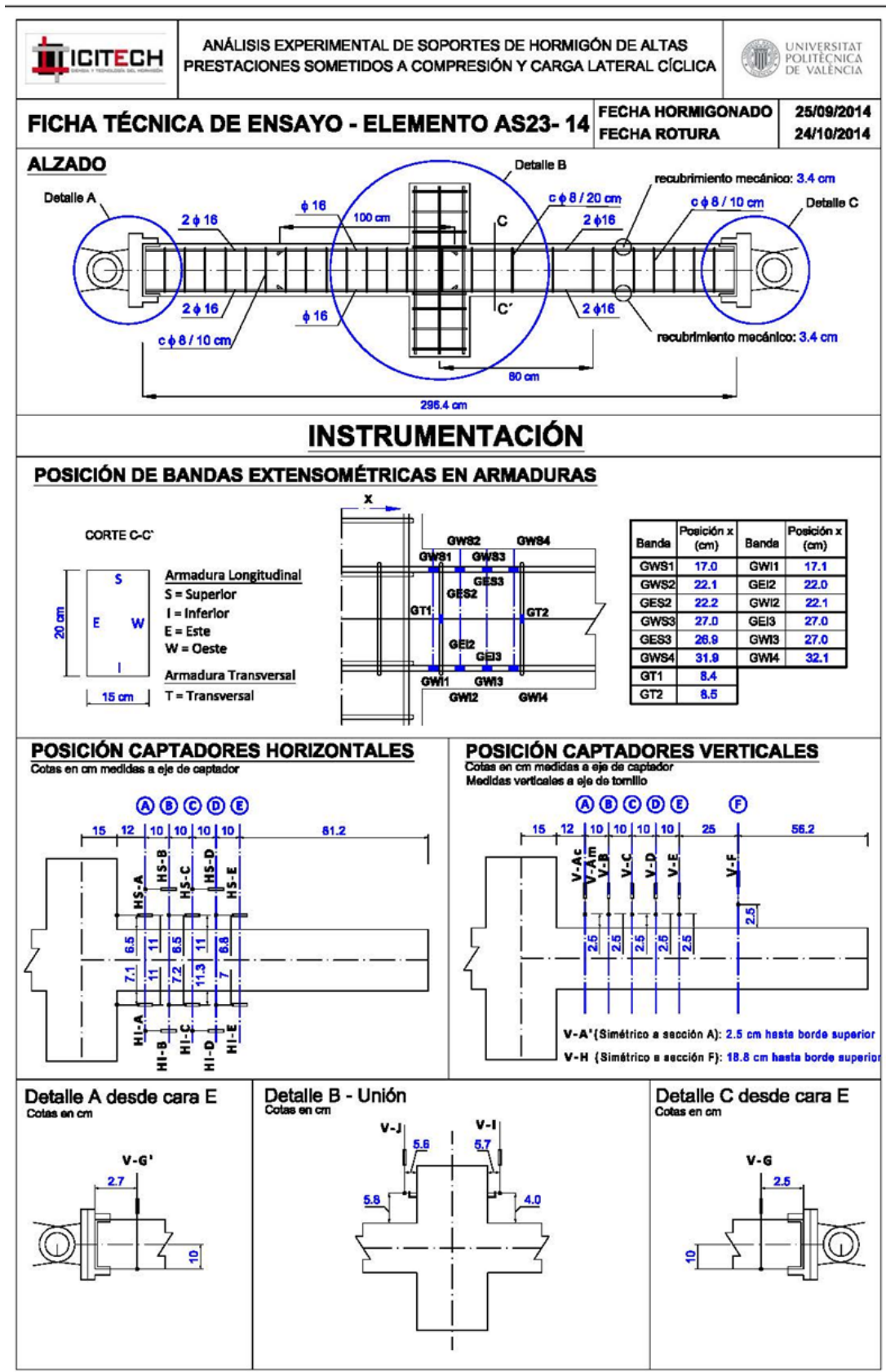
Detalle B - Unión
Cotas en cm

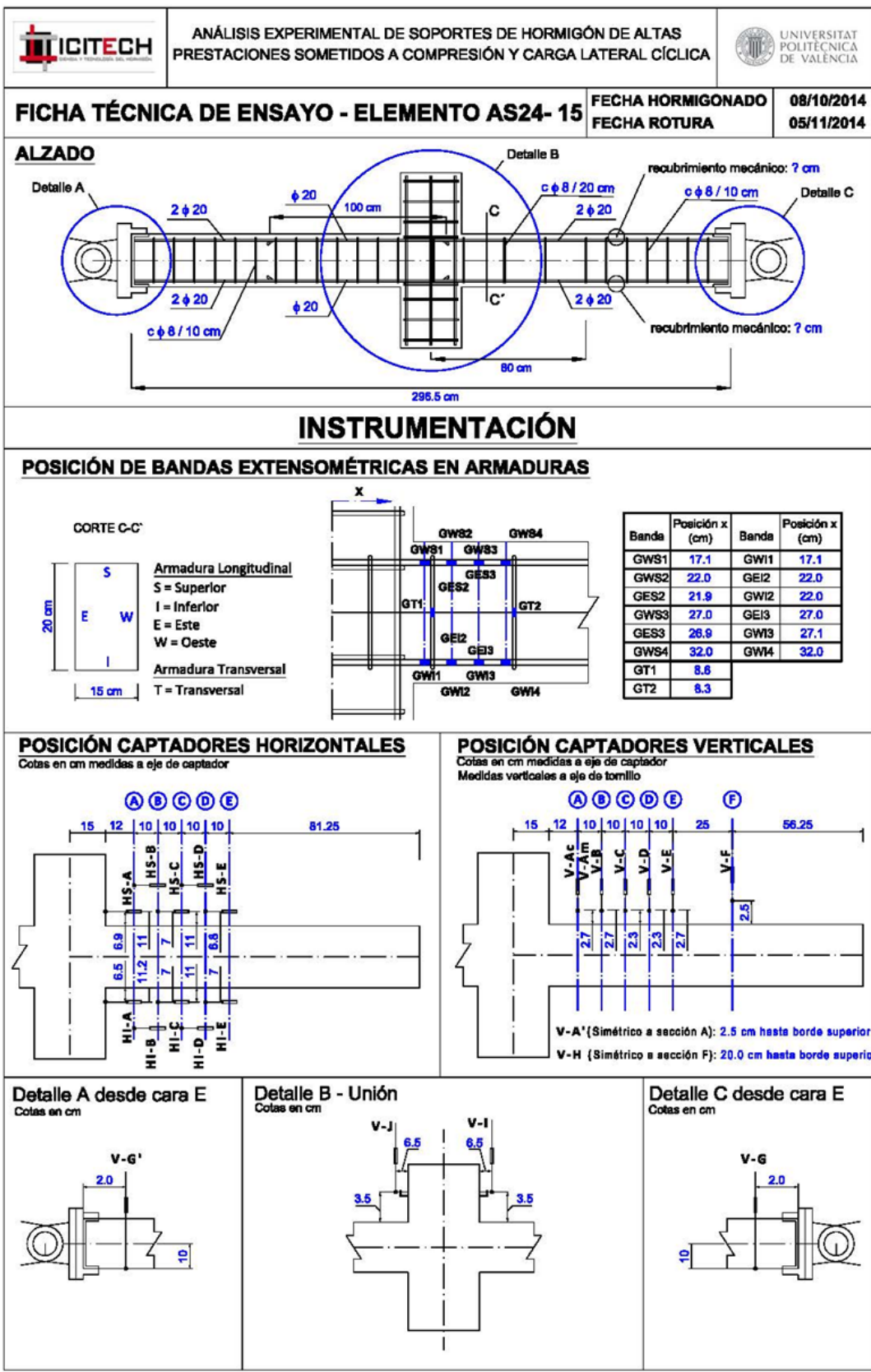



Detalle C desde cara E
Cotas en cm












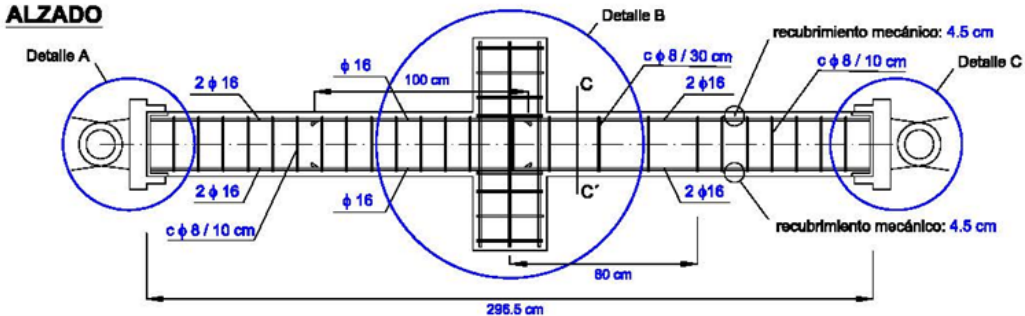
ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE SOPORTES DE HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES SOMETIDOS A COMPRESIÓN Y CARGA LATERAL CÍCLICA



FICHA TÉCNICA DE ENSAYO - ELEMENTO AS13- 16

FECHA HORMIGONADO 24/10/2014
FECHA ROTURA 21/11/2014

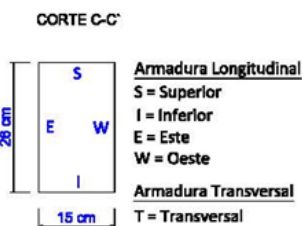
ALZADO

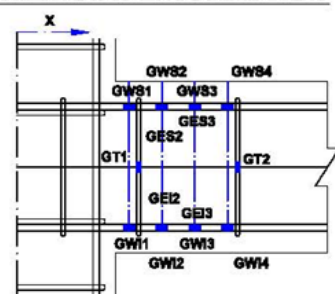


INSTRUMENTACIÓN

POSICIÓN DE BANDAS EXTENSOMÉTRICAS EN ARMADURAS

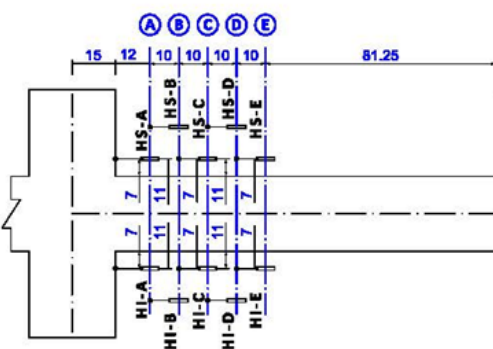
CORTE C-C'



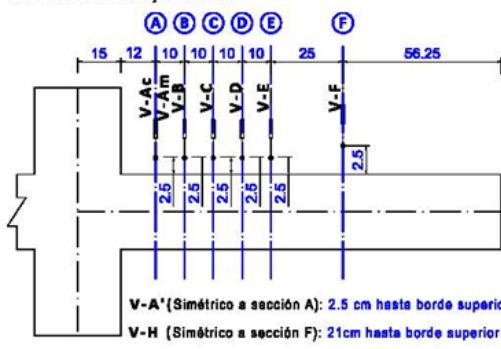


Banda	Posición x (cm)	Banda	Posición x (cm)
GWS1	17.2	GW1	17.0
GWS2	22.2	GEI2	22.0
GES2	22.0	GW2	22.0
GWS3	27.2	GEI3	27.0
GES3	26.9	GW3	27.0
GWS4	32.2	GW4	32.0
GT1	10.4		
GT2	10.5		

POSICIÓN CAPTADORES HORIZONTALES
Cotas en cm medidas a eje de captador

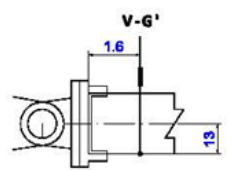


POSICIÓN CAPTADORES VERTICALES
Cotas en cm medidas a eje de captador
Medidas verticales a eje de tornillo

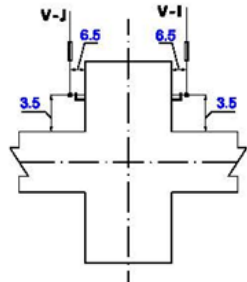


V-A' (Simétrico a sección A): 2.5 cm hasta borde superior
V-H (Simétrico a sección F): 21cm hasta borde superior

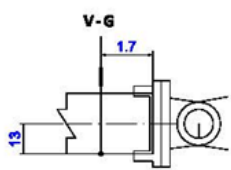
Detalle A desde cara E
Cotas en cm

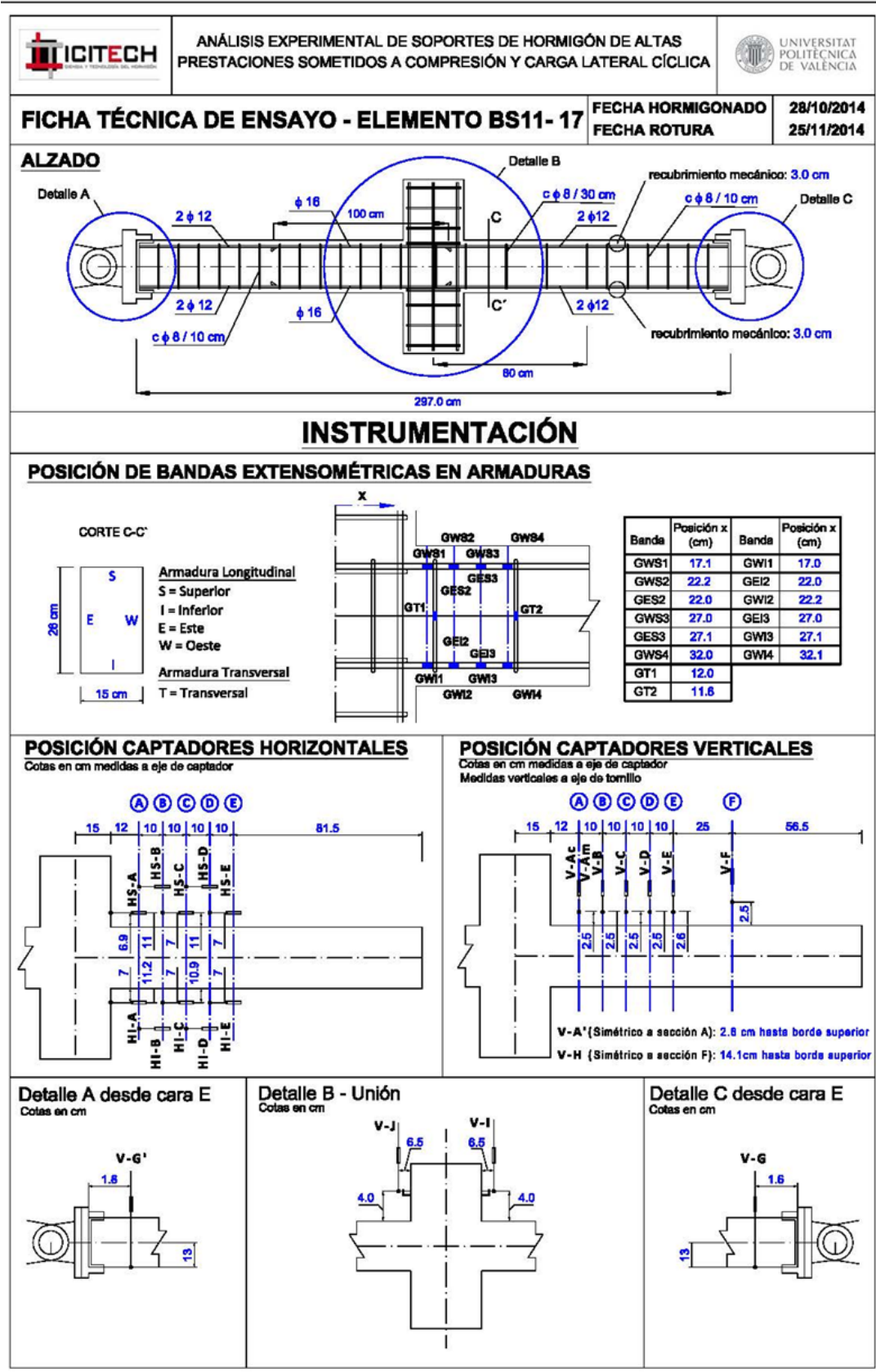



Detalle B - Unión
Cotas en cm




Detalle C desde cara E
Cotas en cm







ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE SOPORTES DE HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES SOMETIDOS A COMPRESIÓN Y CARGA LATERAL CÍCLICA

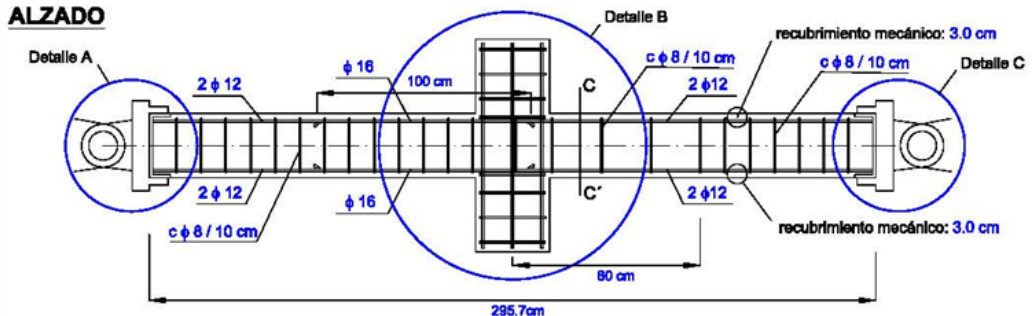


UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

FICHA TÉCNICA DE ENSAYO - ELEMENTO BS11- 18

FECHA HORMIGONADO 04/11/2014
FECHA ROTURA 02/12/2014

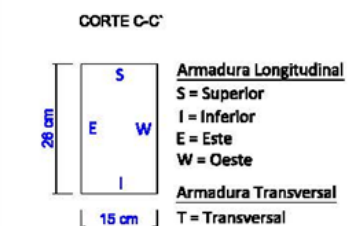
ALZADO



INSTRUMENTACIÓN

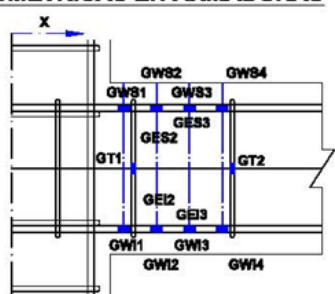
POSICIÓN DE BANDAS EXTENSOMÉTRICAS EN ARMADURAS

CORTE C-C'



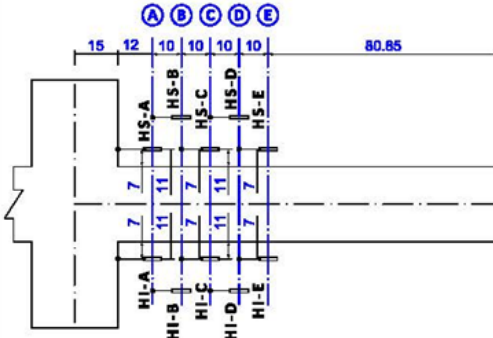
Armadura Longitudinal
S = Superior
I = Inferior
E = Este
W = Oeste

Armadura Transversal
T = Transversal

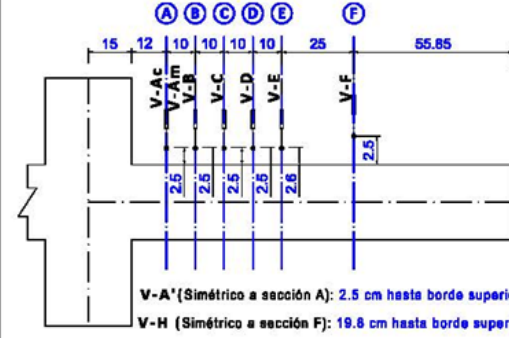


Banda	Posición x (cm)	Banda	Posición x (cm)
GWS1	17.1	GW11	17.0
GWS2	22.1	GEI2	21.9
GES2	21.9	GW12	22.0
GWS3	27.1	GEI3	27.1
GES3	27.1	GW13	27.0
GWS4	32.1	GWM4	32.1
GT1	11.5		
GT2	11.2		
GT3	11.6		

POSICIÓN CAPTADORES HORIZONTALES
Cotas en cm medidas a eje de captador

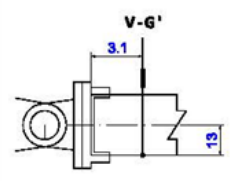


POSICIÓN CAPTADORES VERTICALES
Cotas en cm medidas a eje de captador
Medidas verticales a eje de tornillo

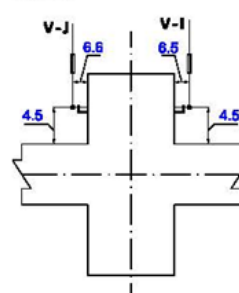


V-A* (Simétrico a sección A): 2.5 cm hasta borde superior
V-H (Simétrico a sección F): 19.8 cm hasta borde superior

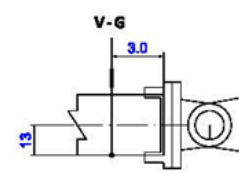
Detalle A desde cara E
Cotas en cm

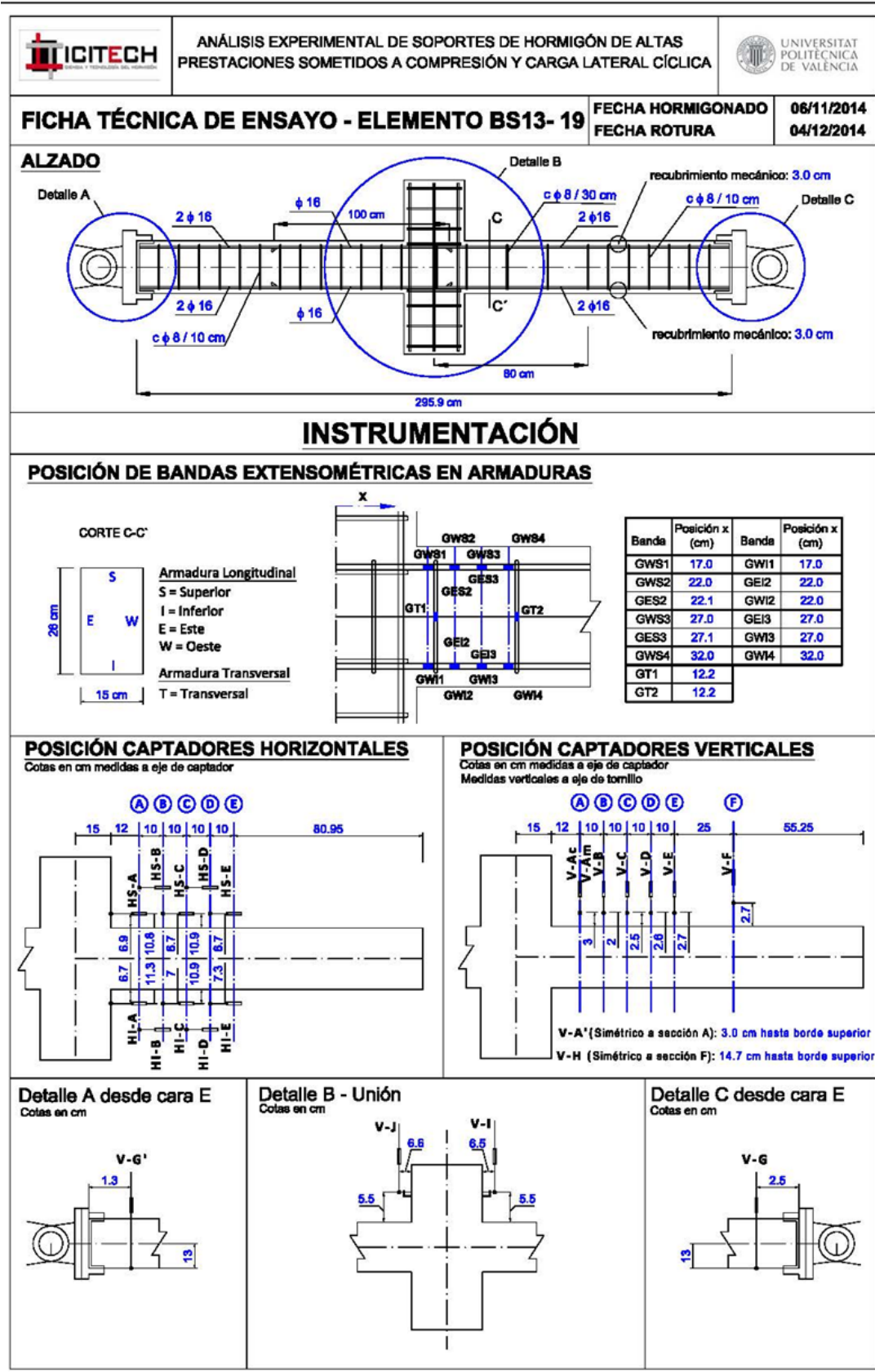



Detalle B - Unión
Cotas en cm




Detalle C desde cara E
Cotas en cm







ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE SOPORTES DE HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES SOMETIDOS A COMPRESIÓN Y CARGA LATERAL CÍCLICA



FICHA TÉCNICA DE ENSAYO - ELEMENTO AS11- 20

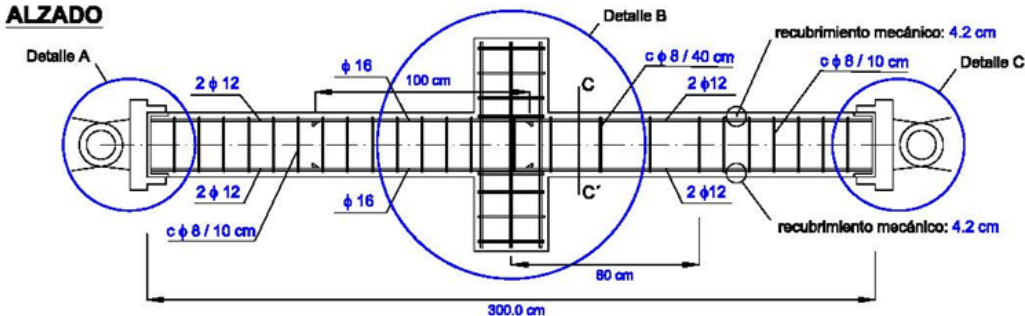
FECHA HORMIGONADO

13/01/2015

FECHA ROTURA

09/02/2015

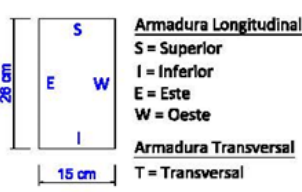
ALZADO

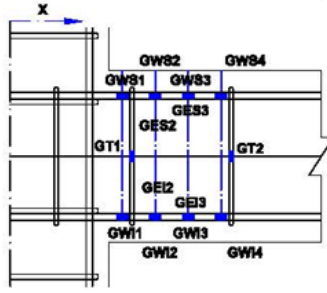


INSTRUMENTACIÓN

POSICIÓN DE BANDAS EXTENSOMÉTRICAS EN ARMADURAS

CORTE C-C'

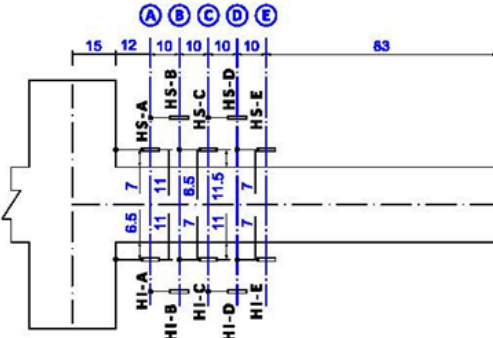




Banda	Posición x (cm)	Banda	Posición x (cm)
GWS1	17.0	GW1	17.0
GWS2	22.0	GEI2	22.0
GES2	21.9	GW12	22.0
GWS3	27.1	GEI3	28.9
GES3	28.9	GW3	27.0
GWS4	32.2	GW4	32.1
GT1	11.0		
GT2	10.8		

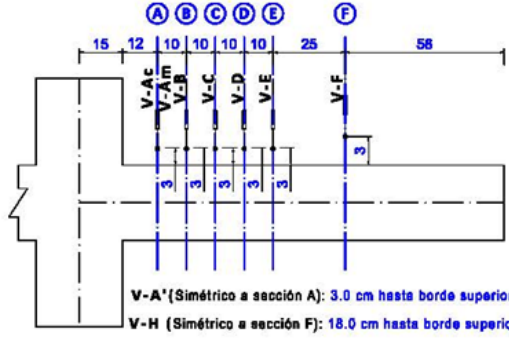
POSICIÓN CAPTADORES HORIZONTALES

Cotas en cm medidas a eje de captador



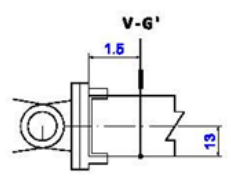
POSICIÓN CAPTADORES VERTICALES

Cotas en cm medidas a eje de captador
Medidas verticales a eje de tornillo

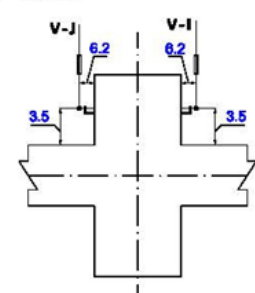


V-A' (Simétrico a sección A): 3.0 cm hasta borde superior
V-H (Simétrico a sección F): 18.0 cm hasta borde superior

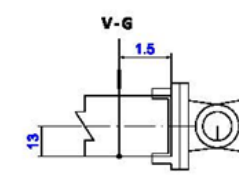
Detalle A desde cara E
Cotas en cm

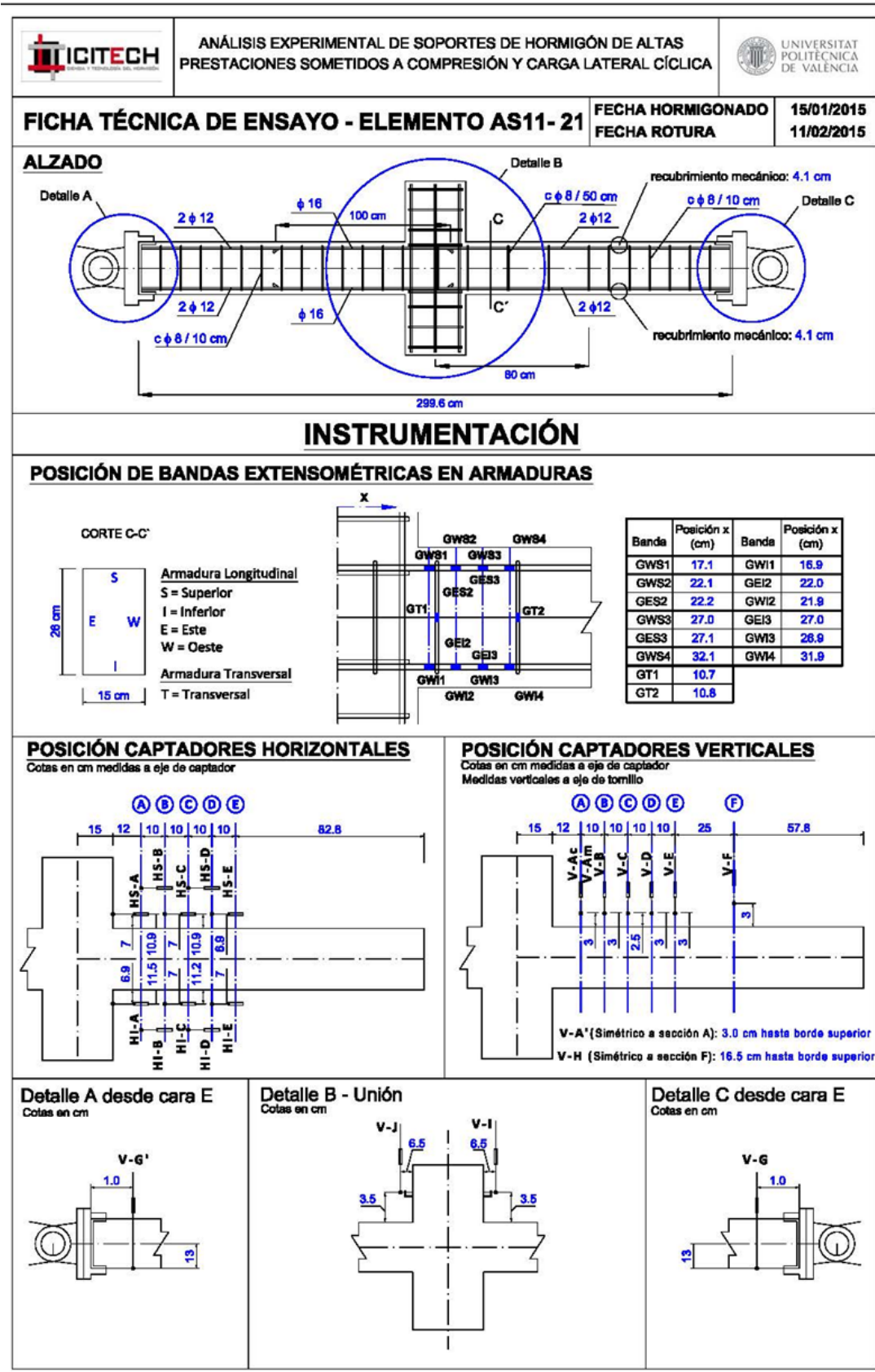


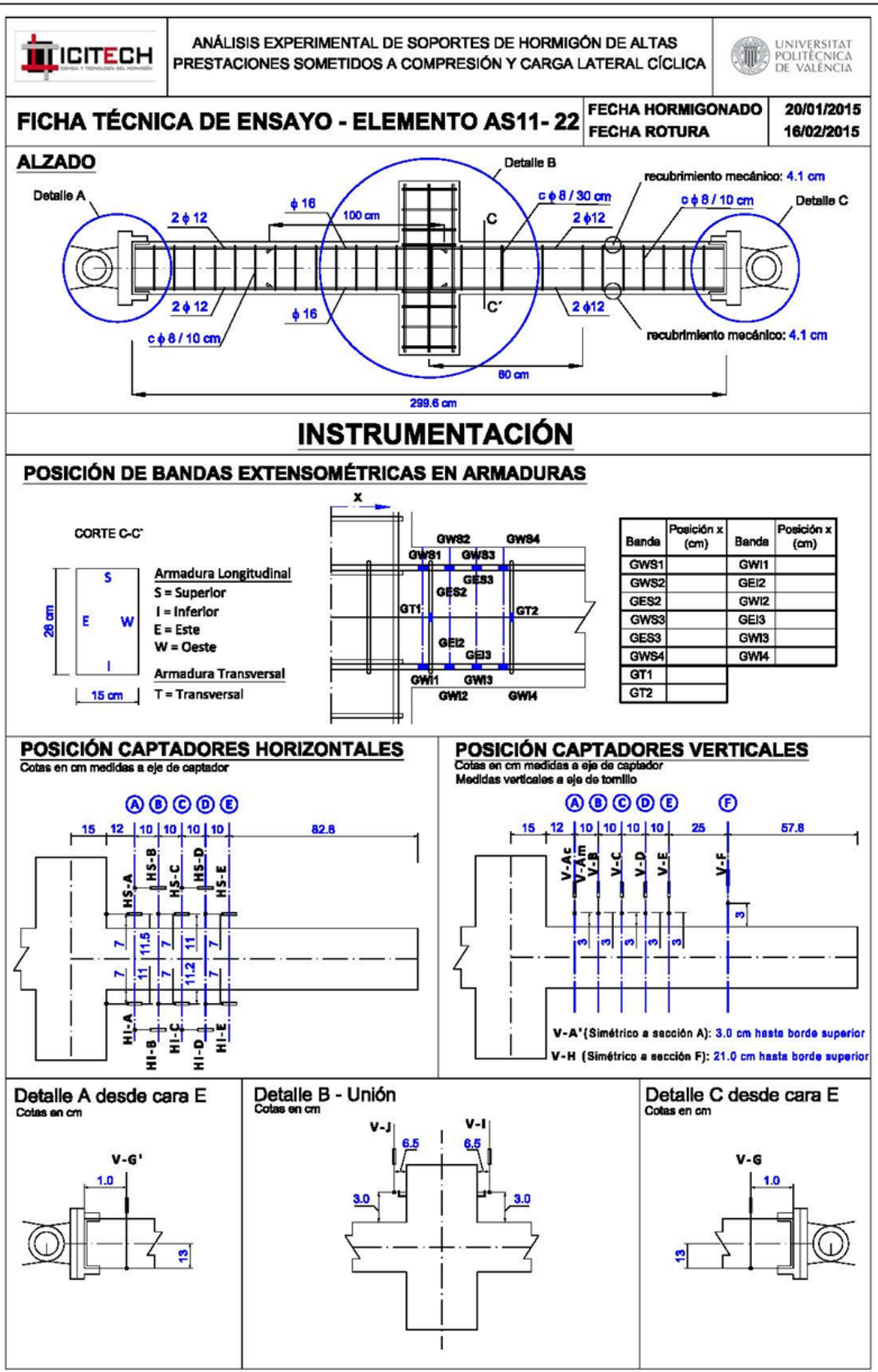
Detalle B - Unión
Cotas en cm

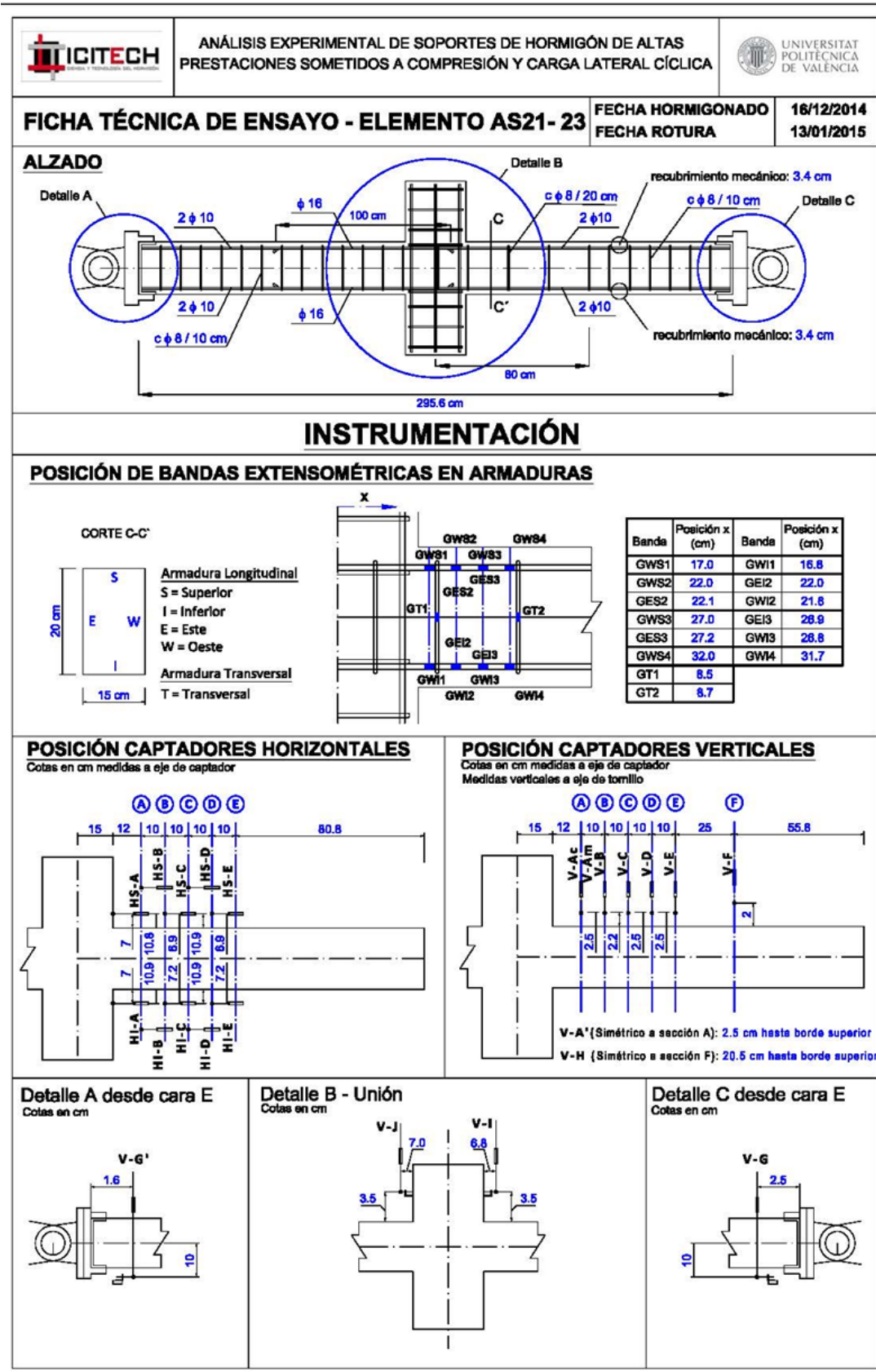


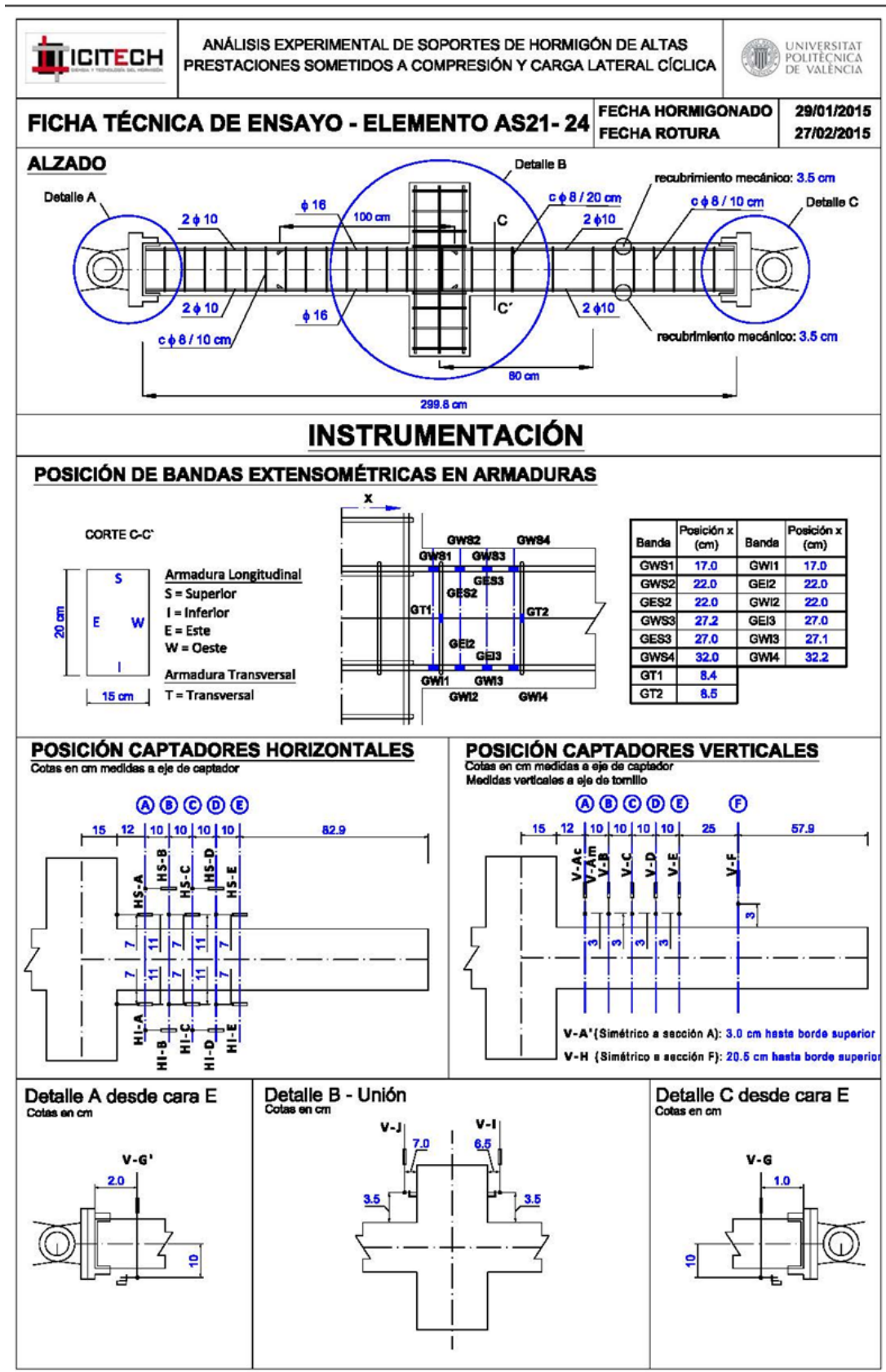
Detalle C desde cara E
Cotas en cm

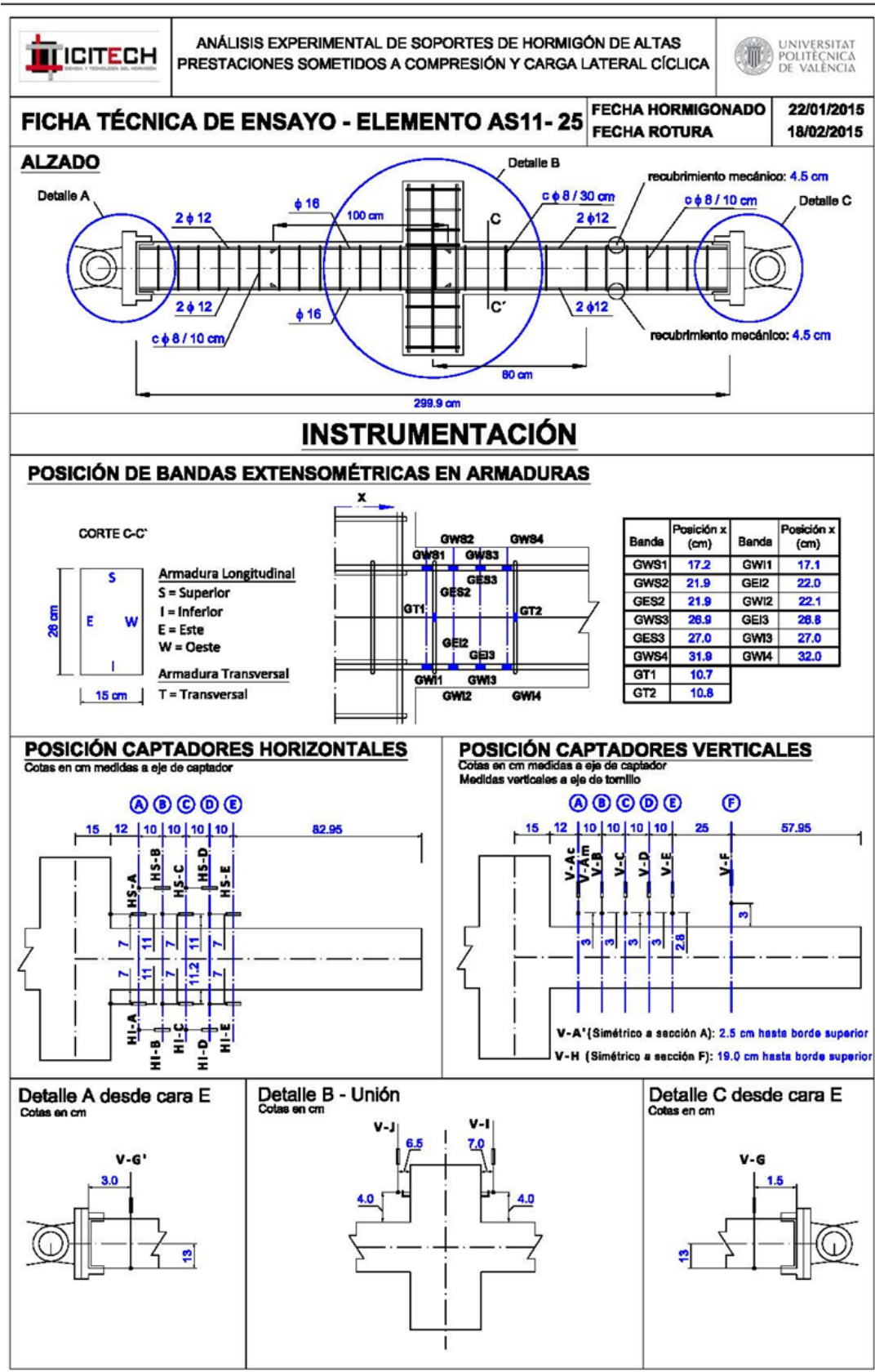








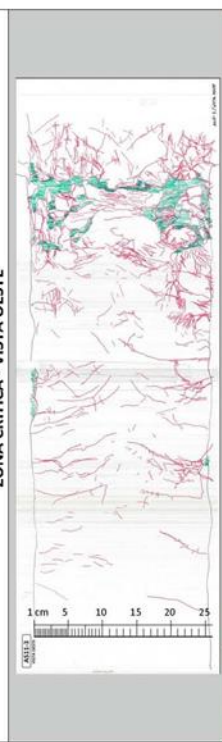














	<p style="text-align: center;">ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE SOPORTES DE HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES SOMETIDOS A COMPRESIÓN Y CARGA LATERAL CÍCLICA</p>	
FICHA TÉCNICA DE ENSAYO - FASE DE ENSAYO		
ELEMENTO Nº: AS11-2 (R)	MAPA DE FISURAS	
CARACTERÍSTICAS DEL ELEMENTO	ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE	
FECHA HORMIGONADO: 27/01/2015	ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE	
FECHA ENSAYO: 24/02/2015	MAPA DE FISURAS	
h (m) 0,26 f_{cm} (Mpa) 125,09	ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE	
b (m) 0,15 Tipo Fibras (%) MIXTAS (2%)	ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE	
f_{rac} (cm) 4,20 Esbeltez λ_e 5,77	MAPA DE FISURAS	
s_1 (m) 0,20 ρ_l 1,16	ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE	
CARACTERÍSTICAS DE LA CARGA		
Tipo de Carga	CARACTERÍSTICAS DE LA CARGA	
$V_{ciclica}$ 0,20	Cíclica	
$A_{flexural}$ (kN) 987,85	$V_{flexural}$	
V_{max} (kN) 77,32	V_{max}	
$drift_{almeno}$ 3,21	$drift_{almeno}$	
μ_e 3,09	μ_e	
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE		
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE		
MAPA DE FISURAS		

	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE SOPORTES DE HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES SOMETIDOS A COMPRESIÓN Y CARGA LATERAL CÍCLICA	 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA																																																
FICHA TÉCNICA DE ENSAYO - FASE DE ENSAYO																																																		
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td colspan="2" data-bbox="454 1167 480 1720">ELEMENTO Nº: AS11-3</td> <td colspan="2" data-bbox="454 629 480 1160">CARACTERÍSTICAS DE LA CARGA</td> </tr> <tr> <td colspan="2" data-bbox="486 1167 512 1720">CARACTERÍSTICAS DEL ELEMENTO</td> <td colspan="2" data-bbox="486 629 512 1160">Tipo de Carga</td> </tr> <tr> <td colspan="2" data-bbox="518 1167 544 1720">FECHA HORMIGONADO: 24/06/2014</td> <td colspan="2" data-bbox="518 629 544 1160">Cíclica</td> </tr> <tr> <td colspan="2" data-bbox="550 1167 576 1720">FECHA ENSAYO: 22/07/2014</td> <td colspan="2" data-bbox="550 629 576 1160">V_{total}</td> </tr> <tr> <td data-bbox="582 1167 608 1720">h (m)</td> <td data-bbox="582 1167 608 1720">0,26</td> <td data-bbox="582 629 608 1160">Axi_{total} (kN)</td> <td data-bbox="582 629 608 1160">0,20</td> </tr> <tr> <td data-bbox="614 1167 639 1720">b (m)</td> <td data-bbox="614 1167 639 1720">0,15</td> <td data-bbox="614 629 639 1160">V_{max} (kN)</td> <td data-bbox="614 629 639 1160">933,93</td> </tr> <tr> <td data-bbox="646 1167 671 1720">r_{hinc} (cm)</td> <td data-bbox="646 1167 671 1720">4,60</td> <td data-bbox="646 629 671 1160">drift_{ultimo}</td> <td data-bbox="646 629 671 1160">76,42</td> </tr> <tr> <td data-bbox="678 1167 703 1720">s_t (m)</td> <td data-bbox="678 1167 703 1720">0,10</td> <td data-bbox="678 629 703 1160">µa</td> <td data-bbox="678 629 703 1160">4,03</td> </tr> <tr> <td colspan="2" data-bbox="710 1167 735 1720"></td> <td data-bbox="710 629 735 1160">f_{cm} (Mpa)</td> <td data-bbox="710 629 735 1160">119,35</td> </tr> <tr> <td colspan="2" data-bbox="742 1167 767 1720"></td> <td data-bbox="742 629 767 1160">Tipo Fibras (%)</td> <td data-bbox="742 629 767 1160">MIXTAS (2%)</td> </tr> <tr> <td colspan="2" data-bbox="774 1167 799 1720"></td> <td data-bbox="774 629 799 1160">Esbeltez λ_a</td> <td data-bbox="774 629 799 1160">5,77</td> </tr> <tr> <td colspan="2" data-bbox="805 1167 831 1720"></td> <td data-bbox="805 629 831 1160">pl</td> <td data-bbox="805 629 831 1160">1,16</td> </tr> </table>			ELEMENTO Nº: AS11-3		CARACTERÍSTICAS DE LA CARGA		CARACTERÍSTICAS DEL ELEMENTO		Tipo de Carga		FECHA HORMIGONADO: 24/06/2014		Cíclica		FECHA ENSAYO: 22/07/2014		V _{total}		h (m)	0,26	Axi _{total} (kN)	0,20	b (m)	0,15	V _{max} (kN)	933,93	r _{hinc} (cm)	4,60	drift _{ultimo}	76,42	s _t (m)	0,10	µa	4,03			f _{cm} (Mpa)	119,35			Tipo Fibras (%)	MIXTAS (2%)			Esbeltez λ _a	5,77			pl	1,16
ELEMENTO Nº: AS11-3		CARACTERÍSTICAS DE LA CARGA																																																
CARACTERÍSTICAS DEL ELEMENTO		Tipo de Carga																																																
FECHA HORMIGONADO: 24/06/2014		Cíclica																																																
FECHA ENSAYO: 22/07/2014		V _{total}																																																
h (m)	0,26	Axi _{total} (kN)	0,20																																															
b (m)	0,15	V _{max} (kN)	933,93																																															
r _{hinc} (cm)	4,60	drift _{ultimo}	76,42																																															
s _t (m)	0,10	µa	4,03																																															
		f _{cm} (Mpa)	119,35																																															
		Tipo Fibras (%)	MIXTAS (2%)																																															
		Esbeltez λ _a	5,77																																															
		pl	1,16																																															
MAPA DE FISURAS																																																		
 <p style="text-align: center;">ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE</p>	 <p style="text-align: center;">ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE</p>																																																	
DOCUMENTACIÓN FOTOGRÁFICA																																																		
 <p style="text-align: center;">20% SUBIDA</p>	 <p style="text-align: center;">20% BAJADA</p>																																																	
FINAL ENSAYO																																																		
																																																		
OBSERVACIONES																																																		
<p>- Cuando estabamos realizando el último ciclo de drift 1.50 se produjo un apagón eléctrico ajeno al ensayo. Se reinicia.</p> <p>- Drift 1.00 : En la segunda subida se observa Fisura Vertical arriba entre la 1ª y 3ª columna DEMEC. En la segunda bajada se observa Fisura Vertical abajo entre la 1ª y 3ª columna DEMEC.</p>																																																		




ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE SOPORTES DE HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES SOMETIDOS A COMPRESIÓN Y CARGA LATERAL CÍCLICA




UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

FICHA TÉCNICA DE ENSAYO - FASE DE ENSAYO


ELEMENTO Nº: AS11-4	
CARACTERÍSTICAS DEL ELEMENTO	
FECHA HORMIGONADO:	26/06/2014
FECHA ENSAYO:	24/07/2014
h (m)	0,26
b (m)	0,15
f_{cm} (Mpa)	125,19
Tipo Fibras (%)	LARGAS (2%)
f_{rac} (cm)	4,50
ϵ_s (m)	0,30
	pl
	1,16




MAPA DE FISURAS
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE




MAPA DE FISURAS
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE



20% SUBIDA



20% BAJADA






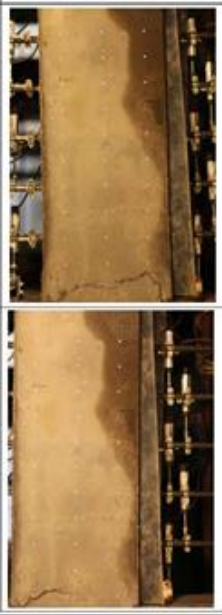




FINAL ENSAYO

DOCUMENTACIÓN FOTOGRÁFICA


OBSERVACIONES

- Se hacen dos tomas de ceros.
- Drift 1.50 : Primera bajada aparece, aproximadamente a 5 cm de unión, Fisura Vertical de abajo arriba y se produce desconchado en unión que se observa en la cara superior (ancho pilar). También se observan dentro de la unión (fisura horizontal) y en la zona reforzada (fisuras verticales) que coinciden con Ast, posible fallo de recubrimiento.
- Drift 2.00 : Primera subida aparece Fisura Vertical de tracción a la altura de la primera columna de DEMEC.
- Drift 3.00 : Al finalizar, ha explotado el recubrimiento lateral a ambos lados de la probeta.

	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE SOPORTES DE HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES SOMETIDOS A COMPRESIÓN Y CARGA LATERAL CÍCLICA	 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA																																
FICHA TÉCNICA DE ENSAYO - FASE DE ENSAYO																																		
<table border="1"> <tr> <td colspan="2" data-bbox="454 1176 486 1720">ELEMENTO Nº: AS11-7</td> <td colspan="2" data-bbox="454 638 486 1164">CARACTERÍSTICAS DE LA CARGA</td> </tr> <tr> <td colspan="2" data-bbox="486 1176 518 1720">CARACTERÍSTICAS DEL ELEMENTO</td> <td colspan="2" data-bbox="486 638 518 1164">Cíclica</td> </tr> <tr> <td colspan="2" data-bbox="518 1176 550 1720">FECHA HORMIGONADO: 02/09/2014</td> <td colspan="2" data-bbox="518 638 550 1164">Tipo de Carga</td> </tr> <tr> <td colspan="2" data-bbox="550 1176 582 1720">FECHA ENSAYO: 30/09/2014</td> <td colspan="2" data-bbox="550 638 582 1164">0,20</td> </tr> <tr> <td data-bbox="582 1176 614 1720">h (m)</td> <td data-bbox="582 1176 614 1720">0,26</td> <td data-bbox="582 638 614 1164">Avilanzad (kN)</td> <td data-bbox="582 638 614 1164">1001,61</td> </tr> <tr> <td data-bbox="614 1176 646 1720">b (m)</td> <td data-bbox="614 1176 646 1720">0,15</td> <td data-bbox="614 638 646 1164">V_{max} (kN)</td> <td data-bbox="614 638 646 1164">82,74</td> </tr> <tr> <td data-bbox="646 1176 678 1720">f_{resc} (cm)</td> <td data-bbox="646 1176 678 1720">4,50</td> <td data-bbox="646 638 678 1164">diff_{afinno}</td> <td data-bbox="646 638 678 1164">3,23</td> </tr> <tr> <td data-bbox="678 1176 710 1720">s₁ (m)</td> <td data-bbox="678 1176 710 1720">0,30</td> <td data-bbox="678 638 710 1164">µs</td> <td data-bbox="678 638 710 1164">2,82</td> </tr> </table>			ELEMENTO Nº: AS11-7		CARACTERÍSTICAS DE LA CARGA		CARACTERÍSTICAS DEL ELEMENTO		Cíclica		FECHA HORMIGONADO: 02/09/2014		Tipo de Carga		FECHA ENSAYO: 30/09/2014		0,20		h (m)	0,26	Avilanzad (kN)	1001,61	b (m)	0,15	V _{max} (kN)	82,74	f _{resc} (cm)	4,50	diff _{afinno}	3,23	s ₁ (m)	0,30	µs	2,82
ELEMENTO Nº: AS11-7		CARACTERÍSTICAS DE LA CARGA																																
CARACTERÍSTICAS DEL ELEMENTO		Cíclica																																
FECHA HORMIGONADO: 02/09/2014		Tipo de Carga																																
FECHA ENSAYO: 30/09/2014		0,20																																
h (m)	0,26	Avilanzad (kN)	1001,61																															
b (m)	0,15	V _{max} (kN)	82,74																															
f _{resc} (cm)	4,50	diff _{afinno}	3,23																															
s ₁ (m)	0,30	µs	2,82																															
MAPA DE FISURAS																																		
 <p>ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE</p>	 <p>ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE</p>																																	
DOCUMENTACIÓN FOTOGRÁFICA																																		
 <p>20% SUBIDA</p>	 <p>20% BAJADA</p>																																	
FINAL ENSAYO																																		
 <p style="text-align: center;">OBSERVACIONES</p> <ul style="list-style-type: none"> - Pandean lateralmente las cuatro armaduras longitudinales. El recubrimiento lateral es menor que el superior e inferior. En ese momento se para el ensayo. - Drift 1.50 : Durante la 2ª subida se observan Fisuras Verticales en la zona de unión y se escucha crujiir. - Drift 1.50 : Durante la 1ª subida se observan tres Fisuras en la zona de unión y se escucha crujiir. 																																		



ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE SOPORTES DE HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES SOMETIDOS A COMPRESIÓN Y CARGA LATERAL CÍCLICA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

FICHA TÉCNICA DE ENSAYO - FASE DE ENSAYO

ELEMENTO Nº: AS11-8	
CARACTERÍSTICAS DEL ELEMENTO	
FECHA HORMIGONADO:	04/09/2014
FECHA ENSAYO:	02/10/2014
h (m)	0,26
b (m)	0,15
f_{cm} (Mpa)	130,60
Tipo Fibras (%)	MIXTAS (1%)
f_{red} (cm)	4,70
Esbeltez λ_e	5,77
s_1 (m)	0,20
pl	3,16

CARACTERÍSTICAS DE LA CARGA	
Tipo de Carga	Cíclica
V_{testal}	0,20
$Ax_{lateral}$ (kN)	1024,80
V_{max} (kN)	85,76
drift Δ_{max}	3,18
H_u	2,78

MAPA DE FISURAS

ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE

ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE

DOCUMENTACIÓN FOTOGRÁFICA


20% SUBIDA

20% BAJADA


FINAL ENSAYO

OBSERVACIONES

- Pandeo lateralmente la armadura longitudinal.
- Drift 1.50 : Durante la 1ª bajada se observa Fisura Vertical con salto de fibras.
- Drift 2.50 : Se observa pandeo de armaduras y al finalizar el primer ciclo se para el ensayo.



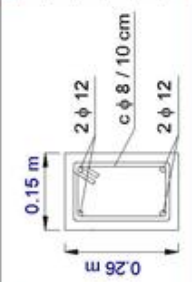
ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE SOPORTES DE HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES SOMETIDOS A COMPRESIÓN Y CARGA LATERAL CÍCLICA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

FICHA TÉCNICA DE ENSAYO - FASE DE ENSAYO

ELEMENTO Nº: AS11-9	
CARACTERÍSTICAS DEL ELEMENTO	
FECHA HORMIGONADO:	09/09/2014
FECHA ENSAYO:	07/10/2014
h (m)	0,26
b (m)	0,15
f_{cm} (Mpa)	134,71
Tipo Fibras (%)	MIXTAS (1%)
f_{resc} (cm)	4,00
s_1 (m)	0,10
Esbeltez λ_s	5,77
ρ_l	1,16



0.15 m

0.26 m


2 ϕ 12

c ϕ 8 / 10 cm


2 ϕ 12

CARACTERÍSTICAS DE LA CARGA

Tipo de Carga	Cíclica
ν_{total}	0,20
$A_{fluctuad}$ (kN)	1062,08
V_{max} (kN)	84,96
$drift_{otimo}$	3,32
μ_s	2,87



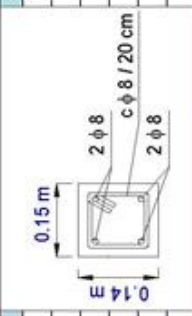
ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE SOPORTES DE HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES SOMETIDOS A COMPRESIÓN Y CARGA LATERAL CÍCLICA



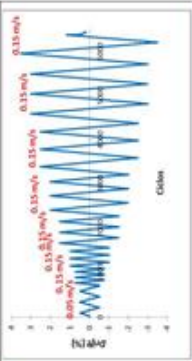
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

FICHA TÉCNICA DE ENSAYO - FASE DE ENSAYO

ELEMENTO Nº: AS31-11		FECHA HORMIGONADO: 17/10/2014		FECHA ENSAYO: 14/11/2014	
h (m)	0,14	f_{cm} (Mpa)	128,95	Tipo Fibras (%)	MIXTAS (2%)
b (m)	0,15	Tipo Fibras (%)	MIXTAS (2%)	Esbeltez λ_s	10,71
f_{resc} (cm)	2,60	pl	0,96		




CARACTERÍSTICAS DE LA CARGA	
Tipo de Carga	Cíclica
v _{total}	0,20
Ax _{total} (kN)	551,07
V _{max} (kN)	15,32
drift _{ultimo}	3,71
μ _s	3,59




MAPA DE FISURAS

ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE




ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE




DOCUMENTACIÓN FOTOGRÁFICA

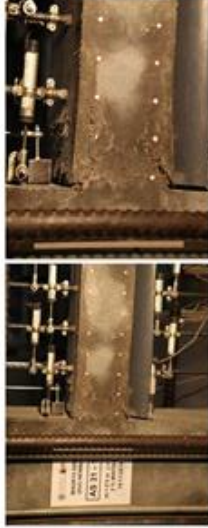
20% SUBIDA



20% BAJADA




FINAL ENSAYO




OBSERVACIONES

- Fotos con cámara de Luis (menos frecuencia en toma de fotos). No estaba pintada con resina la cara W, se pintó en el último ciclo del primer drift.
- Drift 0.75: en subida de primer ciclo, la banda GEI2 va mal.
- Drift 3.00: en subida de primer ciclo, fisura vertical, de arriba abajo, en toda la sección transversal, cerca de la unión "stub"-pilar. En subida de segundo ciclo, fisura horizontal transversal, en la cara superior de la sección, entre 2ª y 3ª columna de puntos.
- Drift 3.50: en subida de primer ciclo, salta el recubrimiento.




ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE SOPORTES DE HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES SOMETIDOS A COMPRESIÓN Y CARGA LATERAL CÍCLICA



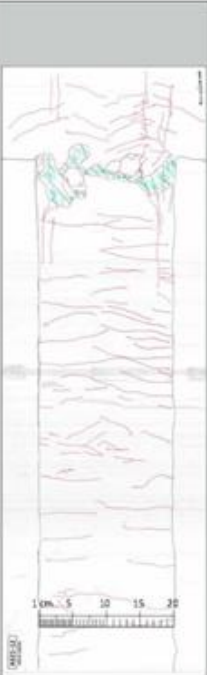
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

FICHA TÉCNICA DE ENSAYO - FASE DE ENSAYO


ELEMENTO Nº: AS21-12	
CARACTERÍSTICAS DEL ELEMENTO	
FECHA HORMIGONADO:	18/09/2014
FECHA ENSAYO:	17/10/2014
h (m)	0,20
f _{cm} (Mpa)	142,28
b (m)	0,15
Tipo Fibras (%)	MIXTAS (2%)
f _{rac} (cm)	3,00
Esbeltez λ _e	7,50
ρ _f (m)	0,20
pl	1,05




MAPA DE FISURAS
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE




MAPA DE FISURAS
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE



20% SUBIDA

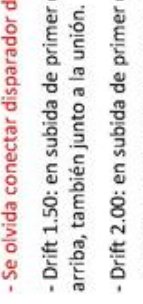



20% BAJADA




FINAL ENSAYO

DOCUMENTACIÓN FOTOGRÁFICA









OBSERVACIONES

- Se olvida conectar disparador de cámara de fotos, comienzan los disparos de fotos en la bajada del primer ciclo del drift 0.50.
- Drift 1.50: en subida de primer ciclo, fisura vertical, de arriba abajo, justo en sección de unión "stub"-pilar. En bajada de primer ciclo, fisura vertical, de abajo arriba, también junto a la unión.
- Drift 2.00: en subida de primer ciclo, aparece una nueva fisura vertical, de arriba abajo, entre columnas 5ª y 6ª de puntos.
- Drift 2.50: en subida de primer ciclo, se observan, del lado reforzado, 6 fisuras verticales a la altura de los estribos.
- Drift 3.50: al completar el segundo ciclo se para el ensayo, ya que se observa mucha abertura de fisura y se podría producir la rotura de la armadura longitudinal.



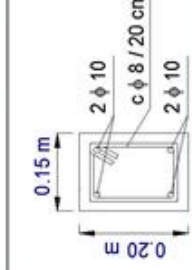
ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE SOPORTES DE HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES SOMETIDOS A COMPRESIÓN Y CARGA LATERAL CÍCLICA




UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

FICHA TÉCNICA DE ENSAYO - FASE DE ENSAYO

ELEMENTO Nº: AS21-13	
CARACTERÍSTICAS DEL ELEMENTO	
FECHA HORMIGONADO:	23/09/2014
FECHA ENSAYO:	21/10/2014
h (m)	0,20
b (m)	0,15
f_{cm} (Mpa)	133,98
Tipo Fibras (%)	MIXTAS (2%)
f_{resc} (cm)	3,00
s_1 (m)	0,20
	Esbeltez λ_s
	pl
	1,05



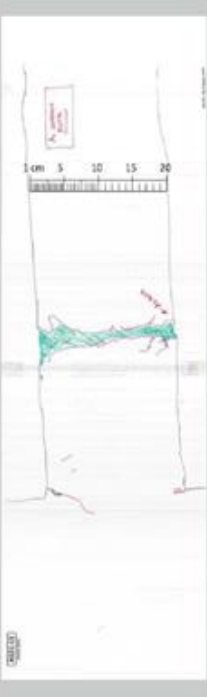


CARACTERÍSTICAS DE LA CARGA

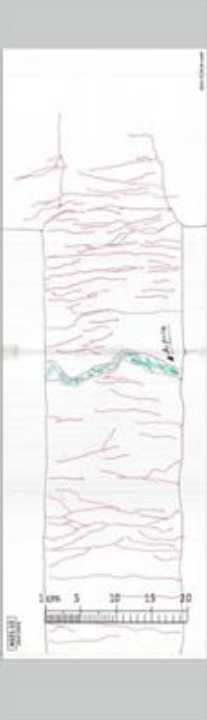
Tipo de Carga	Cíclica
V_{total}	0,00
A_{vibrat} (kN)	0,00
V_{max} (kN)	15,83
$drift_{otimo}$	3,21
μ_s	2,54

MAPA DE FISURAS

ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE




ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE




DOCUMENTACIÓN FOTOGRÁFICA


20% SUBIDA



20% BAJADA




FINAL ENSAYO




OBSERVACIONES

- Se hacen tres toma de ceros.
- Drift 1.50: en subida de primer ciclo, aparece una fisura vertical, de arriba abajo, a la altura de la 5ª columna de puntos.
- Drift 2.00: las bandas de la sección 2 y 4 plastifican.
- Drift 2.50: en bajada de segundo ciclo, el captador VJ se ha soltado.
- Drift 3.00: en bajada de primer ciclo, se rompe la armadura longitudinal, sólo una barra. Se para el ensayo.



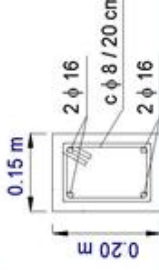
ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE SOPORTES DE HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES SOMETIDOS A COMPRESIÓN Y CARGA LATERAL CÍCLICA

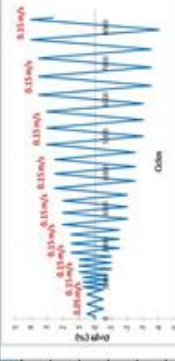


UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

FICHA TÉCNICA DE ENSAYO - FASE DE ENSAYO


ELEMENTO Nº: AS23-14	
CARACTERÍSTICAS DEL ELEMENTO	
FECHA HORMIGONADO:	25/09/2014
FECHA ENSAYO:	24/10/2014
h (m)	0,20
b (m)	0,15
f_{cm} (Mpa)	145,53
Tipo Fibras (%)	MIXTAS (2%)
f_{rac} (cm)	3,40
s_1 (m)	0,20
	Esbeltez λ_e
	7,50
	pl
	2,68






CARACTERÍSTICAS DE LA CARGA	
Tipo de Carga	Cíclica
V_{total}	0,20
Ax_{total} (kN)	875,92
V_{max} (kN)	56,32
$drift_{alicio}$	4,20
H_u	2,79

MAPA DE FISURAS




ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE

MAPA DE FISURAS

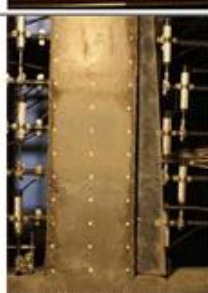


ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE


20% SUBIDA



20% BAJADA




FINAL ENSAYO




DOCUMENTACIÓN FOTOGRÁFICA

OBSERVACIONES

- Drift 2.00: en subida primer ciclo, aparece fisura vertical, de arriba abajo, a la altura de la 1ª columna de puntos.
- Drift 2.50: en bajada primer ciclo, aparecen 3 fisuras verticales seguidas, de abajo arriba, entre la 1ª y 2ª columnas de puntos.
- Drift 4.00: se hace la subida al segundo ciclo de este drift.

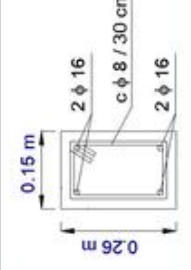



ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE SOPORTES DE HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES SOMETIDOS A COMPRESIÓN Y CARGA LATERAL CÍCLICA




FICHA TÉCNICA DE ENSAYO - FASE DE ENSAYO

ELEMENTO Nº: AS13-16	
CARACTERÍSTICAS DEL ELEMENTO	
FECHA HORMIGONADO:	24/10/2014
FECHA ENSAYO:	21/11/2014
h (m)	0,26
b (m)	0,15
f_{cm} (Mpa)	125,79
Tipo Fibras (%)	MIXTAS (2%)
f_{rac} (cm)	4,50
s_1 (m)	0,30
Esbeltez λ_e	5,77
pl	2,06






MAPA DE FISURAS




ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE




ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE


DOCUMENTACIÓN FOTOGRÁFICA



20% SUBIDA




20% BAJADA




FINAL ENSAYO

OBSERVACIONES

- Drift 1.50: en subida primer ciclo, fisura vertical en la unión "stub"-pilar.
- Drift 1.50: en bajada segundo ciclo, se observan dos fisuras, una fisura vertical entre la 1ª y 2ª columna de puntos y una fisura horizontal en la zona superior.



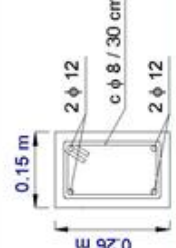
ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE SOPORTES DE HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES SOMETIDOS A COMPRESIÓN Y CARGA LATERAL CÍCLICA

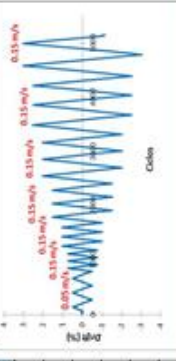


UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA


FICHA TÉCNICA DE ENSAYO - FASE DE ENSAYO

ELEMENTO Nº: BS11-17	
CARACTERÍSTICAS DEL ELEMENTO	CARACTERÍSTICAS DE LA CARGA
FECHA HORMIGONADO: 28/10/2014	Tipo de Carga: Cíclica
FECHA ENSAYO: 25/11/2014	V_{fiscal} : 0,20
f_{cm} (Mpa): 0,26	Ax_{fiscal} (kN): 966,23
Tipo Fibras (%): 121,87	V_{max} (kN): 83,33
MIXTAS (2%):	$drift_{fiscal}$: 3,42
f_{resc} (cm): 3,00	μ_s : 3,19
Esbeltez λ_s : 5,77	
s_1 (m): 0,30	
pl : 1,16	






MAPA DE FISURAS




ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE




ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE


DOCUMENTACIÓN FOTOGRÁFICA



20% SUBIDA




20% BAJADA




FINAL ENSAYO

OBSERVACIONES

- Drift 1.50: en subida de primer ciclo, aparecen daños en la parte superior en la zona de la unión "stub"-pilar. En la bajada del primer ciclo aparece fisura vertical, de abajo arriba, cercana a la unión.
- Drift 2.00: en subida de primer ciclo, aparece una gran fisura vertical, de arriba abajo. En la bajada del primer ciclo la aparece una fisura vertical, de abajo arriba, que se junta con la superior.
- Drift 3.00: en subida de primer ciclo, aparece un deterioro de las zonas colindantes a la unión, tanto en la parte superior como inferior.



ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE SOPORTES DE HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES SOMETIDOS A COMPRESIÓN Y CARGA LATERAL CÍCLICA




FICHA TÉCNICA DE ENSAYO - FASE DE ENSAYO

ELEMENTO Nº: BS11-18


CARACTERÍSTICAS DEL ELEMENTO	
FECHA HORMIGONADO:	04/11/2014
FECHA ENSAYO:	02/12/2014
h (m)	0,26
b (m)	0,15
f_{cm} (Mpa)	122,04
Tipo Fibras (%)	MIXTAS (2%)
f_{rec} (cm)	3,00
Esbeltez λ_e	5,77
ρ_l	1,16

MAPA DE FISURAS




CARACTERÍSTICAS DE LA CARGA


Tipo de Carga	Cíclica
U_{plast}	0,20
Ax_{1plast} (kN)	964,31
V_{max} (kN)	82,26
drift último	3,70
H_s	3,43



20% SUBIDA




20% BAJADA




DOCUMENTACIÓN FOTOGRÁFICA


20% SUBIDA




20% BAJADA



FINAL ENSAYO




FINAL ENSAYO




OBSERVACIONES

- En toma de datos de CONTROL el dato de V está mal, druck mal conectado, no firmos de esos datos.
- Drift 1.50: 1ª subida en primer ciclo, las bandas marcan y aparece una fisura en la esquina con la unión.
- Drift 2.00: durante 1ª subida de primer ciclo, fisuras verticales entre la 1ª y 3ª columna de puntos.
- Drift 2.50: durante 1ª subida de tercer ciclo, se observa pandeo de armadura longitudinal superior. Al inicio de la bajada del tercer ciclo se para el ensayo ya que se observa que hay mucho pandeo.
- Durante el 2ª ciclo del drift 3.00 me doy cuenta de que los captadores verticales de los extremos están, uno despegado (VG) y otro apoyado contra la probeta (VG).




ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE SOPORTES DE HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES SOMETIDOS A COMPRESIÓN Y CARGA LATERAL CÍCLICA




FICHA TÉCNICA DE ENSAYO - FASE DE ENSAYO


ELEMENTO Nº: AS11-20	
CARACTERÍSTICAS DEL ELEMENTO	
FECHA HORMIGONADO:	13/01/2015
FECHA ENSAYO:	09/02/2015
h (m)	0,26
f _{cm} (Mpa)	119,29
b (m)	0,15
Tipo Fibras (%)	MIXTAS (2%)
f _{rec} (cm)	4,20
Esbeltez λ _e	5,77
s ₁ (m)	0,40
pl	1,16




MAPA DE FISURAS
ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE




MAPA DE FISURAS
ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE



20% SUBIDA



20% BAJADA









FINAL ENSAYO

DOCUMENTACIÓN FOTOGRÁFICA


OBSERVACIONES

- Drift 1.00: En la primera subida aparece una fisura vertical (de arriba a abajo) justo en la unión, situada antes de la 1ª línea de puntos.
- Drift 1.50: durante la bajada de tercer ciclo aparece una fisura en "S" dentro de la unión.
- Drift 2.00: durante la 1ª bajada del primer ciclo, posible pandeo de la armadura longitudinal superior e inferior
- Drift 2.50: durante la 1ª subida del primer ciclo, ha pandeado la armadura longitudinal de golpe. La armadura superior pandea hacia arriba, la armadura inferior pandea lateralmente. Se para inmediatamente el ensayo.

	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE SOPORTES DE HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES SOMETIDOS A COMPRESIÓN Y CARGA LATERAL CÍCLICA	 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
FICHA TÉCNICA DE ENSAYO - FASE DE ENSAYO		
ELEMENTO Nº: AS11-22		
CARACTERÍSTICAS DEL ELEMENTO		
FECHA HORMIGONADO: 20/01/2015		
FECHA ENSAYO: 16/02/2015		
h (m) : 0,26	f_{cm} (Mpa) : 117,94	
b (m) : 0,15	Tipo Fibras (%) : MIXTAS (2%)	
f_{rac} (cm) : 4,10	Esbeltez λ_c : 5,77	
s₁ (m) : 0,30	pl : 3,16	H₀ : 3,16
MAPA DE FISURAS		
		ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE
		ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE
DOCUMENTACIÓN FOTOGRÁFICA		
20% SUBIDA	20% BAJADA	FINAL ENSAYO
OBSERVACIONES		



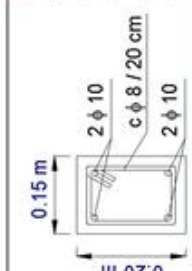
ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE SOPORTES DE HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES SOMETIDOS A COMPRESIÓN Y CARGA LATERAL CÍCLICA

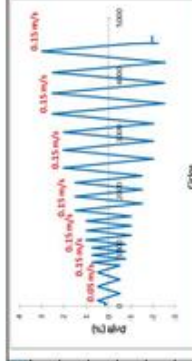


UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

FICHA TÉCNICA DE ENSAYO - FASE DE ENSAYO


ELEMENTO Nº: 1S21-23	
CARACTERÍSTICAS DEL ELEMENTO	
FECHA HORMIGONADO:	16/12/2014
FECHA ENSAYO:	13/01/2015
h (m)	0,20
b (m)	0,15
f_{cm} (Mpa)	121,72
Tipo Fibras (%)	MIXTAS (2%)
f_{resc} (cm)	3,40
s_1 (m)	0,20
Esbeltez λ_s	7,50
pl	1,05



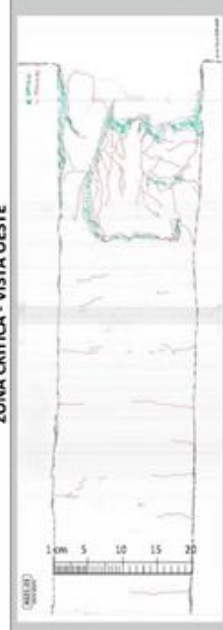


MAPA DE FISURAS

ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE




ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE




DOCUMENTACIÓN FOTOGRÁFICA


20% SUBIDA



20% BAJADA




FINAL ENSAYO




OBSERVACIONES

- Drift 1.50: durante el desarrollo del primer ciclo se observan microfisuras verticales en la zona crítica de arriba abajo y de abajo arriba.
- Drift 2.00: durante 2º ciclo, primera subida, aparece fisura vertical de arriba abajo en zona unión "stub"-pilar.
- Drift 3.00 : durante la 1ª subida toca en las placas de control de pandeo (11 cm).

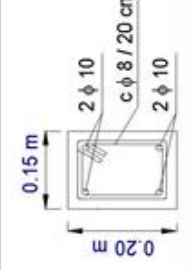



ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE SOPORTES DE HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES SOMETIDOS A COMPRESIÓN Y CARGA LATERAL CÍCLICA



FICHA TÉCNICA DE ENSAYO - FASE DE ENSAYO


ELEMENTO Nº: AS21-24	
CARACTERÍSTICAS DEL ELEMENTO	
FECHA HORMIGONADO:	29/01/2015
FECHA ENSAYO:	27/02/2015
h (m)	0,20
b (m)	0,15
f_{cm} (Mpa)	133,32
Tipo Fibras (%)	MIXTAS (2%)
f_{rac} (cm)	3,50
s_1 (m)	0,20
	pl
	1,05






CARACTERÍSTICAS DE LA CARGA	
Tipo de Carga	Cíclica
V_{fiscal}	0,40
Ax_{fiscal} (kN)	1590,83
V_{max} (kN)	48,03
$drift_{almeno}$	2,73
H_u	2,26

ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE




ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE




MAPA DE FISURAS

20% SUBIDA





20% BAJADA



DOCUMENTACIÓN FOTOGRÁFICA


FINAL ENSAYO






OBSERVACIONES

- Hemos puesto **TERMOPARES** en el ensayo.
- Banda GES3 falla desde el principio del ensayo.
- Drift 2.00 : Durante la 1ª subida se produce una fisura horizontal en la parte inferior, que va desde la 2 columnas de puntos hacia en encuentro "stub"-pilar, acabando con bajada en vertical.



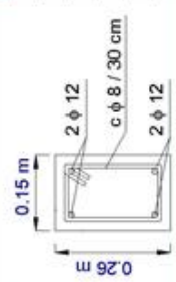
ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE SOPORTES DE HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES SOMETIDOS A COMPRESIÓN Y CARGA LATERAL CÍCLICA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

FICHA TÉCNICA DE ENSAYO - FASE DE ENSAYO

ELEMENTO Nº:	AS11-25		
CARACTERÍSTICAS DEL ELEMENTO	FECHA HORRIGONADO: 22/01/2015 FECHA ENSAYO: 18/02/2015		
h (m)	0,26	f_{cm} (Mpa)	120,56
b (m)	0,15	Tipo Fibras (%)	MIXTAS (2%)
f_{resc} (cm)	4,50	Esbeltez λ_s	5,77
s_1 (m)	0,30	pl	1,16



0.15 m

2 ϕ 12

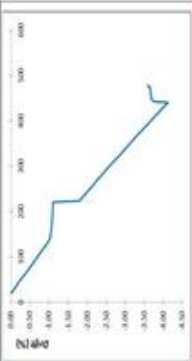
c ϕ 8 / 30 cm

2 ϕ 12


920

CARACTERÍSTICAS DE LA CARGA


Tipo de Carga	Monotónica
ν_{fiscal}	0,20
Ax_{fiscal} (kN)	948,60
V_{max} (kN)	81,05
drift α_{fiscal}	3,46
μ_s	2,85



MAPA DE FISURAS




ZONA CRÍTICA - VISTA ESTE




ZONA CRÍTICA - VISTA OESTE


20% SUBIDA




20% BAJADA



DOCUMENTACIÓN FOTOGRÁFICA






20% SUBIDA



20% BAJADA

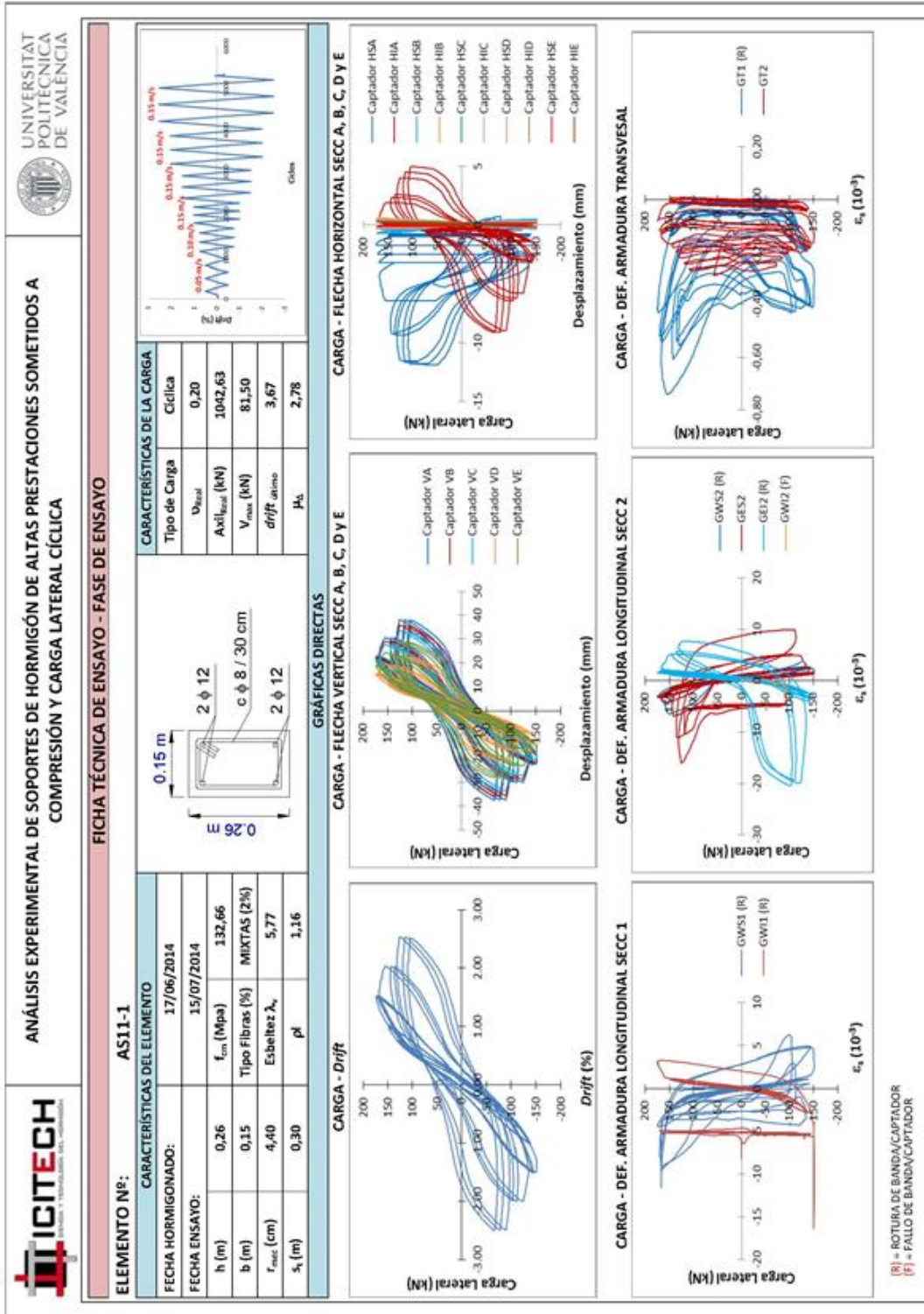
FINAL ENSAYO

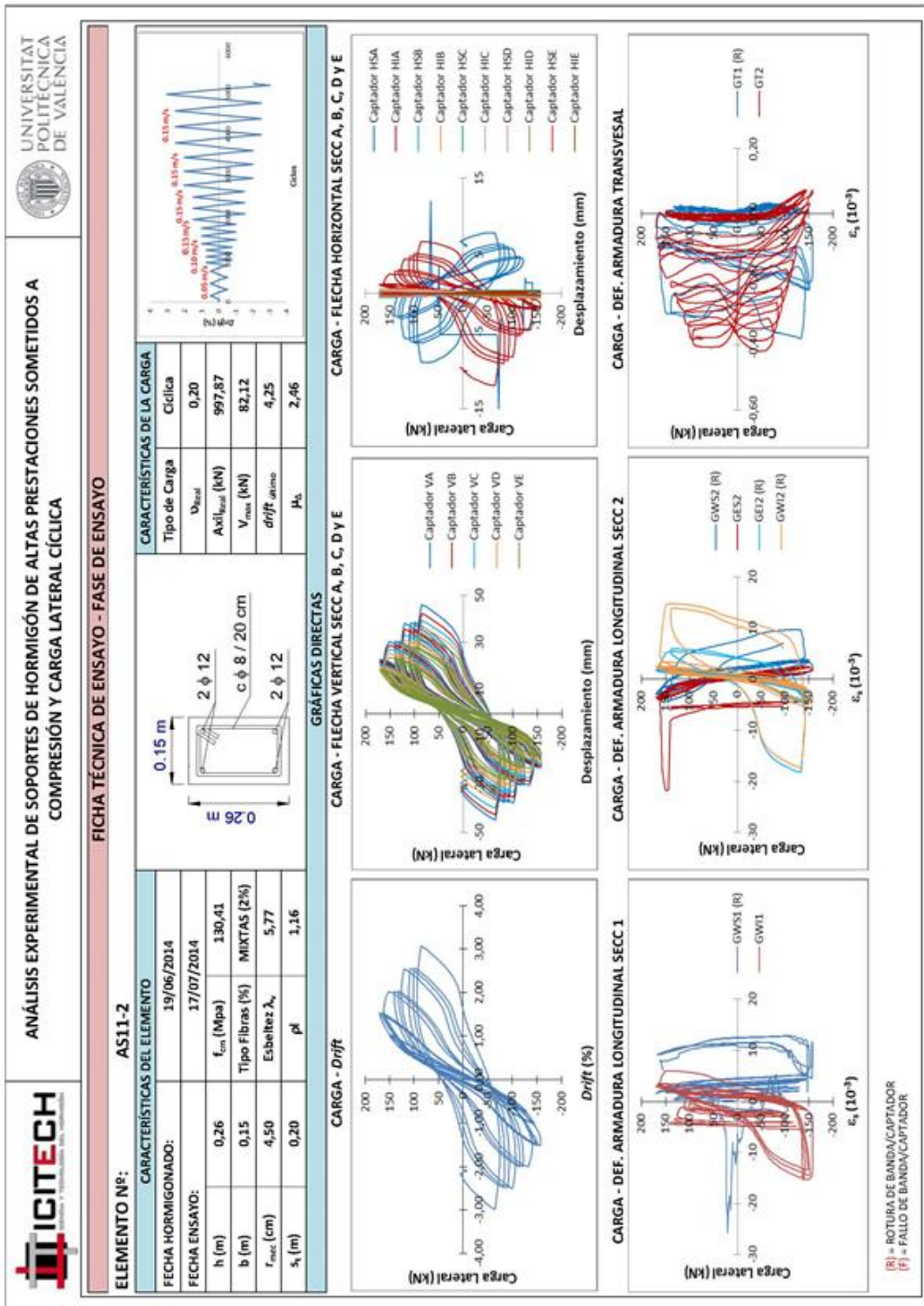




OBSERVACIONES

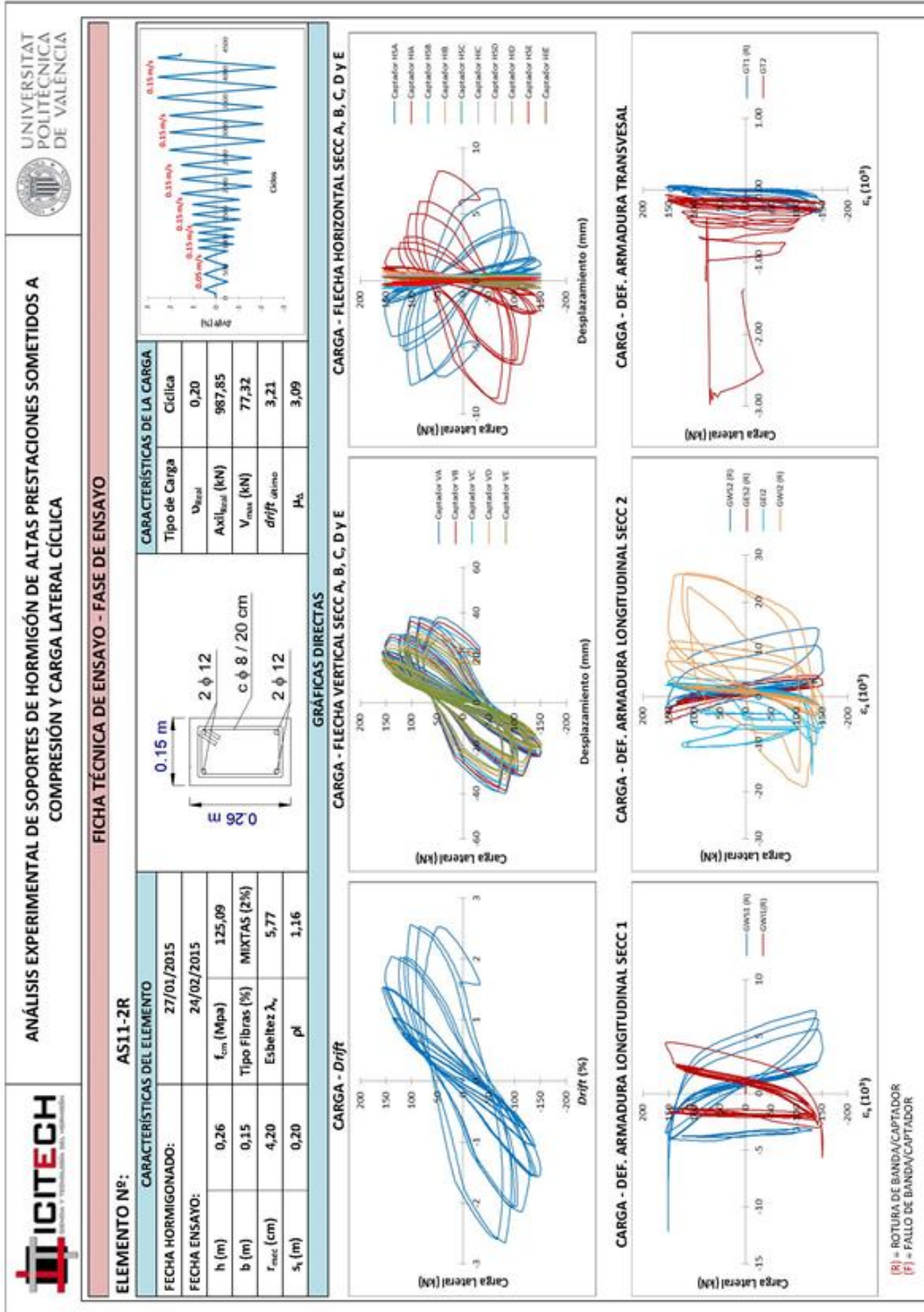
- Drift 1.50 : se observa fisura vertical de abajo arriba en la unión pilar-"stub"
- Drift 1.75 : se alcanza la fuerza vertical máxima V=16.50 T

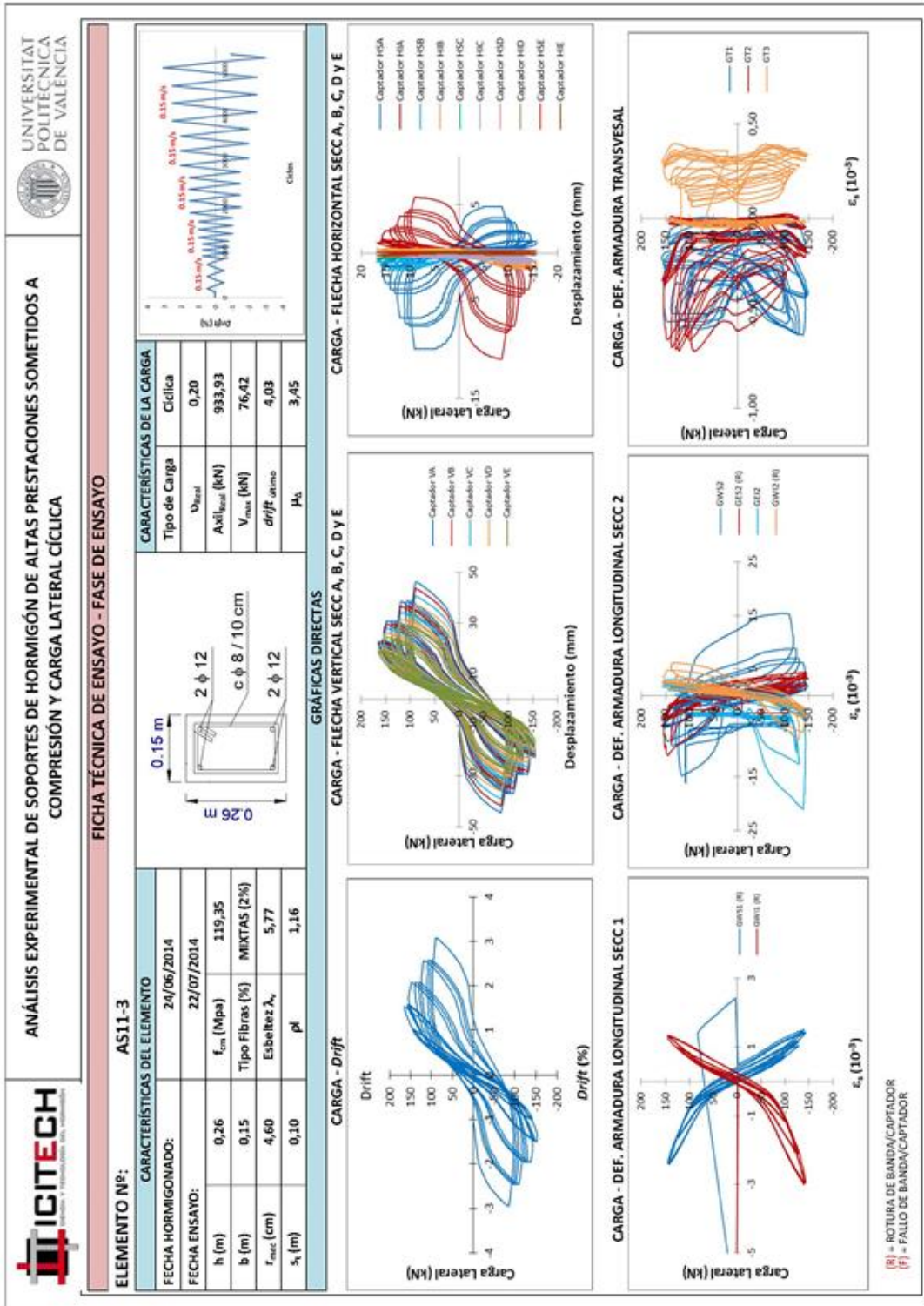
Ficha de gráficas directas





(R) = ROTURA DE BANDA/CAPTADOR
(F) = FALLO DE BANDA/CAPTADOR







ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE SOPORTES DE HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES SOMETIDOS A COMPRESIÓN Y CARGA LATERAL CÍCLICA



FICHA TÉCNICA DE ENSAYO - FASE DE ENSAYO

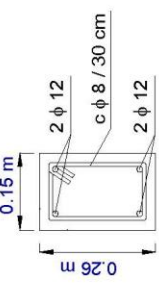
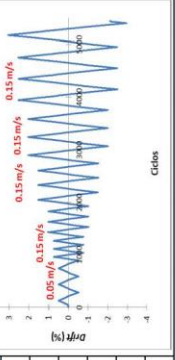
ELEMENTO Nº: AS11-4

CARACTERÍSTICAS DEL ELEMENTO

FECHA HORMIGONADO:	26/06/2014
FECHA ENSAYO:	24/07/2014
h (m)	0,26
b (m)	0,15
f_{cm} (Mpa)	125,19
Tipo Fibras (%)	LARGAS (2%)
r_{mic} (cm)	4,50
Esbeltez λ_e	5,77
s_1 (m)	0,30
ρ_l	1,16

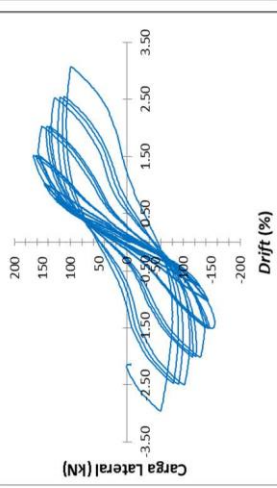
CARACTERÍSTICAS DE LA CARGA

Tipo de Carga	Cíclica
V_{Real}	0,20
$A_{VI,Real}$ (kN)	985,00
V_{max} (kN)	80,65
$drift_{ultimo}$	3,86
H_u	3,39

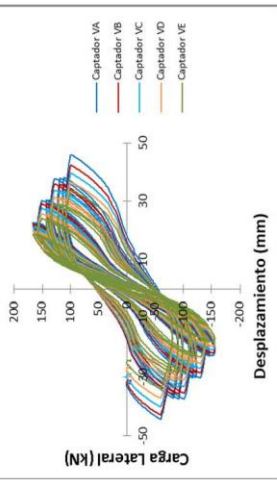


GRÁFICAS DIRECTAS

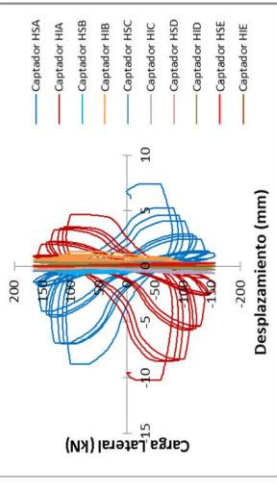
CARGA - Drift



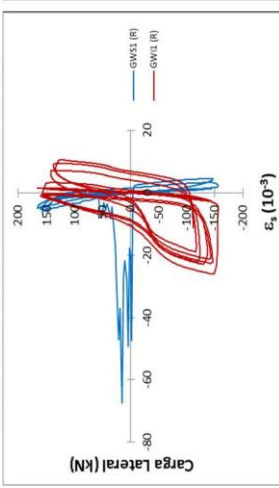
CARGA - FLECHA VERTICAL SECC A, B, C, D Y E



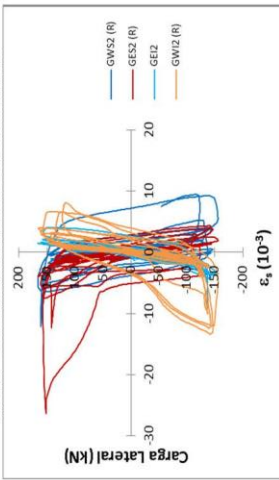
CARGA - FLECHA HORIZONTAL SECC A, B, C, D Y E



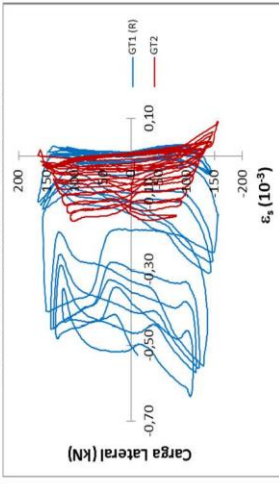
CARGA - DEF. ARMADURA LONGITUDINAL SECC 1



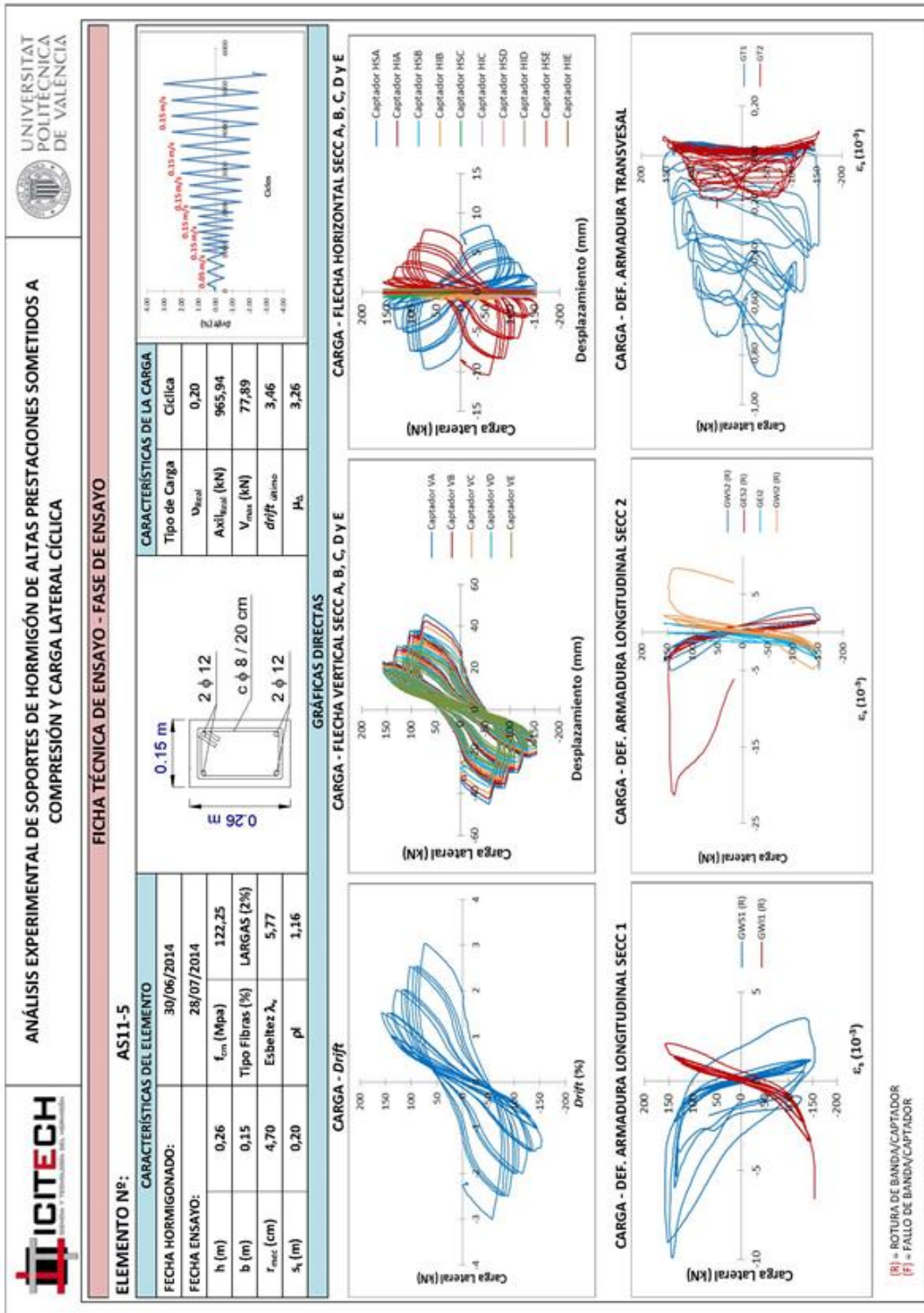
CARGA - DEF. ARMADURA LONGITUDINAL SECC 2

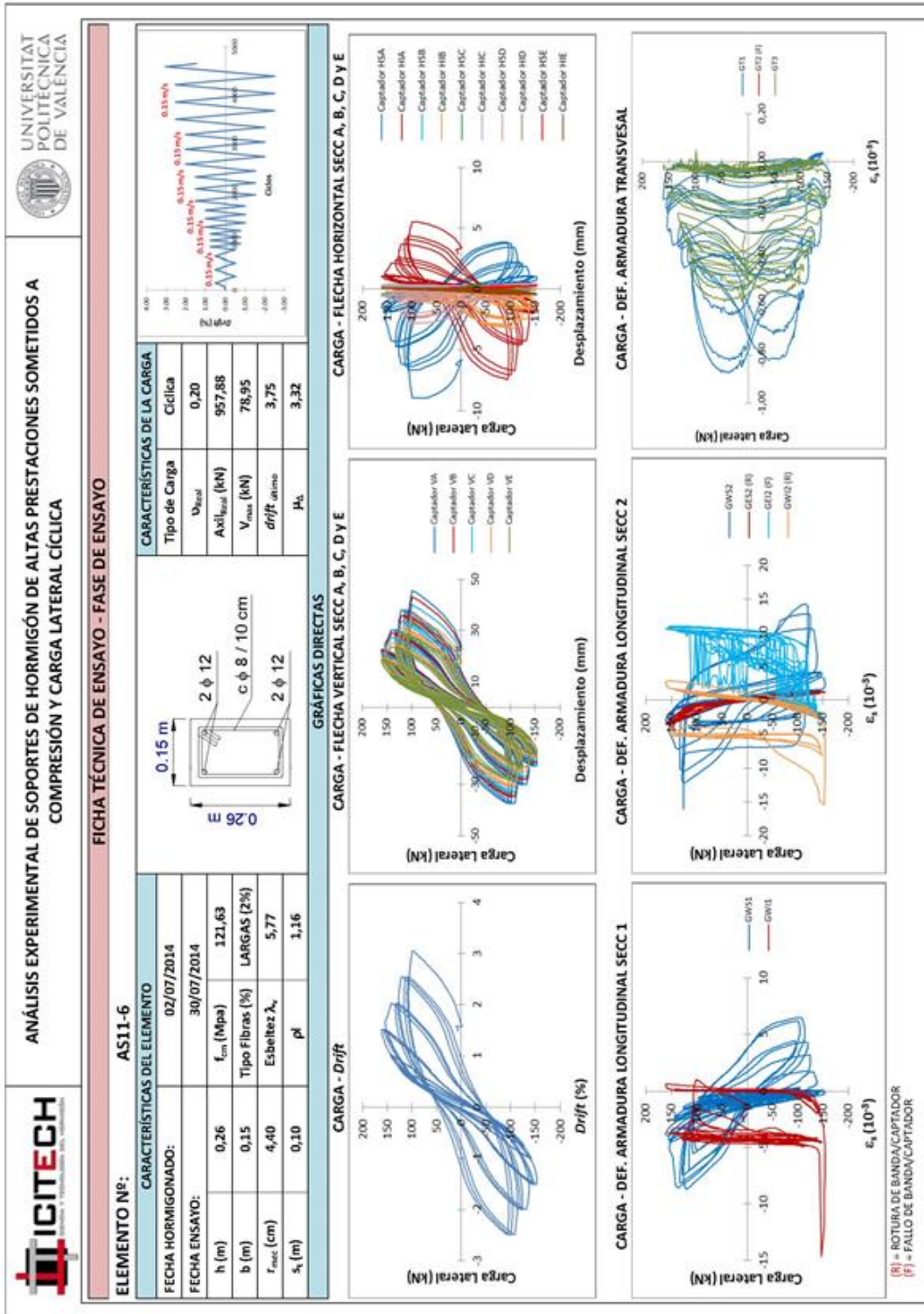


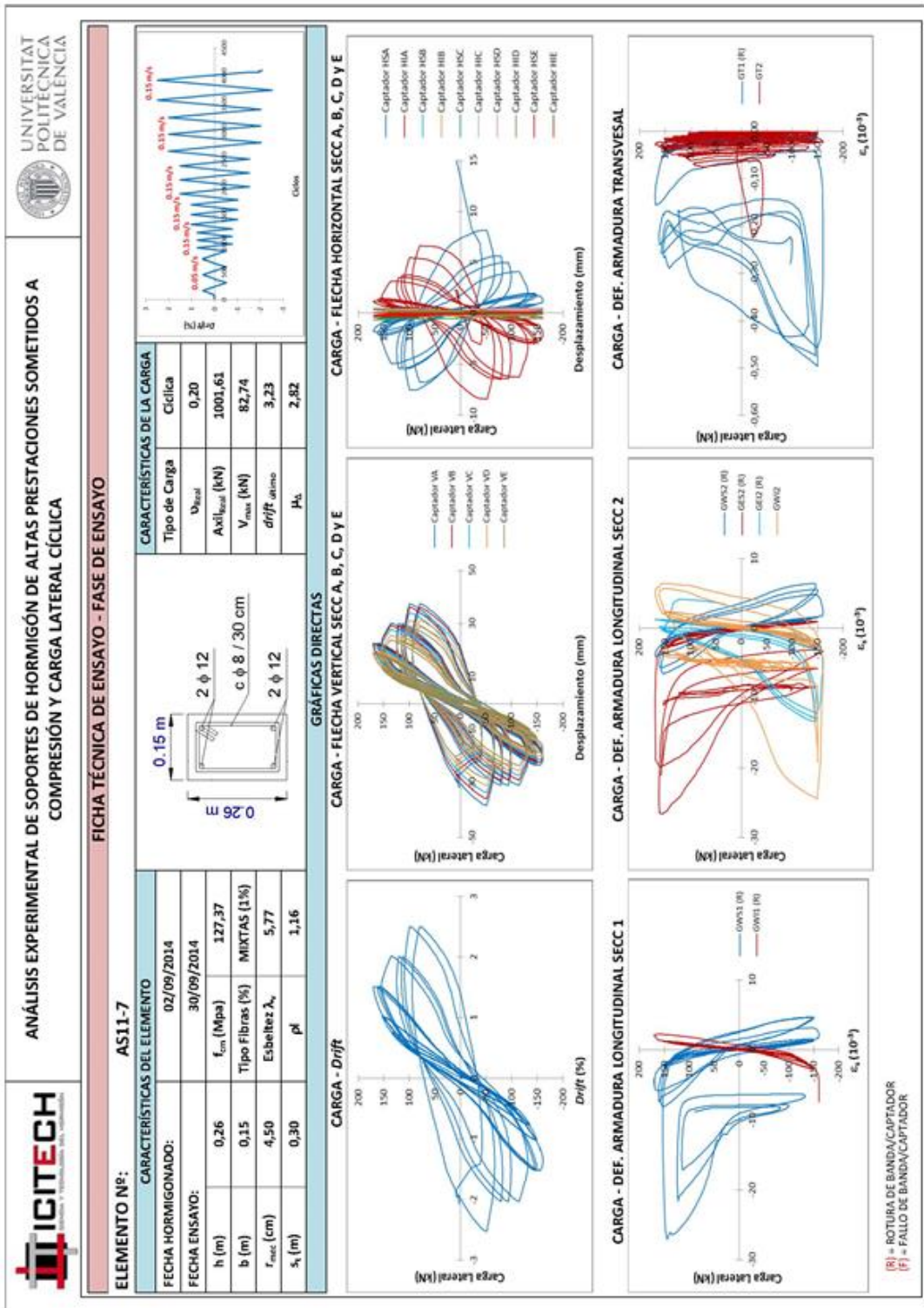
CARGA - DEF. ARMADURA TRANSVERSAL

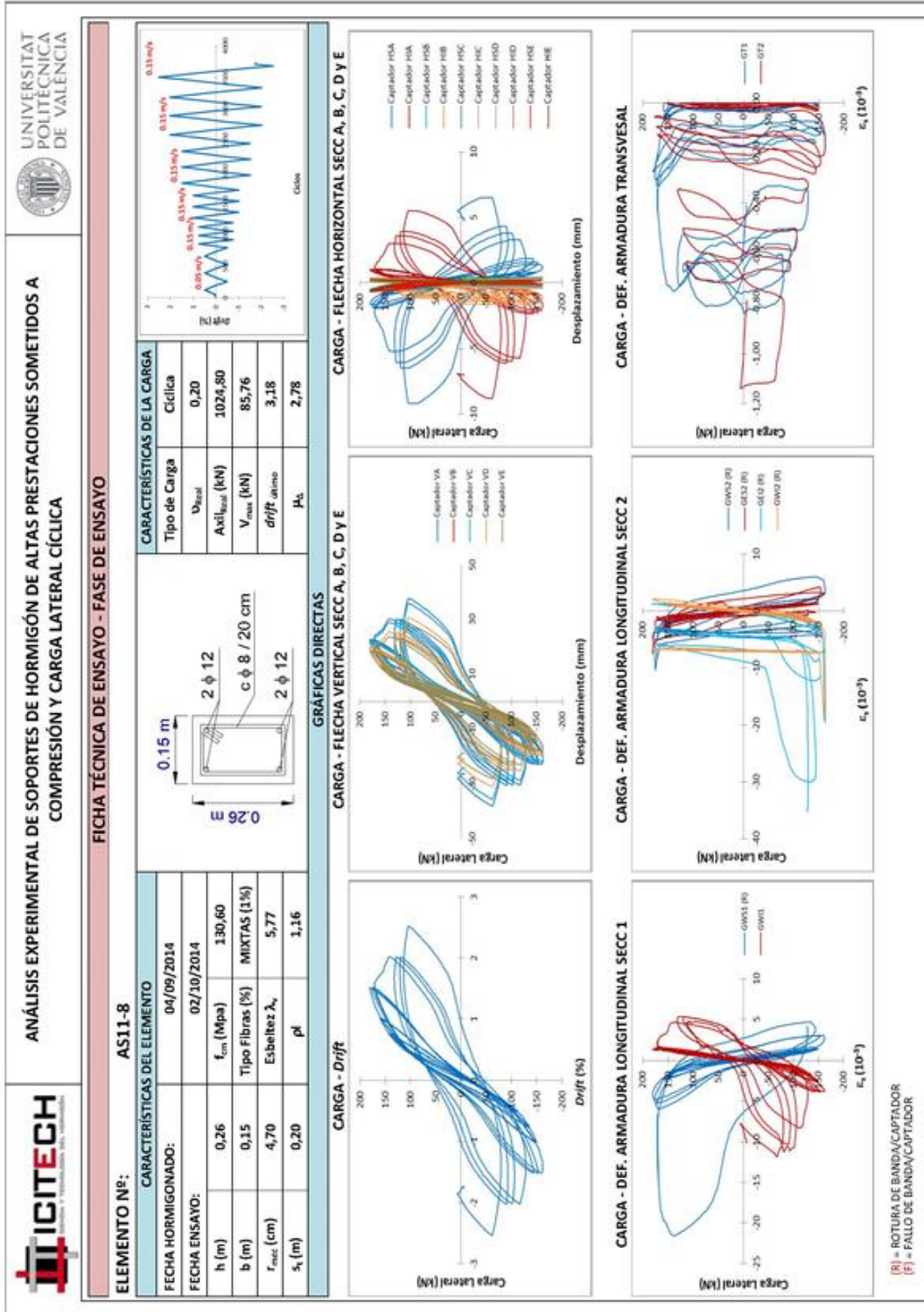


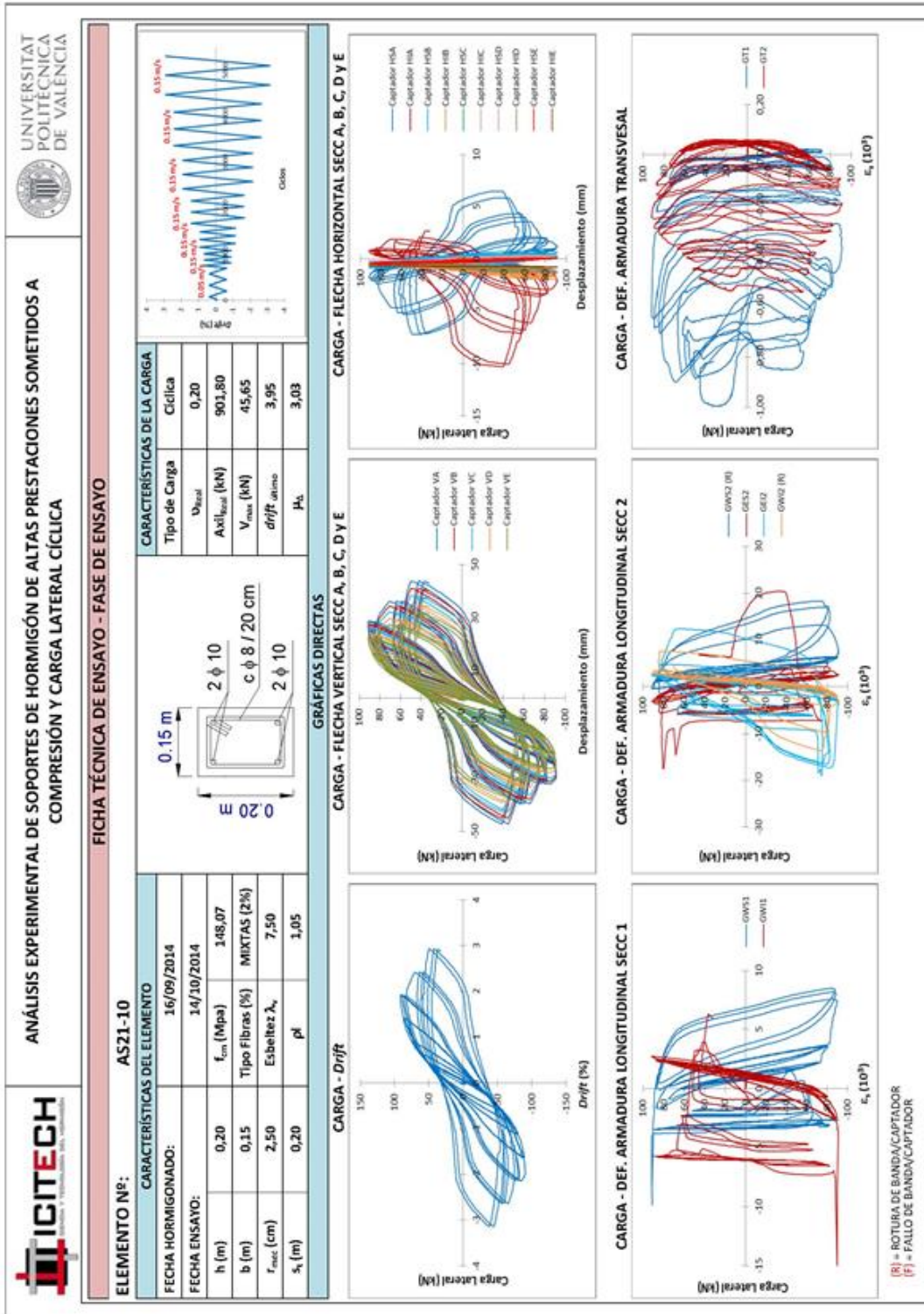
(R) = ROTURA DE BANDA/CAPTADOR
(F) = FALLO DE BANDA/CAPTADOR

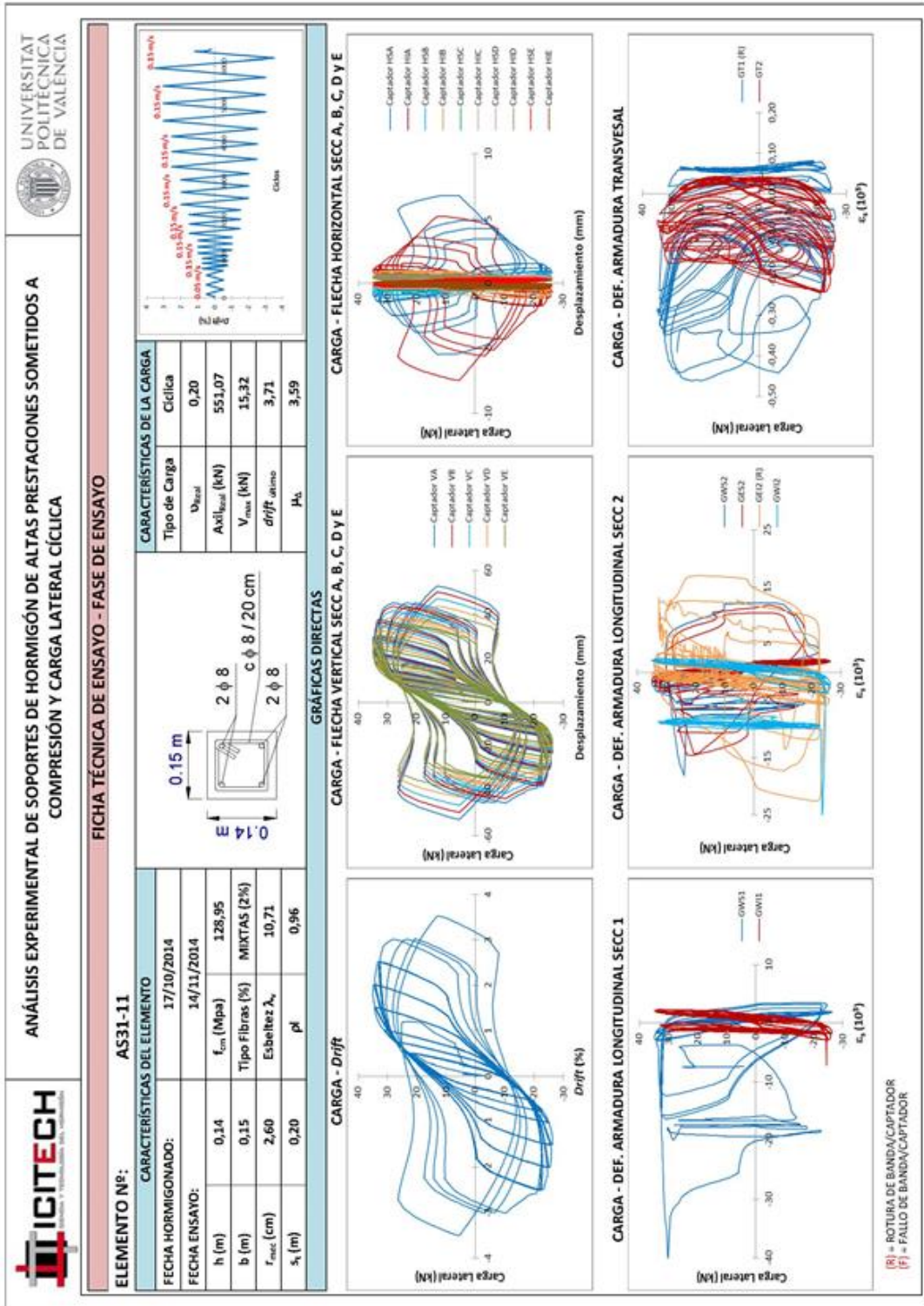


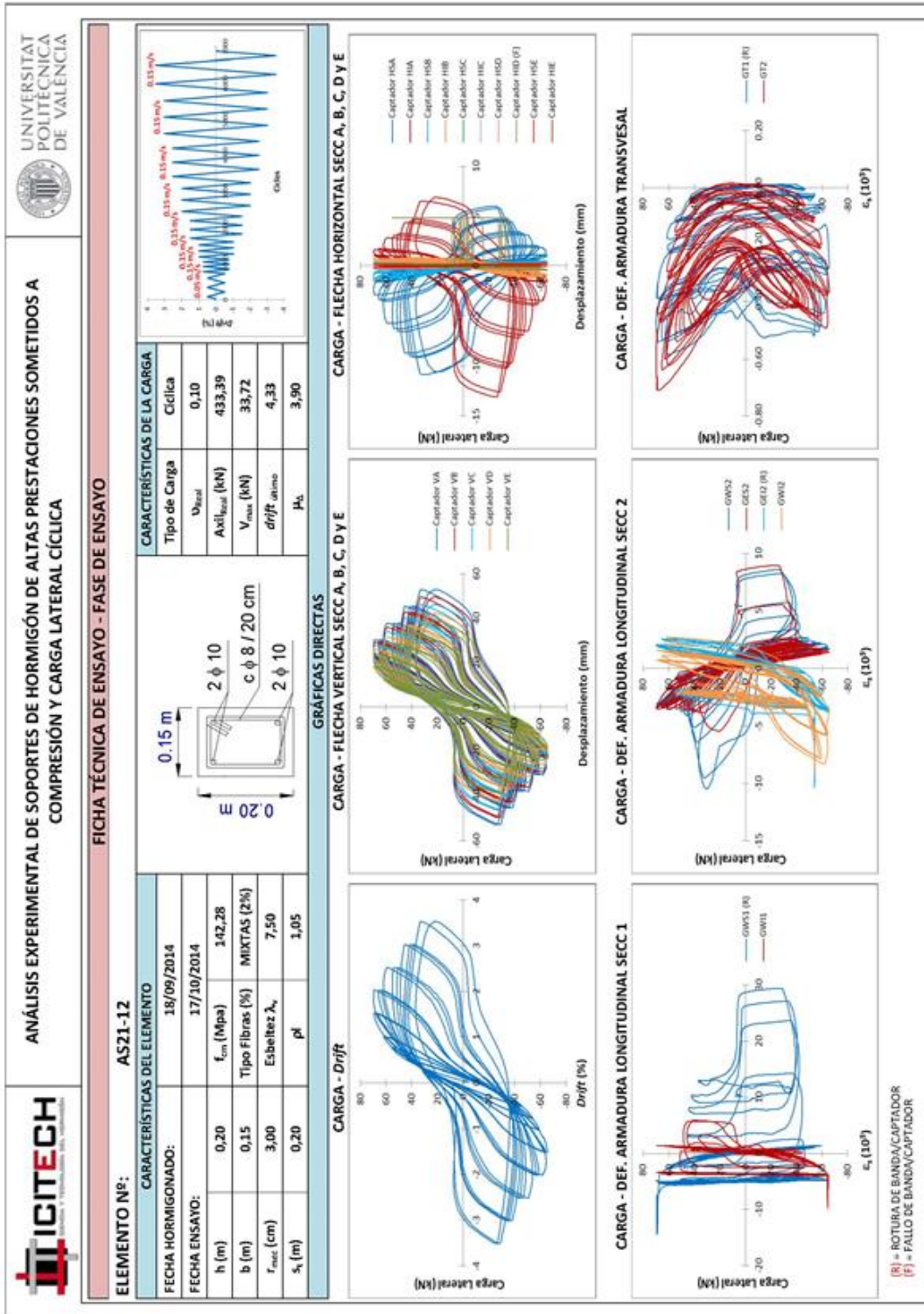


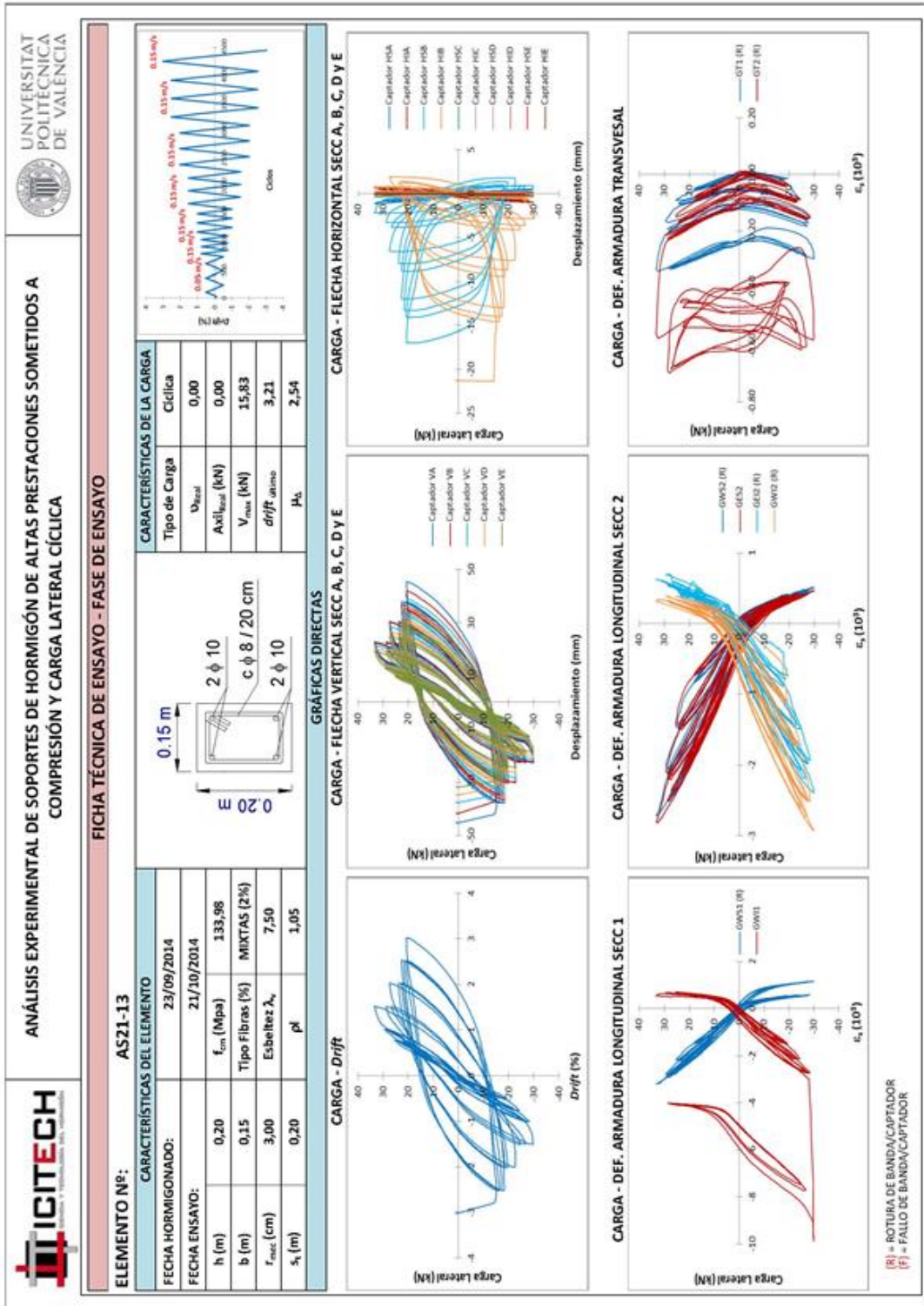


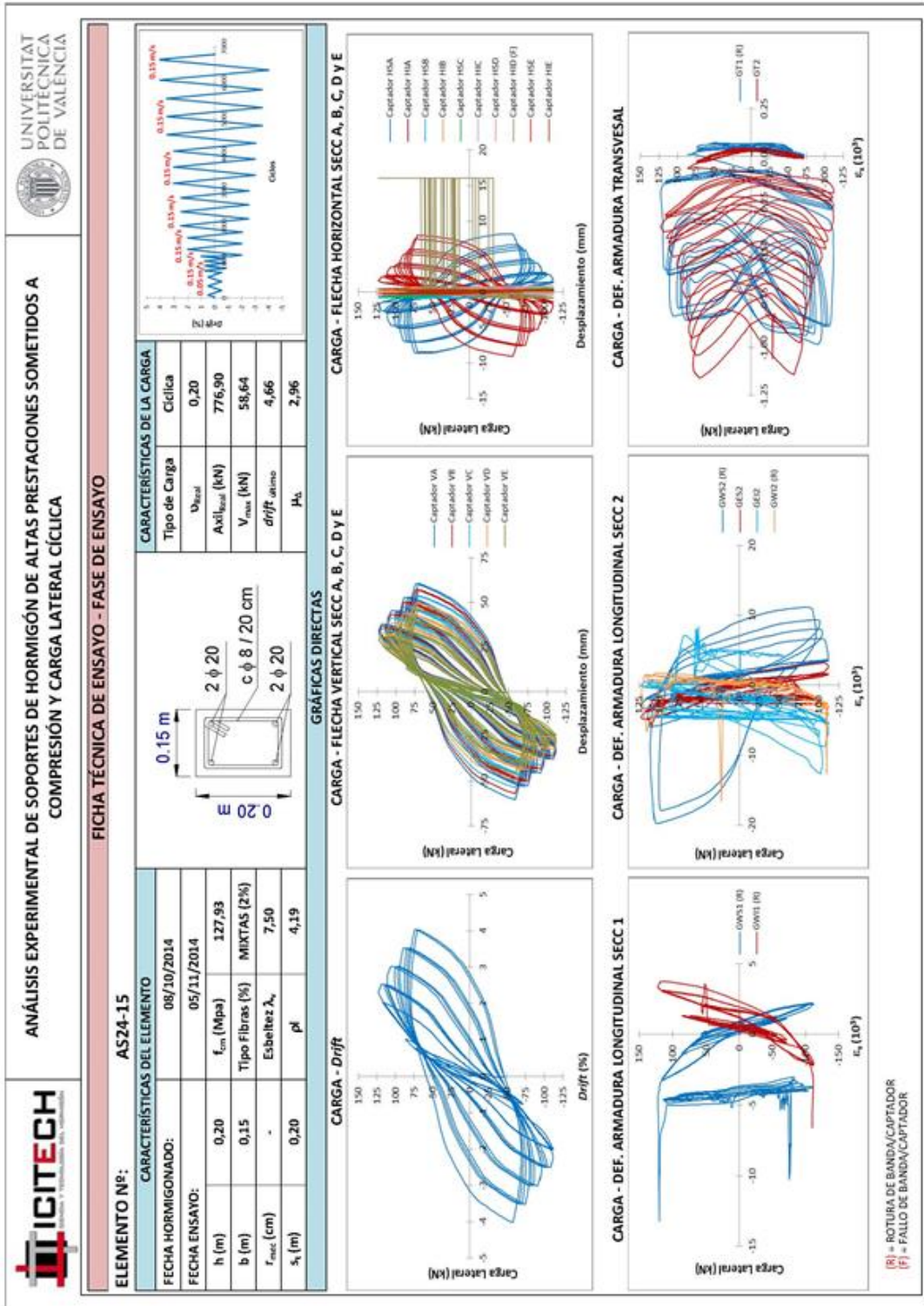


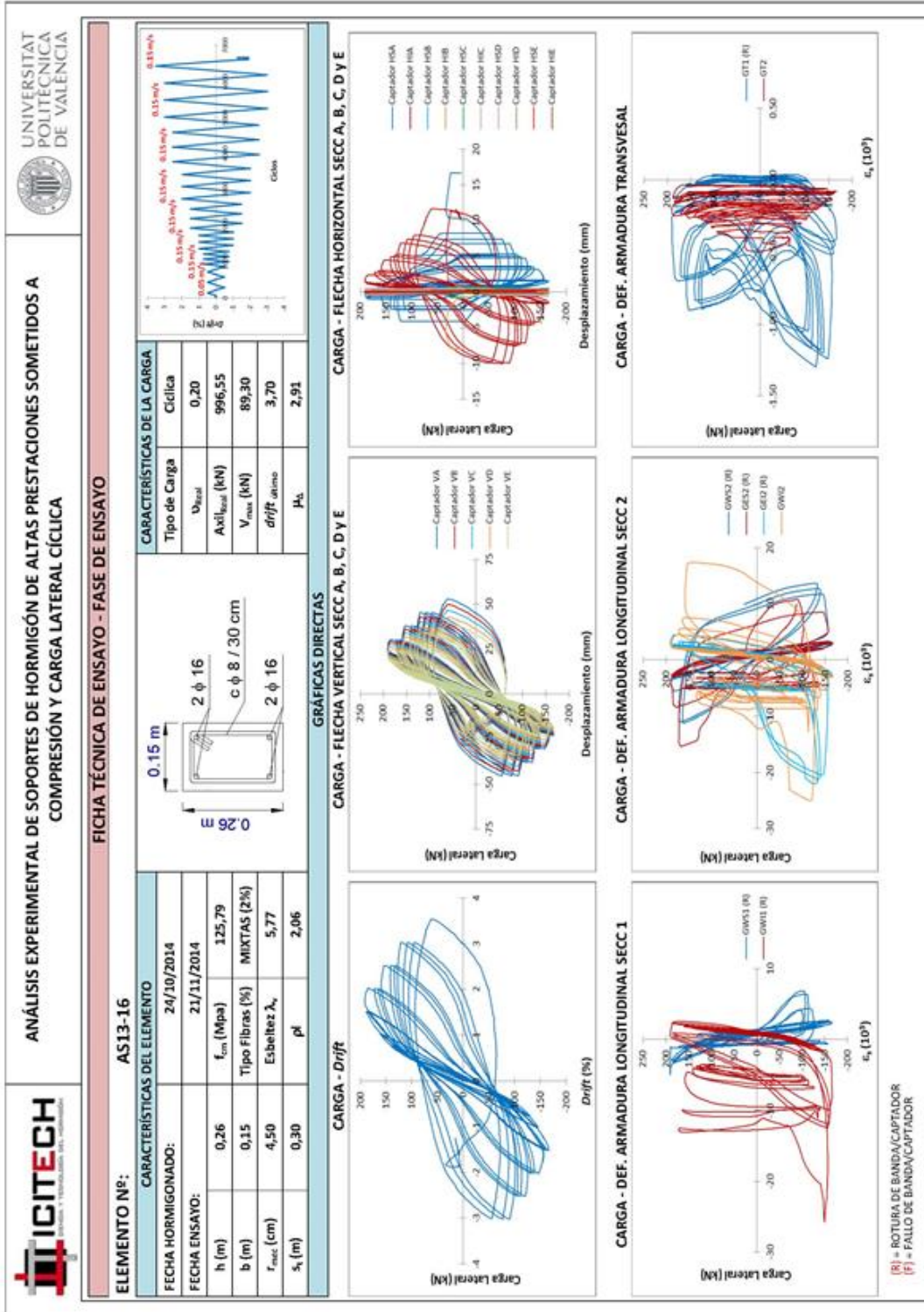


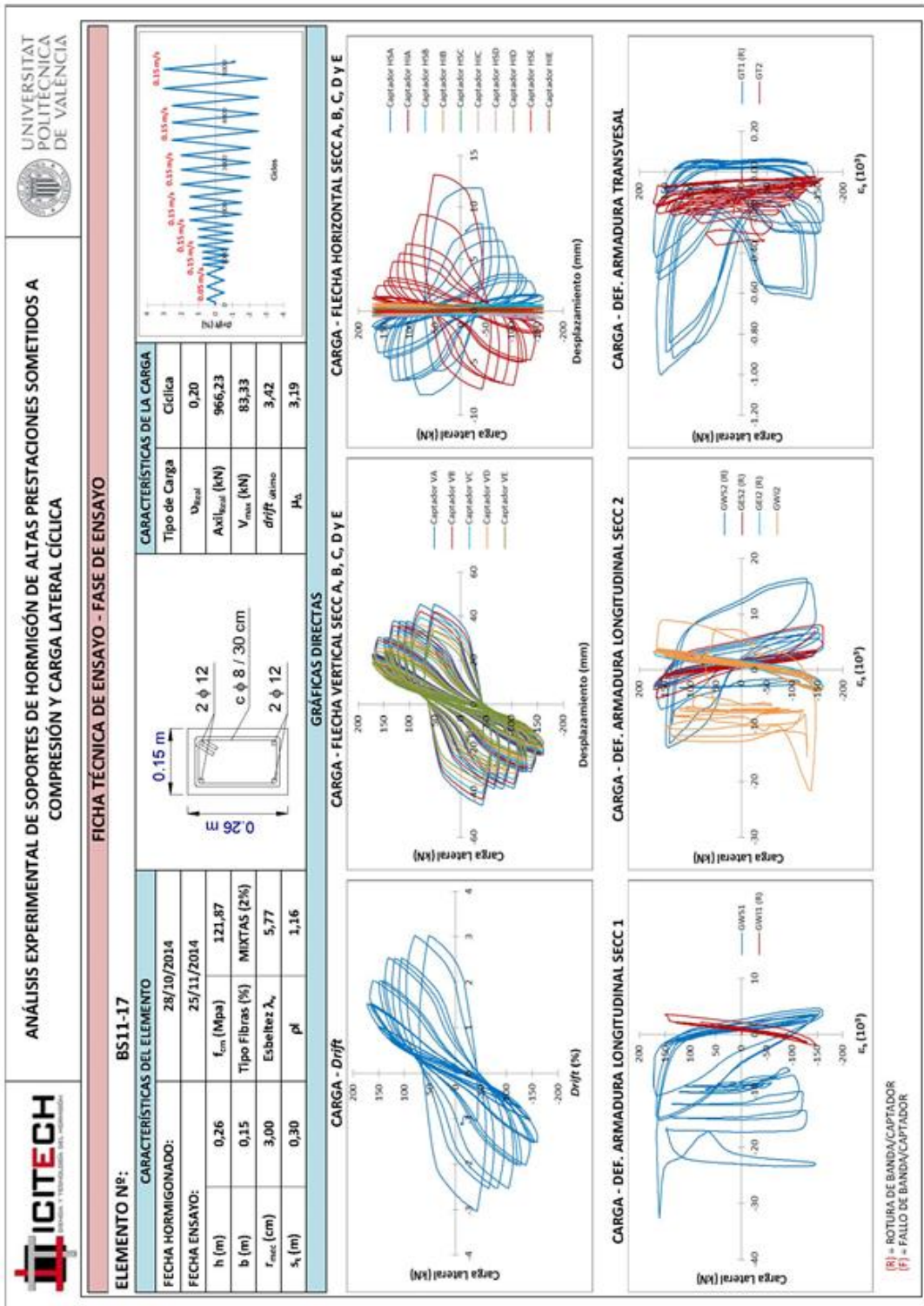


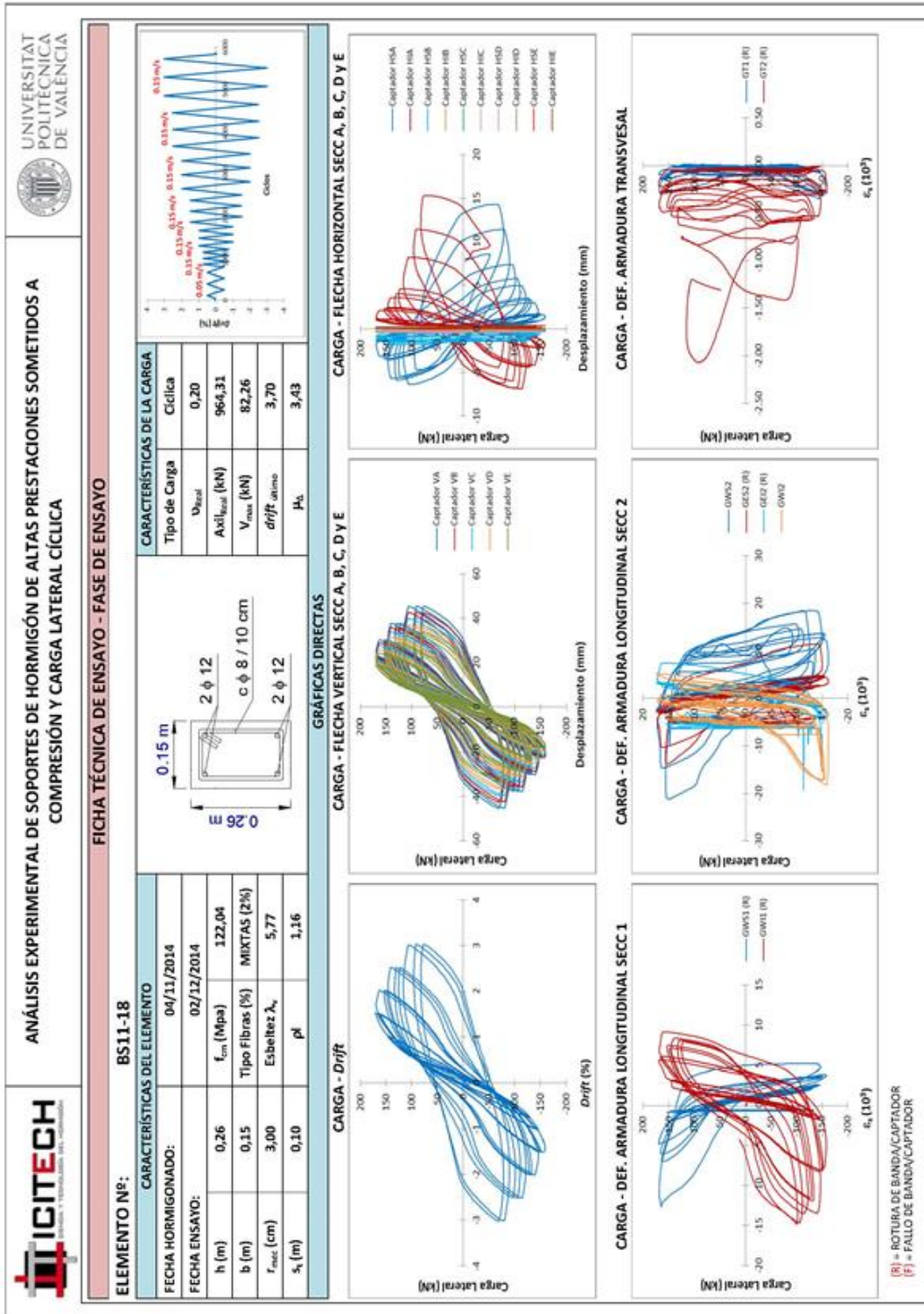


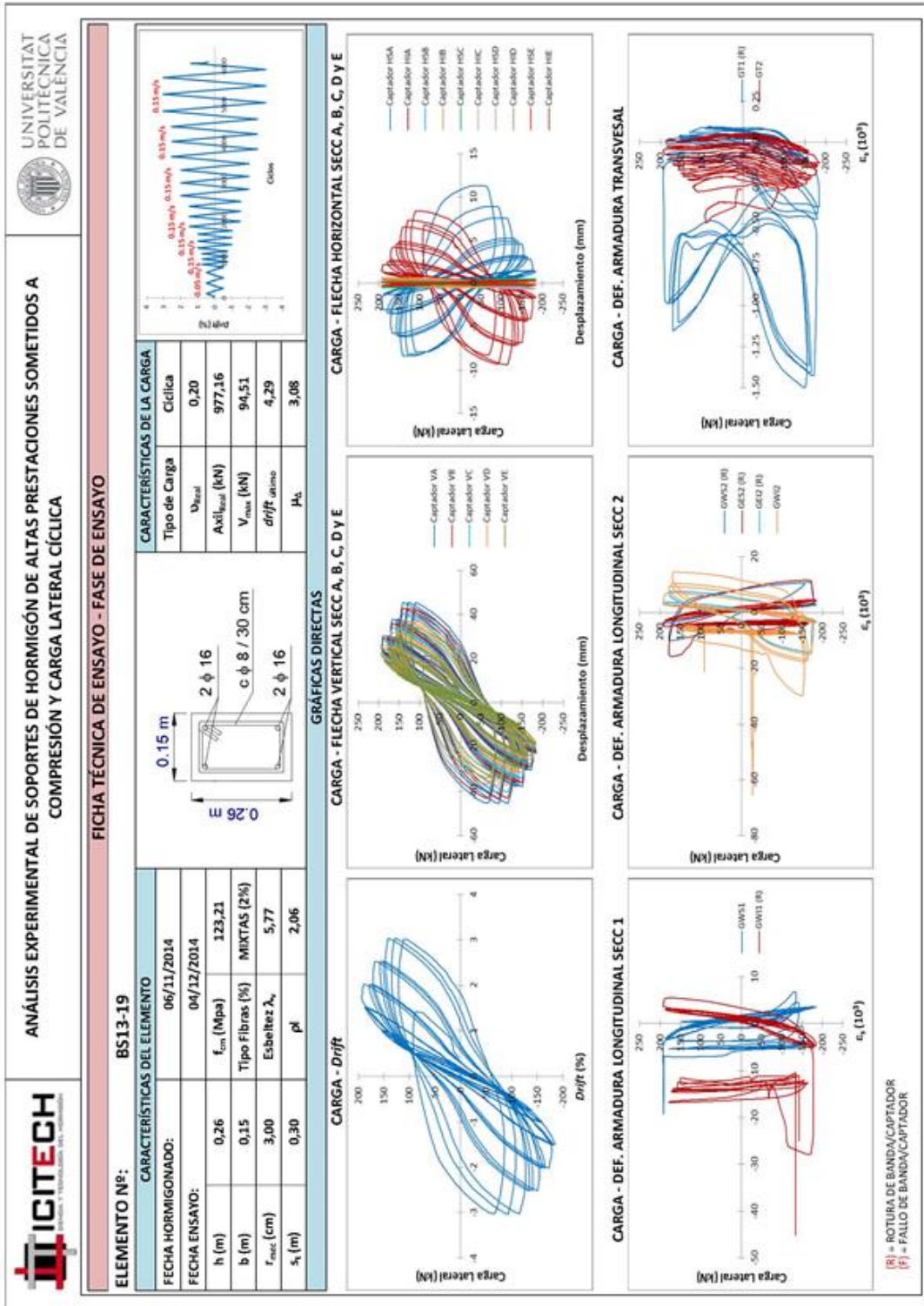


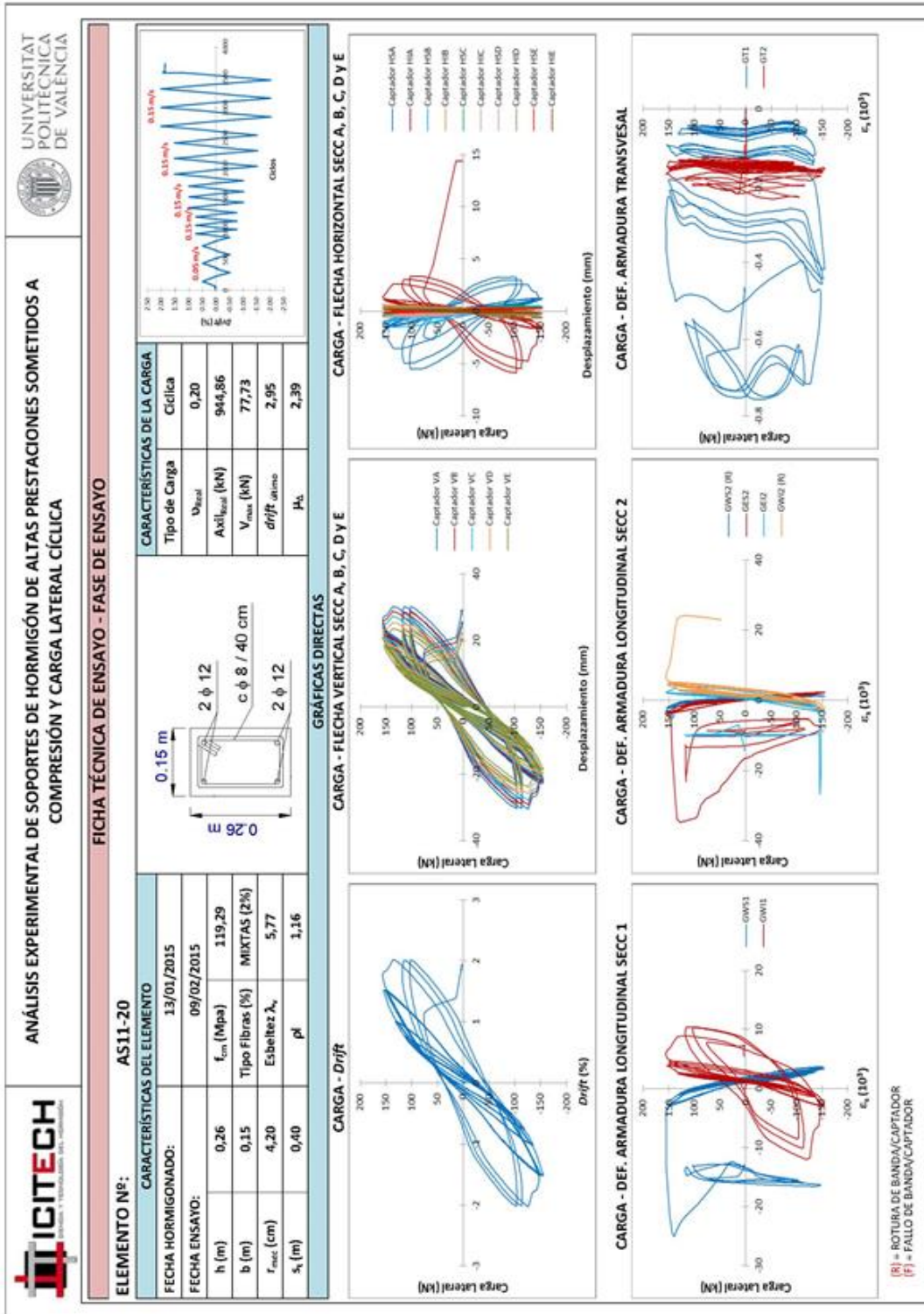


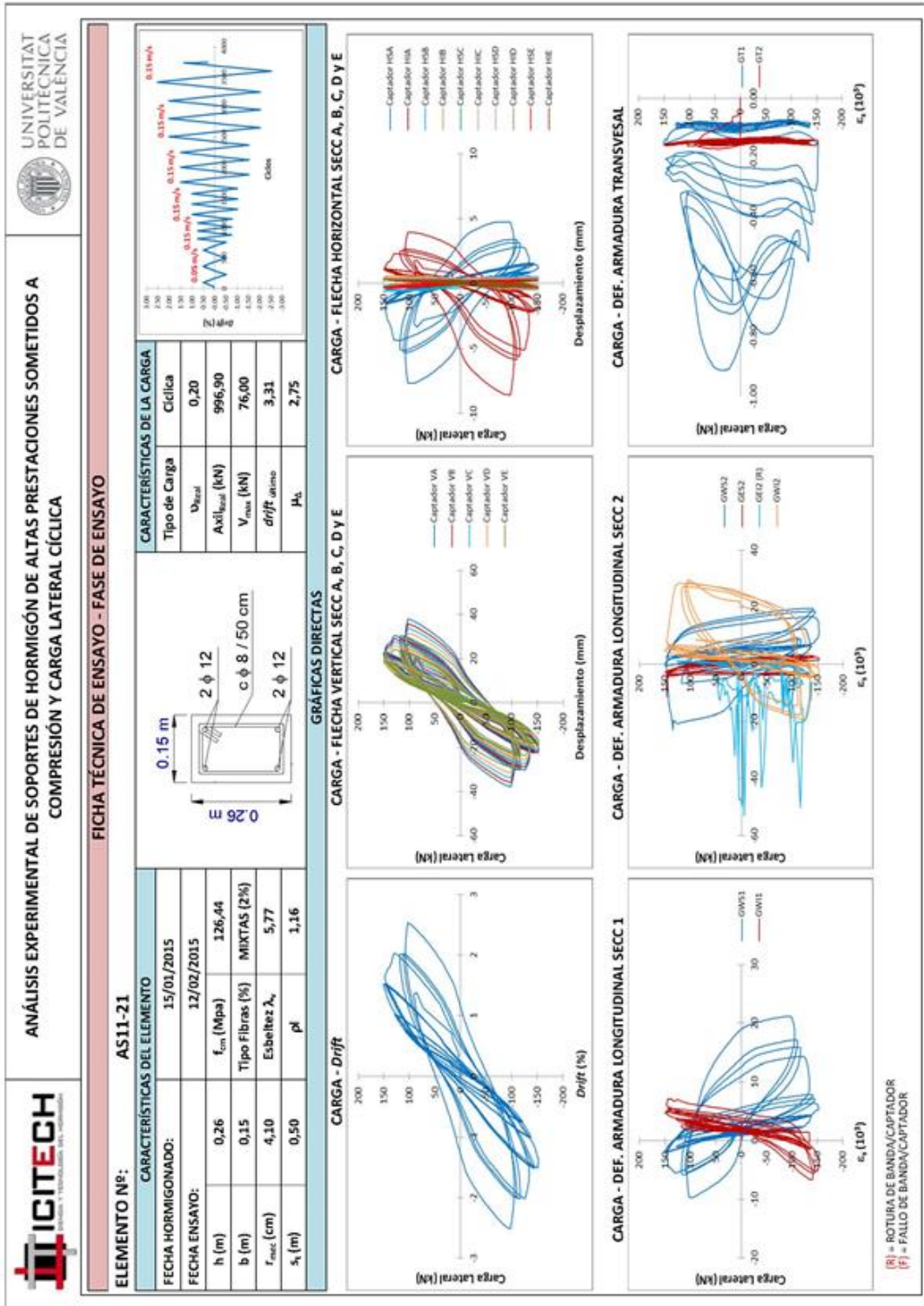


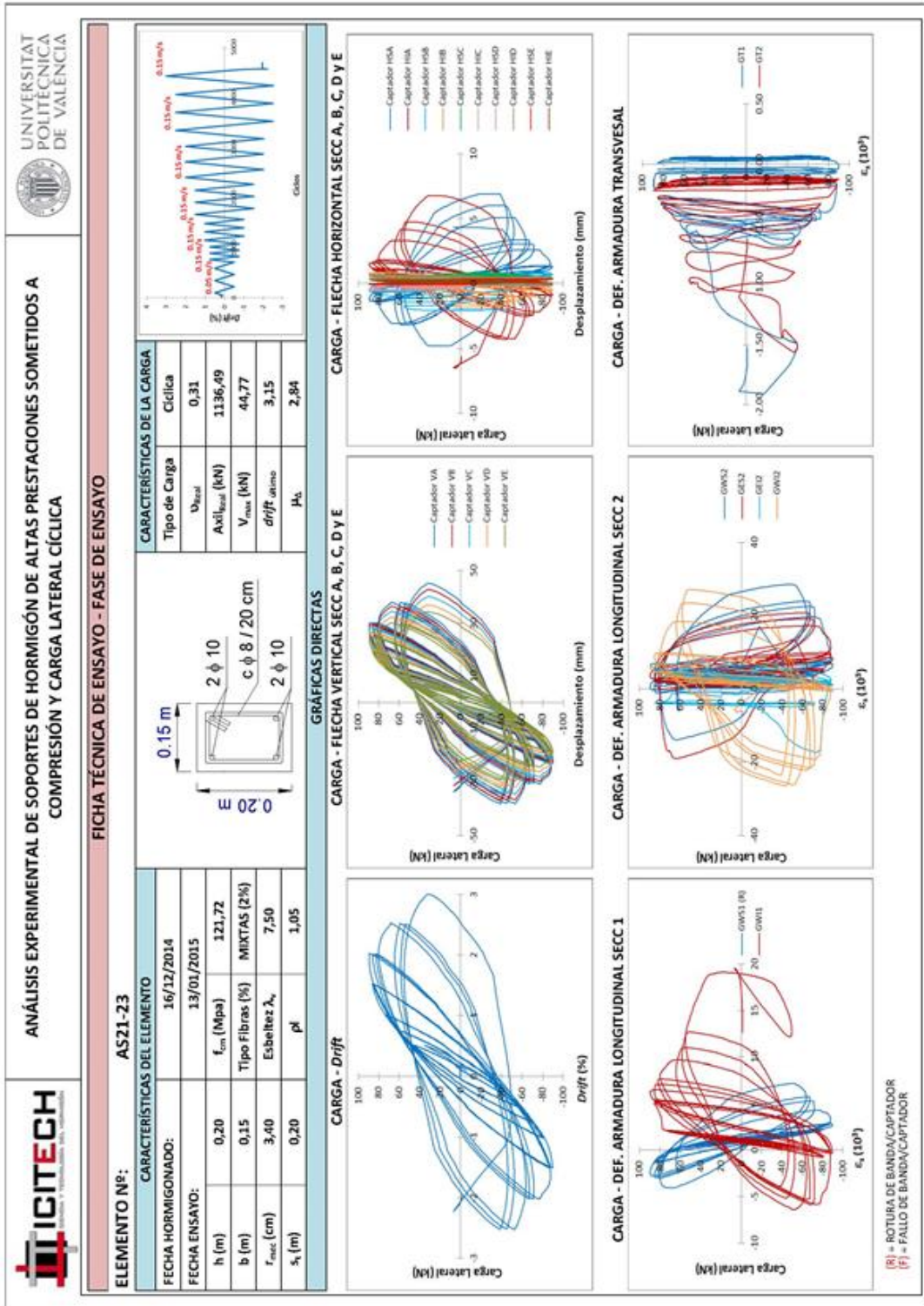


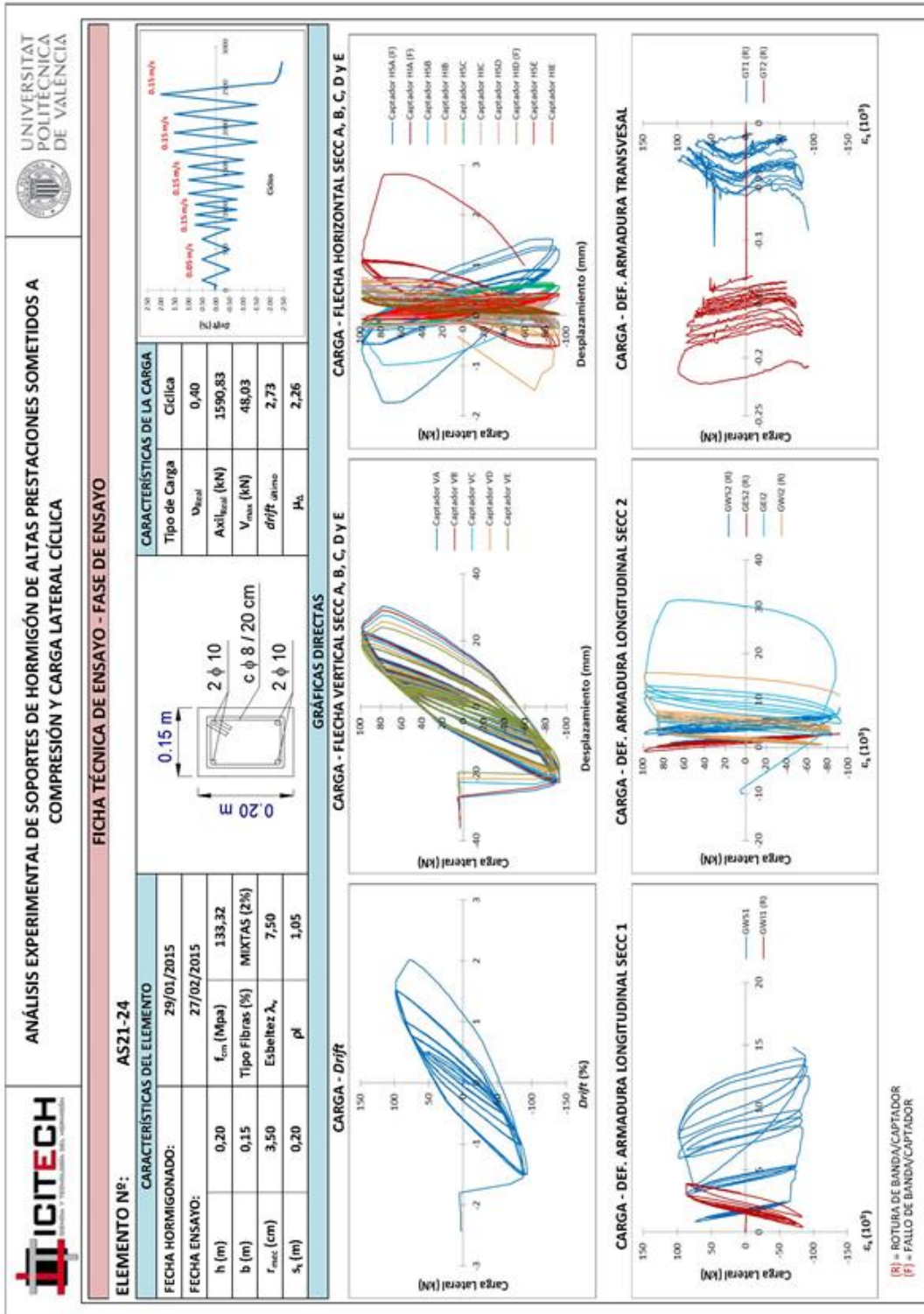


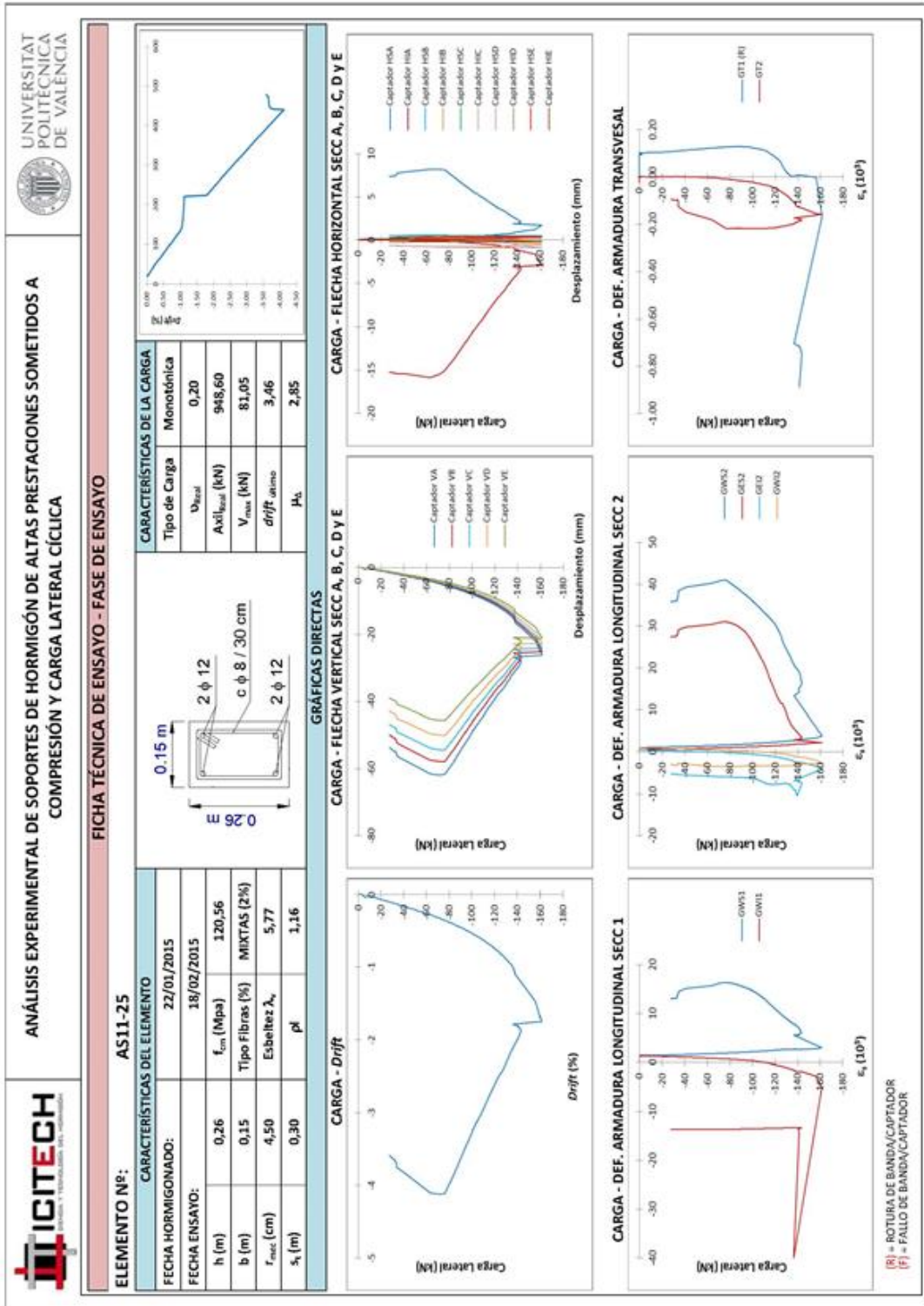




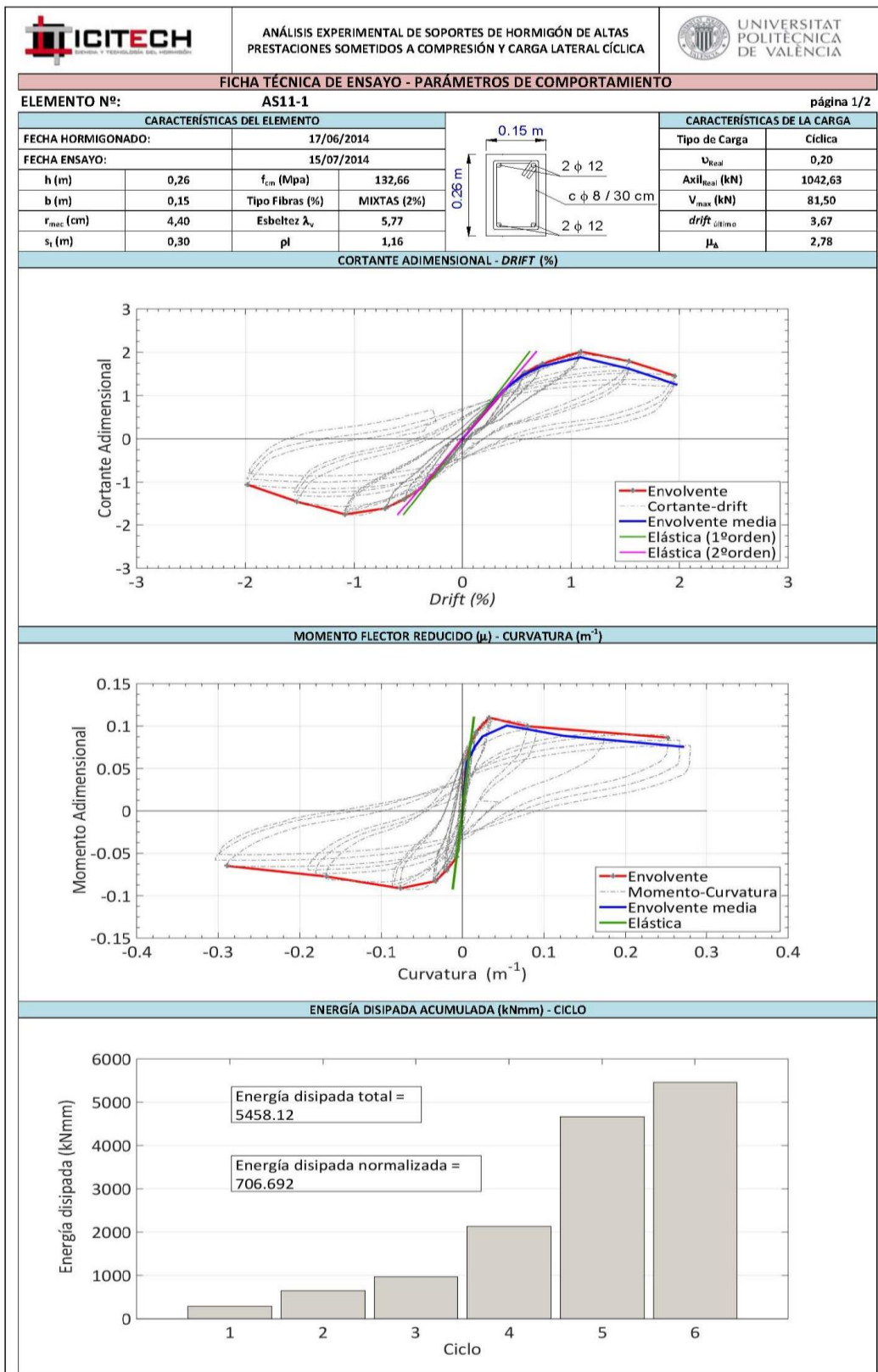


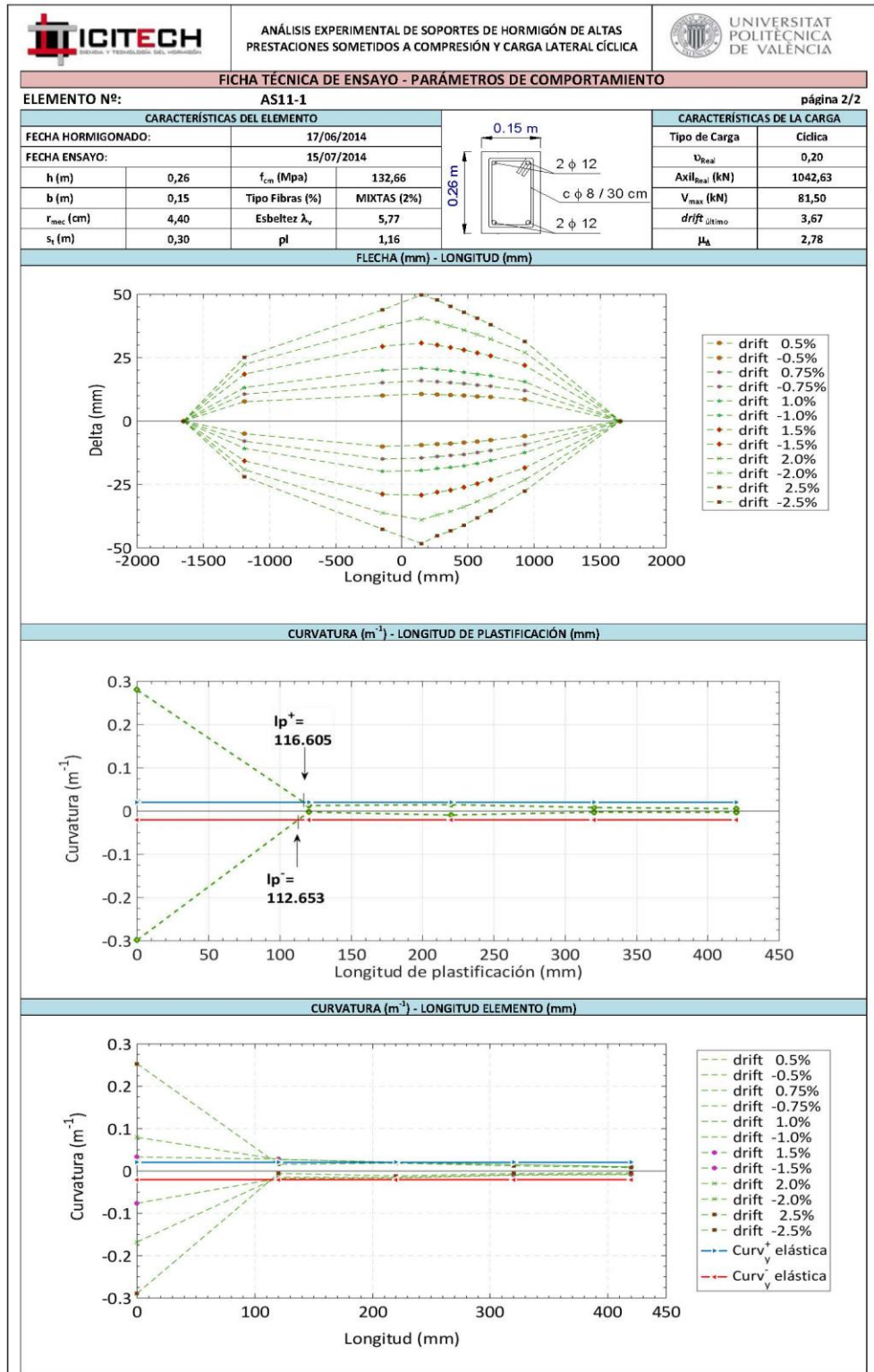


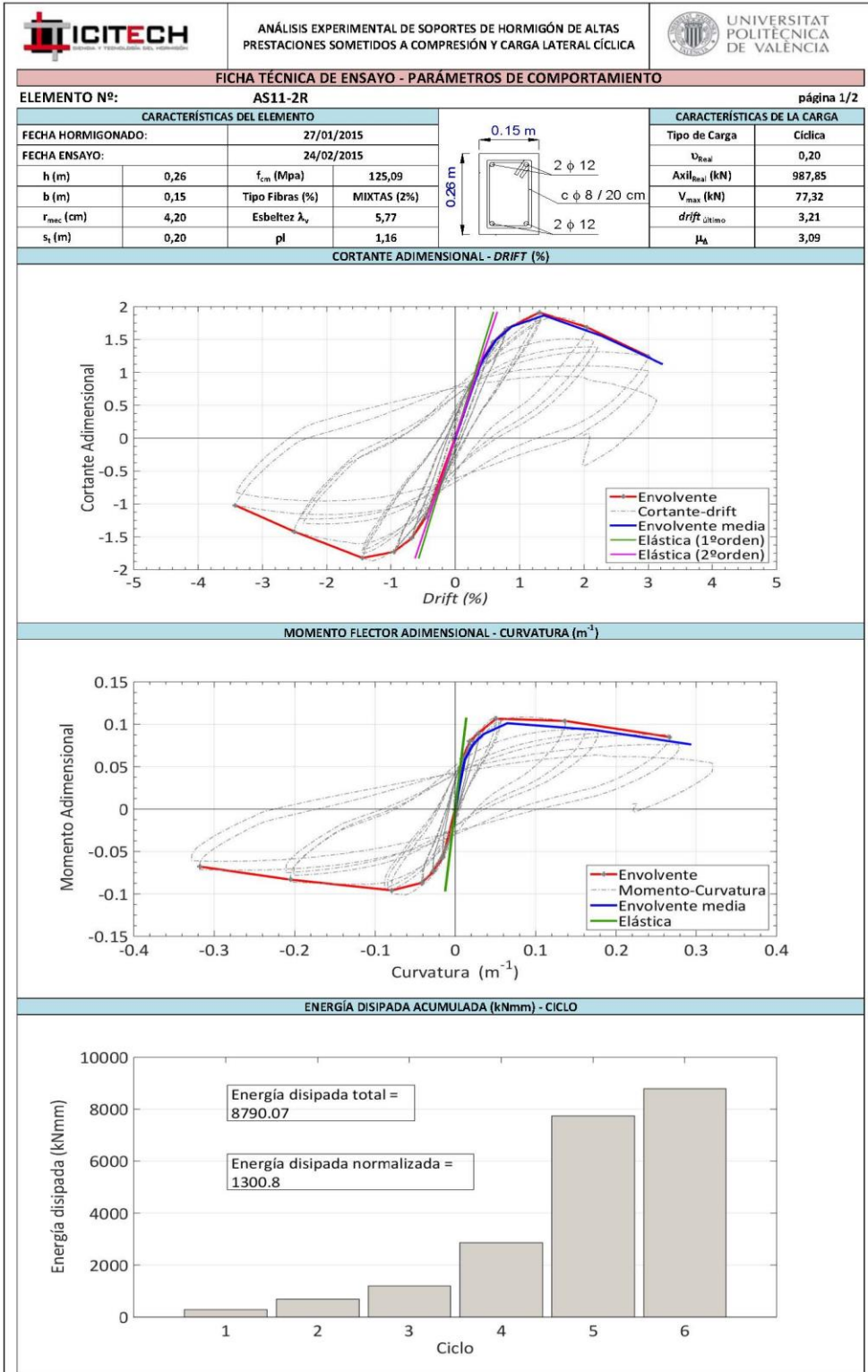


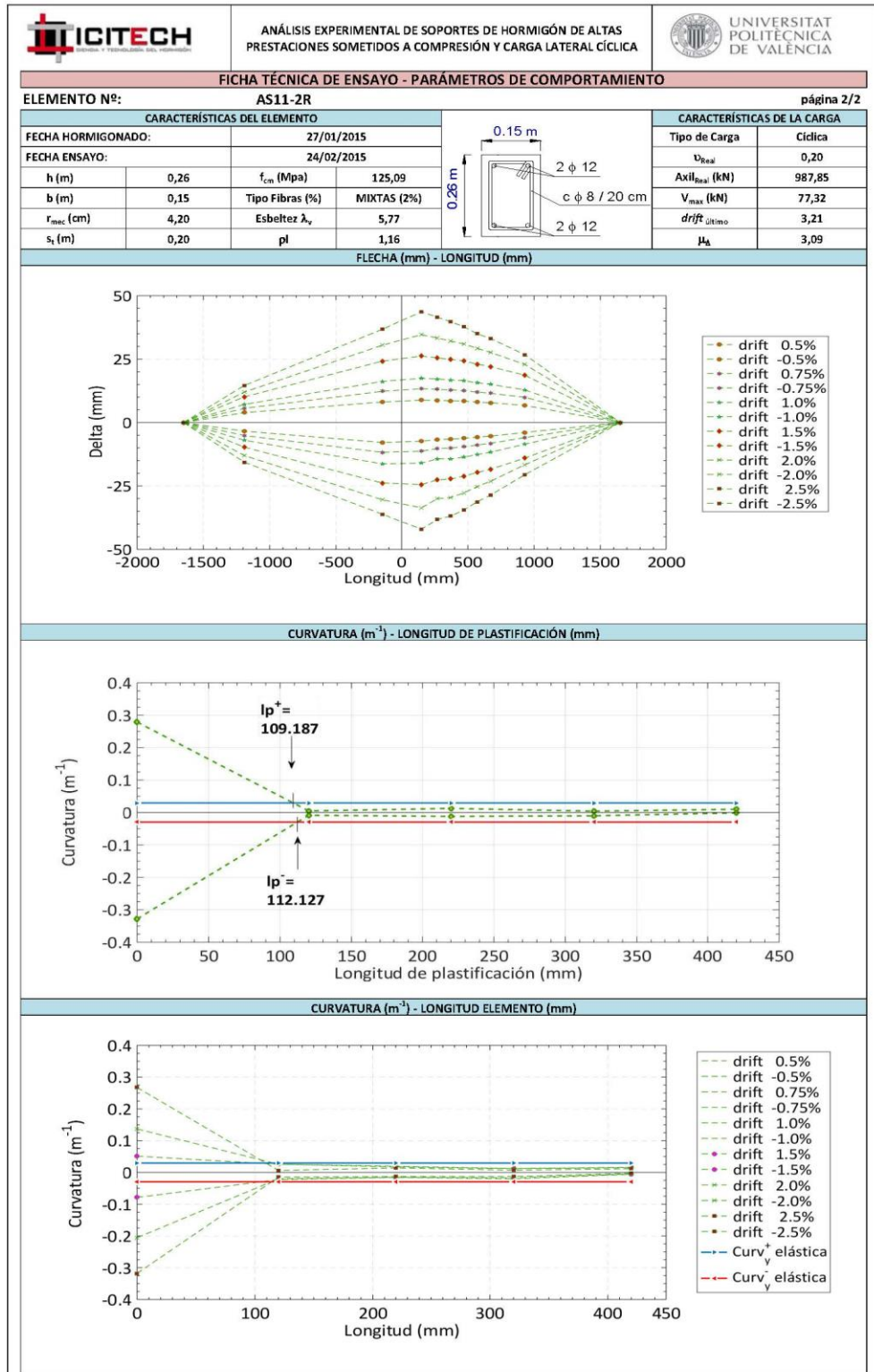


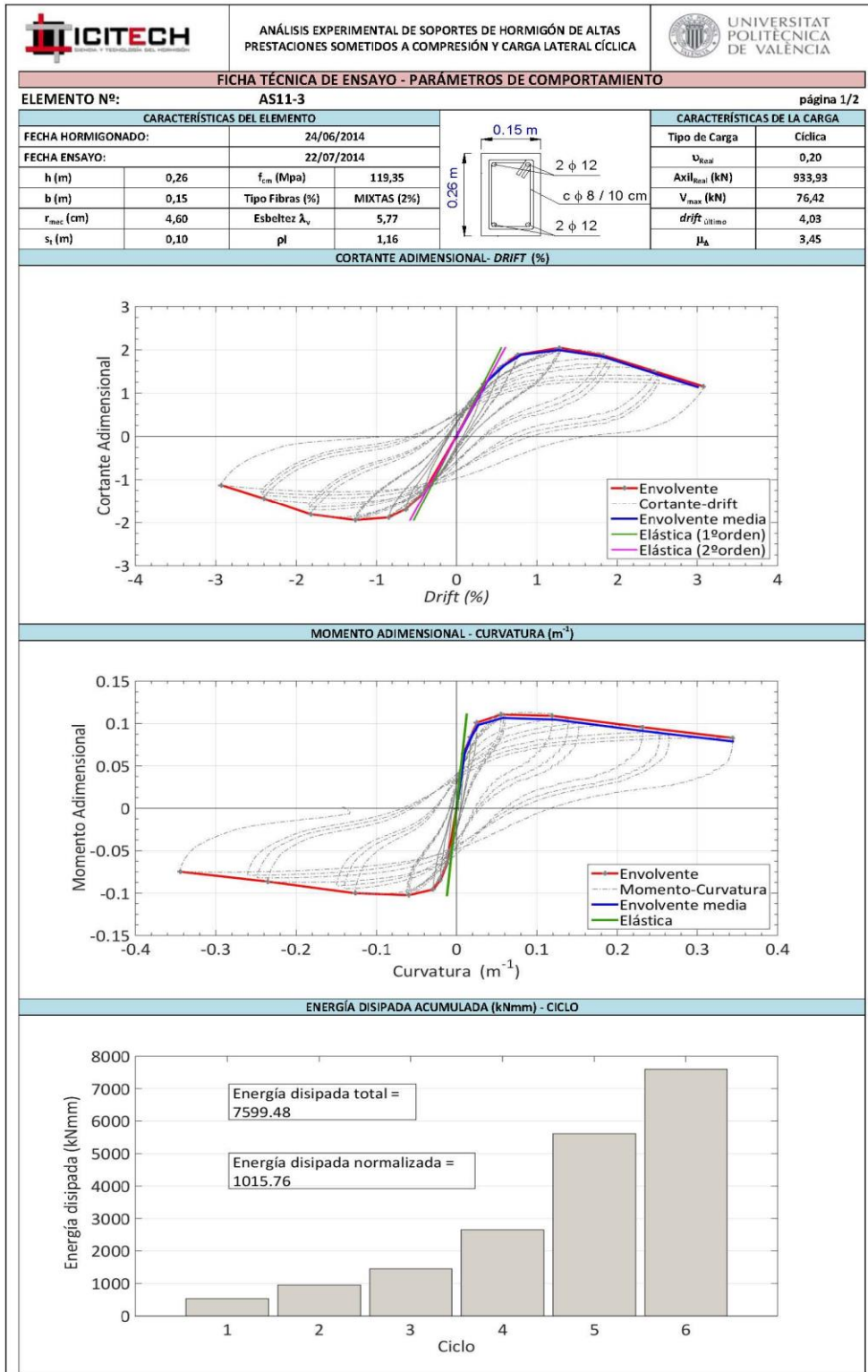
Ficha de parámetros de comportamiento

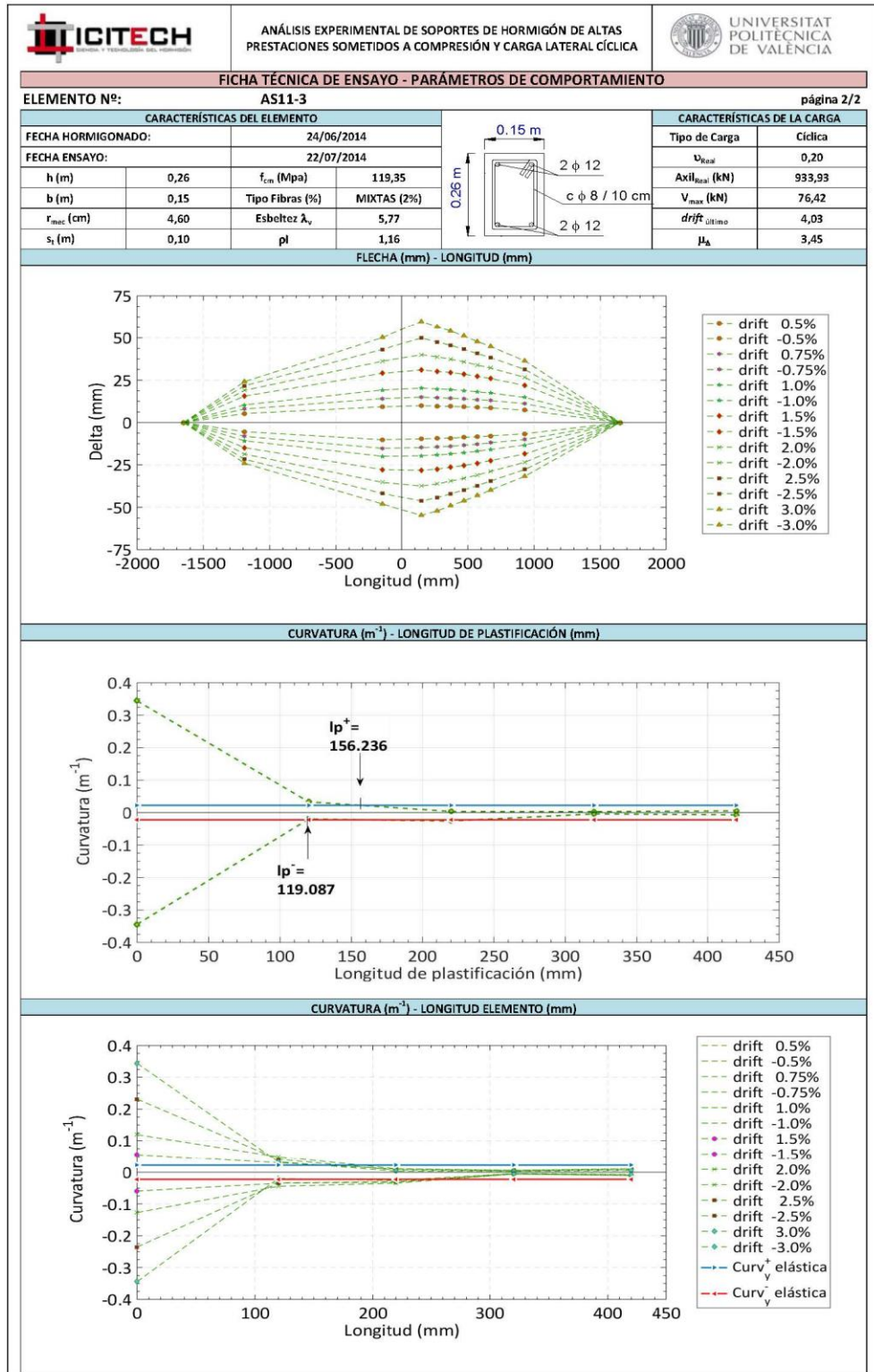


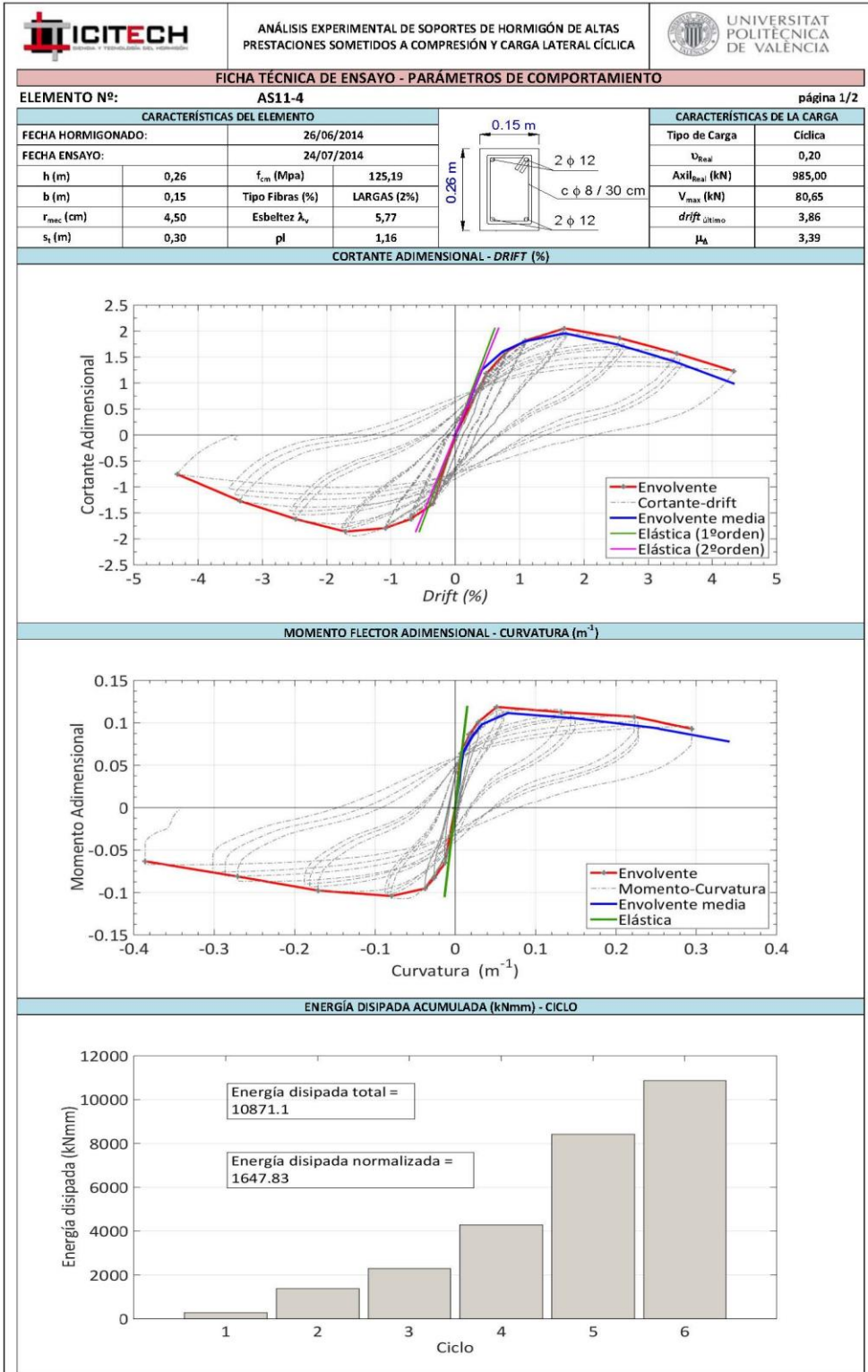


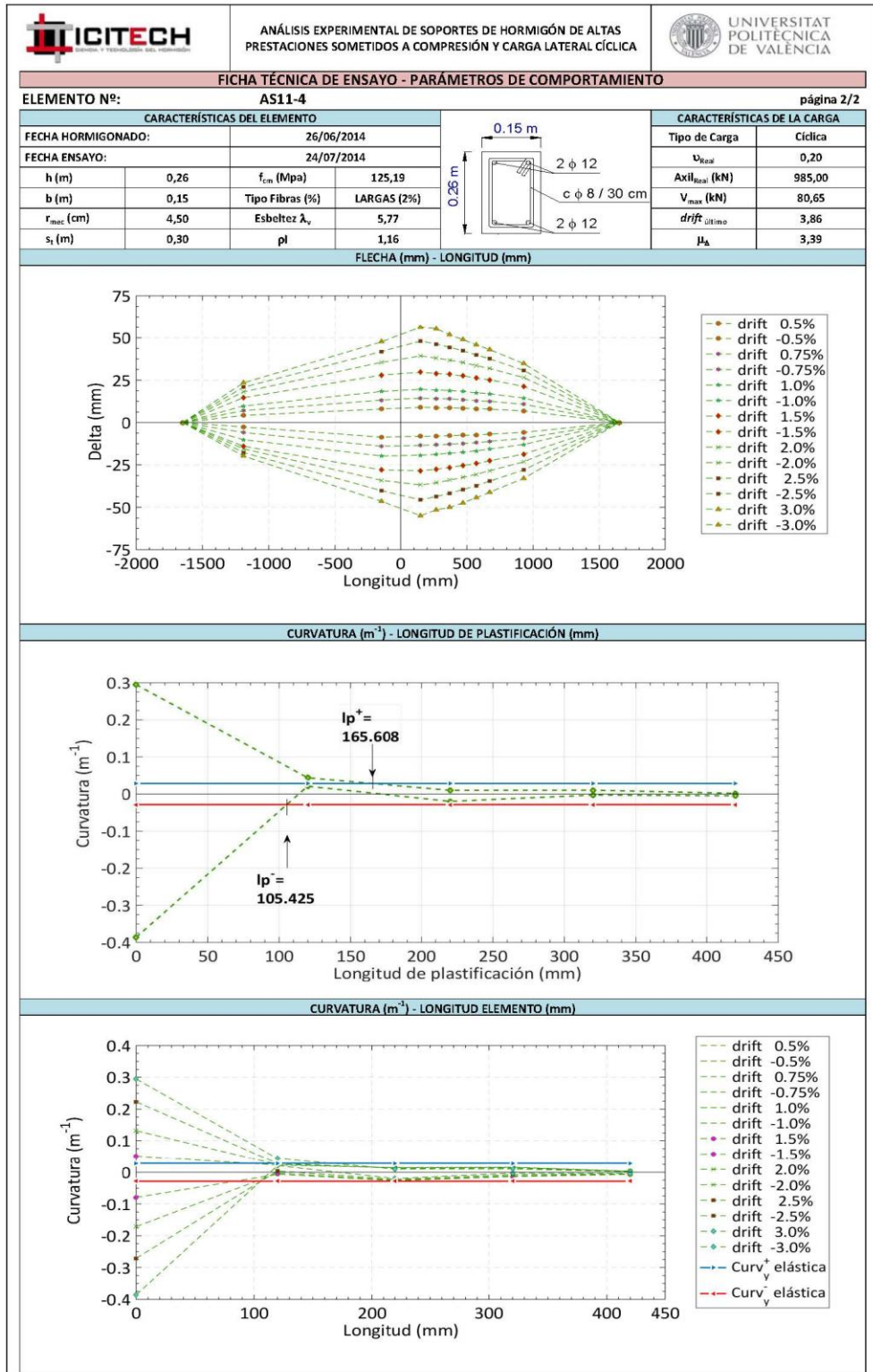


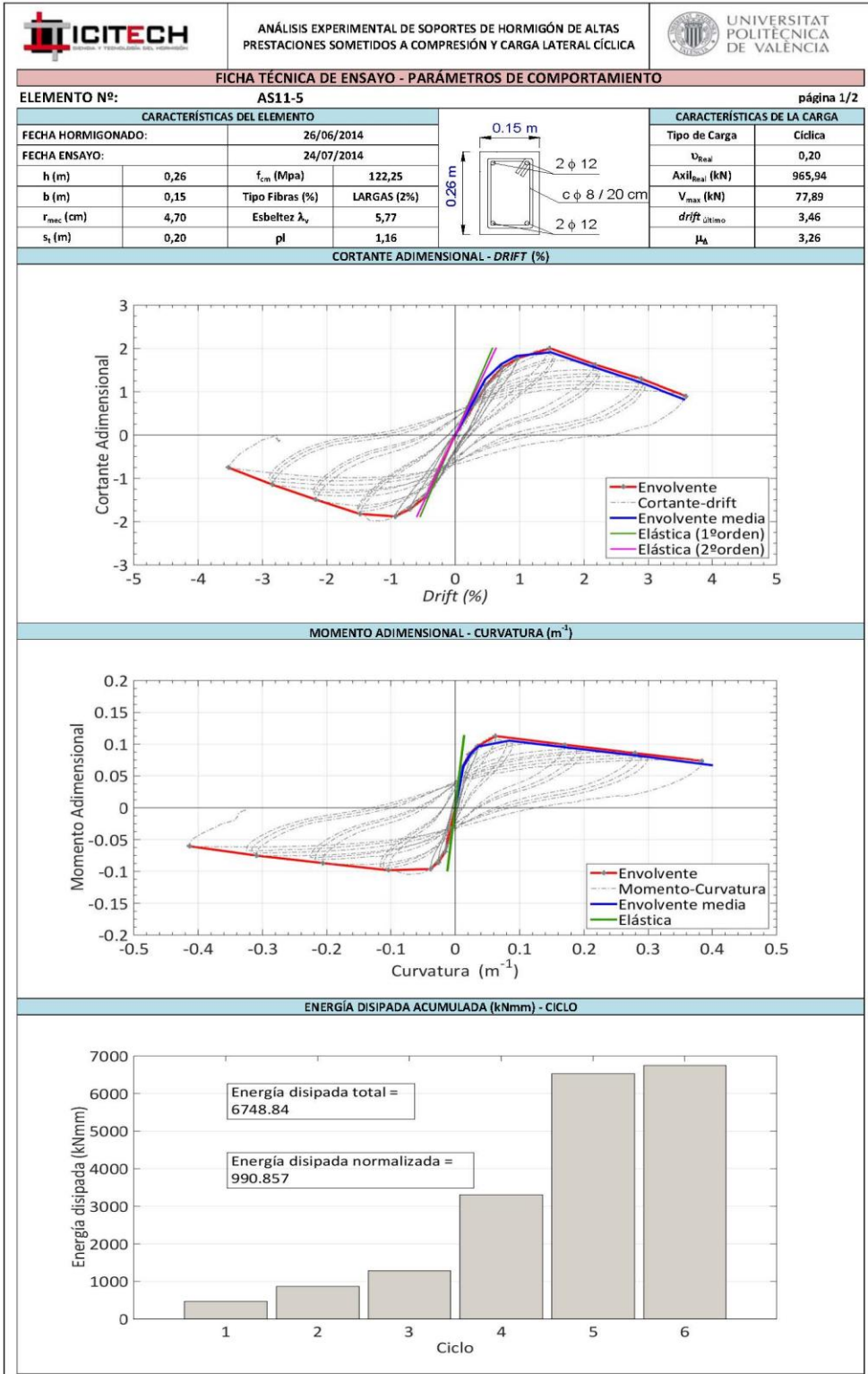


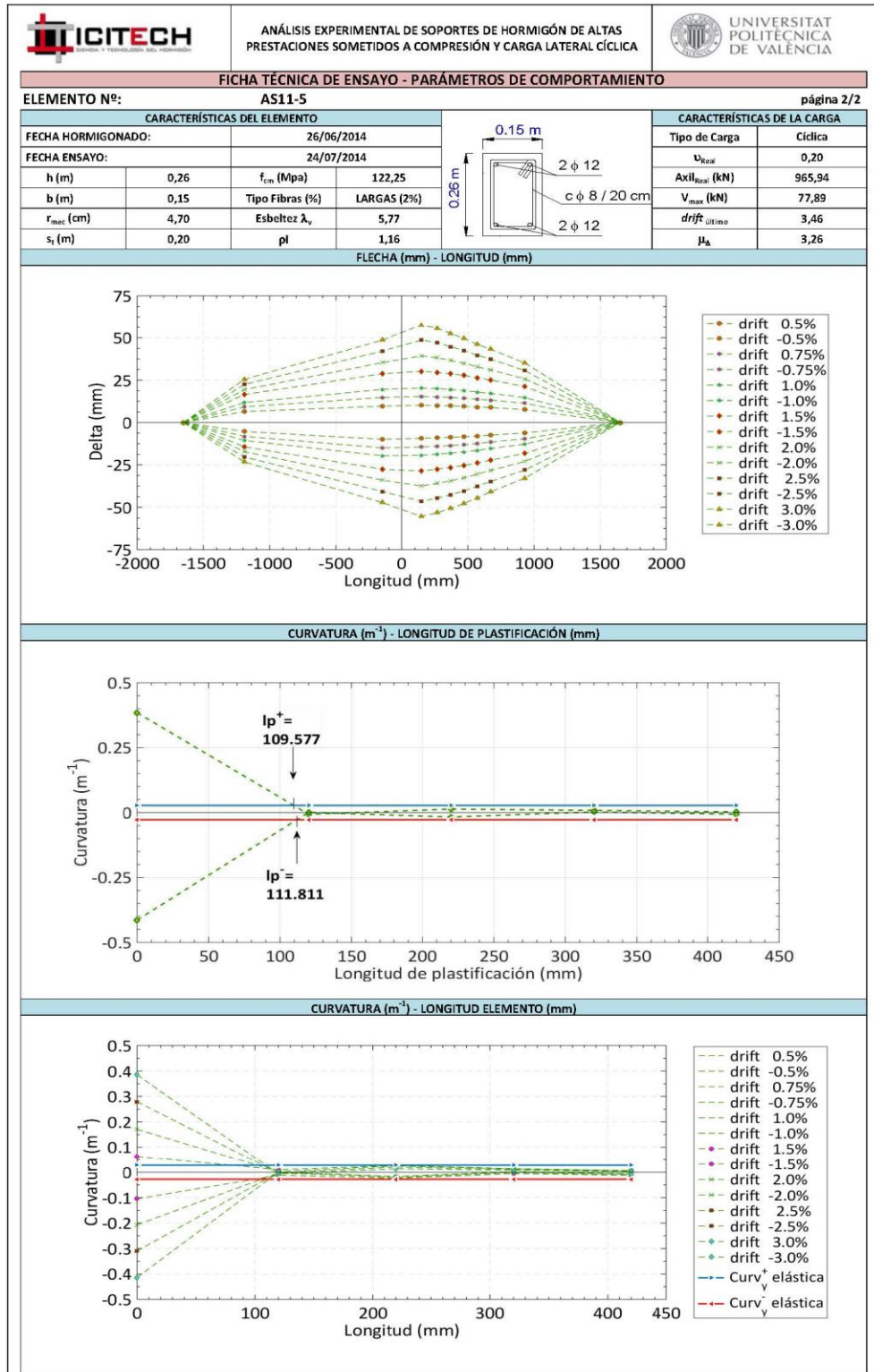


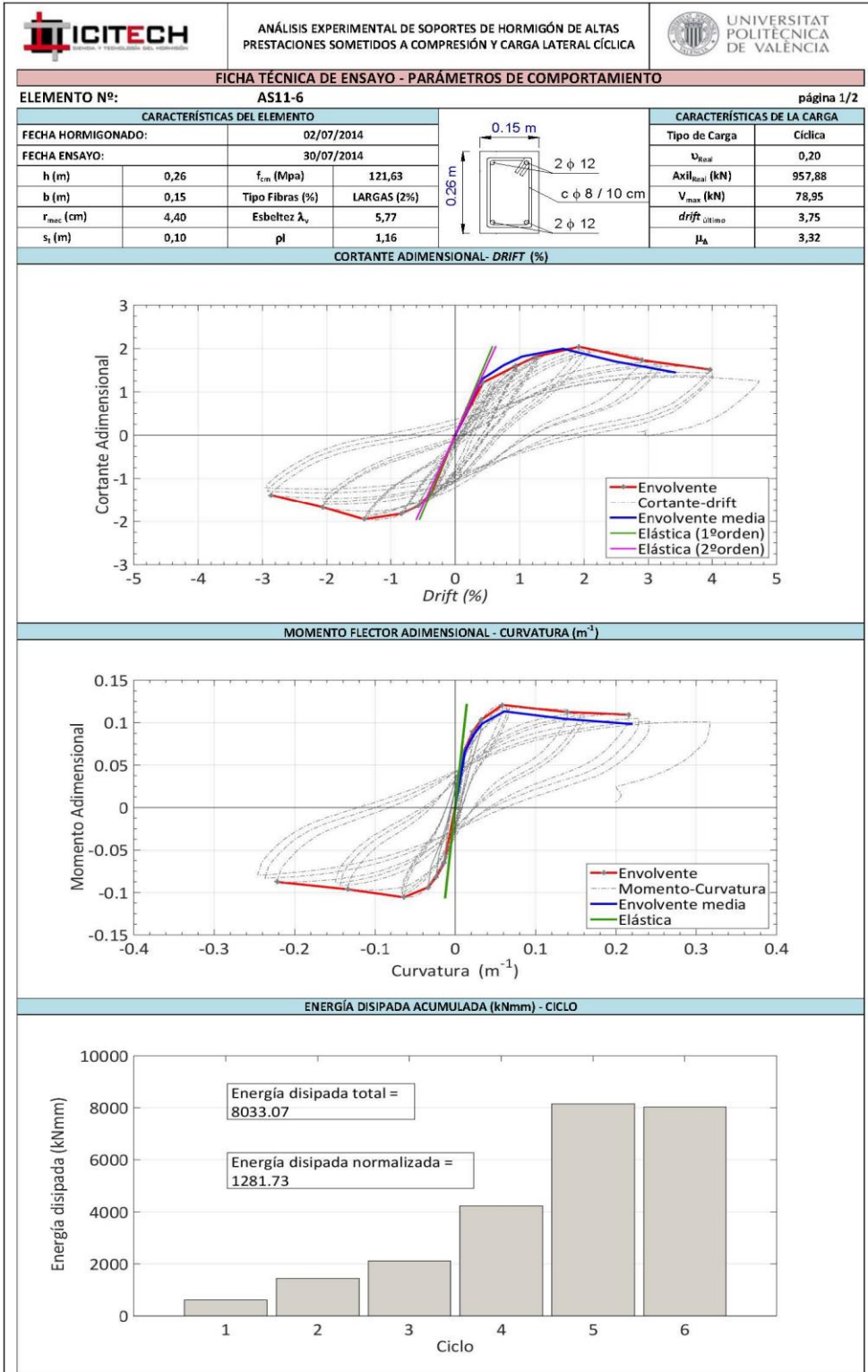


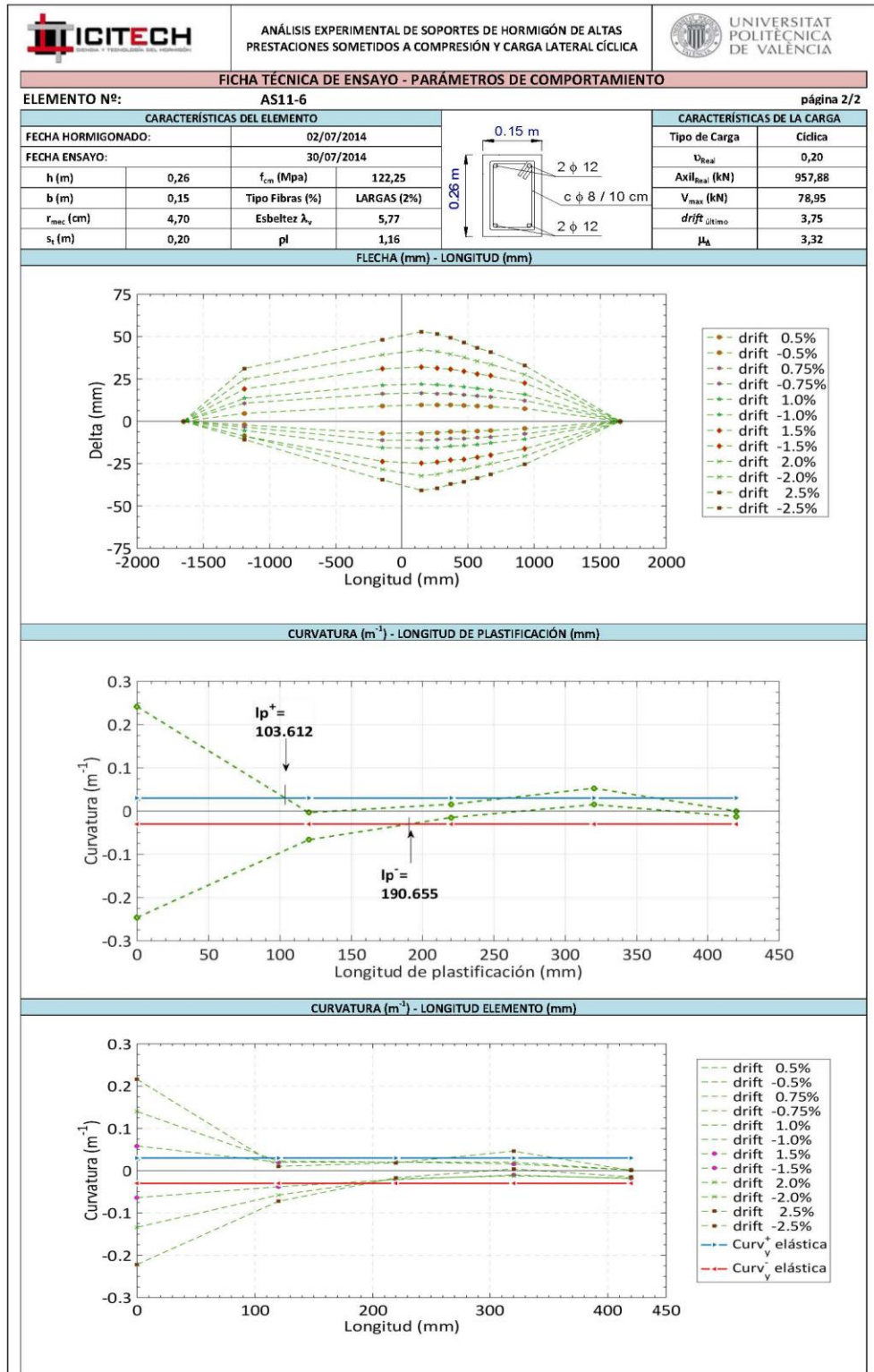


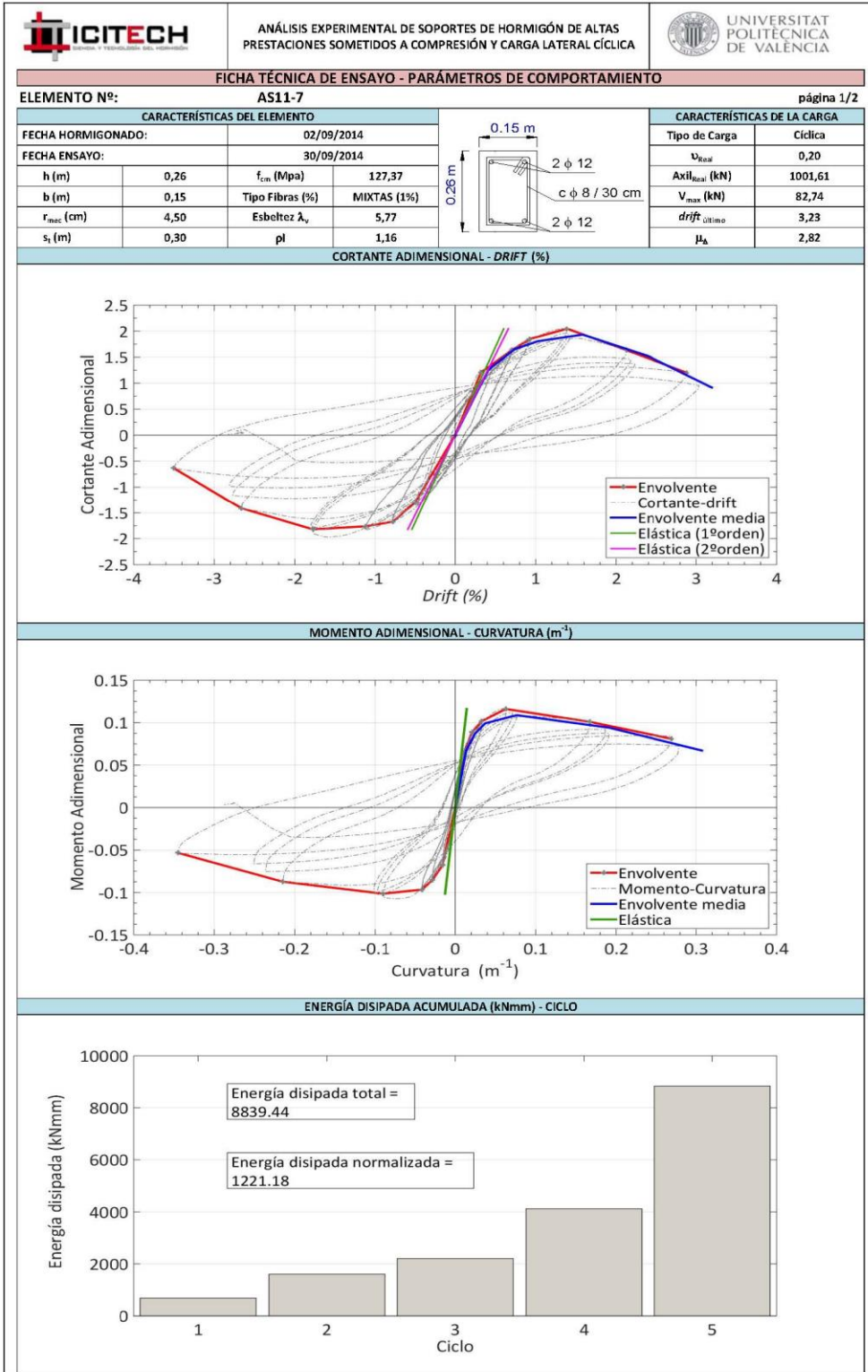


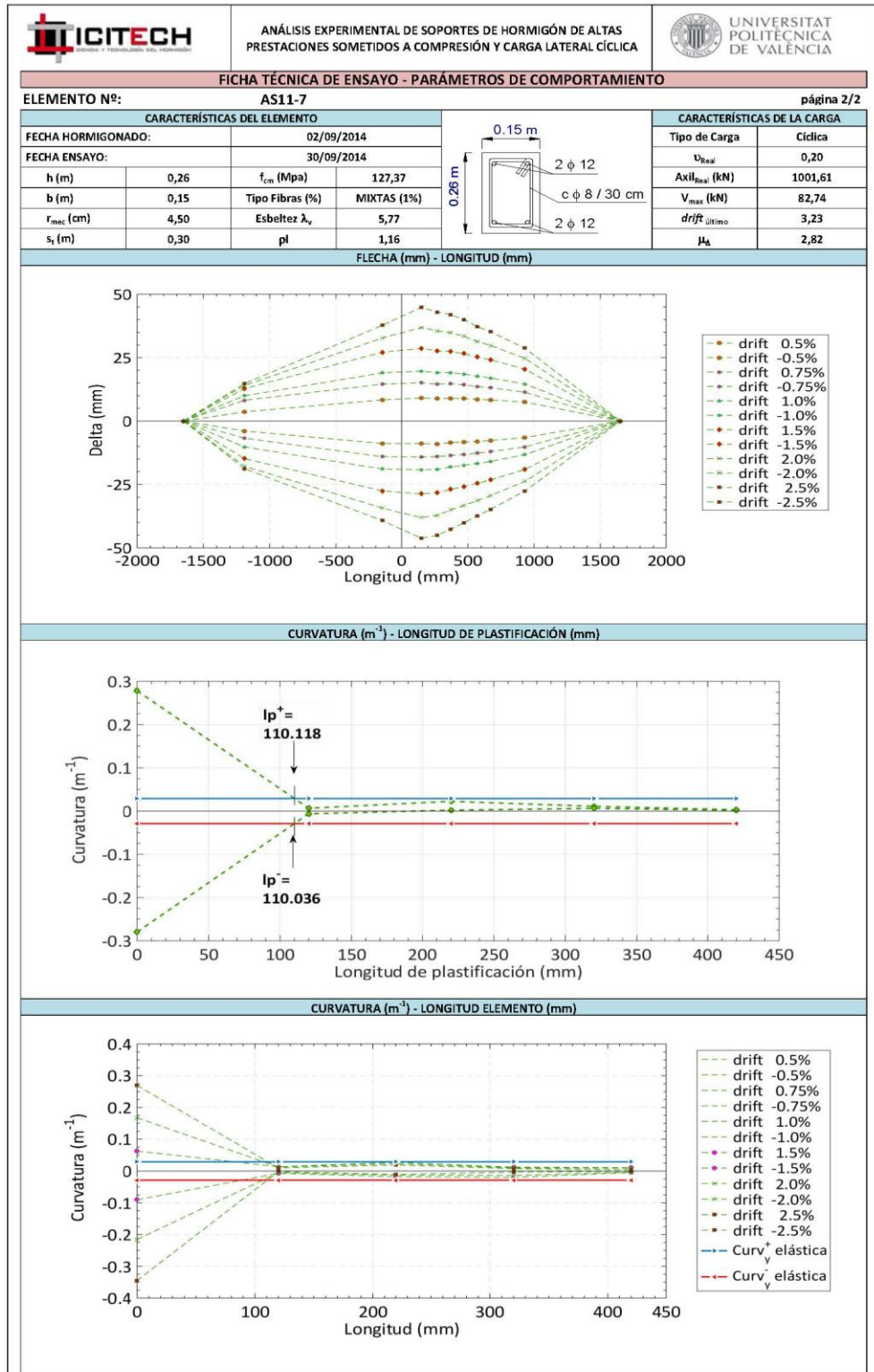


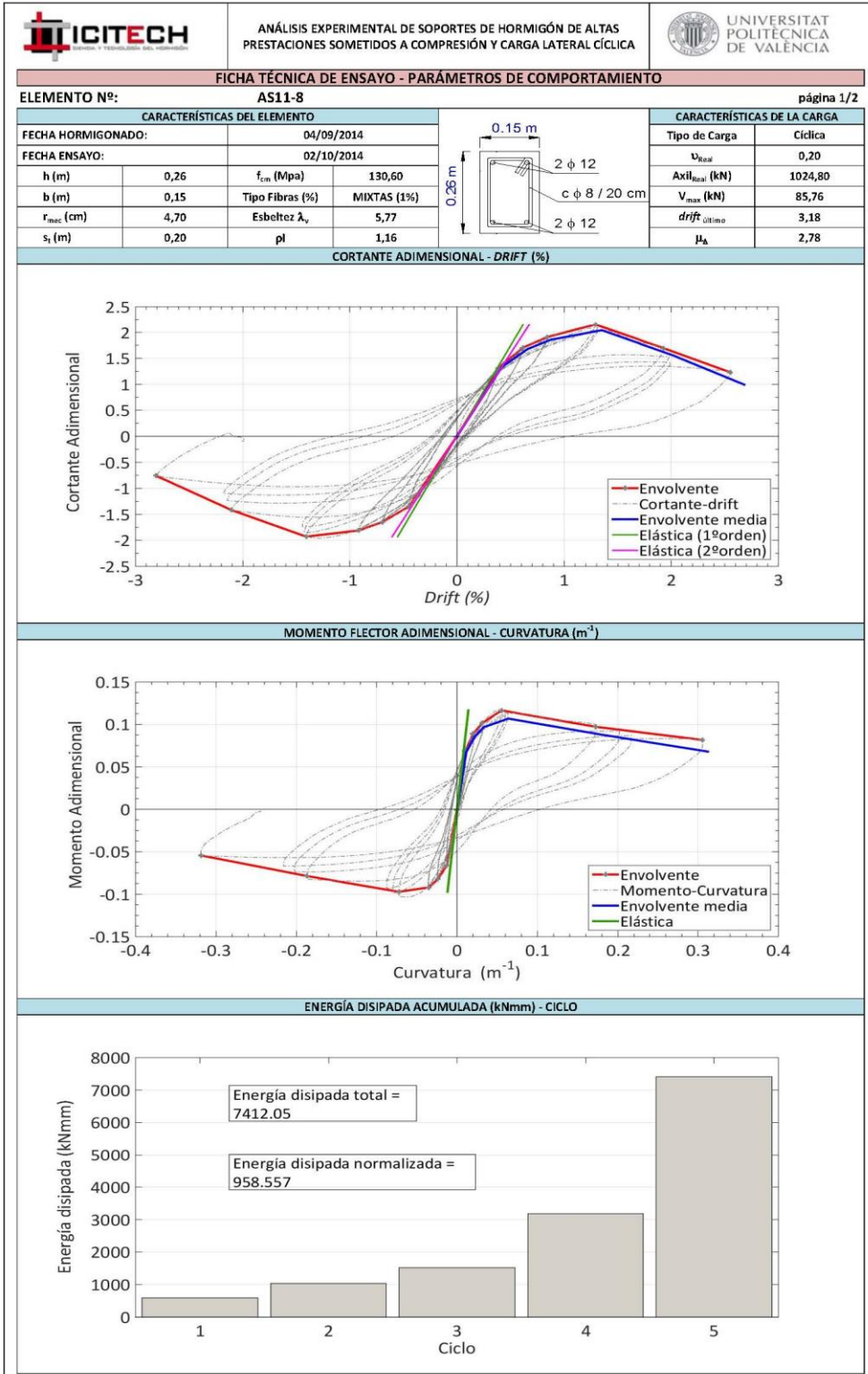


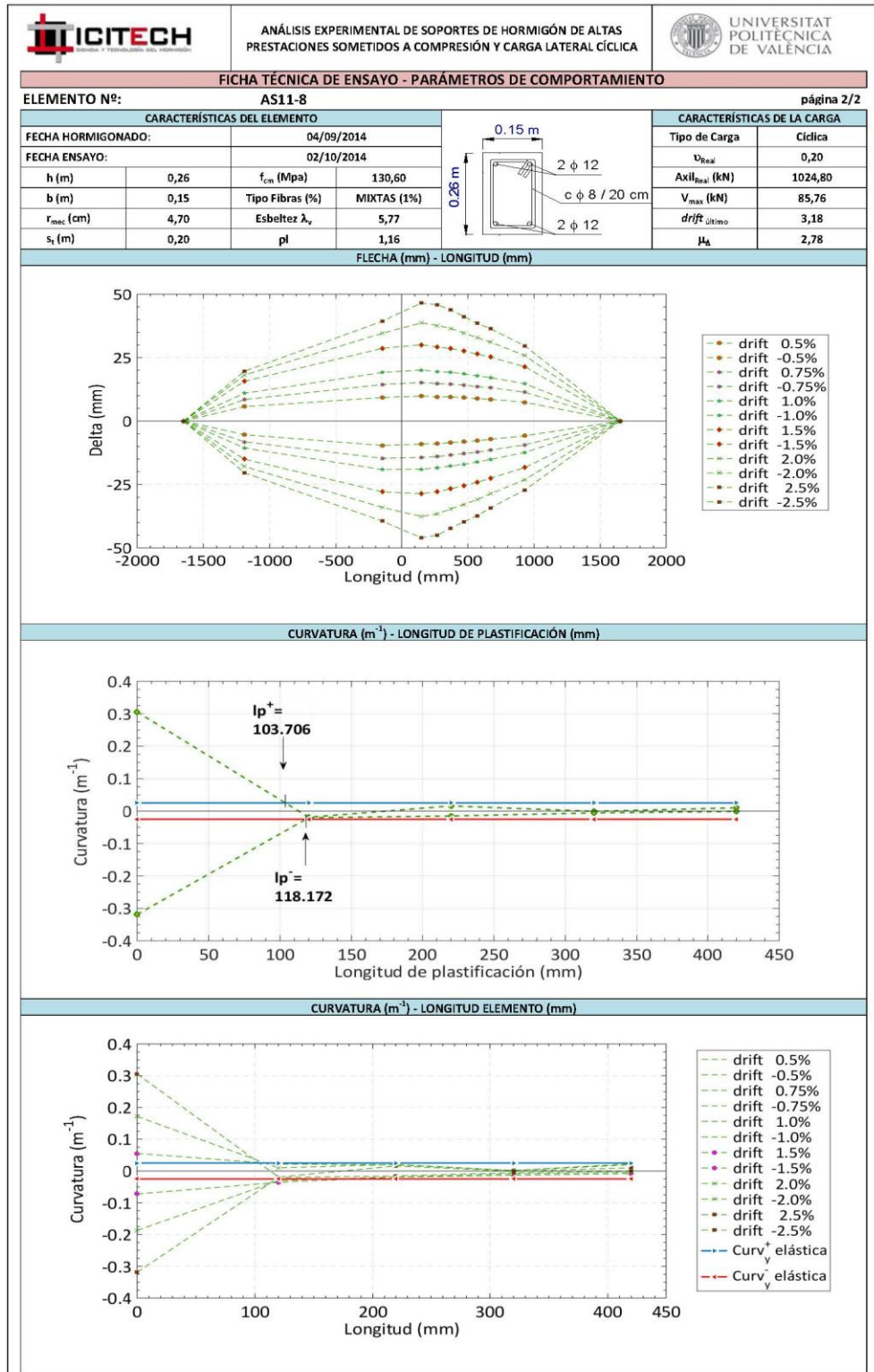


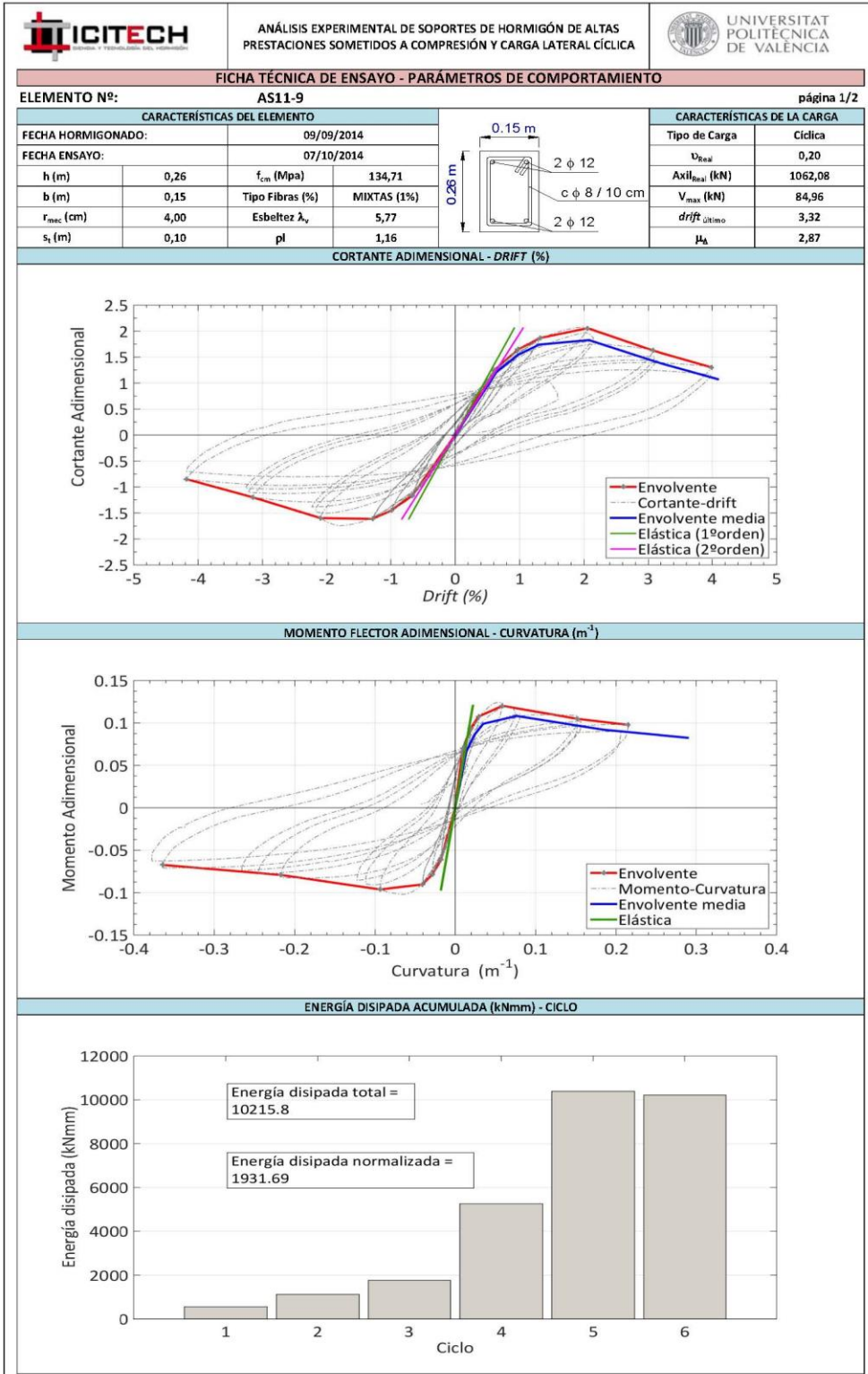


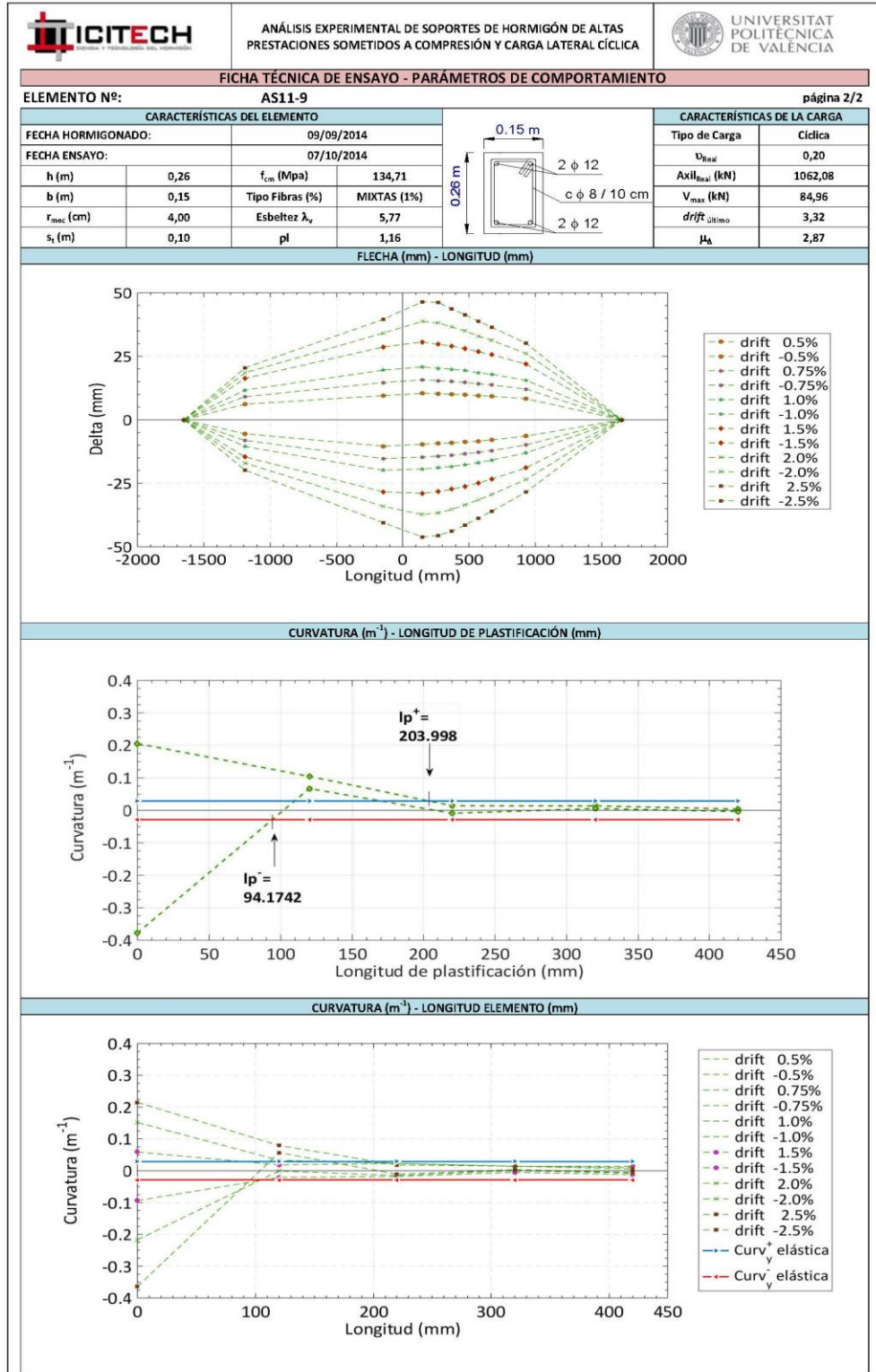


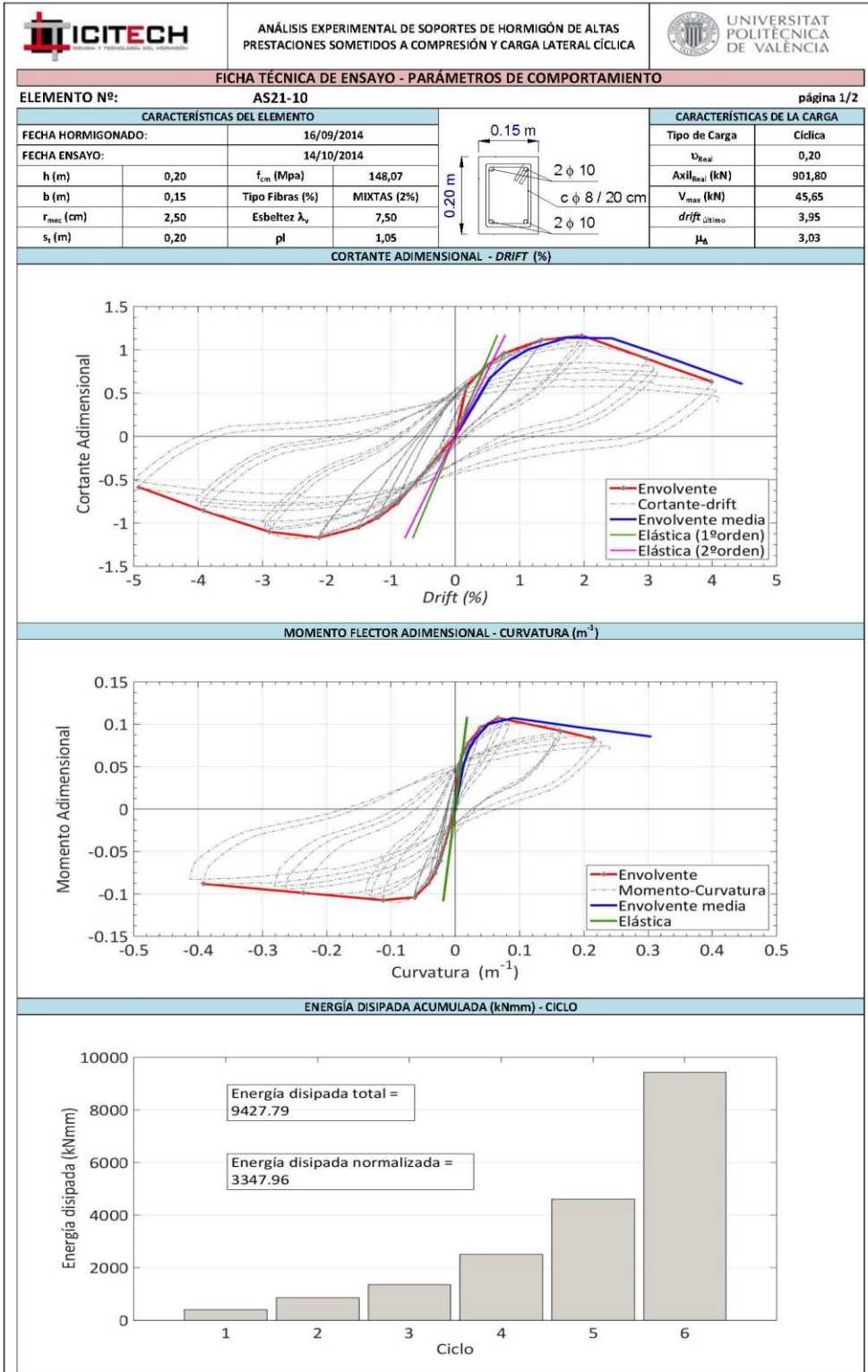


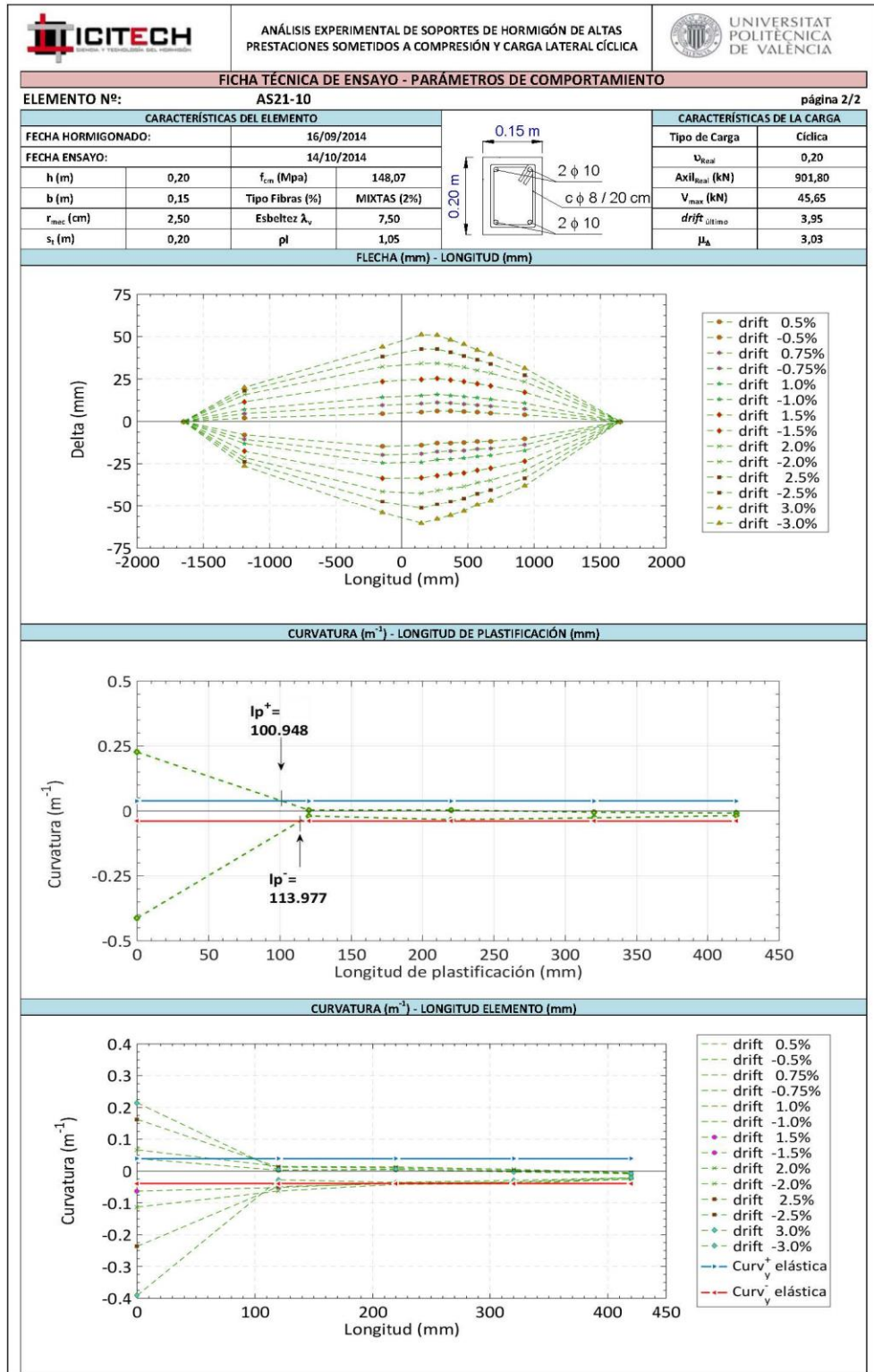


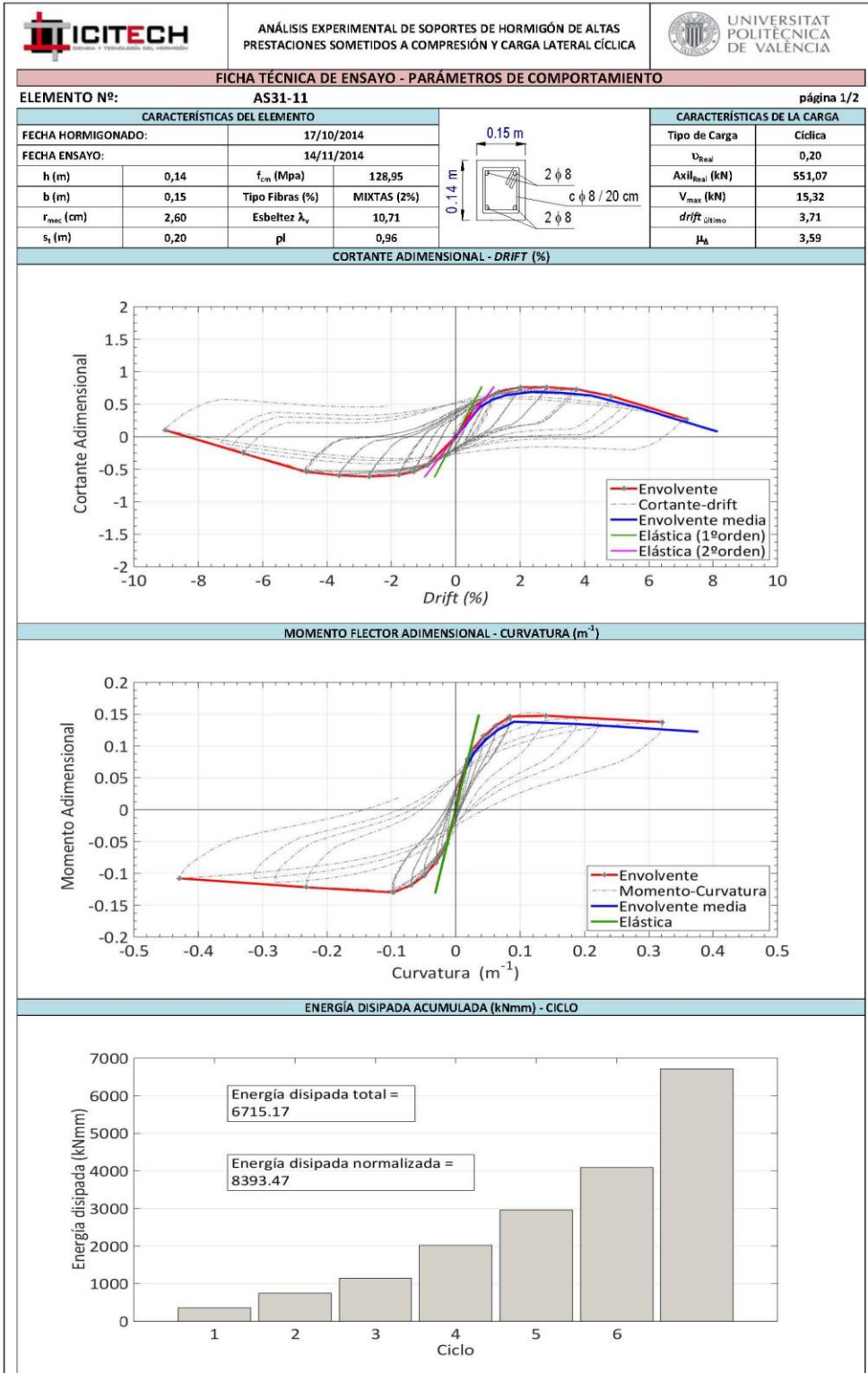


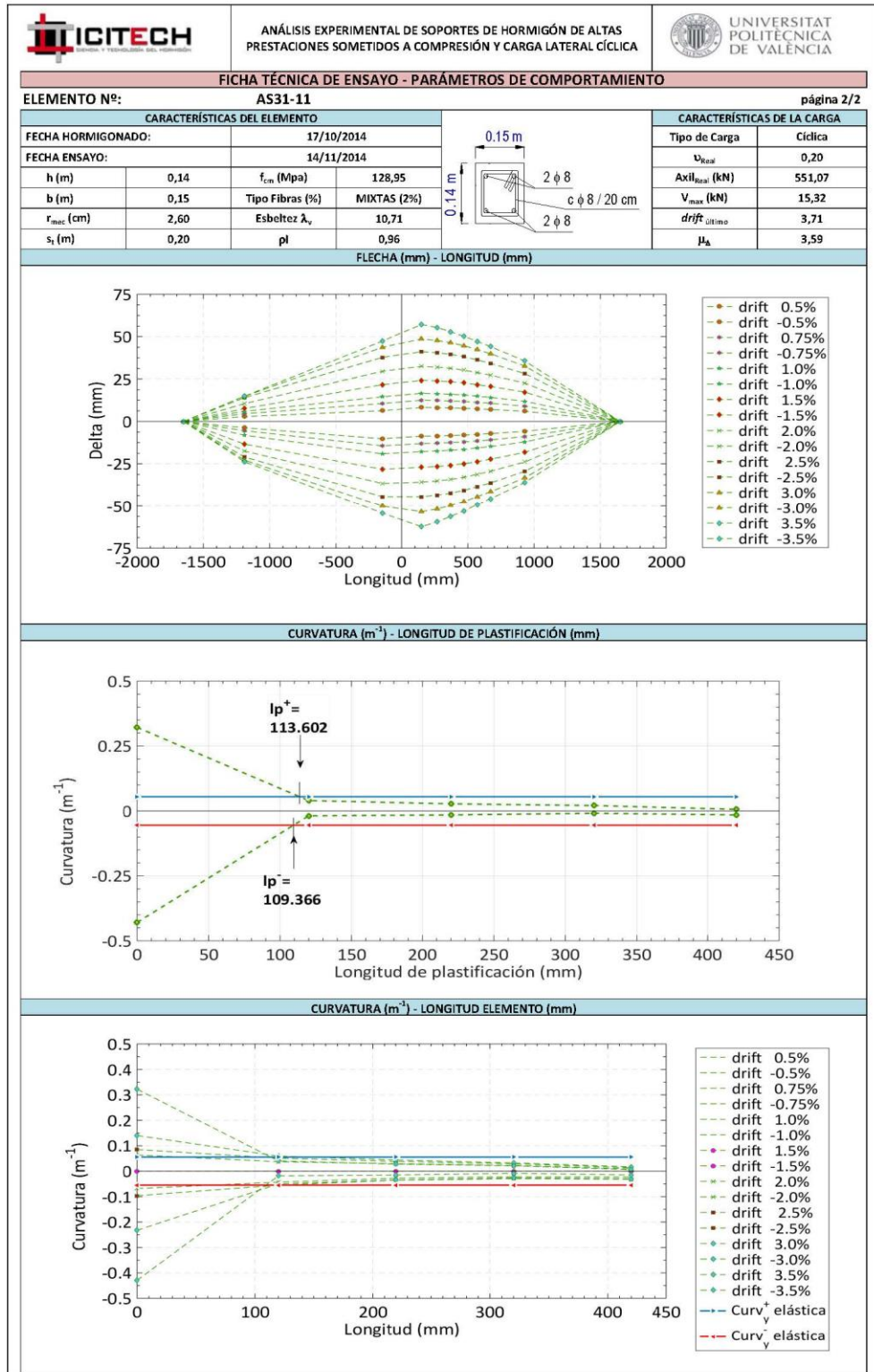


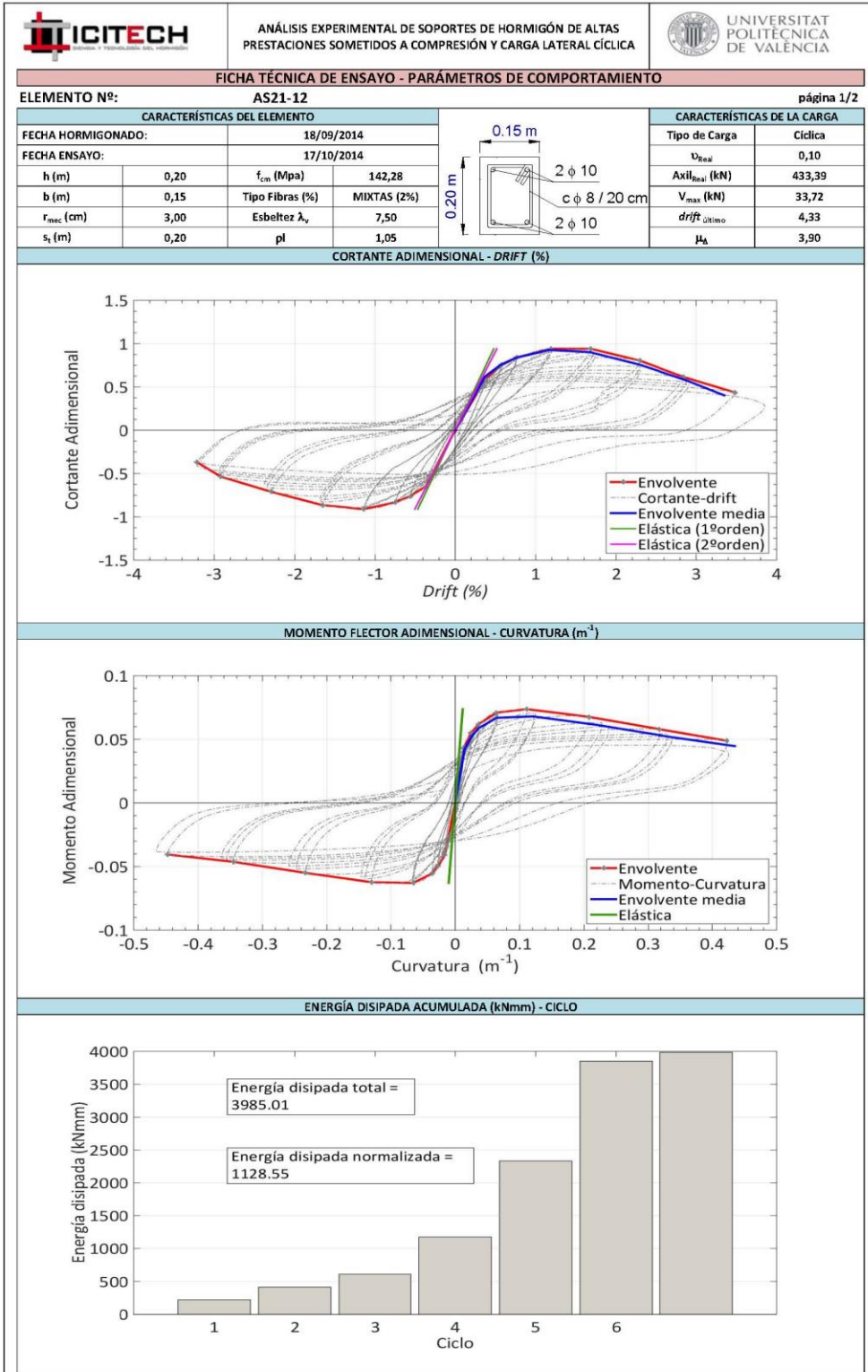


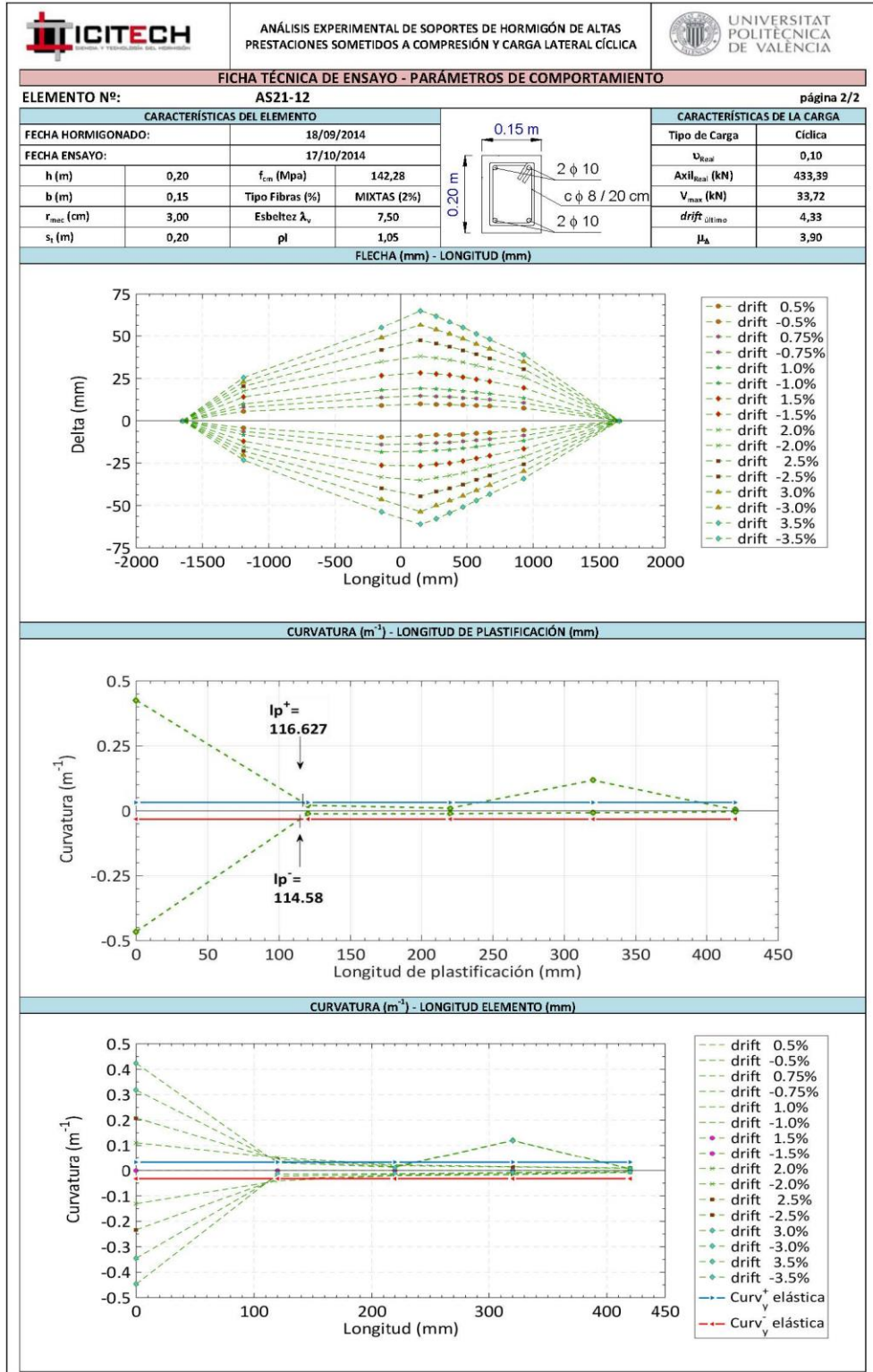


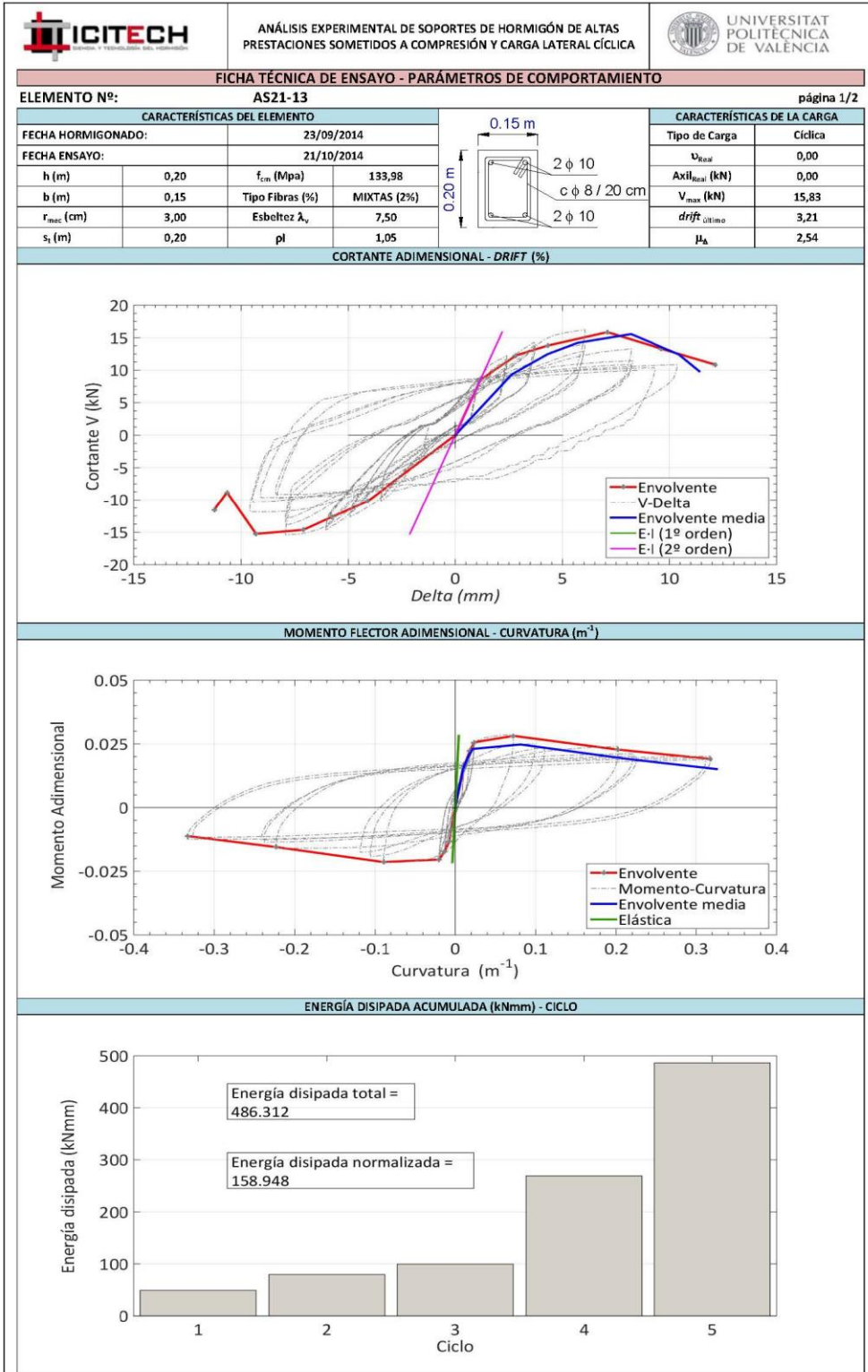


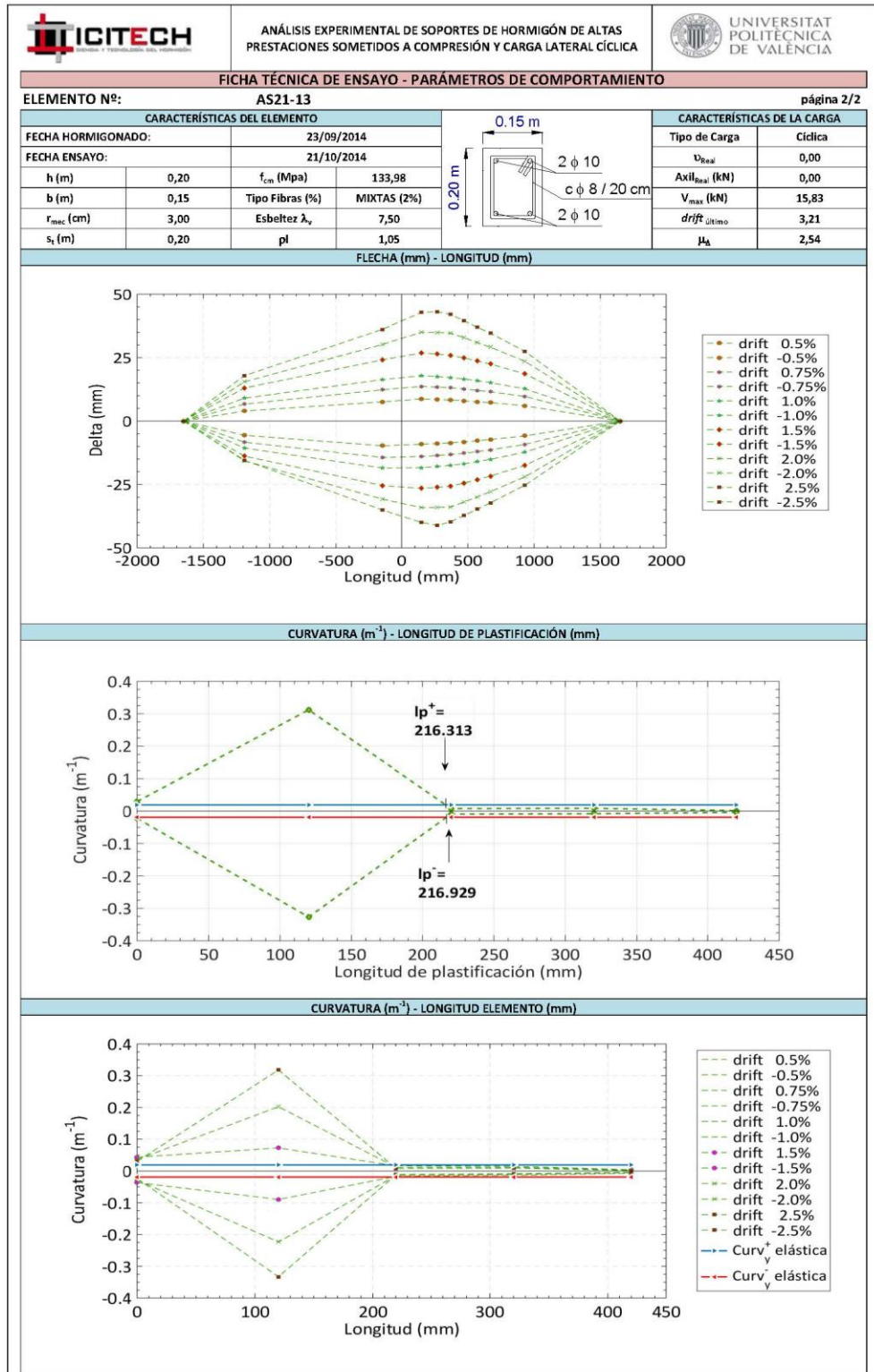


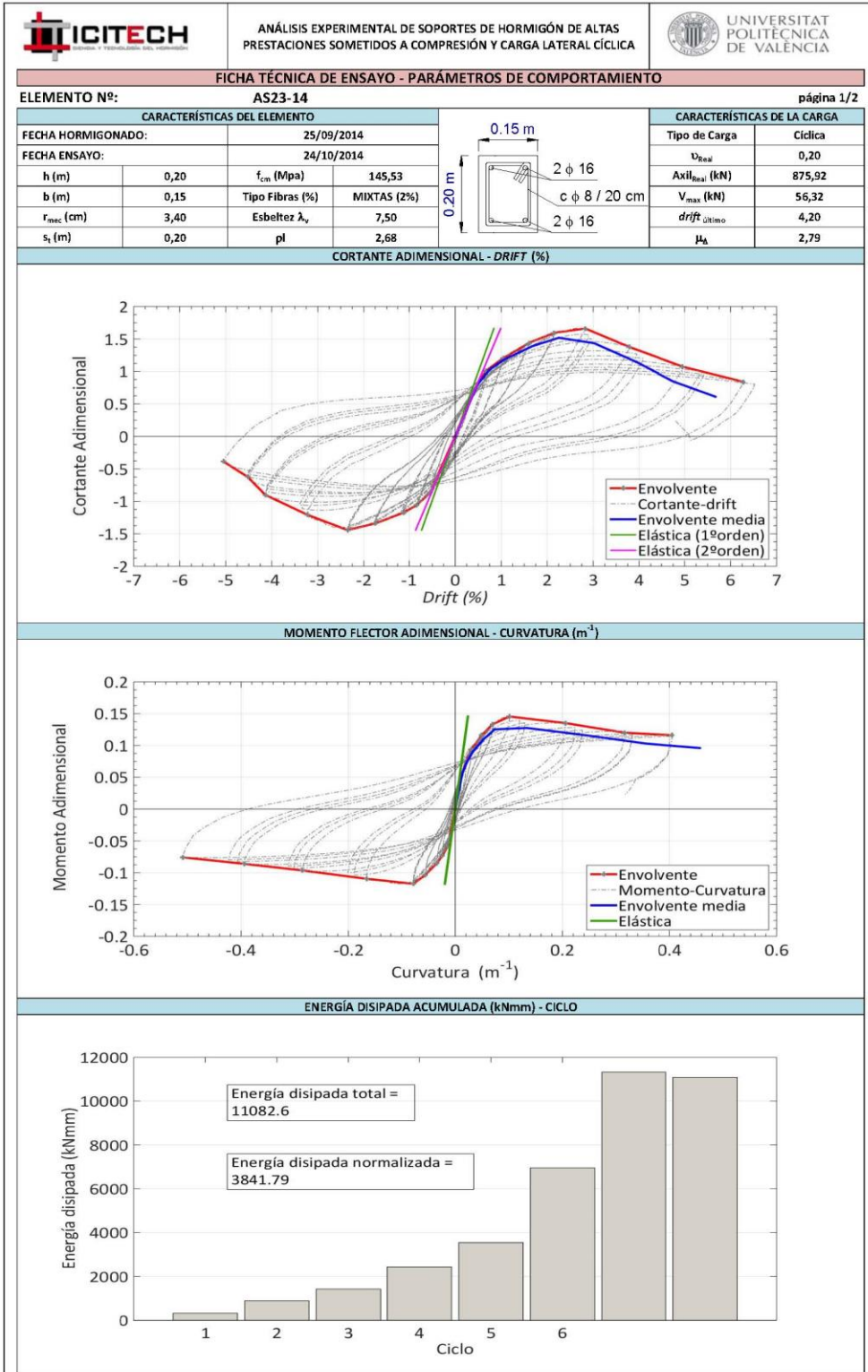


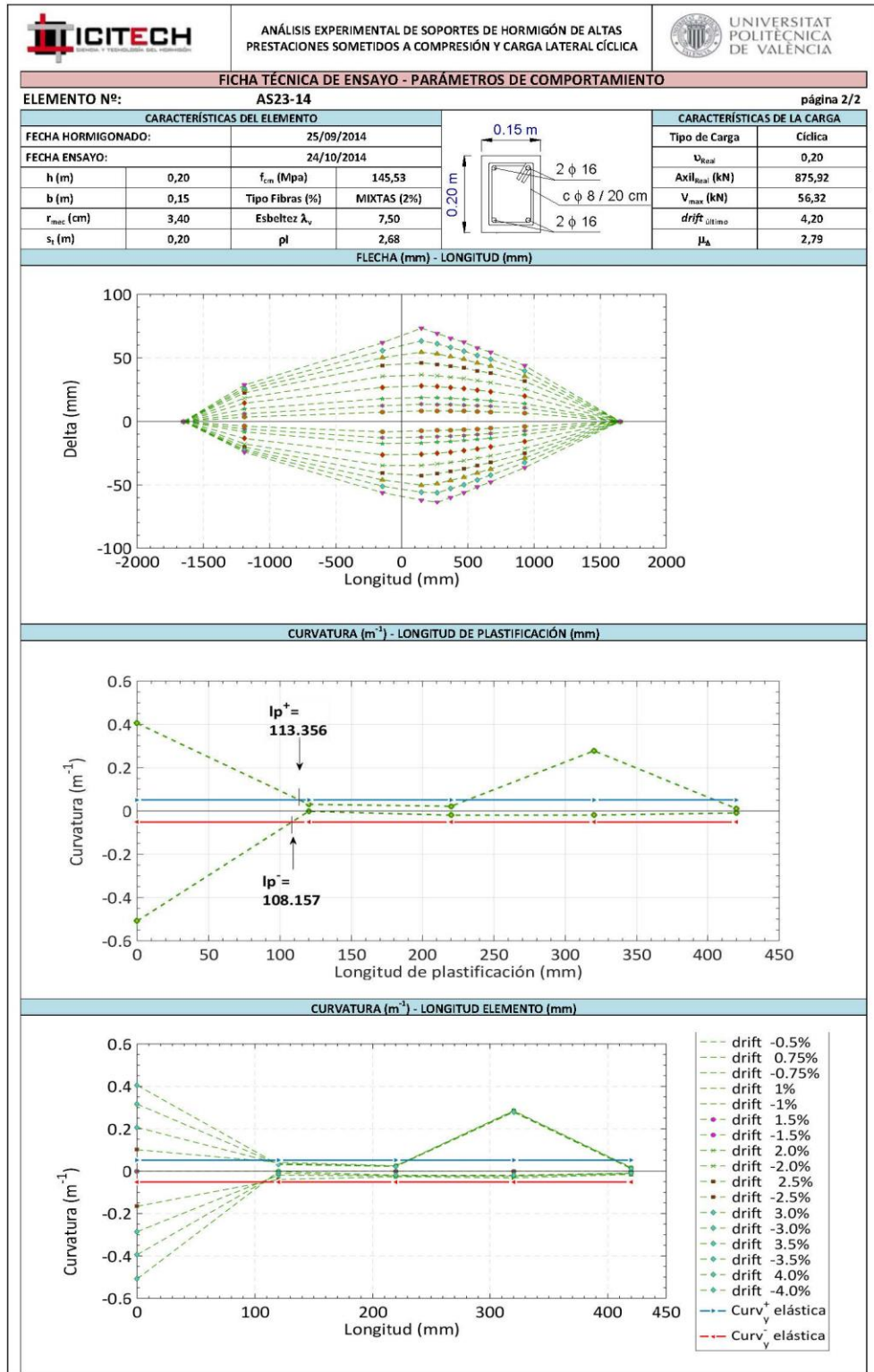


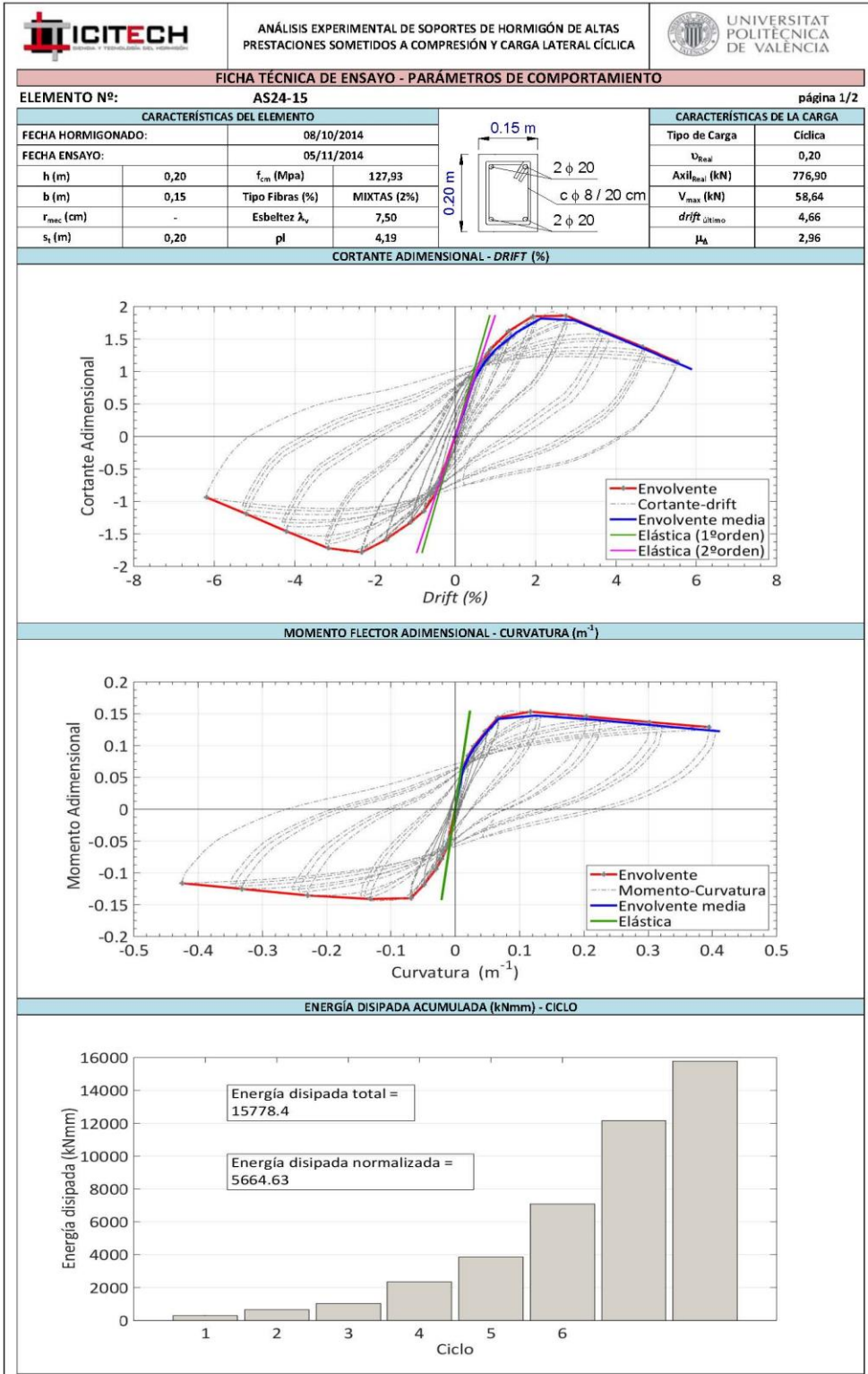


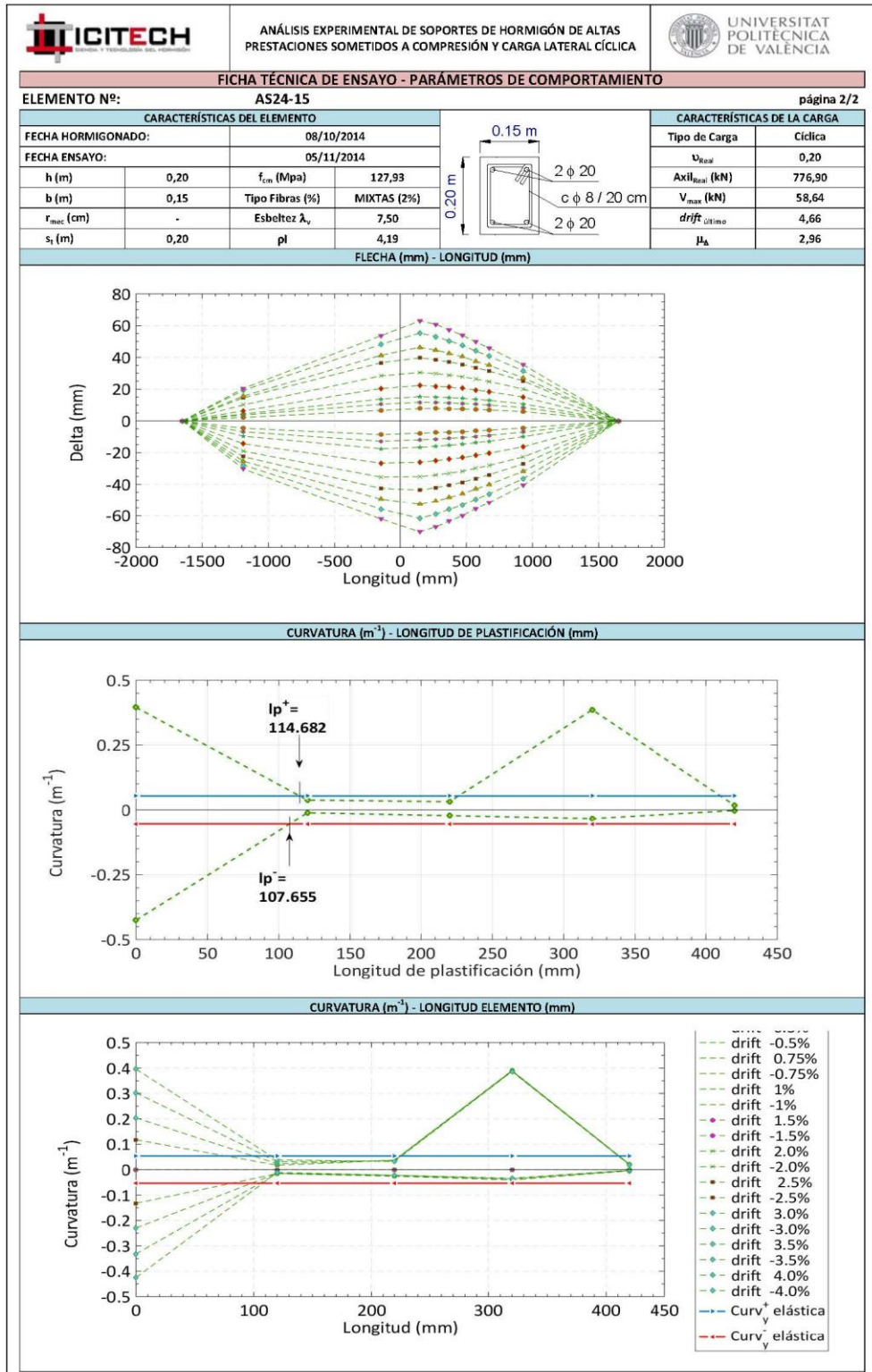


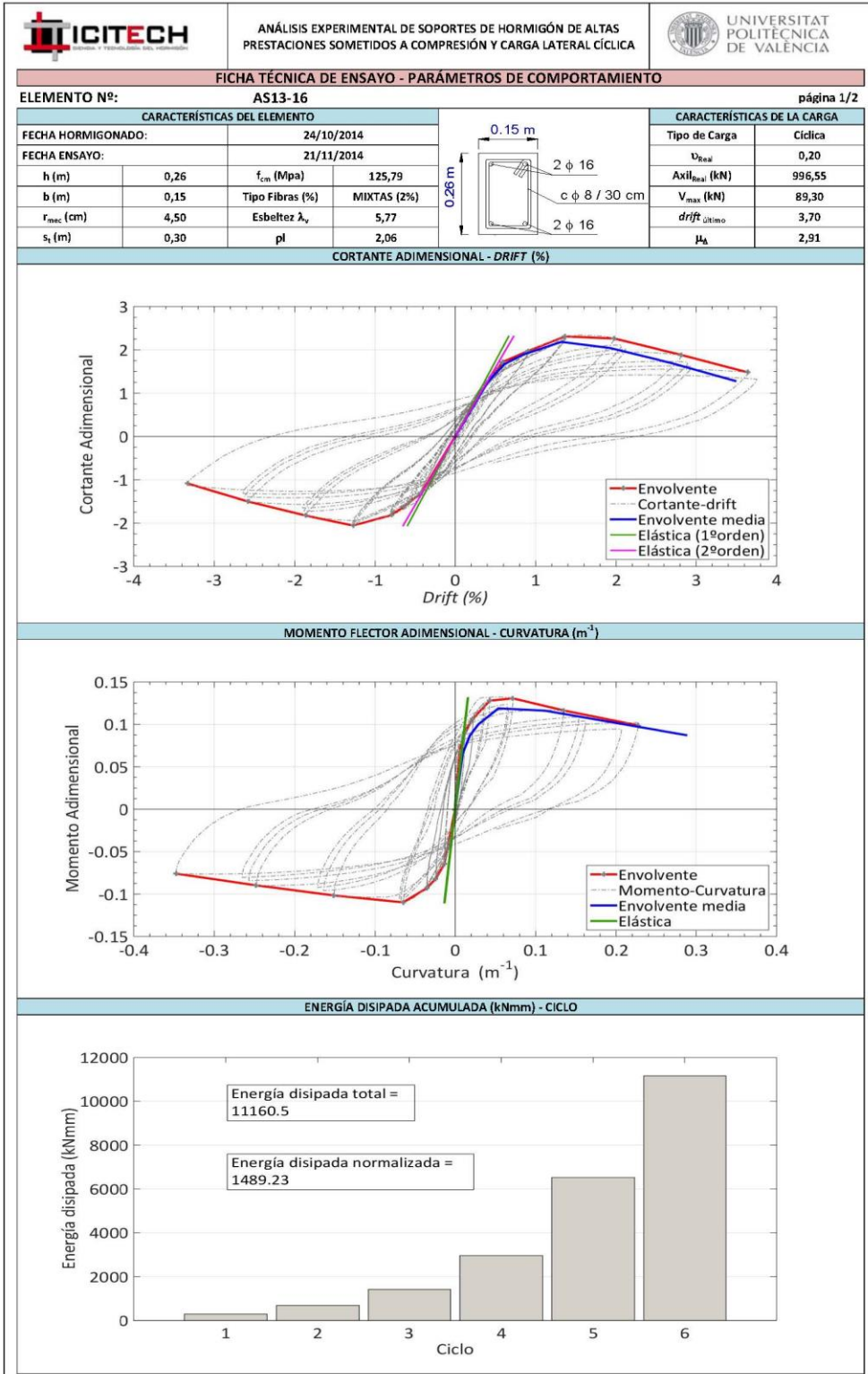


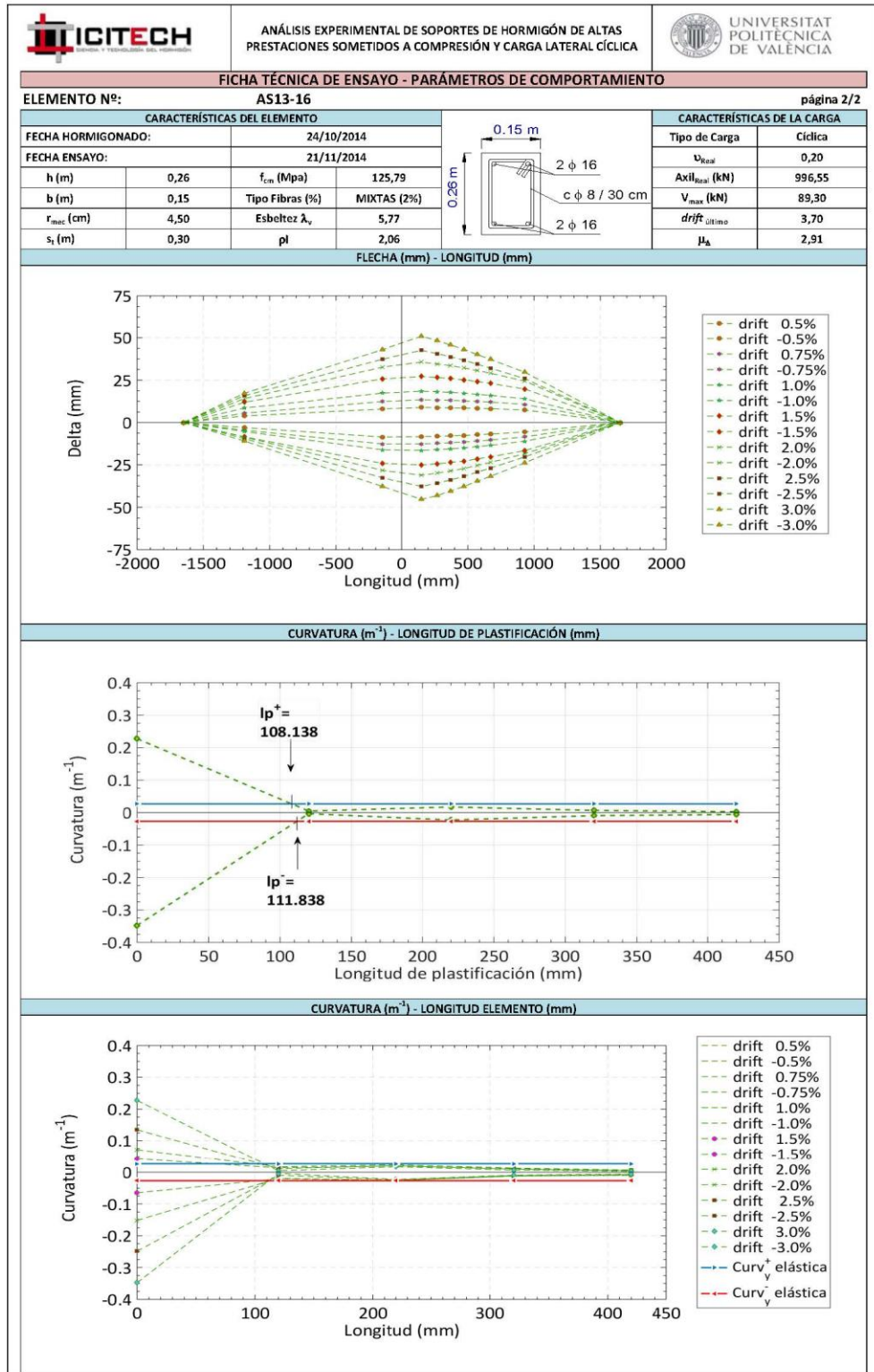


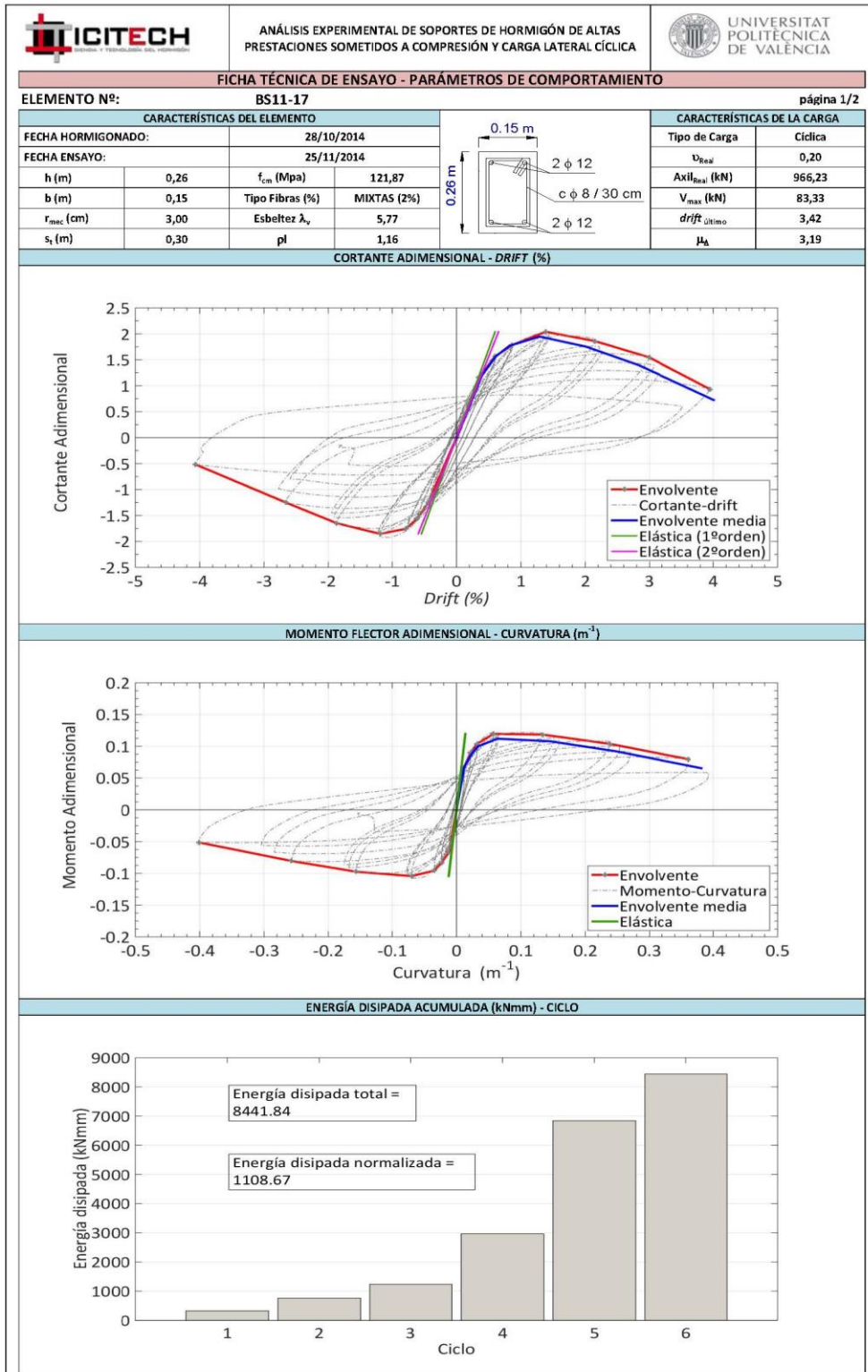


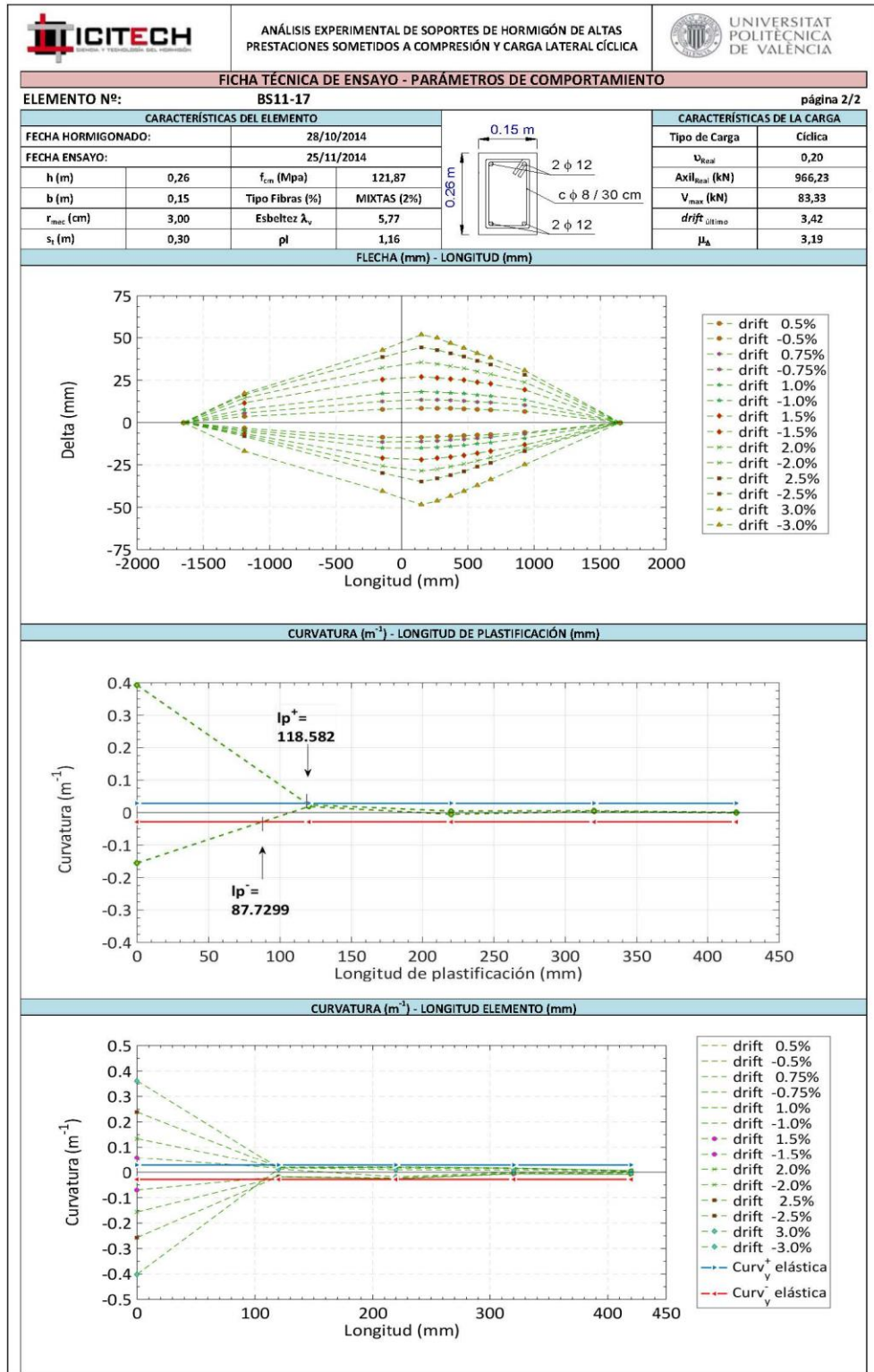


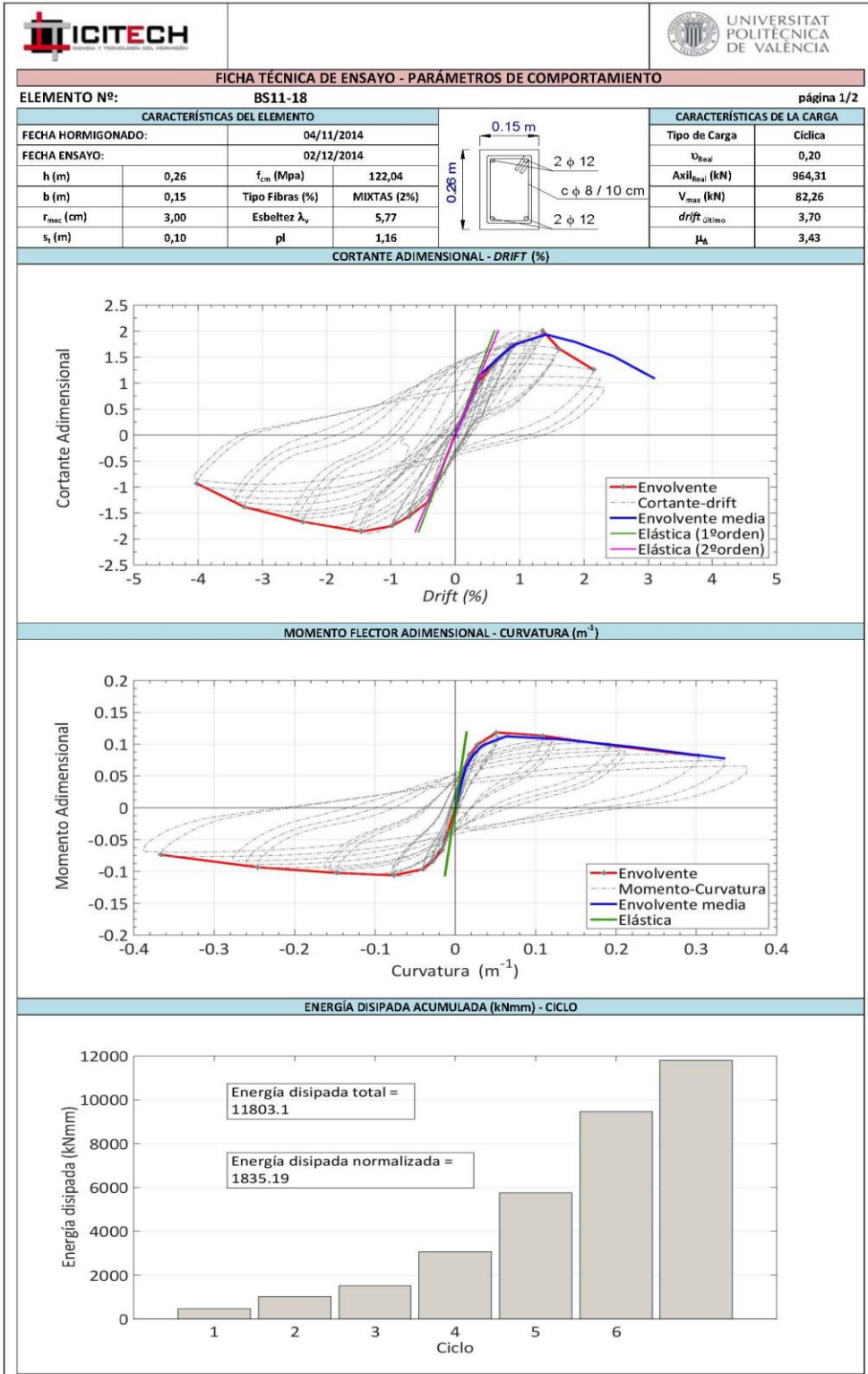


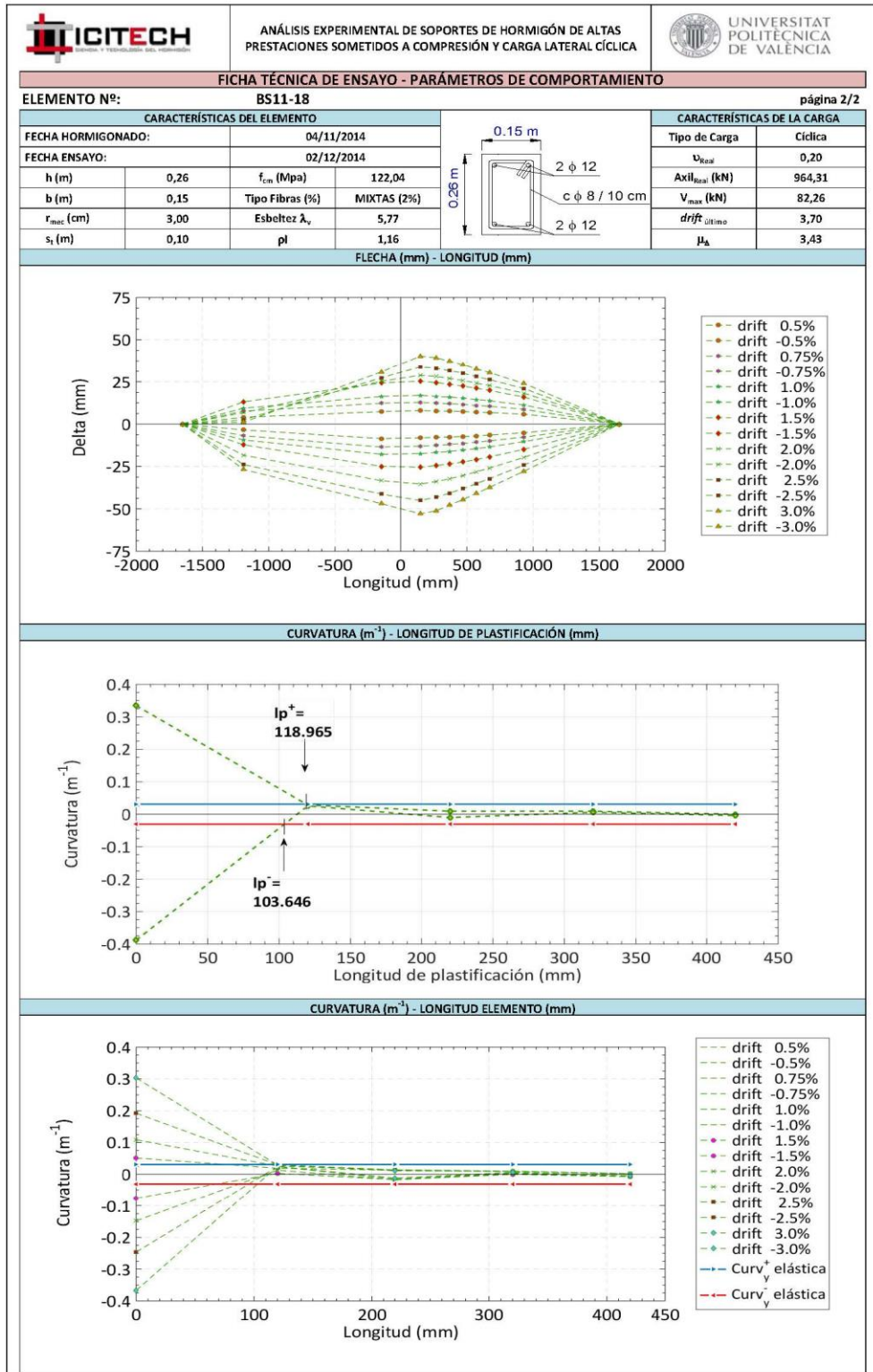


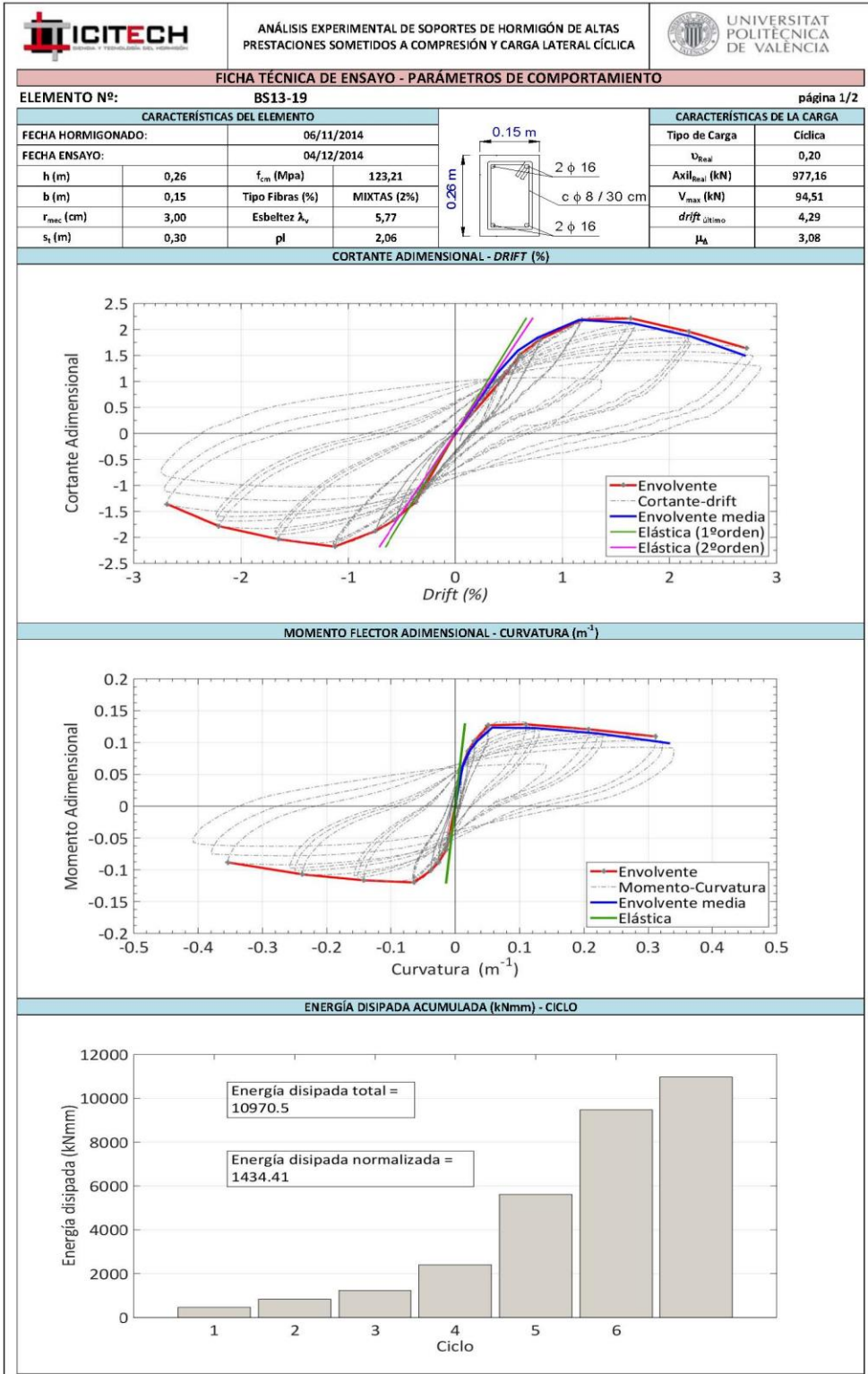


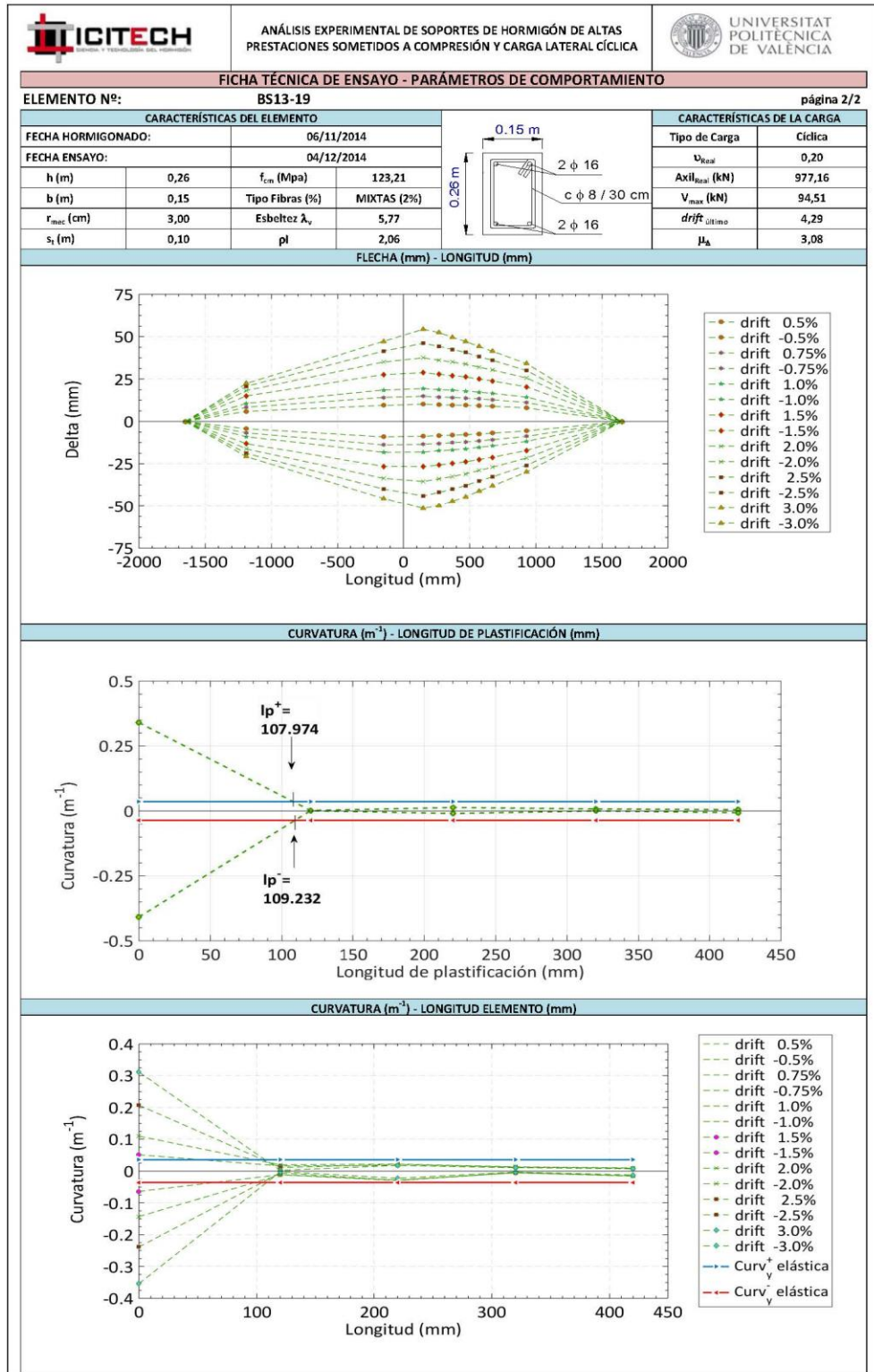


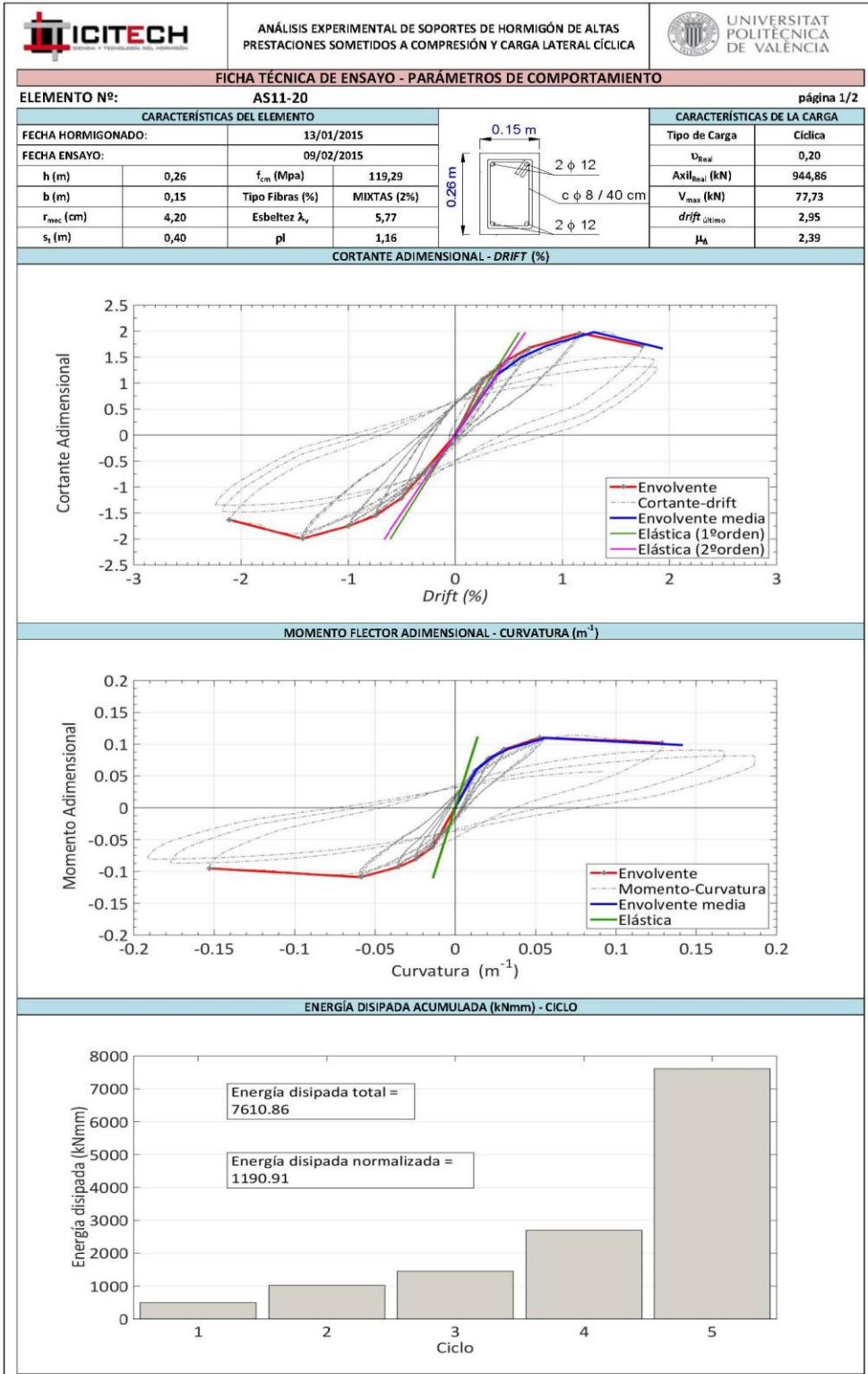


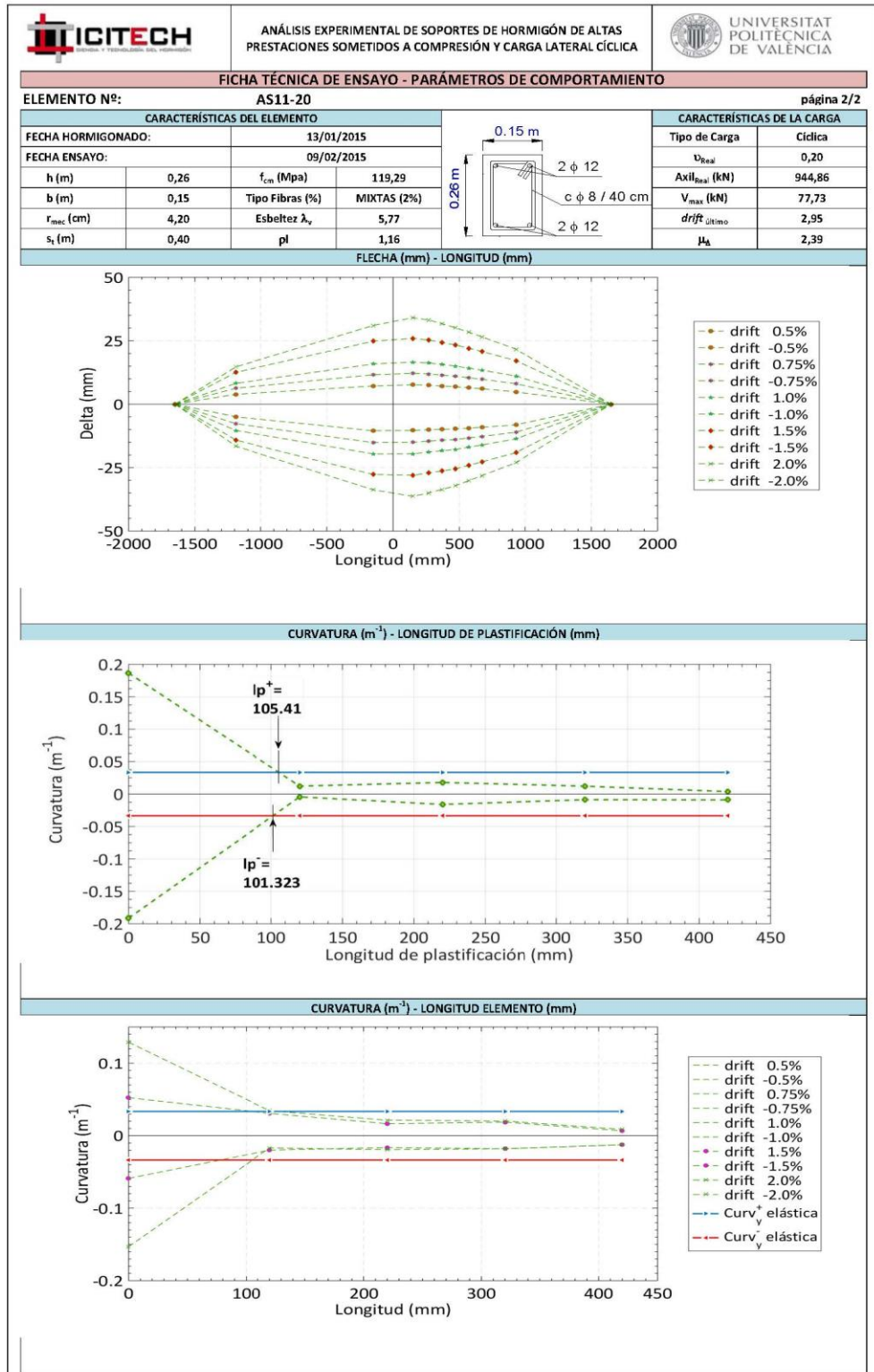


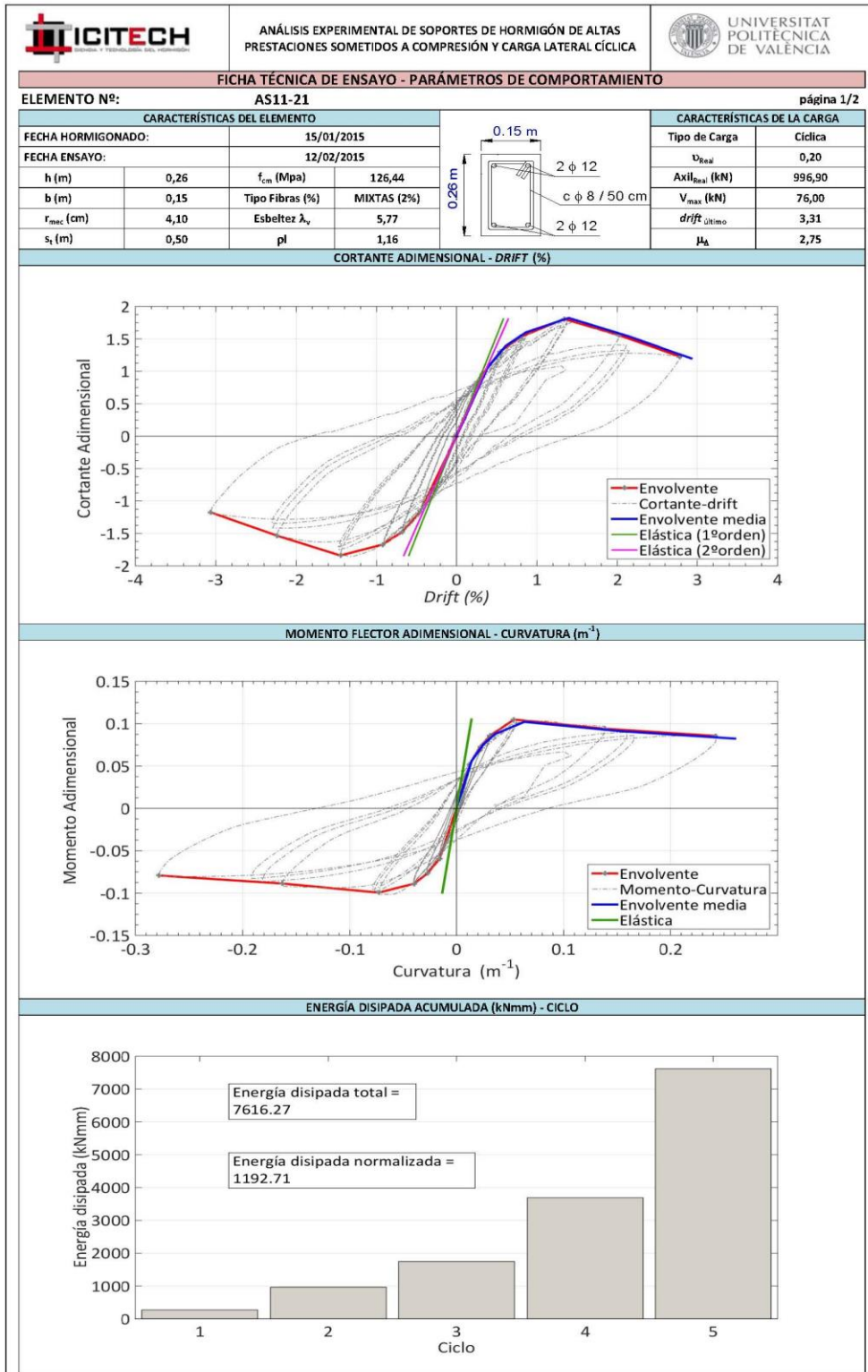


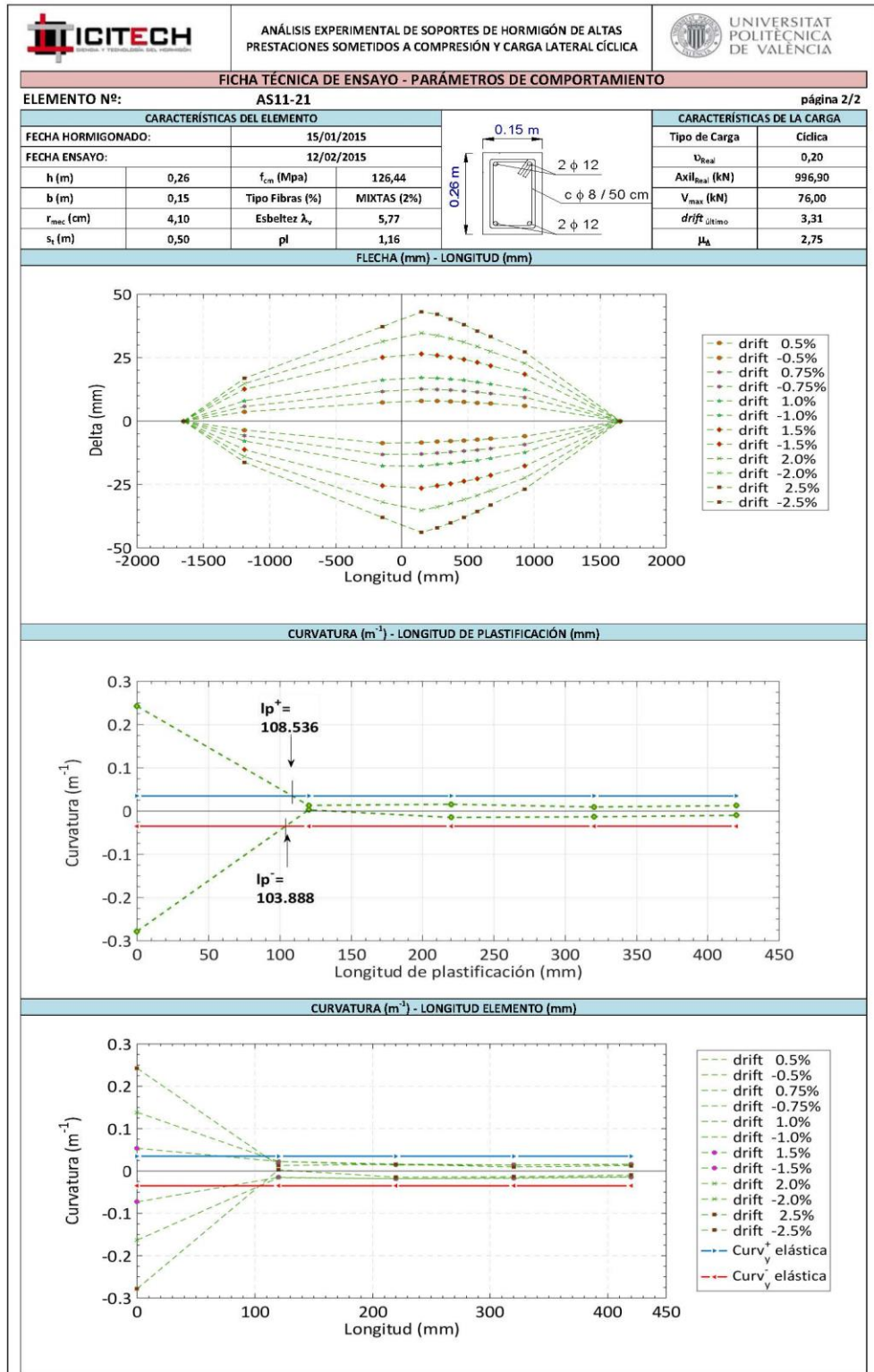


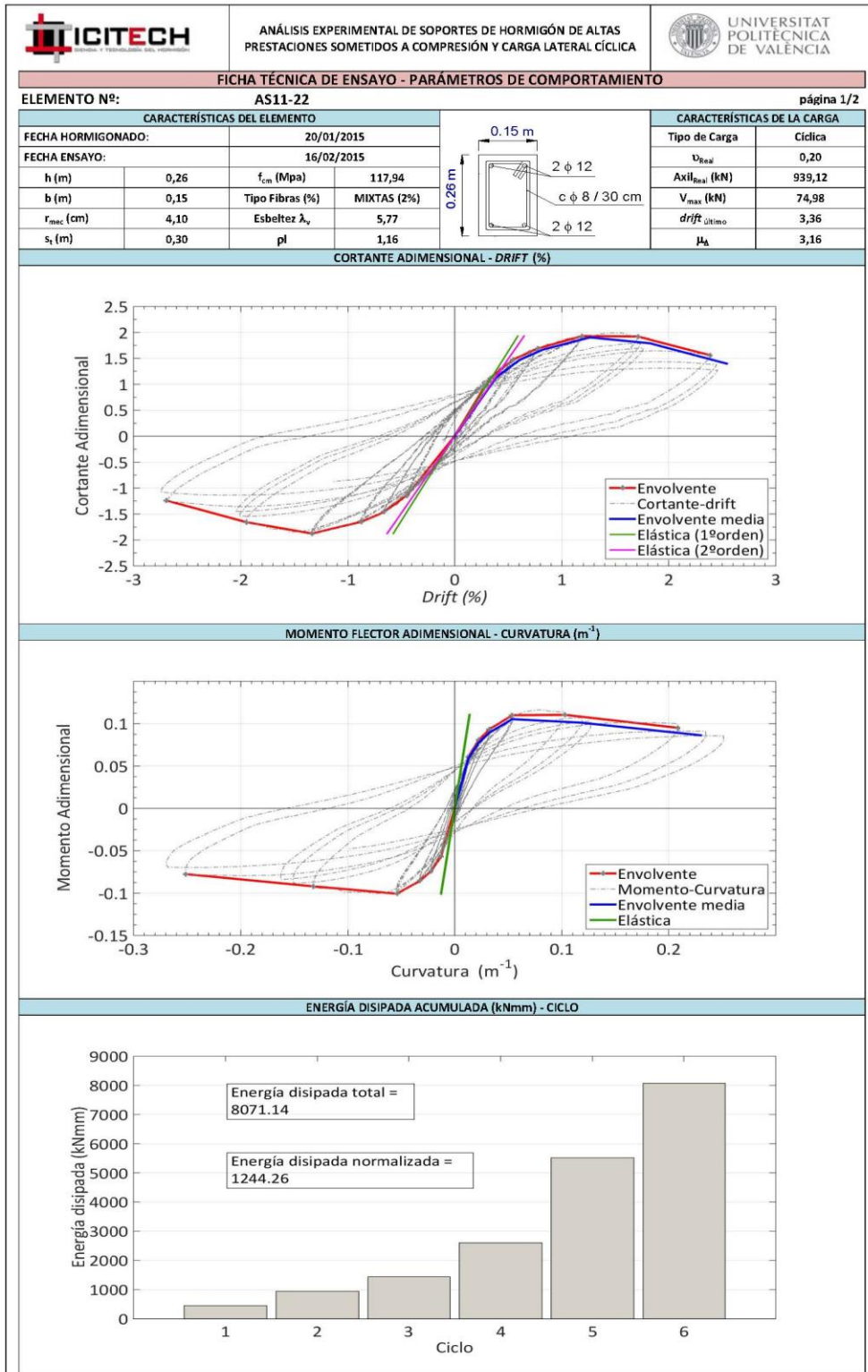


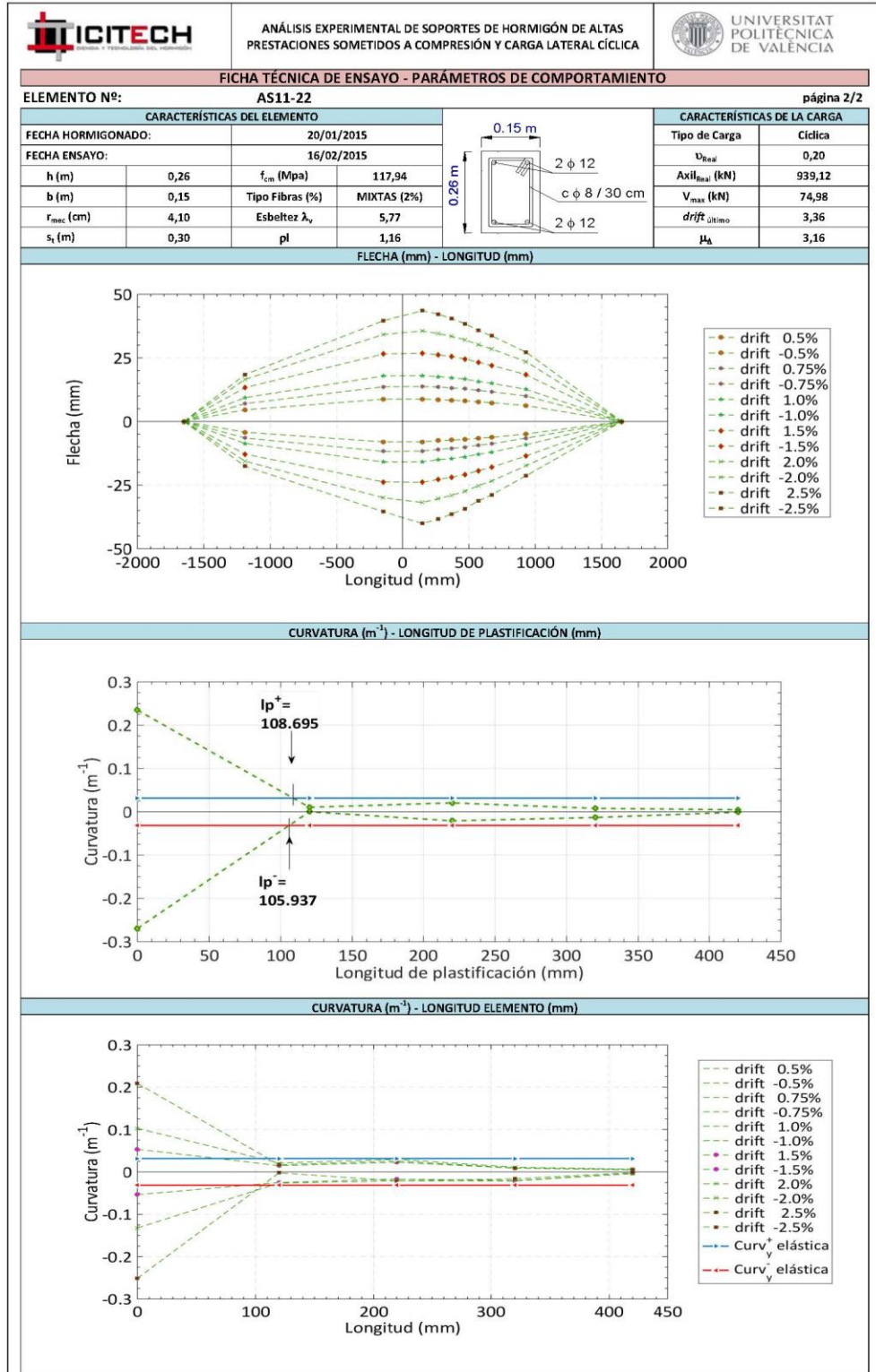


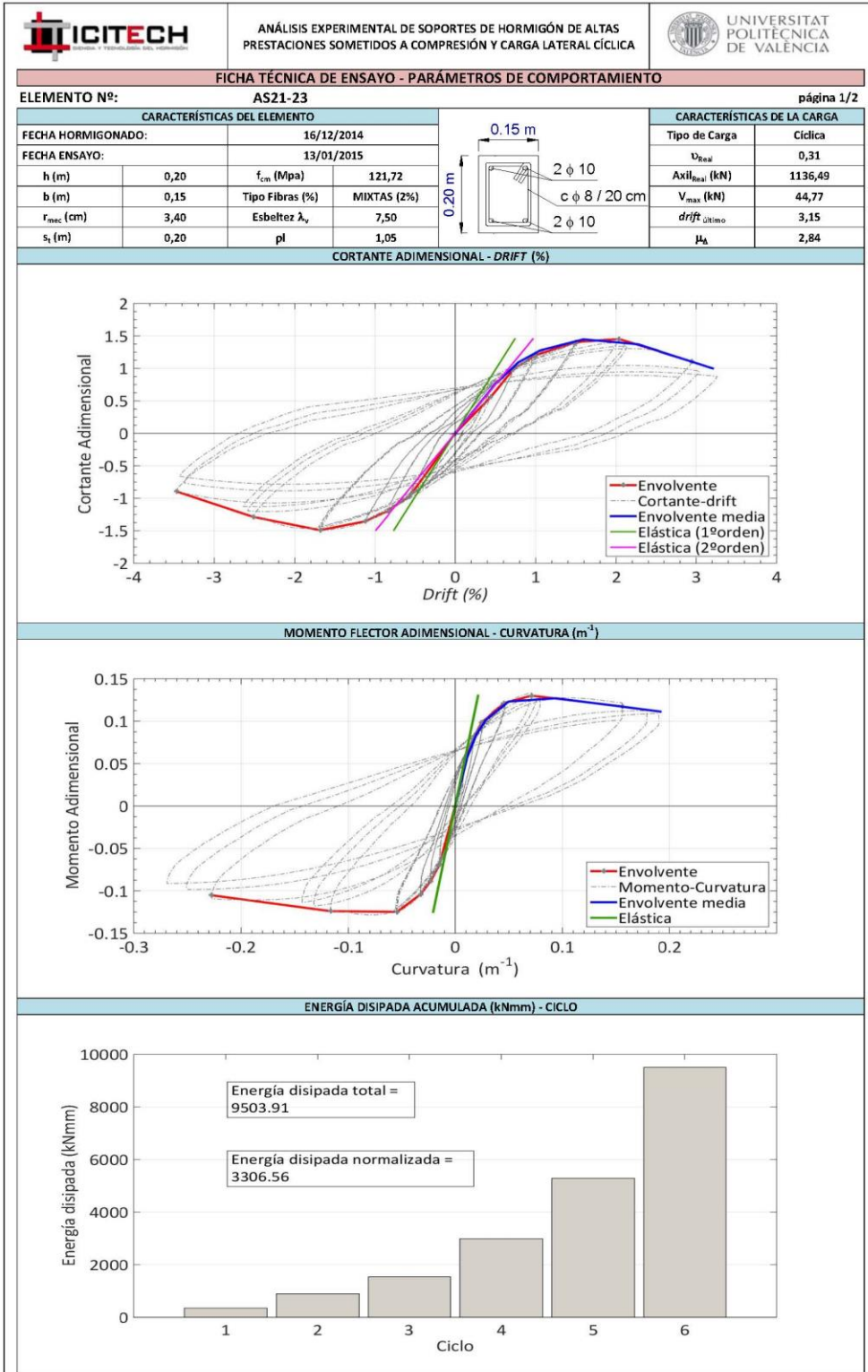


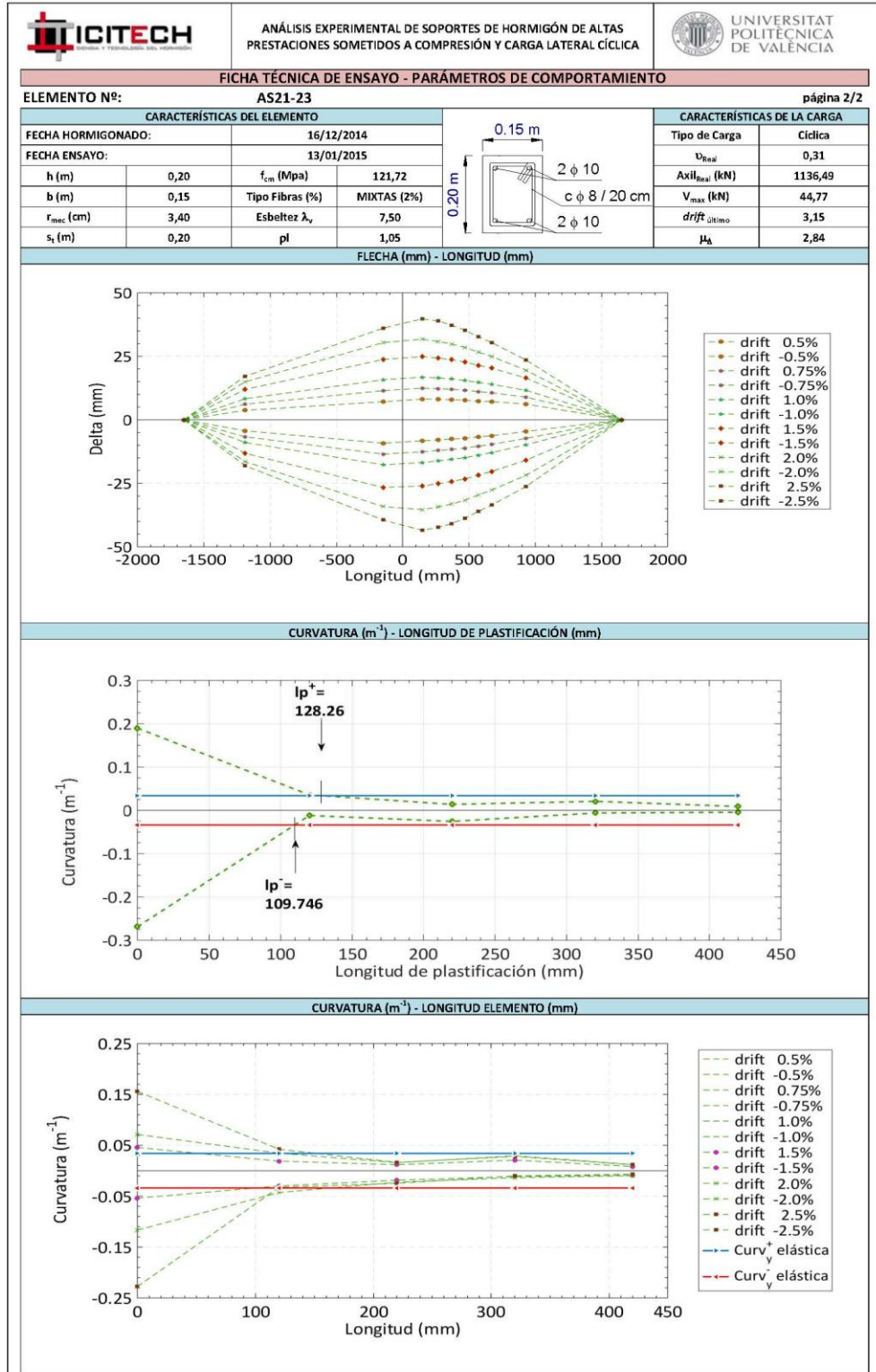


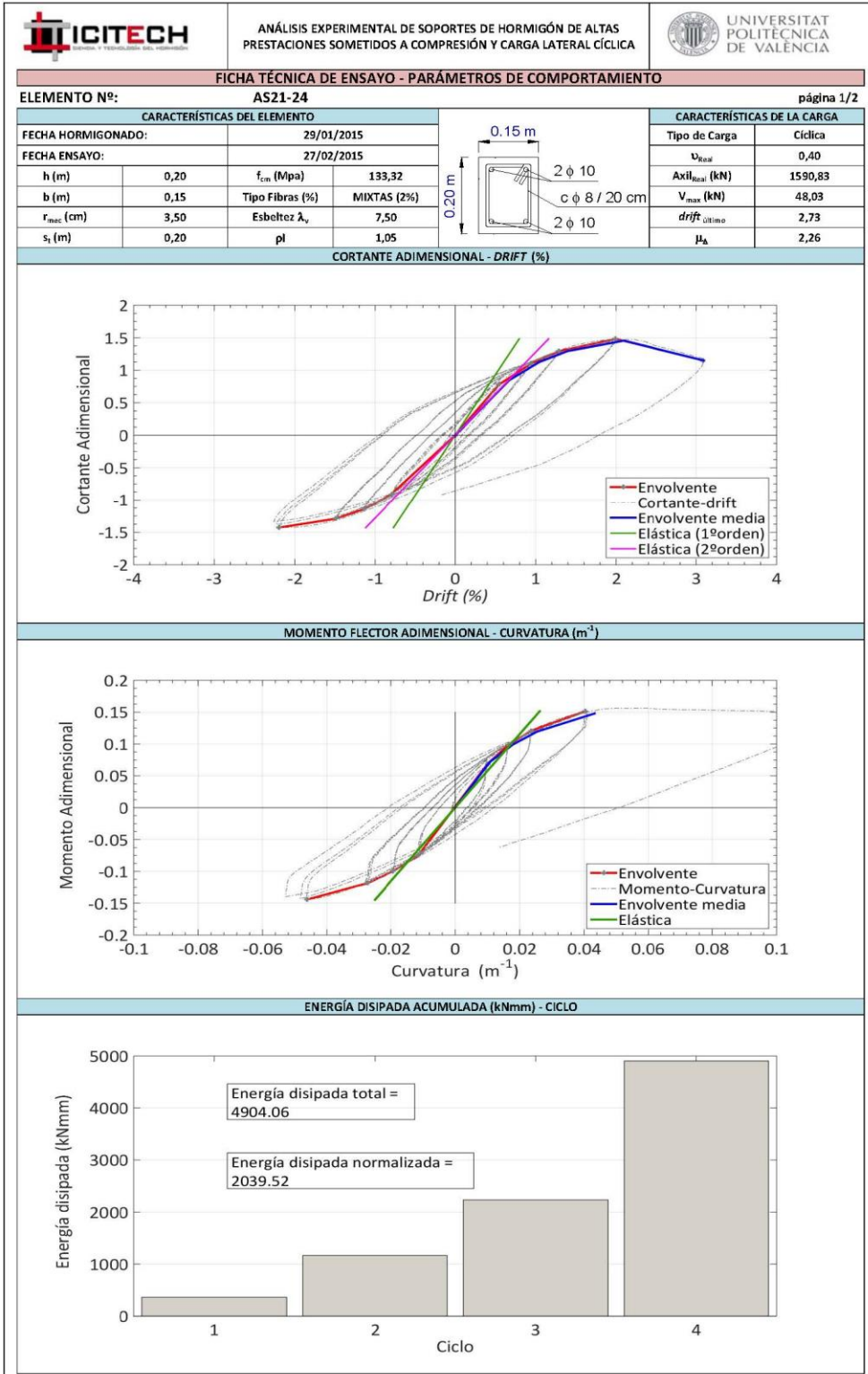


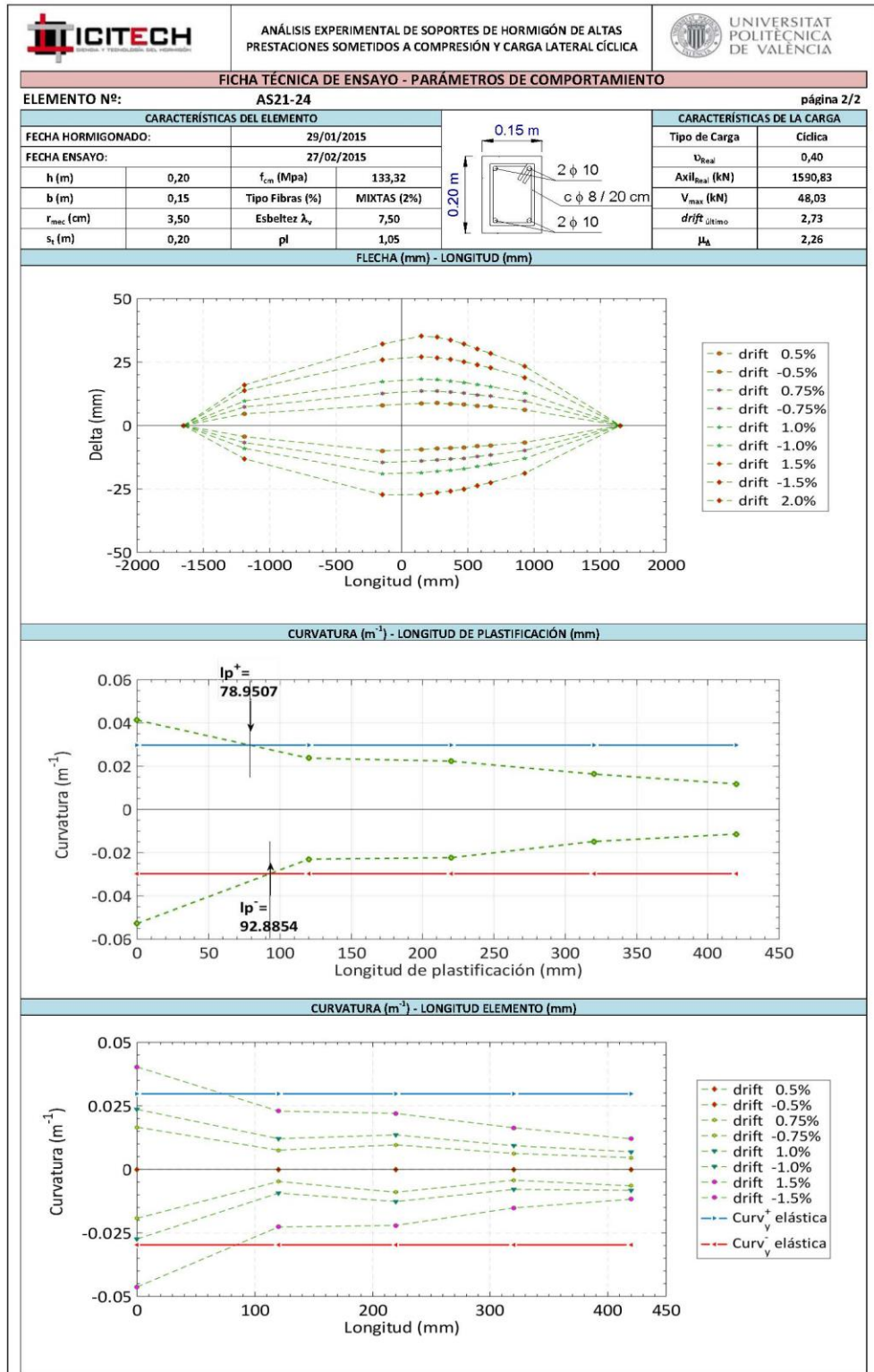










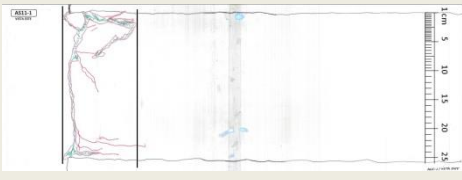
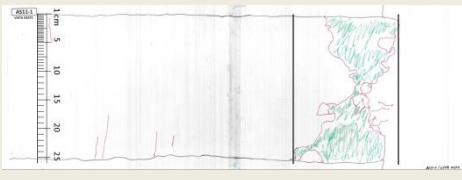
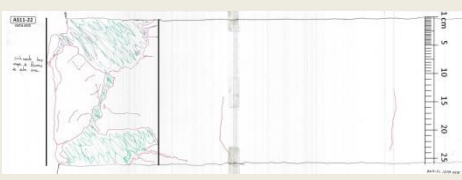
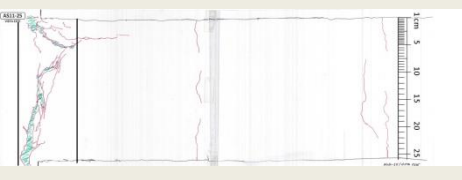
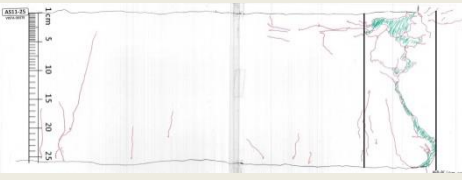
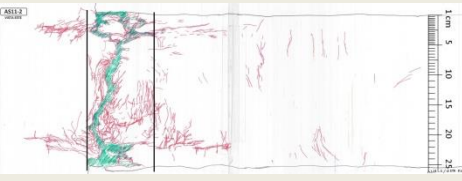
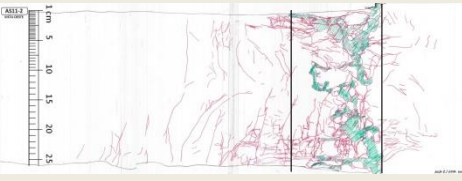
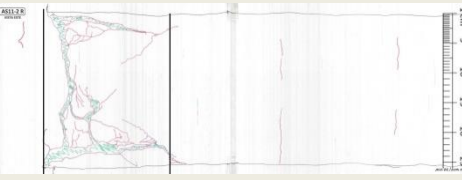
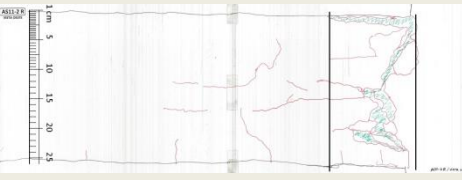


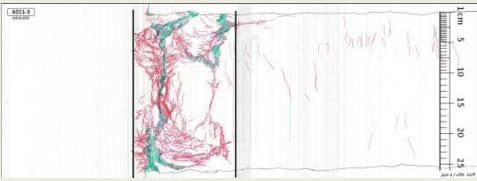
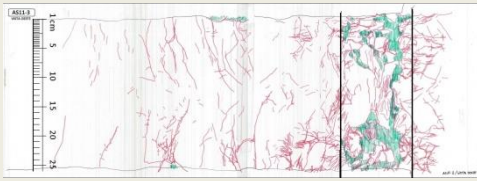
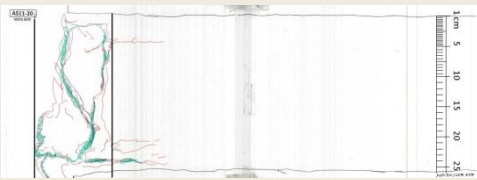

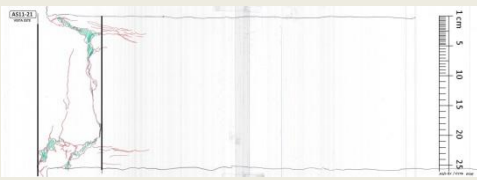
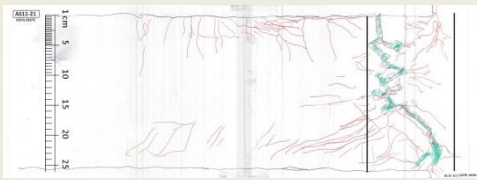


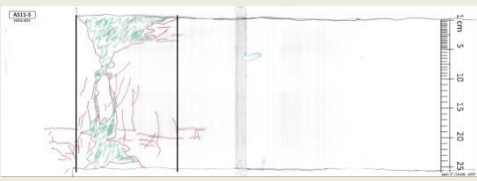
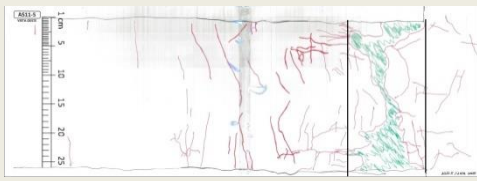
ANEJO B

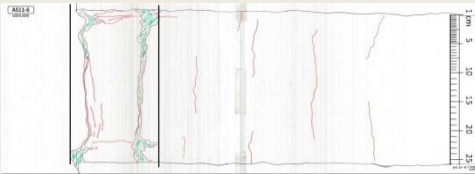
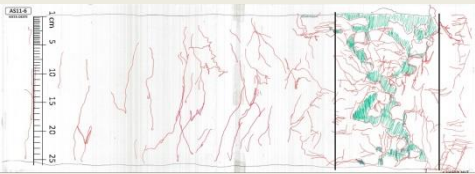
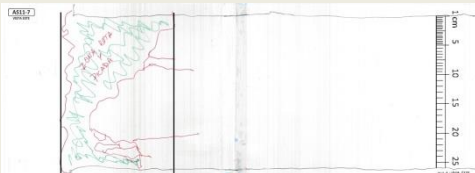



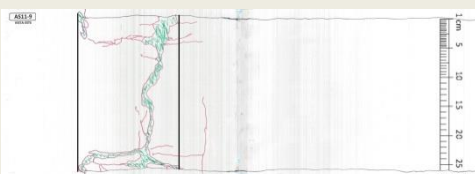


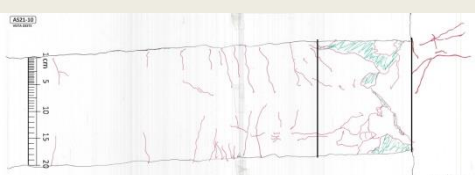
Anejo B: Mapas de fisuras


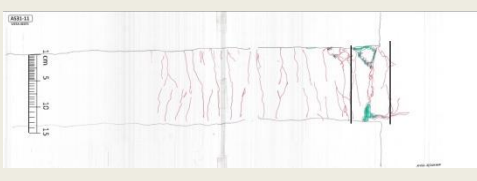
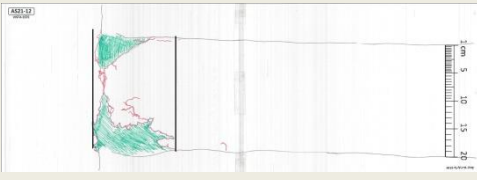


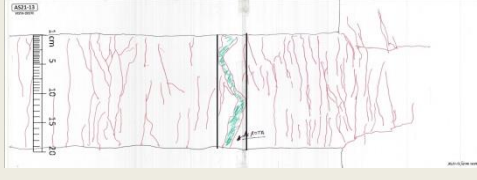


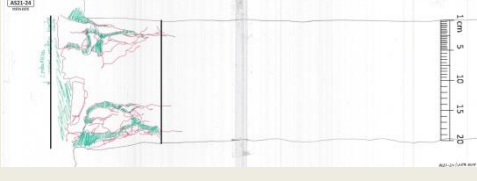
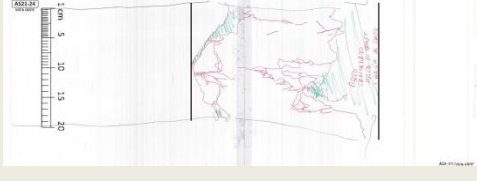
Dentro de este anejo se encuentran los mapas de fisuras realizados para cada uno de los elementos ensayados, así como las medidas de la longitud de daño observada.

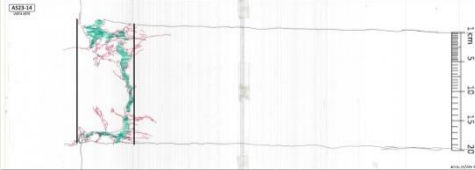

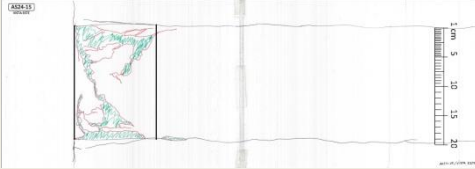
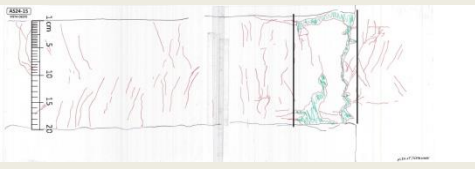
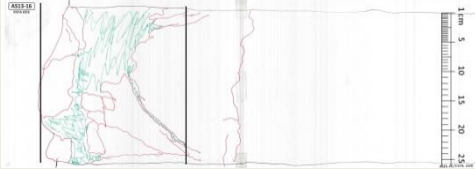
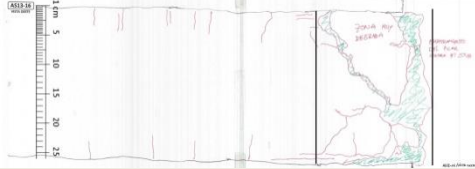
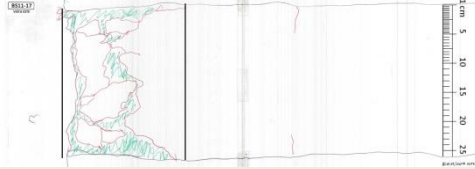
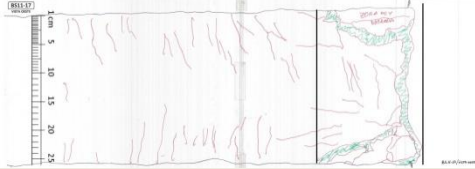
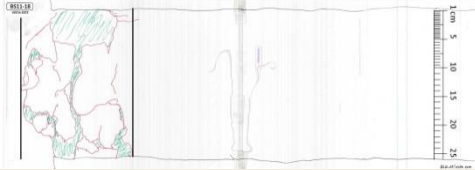
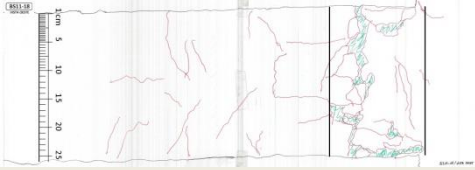
Mapas de fisuras y medida visual de la longitud crítica de daño

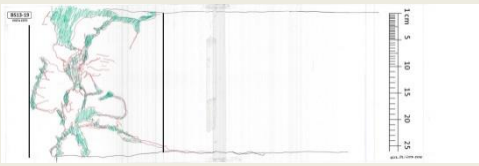

AS11-1 (E)	AS11-1 (W)	Ldaño_med
 <p>12.88 cm</p>	 <p>15.78 cm</p>	14.33 cm
AS11-22 (E)	AS11-22 (W)	Ldaño_med
 <p>18.25 cm</p>	SIN MAPA DE FISURAS	18.25 cm
AS11-25 (E)	AS11-25 (W)	Ldaño_med
 <p>10.67 cm</p>	 <p>12.74 cm</p>	11.71 cm
AS11-2 (E)	AS11-2 (W)	Ldaño_med
 <p>11.66 cm</p>	 <p>15.65 cm</p>	13.63 cm
AS11-2R (E)	AS11-2R (W)	Ldaño_med
 <p>21.25 cm</p>	 <p>15.50 cm</p>	18.37 cm

AS11-3 (E)	AS11-3 (W)	Ldaño_med
 <p data-bbox="343 470 438 504">16.47 cm</p>	 <p data-bbox="850 470 946 504">12.02 cm</p>	14.25 cm
AS11-20 (E)	AS11-20 (W)	Ldaño_med
 <p data-bbox="343 797 438 831">13.12 cm</p>	 <p data-bbox="850 797 946 831">12.88 cm</p>	13.00 cm
AS11-21 (E)	AS11-21 (W)	Ldaño_med
 <p data-bbox="343 1124 438 1158">11.00 cm</p>	 <p data-bbox="850 1124 946 1158">14.47 cm</p>	12.74 cm
AS11-4 (E)	AS11-4 (W)	Ldaño_med
 <p data-bbox="343 1451 438 1485">16.43 cm</p>	 <p data-bbox="850 1451 946 1485">15.55 cm</p>	15.99 cm
AS11-5 (E)	AS11-5 (W)	Ldaño_med
 <p data-bbox="343 1778 438 1812">17.25 cm</p>	 <p data-bbox="850 1778 946 1812">13.63 cm</p>	15.44 cm

AS11-6 (E)	AS11-6 (W)	Ldaño_med
 <p data-bbox="496 483 588 510">15.55 cm</p>	 <p data-bbox="1007 483 1099 510">18.11 cm</p>	16.83 cm
AS11-7 (E)	AS11-7 (W)	Ldaño_med
 <p data-bbox="496 808 588 835">19.69 cm</p>	 <p data-bbox="1007 808 1099 835">24.24 cm</p>	21.97 cm
AS11-8 (E)	AS11-8 (W)	Ldaño_med
 <p data-bbox="496 1133 588 1160">17.75 cm</p>	 <p data-bbox="1007 1133 1099 1160">18.50 cm</p>	18.13 cm
AS11-9 (E)	AS11-9 (W)	Ldaño_med
 <p data-bbox="496 1458 588 1485">17.25 cm</p>	 <p data-bbox="1007 1458 1099 1485">16.25 cm</p>	16.75 cm
AS21-10 (E)	AS21-10 (W)	Ldaño_med
 <p data-bbox="496 1783 588 1809">10.38 cm</p>	 <p data-bbox="1007 1783 1099 1809">17.03 cm</p>	13.84 cm

AS31-11 (E)	AS31-11 (W)	Ldaño_med
 <p data-bbox="343 470 438 504">12.00 cm</p>	 <p data-bbox="853 470 949 504">7.22 cm</p>	9.61 cm
AS21-12 (E)	AS21-12 (W)	Ldaño_med
 <p data-bbox="343 795 438 828">14.55 cm</p>	 <p data-bbox="853 795 949 828">9.35 cm</p>	11.95 cm
AS21-13 (E)	AS21-13 (W)	Ldaño_med
 <p data-bbox="343 1120 438 1153">6.30 cm</p>	 <p data-bbox="853 1120 949 1153">5.00 cm</p>	5.65 cm
AS21-23 (E)	AS21-23 (W)	Ldaño_med
 <p data-bbox="343 1444 438 1478">9.76 cm</p>	 <p data-bbox="853 1444 949 1478">24.00 cm</p>	16.88 cm
AS21-24 (E)	AS21-24 (W)	Ldaño_med
 <p data-bbox="343 1769 438 1803">18.55 cm</p>	 <p data-bbox="853 1769 949 1803">30.73 cm</p>	24.64 cm

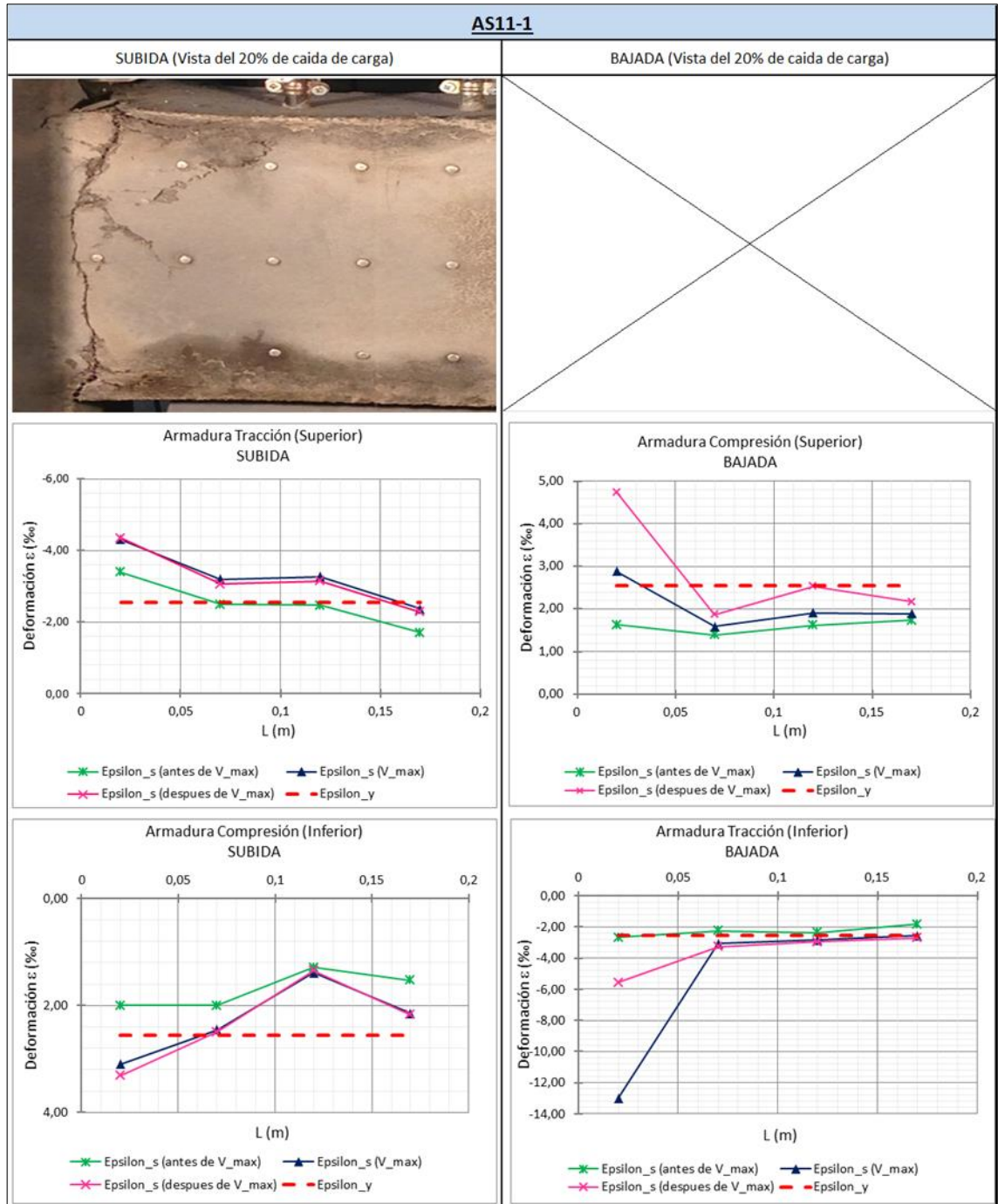
AS23-14 (E)	AS23-14 (W)	Ldaño_med
 <p data-bbox="501 483 584 510">9.75 cm</p>	 <p data-bbox="1007 483 1090 510">16.25 cm</p>	13.00 cm
AS24-15 (E)	AS24-15 (W)	Ldaño_med
 <p data-bbox="496 808 579 835">13.75 cm</p>	 <p data-bbox="1007 808 1090 835">11.47 cm</p>	12.61 cm
AS13-16 (E)	AS13-16 (W)	Ldaño_med
 <p data-bbox="496 1133 579 1160">25.00 cm</p>	 <p data-bbox="1007 1133 1090 1160">19.95 cm</p>	22.48 cm
BS11-17 (E)	BS11-17 (W)	Ldaño_med
 <p data-bbox="496 1458 579 1485">20.96 cm</p>	 <p data-bbox="1007 1458 1090 1485">18.55 cm</p>	19.76 cm
BS11-18 (E)	BS11-18 (W)	Ldaño_med
 <p data-bbox="496 1783 579 1809">18.30 cm</p>	 <p data-bbox="1007 1783 1090 1809">16.58 cm</p>	17.44 cm

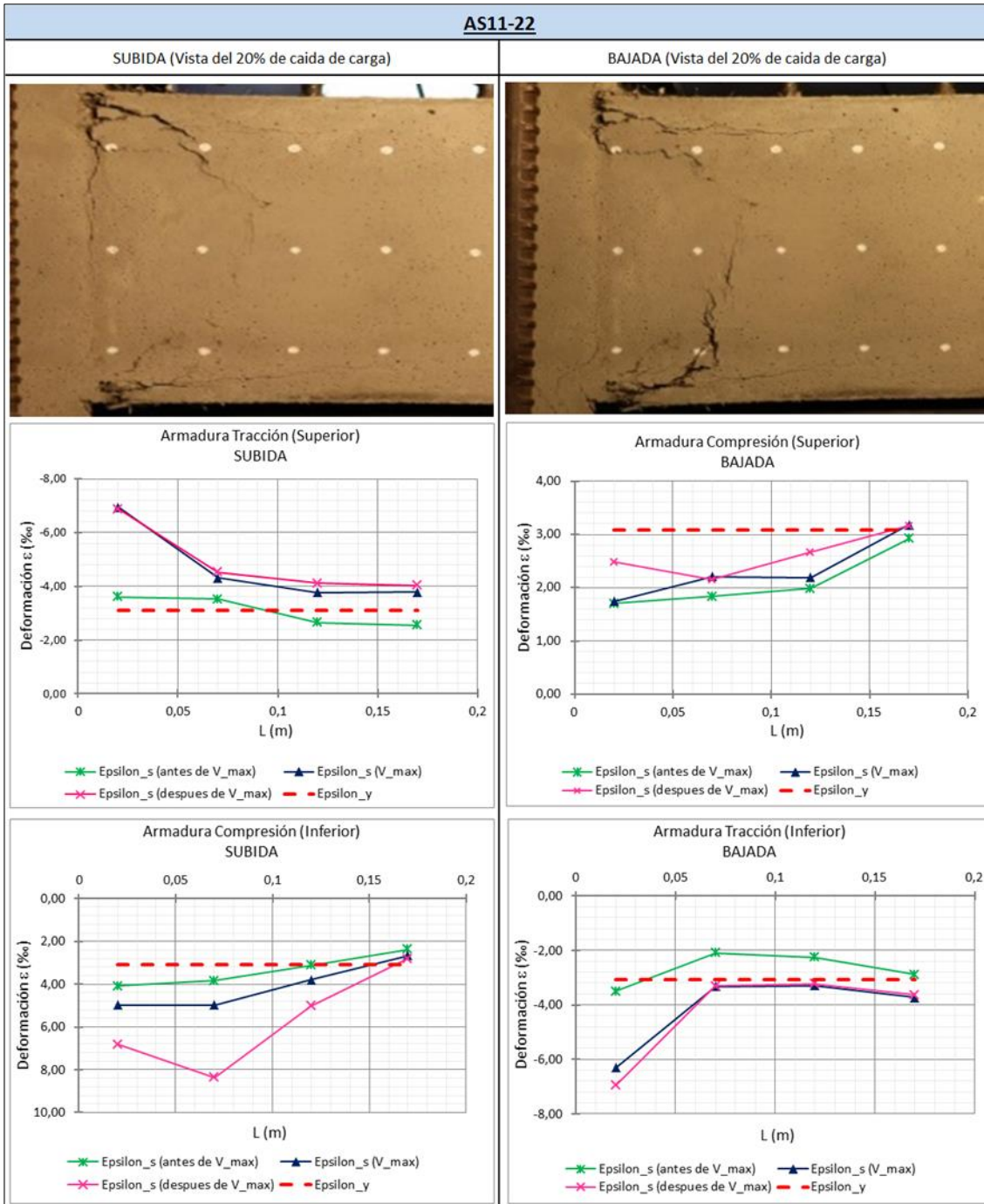
BS13-19 (E)	BS13-19 (W)	Ldaño_med
 <p data-bbox="343 465 438 495">25.28 cm</p>	 <p data-bbox="852 465 948 495">22.75 cm</p>	<p data-bbox="1182 369 1278 398">24.02 cm</p>

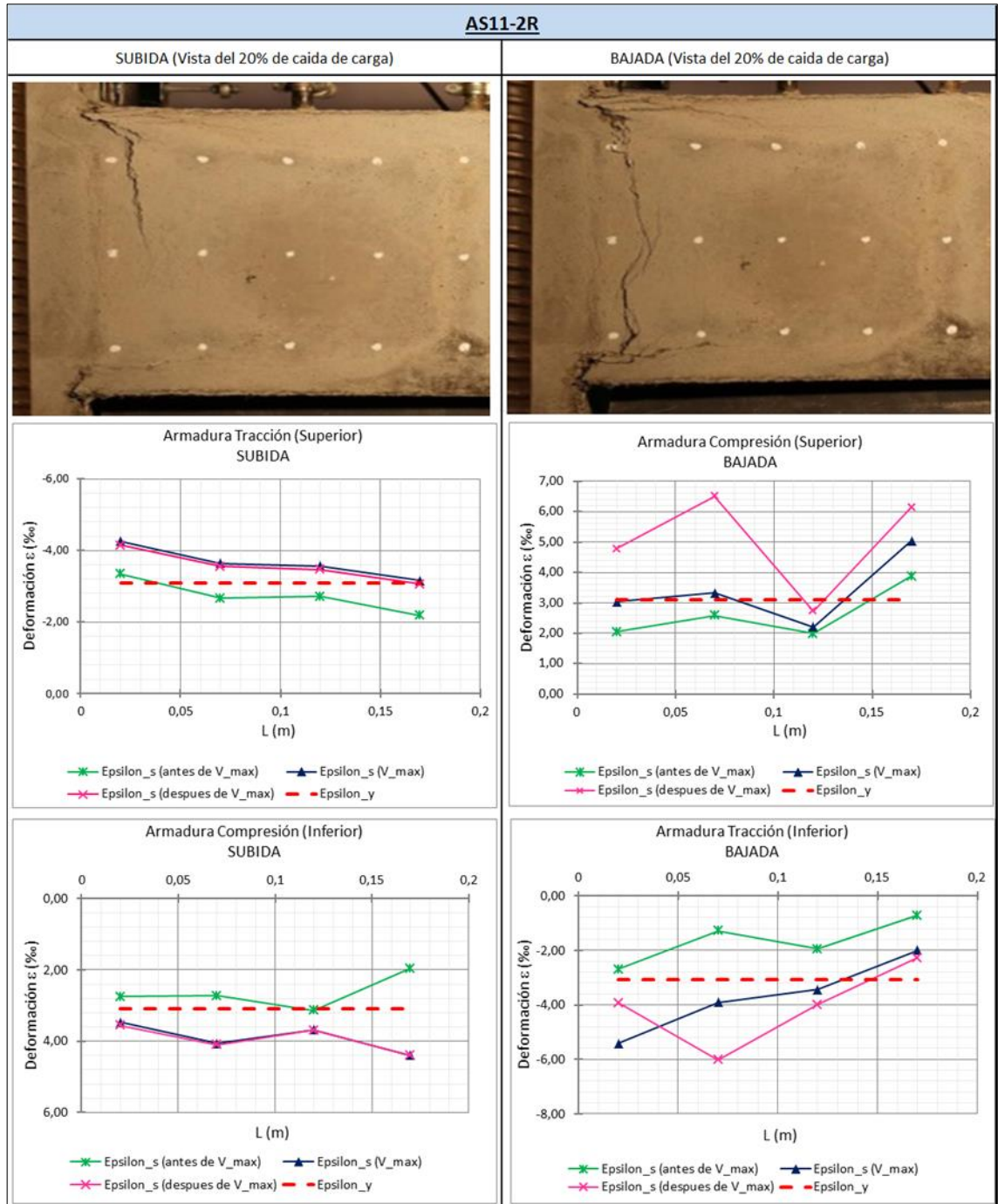
ANEJO C

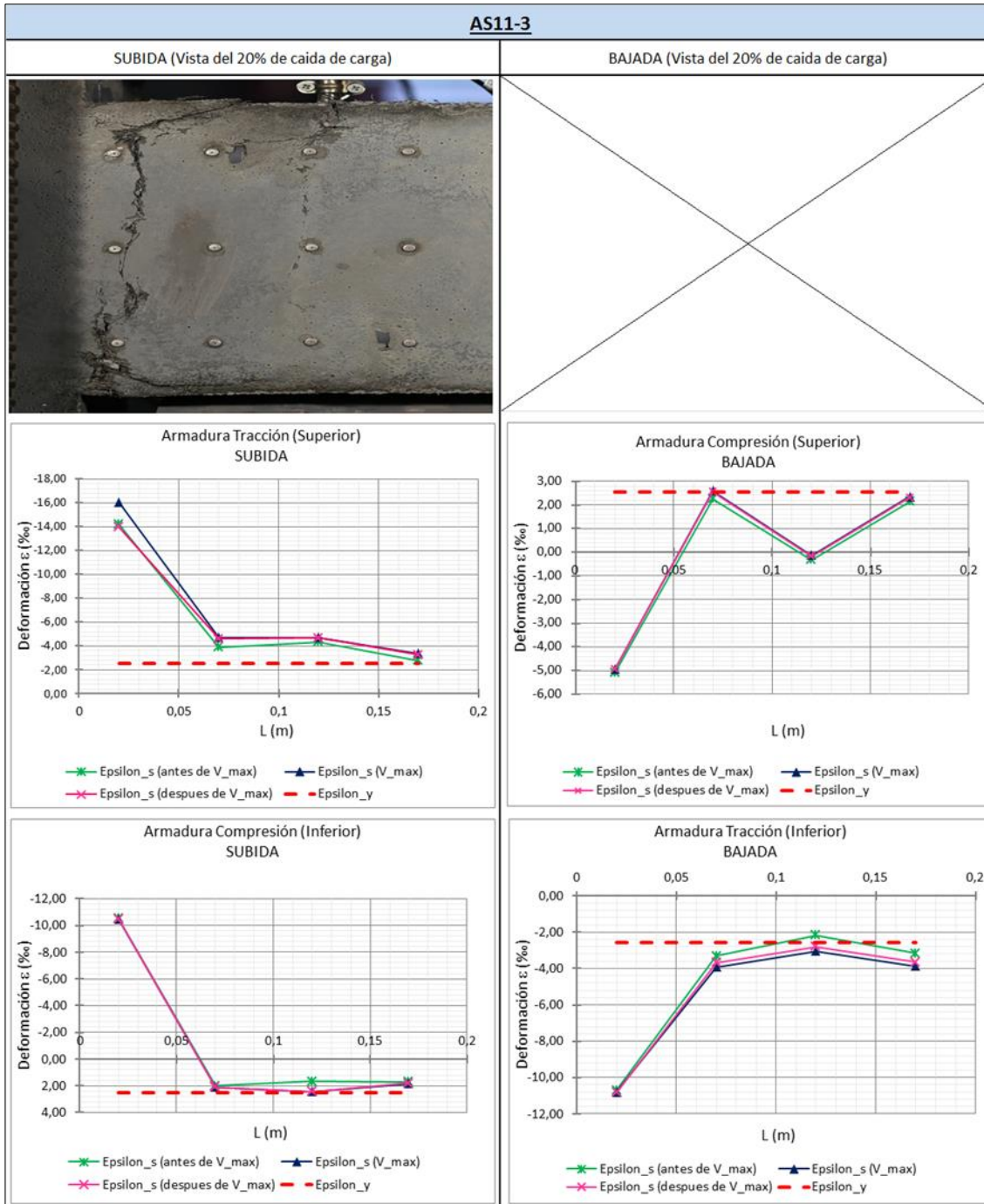
Anejo C: Perfiles de deformación en la zona crítica

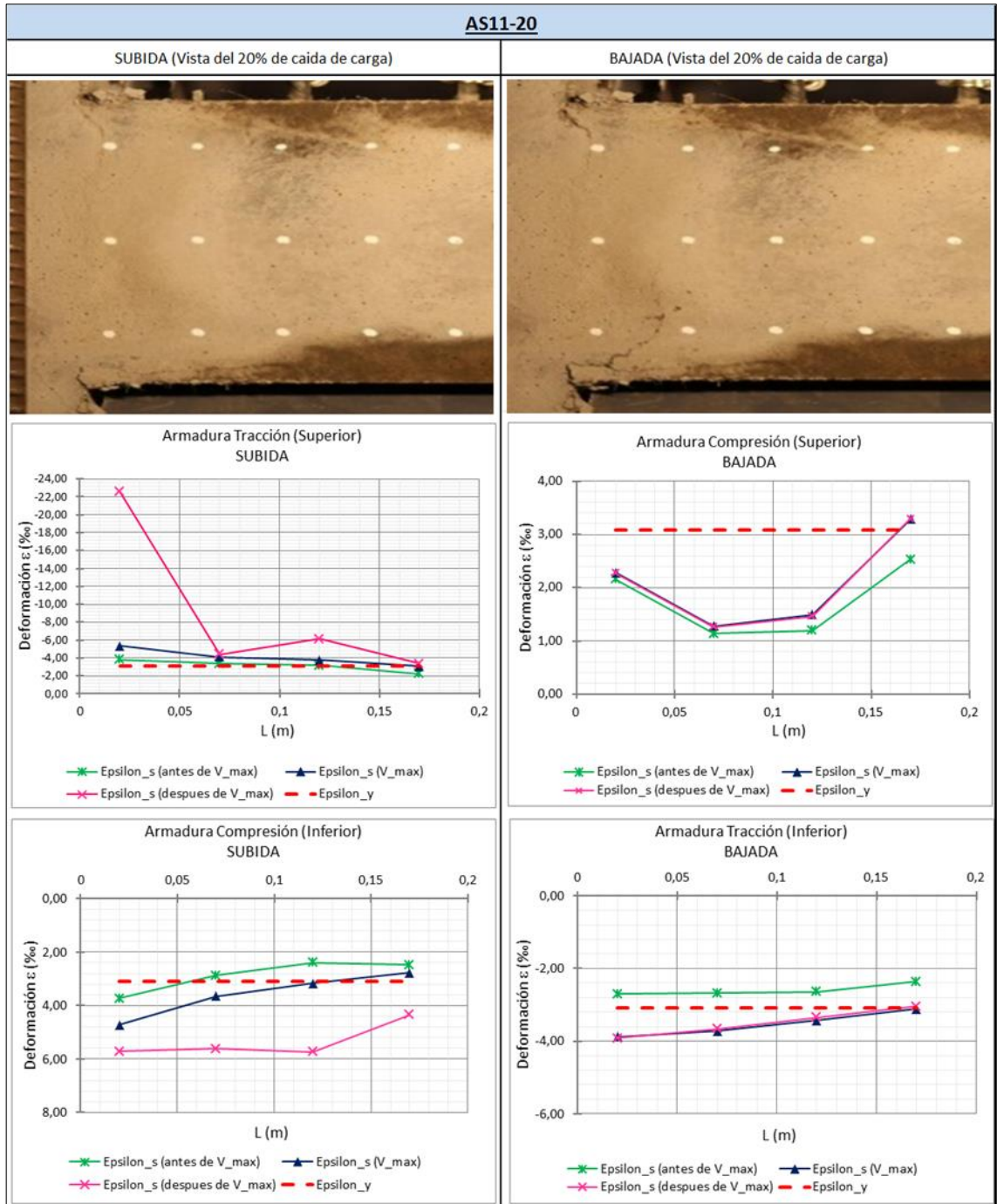
En este anejo se pueden consultar los perfiles de deformación de los soportes incluidos en este trabajo para distintos niveles de carga.

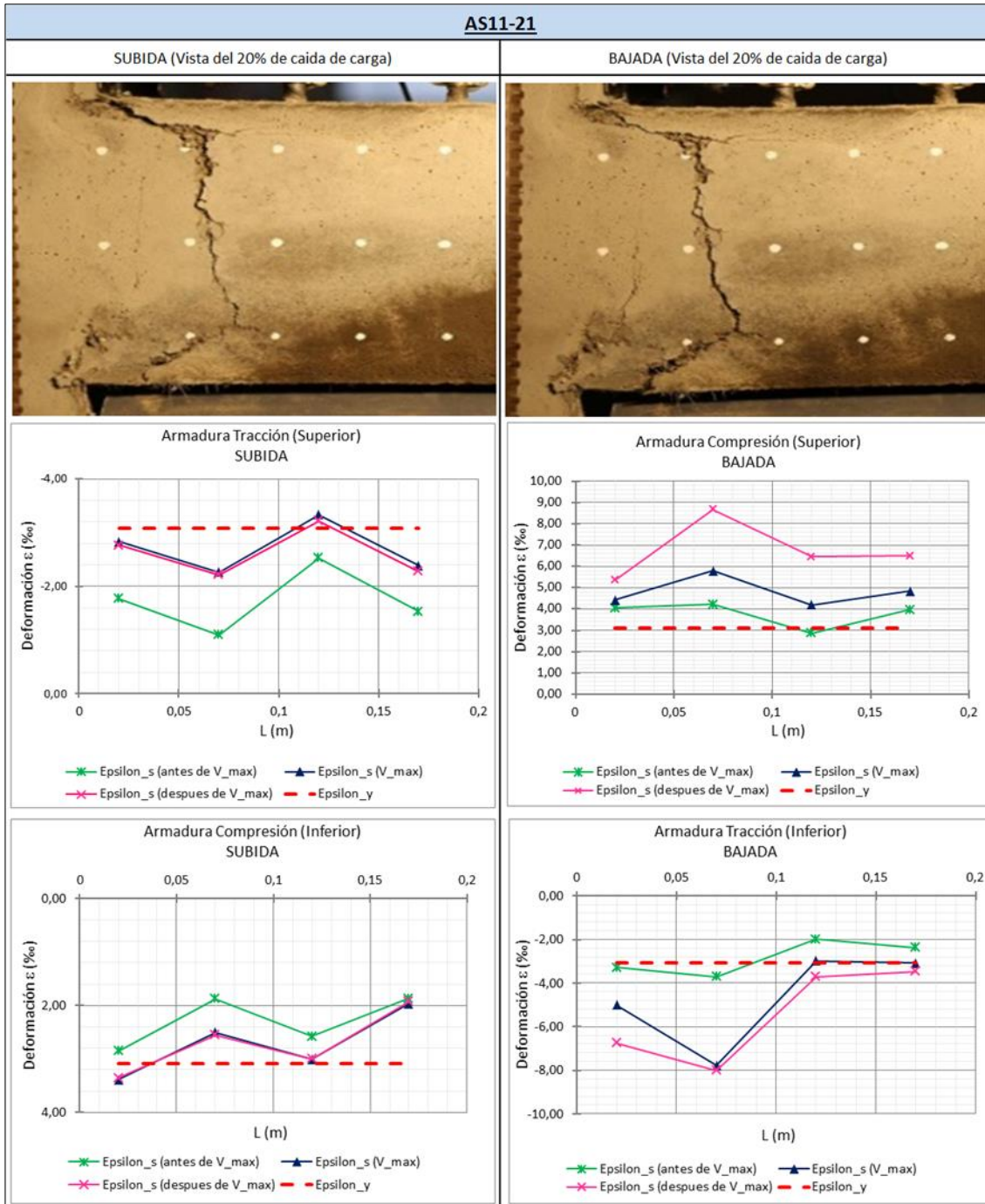


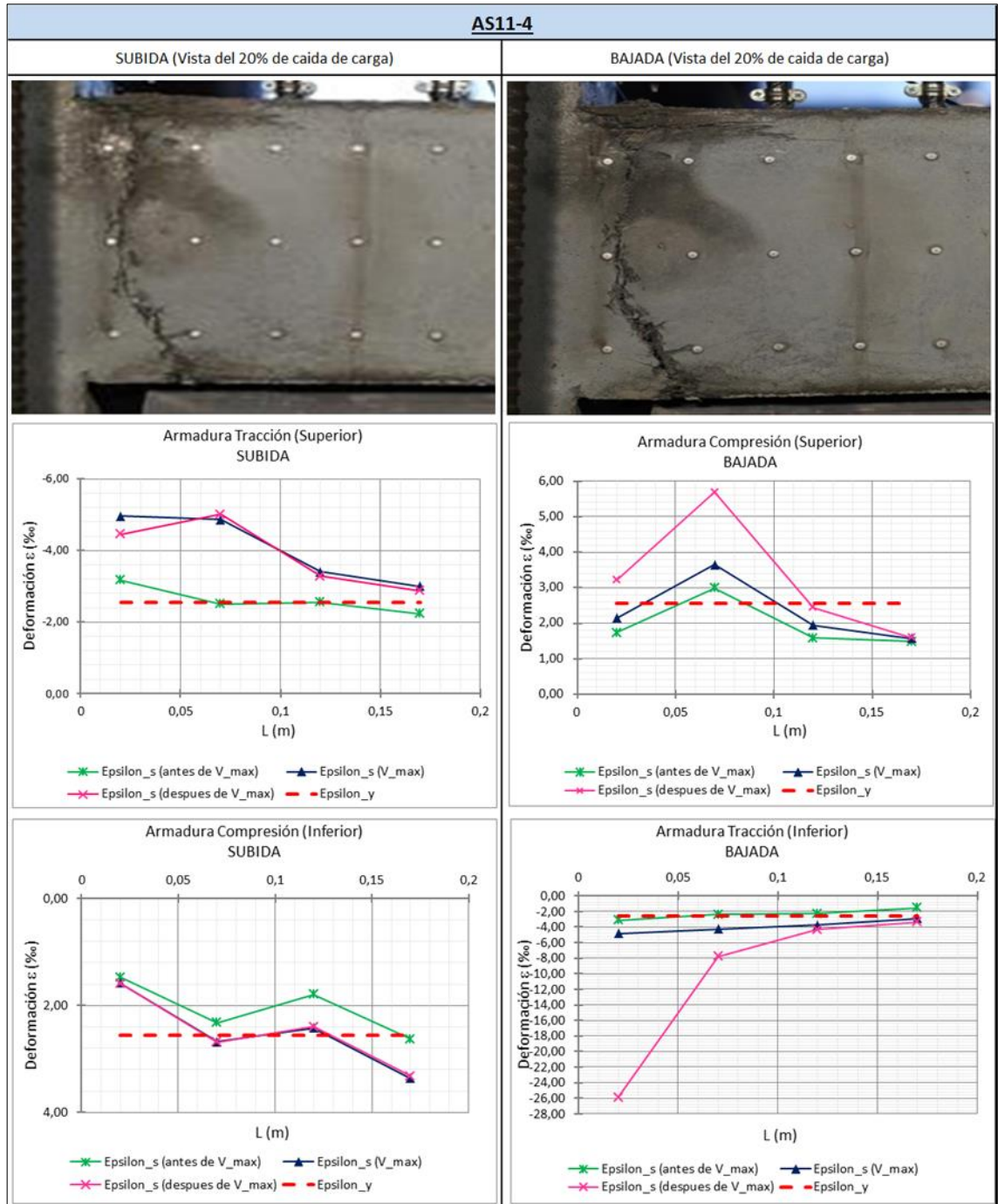


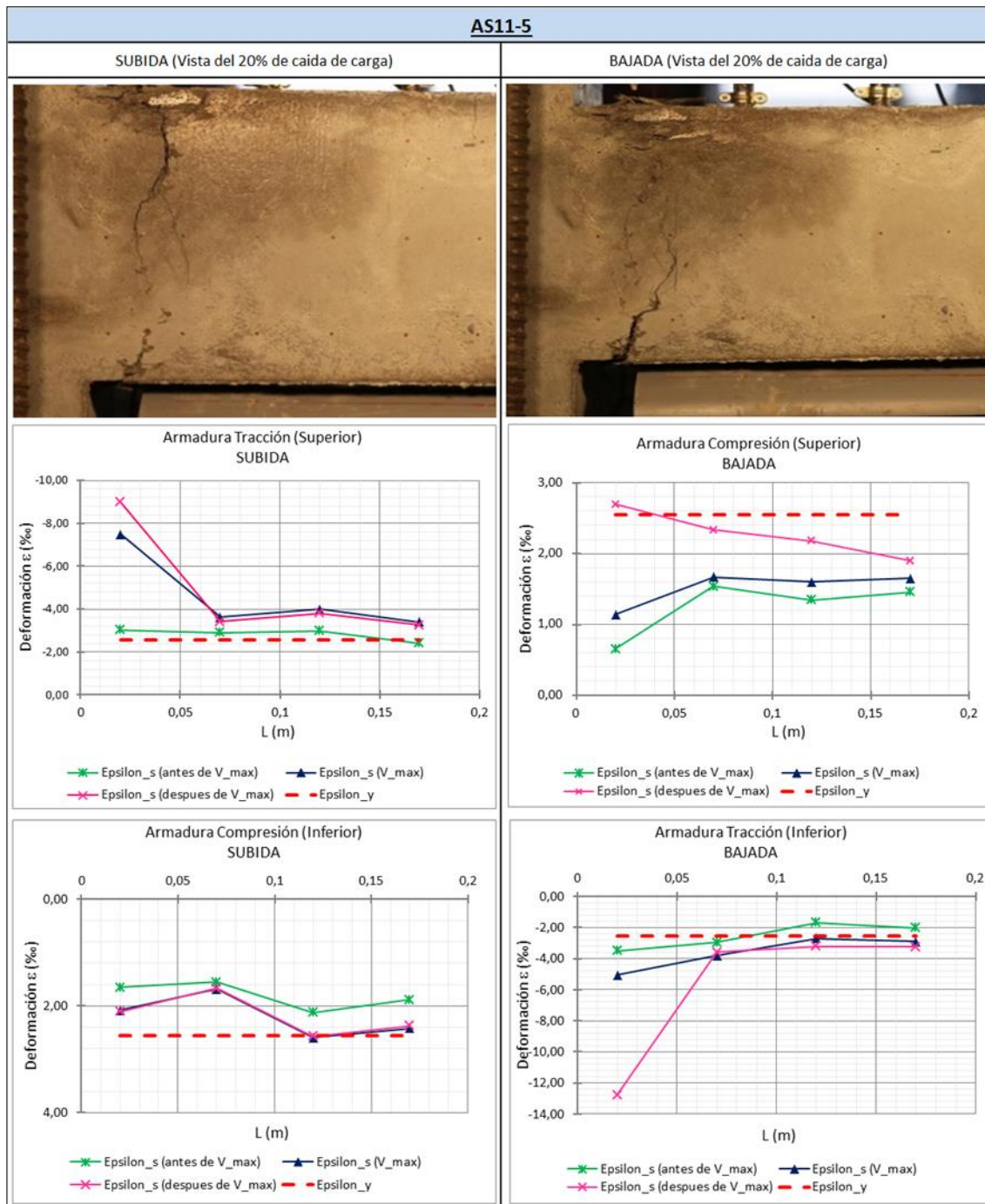


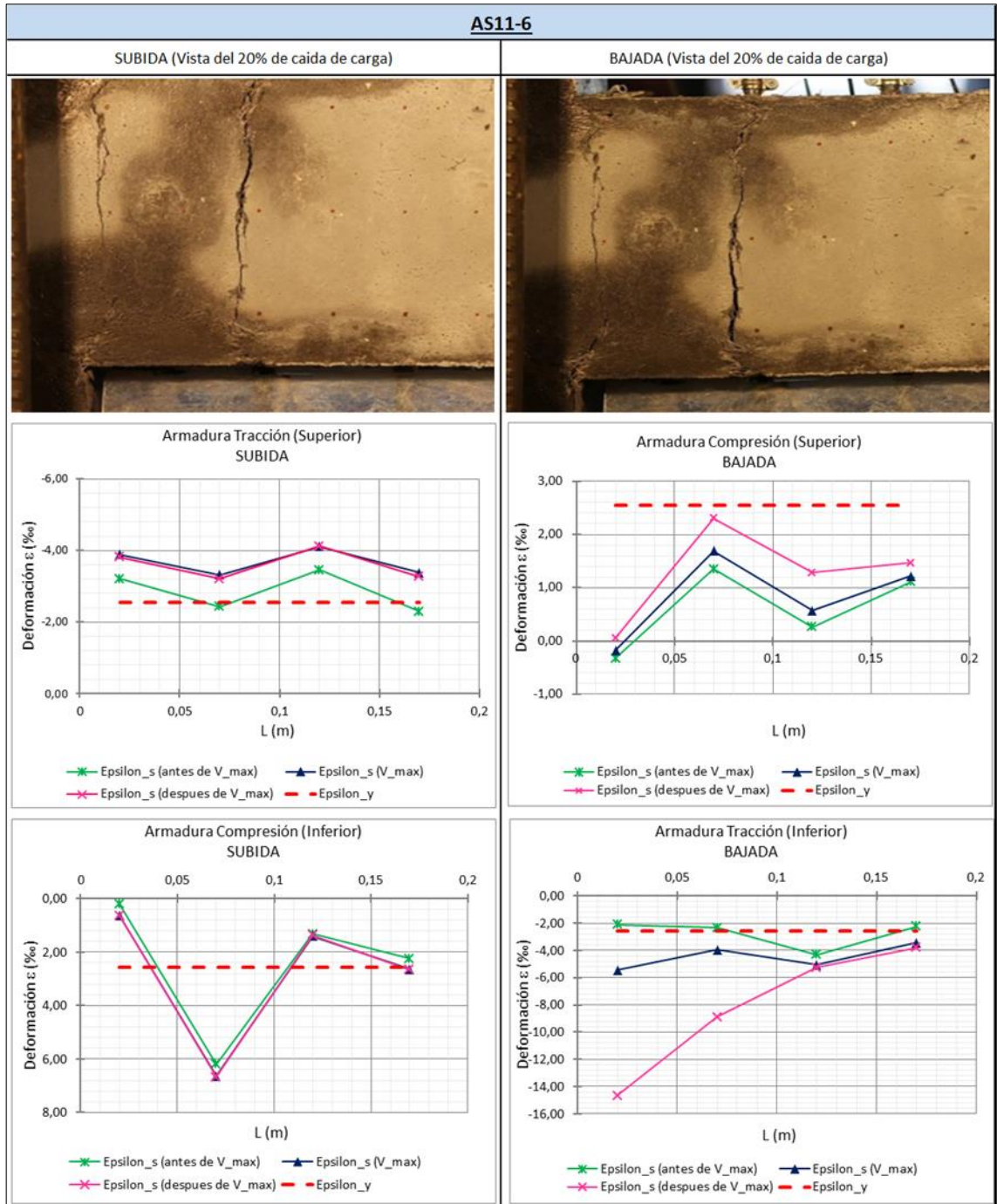


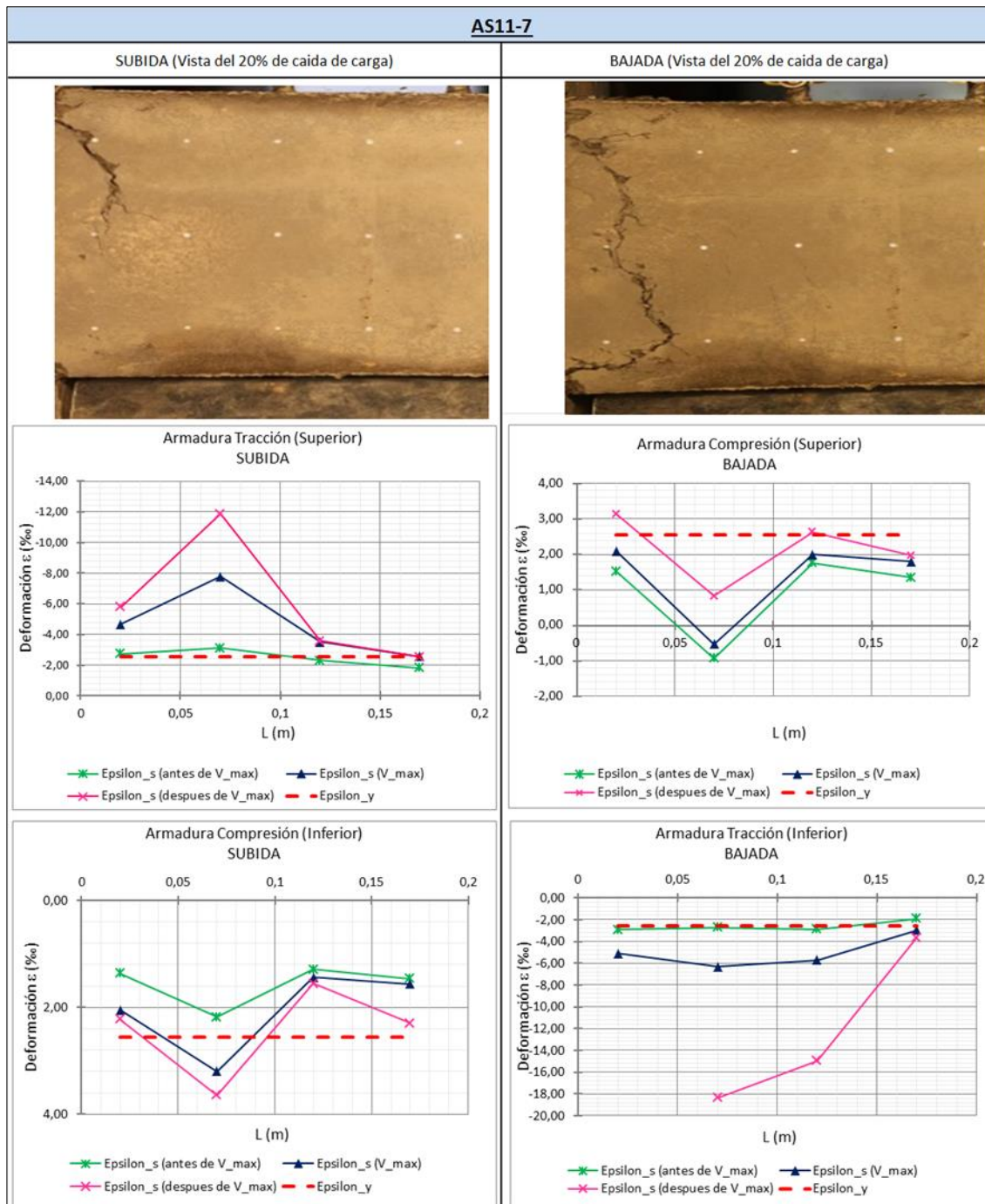


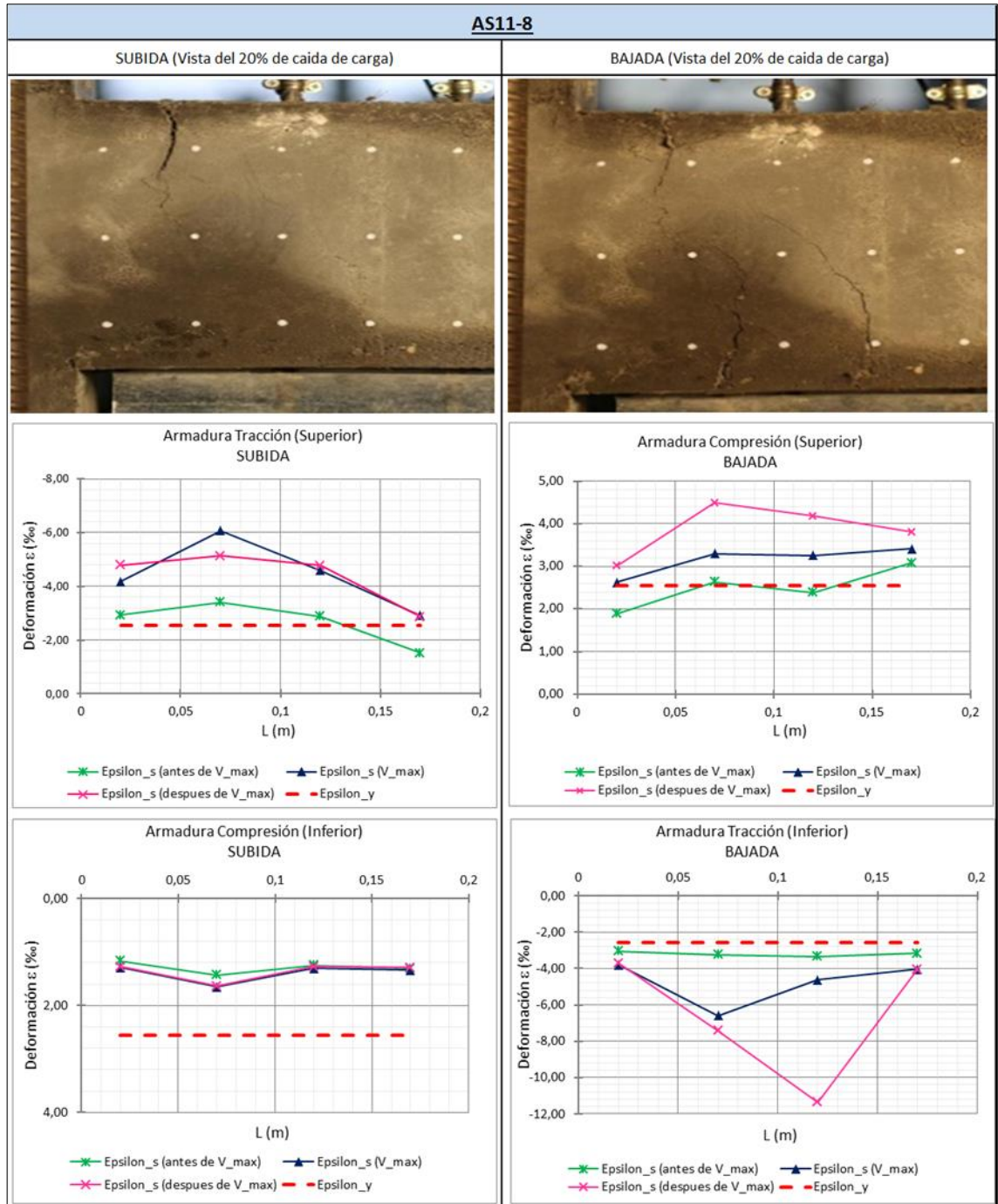


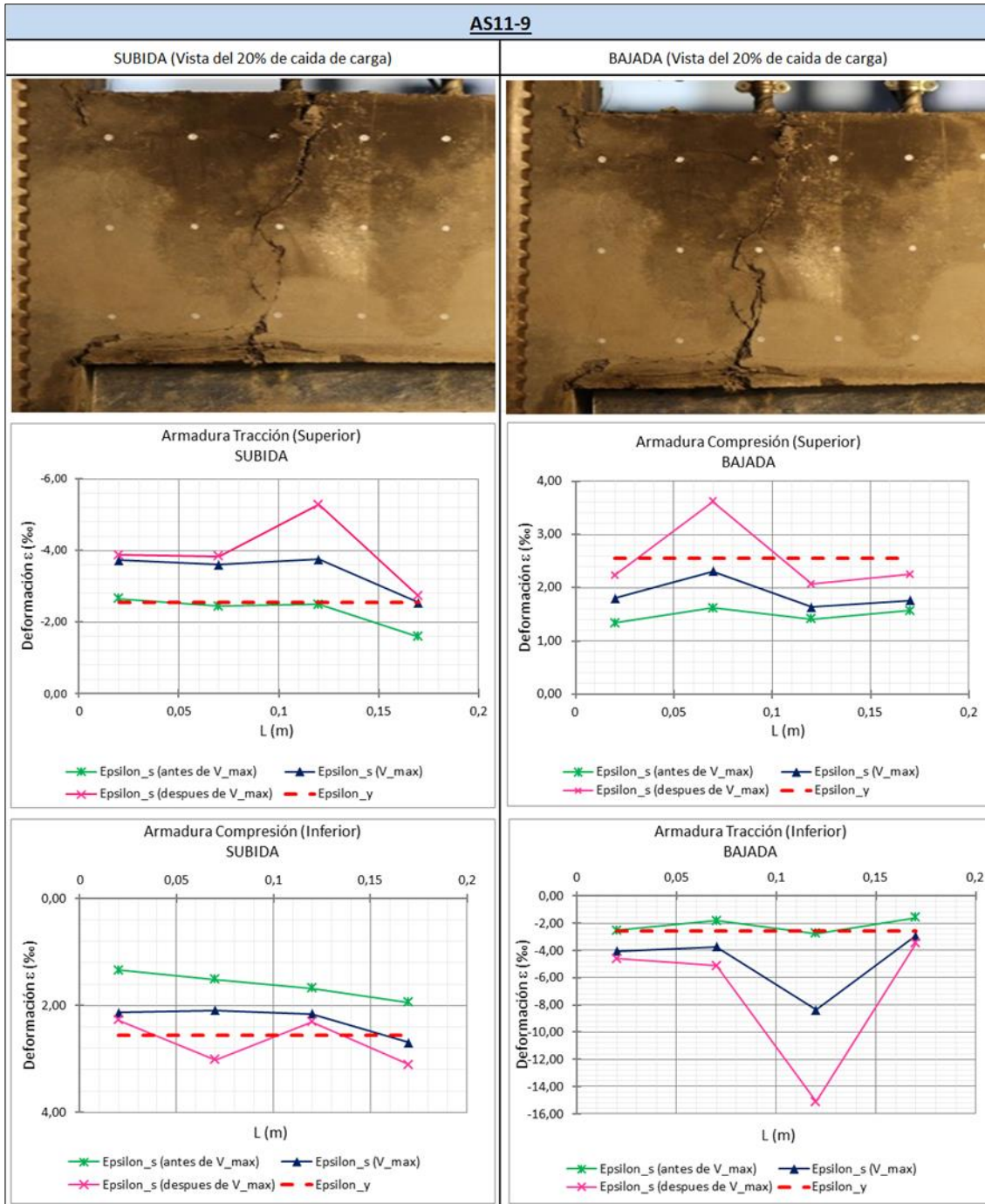


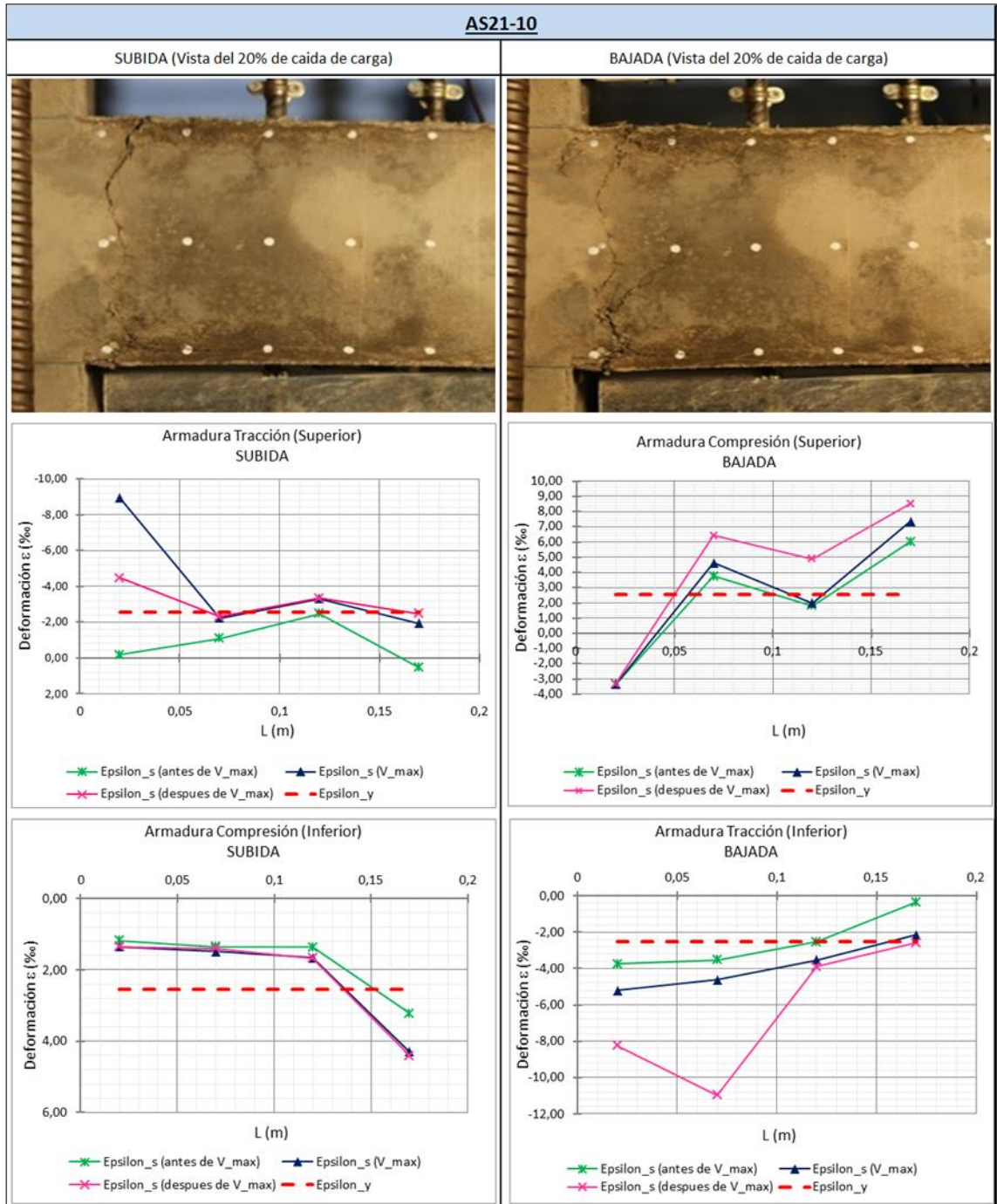


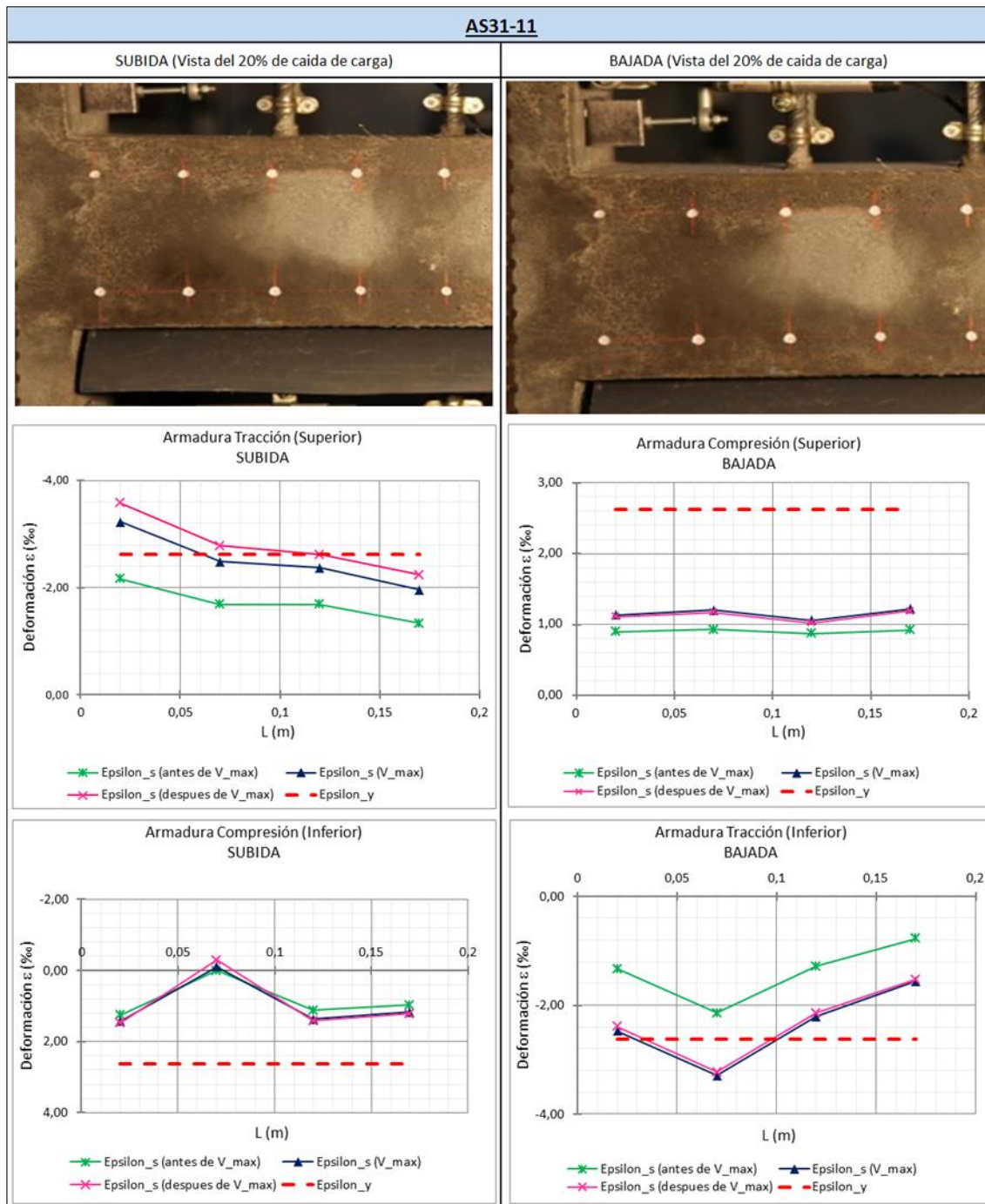


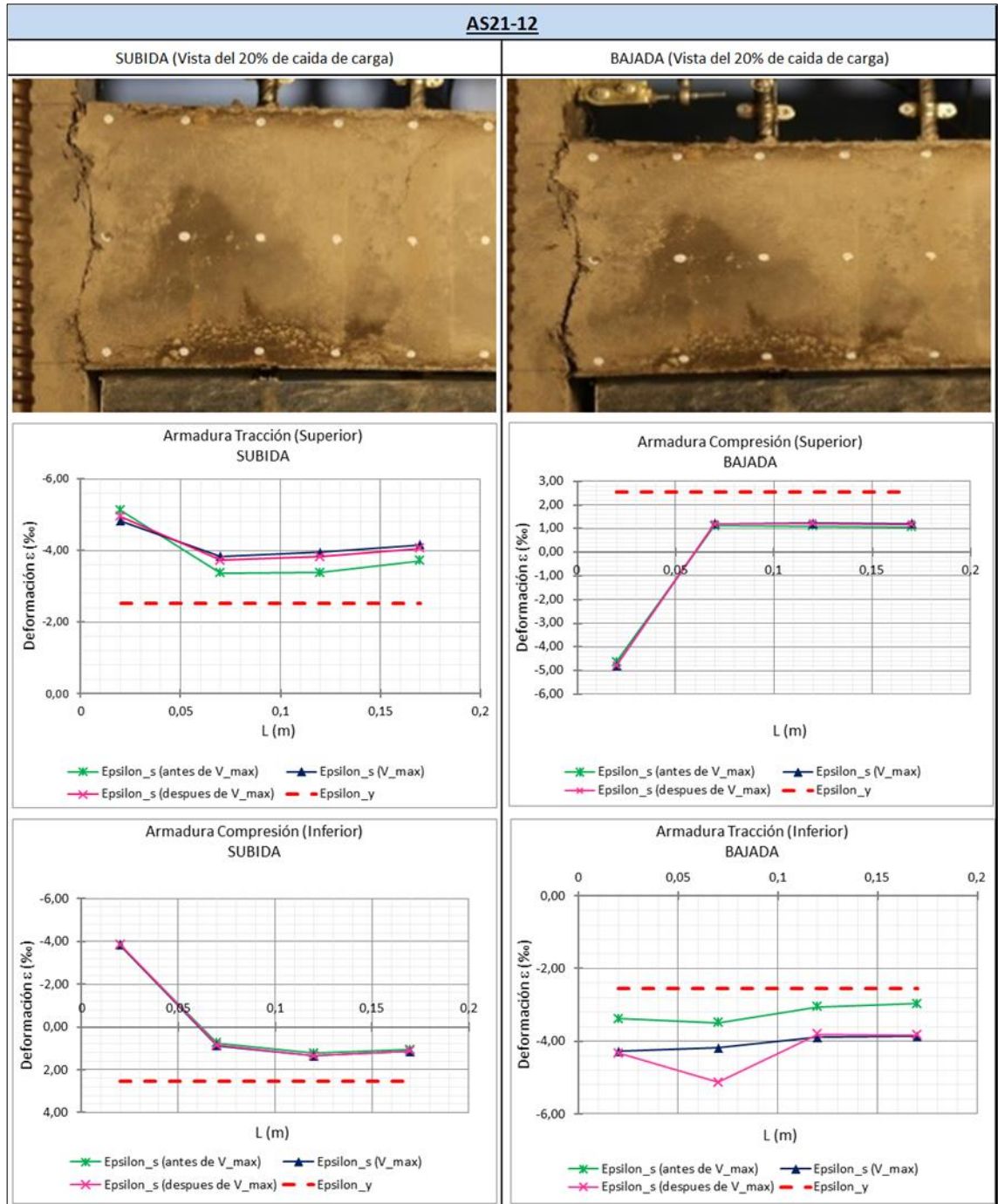


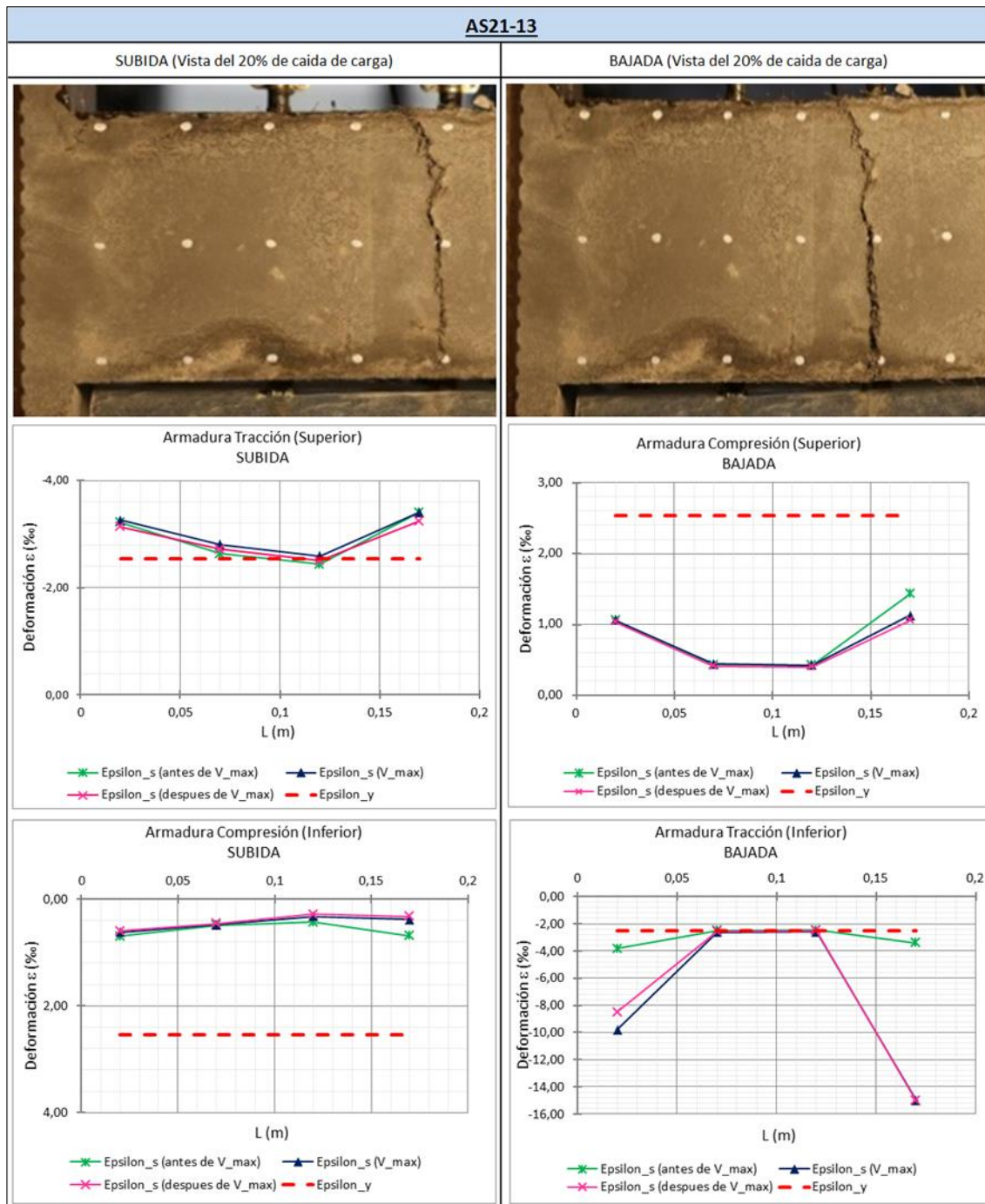


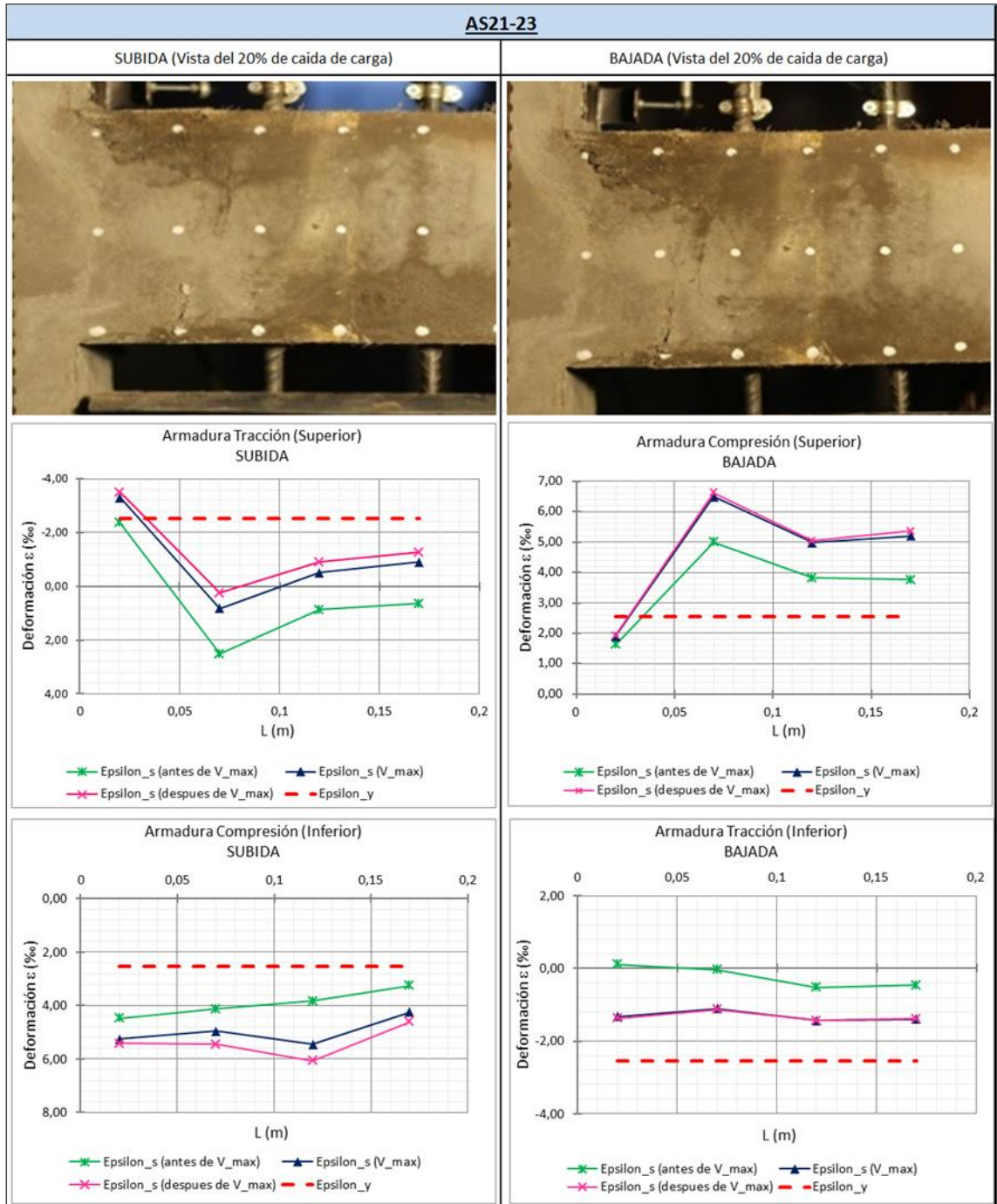


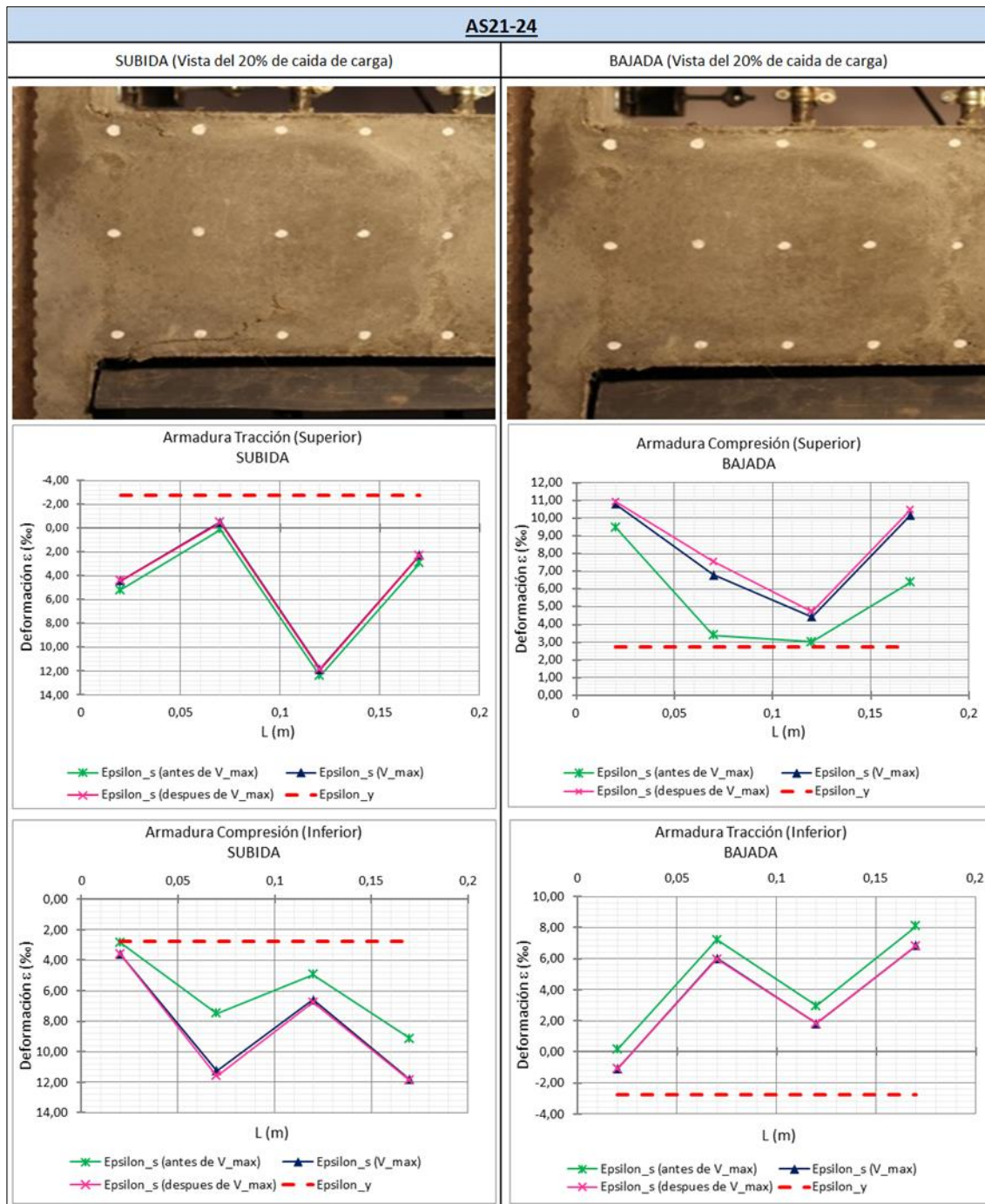


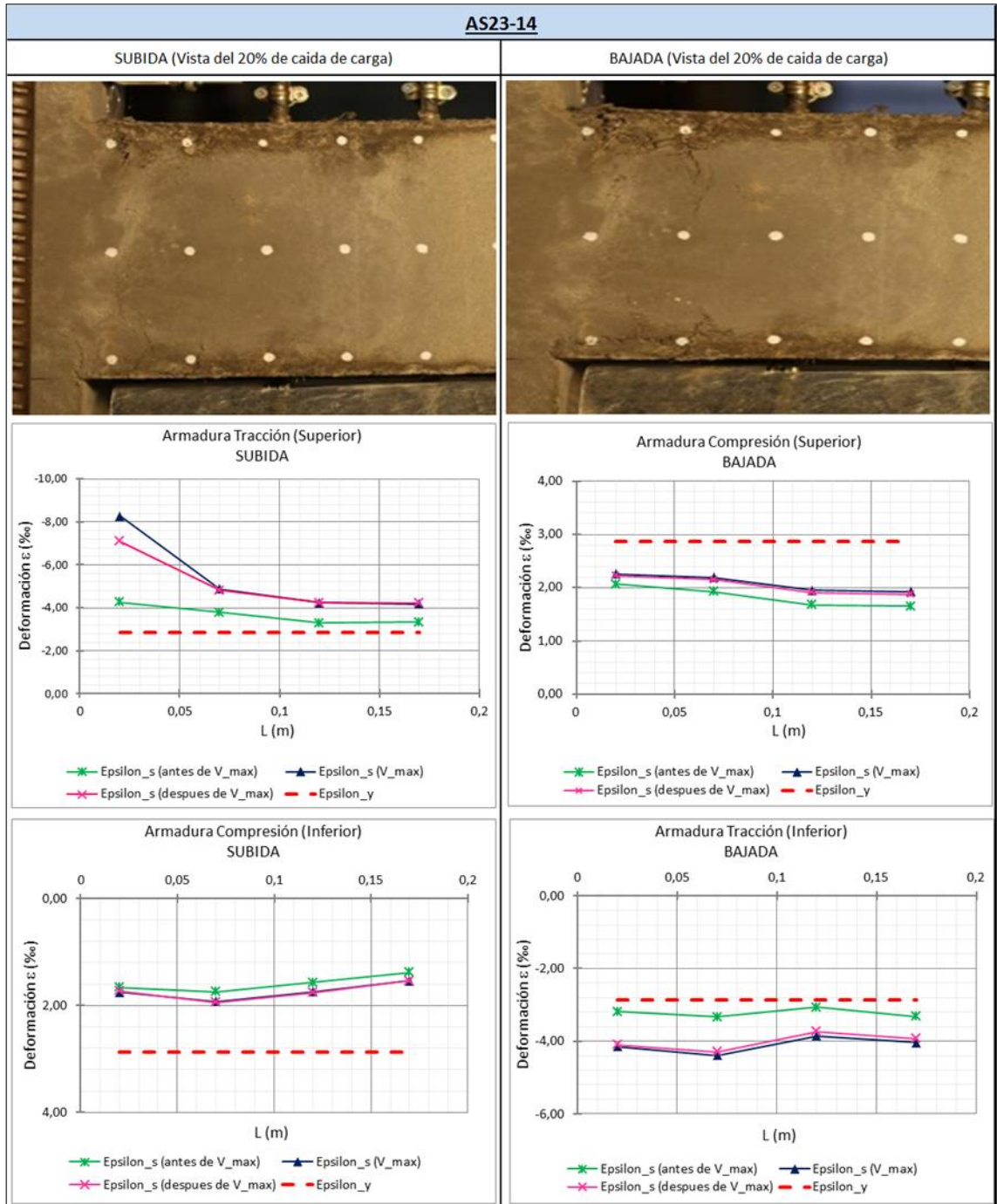


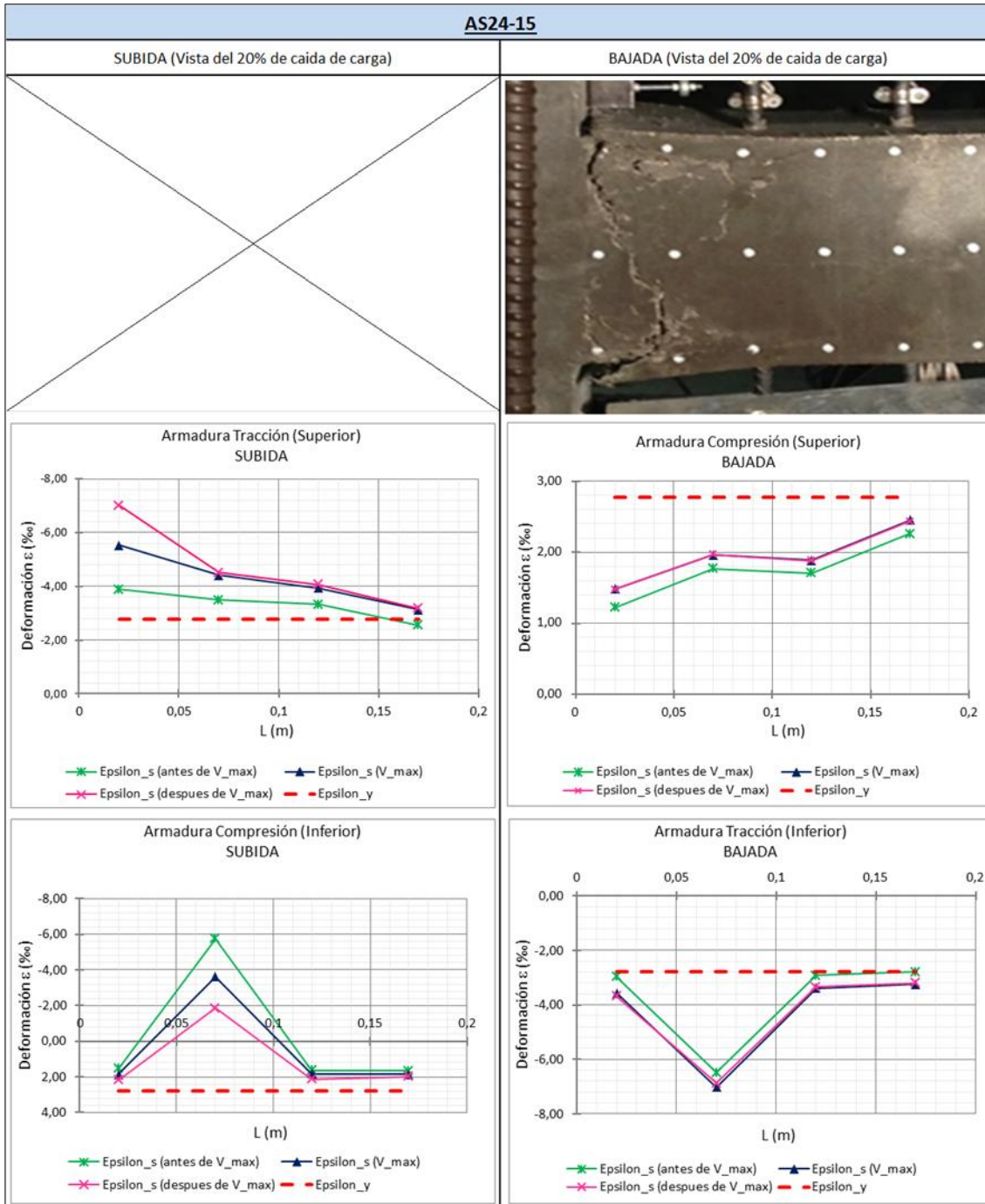


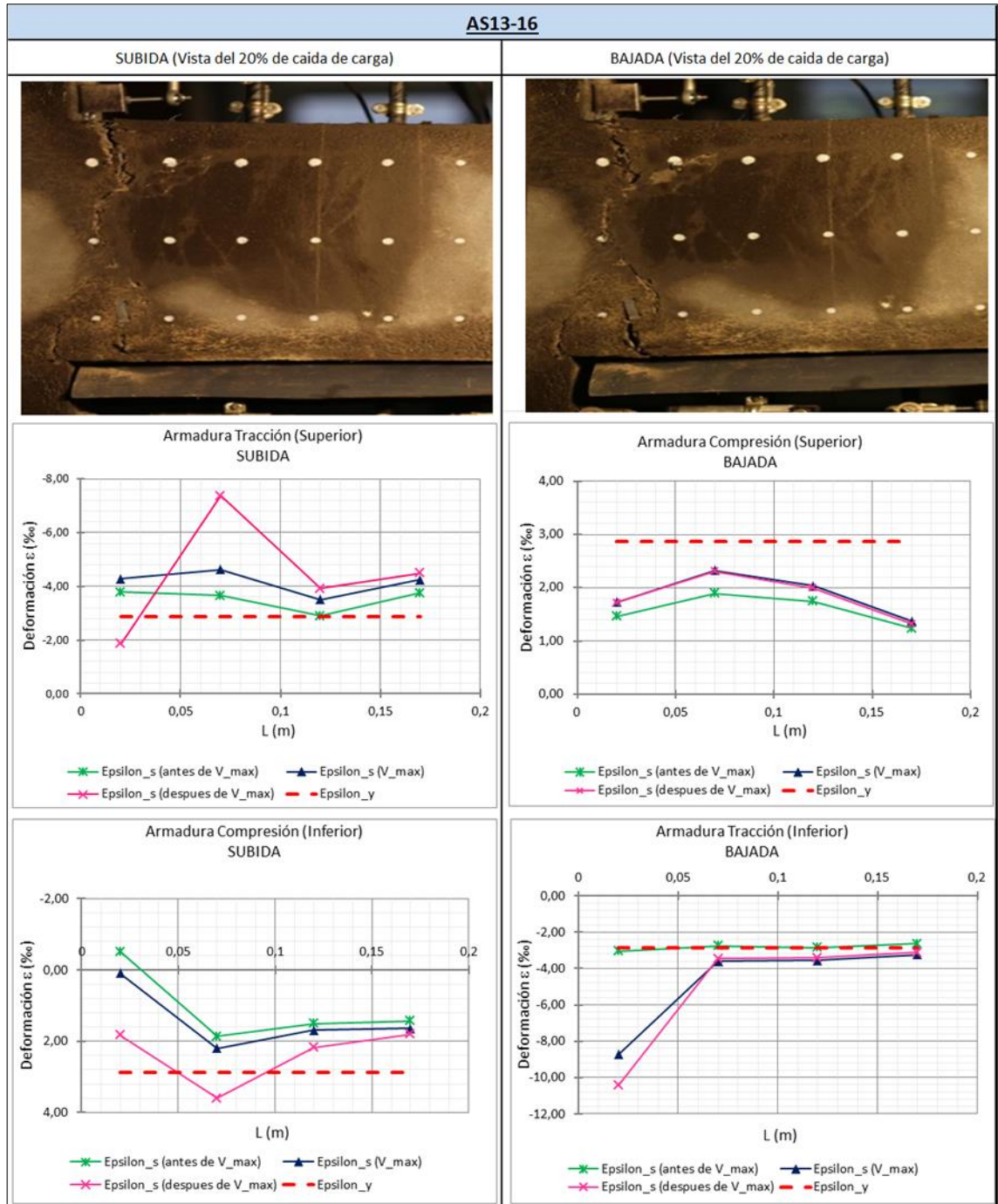


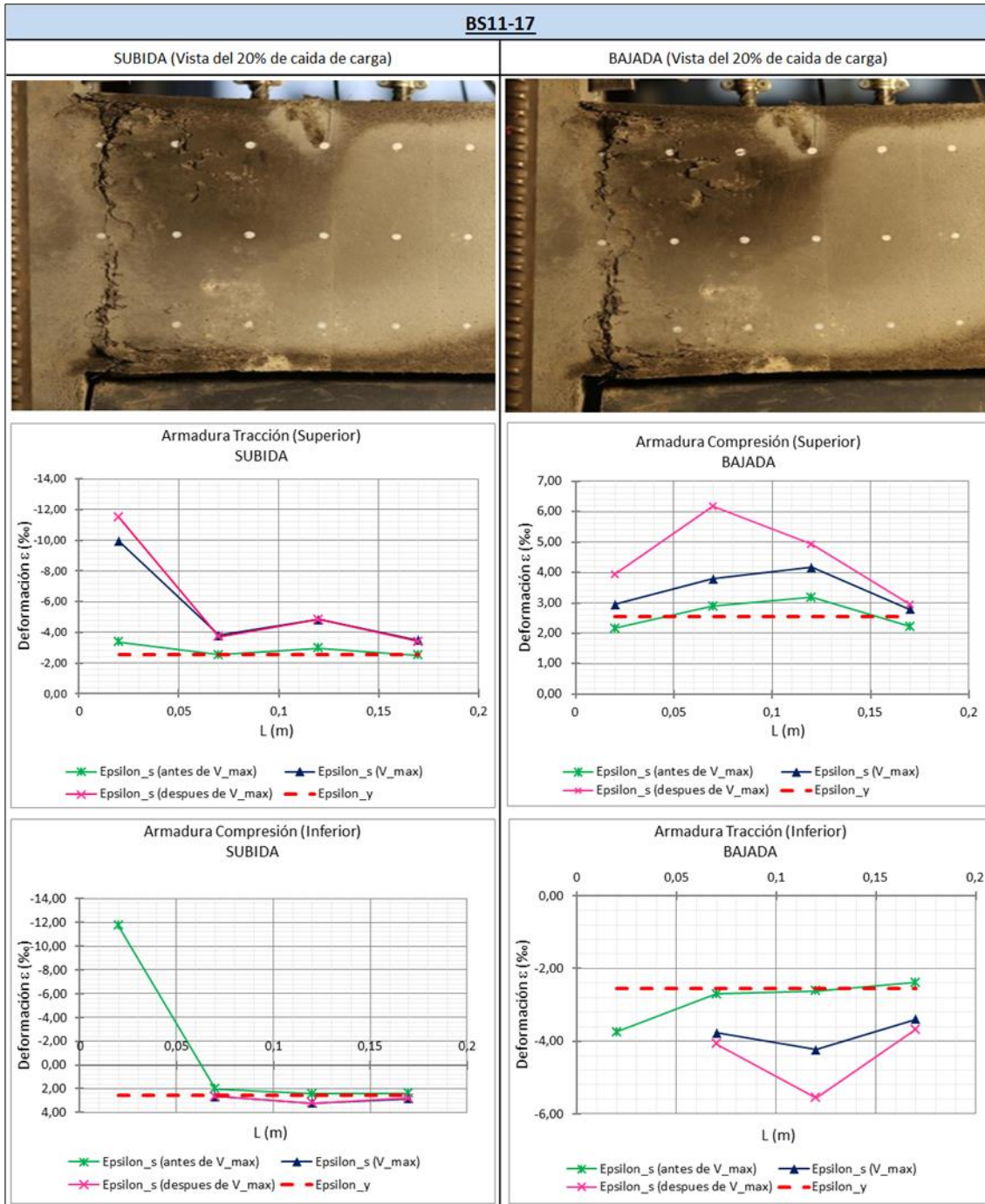


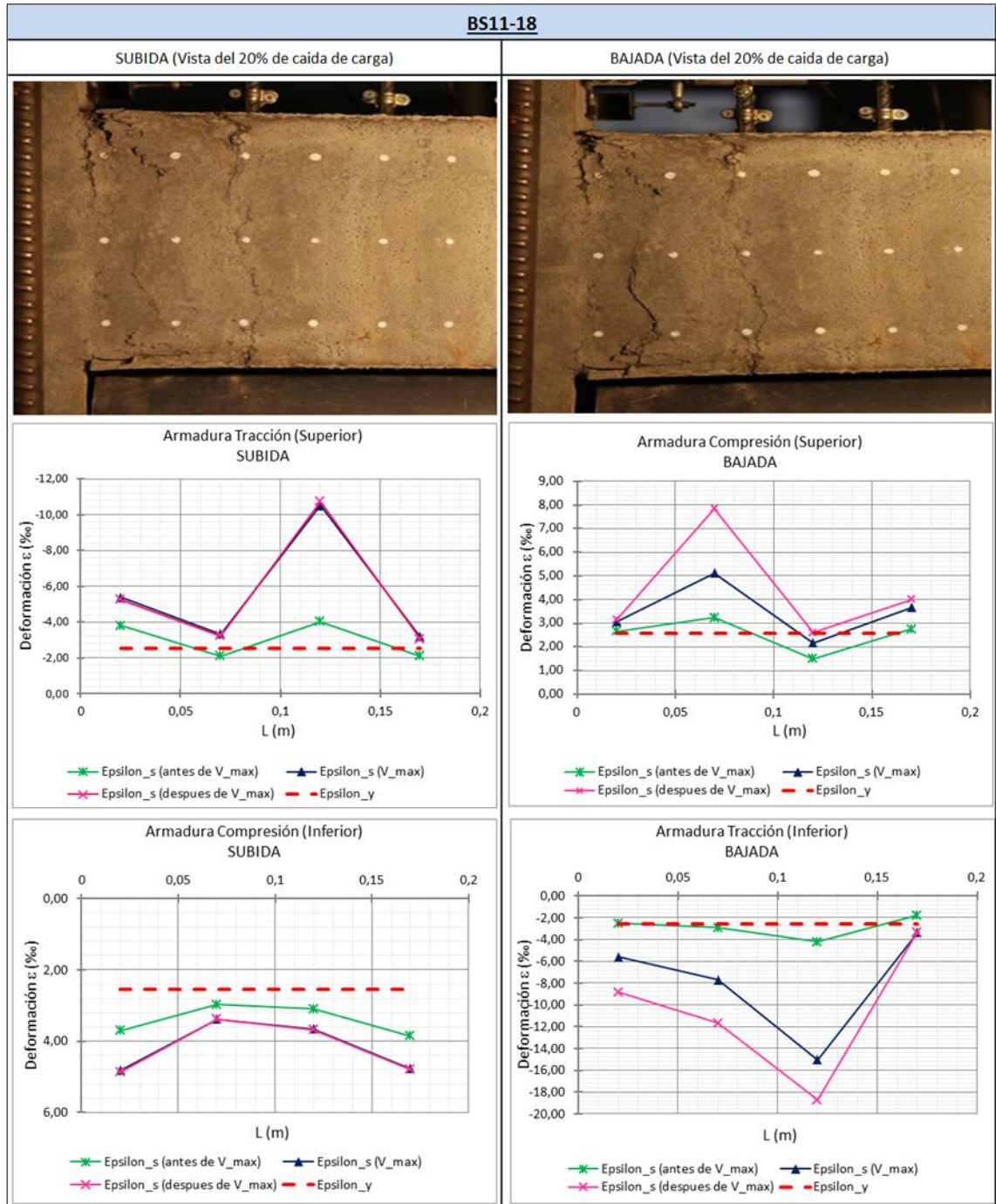


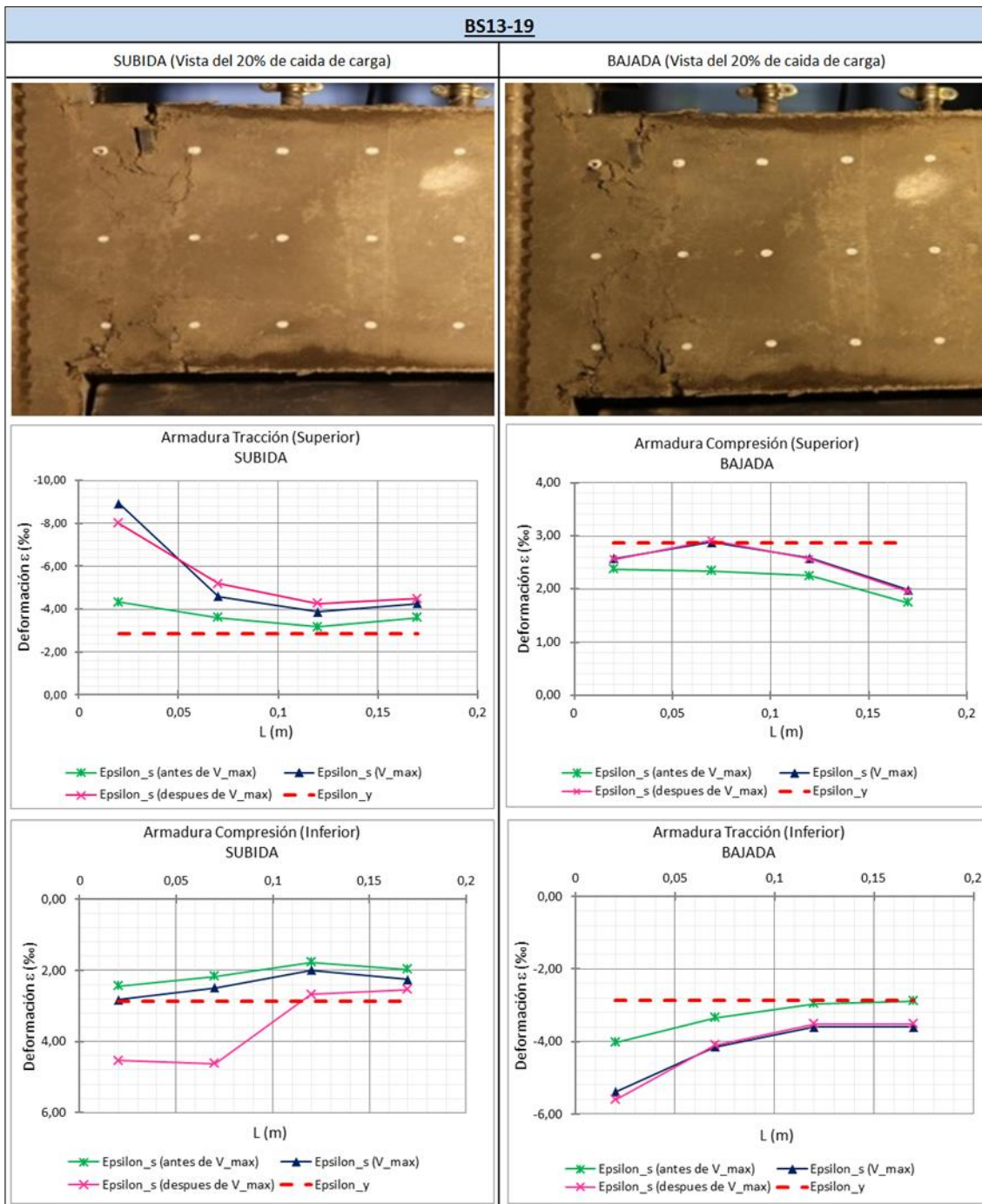


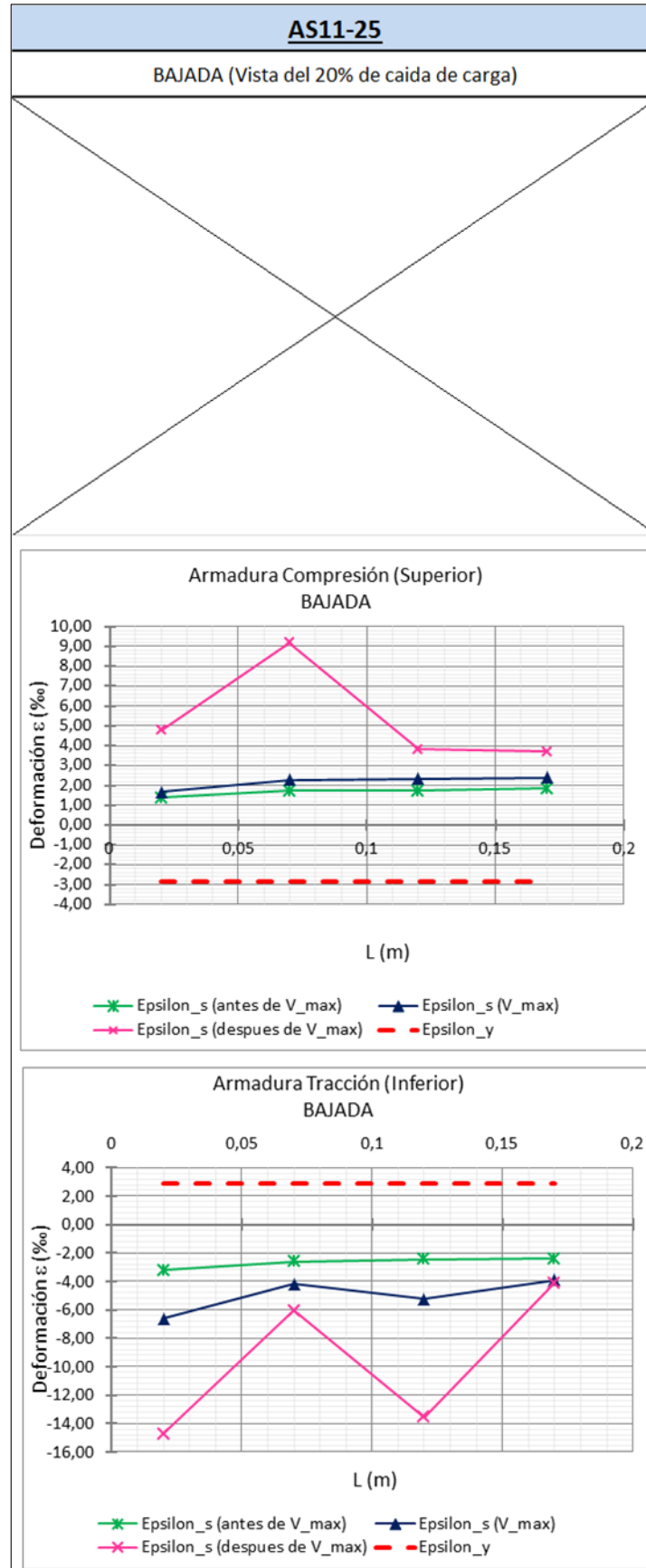












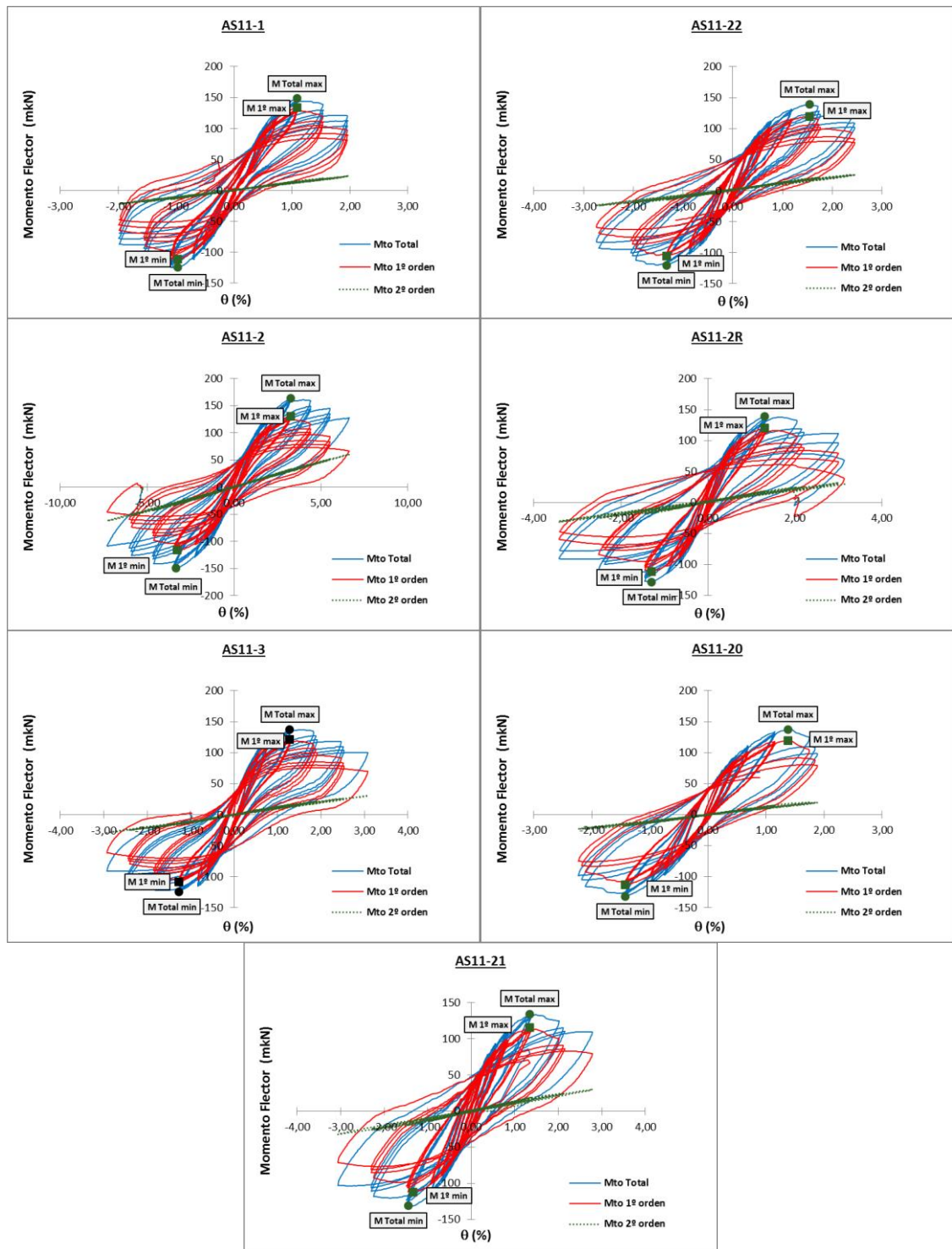
ANEJO D

Anejo D: Modos de fallo

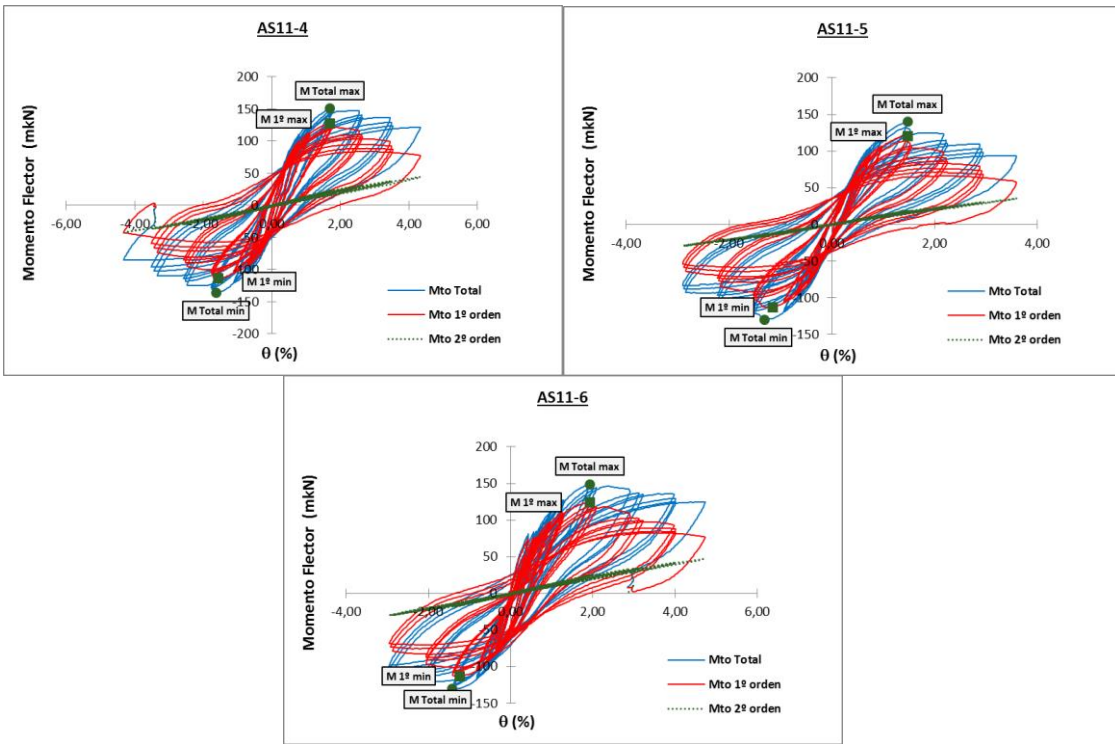
Se recapitulan los modos de fallo planteados para los elementos ensayados en este trabajo.

Modo de fallo: Curvas Momento Flector-Drift

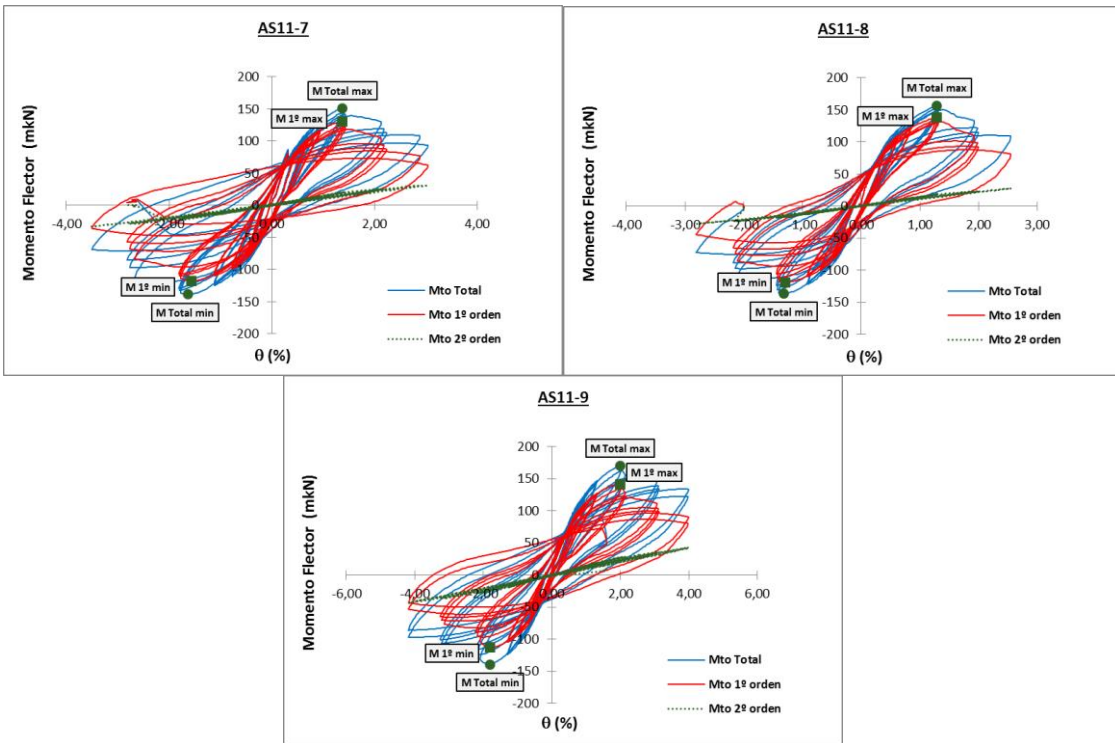
- **SERIE 1: Separación de la armadura transversal**



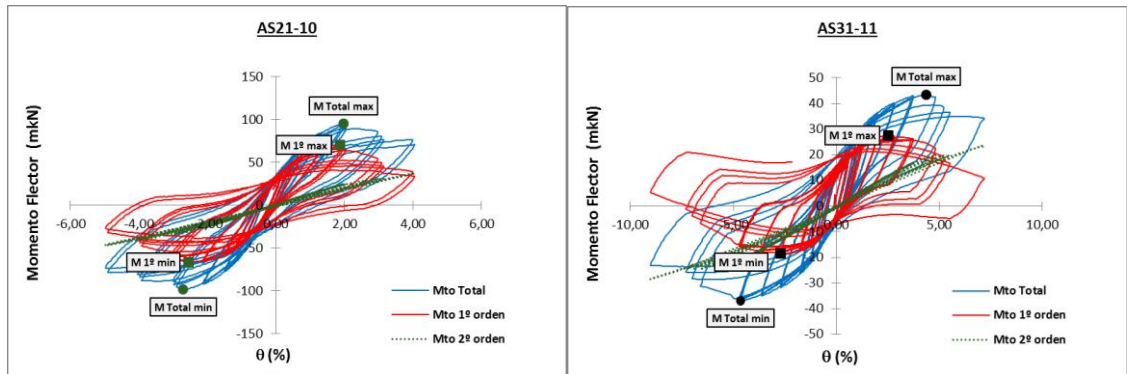
• **SERIE 1: Tipo de fibras** (Añadiendo AS11-3, AS11-2R, AS11-1 y AS11-22)



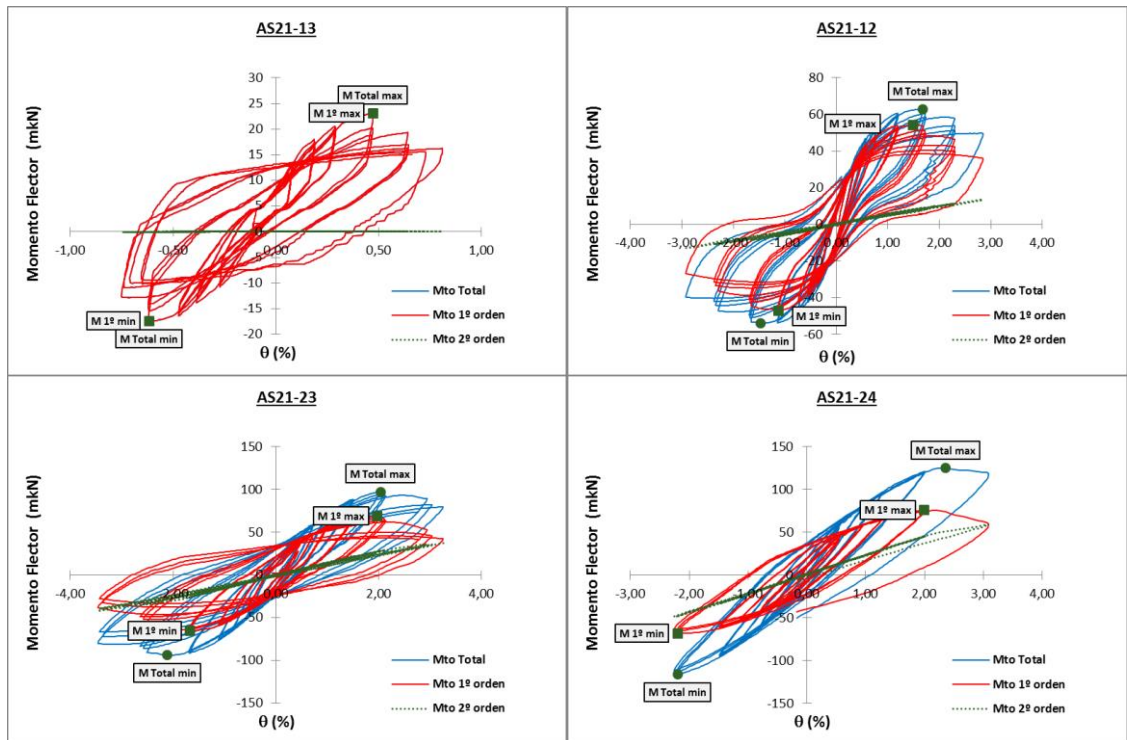
• **SERIE 1: Volumen de fibras** (Añadiendo AS11-3, AS11-2R, AS11-1 y AS11-22)



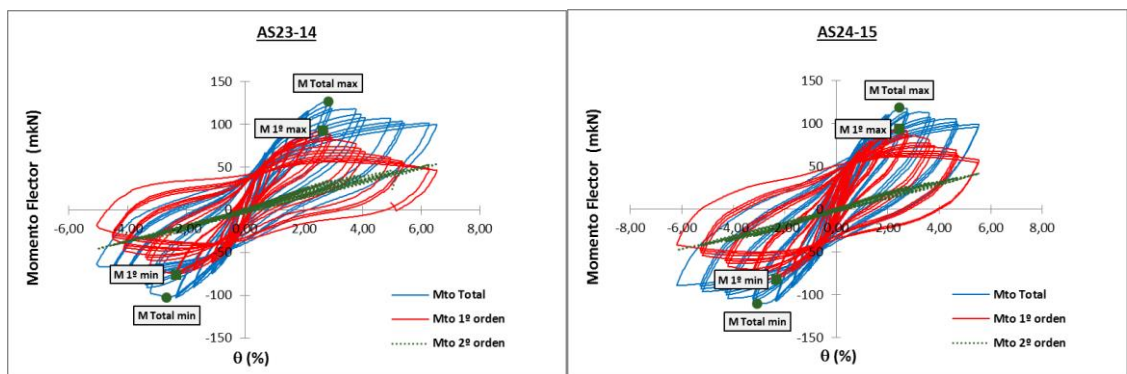
• **SERIE 2: Esbeltez (Añadiendo AS11-2R)**

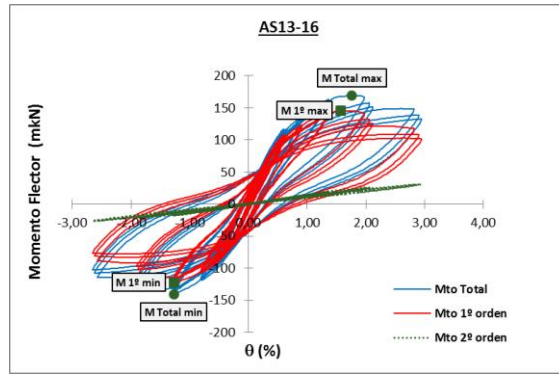


• **SERIE 2: Nivel de axil (Añadiendo AS21-10)**

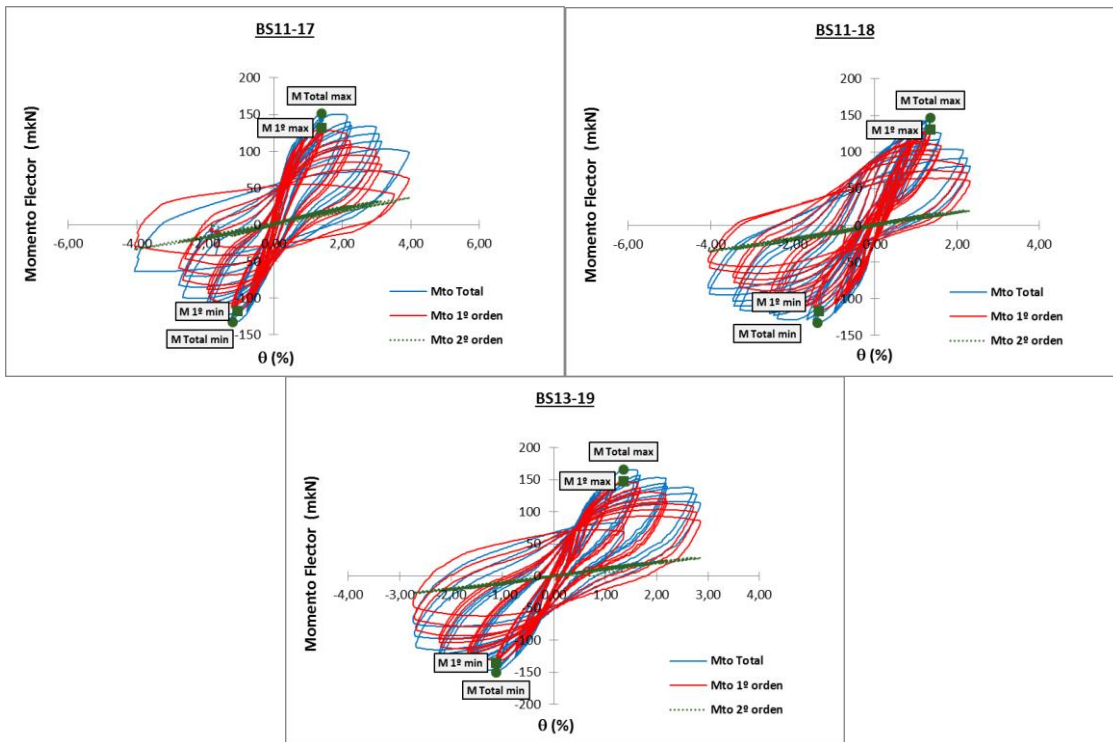


• **SERIE 3: Cuantía de la armadura longitudinal (Añadiendo AS11-1, AS11-22 y AS21-10)**

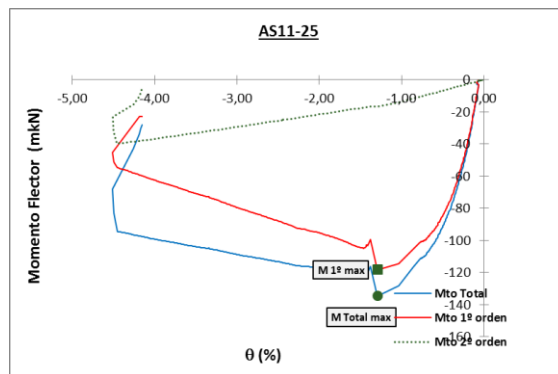




- **SERIE 4: Recubrimiento relativo** (Añadiendo AS11-1, AS11-22 y AS13-16)

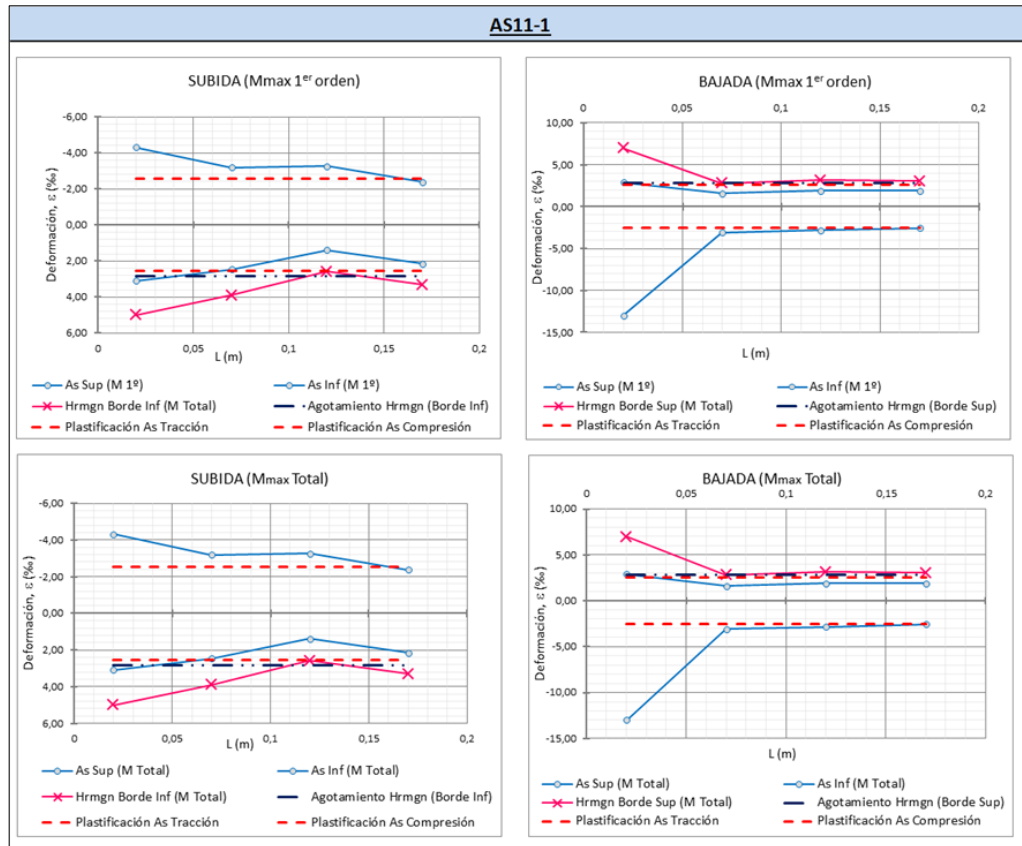


- **SERIE 5: Tipo de carga** (Añadiendo AS11-1 y AS11-22)

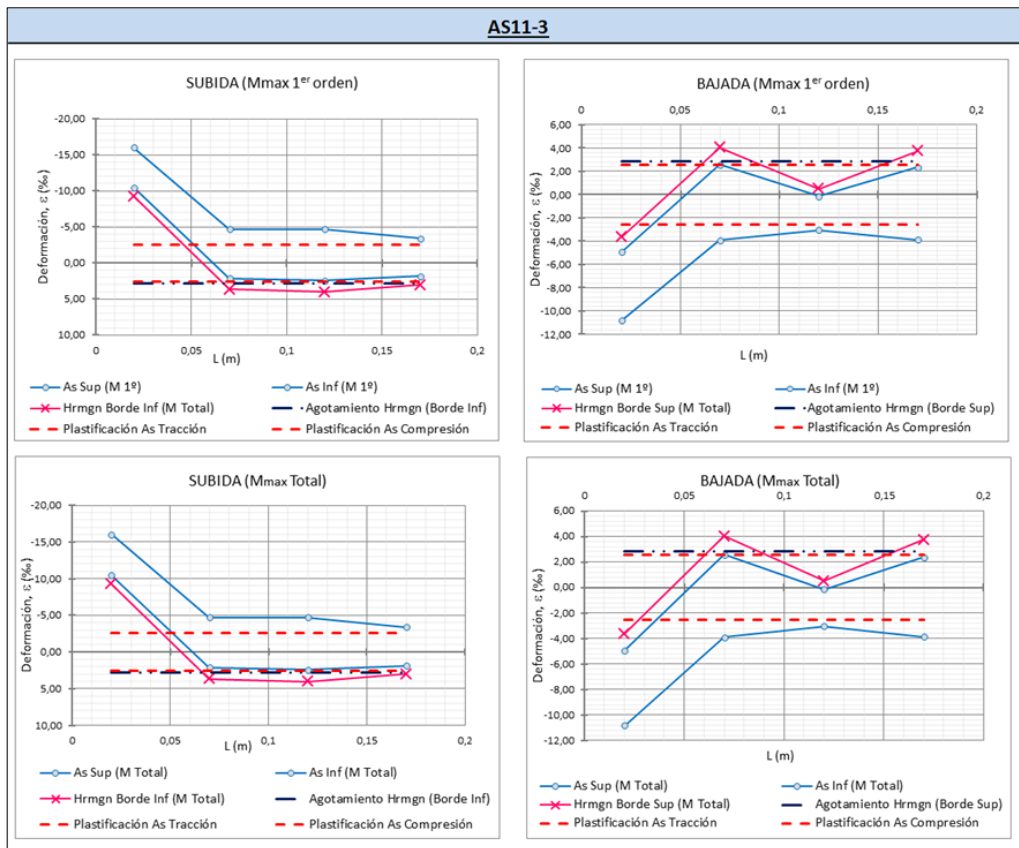


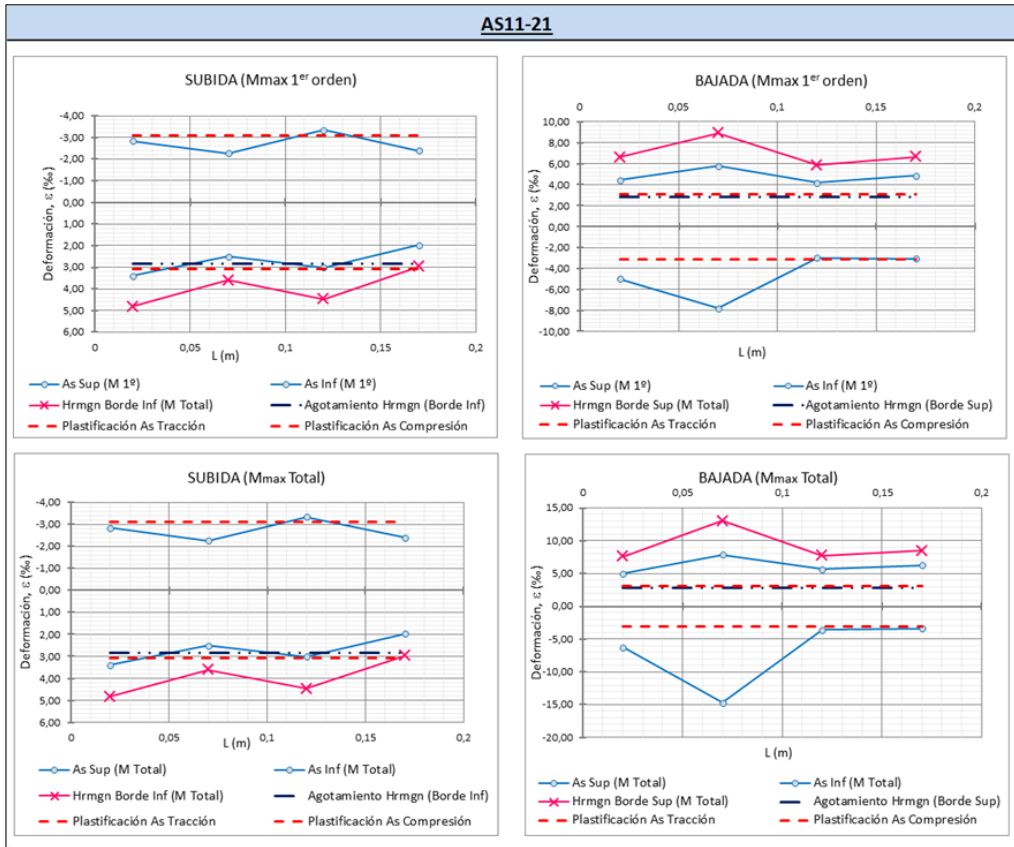
Modo de fallo: Deformación de los materiales

- **SERIE 1: Separación de la armadura transversal**

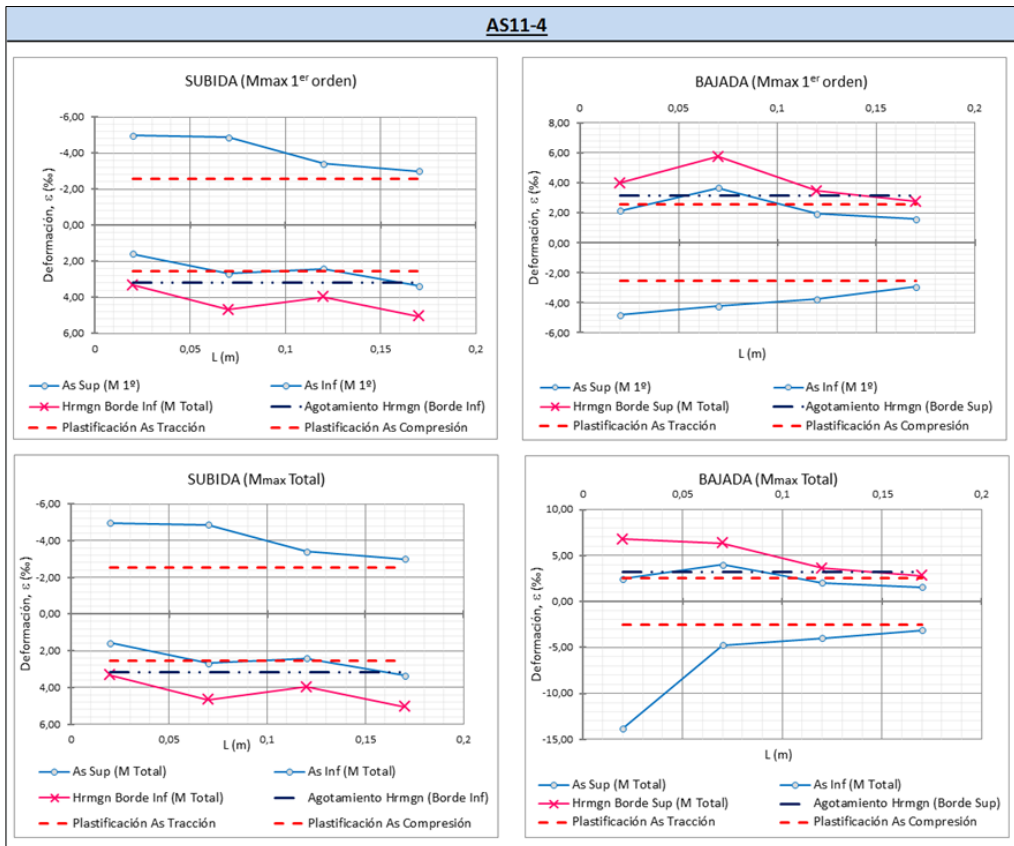


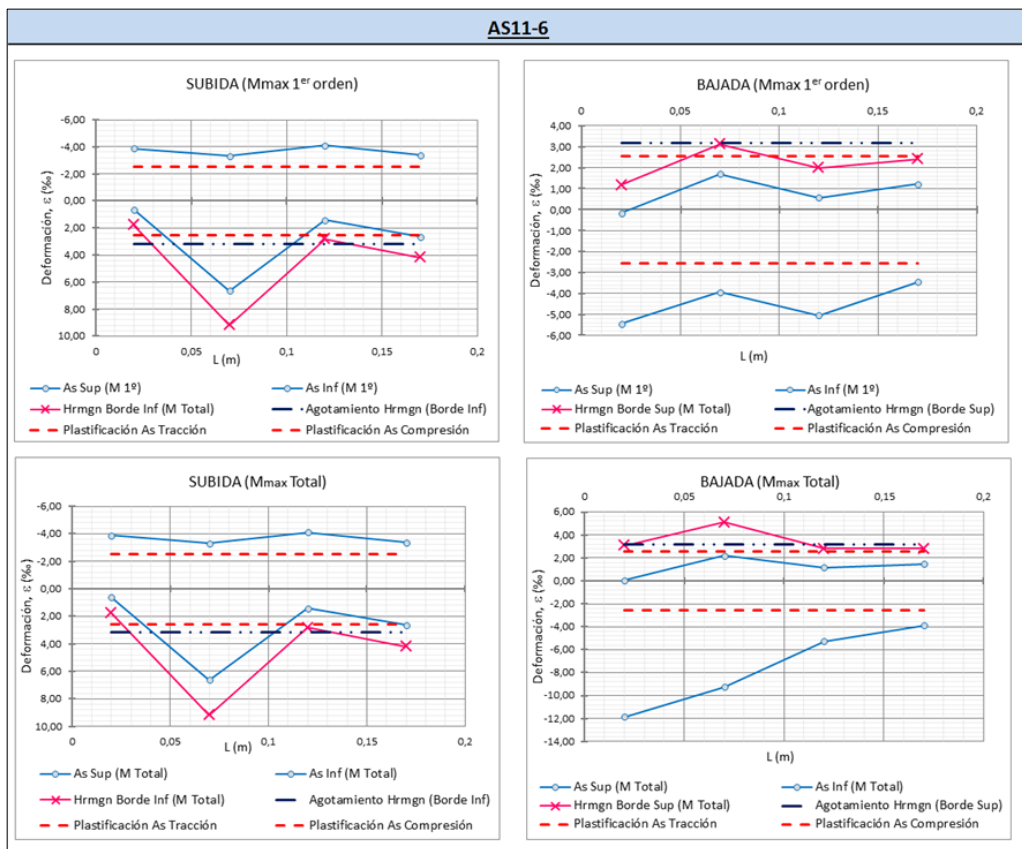
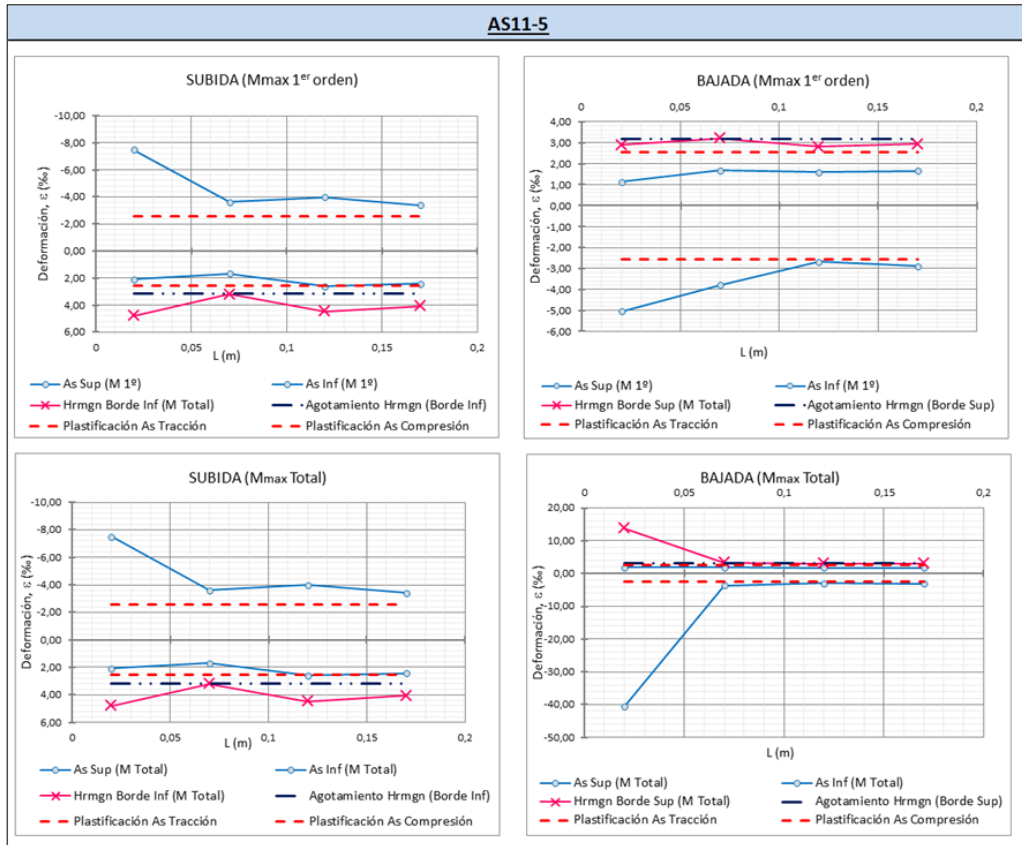




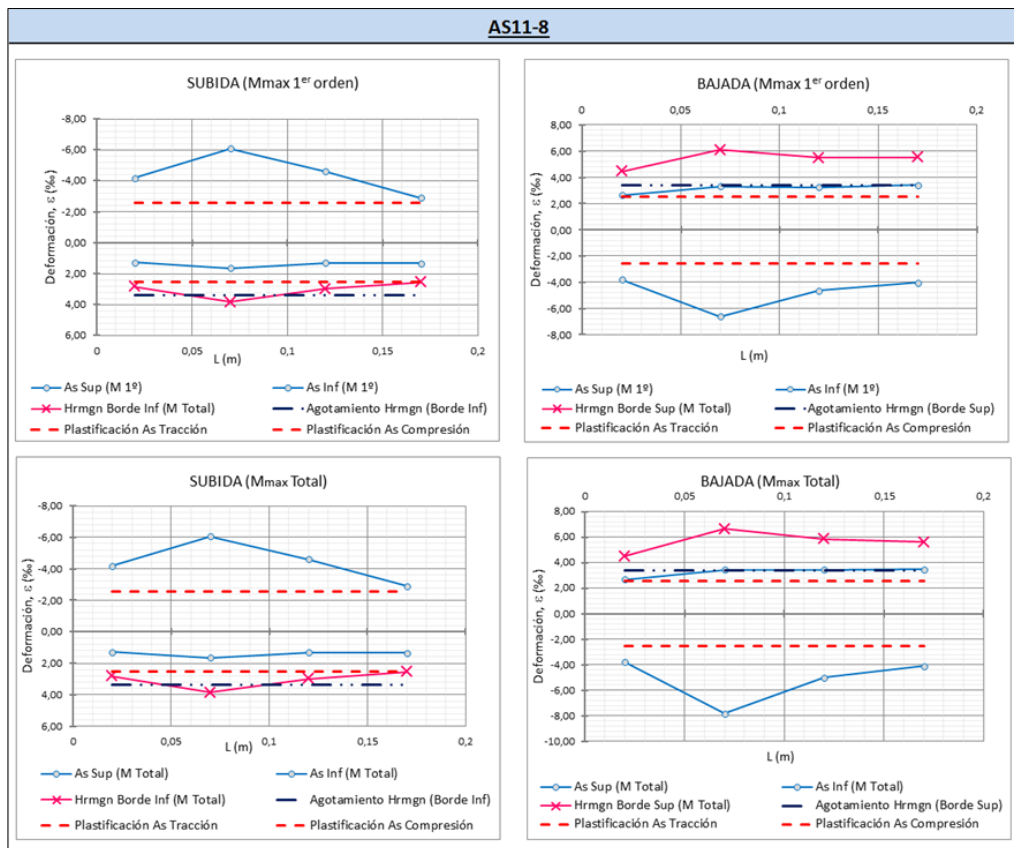
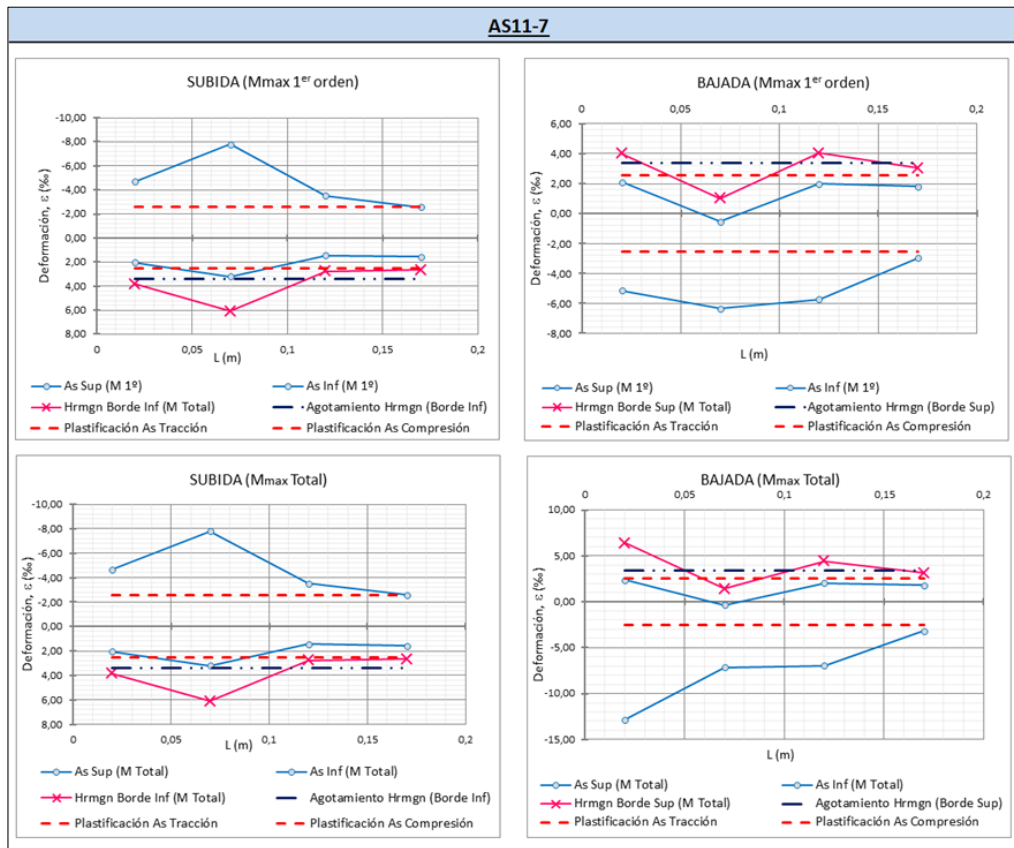


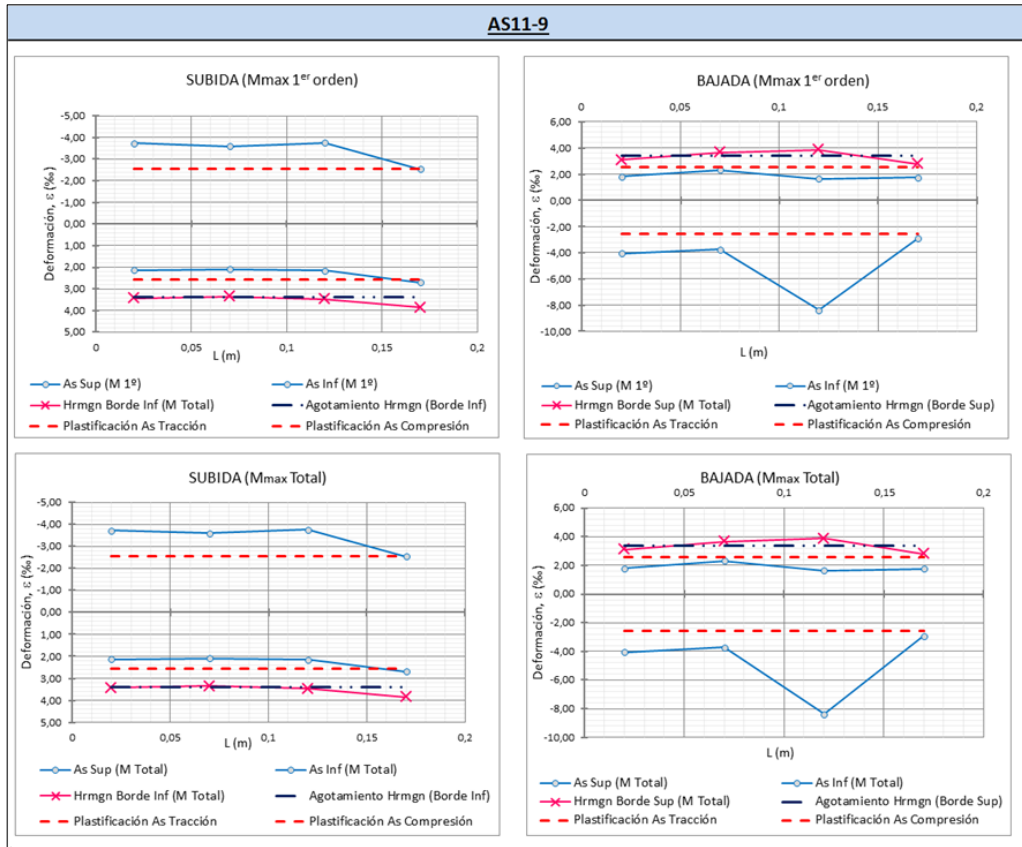
- **SERIE 1: Tipo de fibras** (Añadiendo AS11-3, AS11-2R, AS11-1 y AS11-22)



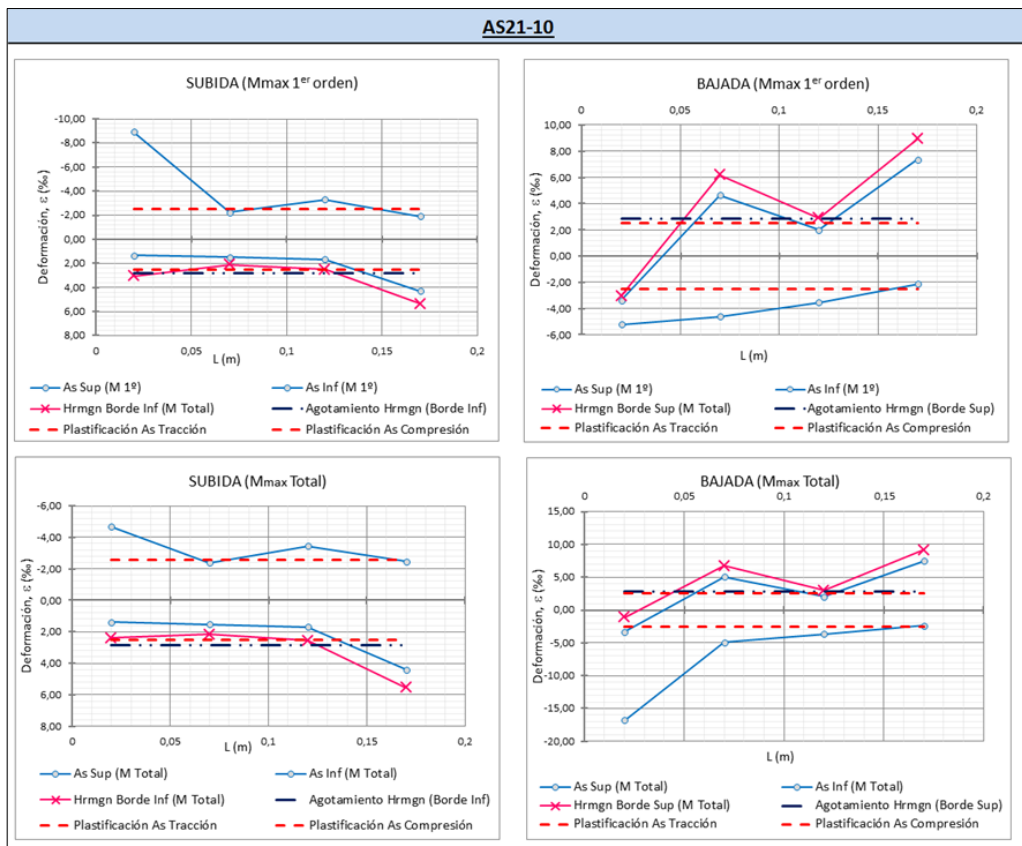


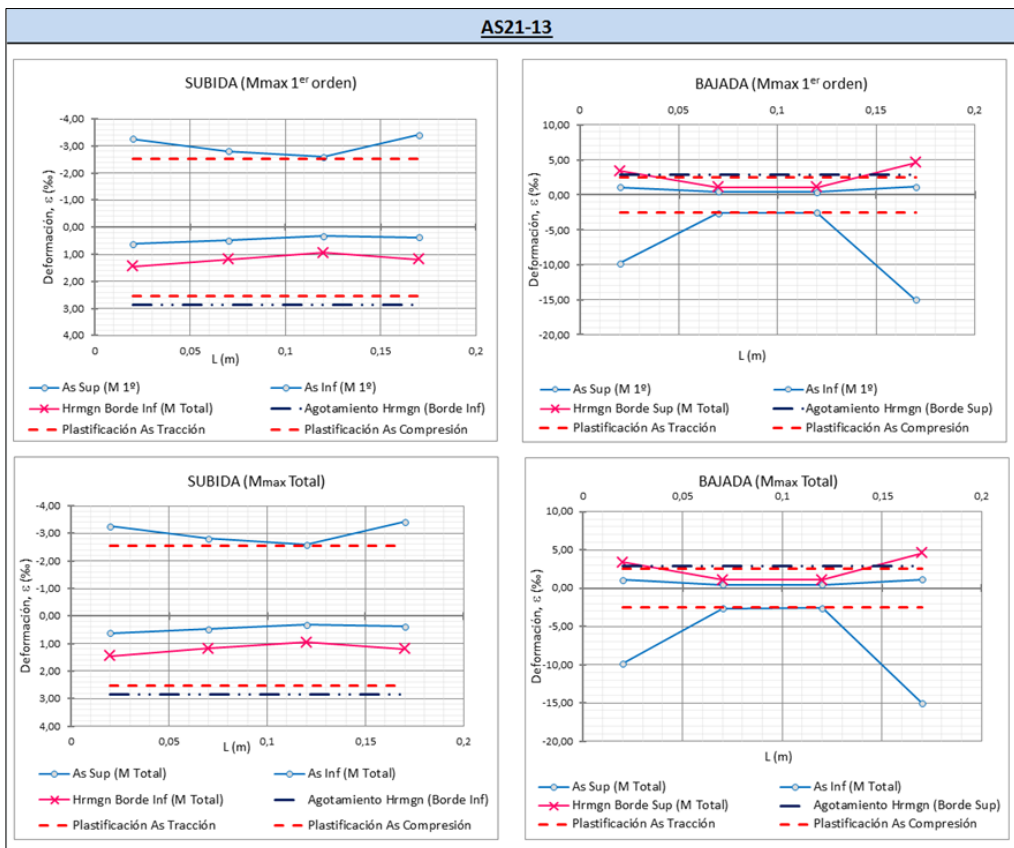
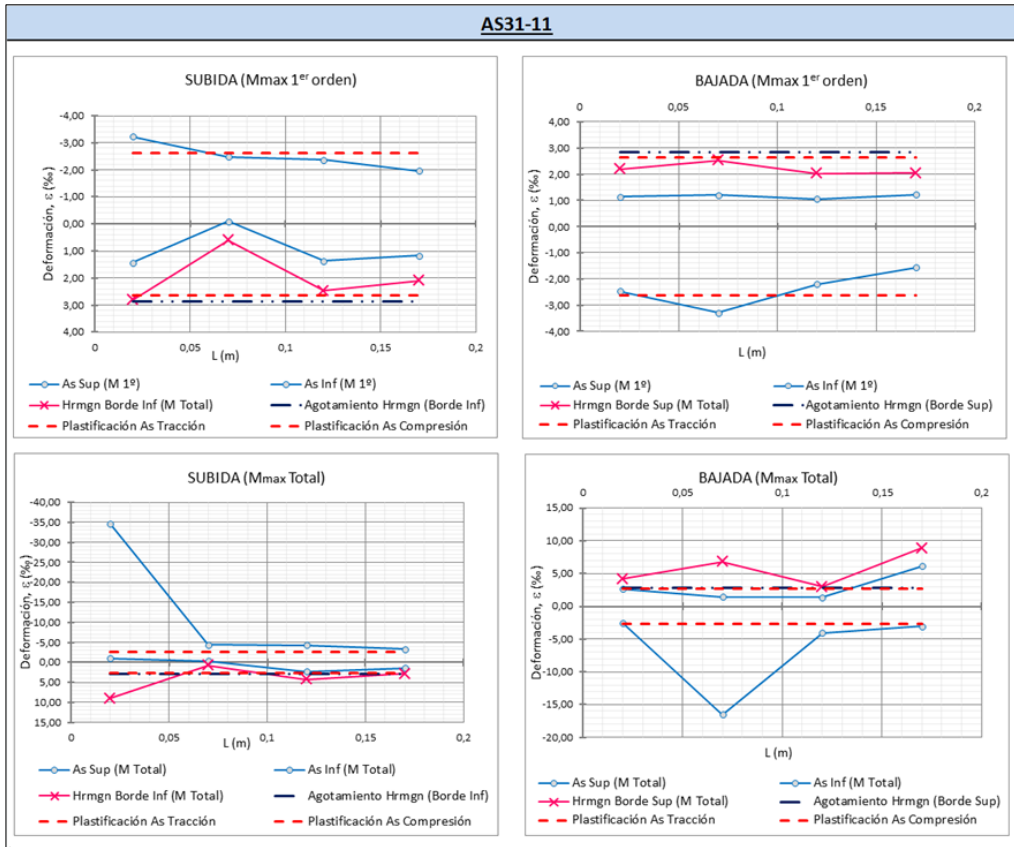
• **SERIE 1: Volumen de fibras (Añadiendo AS11-3, AS11-2R, AS11-1 y AS11-22)**



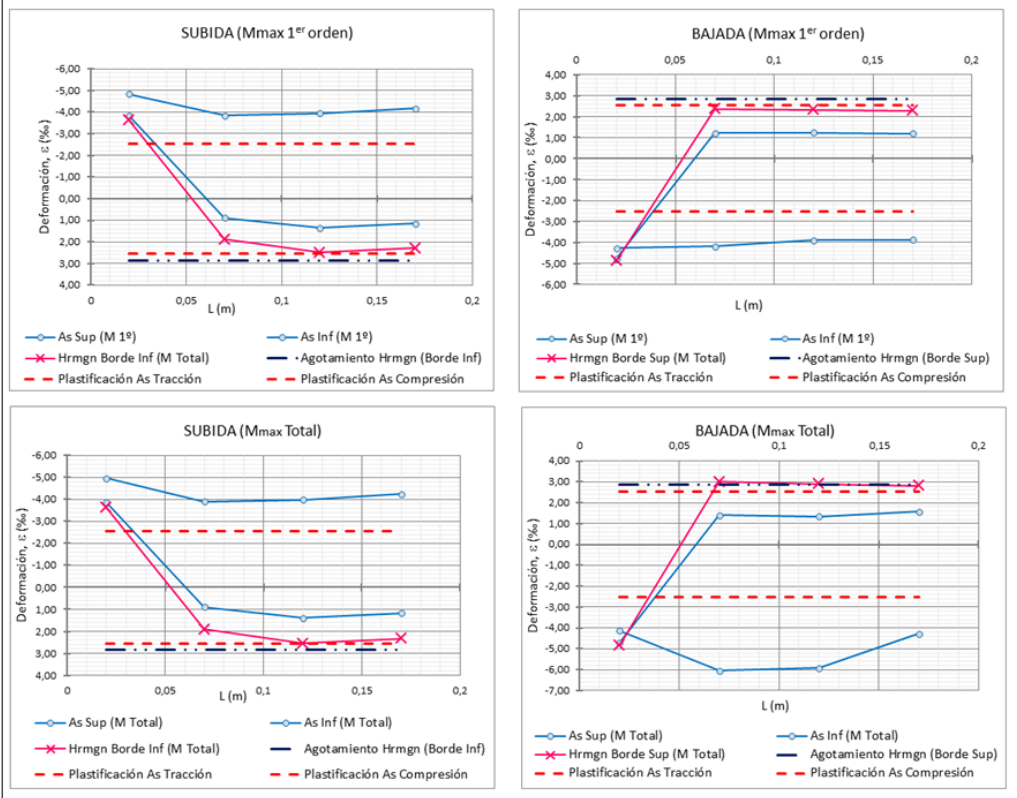


• **SERIE 2: Esbeltez (Añadiendo AS11-2R)**

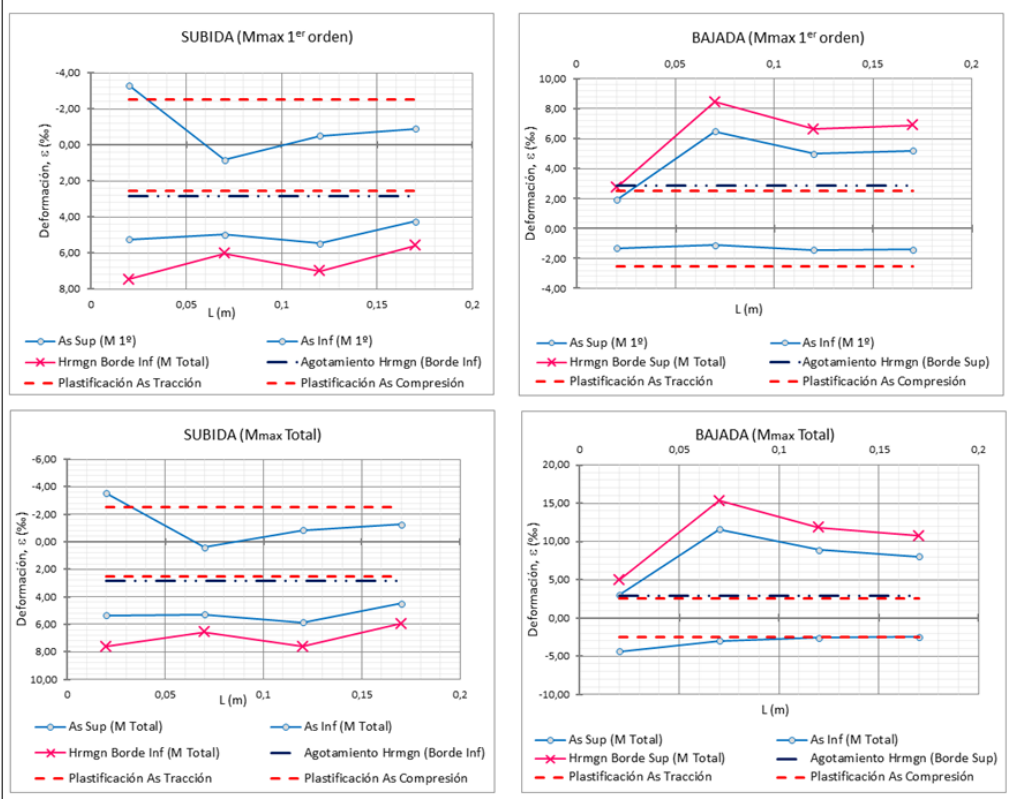


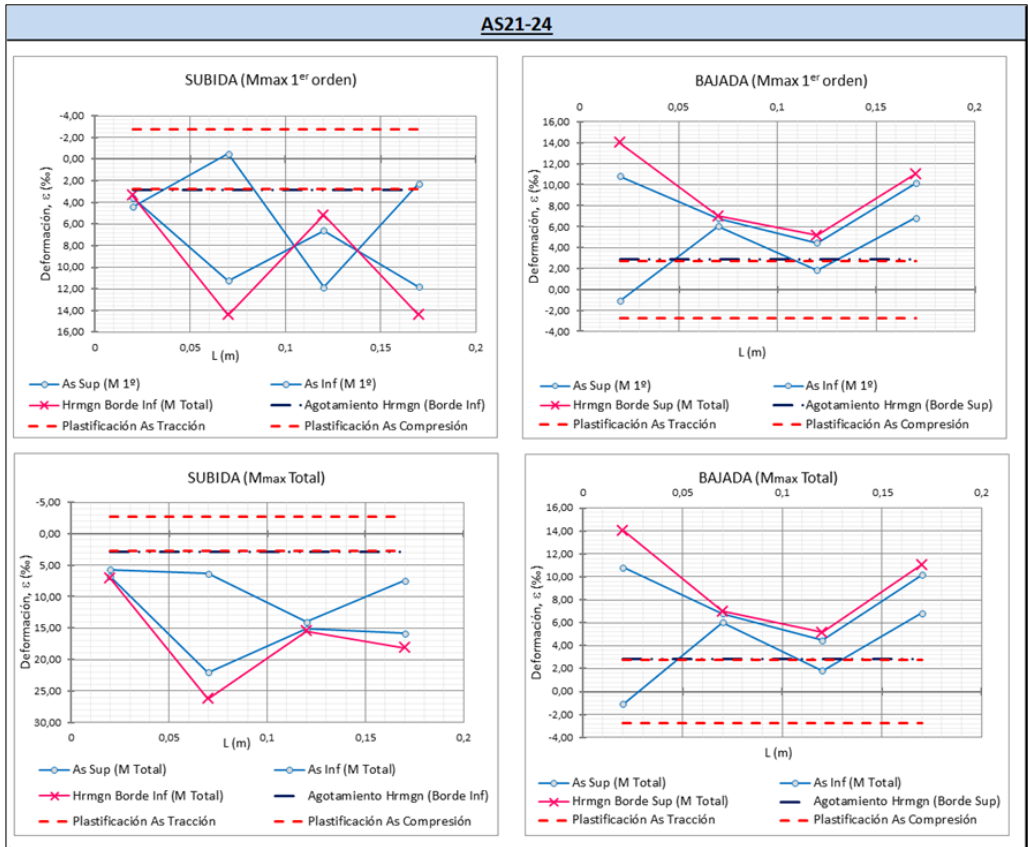


AS21-12

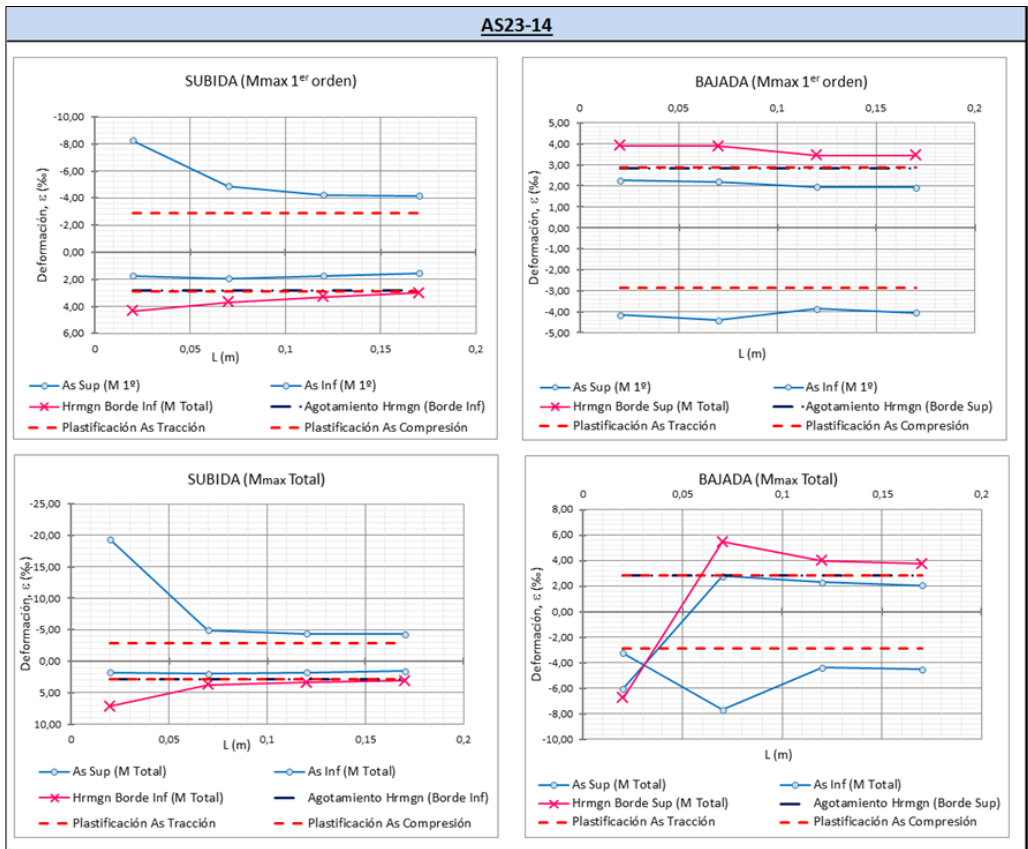


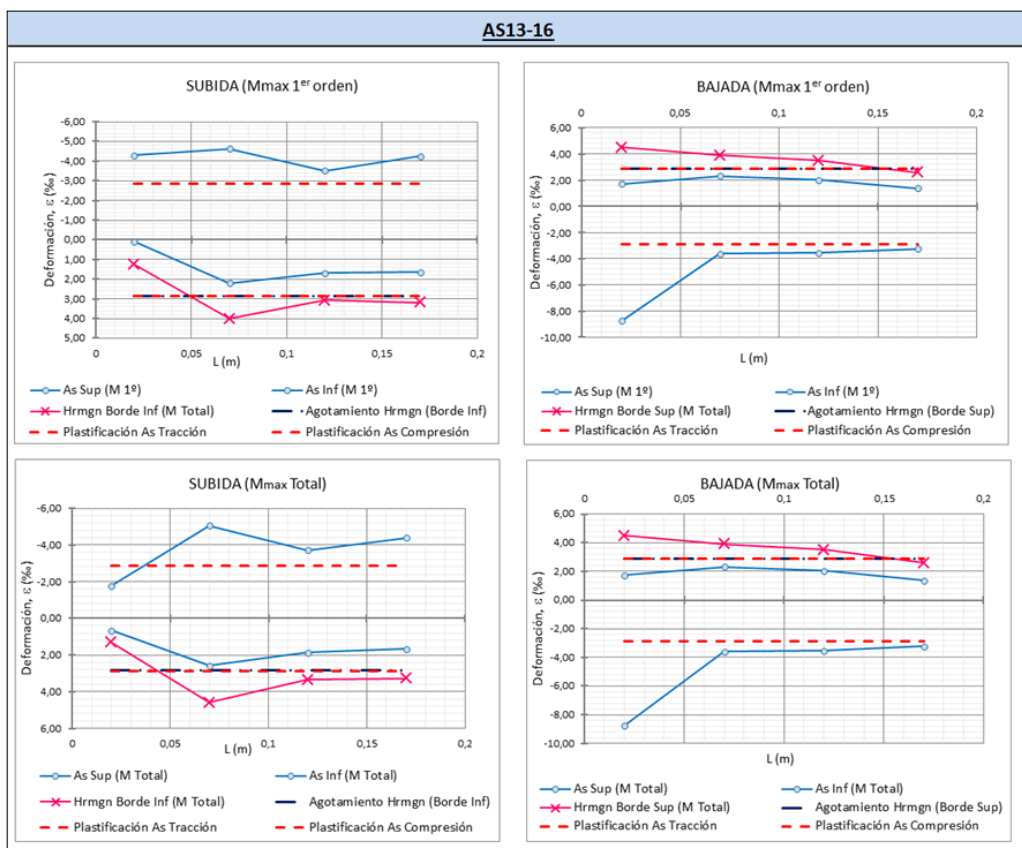
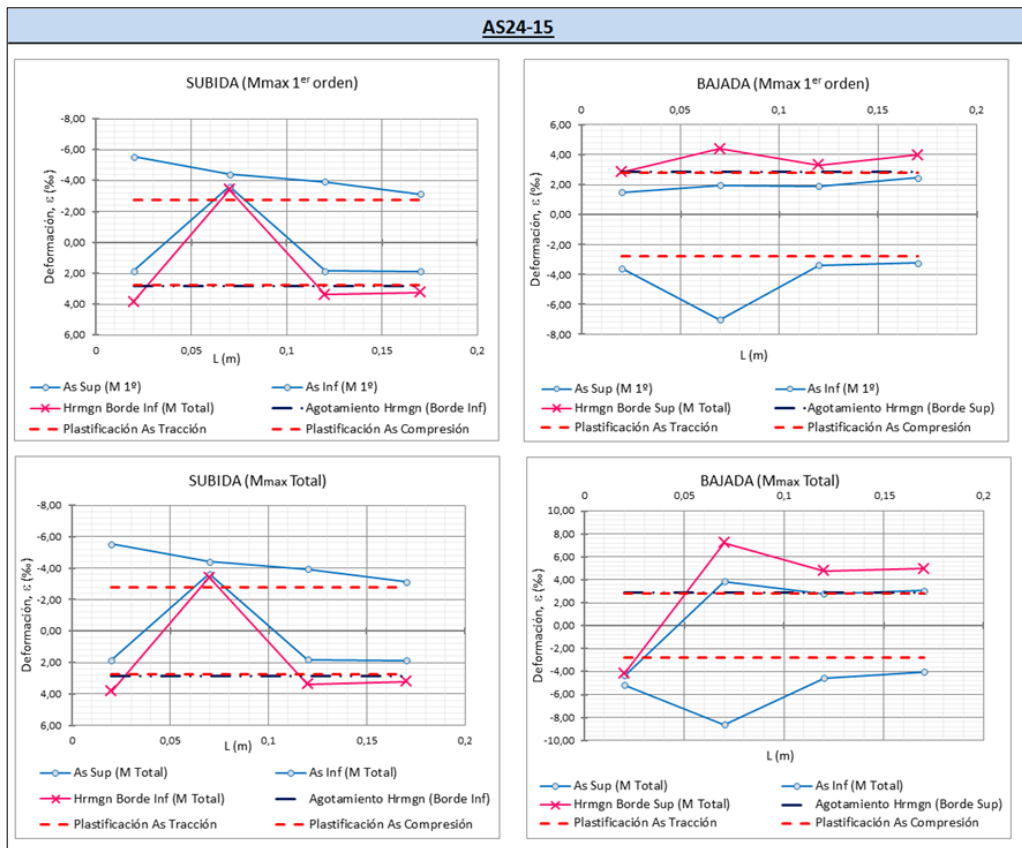
AS21-23



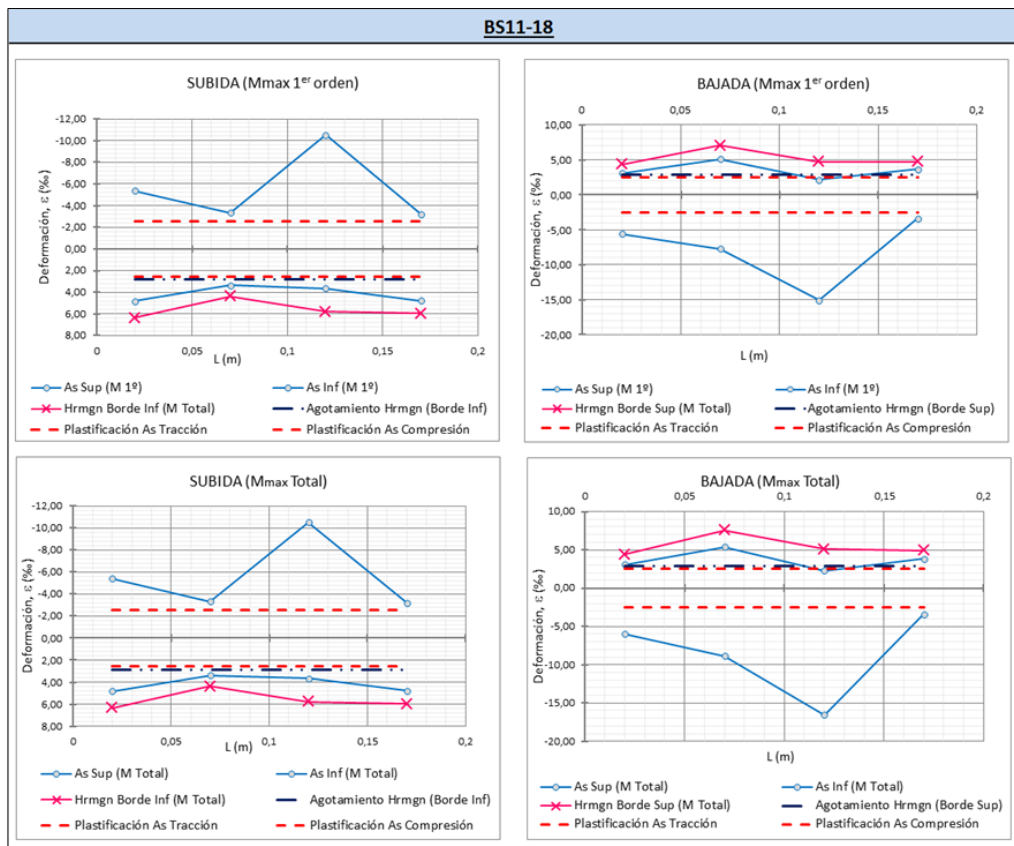
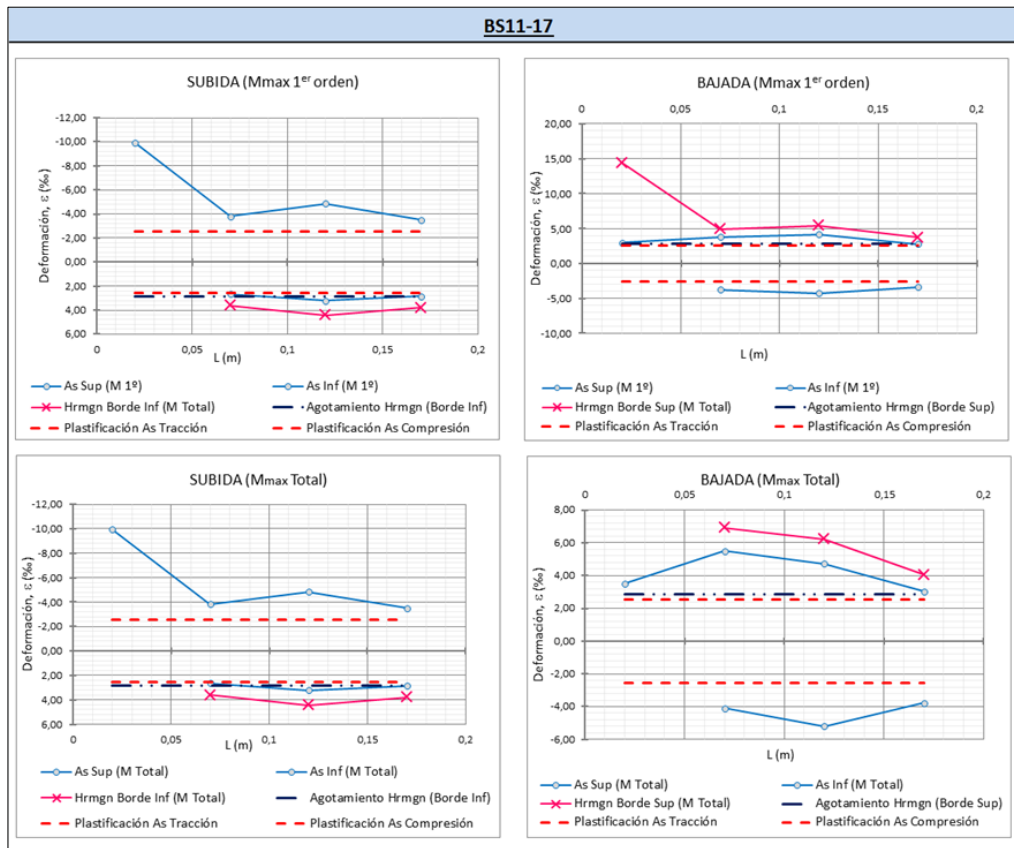


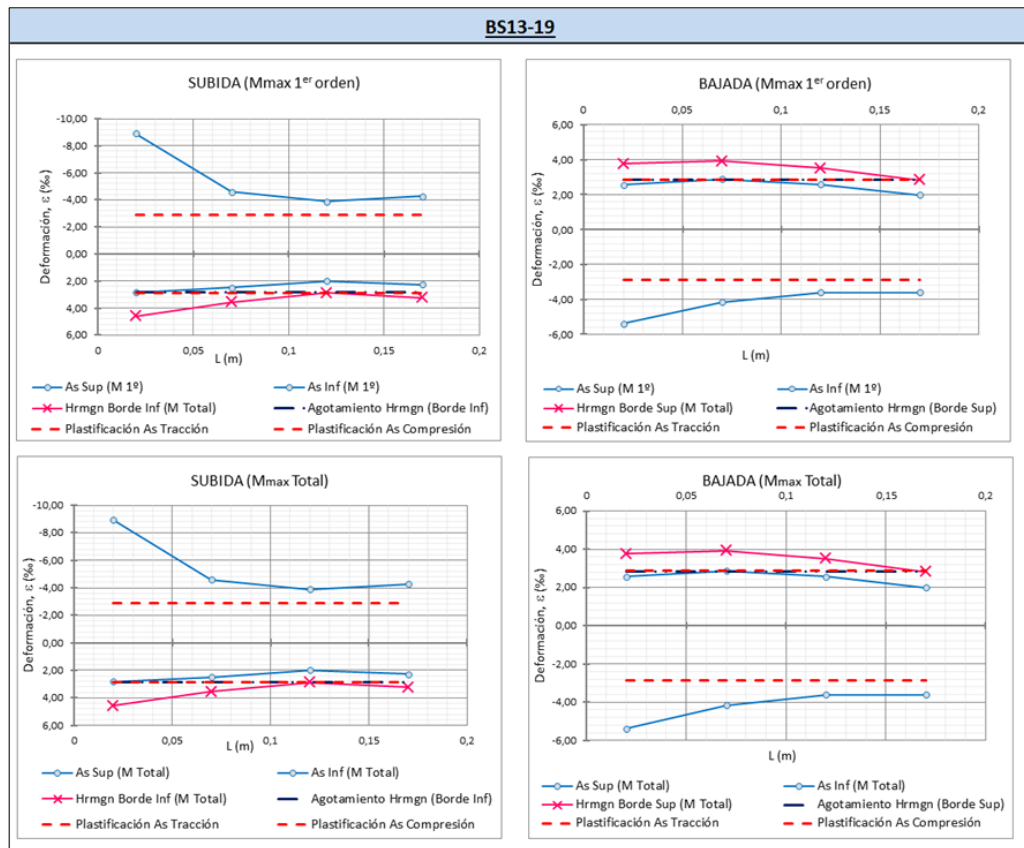
● **SERIE 3: Cuantía de la armadura longitudinal (Añadiendo AS11-1, AS11-22 y AS21-10)**



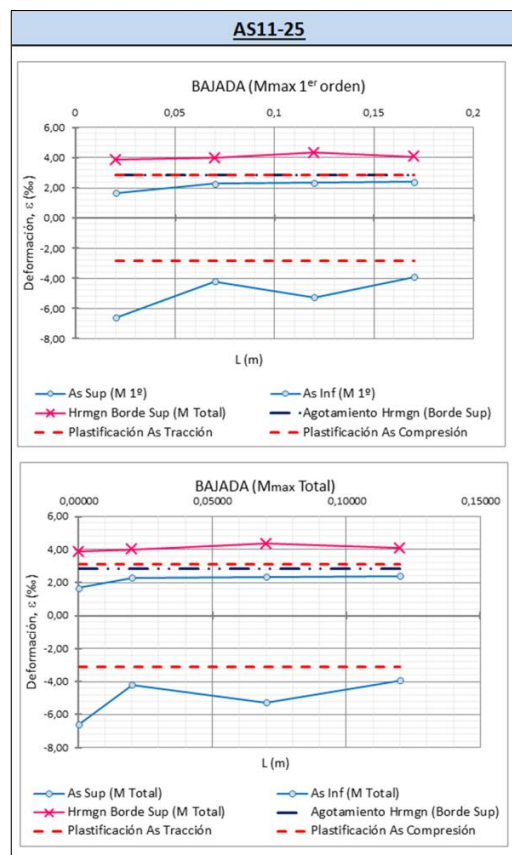


• **SERIE 4: Recubrimiento relativo (Añadiendo AS11-1, AS11-22 y AS13-16)**





- **SERIE 5: Tipo de carga (Añadiendo AS11-1 y AS11-22)**



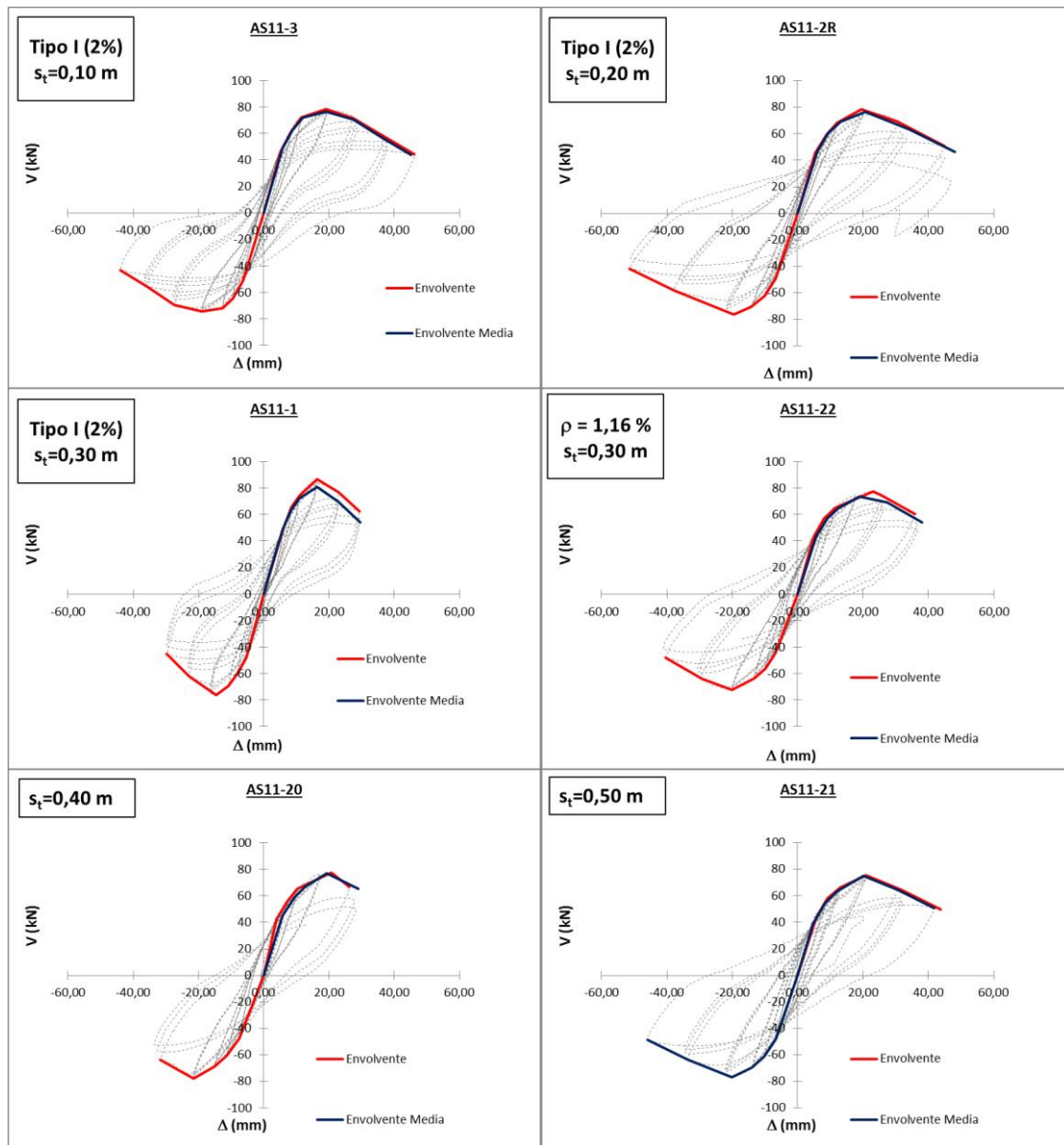
ANEJO E

Anejo E: Envolventes de los soportes

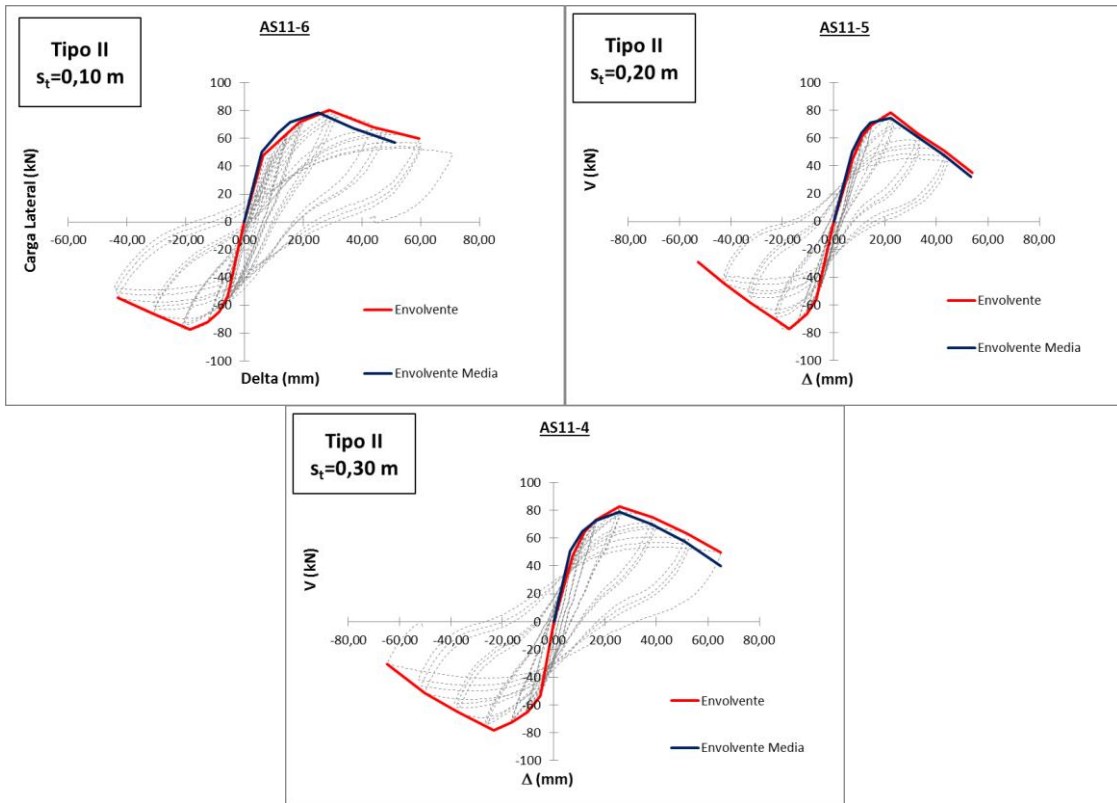
En este anejo se recopilan las gráficas de las envolventes de las curvas cortante-desplazamiento y momento-curvatura. Se divide en tres grandes apartados: envolventes experimentales, envolventes idealizadas según los métodos empleados y las envolventes obtenidas mediante un modelo teórico de referencia.

Envolventes de las curvas experimentales: cortante - *drift* y momento – curvatura

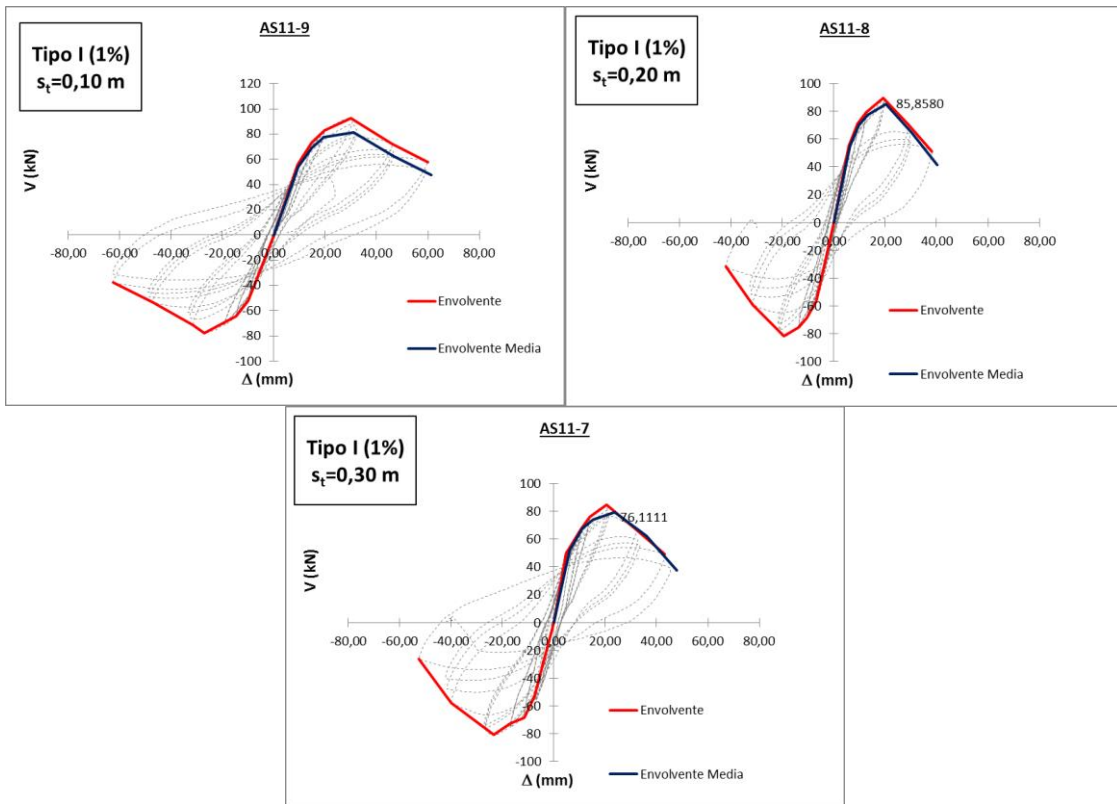
- ENVOLVENTES CORTANTE – DESPLAZAMIENTO
 - **SERIE 1: Separación de la armadura transversal**



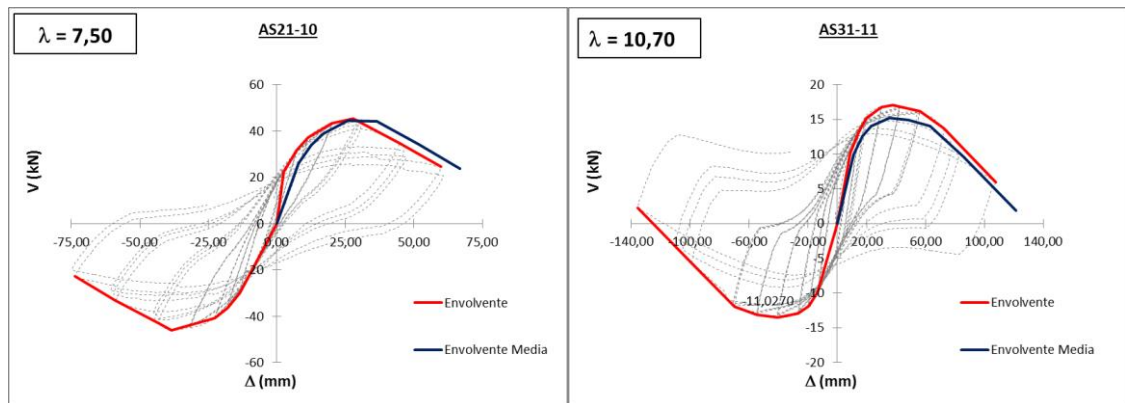
• **SERIE 1: Tipo de fibras** (Añadiendo AS11-3, AS11-2R, AS11-1 y AS11-22)



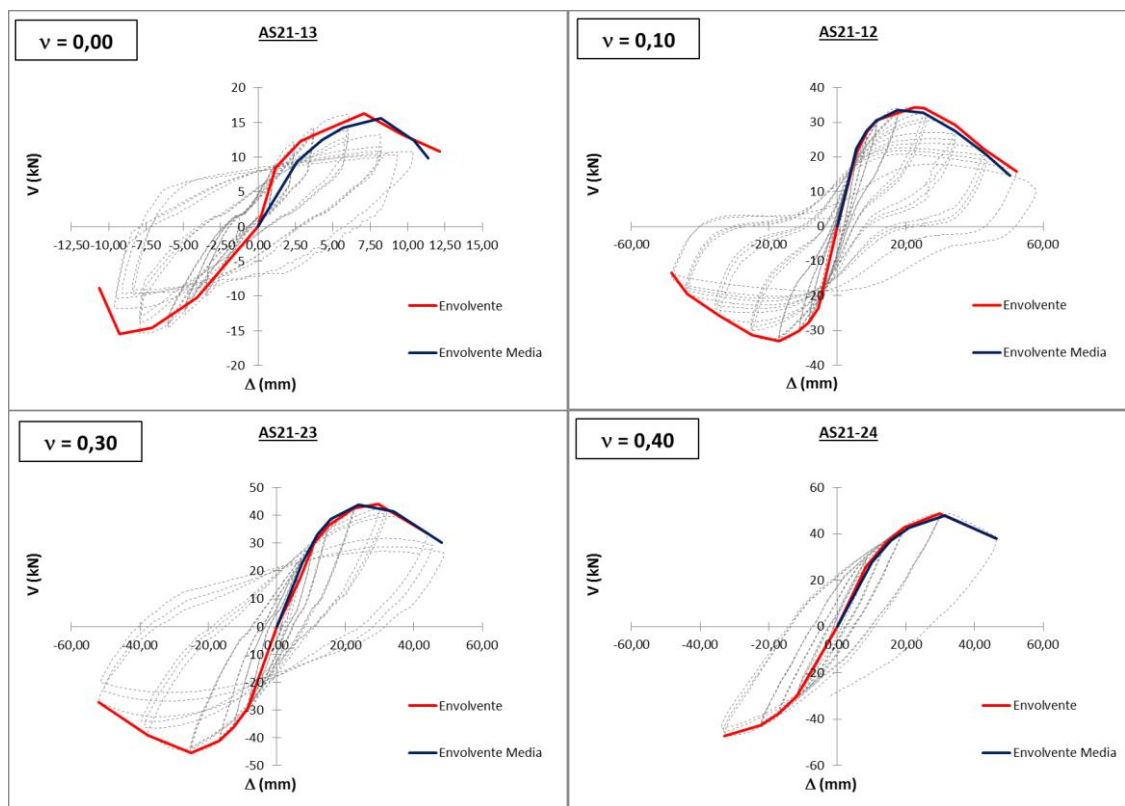
• **SERIE 1: Volumen de fibras** (Añadiendo AS11-3, AS11-2R, AS11-1 y AS11-22)



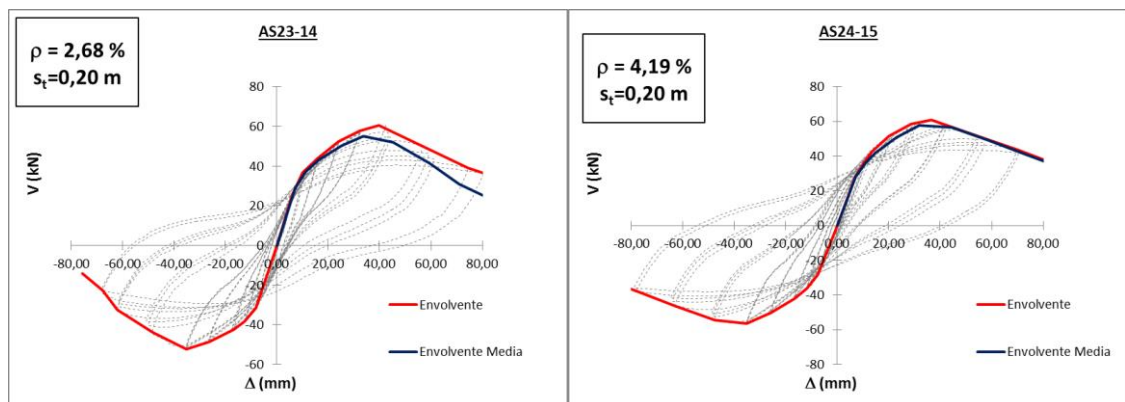
• **SERIE 2: Esbeltez (Añadiendo AS11-2R)**

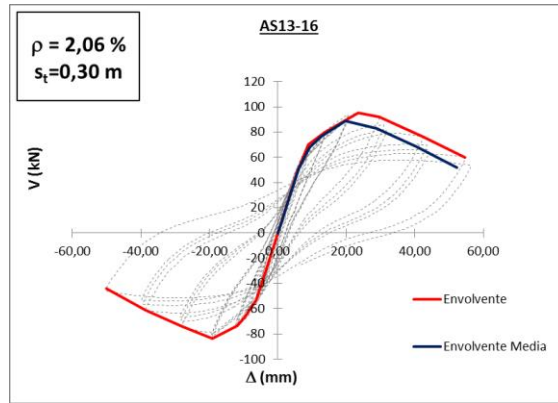


• **SERIE 2: Nivel de axil (Añadiendo AS21-10)**

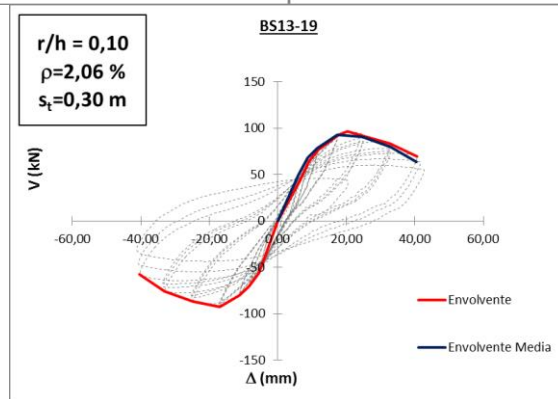
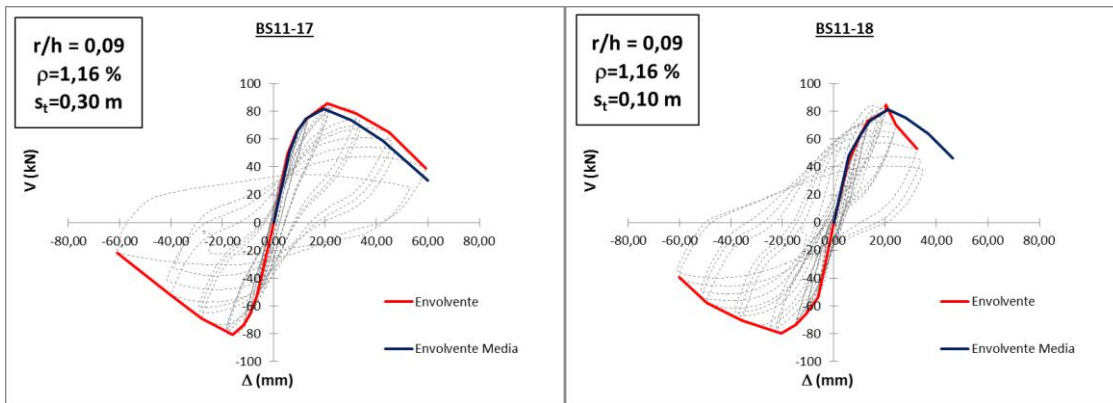


• **SERIE 3: Cuantía de la armadura longitudinal (Añadiendo AS11-1, AS11-22 y AS21-10)**

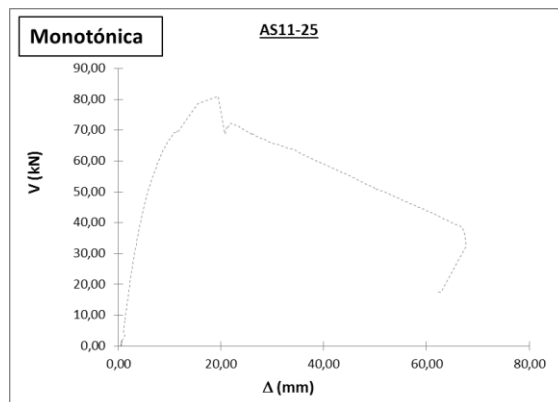




- **SERIE 4: Recubrimiento relativo (Añadiendo AS11-1, AS11-22 y AS13-16)**

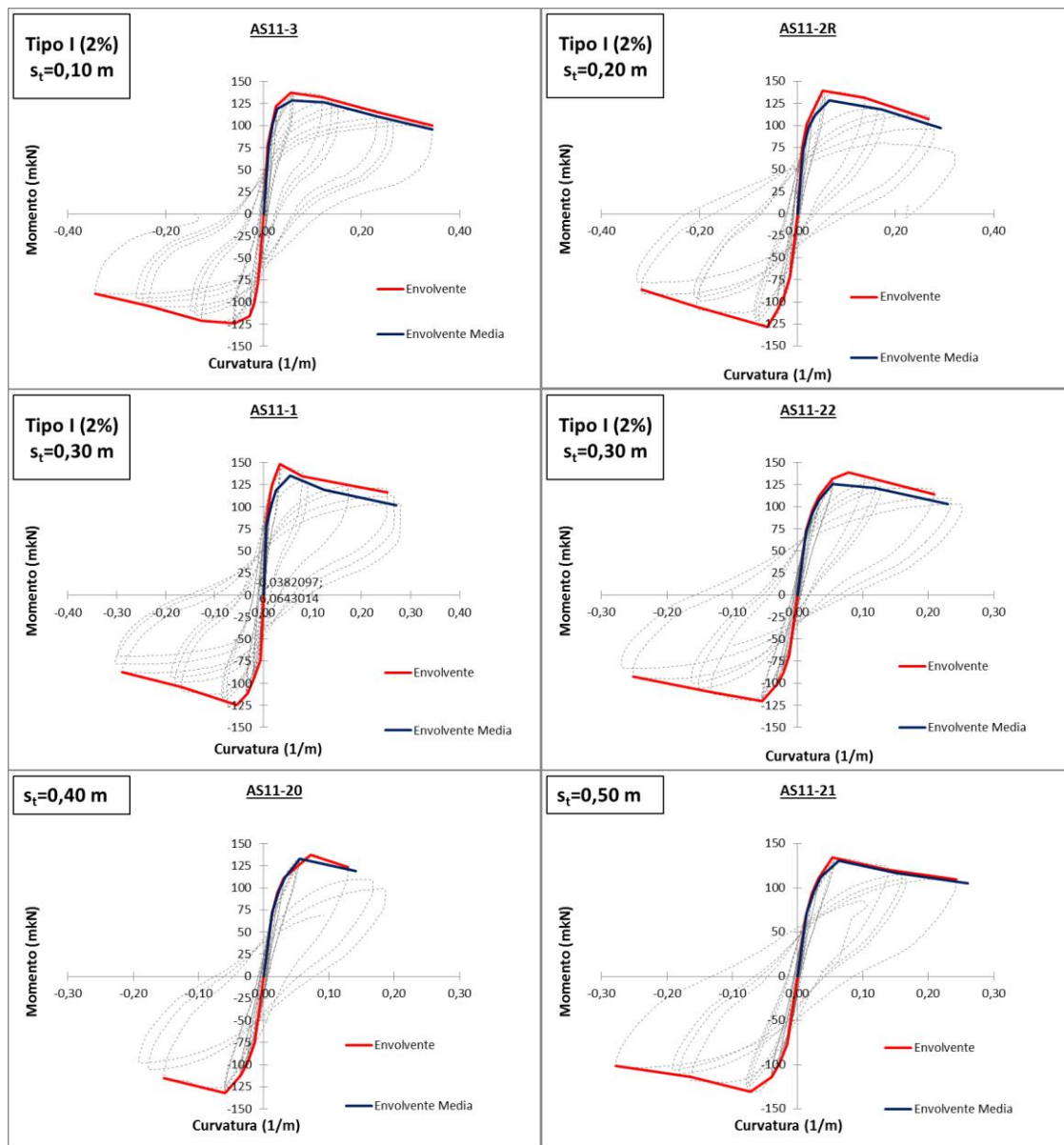


- **SERIE 5: Tipo de carga (Añadiendo AS11-1 y AS11-22)**

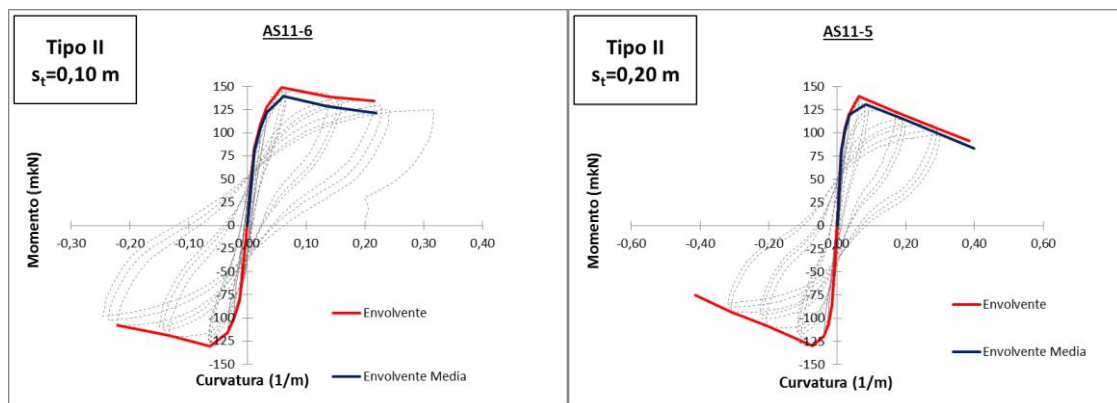


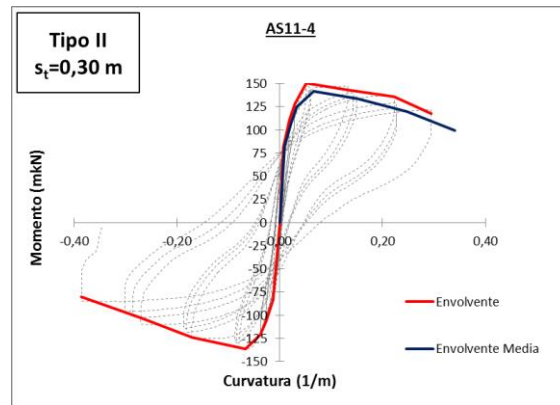
• ENVOLVENTES MOMENTO – CURVATURA

• SERIE 1: Separación de la armadura transversal

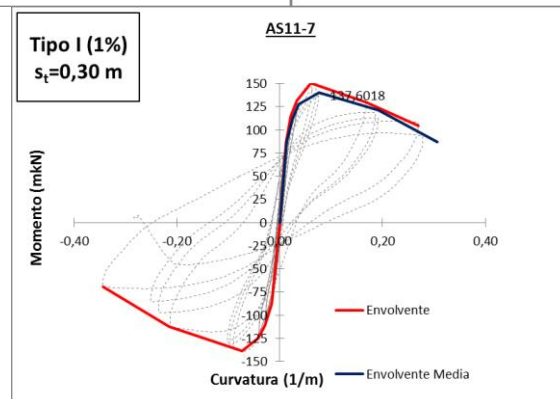
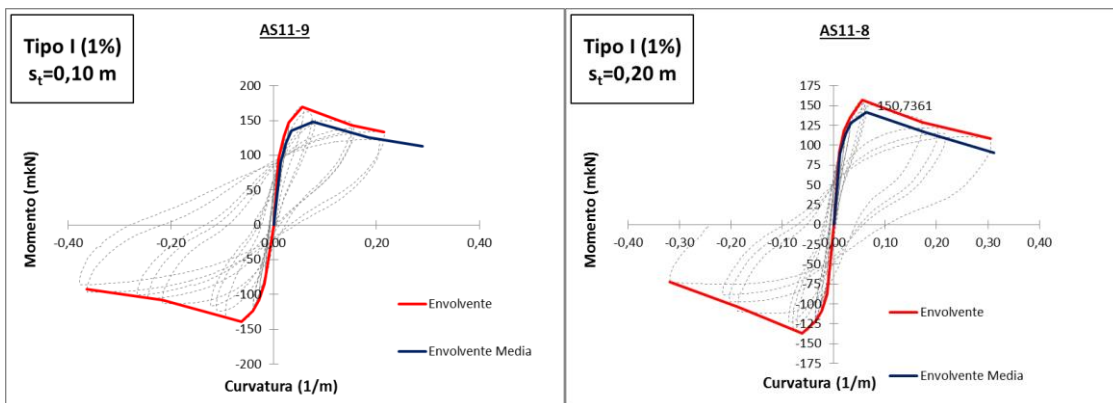


• SERIE 1: Tipo de fibras (Añadiendo AS11-3, AS11-2R, AS11-1 y AS11-22)

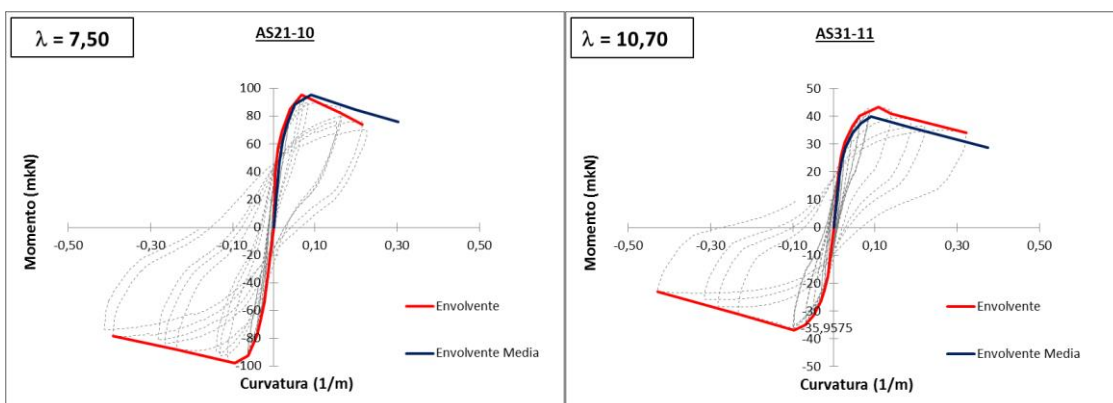




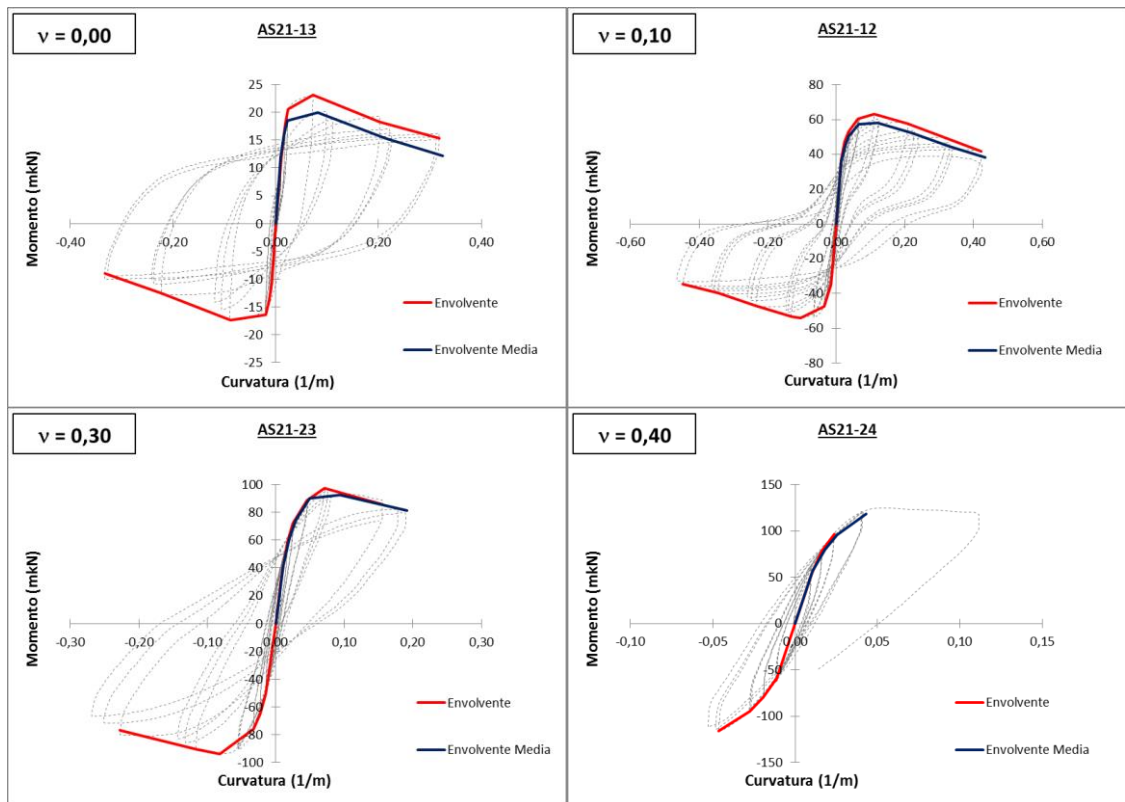
- **SERIE 1: Volumen de fibras** (Añadiendo AS11-3, AS11-2R, AS11-1 y AS11-22)



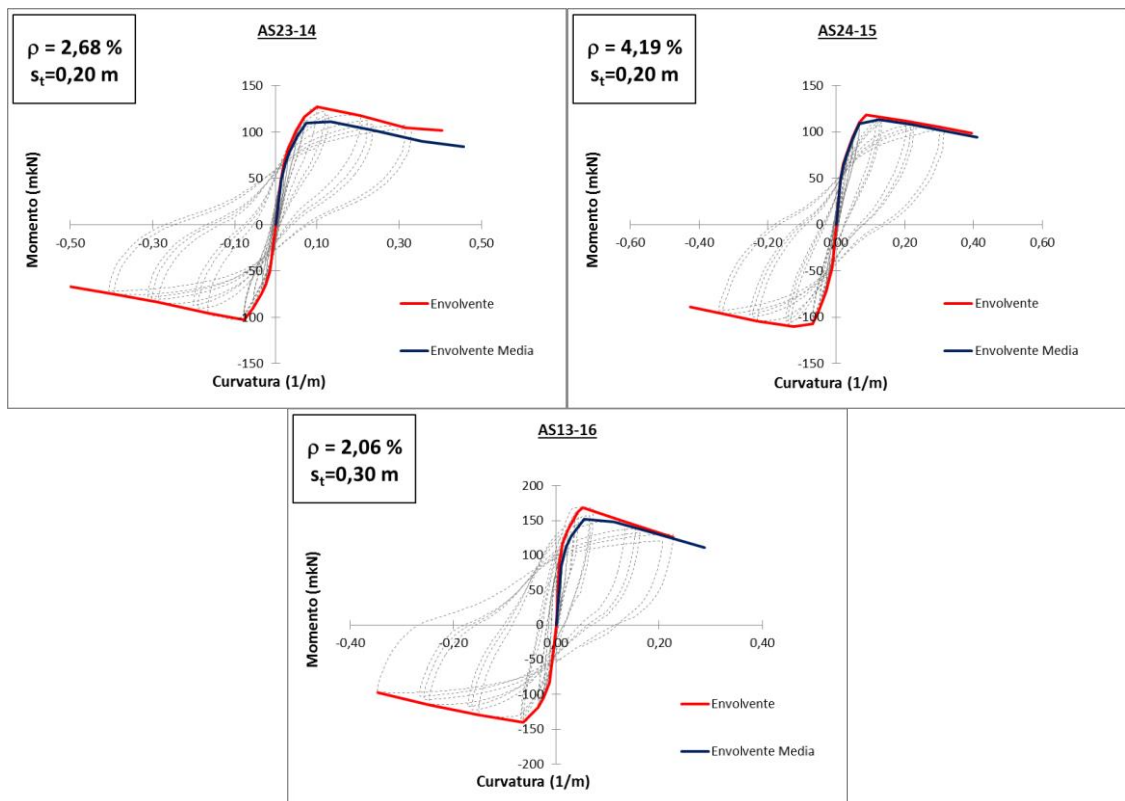
- **SERIE 2: Esbeltez** (Añadiendo AS11-2R)



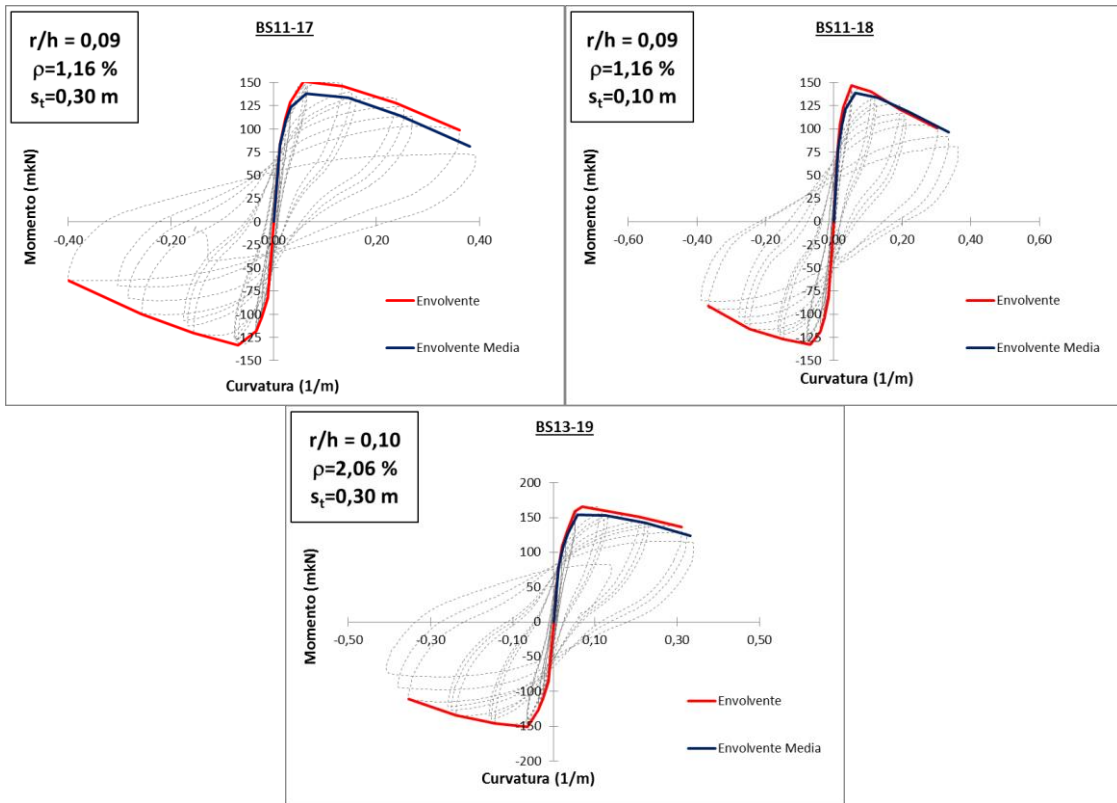
• **SERIE 2: Nivel de axil (Añadiendo AS21-10)**



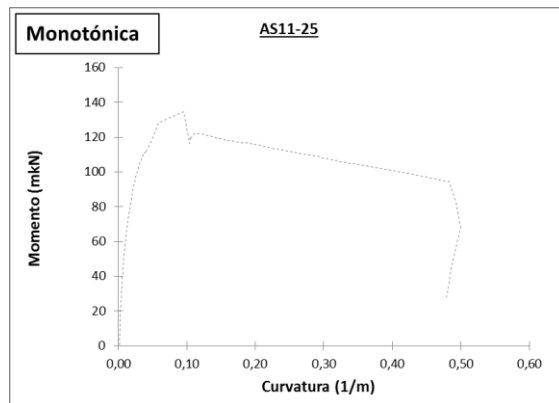
• **SERIE 3: Cuantía de la armadura longitudinal (Añadiendo AS11-1, AS11-22 y AS21-10)**



- SERIE 4: Recubrimiento relativo (Añadiendo AS11-1, AS11-22 y AS13-16)**



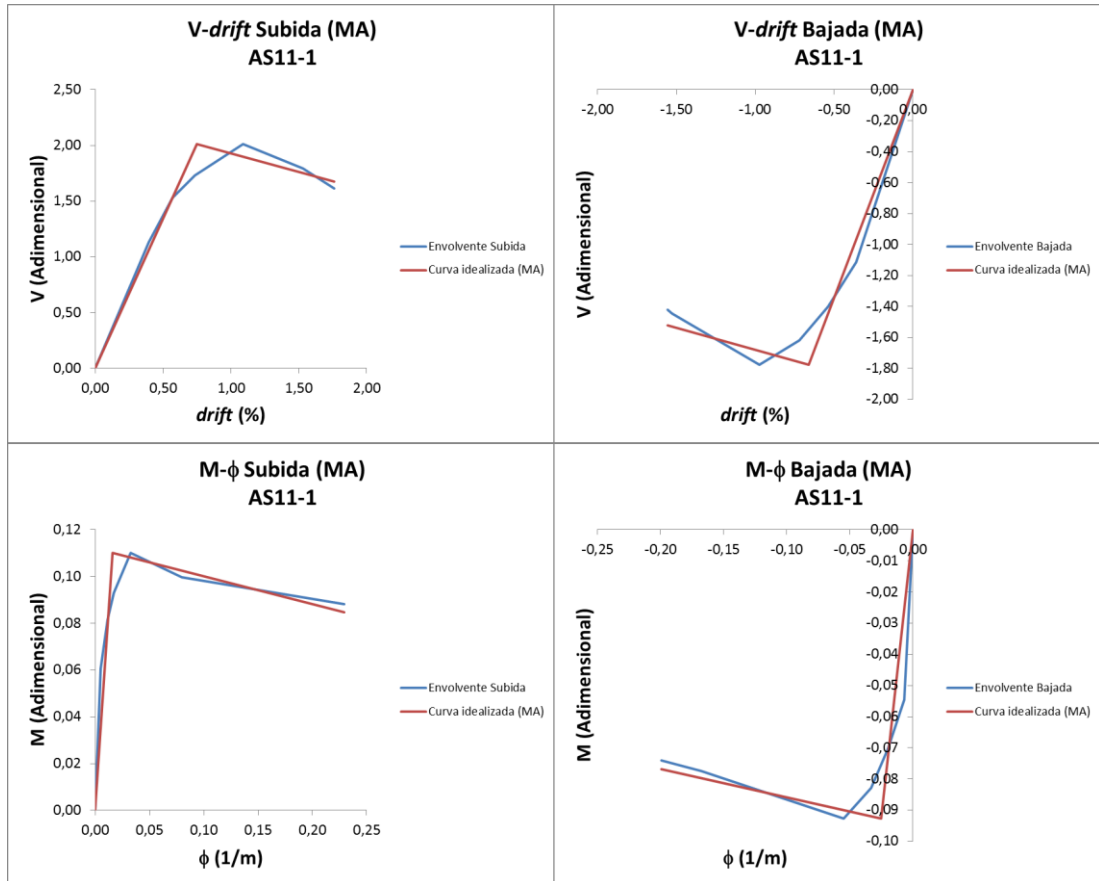
- SERIE 5: Tipo de carga (Añadiendo AS11-1 y AS11-22)**



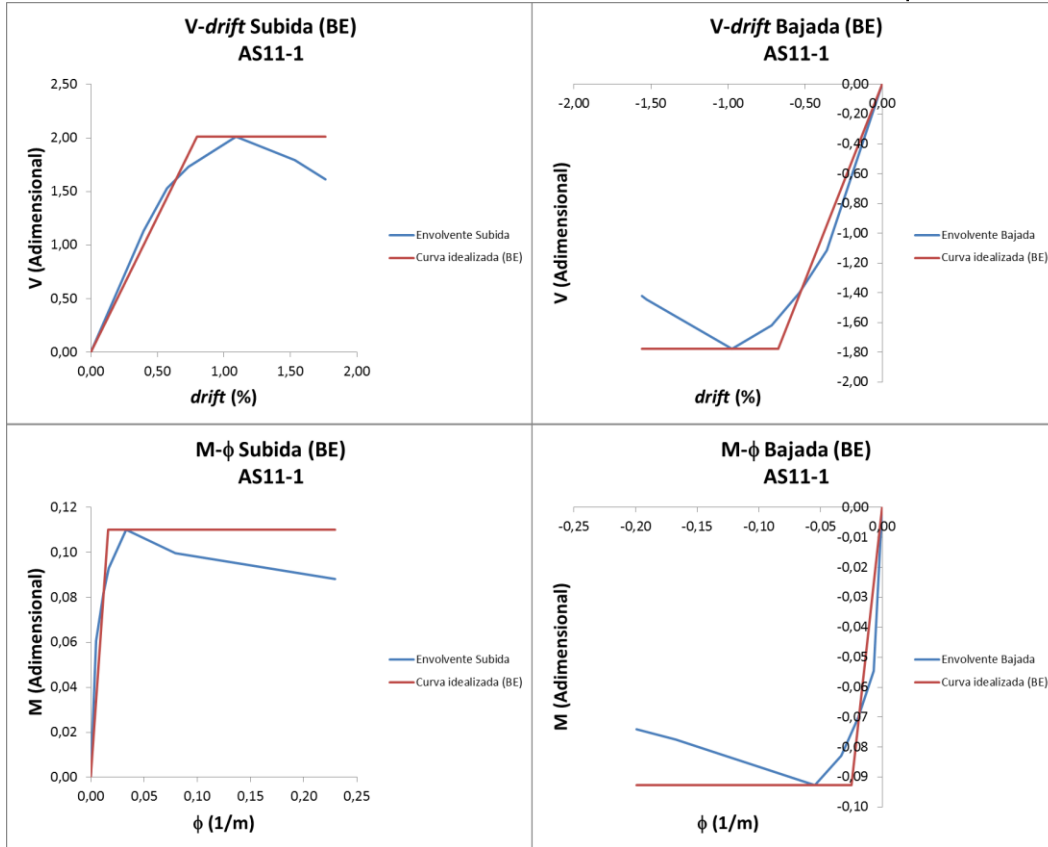
Envolventes de las curvas idealizadas: cortante - drift y momento – curvatura.

SERIE 1

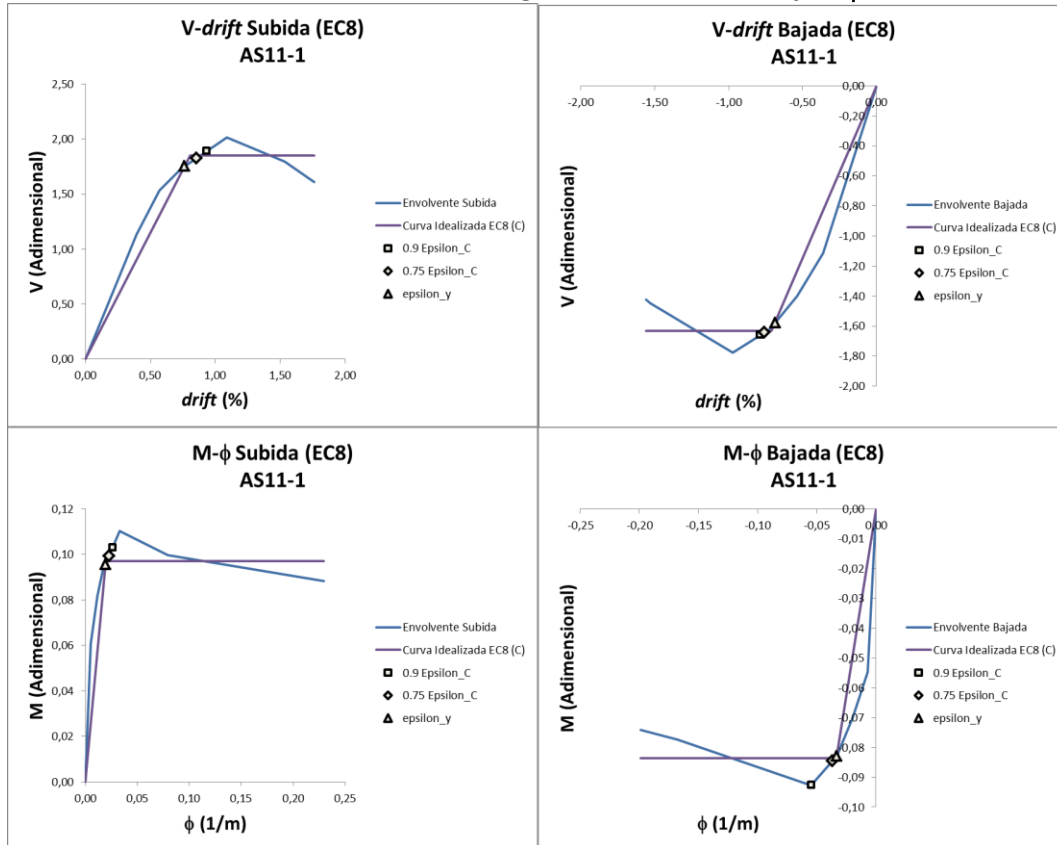
AS11-1 Método Aproximado. Envolventes V- Δ y M- ϕ



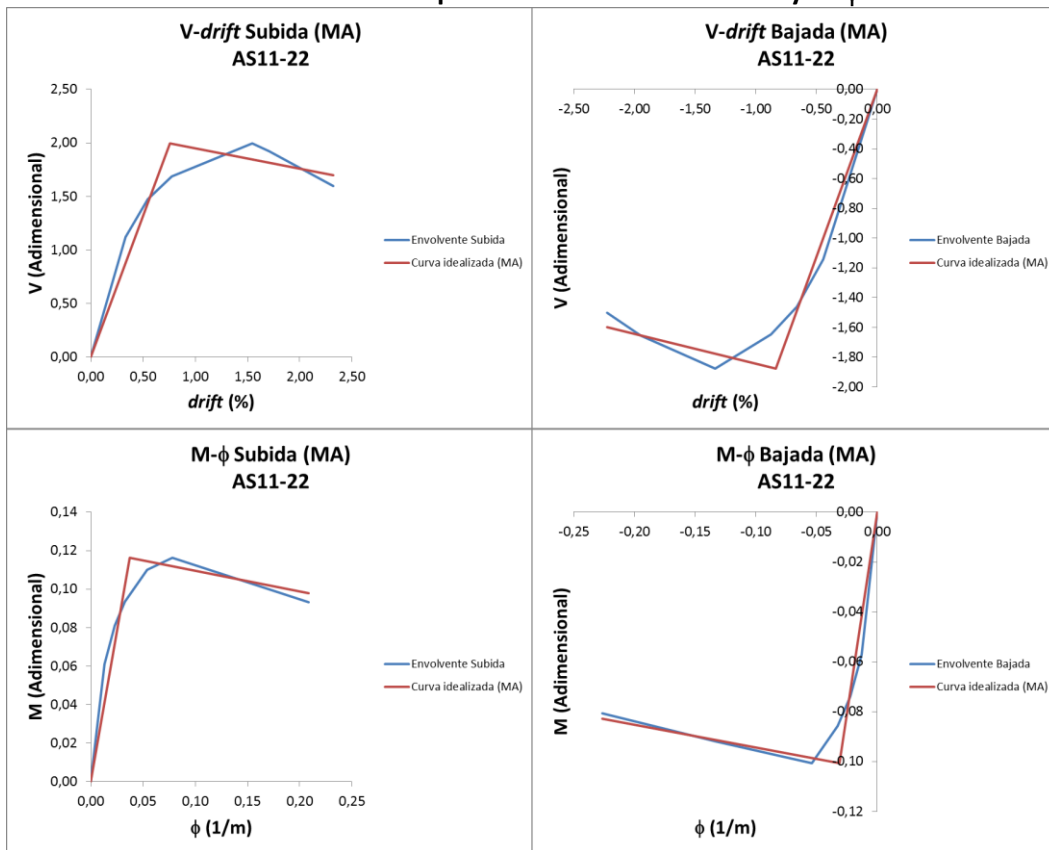
AS11-1 Método del Balance de Energía. Envoltentes V- Δ y M- ϕ



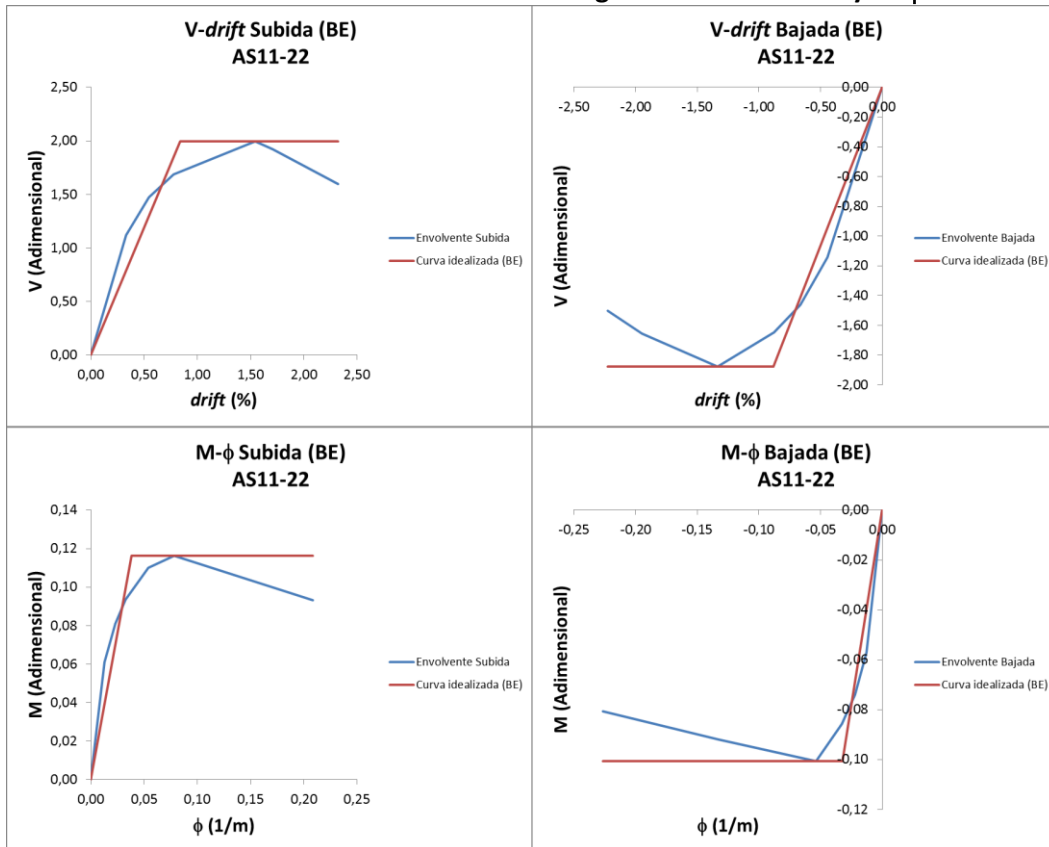
AS11-1 Método Eurocódigo 8. Envoltentes V- Δ y M- ϕ



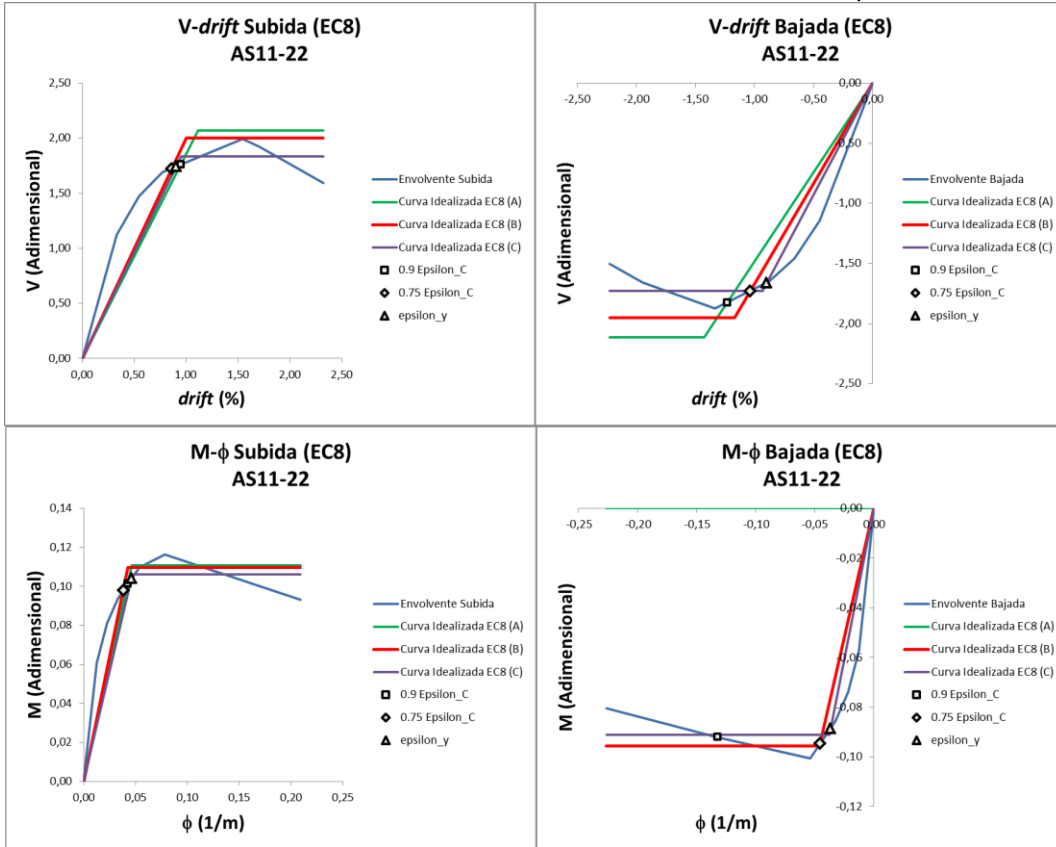
AS11-22 Método Aproximado. Envolventes $V-\Delta$ y $M-\phi$



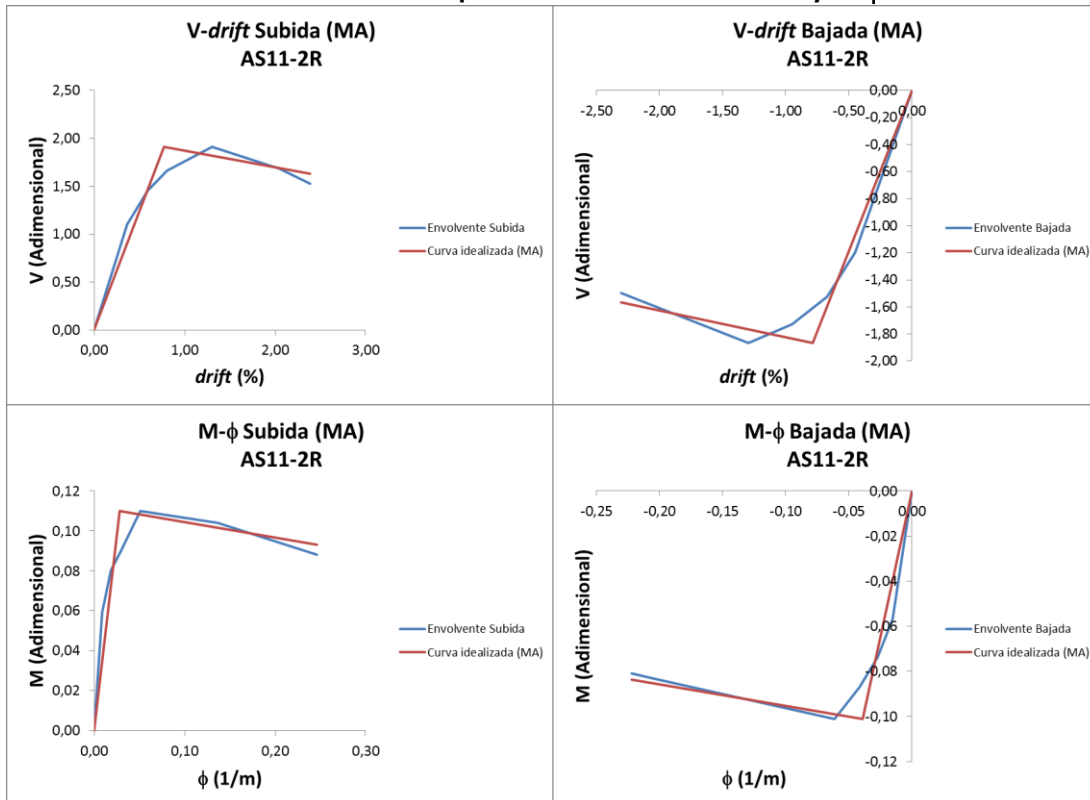
AS11-22 Método del Balance de Energía. Envolventes $V-\Delta$ y $M-\phi$



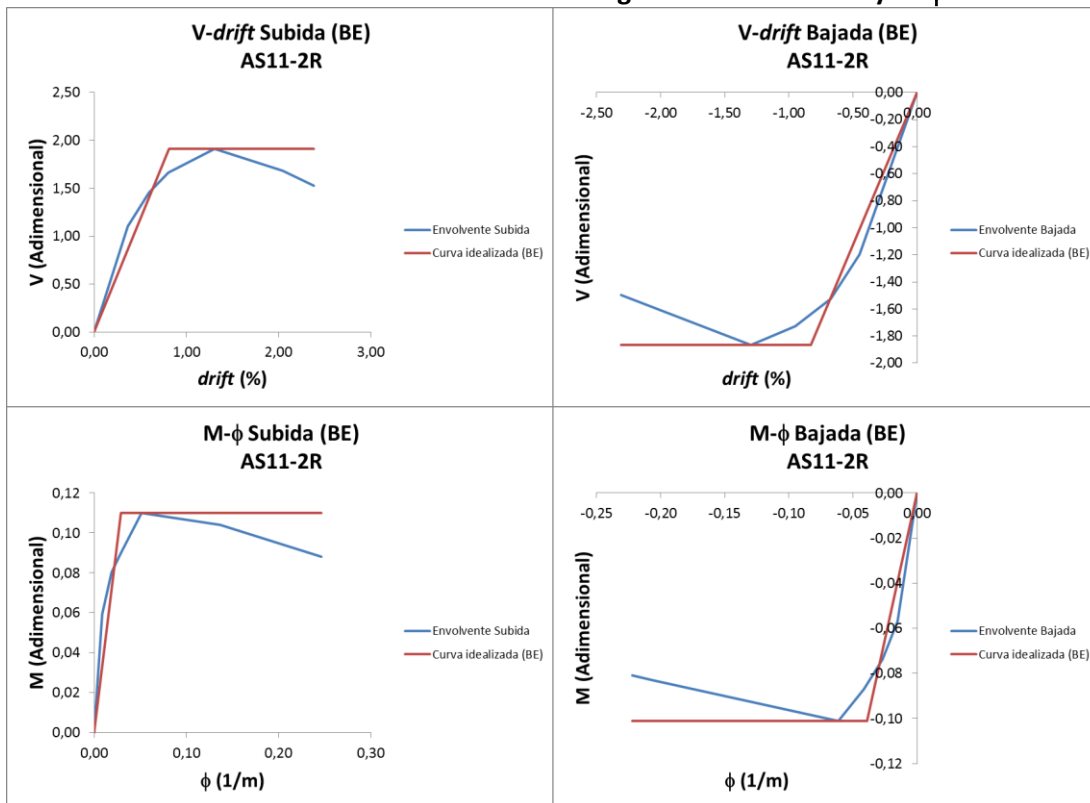
AS11-22 Método Eurocódigo 8. Envoltentes V- Δ y M- ϕ



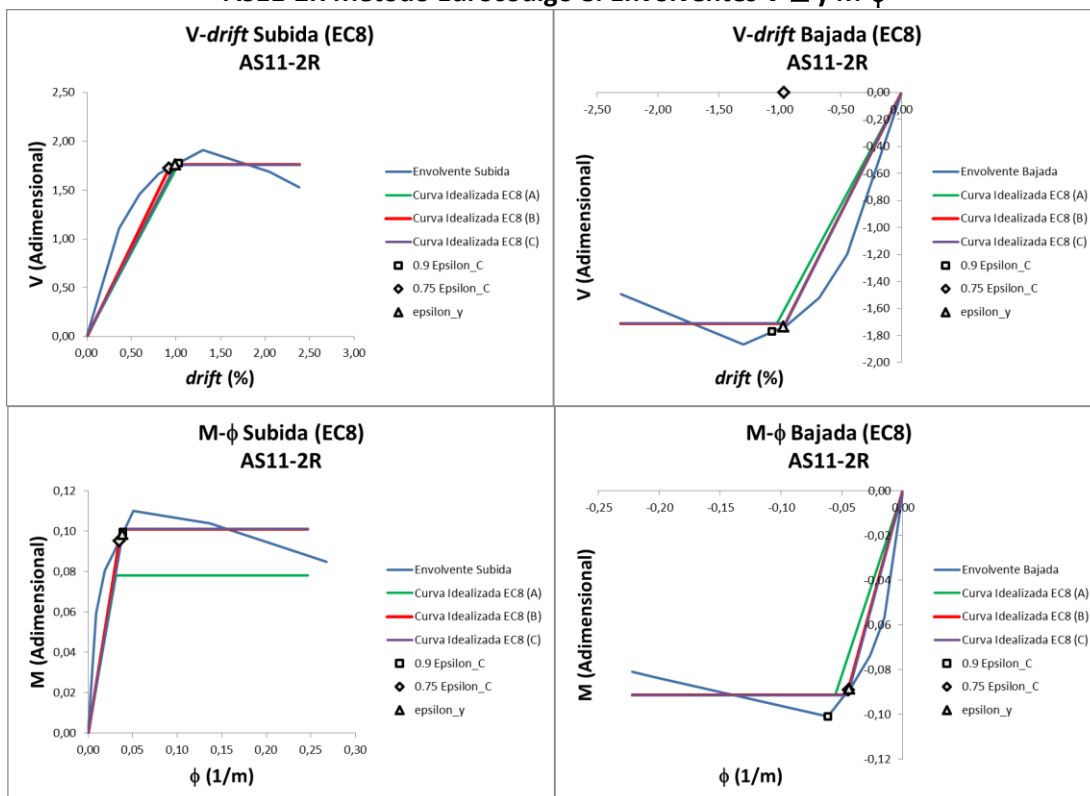
AS11-2R Método Aproximado. Envoltentes V- Δ y M- ϕ



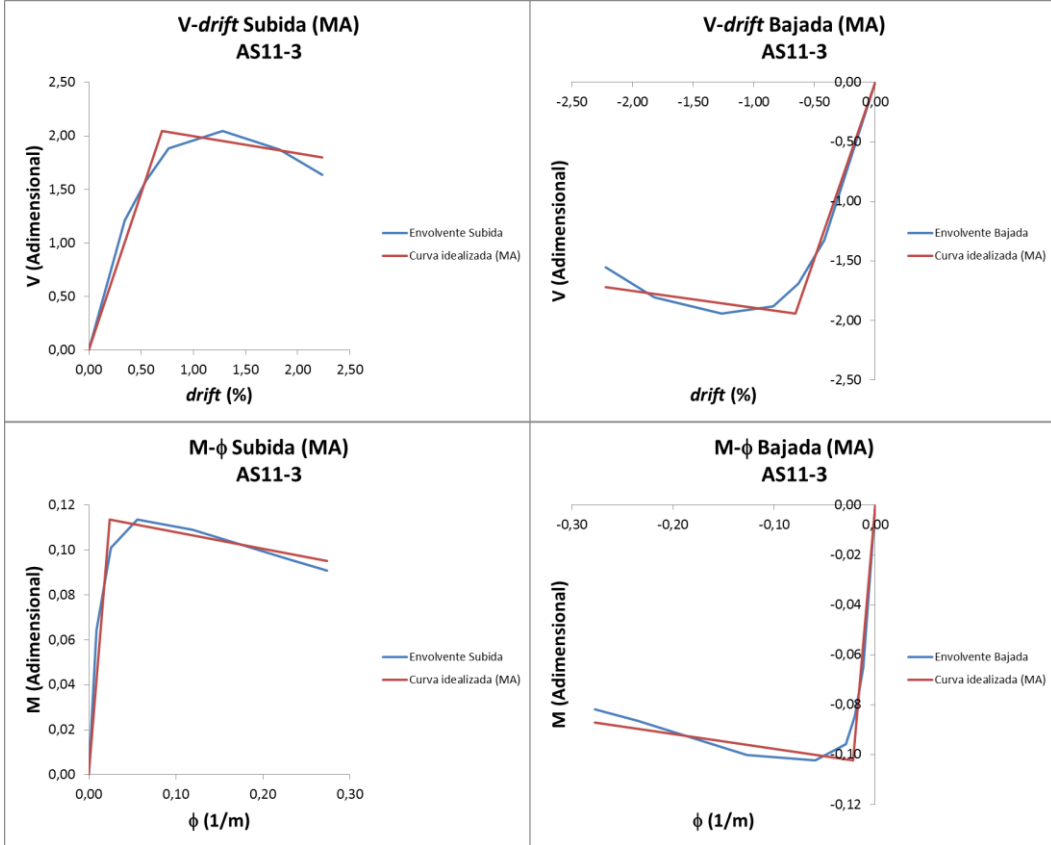
AS11-2R Método del Balance de Energía. Envolventes V- Δ y M- ϕ



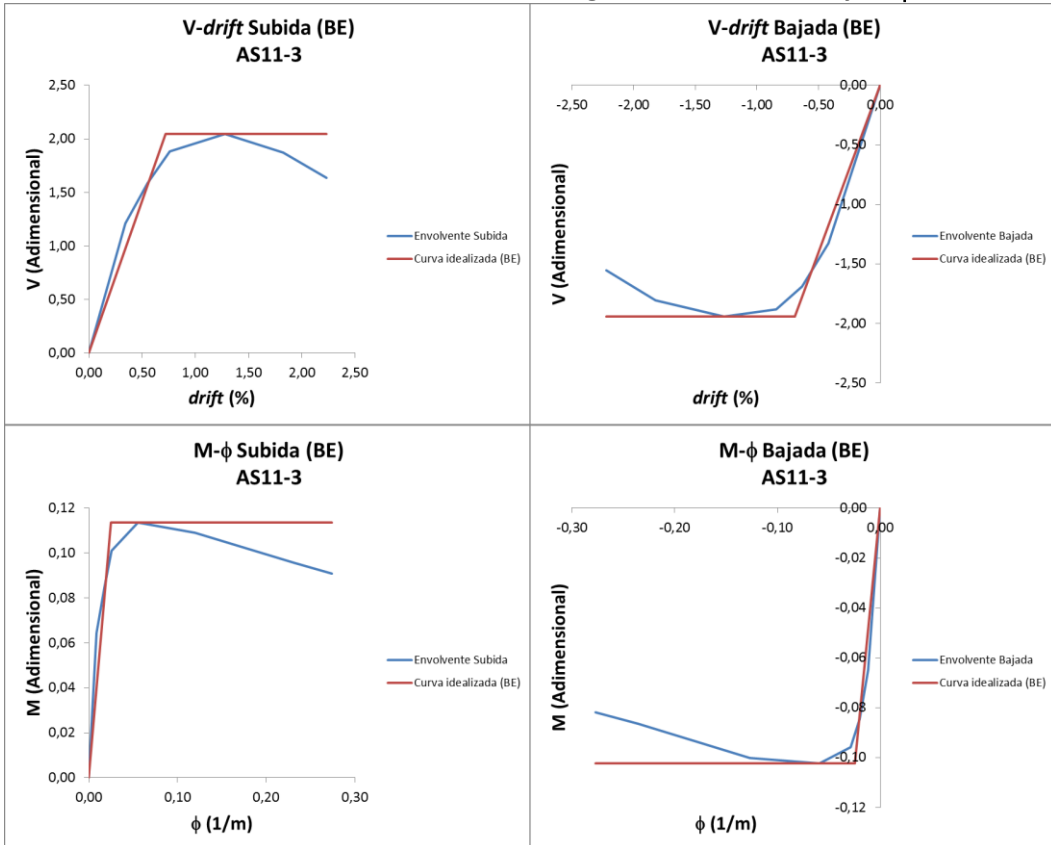
AS11-2R Método Eurocódigo 8. Envolventes V- Δ y M- ϕ



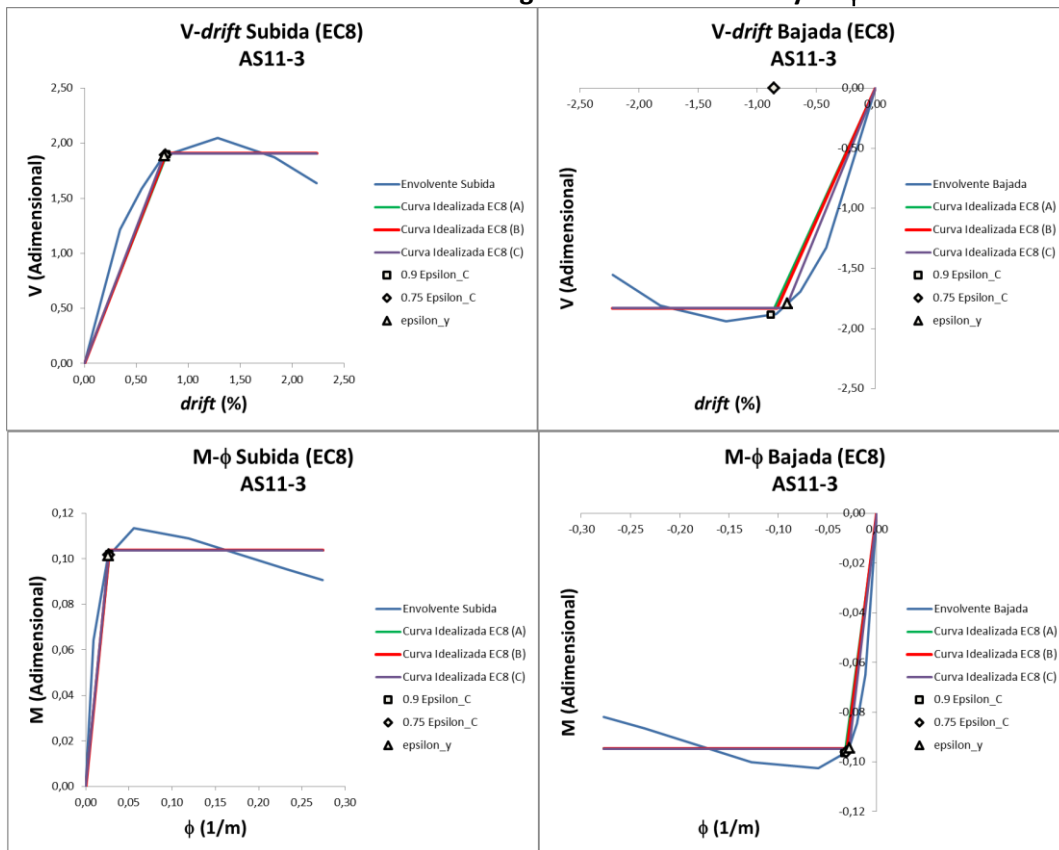
AS11-3 Método Aproximado. Envoltentes $V-\Delta$ y $M-\phi$



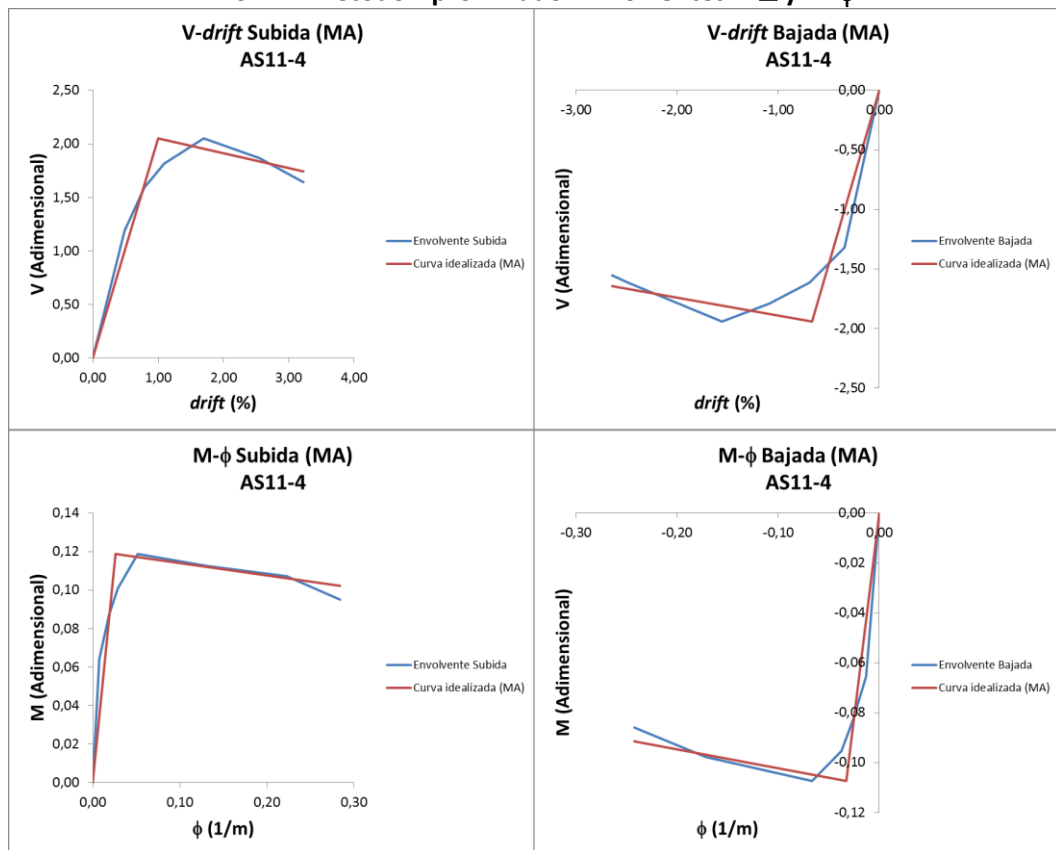
AS11-3 Método del Balance de Energía. Envoltentes $V-\Delta$ y $M-\phi$



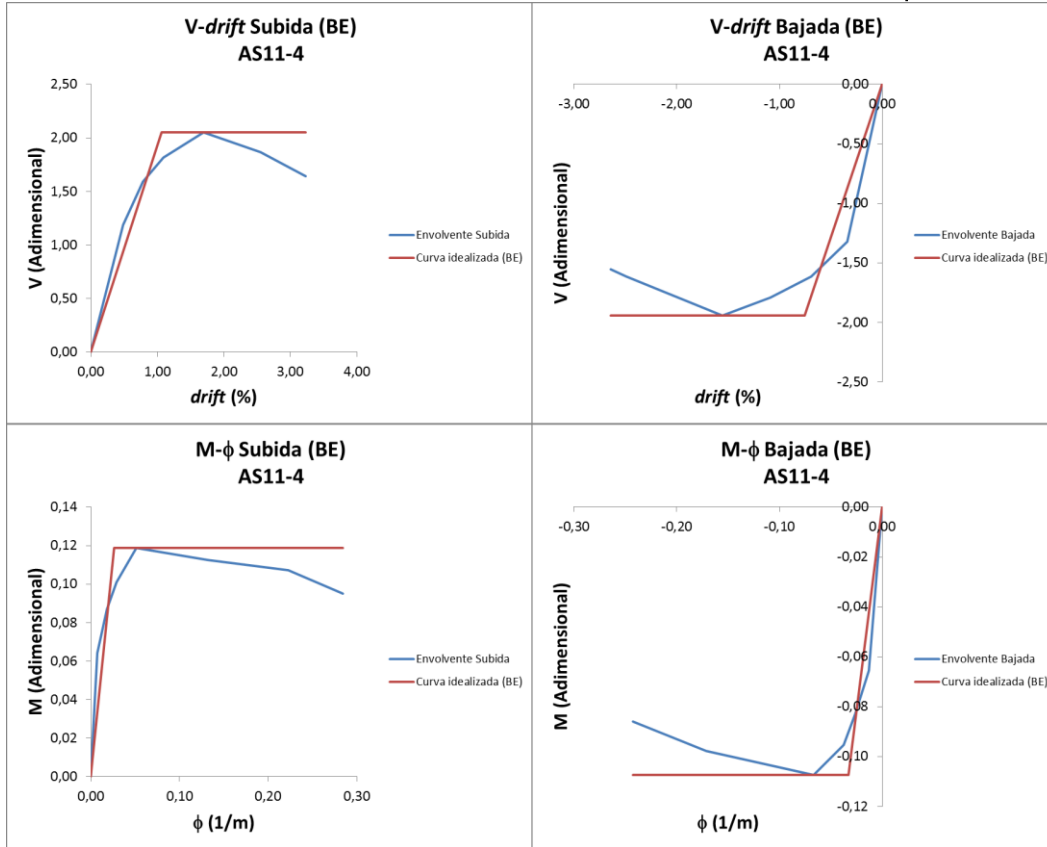
AS11-3 Método Eurocódigo 8. Envolventes V- Δ y M- ϕ



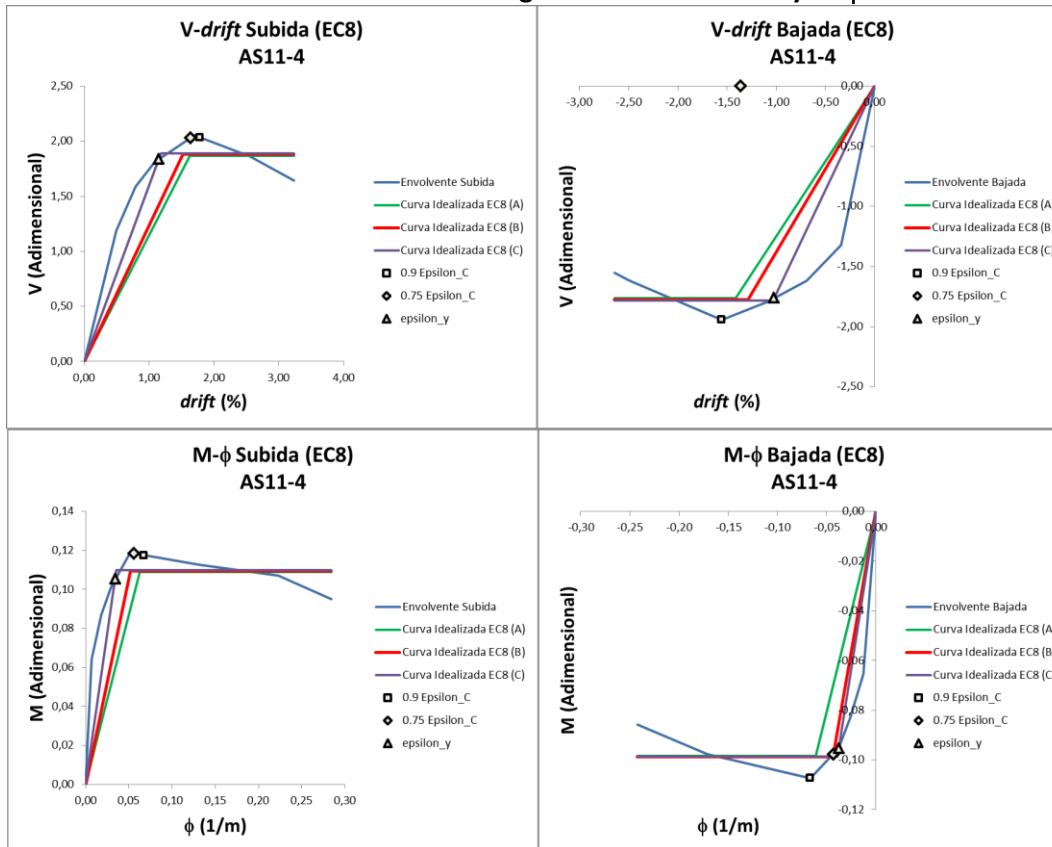
AS11-4 Método Aproximado. Envolventes V- Δ y M- ϕ



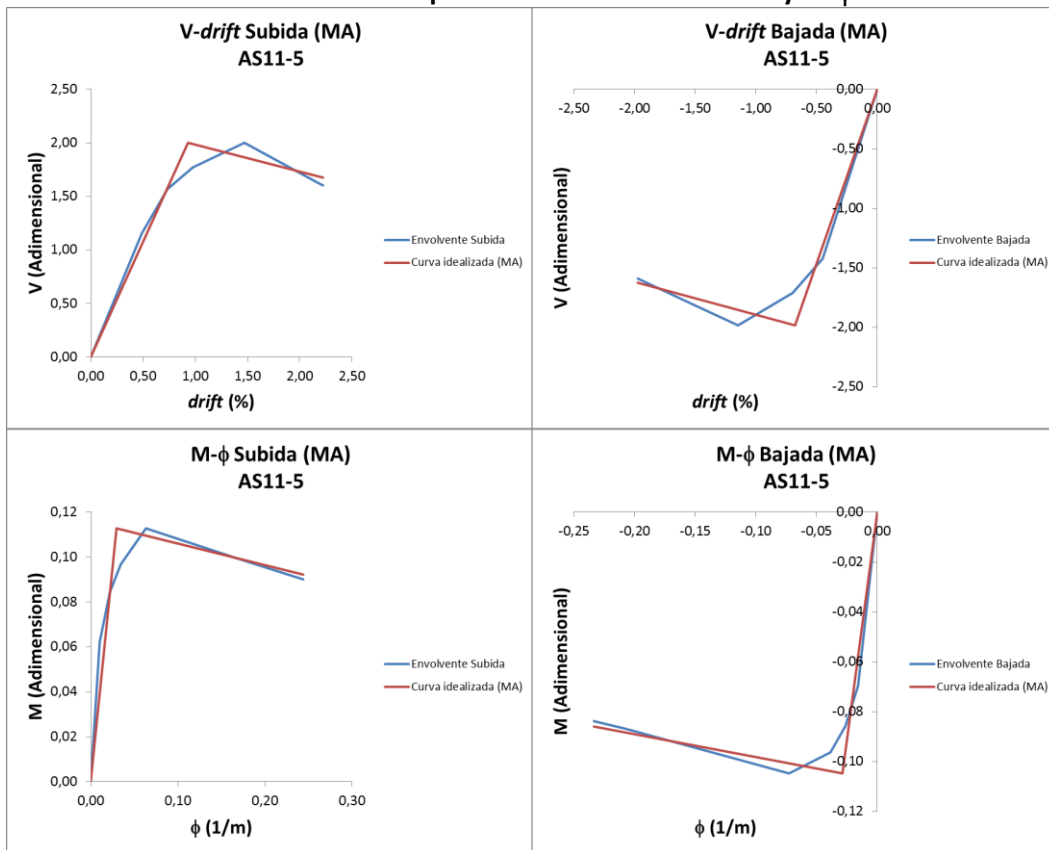
AS11-4 Método del Balance de Energía. Envoltentes V- Δ y M- ϕ



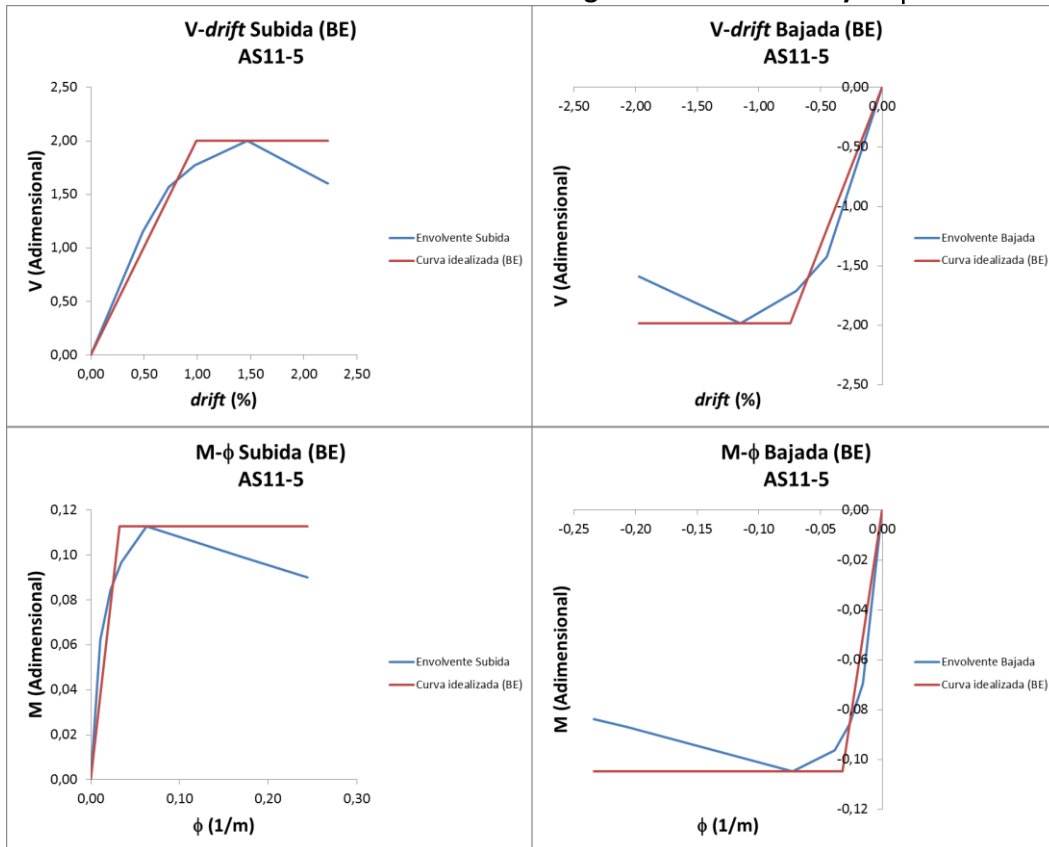
AS11-4 Método Eurocódigo 8. Envoltentes V- Δ y M- ϕ



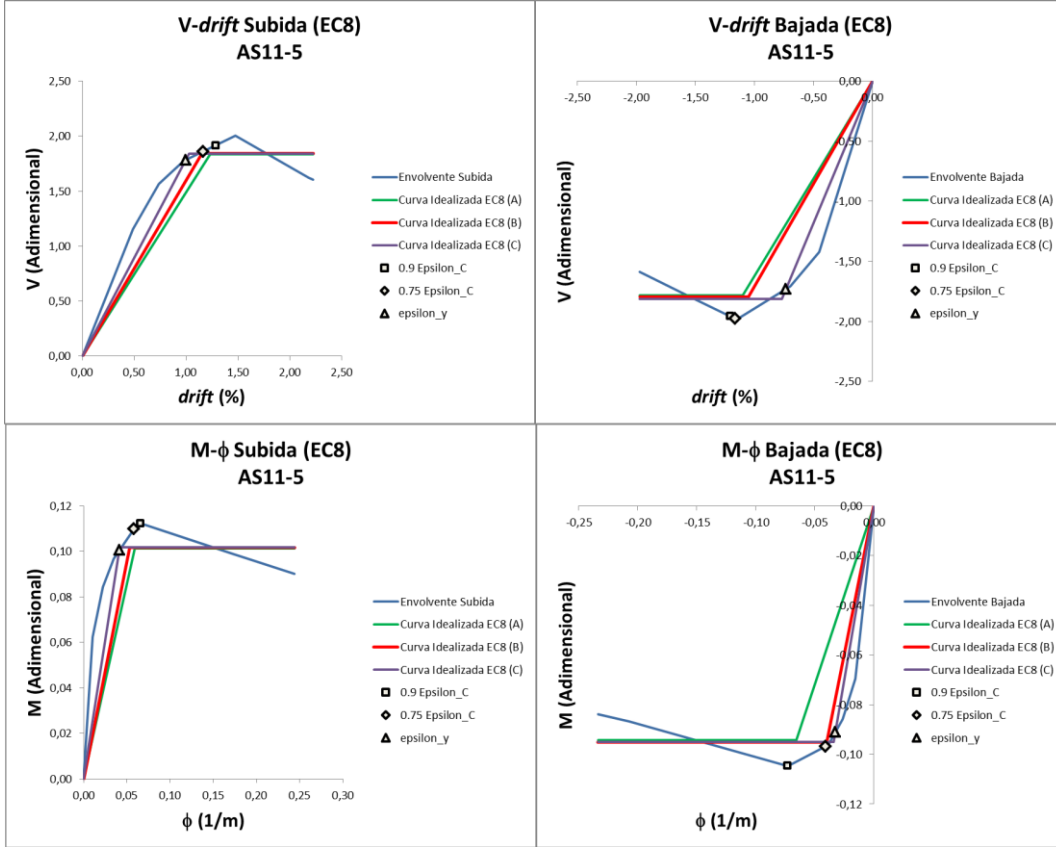
AS11-5 Método Aproximado. Envolventes V- Δ y M- ϕ



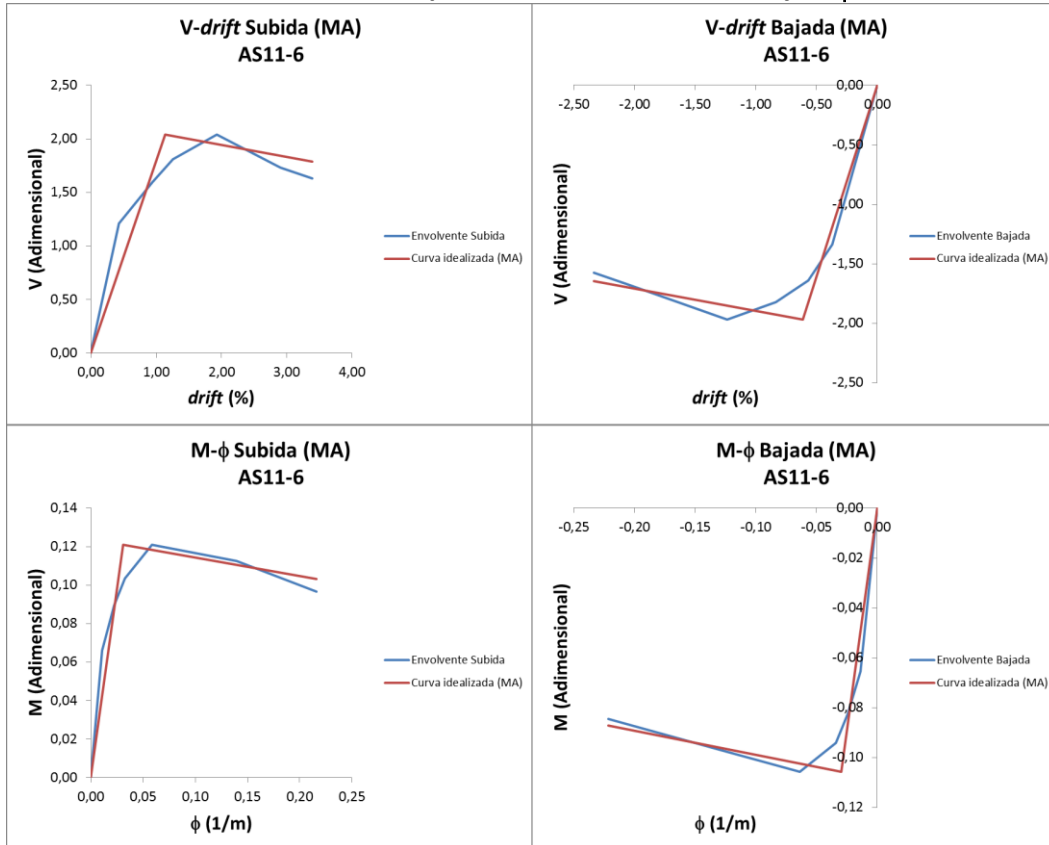
AS11-5 Método del Balance de Energía. Envolventes V- Δ y M- ϕ



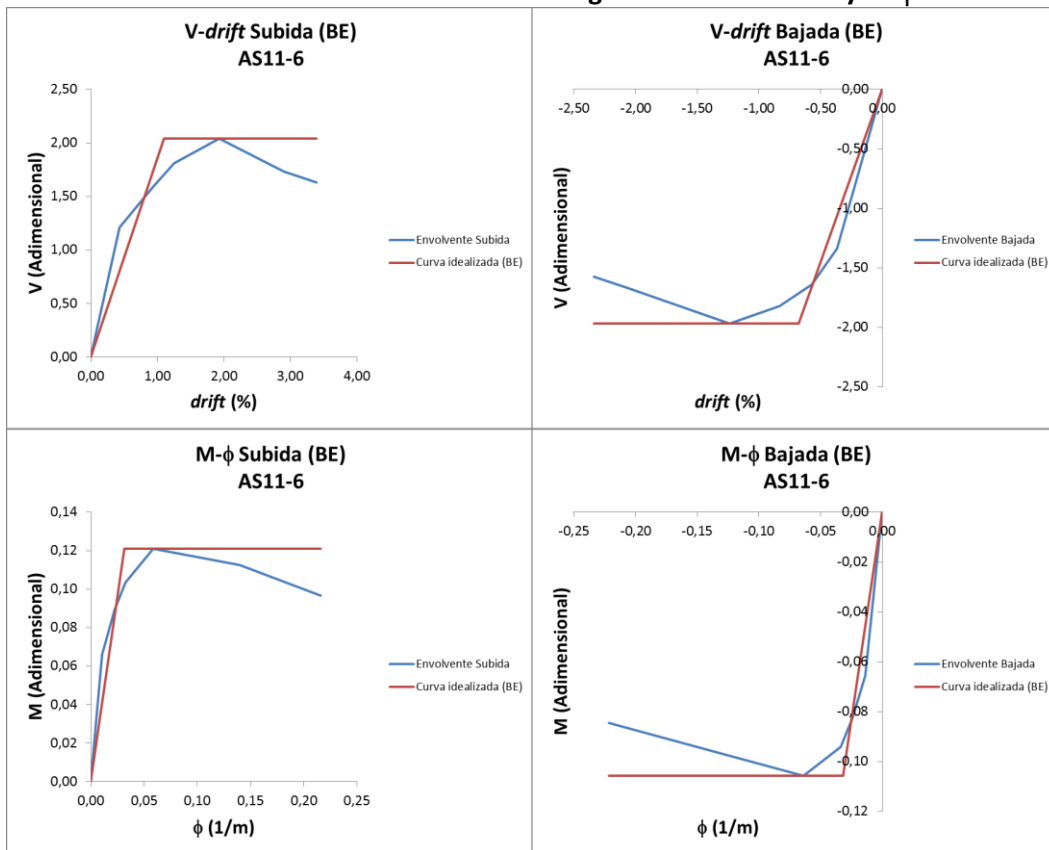
AS11-5 Método Eurocódigo 8. Envoltentes V- Δ y M- ϕ



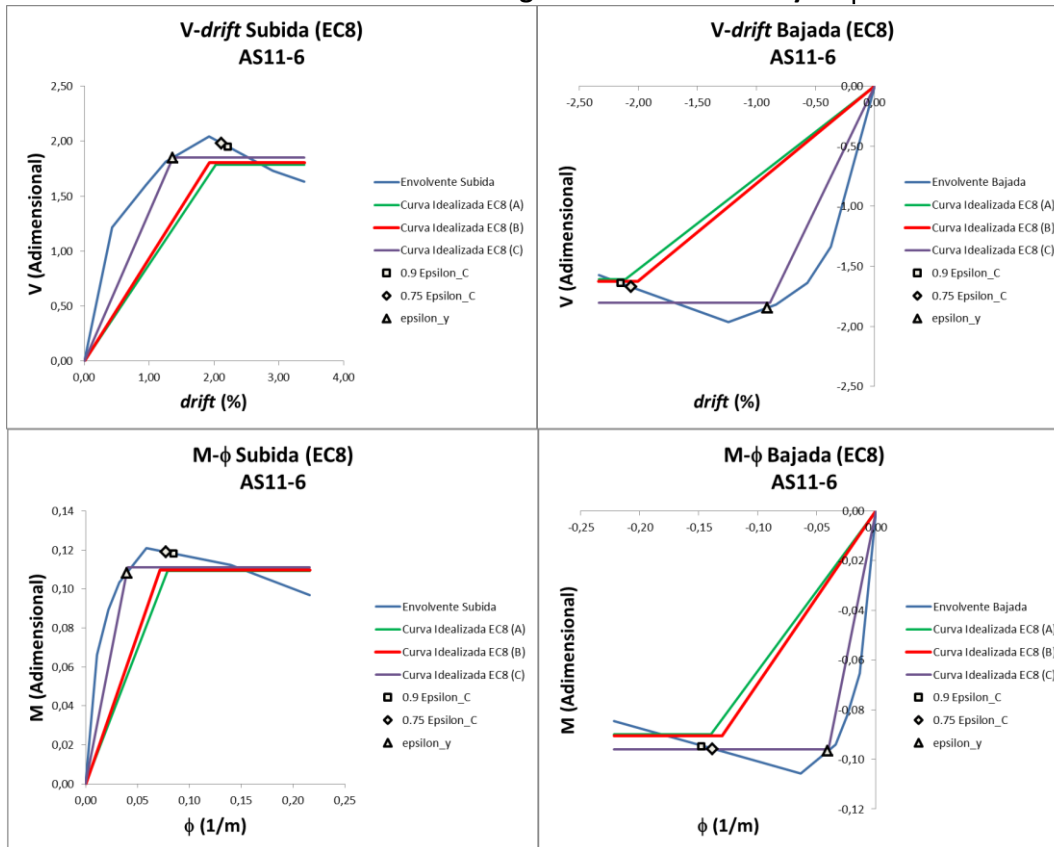
AS11-6 Método Aproximado. Envoltentes V- Δ y M- ϕ



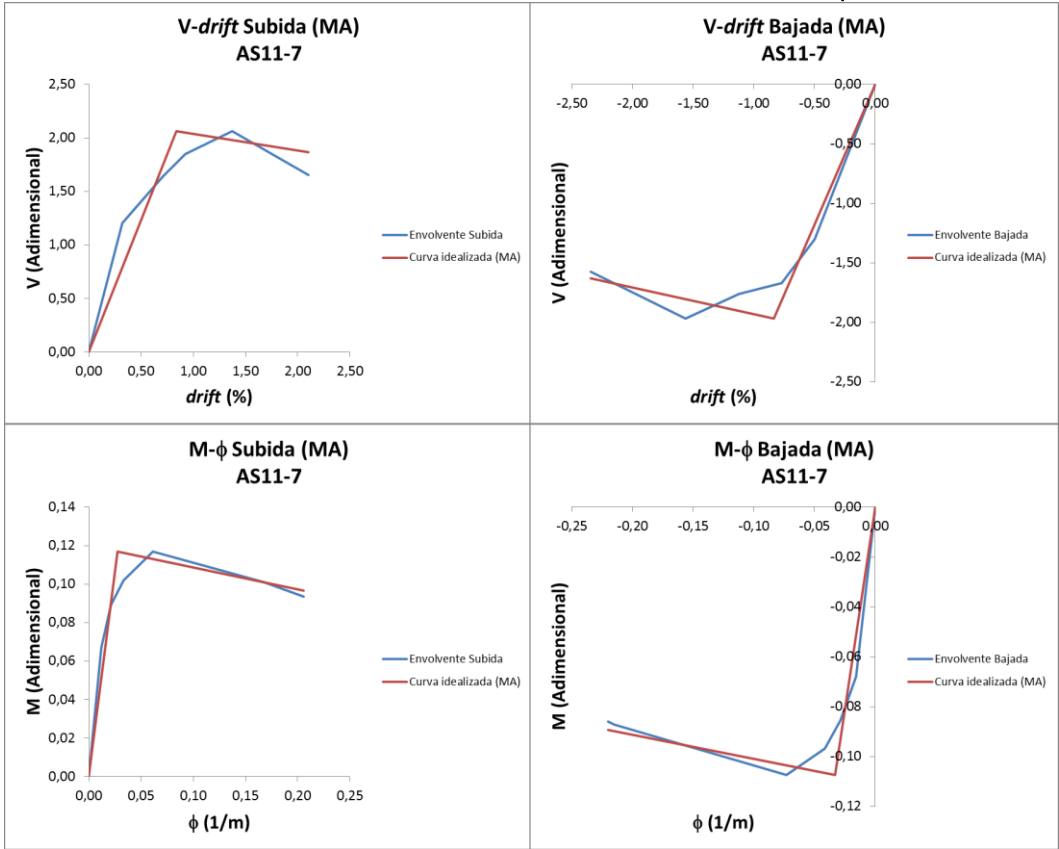
AS11-6 Método del Balance de Energía. Envolventes V- Δ y M- ϕ



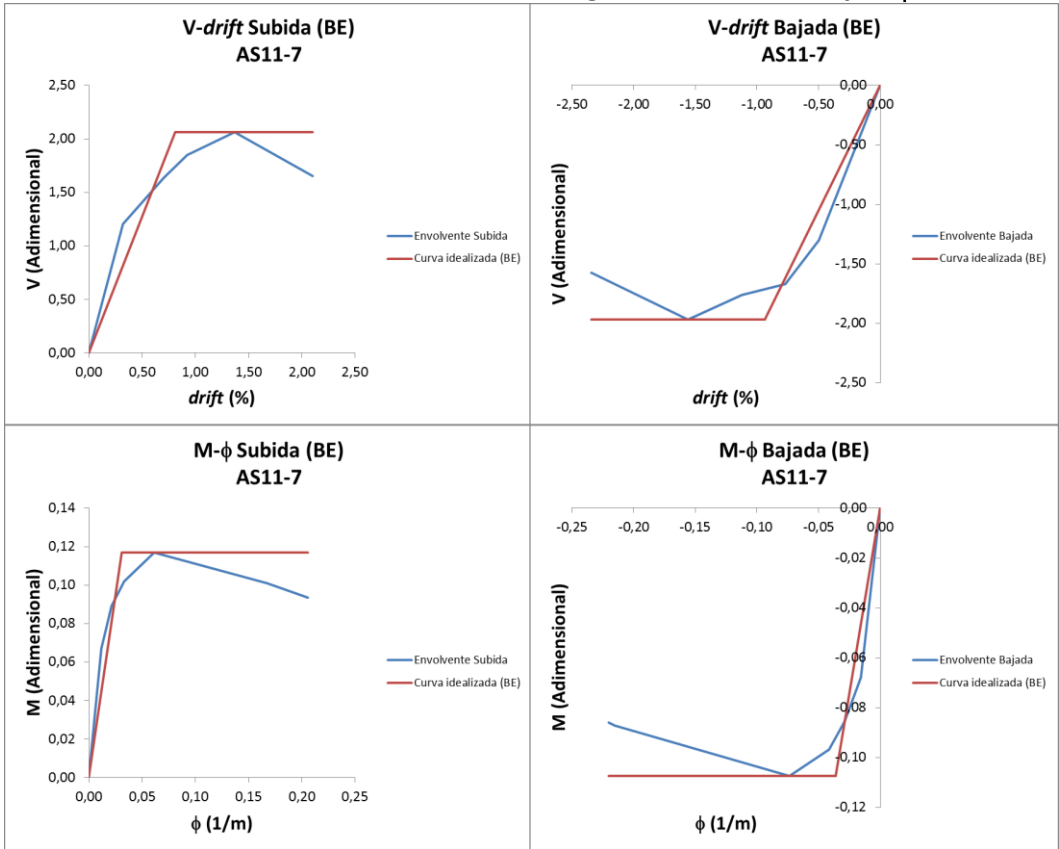
AS11-6 Método Eurocódigo 8. Envolventes V- Δ y M- ϕ



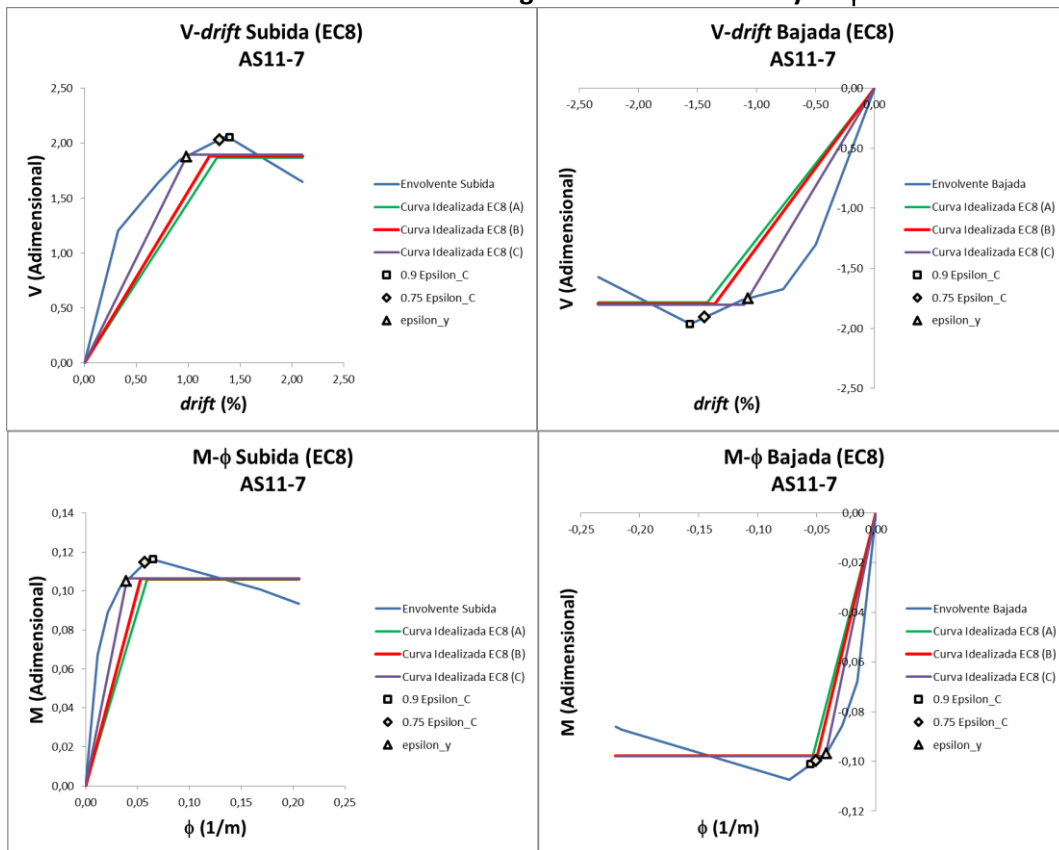
AS11-7 Método Aproximado. Envoltentes $V-\Delta$ y $M-\phi$



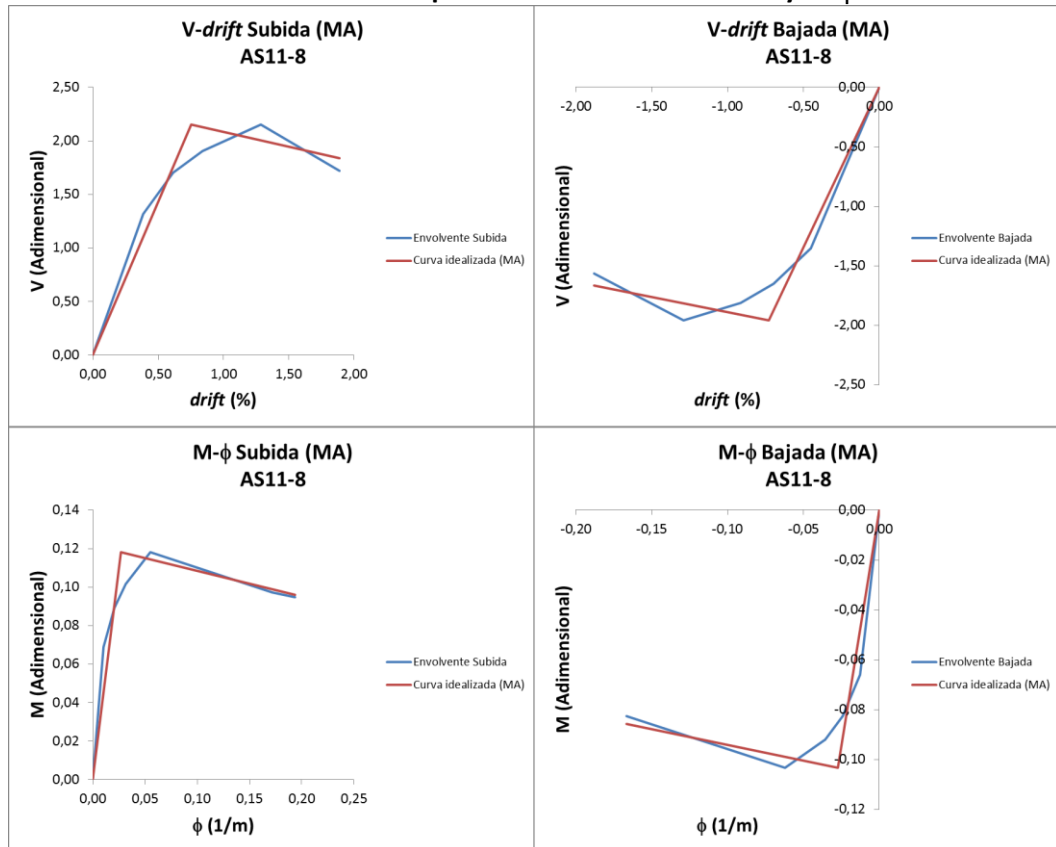
AS11-7 Método del Balance de Energía. Envoltentes $V-\Delta$ y $M-\phi$



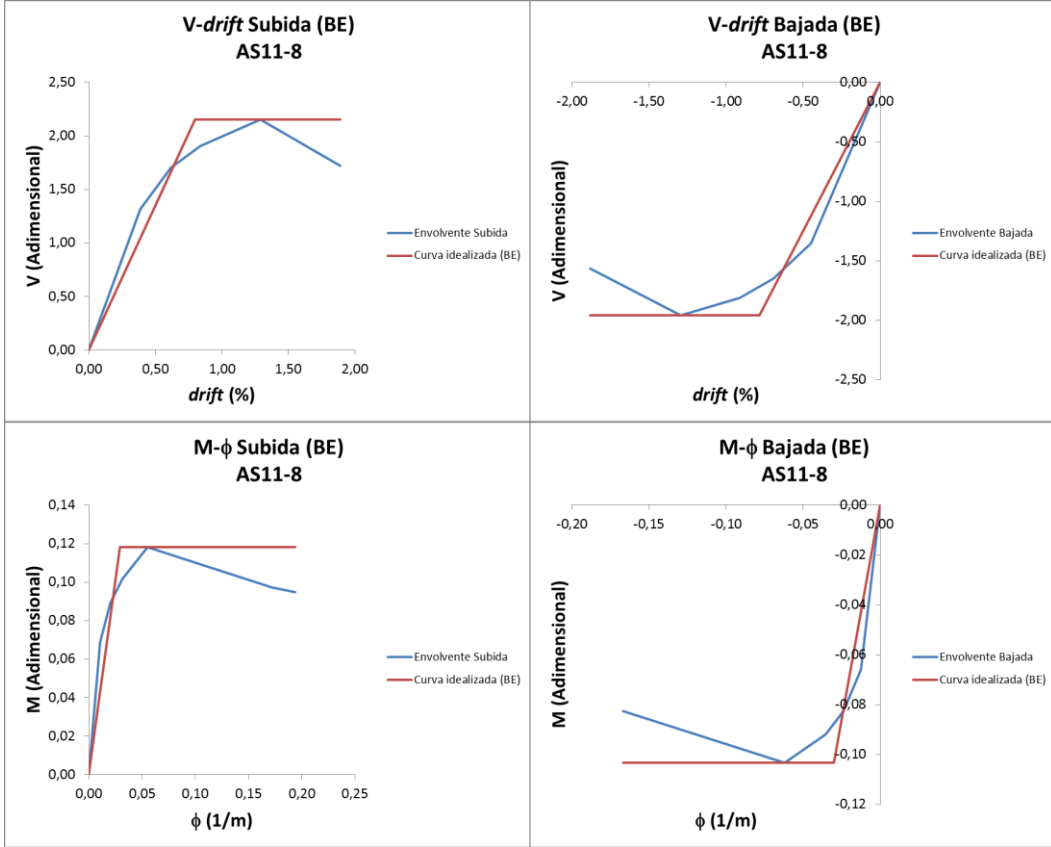
AS11-7 Método Eurocódigo 8. Envolventes V- Δ y M- ϕ



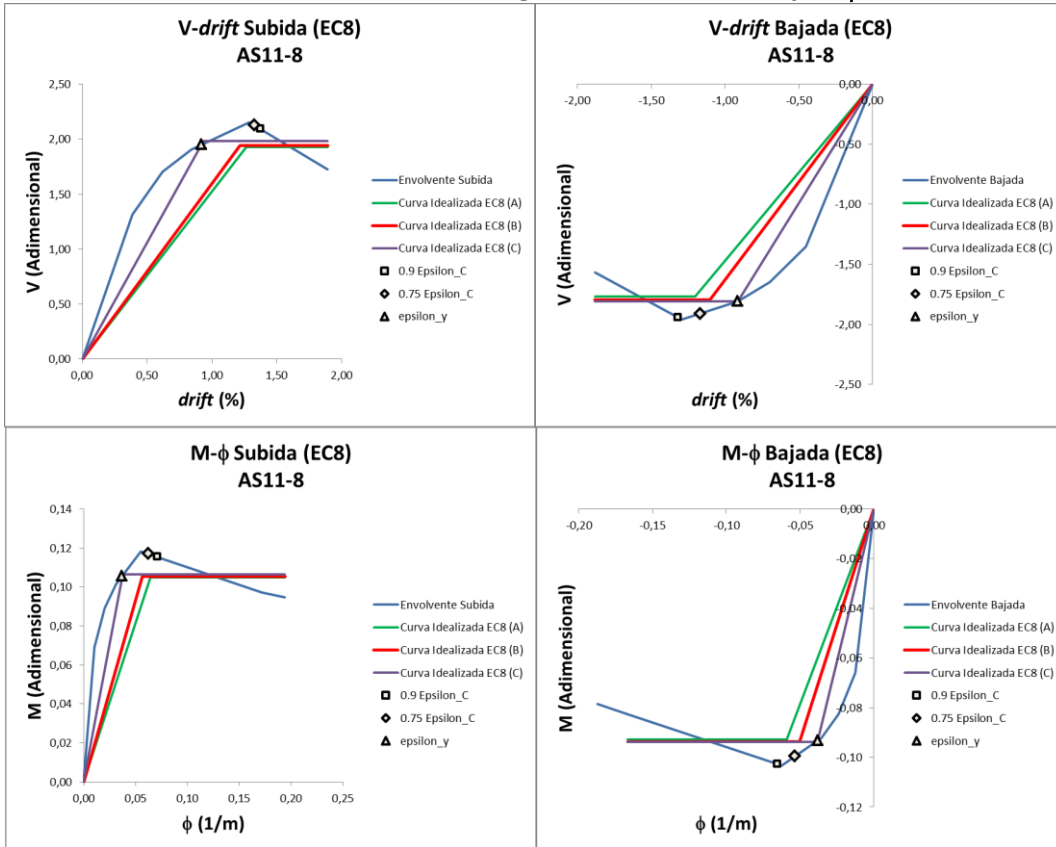
AS11-8 Método Aproximado. Envolventes V- Δ y M- ϕ



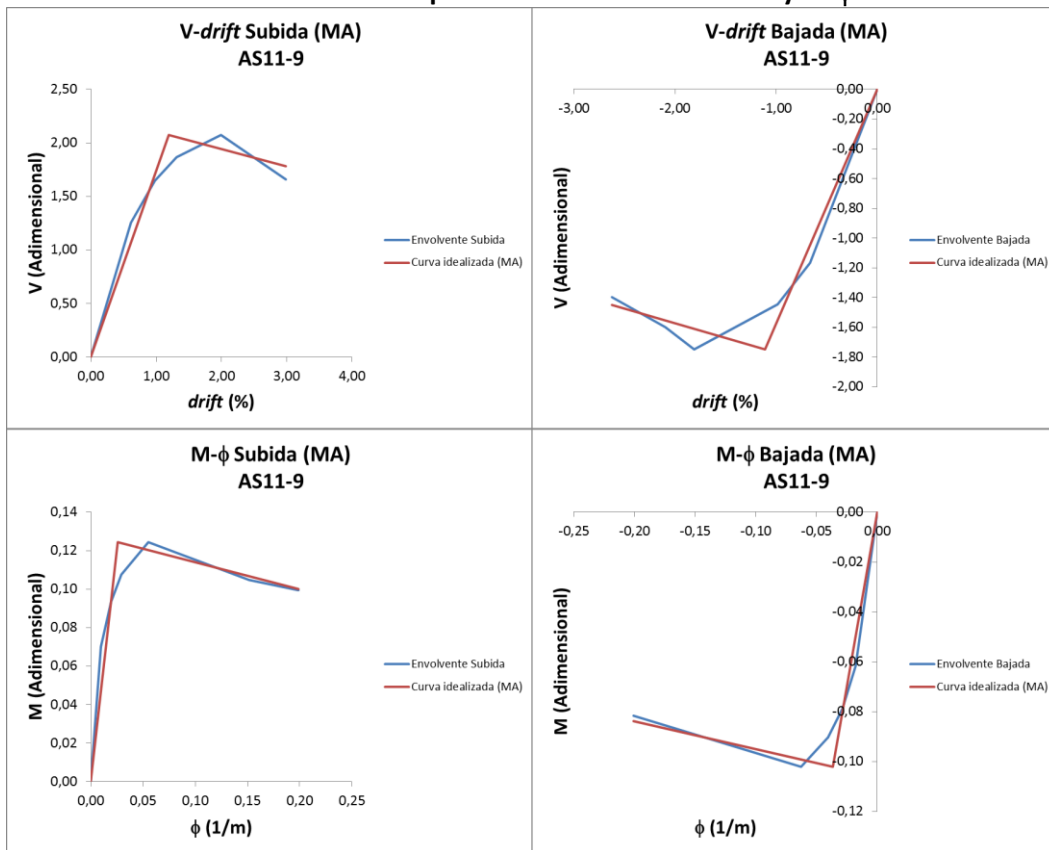
AS11-8 Método del Balance de Energía. Envoltentes V- Δ y M- ϕ



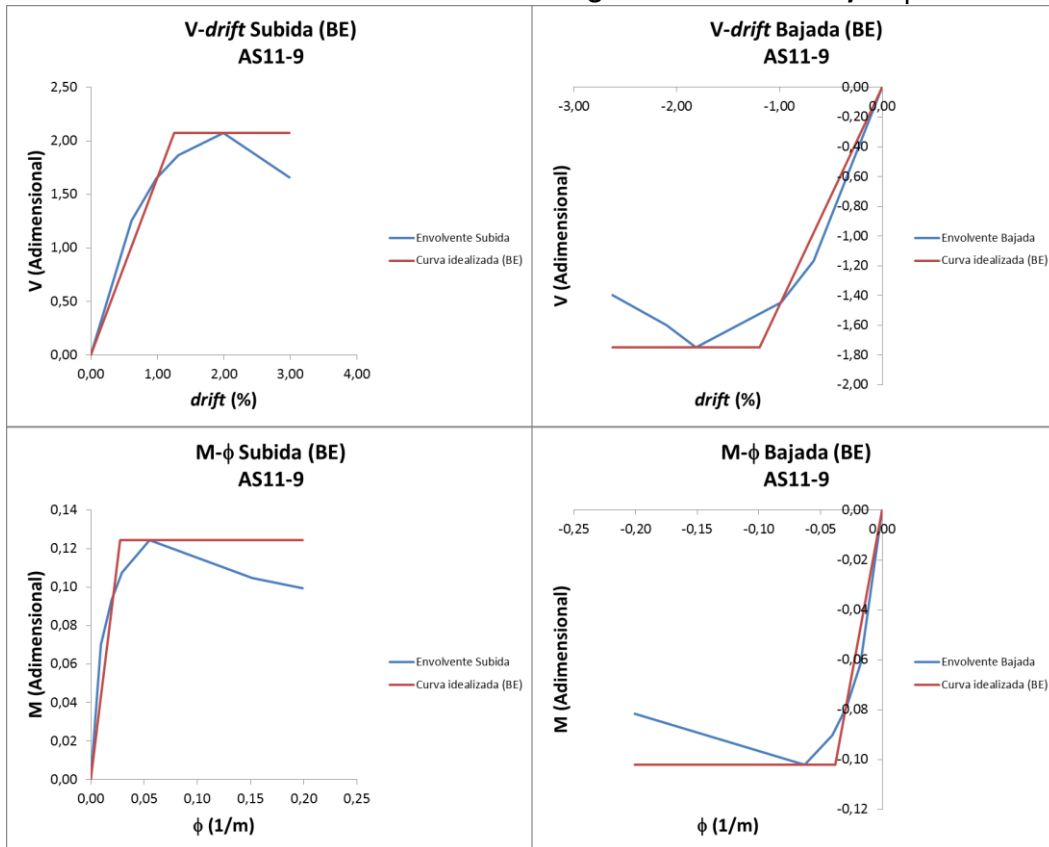
AS11-8 Método Eurocódigo 8. Envoltentes V- Δ y M- ϕ



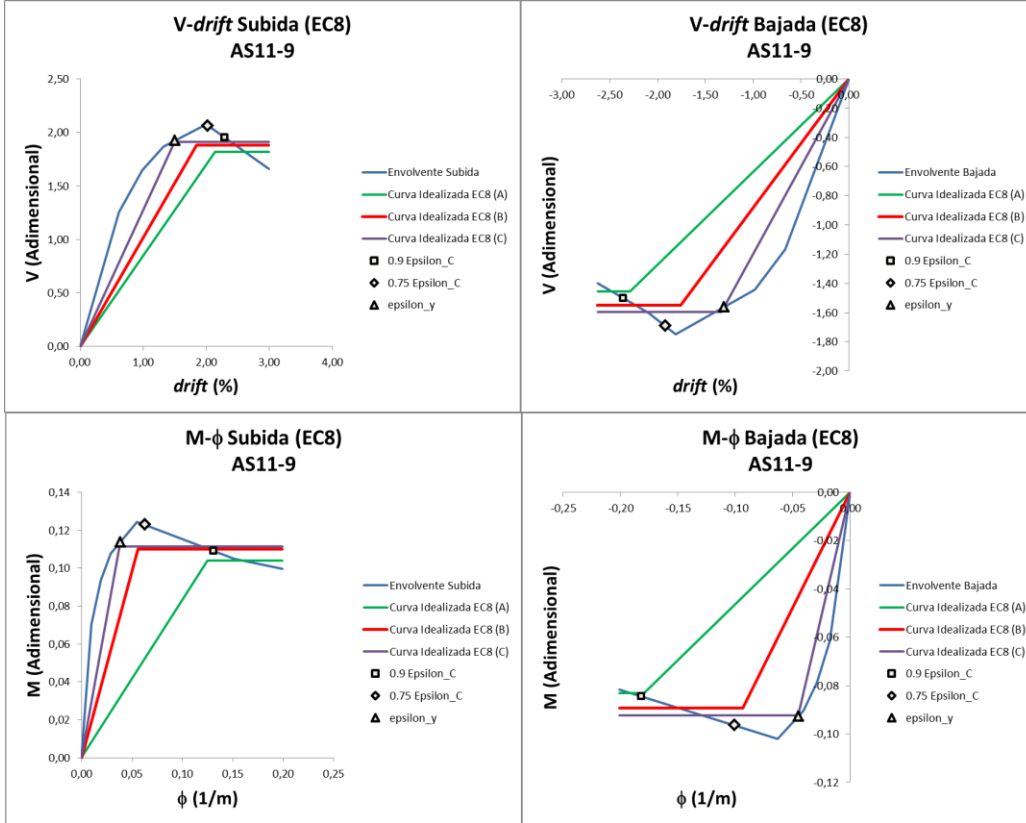
AS11-9 Método Aproximado. Envolventes V- Δ y M- ϕ



AS11-9 Método del Balance de Energía. Envolventes V- Δ y M- ϕ

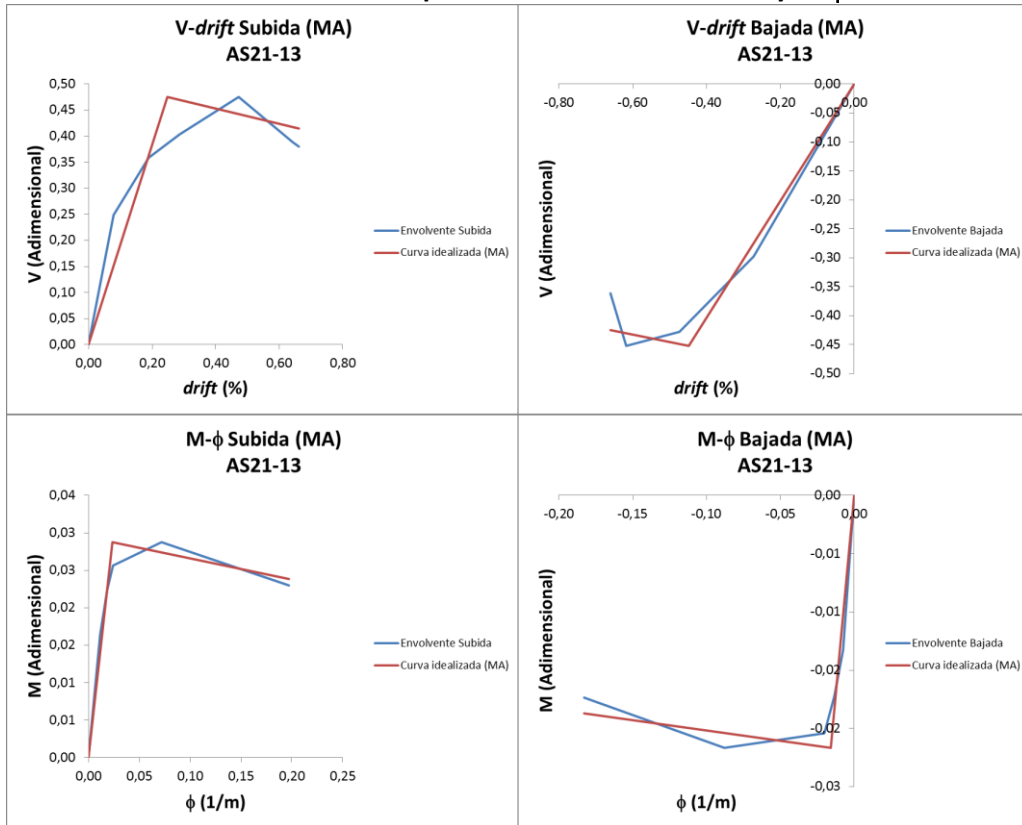


AS11-9 Método Eurocódigo 8. Envoltentes V-Δ y M-φ

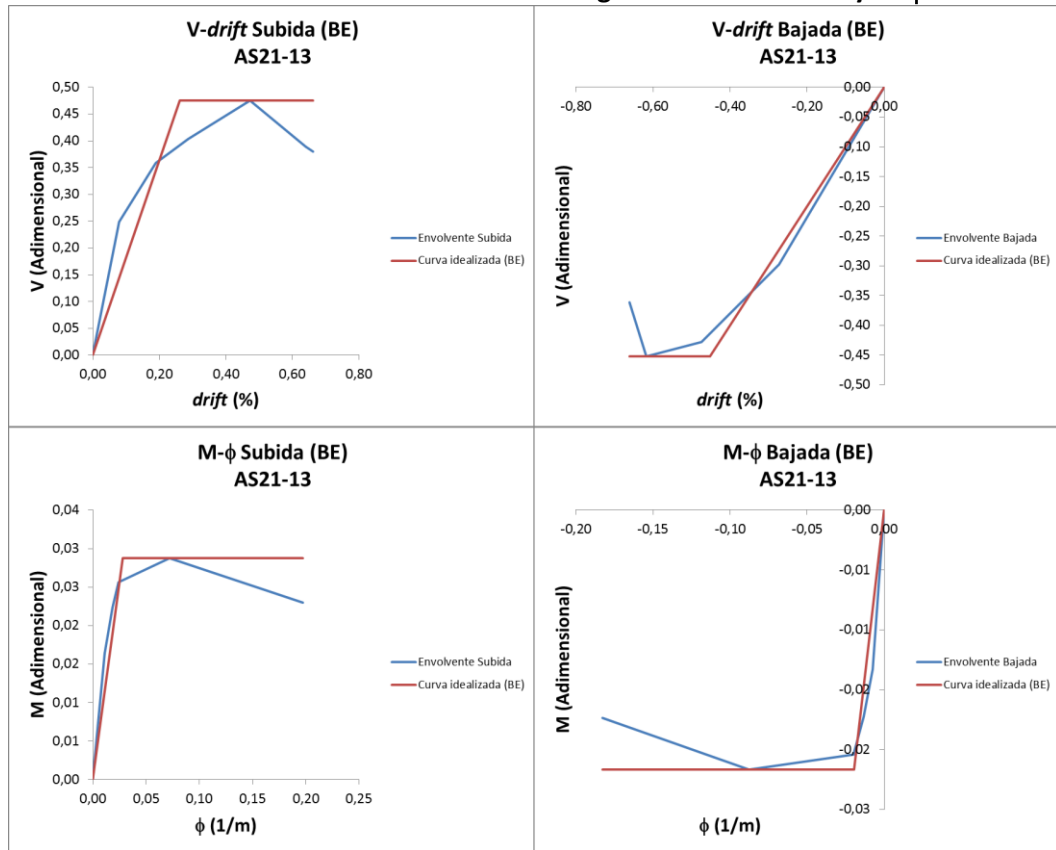


SERIE 2

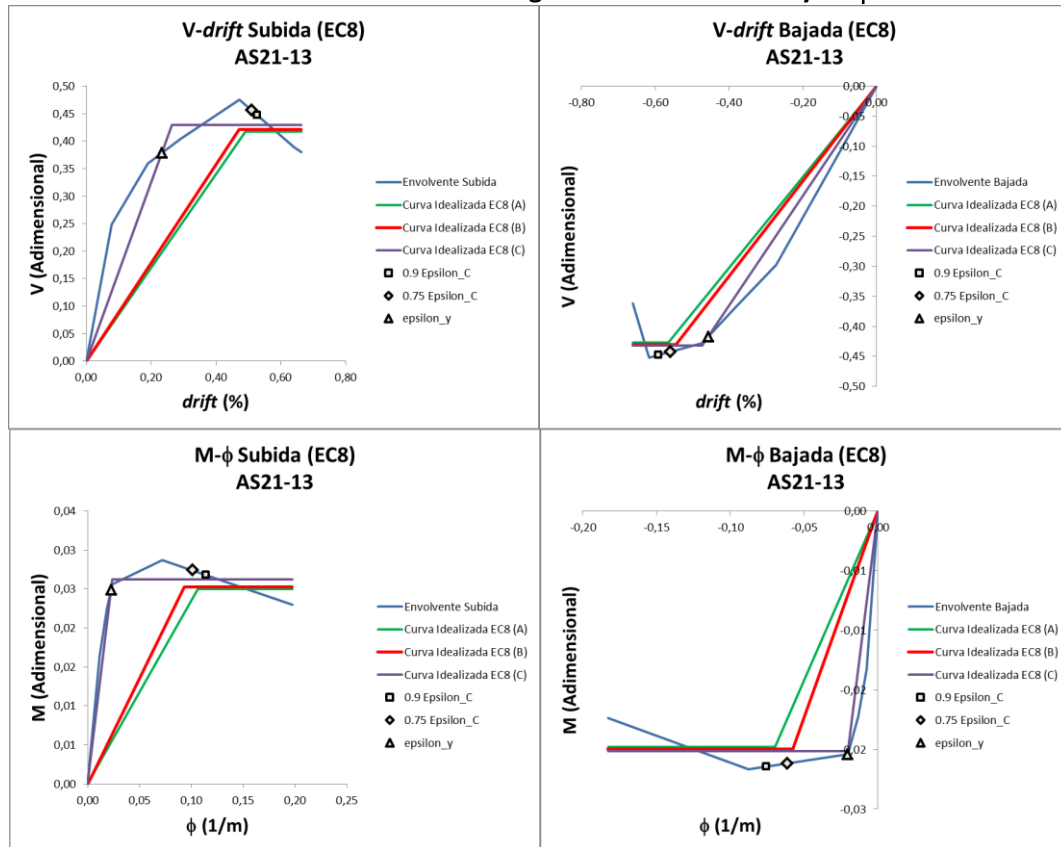
AS21-13 Método Aproximado. Envoltentes V-Δ y M-φ



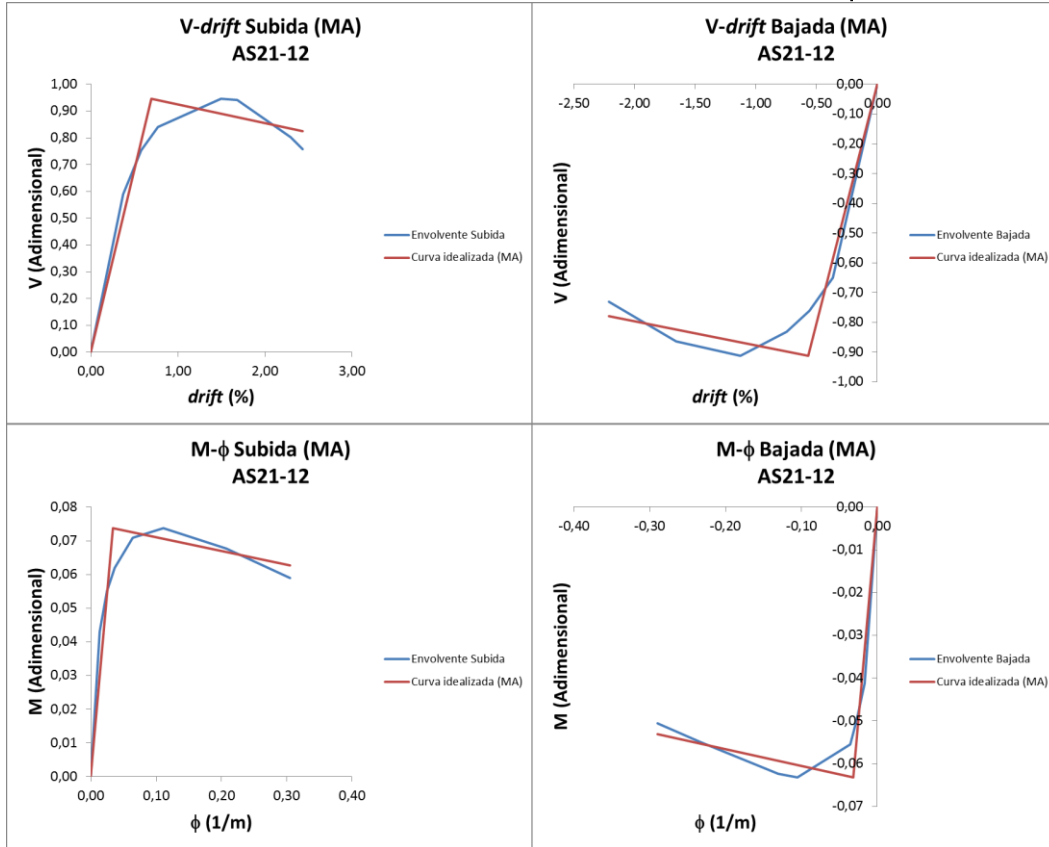
AS21-13 Método del Balance de Energía. Envolventes V- Δ y M- ϕ



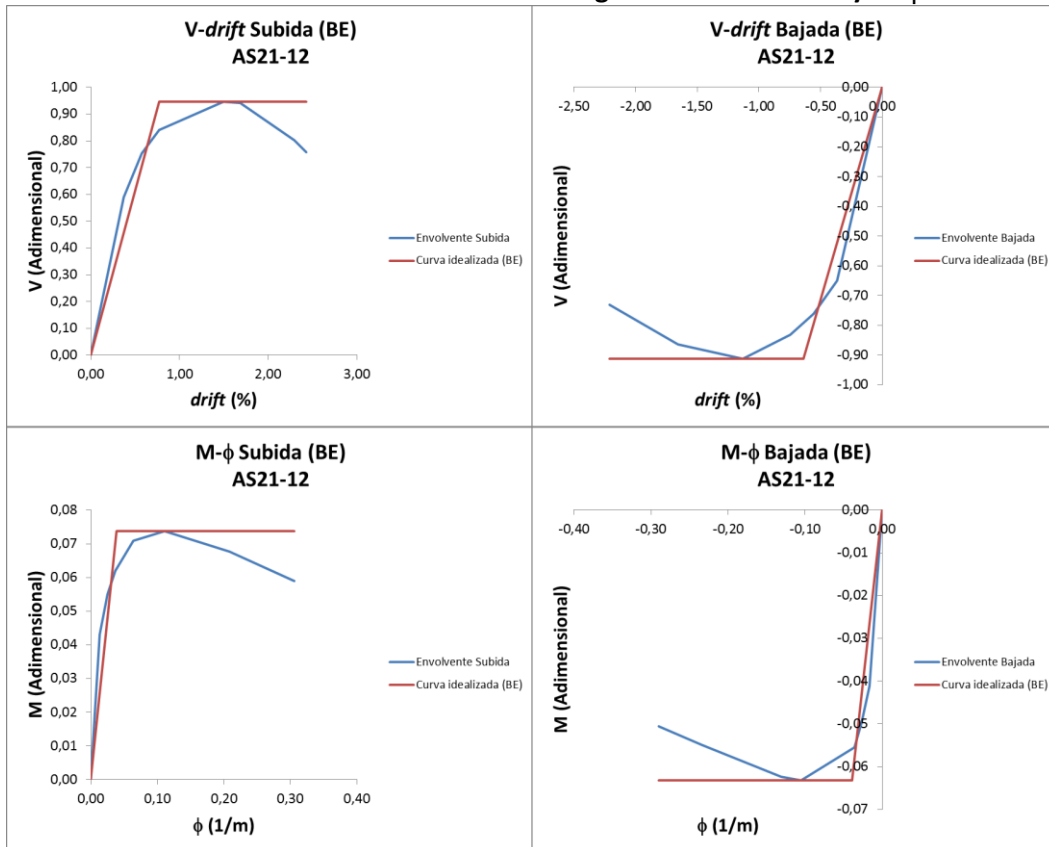
AS21-13 Método Eurocódigo 8. Envolventes V- Δ y M- ϕ



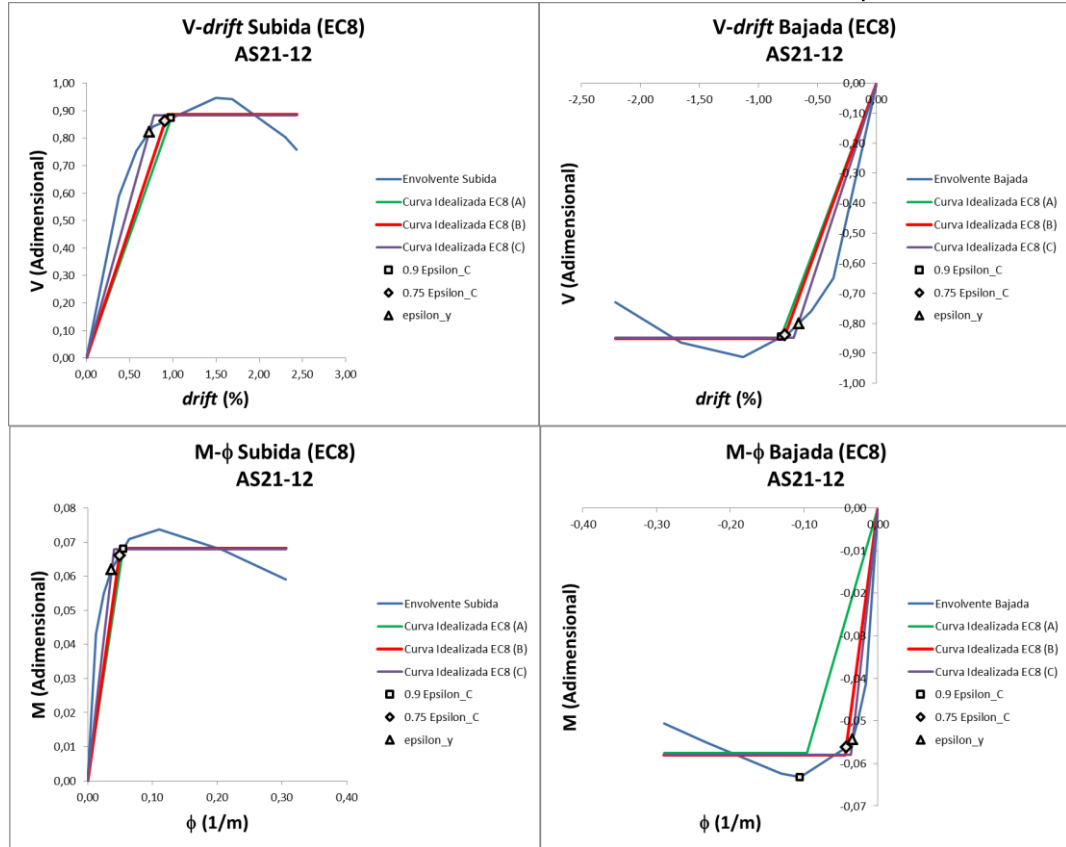
AS21-12 Método Aproximado. Envoltentes V- Δ y M- ϕ



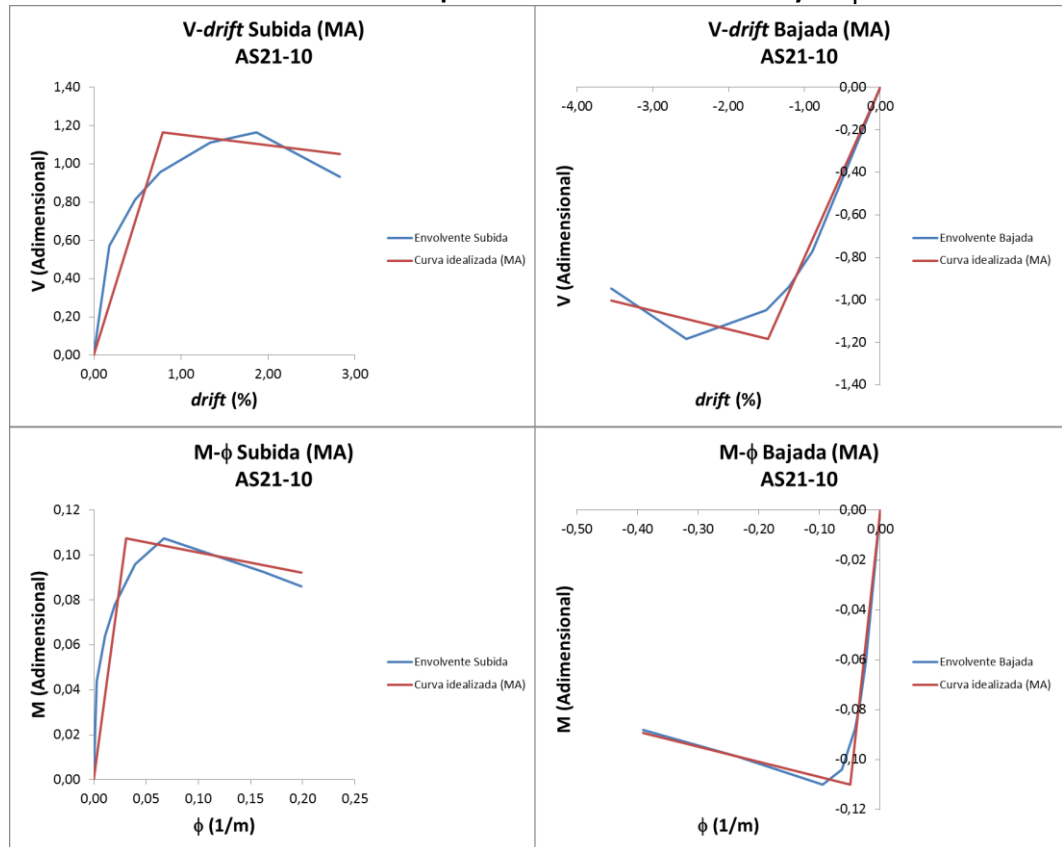
AS21-12 Método del Balance de Energía. Envoltentes V- Δ y M- ϕ



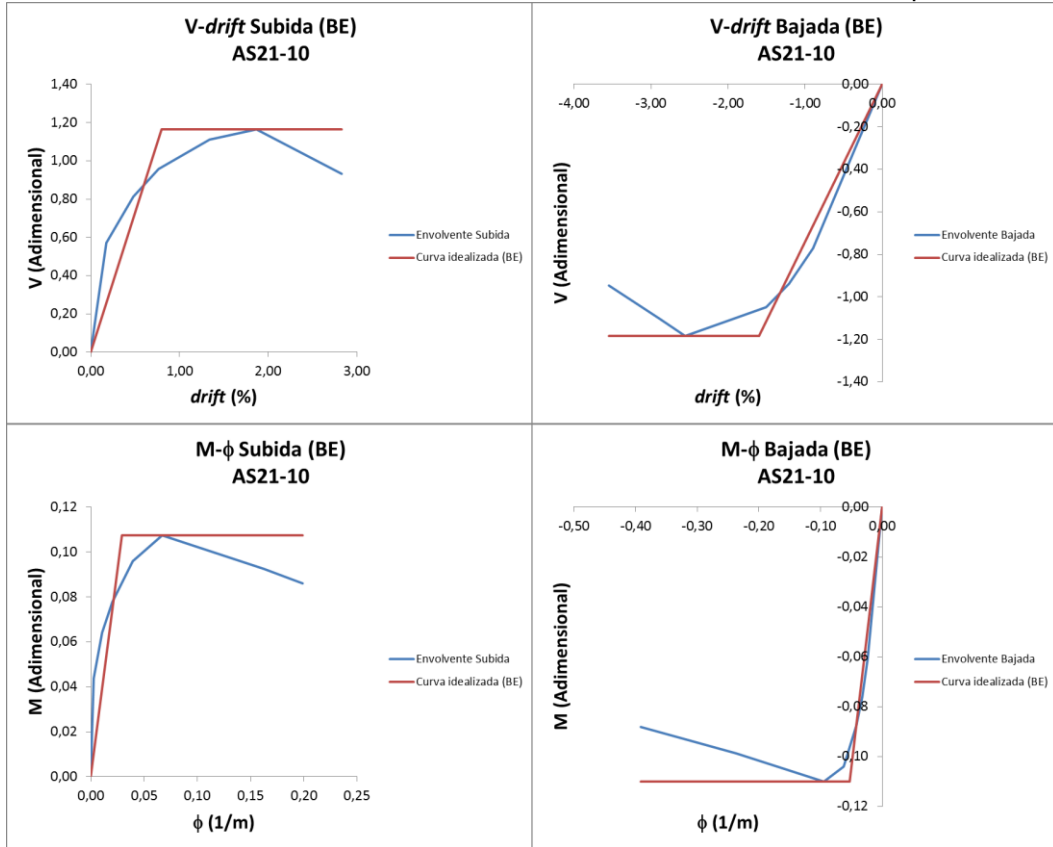
AS21-12 Método Eurocódigo 8. Envolventes V- Δ y M- ϕ



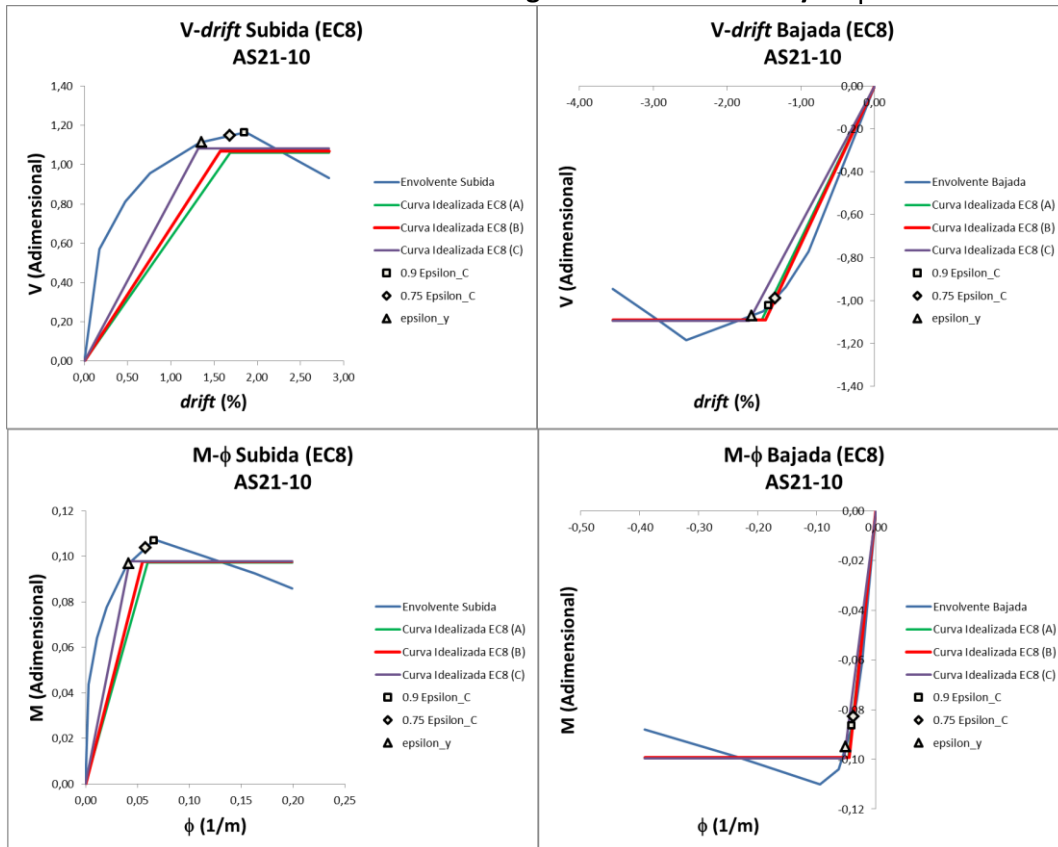
AS21-10 Método Aproximado. Envolventes V- Δ y M- ϕ



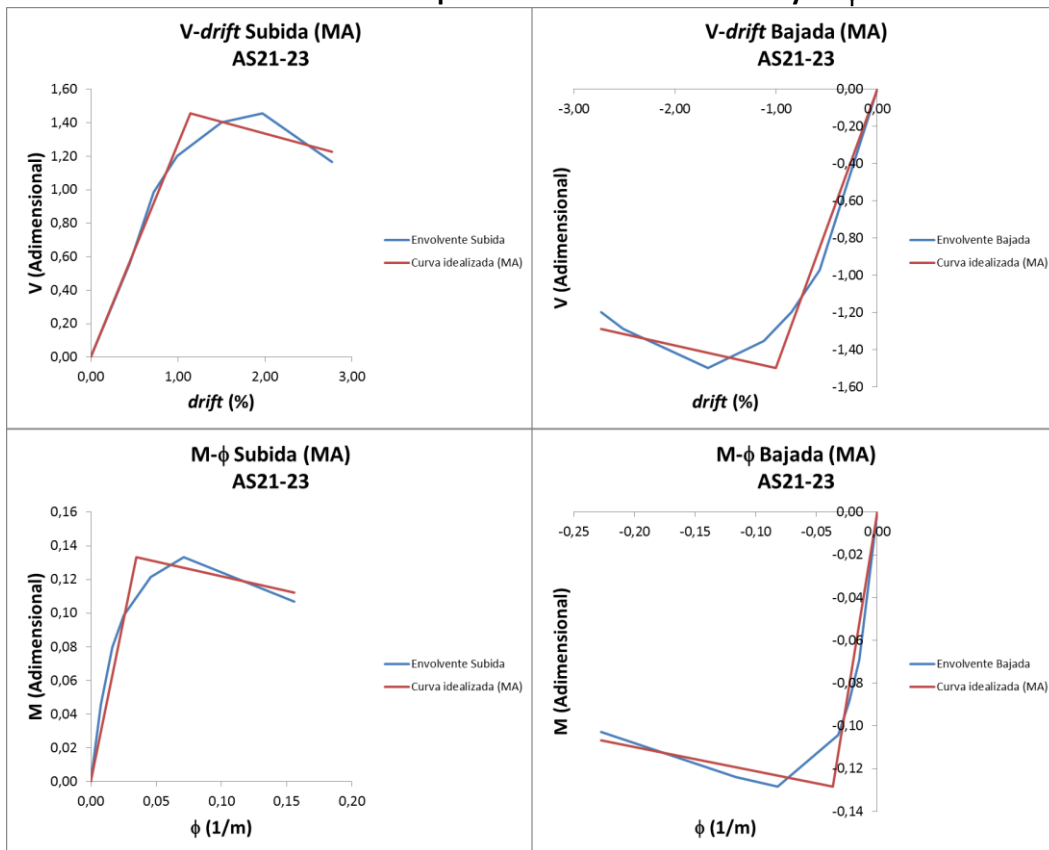
AS21-10 Método del Balance de Energía. Envoltentes V- Δ y M- ϕ



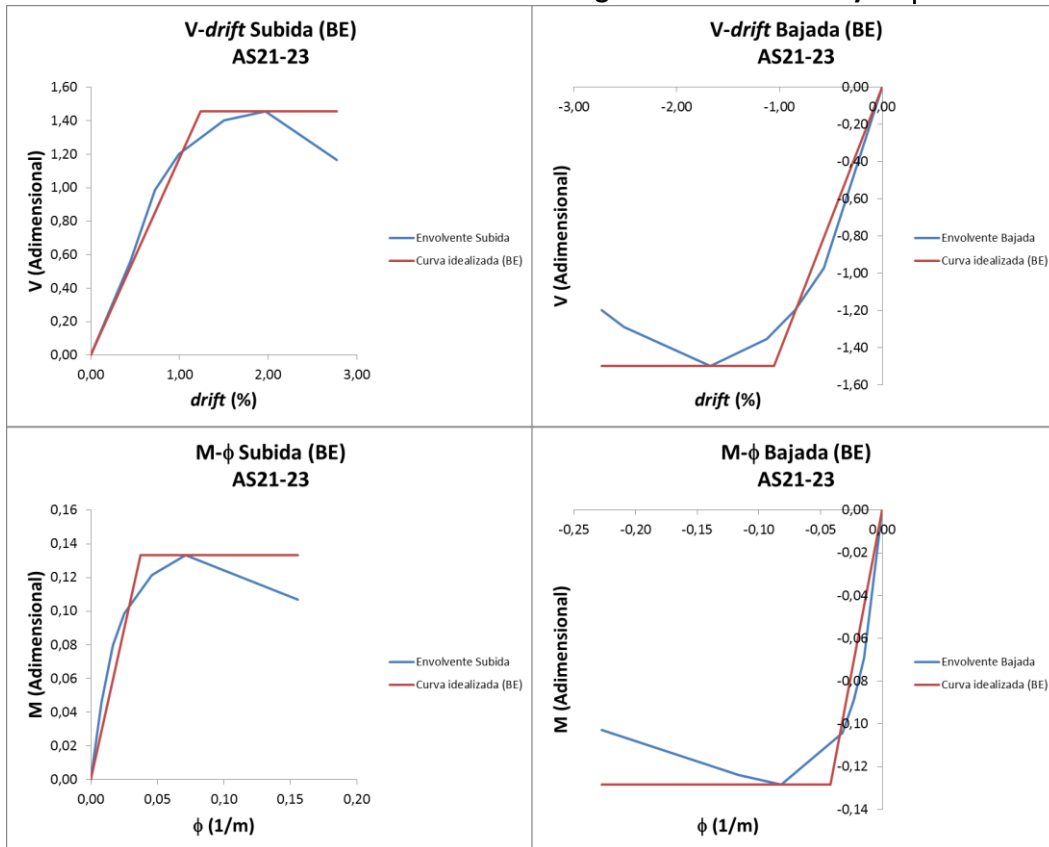
AS21-10 Método Eurocódigo 8. Envoltentes V- Δ y M- ϕ



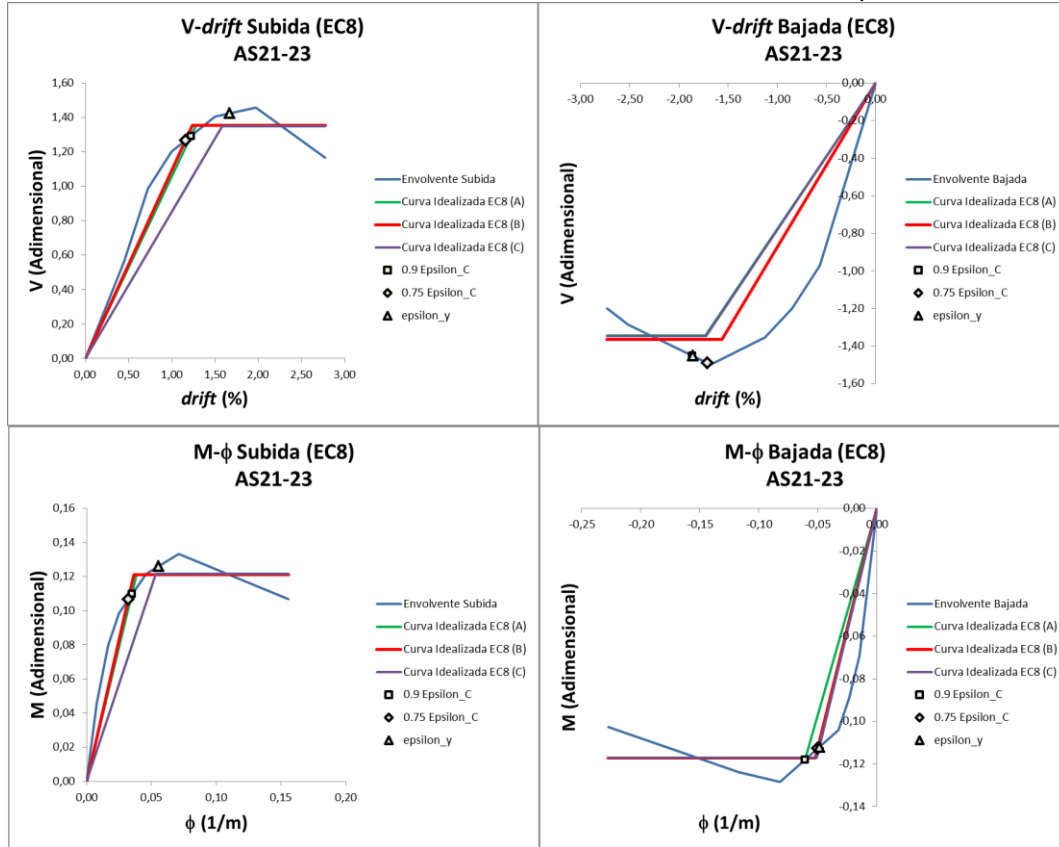
AS21-23 Método Aproximado. Envolventes $V-\Delta$ y $M-\phi$



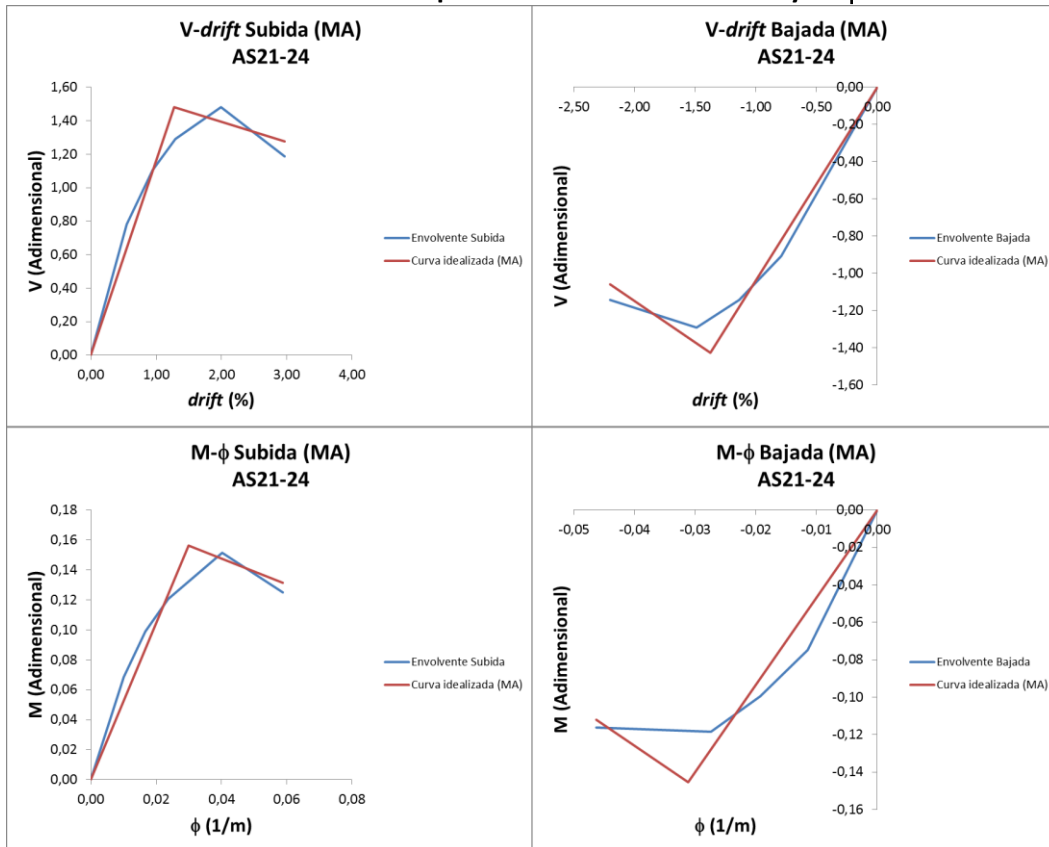
AS21-23 Método del Balance de Energía. Envolventes $V-\Delta$ y $M-\phi$



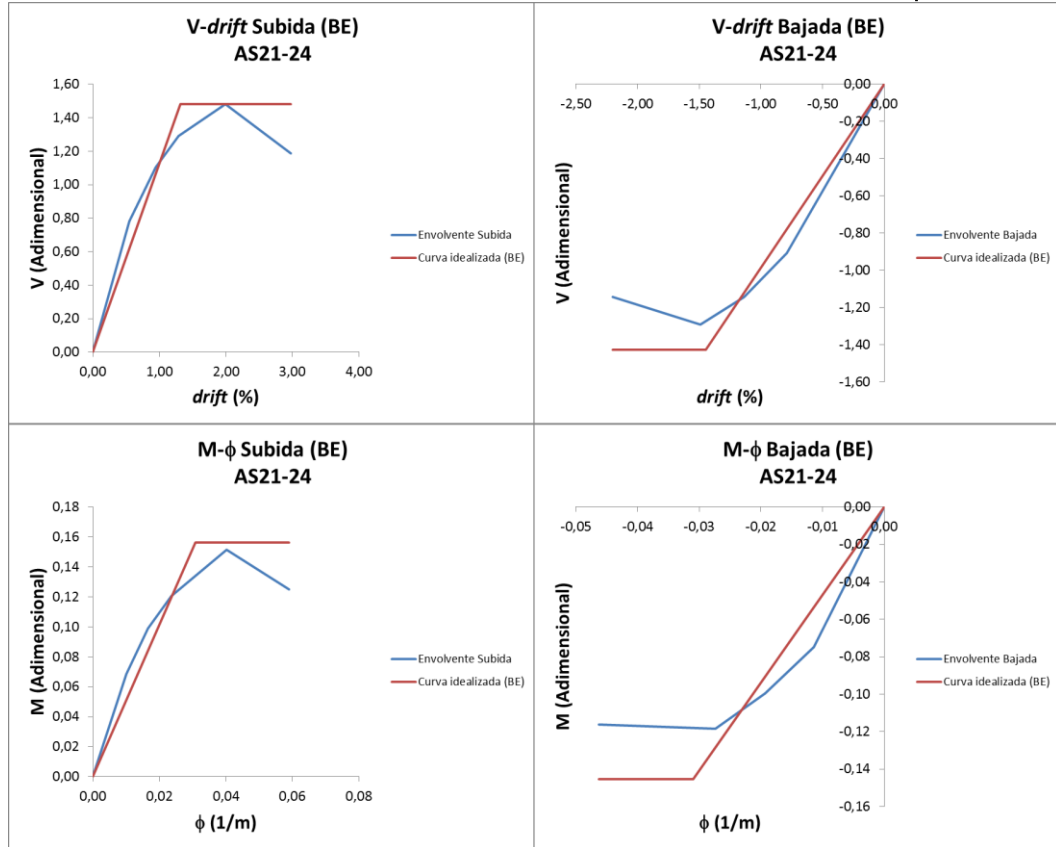
AS21-23 Método Eurocódigo 8. Envoltentes V- Δ y M- ϕ



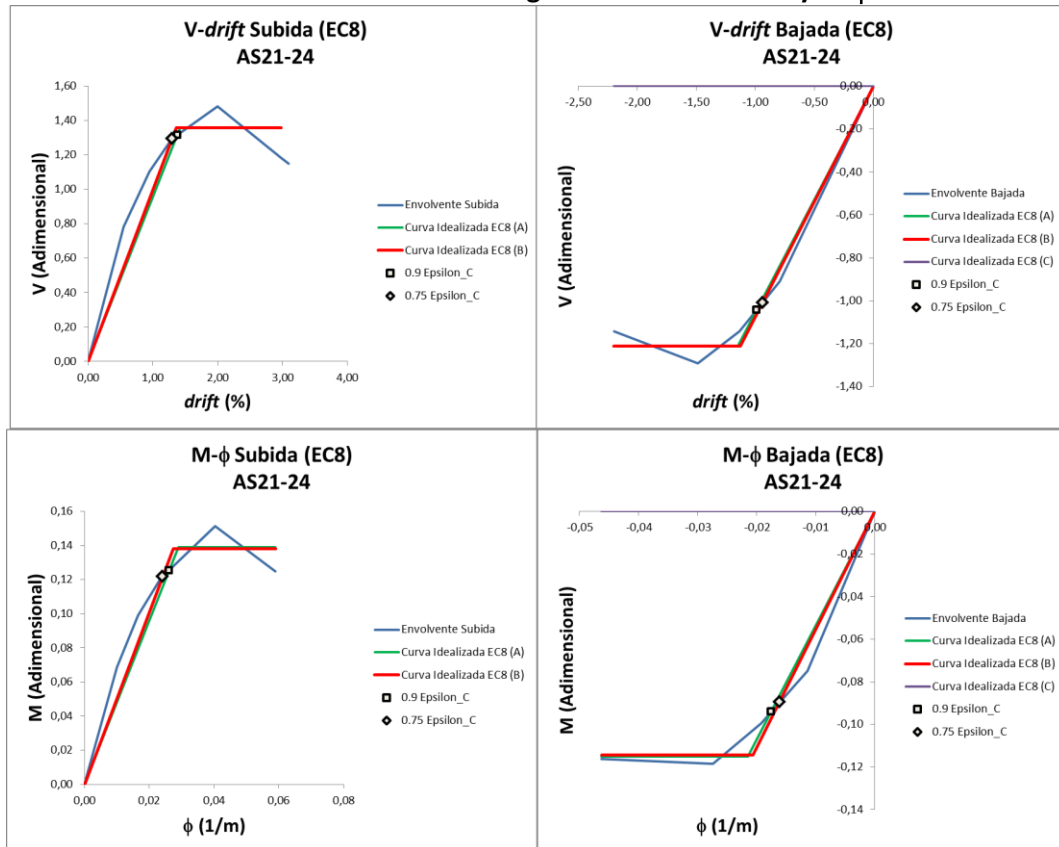
AS21-24 Método Aproximado. Envoltentes V- Δ y M- ϕ



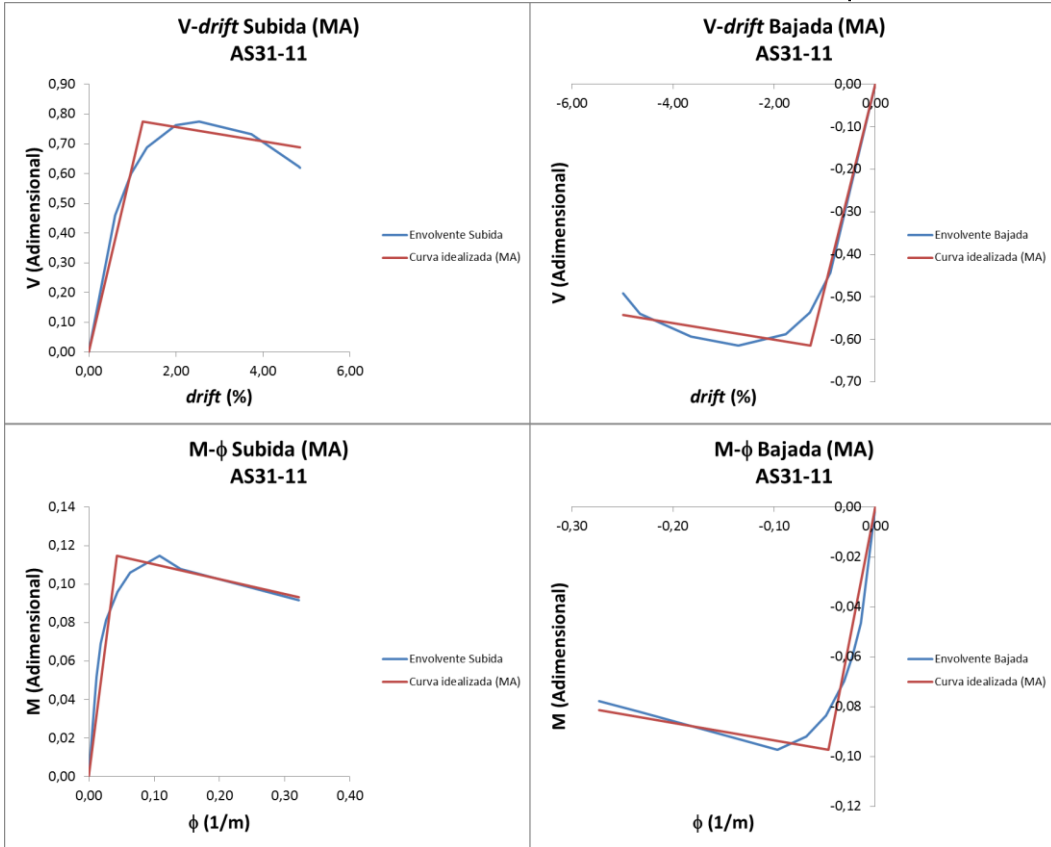
AS21-24 Método del Balance de Energía. Envolventes $V-\Delta$ y $M-\phi$



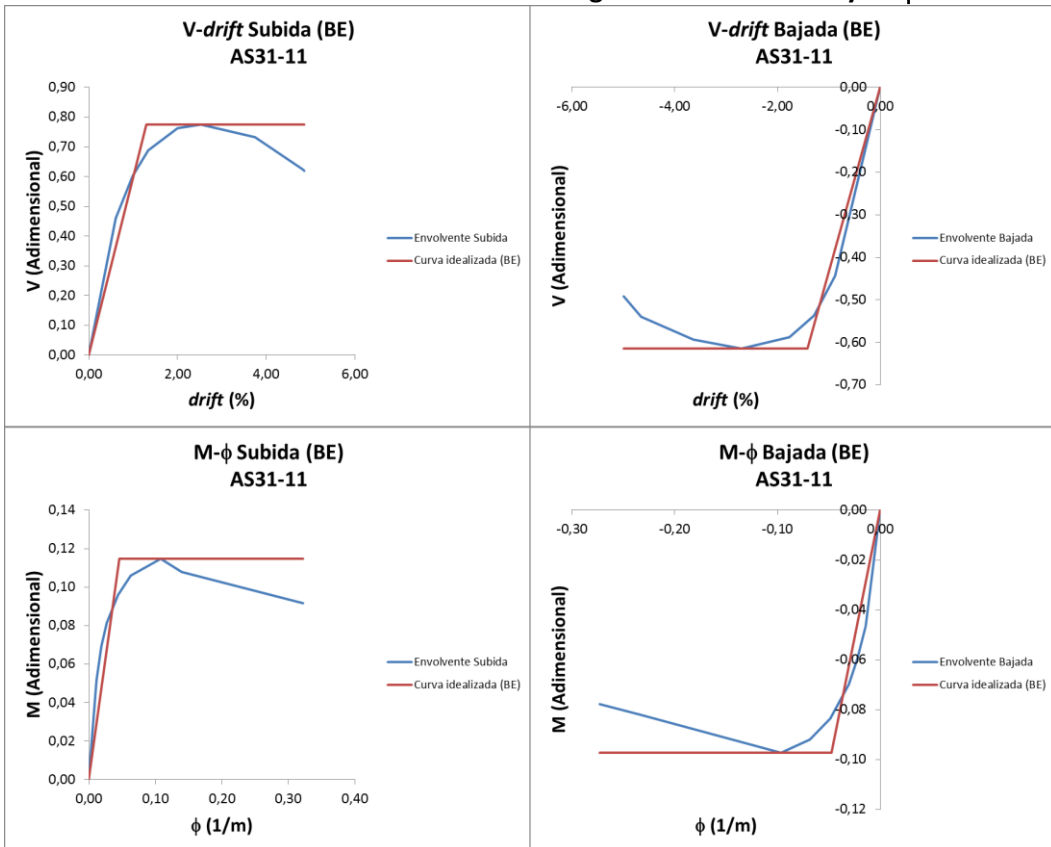
AS21-24 Método Eurocódigo 8. Envloventes $V-\Delta$ y $M-\phi$



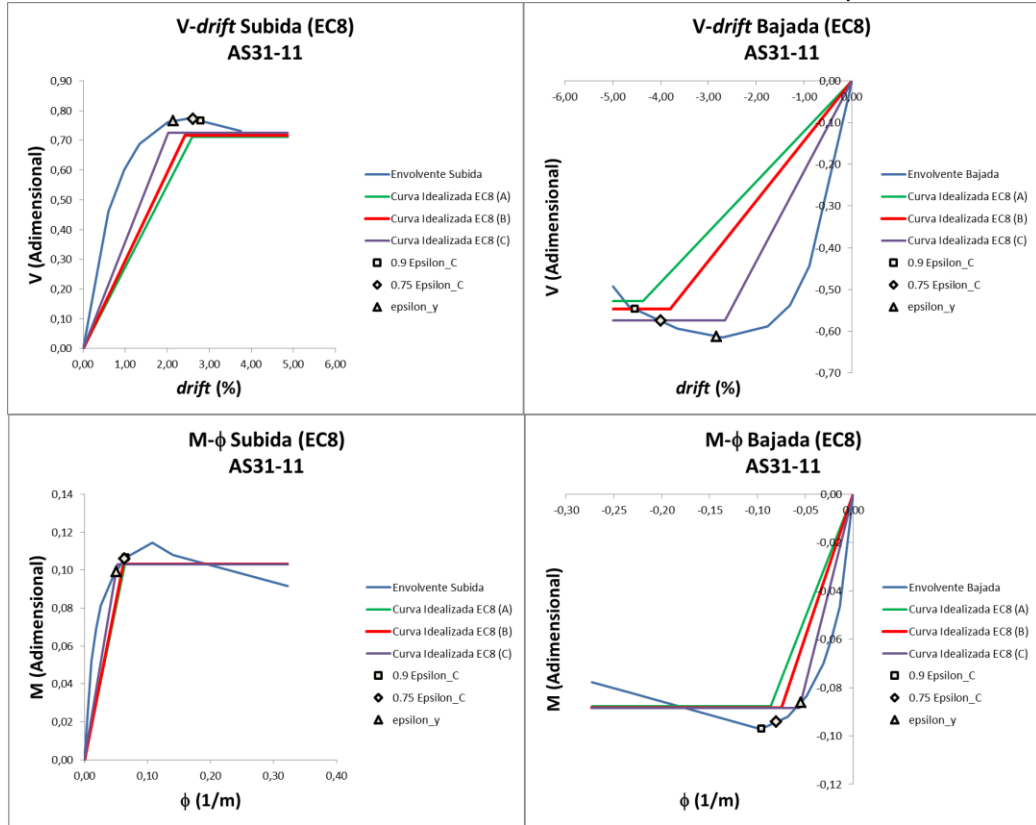
AS31-11 Método Aproximado. Envoltentes V- Δ y M- ϕ



AS31-11 Método del Balance de Energía. Envoltentes V- Δ y M- ϕ

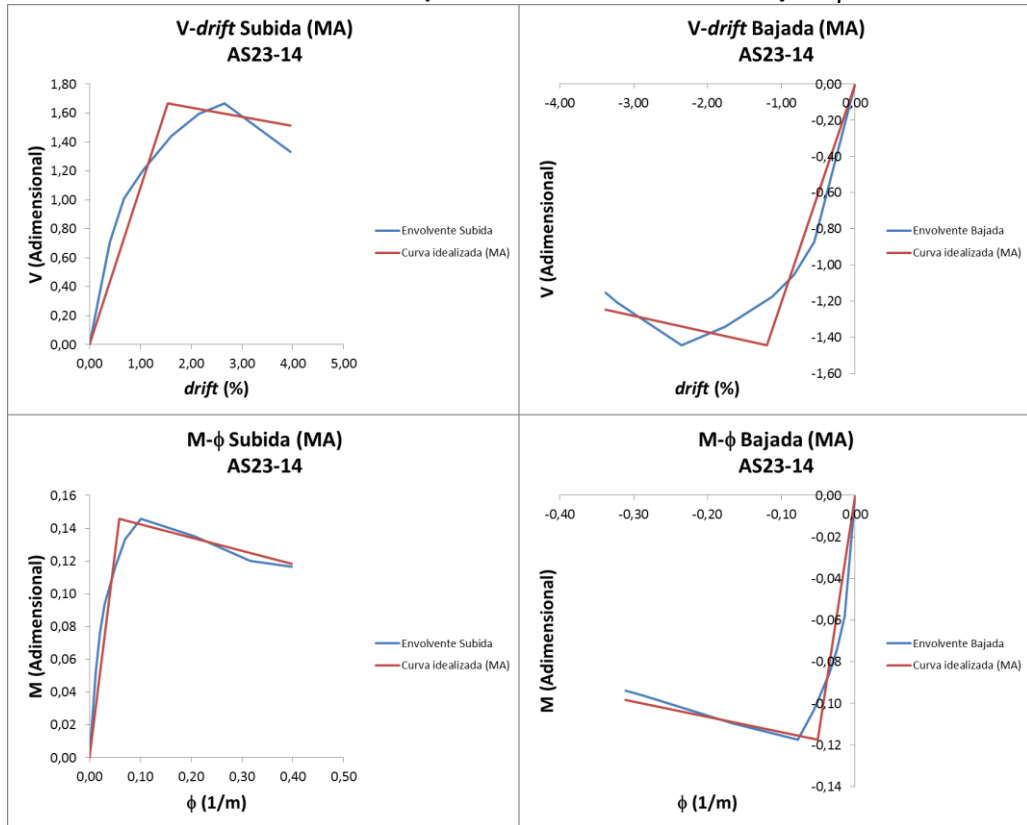


AS31-11 Método Eurocódigo 8. Envolventes V- Δ y M- ϕ

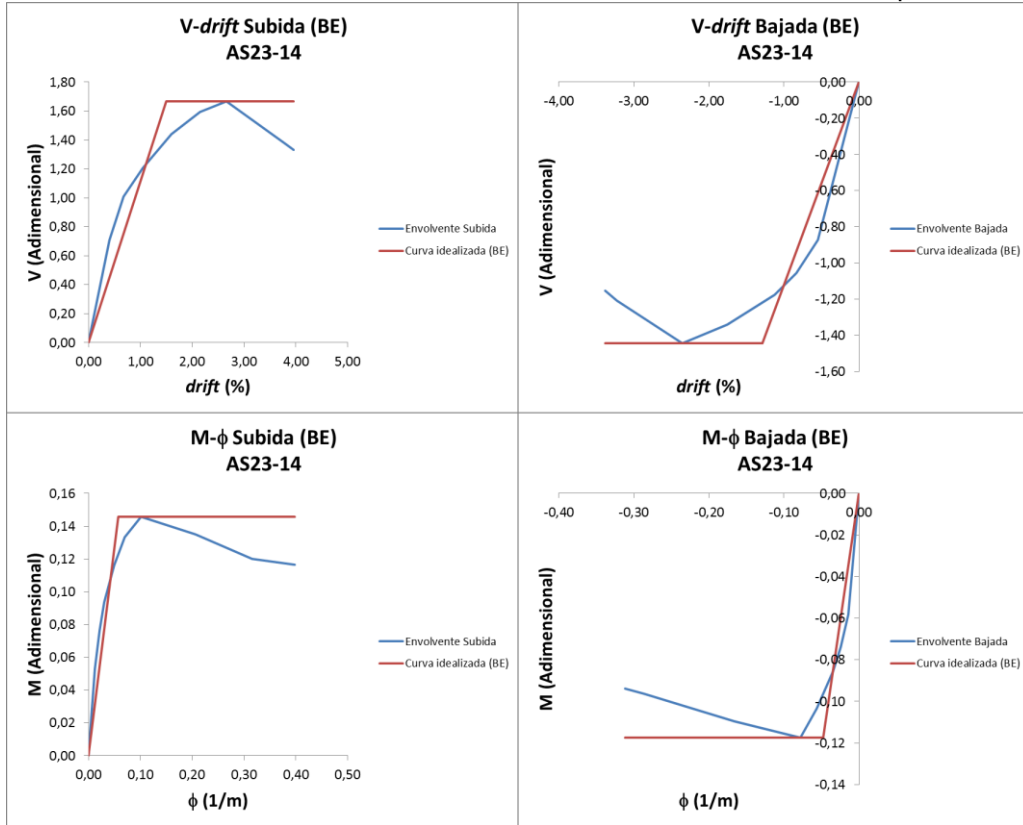


SERIE 3

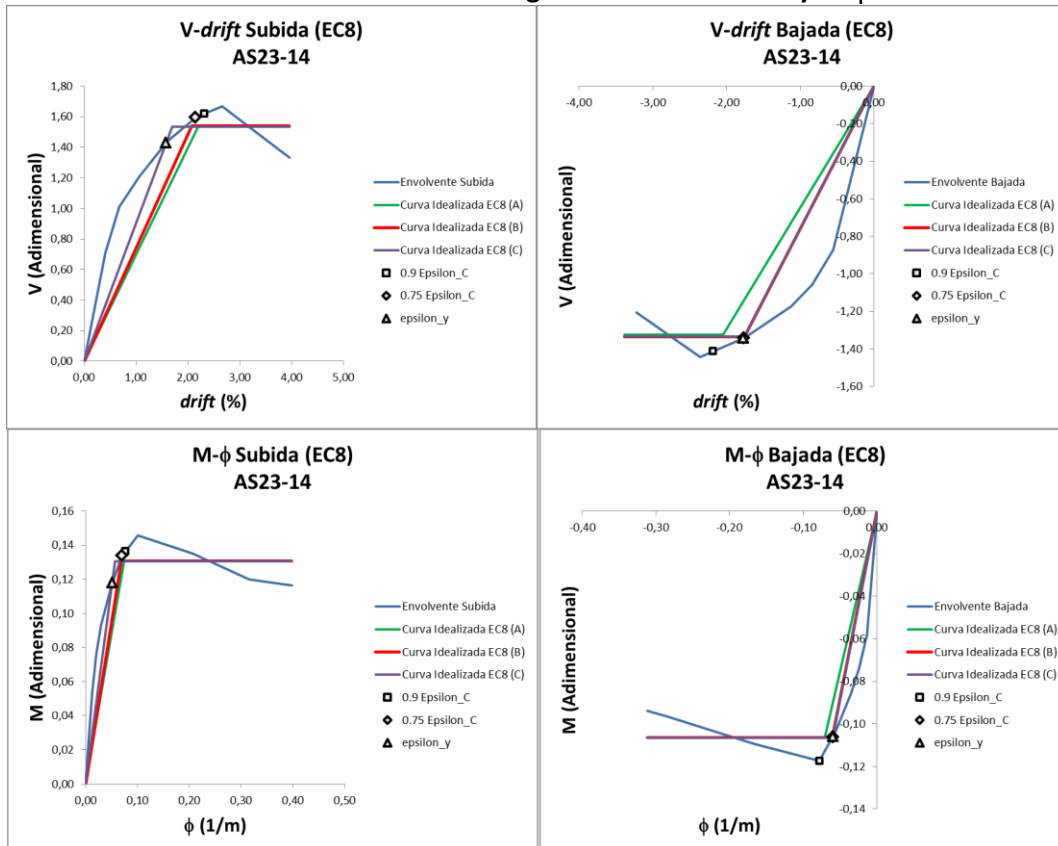
AS23-14 Método Aproximado. Envolventes V- Δ y M- ϕ



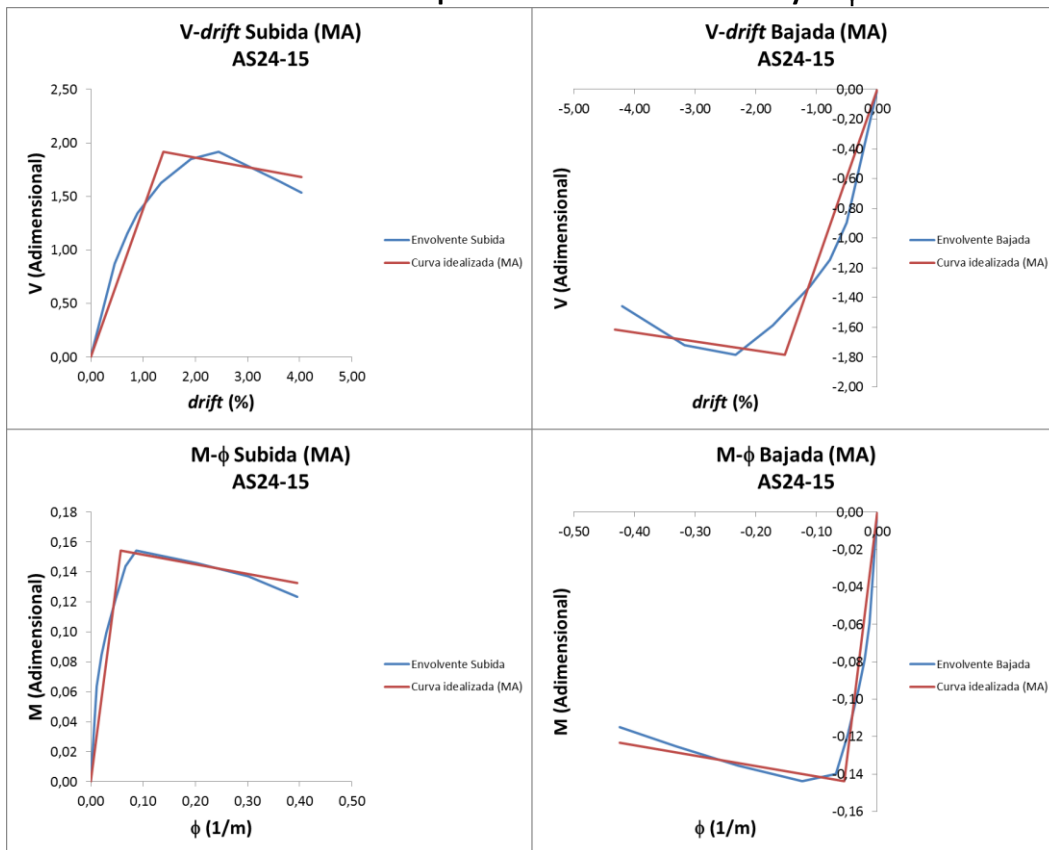
AS23-14 Método del Balance de Energía. Envoltentes V- Δ y M- ϕ



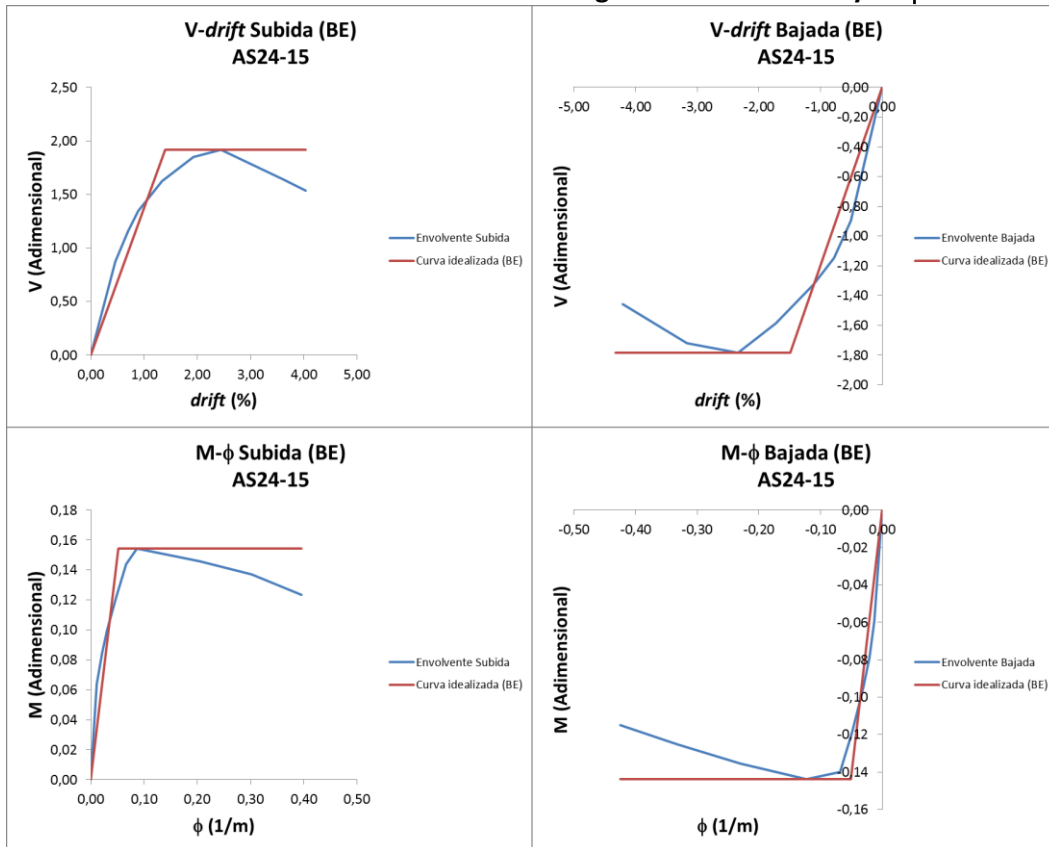
AS23-14 Método Eurocódigo 8. Envoltentes V- Δ y M- ϕ



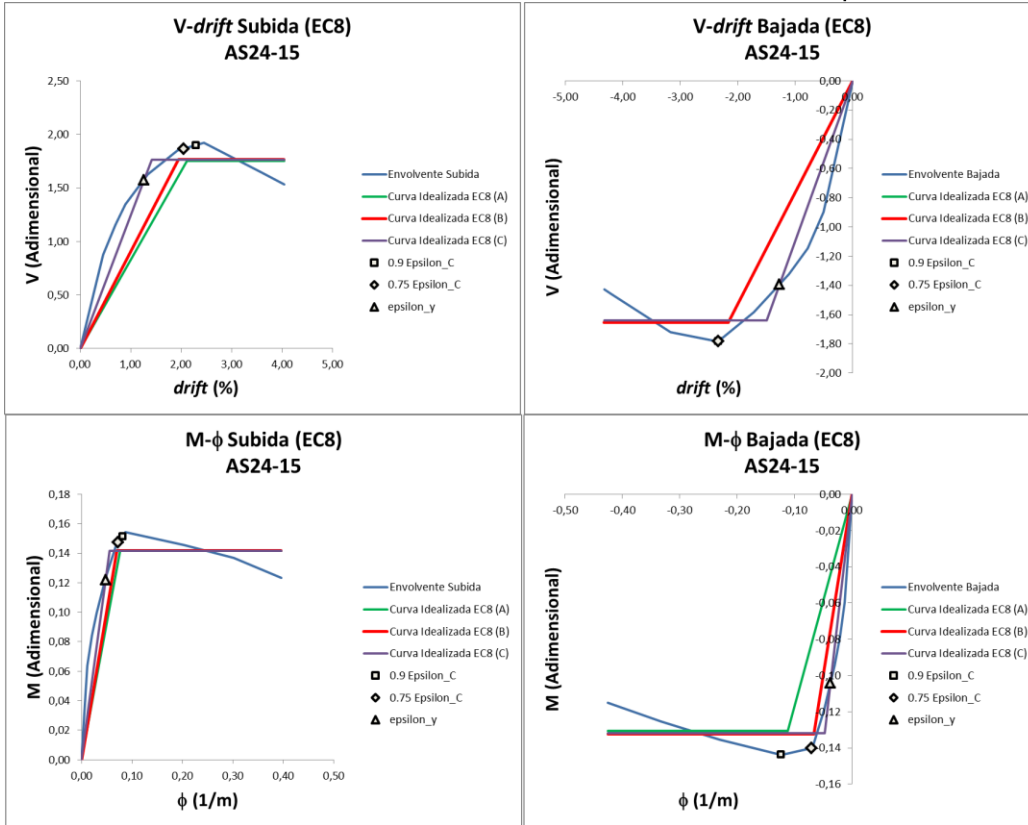
AS24-15 Método Aproximado. Envolventes $V-\Delta$ y $M-\phi$



AS24-15 Método del Balance de Energía. Envolventes $V-\Delta$ y $M-\phi$

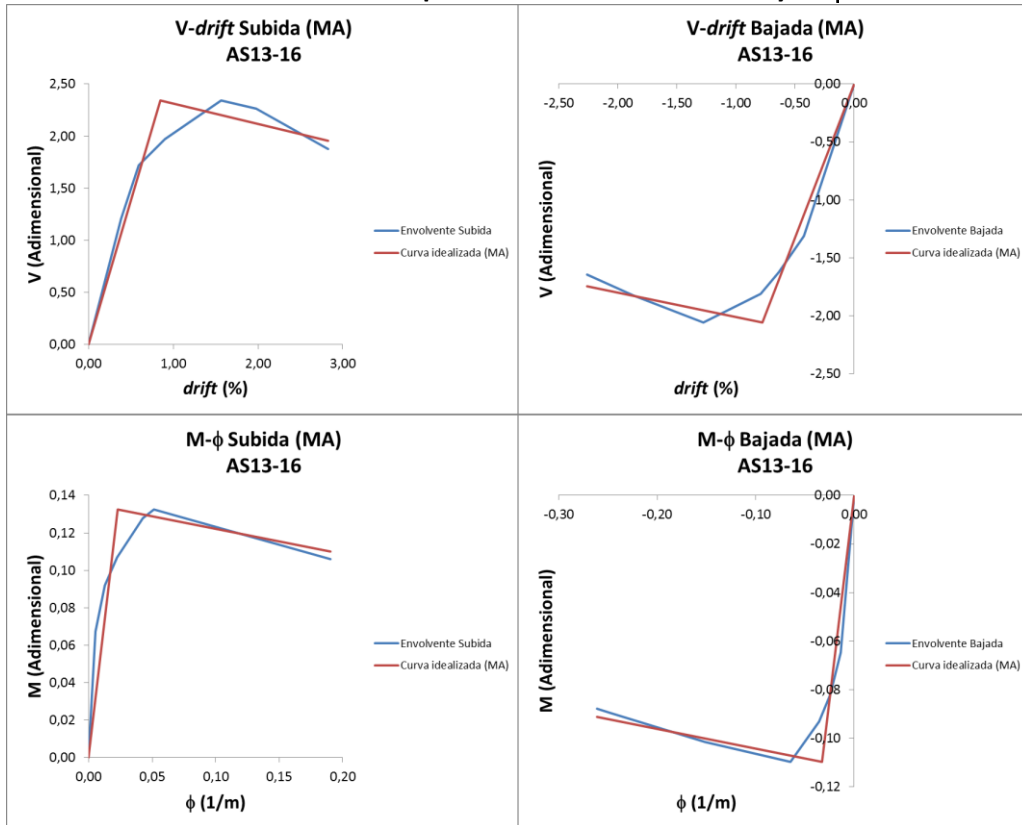


AS24-15 Método Eurocódigo 8. Envoltentes V- Δ y M- ϕ

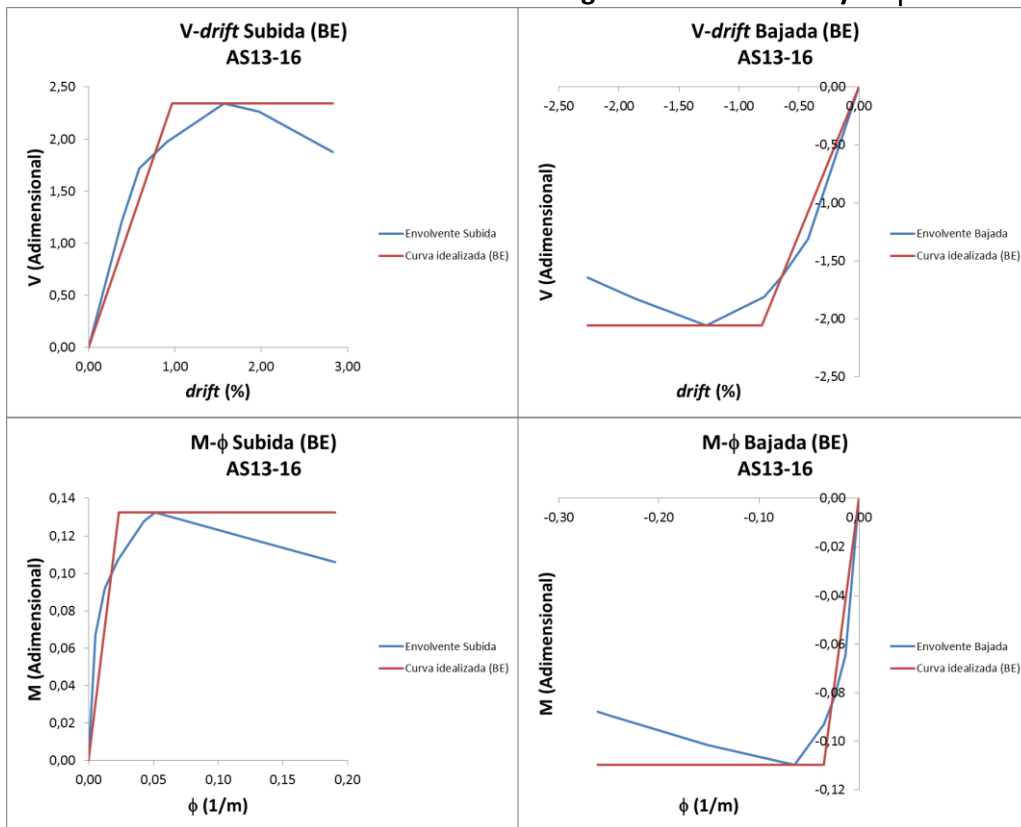


SERIE 4

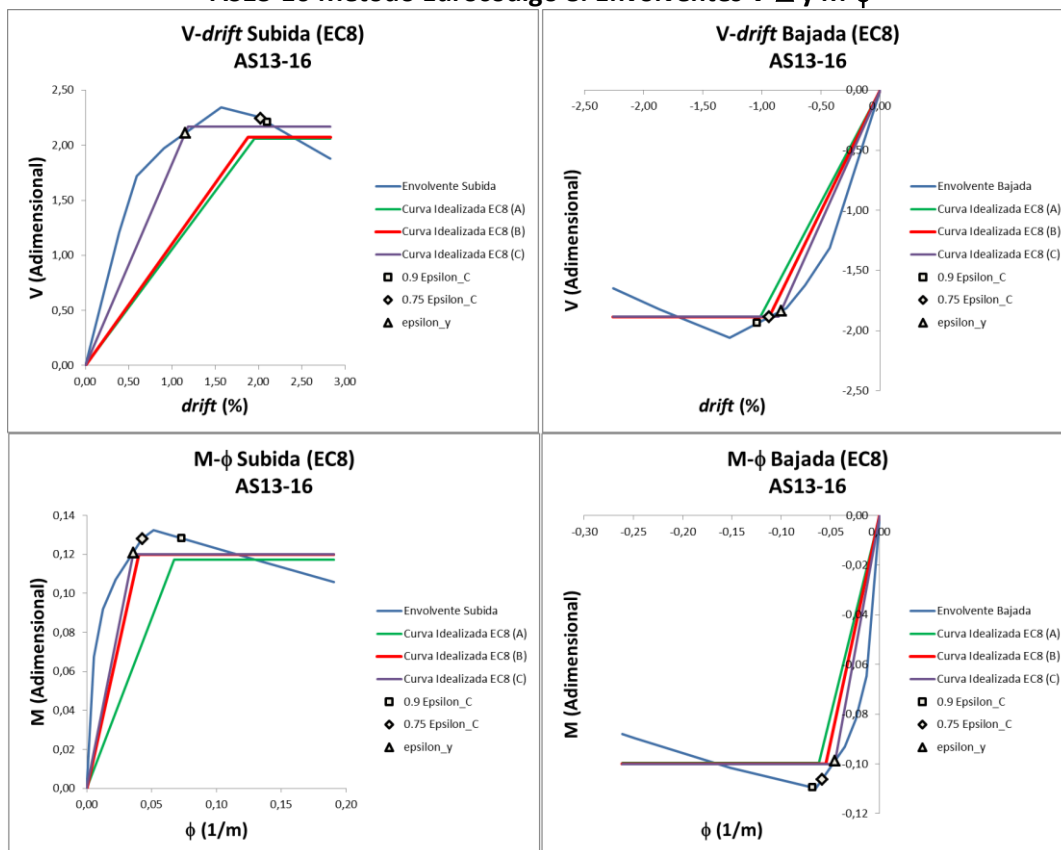
AS13-16 Método Aproximado. Envoltentes V- Δ y M- ϕ



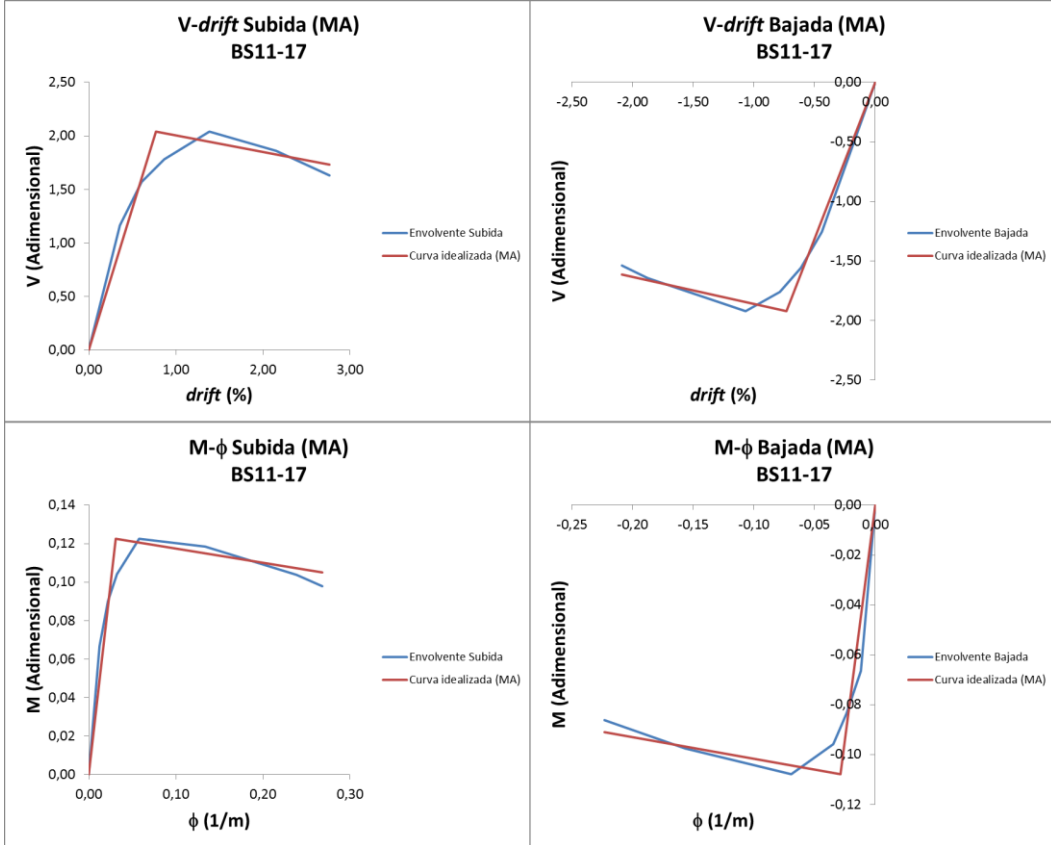
AS13-16 Método del Balance de Energía. Envolventes V- Δ y M- ϕ



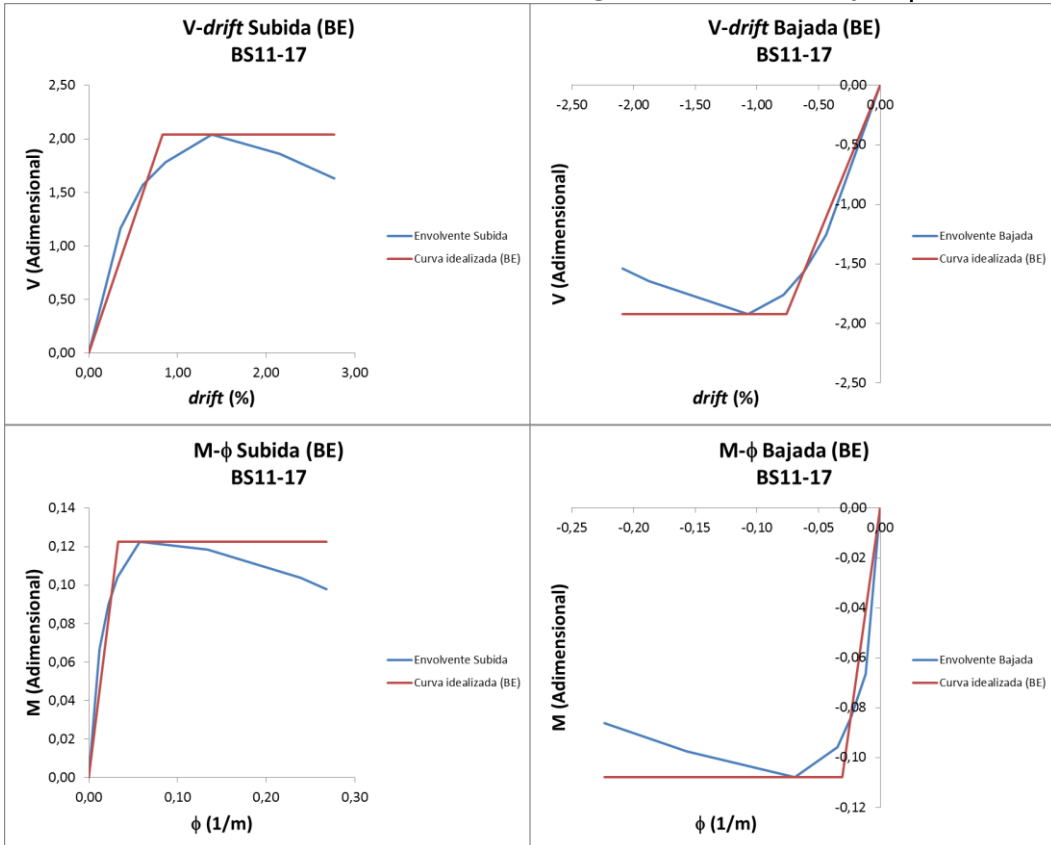
AS13-16 Método Eurocódigo 8. Envolventes V- Δ y M- ϕ



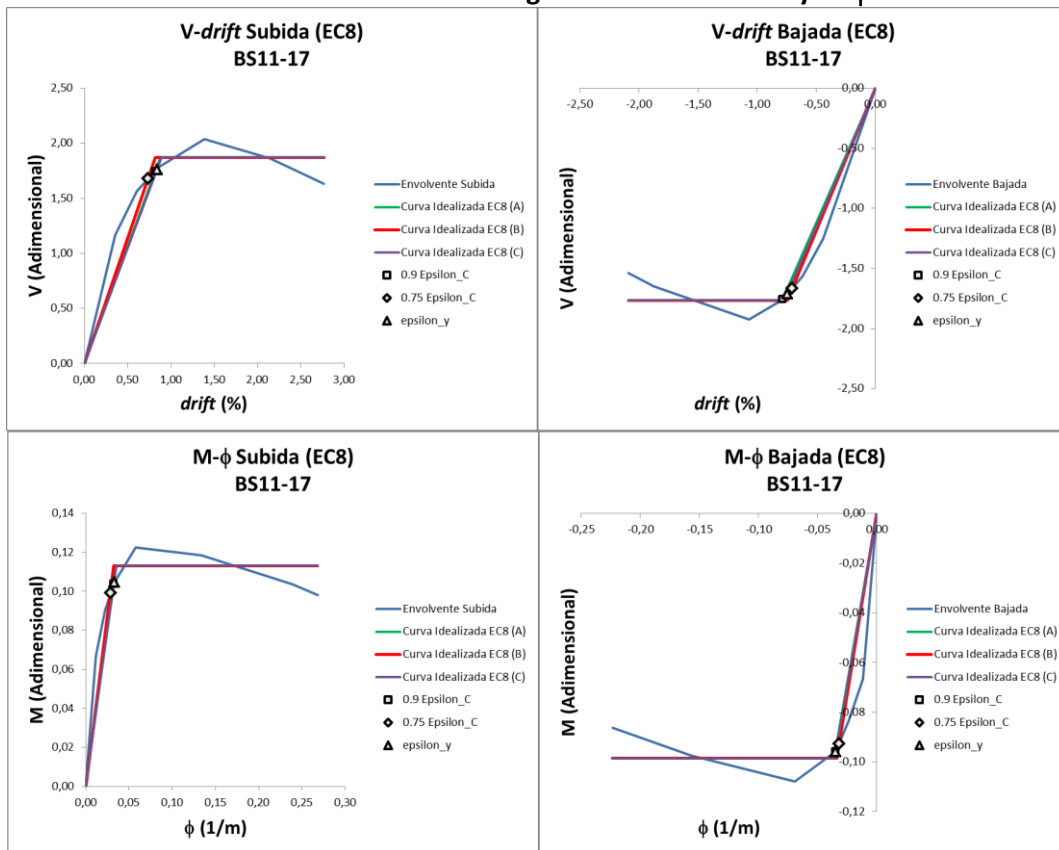
BS11-17 Método Aproximado. Envoltentes V- Δ y M- ϕ



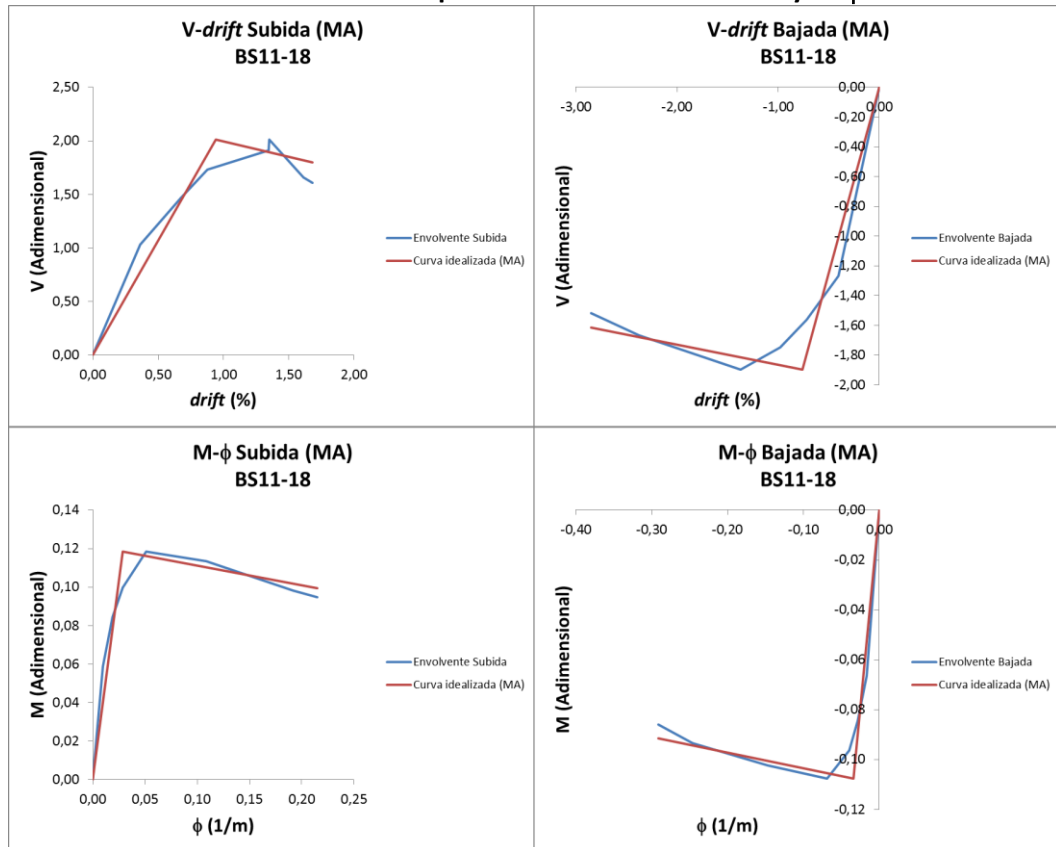
BS11-17 Método del Balance de Energía. Envoltentes V- Δ y M- ϕ



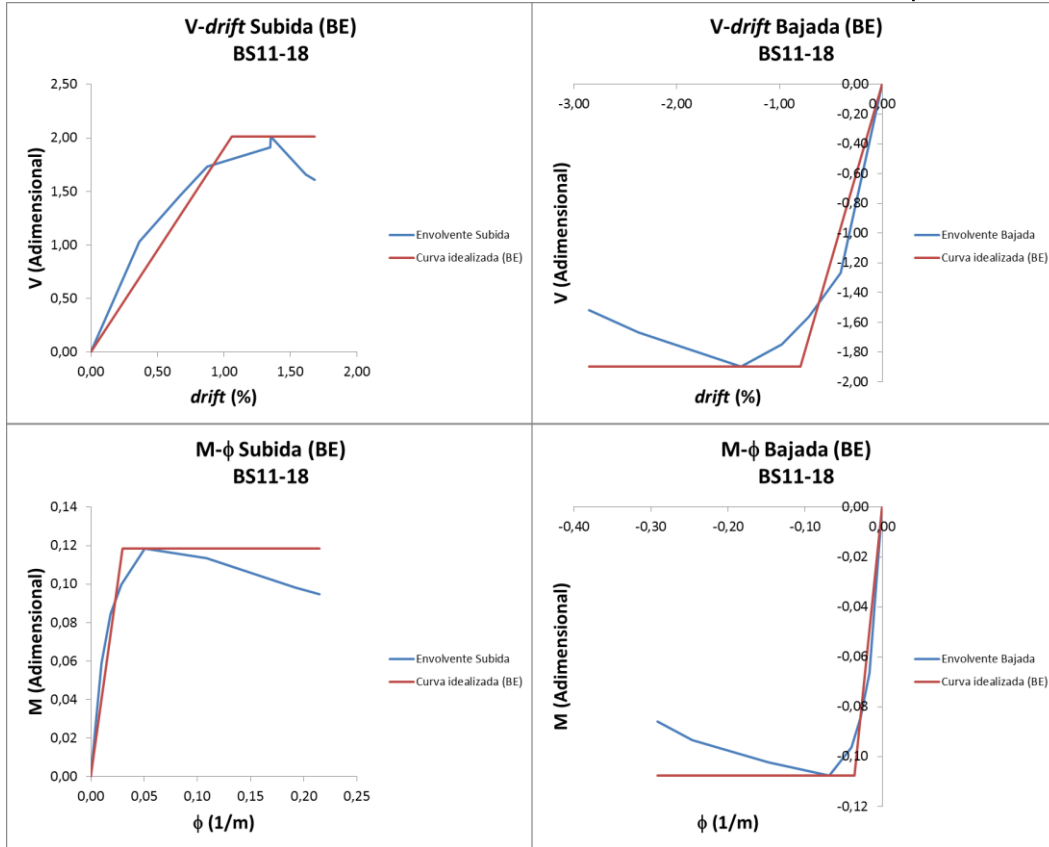
BS11-17 Método Eurocódigo 8. Envolventes V- Δ y M- ϕ



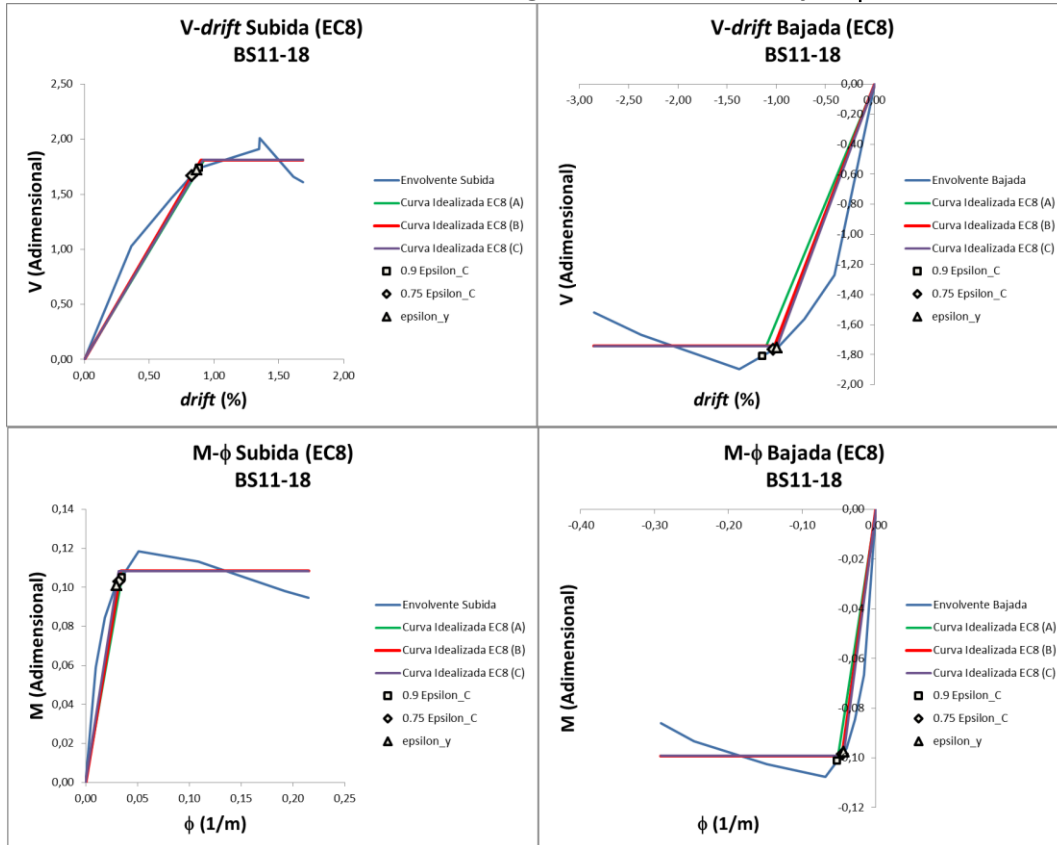
BS11-18 Método Aproximado. Envolventes V- Δ y M- ϕ



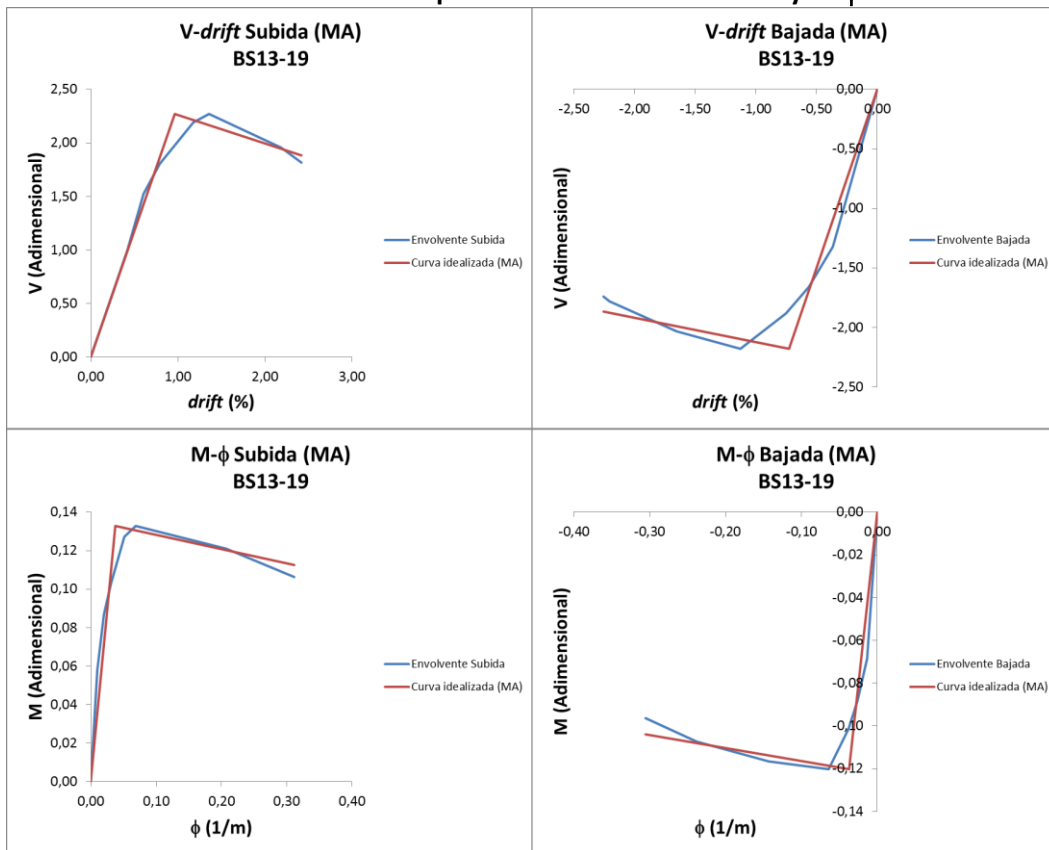
BS11-18 Método del Balance de Energía. Envoltentes V- Δ y M- ϕ



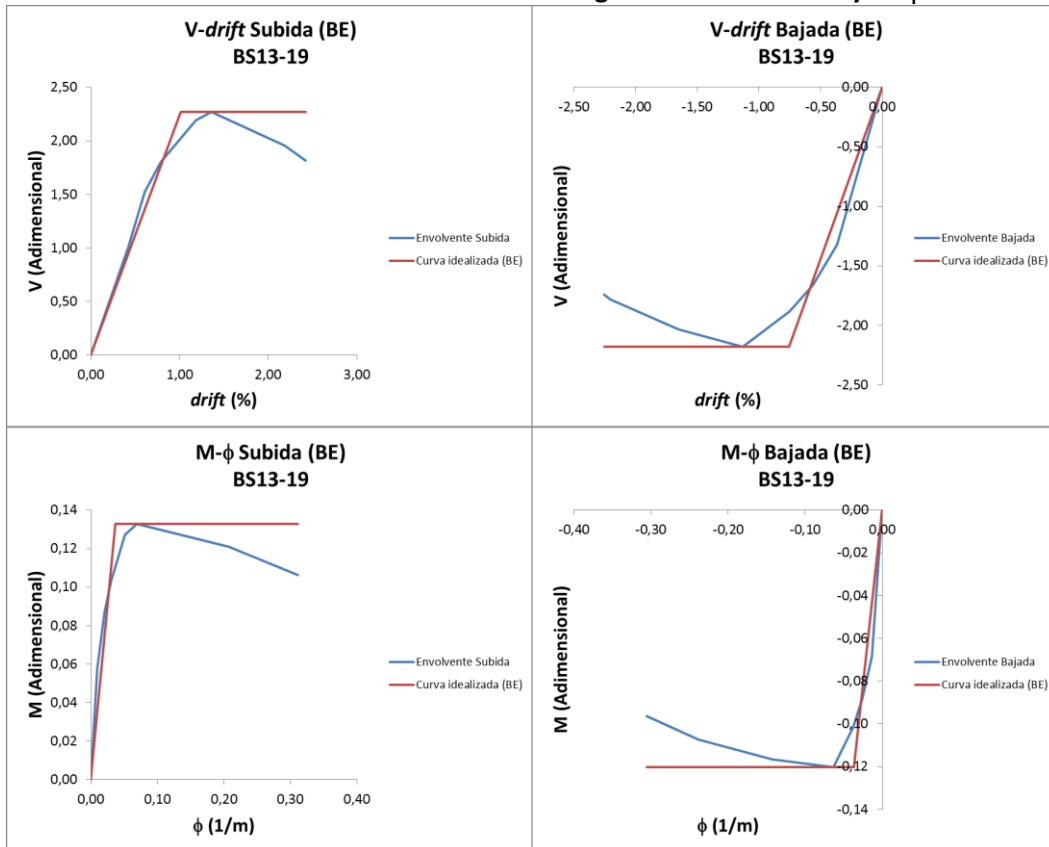
BS11-18 Método Eurocódigo 8. Envoltentes V- Δ y M- ϕ



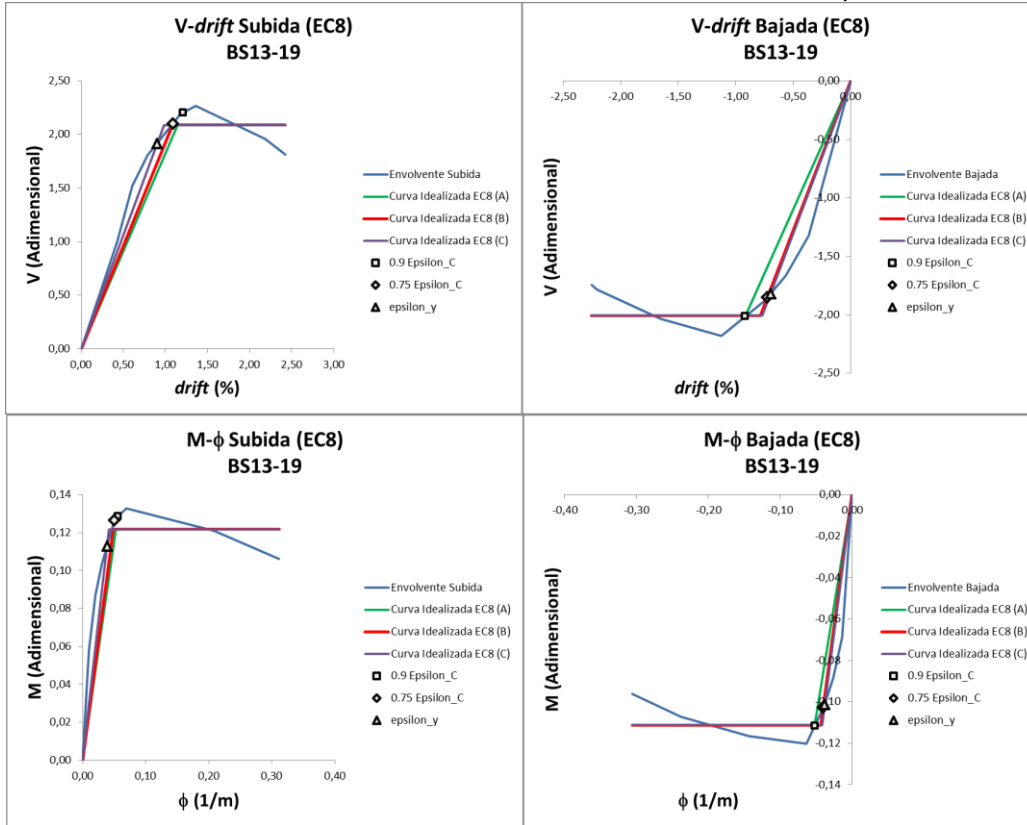
BS13-19 Método Aproximado. Envolventes $V-\Delta$ y $M-\phi$



BS13-19 Método del Balance de Energía. Envolventes $V-\Delta$ y $M-\phi$

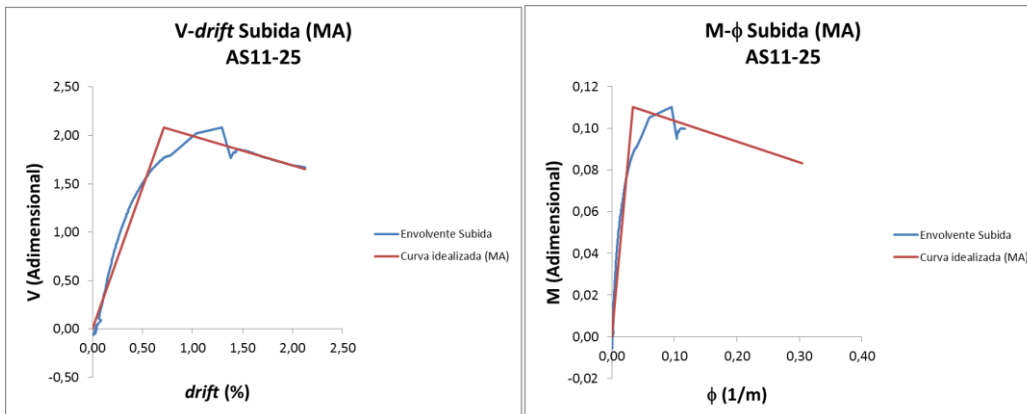


BS13-19 Método Eurocódigo 8. Envoltentes V- Δ y M- ϕ

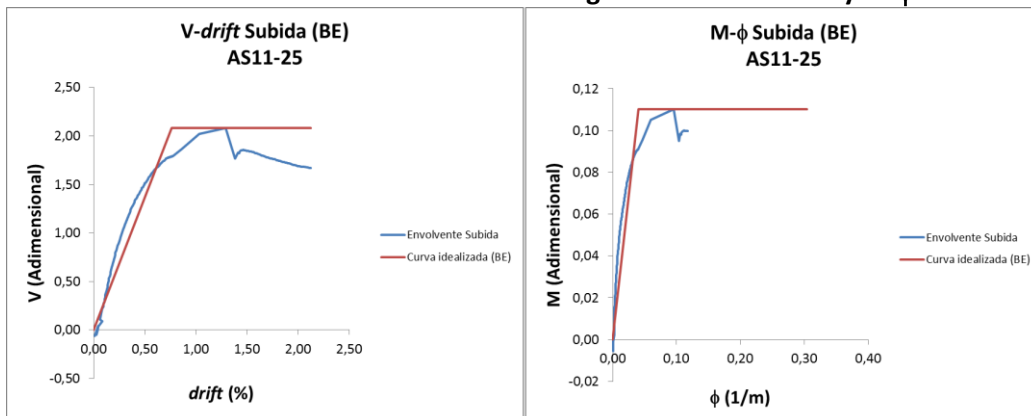


SERIE 5

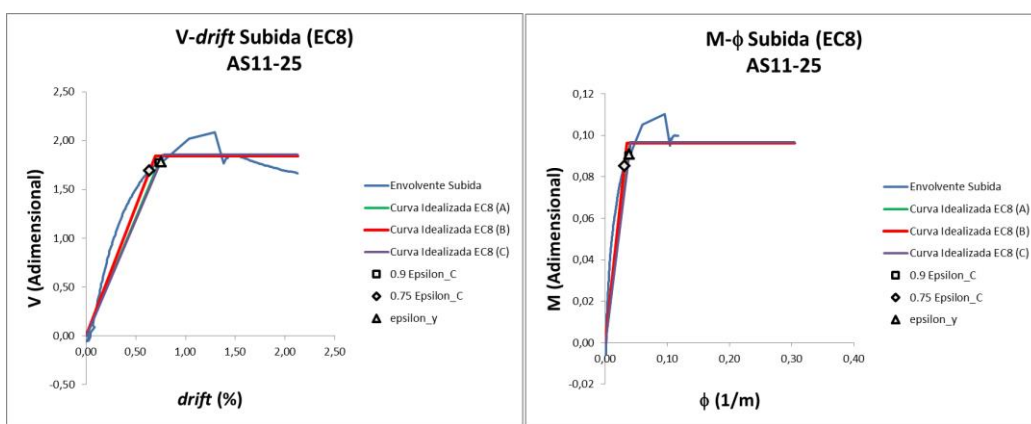
AS11-25 Método Aproximado. Envoltentes V- Δ y M- ϕ



AS11-25 Método del Balance de Energía. Envolventes V- Δ y M- ϕ



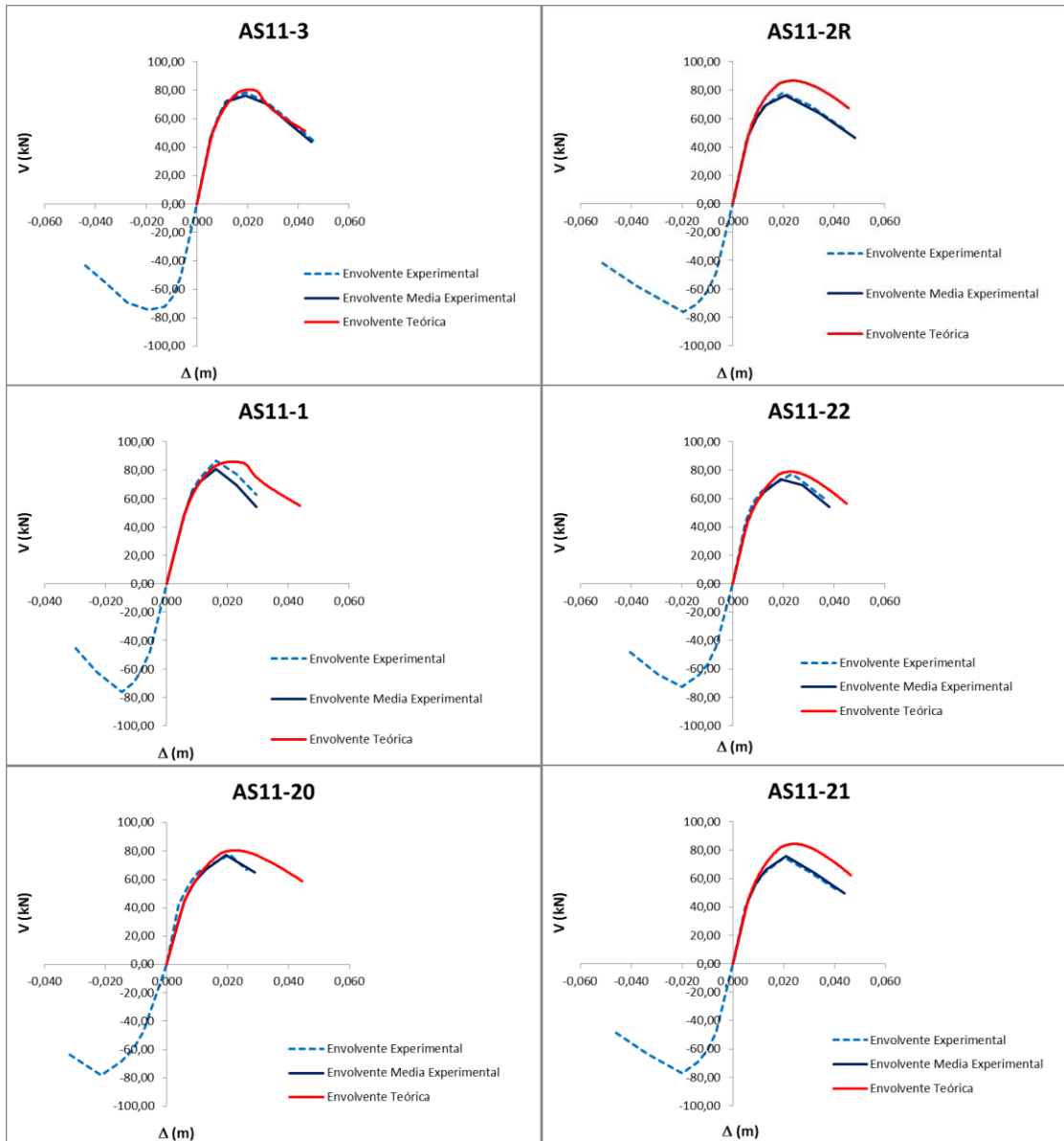
AS11-25 Método Eurocódigo 8. Envolventes V- Δ y M- ϕ



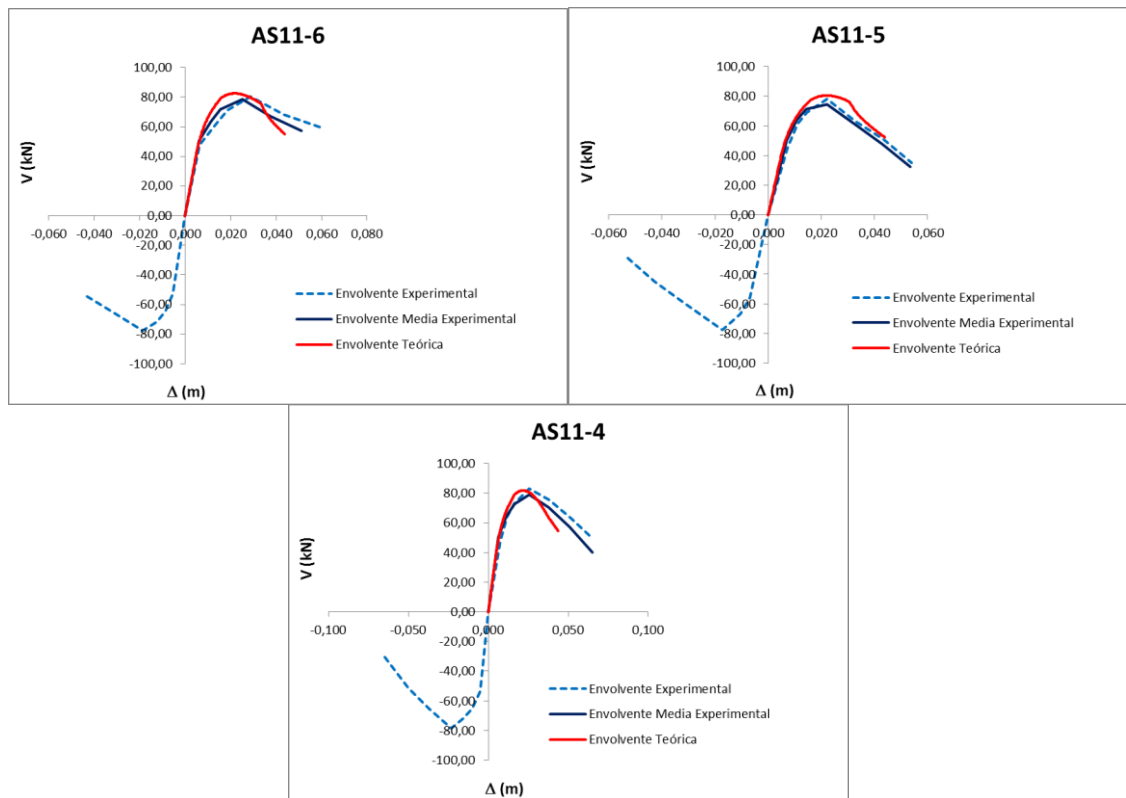
Envoltentes obtenidas mediante un modelo teórico de referencia: cortante - desplazamiento y momento – curvatura

- ENVOLTENTES CORTANTE – DESPLAZAMIENTO

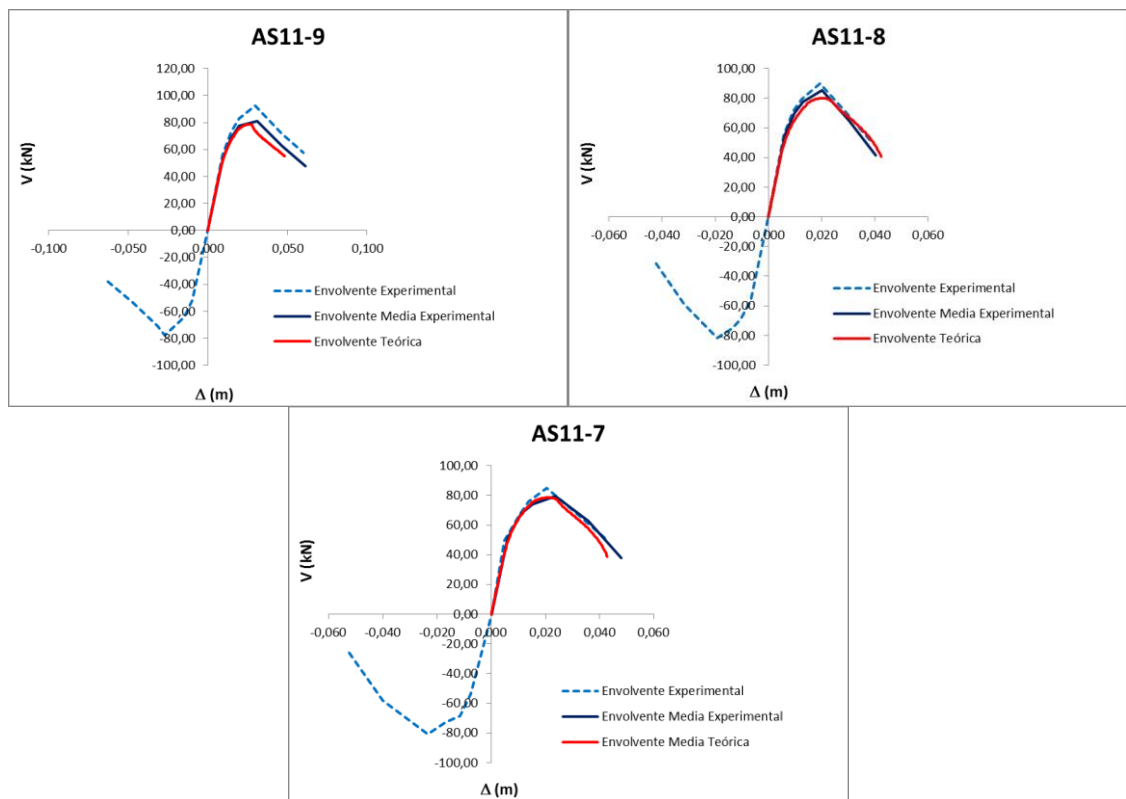
- SERIE 1: Separación de la armadura transversal



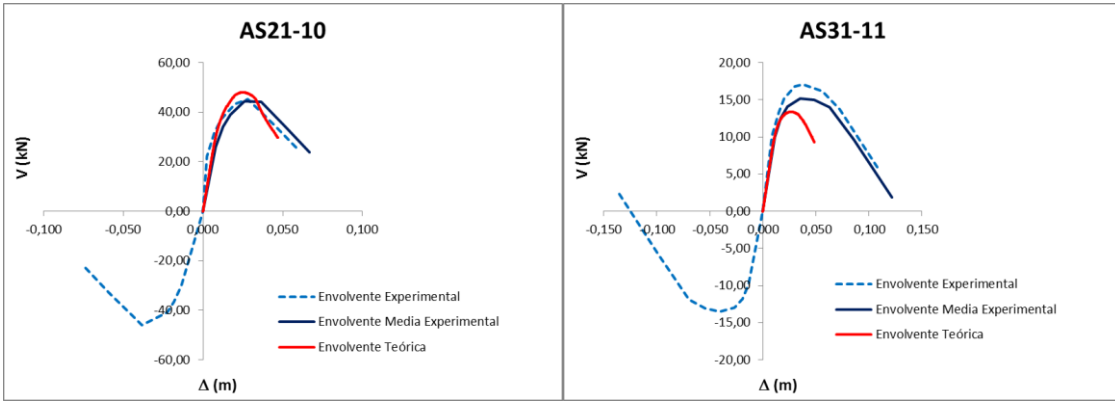
• **SERIE 1: Tipo de fibras** (Añadiendo AS11-3, AS11-2R, AS11-1 y AS11-22)



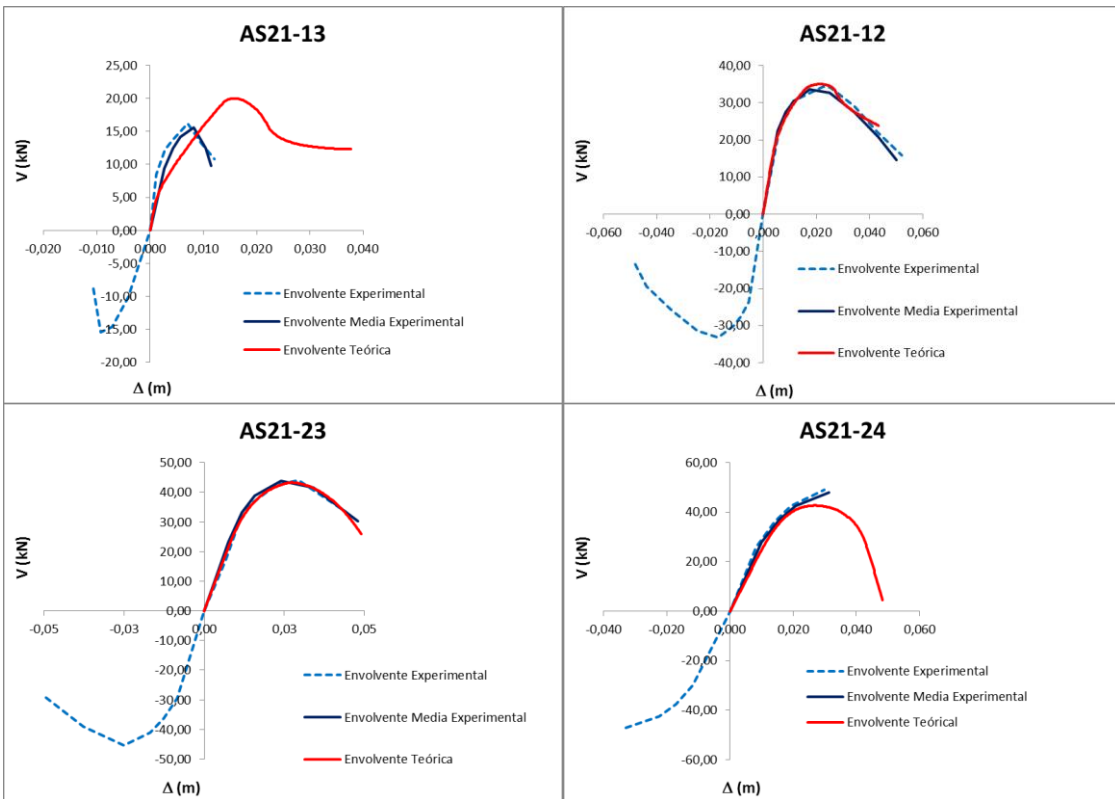
• **SERIE 1: Volumen de fibras** (Añadiendo AS11-3, AS11-2R, AS11-1 y AS11-22)



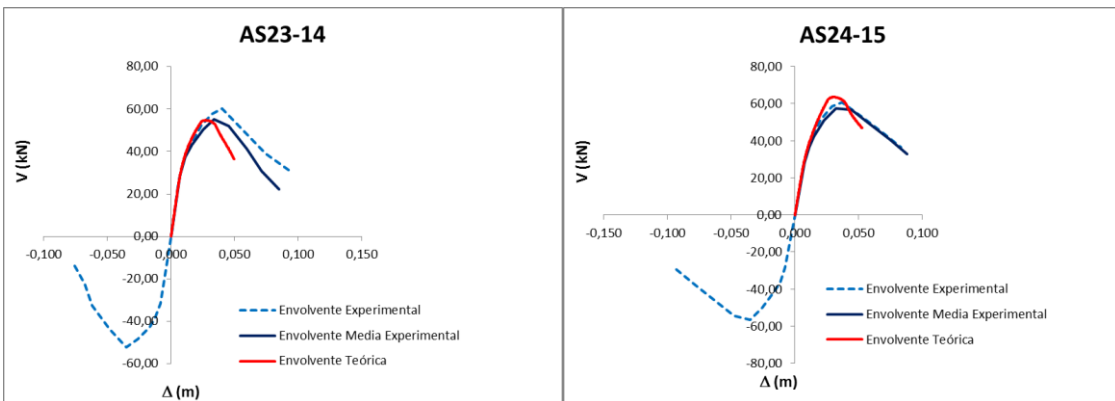
• **SERIE 2: Esbeltez (Añadiendo AS11-2R)**

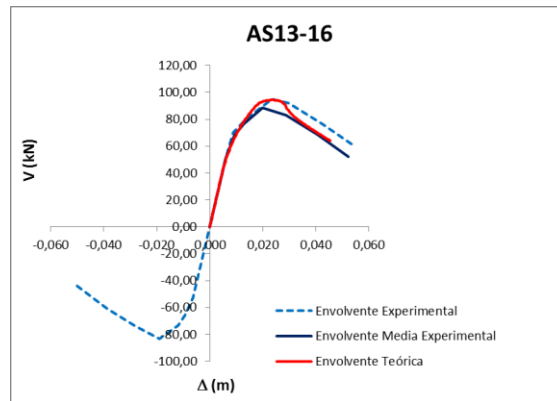


• **SERIE 2: Nivel de axil (Añadiendo AS21-10)**

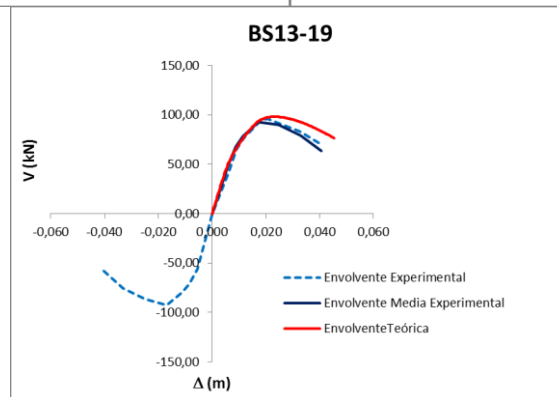
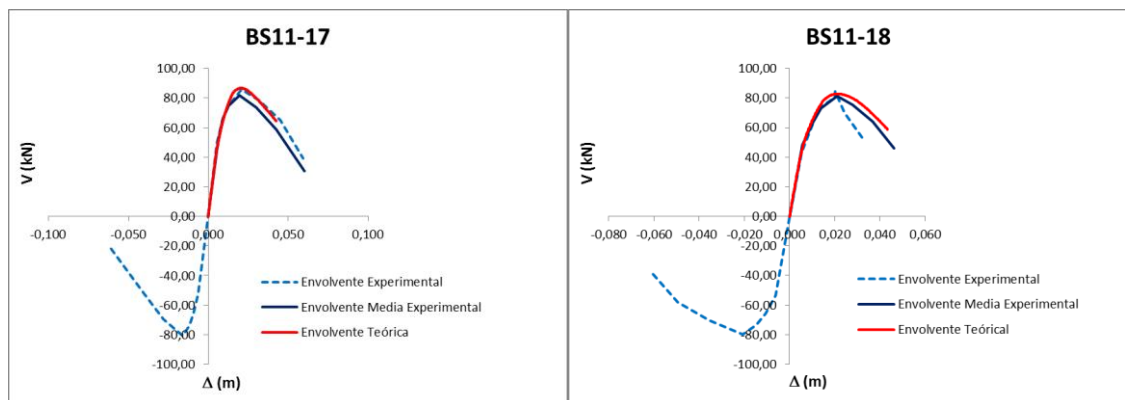


• **SERIE 3: Cuantía de la armadura longitudinal (Añadiendo AS11-1, AS11-22 y AS21-10)**

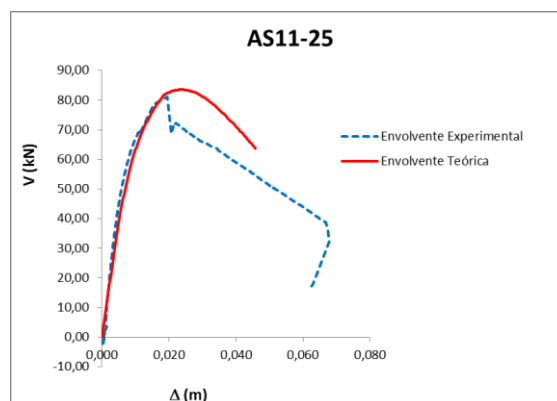




- **SERIE 4: Recubrimiento relativo (Añadiendo AS11-1, AS11-22 y AS13-16)**

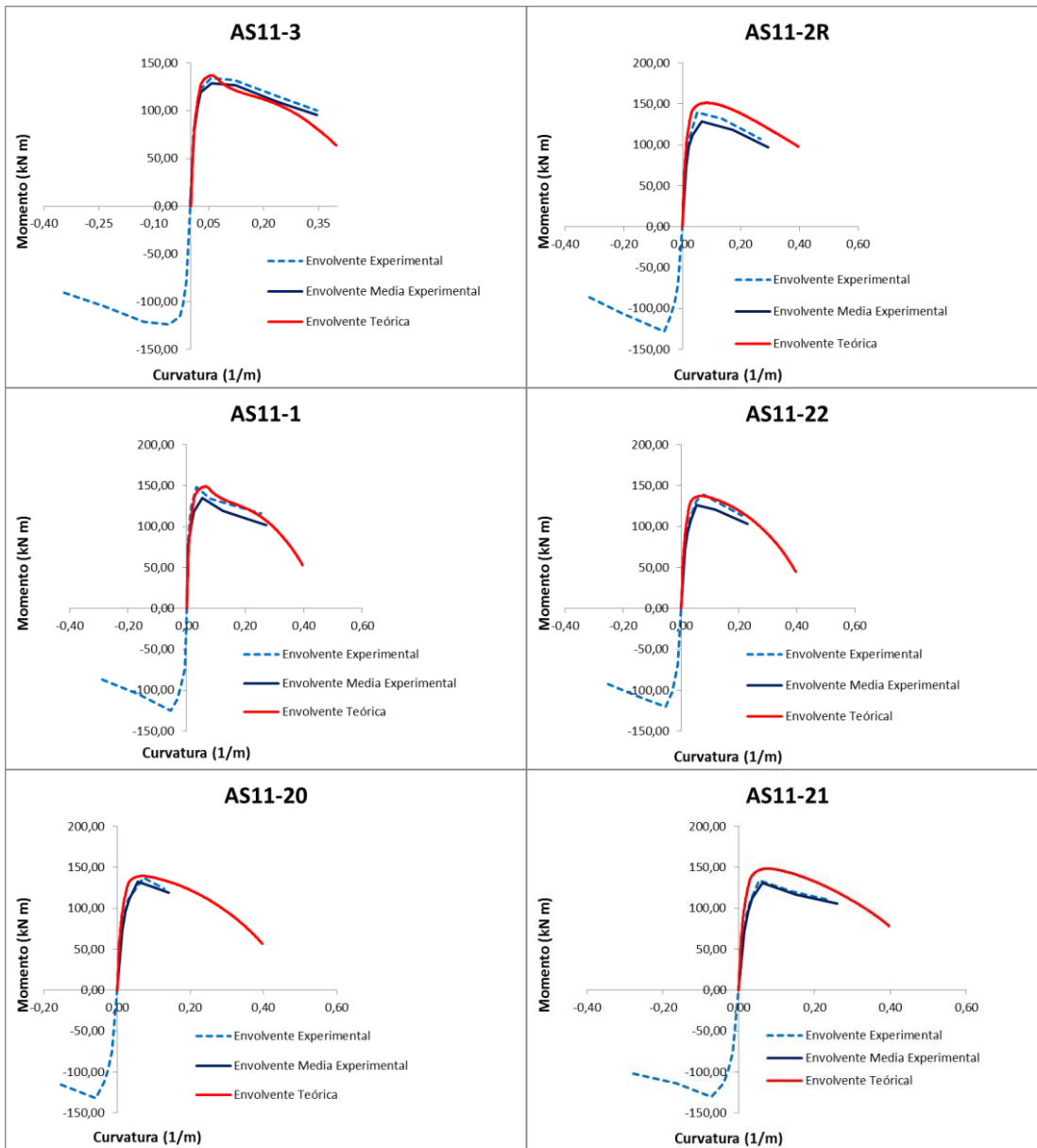


- **SERIE 5: Tipo de carga (Añadiendo AS11-1 y AS11-22)**

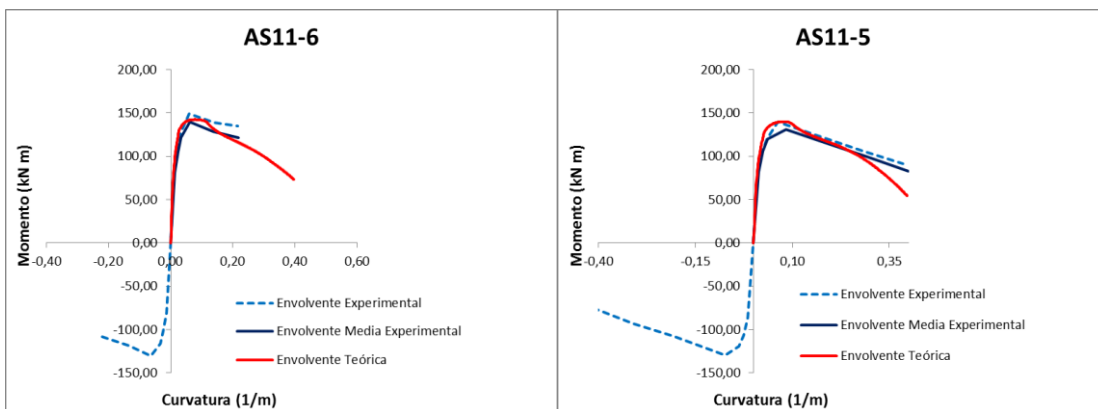


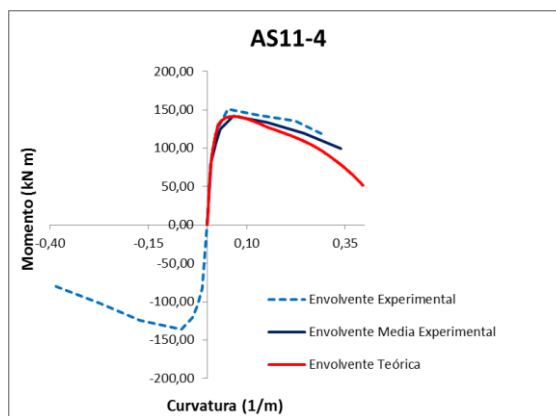
• ENVOLVENTES MOMENTO – CURVATURA

• SERIE 1: Separación de la armadura transversal

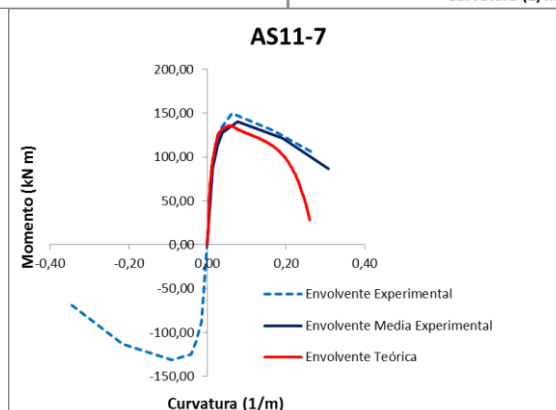
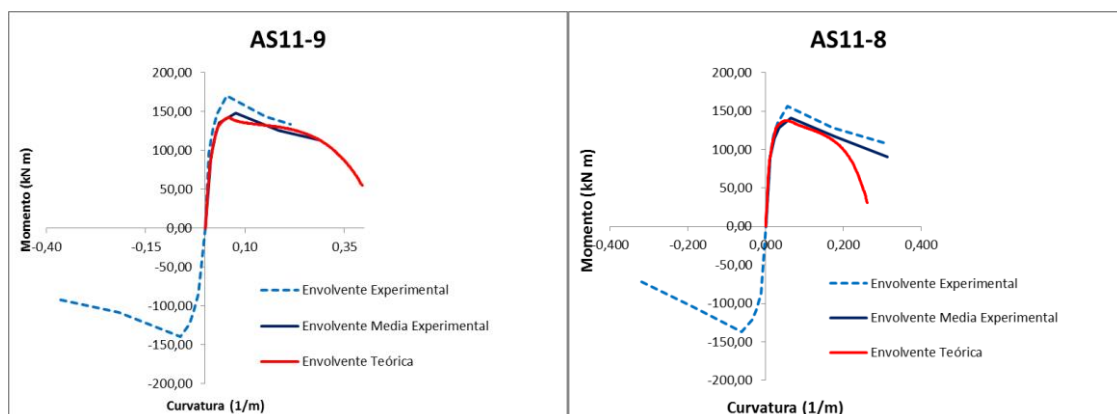


• SERIE 1: Tipo de fibras (Añadiendo AS11-3, AS11-2R, AS11-1 y AS11-22)

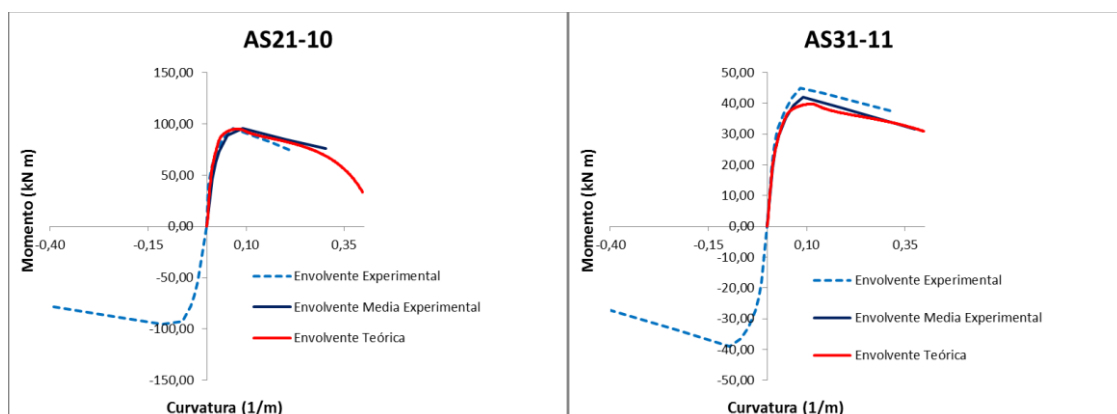




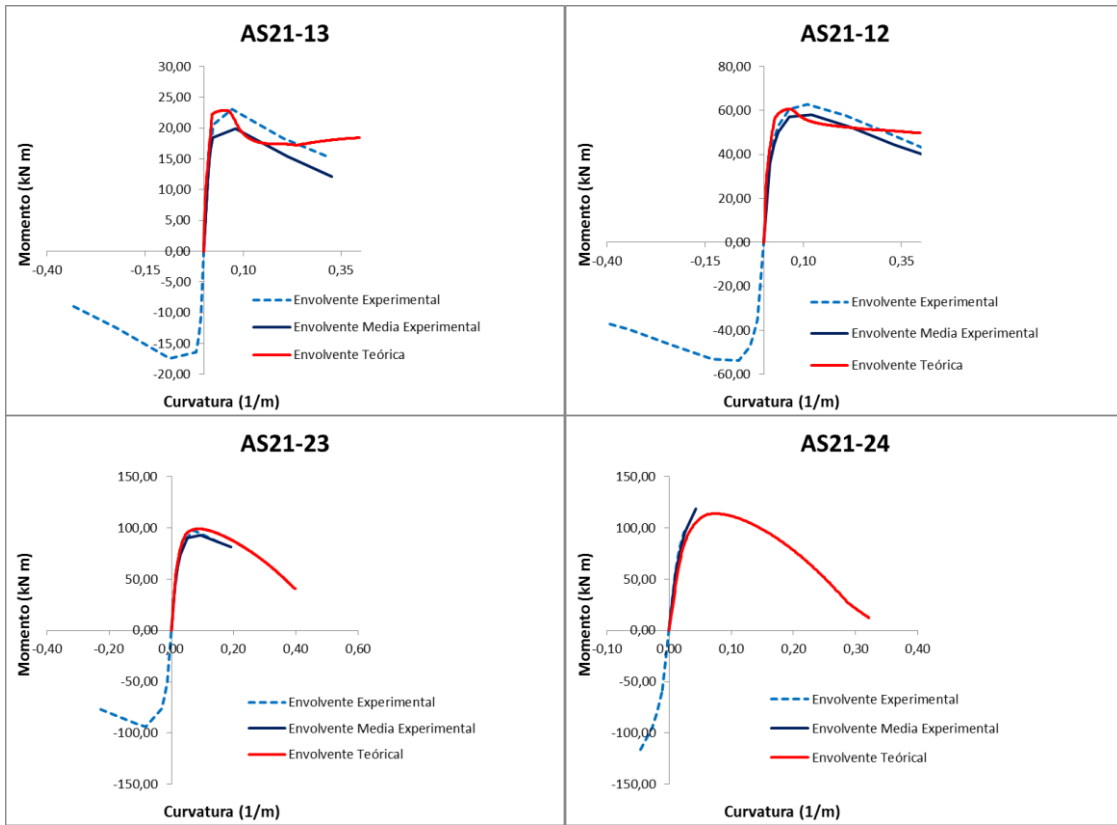
- **SERIE 1: Volumen de fibras** (Añadiendo AS11-3, AS11-2R, AS11-1 y AS11-22)



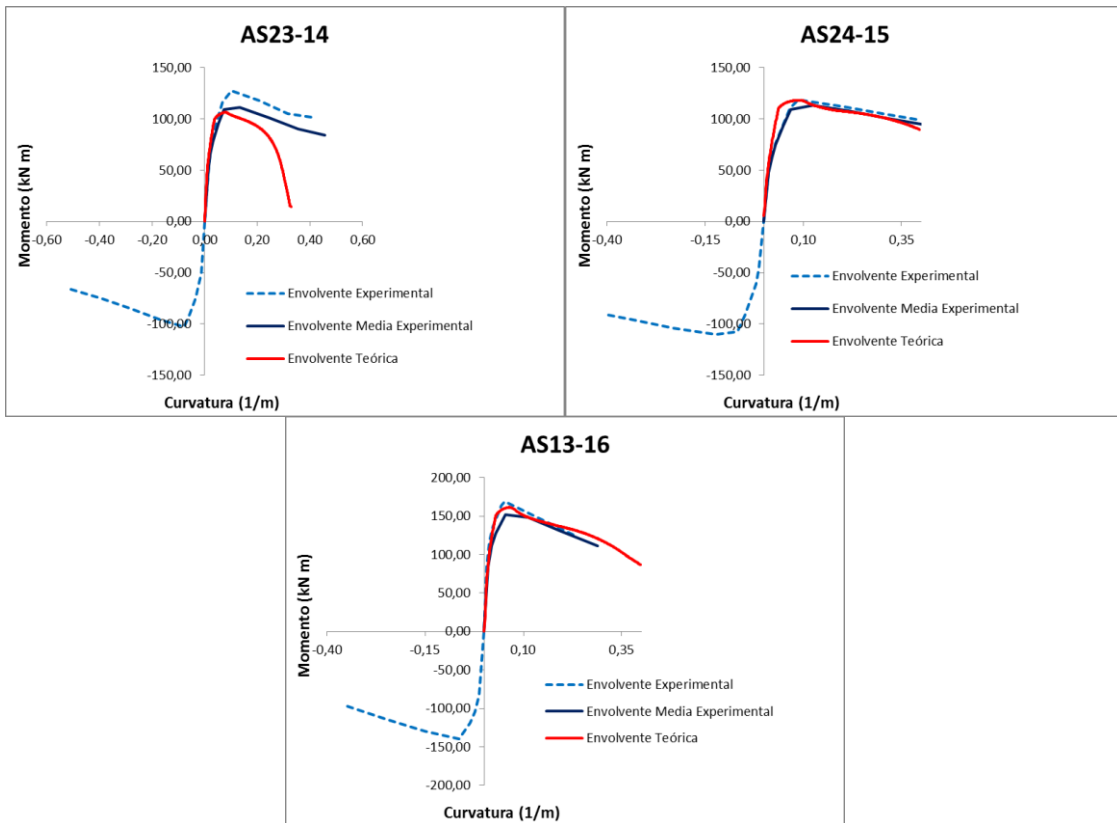
- **SERIE 2: Esbeltez** (Añadiendo AS11-2R)



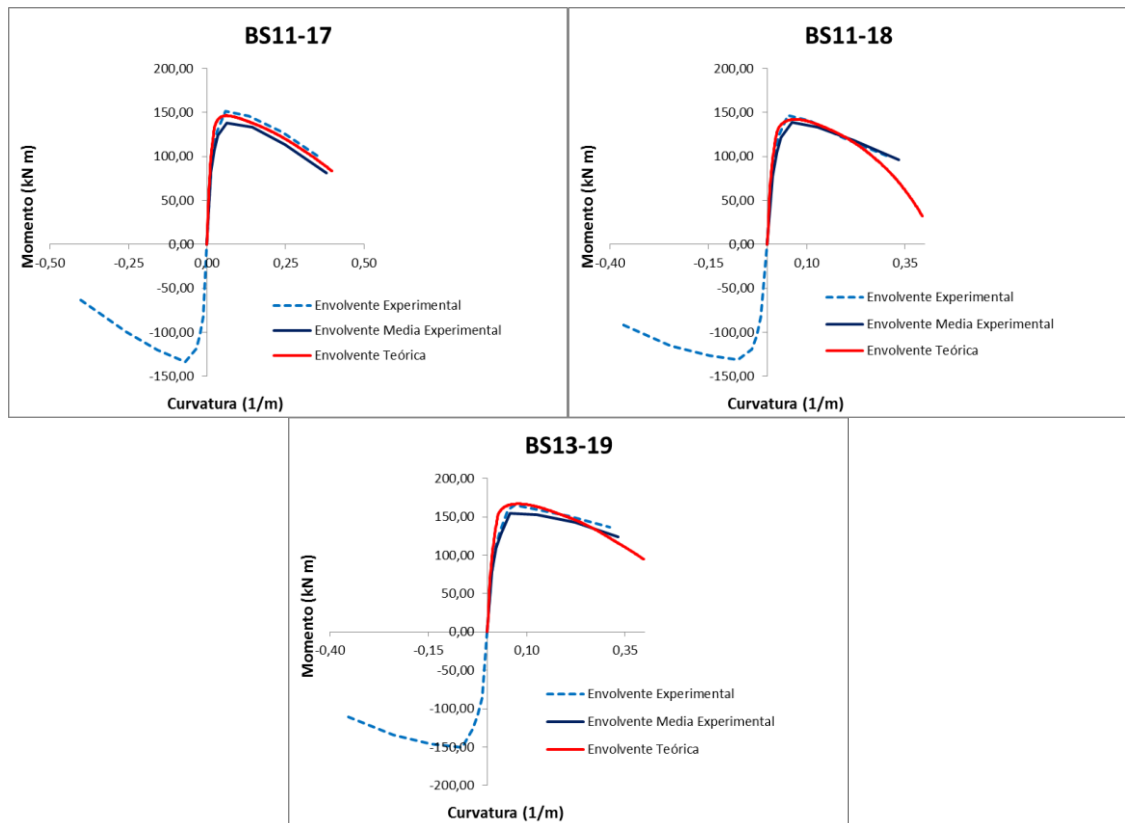
• **SERIE 2: Nivel de axil (Añadiendo AS21-10)**



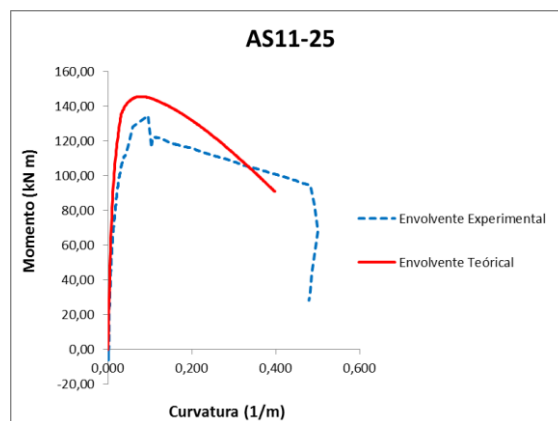
• **SERIE 3: Cuantía de la armadura longitudinal (Añadiendo AS11-1, AS11-22 y AS21-10)**



- **SERIE 4: Recubrimiento relativo (Añadiendo AS11-1, AS11-22 y AS13-16)**



- **SERIE 5: Tipo de carga (Añadiendo AS11-1 y AS11-22)**



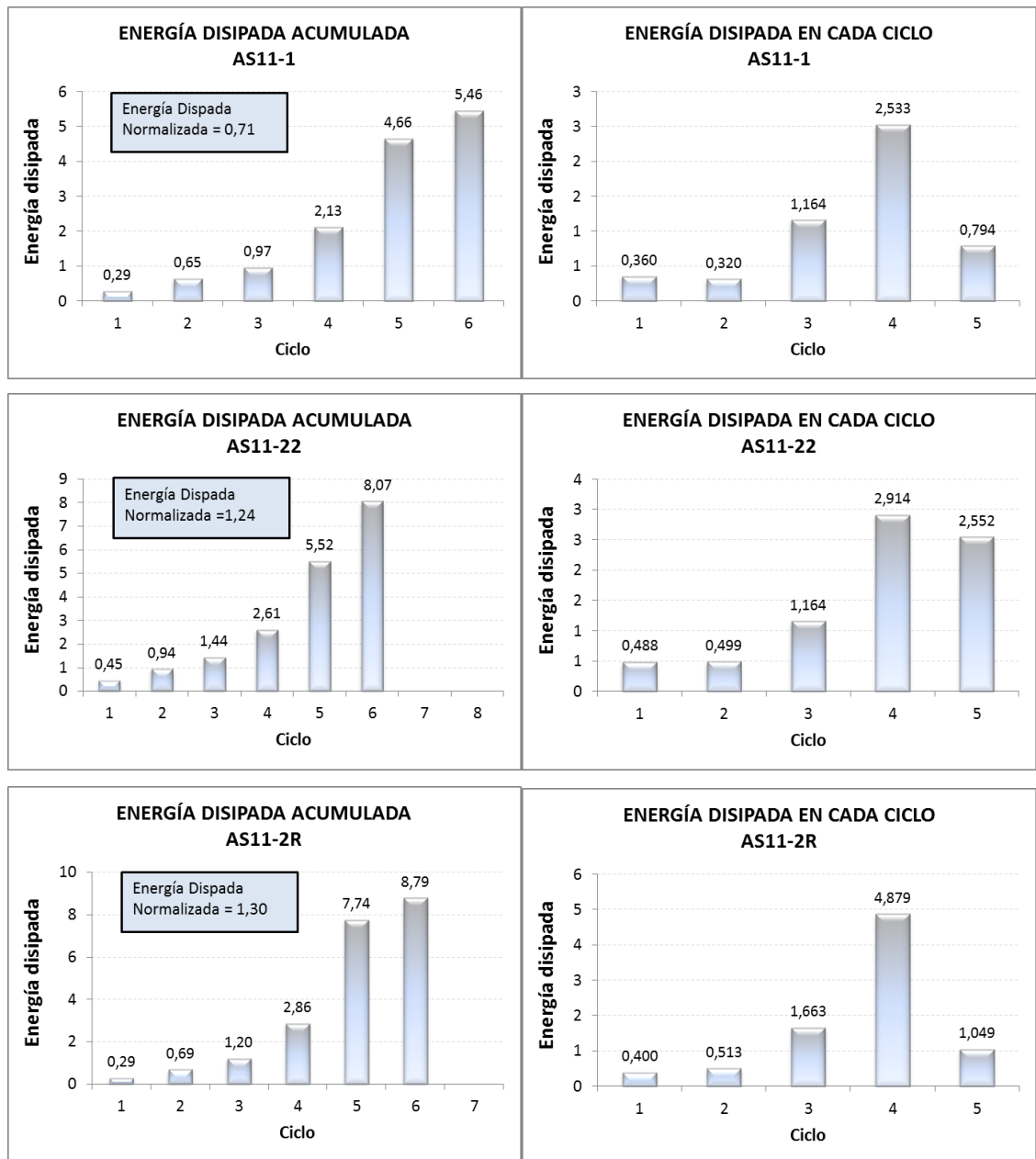
ANEJO F

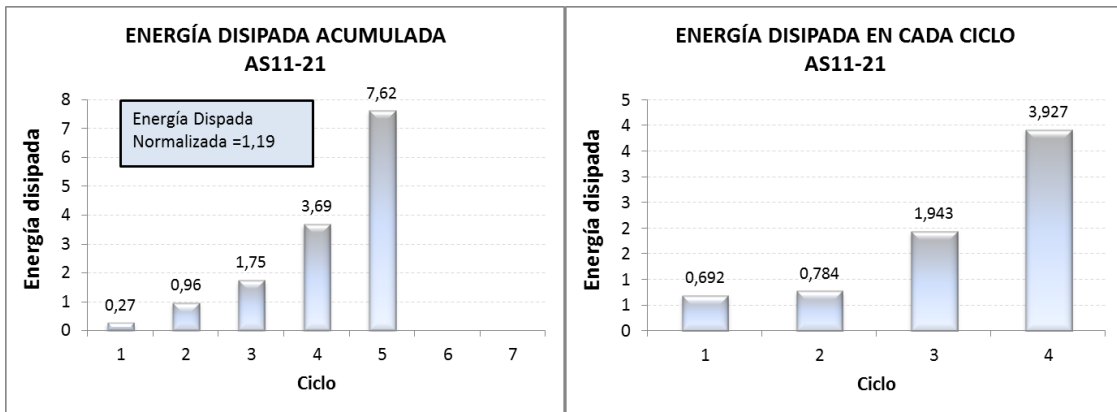
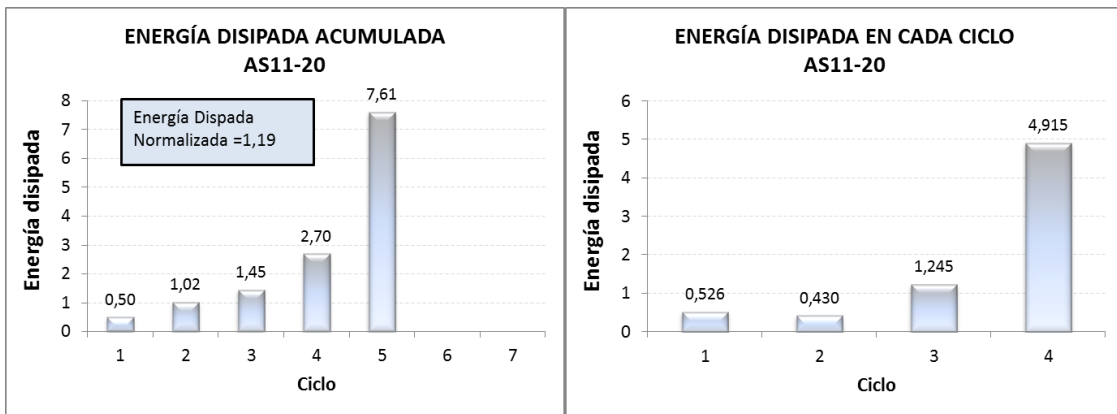
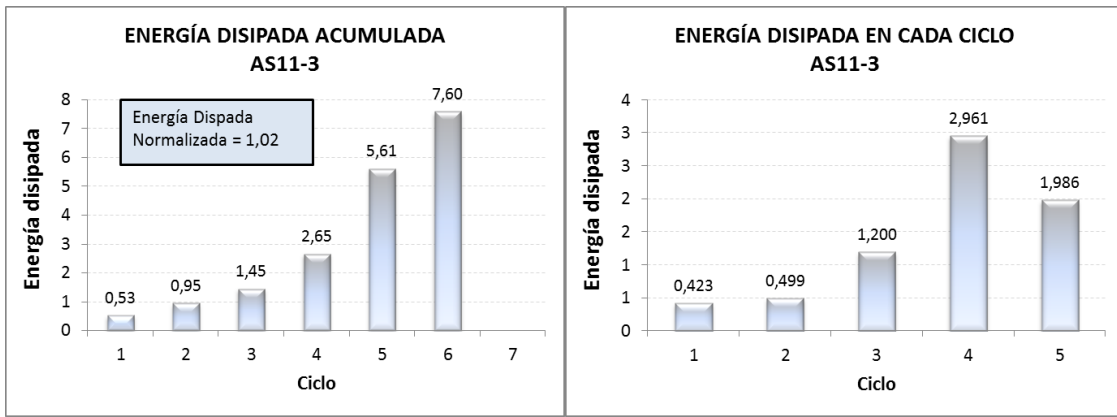
Anejo F: Energía de disipación

Se recapitulan las gráficas de la energía disipada en cada ciclo y la acumulada para cada soporte.

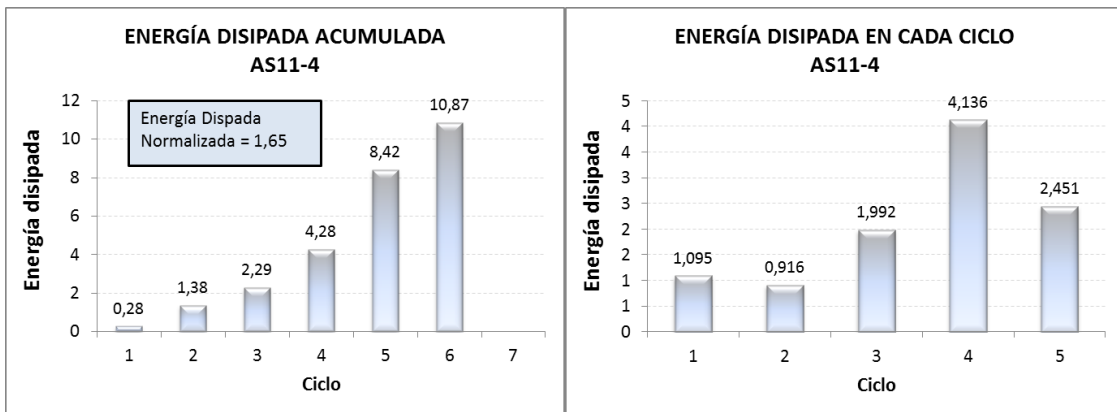
Energía de disipación: Acumulada y disipada por ciclo

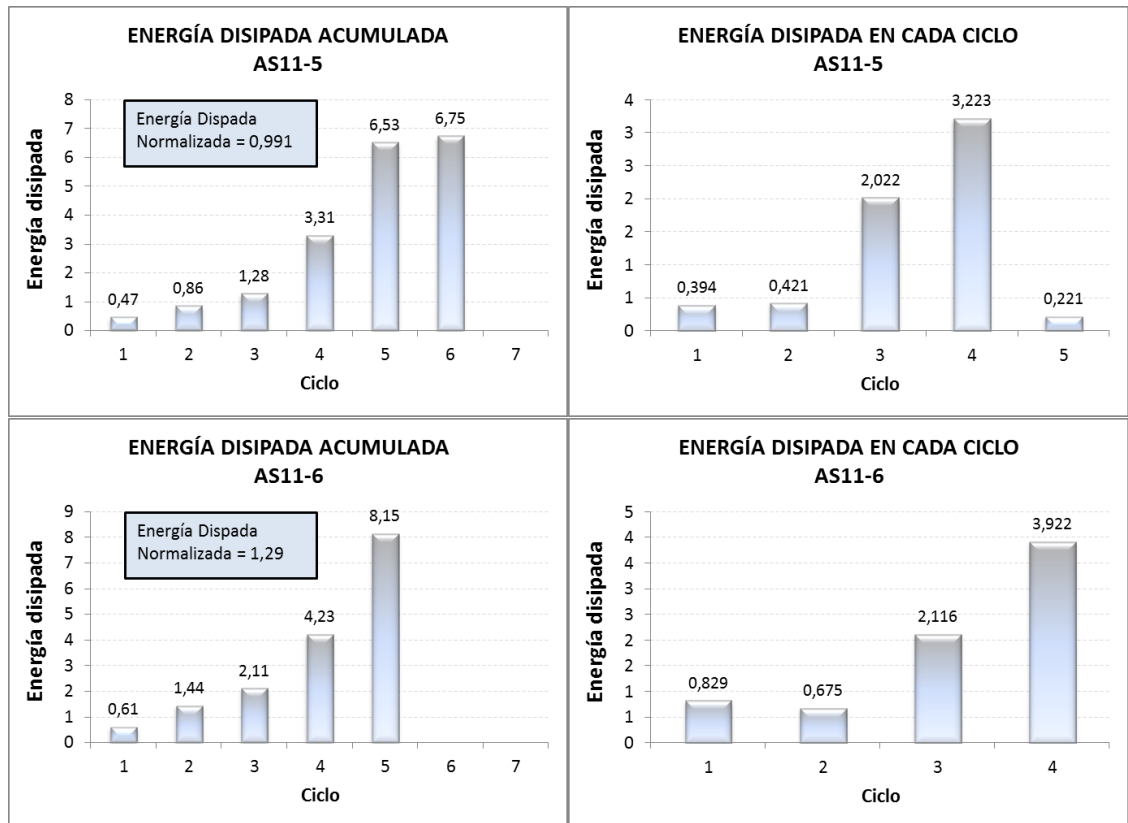
- **SERIE 1: Separación de la armadura transversal**



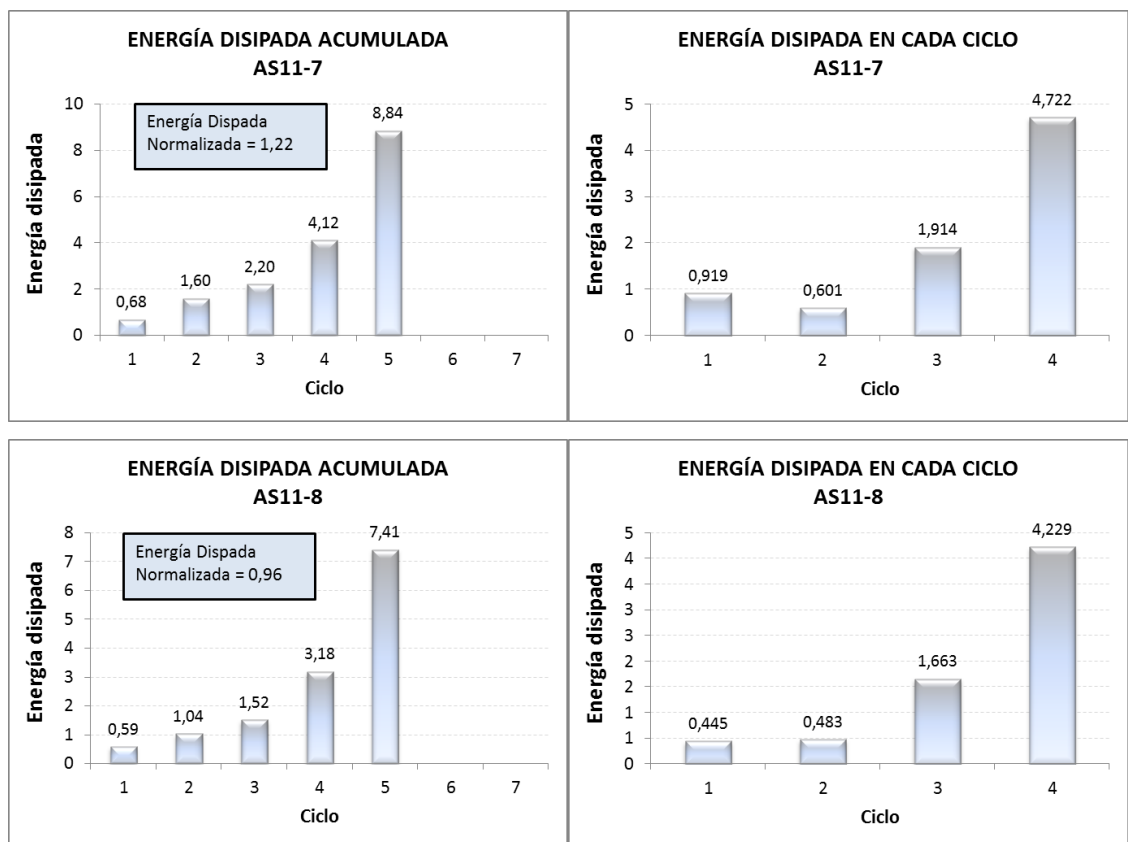


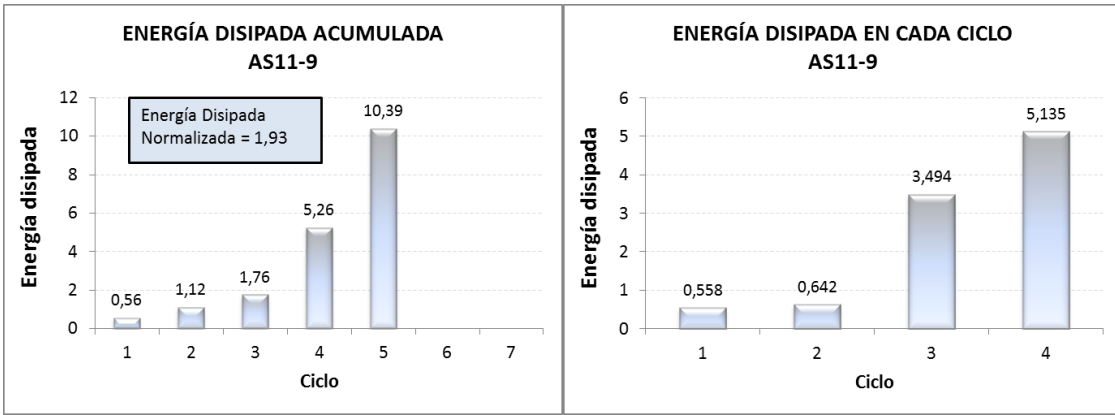
• **SERIE 1: Tipo de fibras** (Añadiendo AS11-3, AS11-2R, AS11-1 y AS11-22)



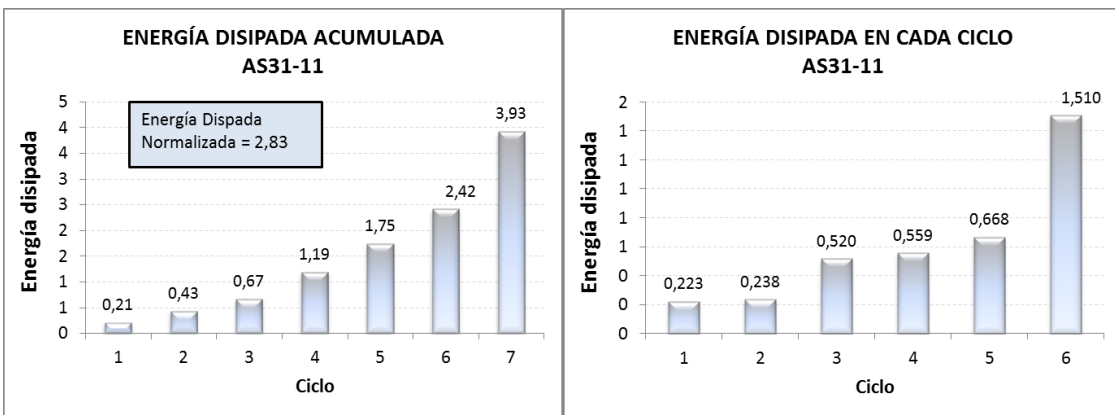
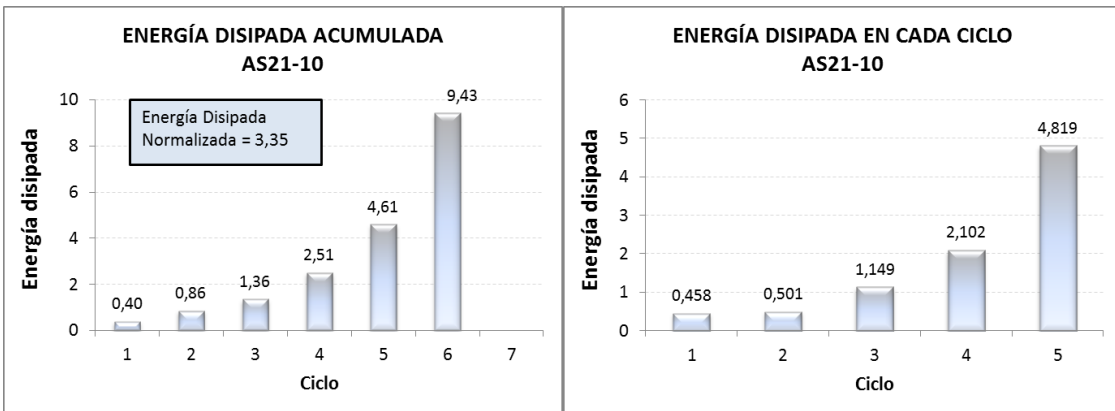


• **SERIE 1: Volumen de fibras (Añadiendo AS11-3, AS11-2R, AS11-1 y AS11-22)**

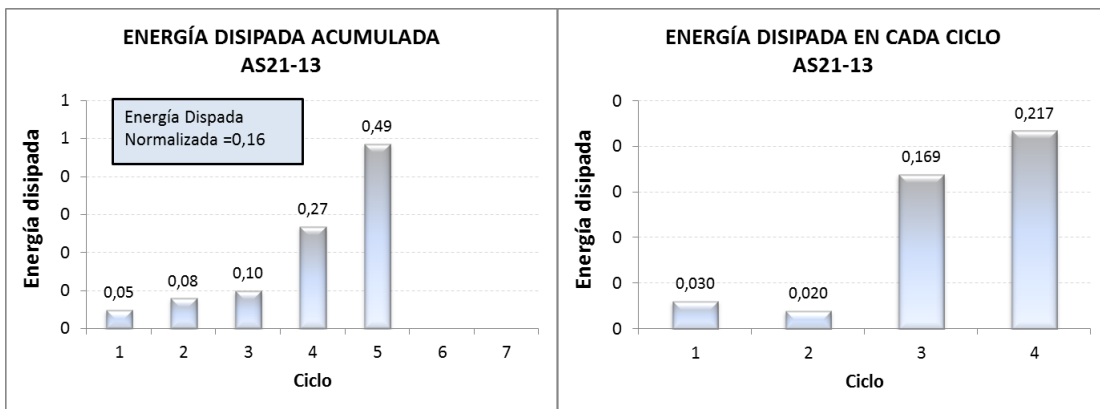


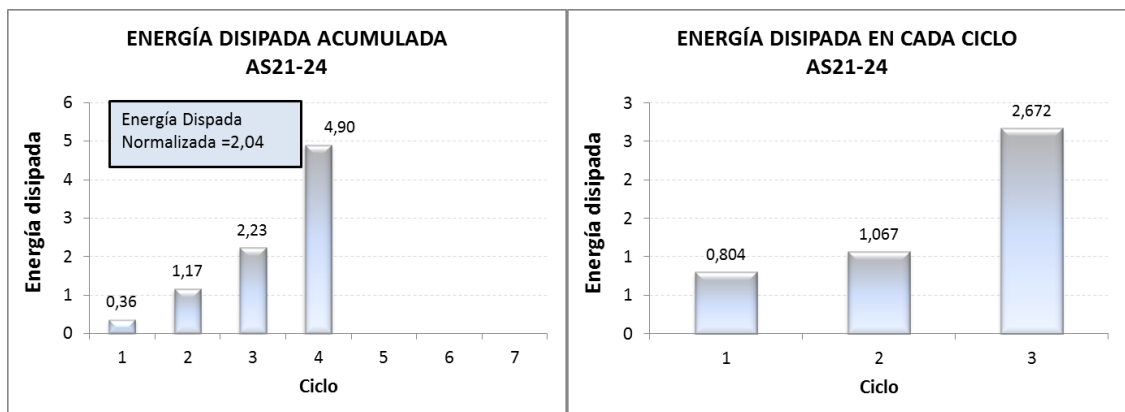
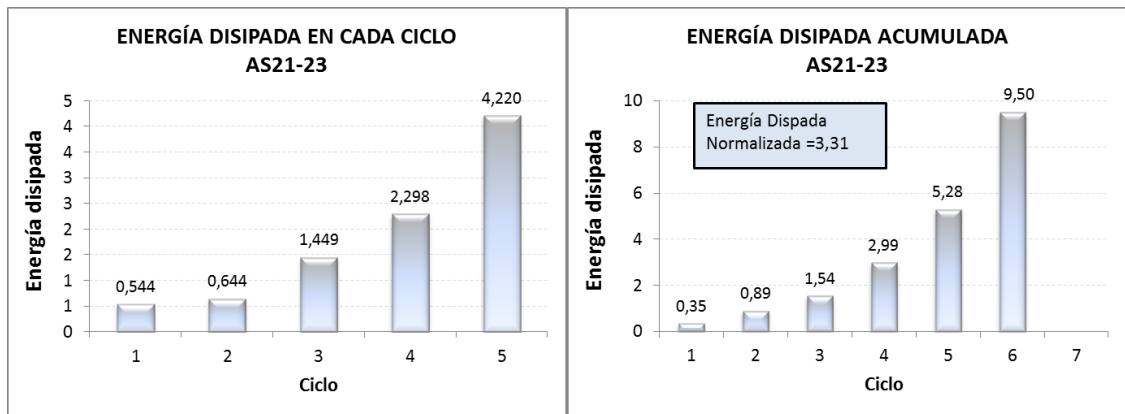
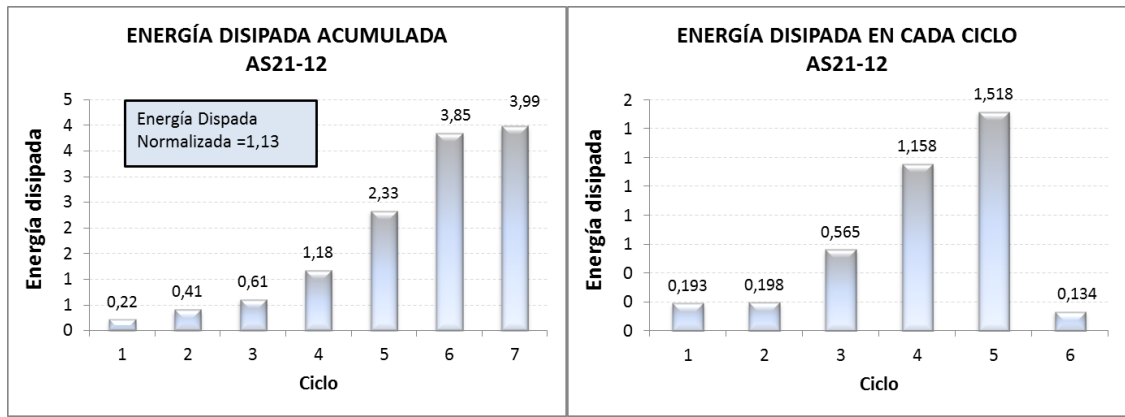


• **SERIE 2: Esbeltez (Añadiendo AS11-2R)**

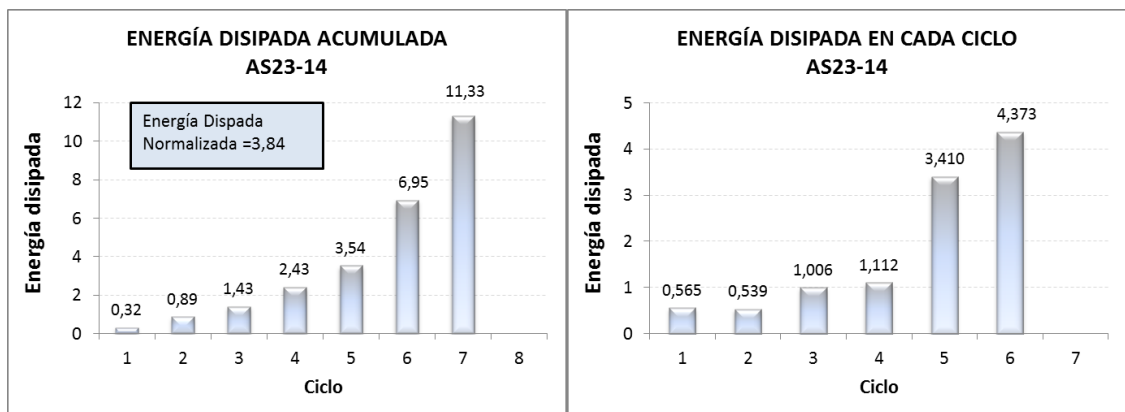


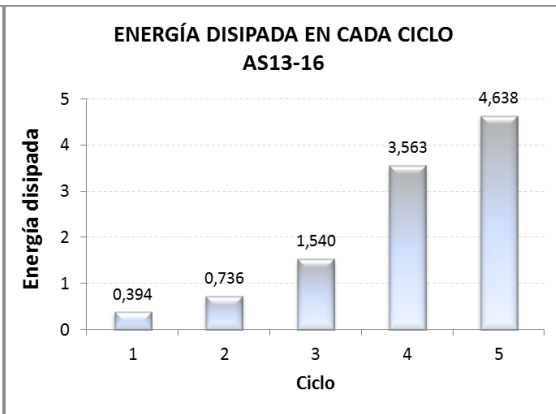
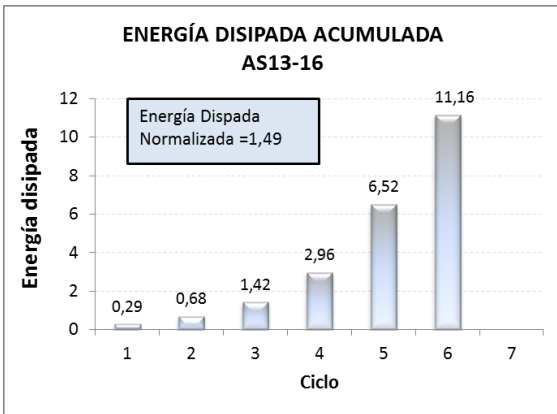
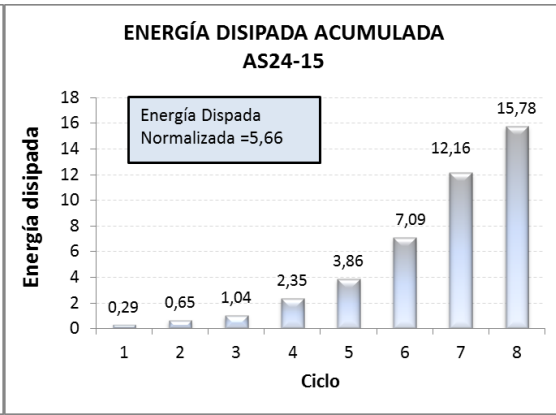
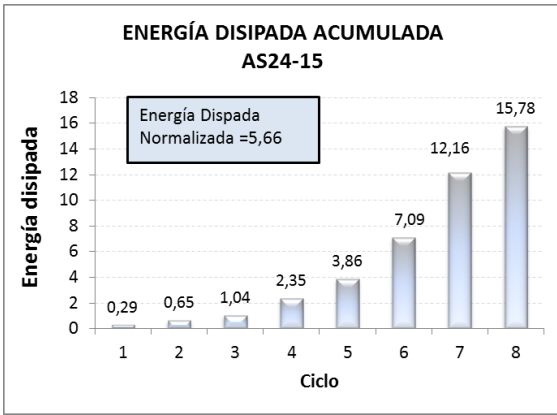
• **SERIE 2: Nivel de axil (Añadiendo AS21-10)**



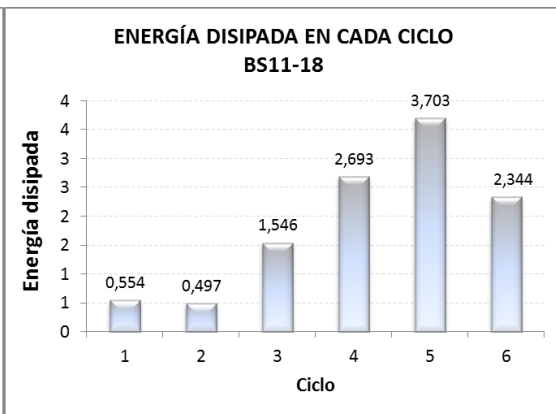
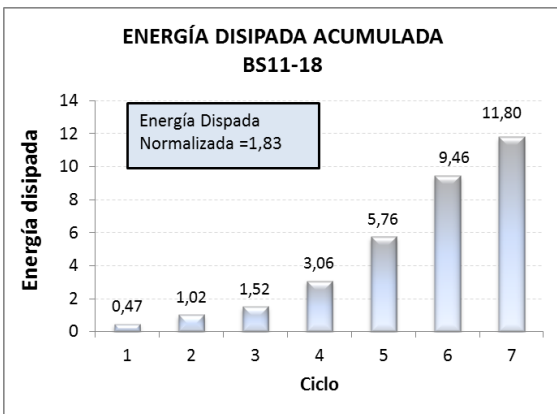
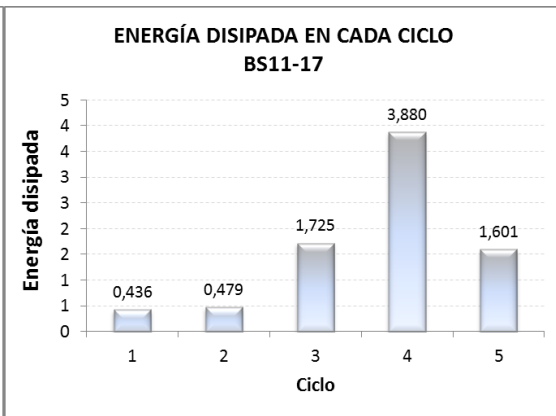
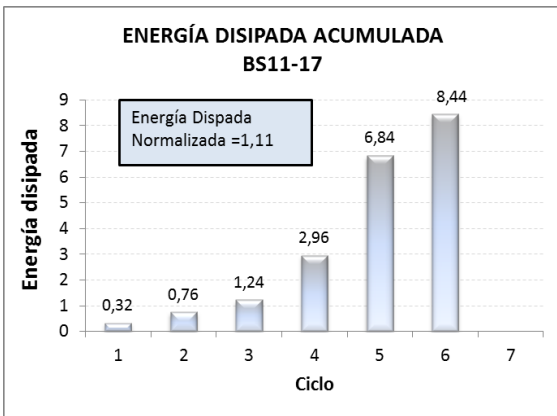


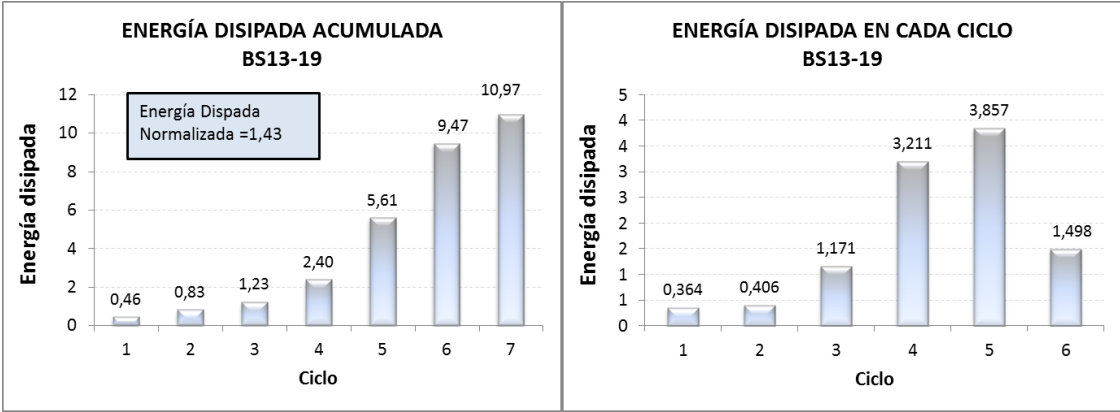
- **SERIE 3: Cuantía de la armadura longitudinal (Añadiendo AS11-1, AS11-22 y AS21-10)**





• **SERIE 4: Recubrimiento relativo (Añadiendo AS11-1, AS11-22 y AS13-16)**





ANEJO G

Anejo G: Módulo de Deformación

En este anejo se recogen los valores del módulo de deformación del hormigón experimentales y los obtenidos según la normativa y bibliografía consultada.

Módulo de deformación del hormigón.

Valores del módulo de deformación del hormigón experimentales y obtenidos según la normativa y bibliografía consultada. Relación entre el módulo teórico y el experimental.

Hormigón Tipo I (2% Vol de Fibras)	f_c (Mpa)	E_{c_exp} (Mpa)	$E_{c_teo_CM10}$ (Mpa)	$E_{c_teo_EC2}$ (Mpa)	$E_{c_teo_AFGC}$ (Mpa)	$E_{c_teo_CM10}/E_{c_exp}$	$E_{c_teo_EC2}/E_{c_exp}$	$E_{c_teo_AFGC}/E_{c_exp}$
AS11-1	132,66	45328,00	50896,17	47779,84	50338,14	1,12	1,05	1,11
AS11-22	117,94	40950,00	48939,61	46123,52	48403,02	1,20	1,13	1,18
AS11-2	130,41	47431,00	50607,22	47535,63	50052,35	1,07	1,00	1,06
AS11-2R	125,09	42817,00	49908,92	46944,90	49361,71	1,17	1,10	1,15
AS11-3	119,35	45636,00	49133,68	46288,11	48594,97	1,08	1,01	1,06
AS11-20	119,29	41791,00	49124,98	46280,74	48586,37	1,18	1,11	1,16
AS11-21	126,44	41601,00	50088,09	47096,55	49538,91	1,20	1,13	1,19
AS21-10	148,07	49084,00	52794,57	49380,83	52215,72	1,08	1,01	1,06
AS31-11	128,95	43914,00	50417,22	47374,98	49864,44	1,15	1,08	1,14
AS21-12	142,28	50882,00	52097,44	48793,59	51526,23	1,02	0,96	1,01
AS21-13	133,98	48045,00	51064,00	47921,61	50504,13	1,06	1,00	1,05
AS21-23	121,70	42132,00	49454,06	46559,67	48911,84	1,17	1,11	1,16
AS21-24	133,32	44074,00	50980,44	47851,03	50421,48	1,16	1,09	1,14
AS23-14	145,53	48671,00	52490,94	49125,16	51915,42	1,08	1,01	1,07
AS24-15	127,93	43501,00	50283,50	47261,88	49732,18	1,16	1,09	1,14
AS13-16	125,79	44309,00	50002,42	47024,04	49454,18	1,13	1,06	1,12
BS11-17	121,87	45510,00	49477,08	46579,17	48934,61	1,09	1,02	1,08
BS11-18	122,04	43829,00	49500,08	46598,65	48957,35	1,13	1,06	1,12
BS13-19	123,21	43177,00	49657,76	46732,23	49113,30	1,15	1,08	1,14
AS11-25	120,56	43087,00	49299,66	46428,82	48759,13	1,14	1,08	1,13
Valor máximo	148,07	50882,00	52794,57	49380,83	52215,72	1,20	1,13	1,19
Valor mínimo	117,94	40950,00	48939,61	46123,52	48403,02	1,02	0,96	1,01
Valor medio	128,32	44788,45	50310,89	47284,05	49759,27	1,13	1,06	1,11
Desviación típica (σ)	8,77	2754,63	1125,91	951,48	1113,57	4,98%	4,82%	4,92%
C.de Variación (Cv)	6,84%	6,15%	2,24%	2,01%	2,24%	4,42%	4,55%	4,42%

Anejo G

Hormigón Tipo II (2% Vol de Fibras)	fc (Mpa)	Ec_exp (Mpa)	Ec_teo_CM10 (Mpa)	Ec_teo_EC2 (Mpa)	Ec_teo_AFGC (Mpa)	Ec_teo_CM10/ /Ec_exp	Ec_teo_EC2 /Ec_exp	Ec_teo_AFGC/ Ec_exp
AS11-7	127,37	45168,00	50209,80	47199,53	49659,29	1,11	1,04	1,10
AS11-8	130,60	47486,00	50631,35	47556,03	50076,22	1,07	1,00	1,05
AS11-9	134,71	31097,00	51156,58	47999,80	50595,69	1,65	1,54	1,63
Valor máximo	134,71	47486,00	51156,58	47999,80	50595,69	1,65	1,54	1,63
Valor mínimo	127,37	31097,00	50209,80	47199,53	49659,29	1,07	1,00	1,05
Valor medio	130,89	46327,00	50420,58	47377,78	49867,76	1,09	1,02	1,08
Desviación típica (σ)	3,68	1639,07	298,08	252,08	294,81	0,03	0,03	0,03
C.de Variación (Cv)	2,81%	3,54%	0,59%	0,53%	0,59%	2,95%	3,01%	2,95%

Hormigón Tipo I (1% Vol de Fibras)	fc (Mpa)	Ec_exp (Mpa)	Ec_teo_CM10 (Mpa)	Ec_teo_EC2 (Mpa)	Ec_teo_AFGC (Mpa)	Ec_teo_CM10/ Ec_exp	Ec_teo_EC2 /Ec_exp	Ec_teo_AFGC /Ec_exp
AS11-4	125,19	43592,00	49922,92	46956,76	49375,56	1,15	1,08	1,13
AS11-5	122,25	43891,00	49529,04	46623,19	48985,99	1,13	1,06	1,12
AS11-6	121,63	45170,00	49444,58	46551,63	48902,46	1,09	1,03	1,08
Valor máximo	125,19	45170,00	49922,92	46956,76	49375,56	1,15	1,08	1,13
Valor mínimo	121,63	43592,00	49444,58	46551,63	48902,46	1,09	1,03	1,08
Valor medio	123,03	44217,67	49632,18	46710,52	49088,00	1,12	1,06	1,11
Desviación típica (σ)	1,90	838,19	255,31	216,22	252,51	0,03	0,02	0,03
C.de Variación (Cv)	1,55%	1,90%	0,51%	0,46%	0,51%	2,30%	2,25%	2,30%

Coefficients obtained for the supports tested according to the consulted norm.

Hormigón Tipo II (2% Vol de Fibras)	$Ec_exp/(fc/10)^{0,3}$	$Ec_exp/(fc^{1/3})$	Ec_exp_EC2-CM10 (Mpa)	Ec_exp_AFGC (Mpa)	Ec_exp_EC2-CM10 /Ec_exp	Ec_exp_AFGC /Ec_exp
AS11-7	23403,10	8977,34	50230,80	46129,32	1,11	1,02
AS11-8	23422,68	9359,47	50610,19	46516,61	1,07	0,98
AS11-9	23446,86	6066,28	51082,46	46999,15	1,64	1,51
Valor máximo	23446,86	9359,47	51082,46	46999,15	1,64	1,51
Valor mínimo	23403,10	6066,28	50230,80	46129,32	1,07	0,98
Valor medio	23412,89	9168,40	50420,50	46322,96	1,09	1,00
Desviación típica (σ)	13,84	270,21	268,27	273,86	0,03	0,03
C.de Variación (Cv)	0,06%	2,95%	0,53%	0,59%	3,01%	2,95%

Hormigón Tipo I (1% Vol de Fibras)	$Ec_exp/(fc/10)^{0,3}$	$Ec_exp/(fc^{1/3})$	Ec_exp_EC2-CM10 (Mpa)	Ec_exp_AFGC (Mpa)	Ec_exp_EC2-CM10 /Ec_exp	Ec_exp_AFGC /Ec_exp
AS11-4	23389,70	8713,89	49893,73	44479,68	1,14	1,02
AS11-5	23371,18	8843,43	49539,30	44128,74	1,13	1,01
AS11-6	23367,19	9116,68	49463,27	44053,49	1,10	0,98
Valor máximo	23389,70	9116,68	49893,73	44479,68	1,14	1,02
Valor mínimo	23367,19	8713,89	49463,27	44053,49	1,10	0,98
Valor medio	23376,02	8891,33	49632,10	44220,64	1,12	1,00
Desviación típica (σ)	12,01	205,62	229,75	227,47	0,03	0,02
C.de Variación (Cv)	0,05%	2,31%	0,46%	0,51%	2,25%	2,30%

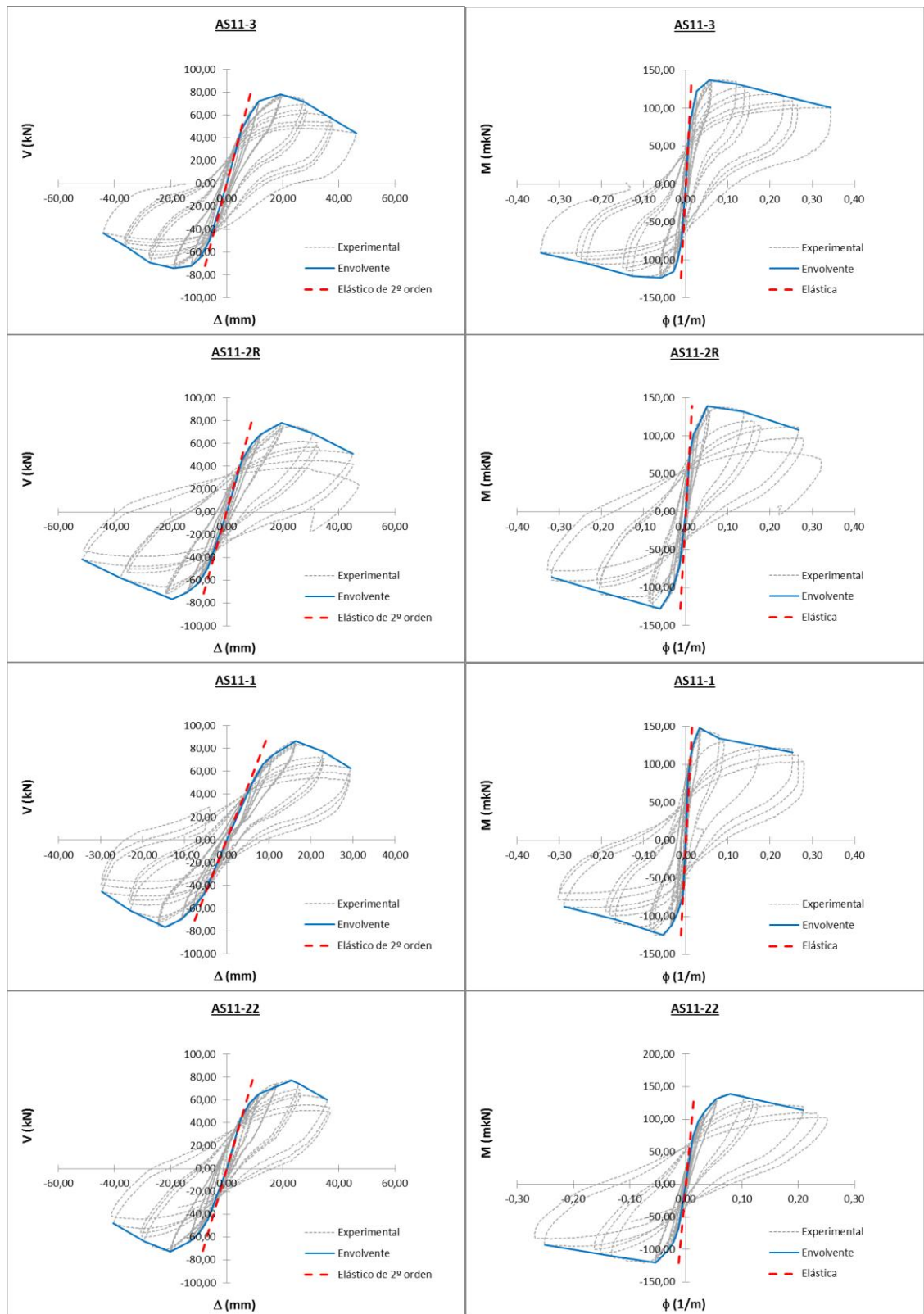
Hormigón Tipo I (2% Vol de Fibras)	$E_{c_exp}/(f_c/10)^{0,3}$	$E_{c_exp}/f_c^{1/3}$	$E_{c_exp_EC2-CM10}$ (Mpa)	$E_{c_exp_AFGC}$ (Mpa)	$E_{c_exp_EC2-CM10}/E_{c_exp}$	$E_{c_exp_AFGC}/E_{c_exp}$
AS11-1	23434,90	8887,64	50836,26	45283,63	112,15%	99,90%
AS11-22	23343,21	8350,23	49074,00	43542,82	119,84%	106,33%
AS11-2	23421,56	9353,09	50576,44	45026,54	106,63%	94,93%
AS11-2R	23389,04	8561,37	49947,91	44405,24	116,65%	103,71%
AS11-3	23352,45	9269,01	49249,11	43715,49	107,92%	95,79%
AS11-20	23352,04	8489,57	49241,26	43707,76	117,83%	104,59%
AS11-21	23397,42	8288,47	50109,26	44564,65	120,45%	107,12%
AS21-10	23520,88	9278,03	52539,67	46972,68	107,04%	95,70%
AS31-11	23412,75	8692,19	50405,51	44857,49	114,78%	102,15%
AS21-12	23489,63	9746,60	51914,86	46352,42	102,03%	91,10%
AS21-13	23442,62	9389,41	50987,11	45432,95	106,12%	94,56%
AS21-23	23367,64	8501,88	49538,04	44000,55	117,58%	104,43%
AS21-24	23438,78	8627,48	50912,01	45358,60	115,51%	102,91%
AS23-14	23507,32	9253,18	52267,64	46702,53	107,39%	95,96%
AS24-15	23406,54	8633,34	50285,17	44738,52	115,60%	102,84%
AS13-16	23393,42	8843,13	50032,12	44488,43	112,92%	100,40%
BS11-17	23368,73	9179,26	49558,79	44021,03	108,90%	96,73%
BS11-18	23369,81	8836,10	49579,52	44041,49	113,12%	100,48%
BS13-19	23377,24	8677,02	49721,64	44181,78	115,16%	102,33%
AS11-25	23360,33	8721,83	49398,82	43863,17	114,65%	101,80%
Valor máximo	23520,88	9746,60	52539,67	46972,68	1,20	1,07
Valor mínimo	23343,21	8288,47	49074,00	43542,82	1,02	0,91
Valor medio	23407,32	8878,94	50308,76	44762,89	1,13	1,00
Desviación típica (σ)	51,95	399,33	1012,35	1001,75	0,05	0,04
C.de Variación (Cv)	0,22%	4,50%	2,01%	2,24%	4,55%	4,42%

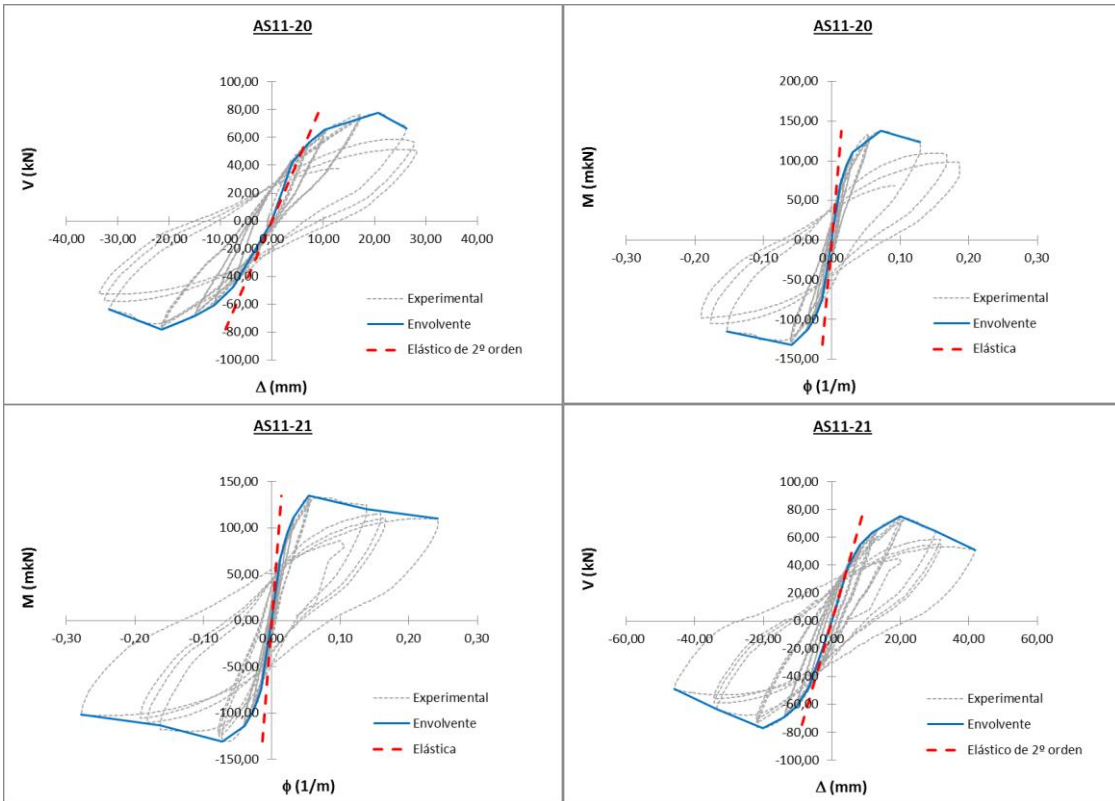
ANEJO H

Anejo H: Rigidez efectiva

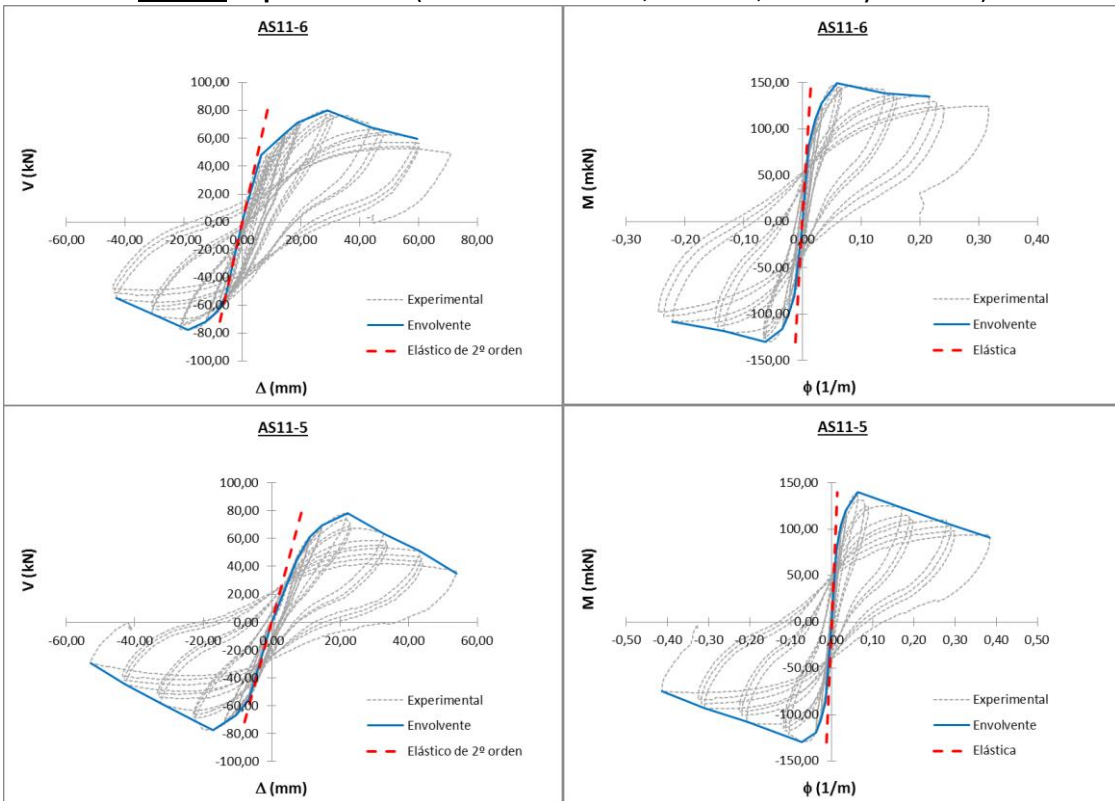
En él se representan las gráficas cortante-desplazamiento y momento curvatura incluyendo la recta elástica.

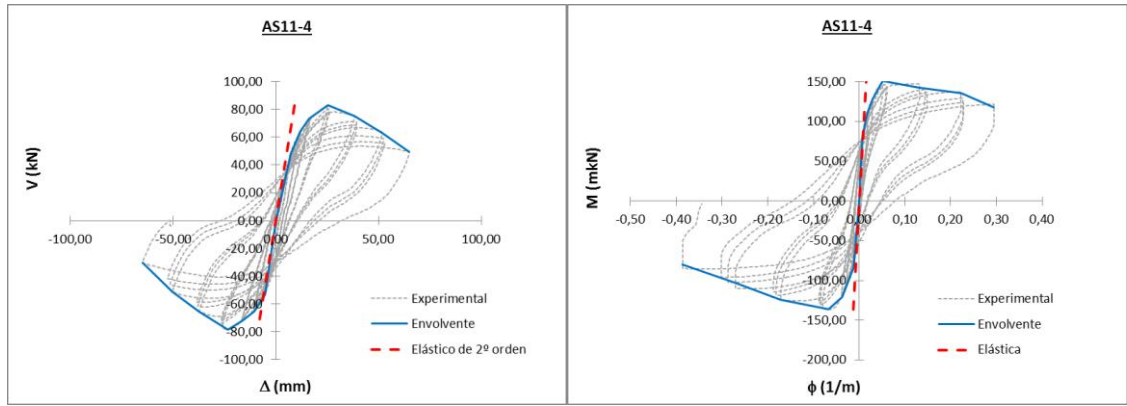
• **SERIE 1: Separación de la armadura transversal**



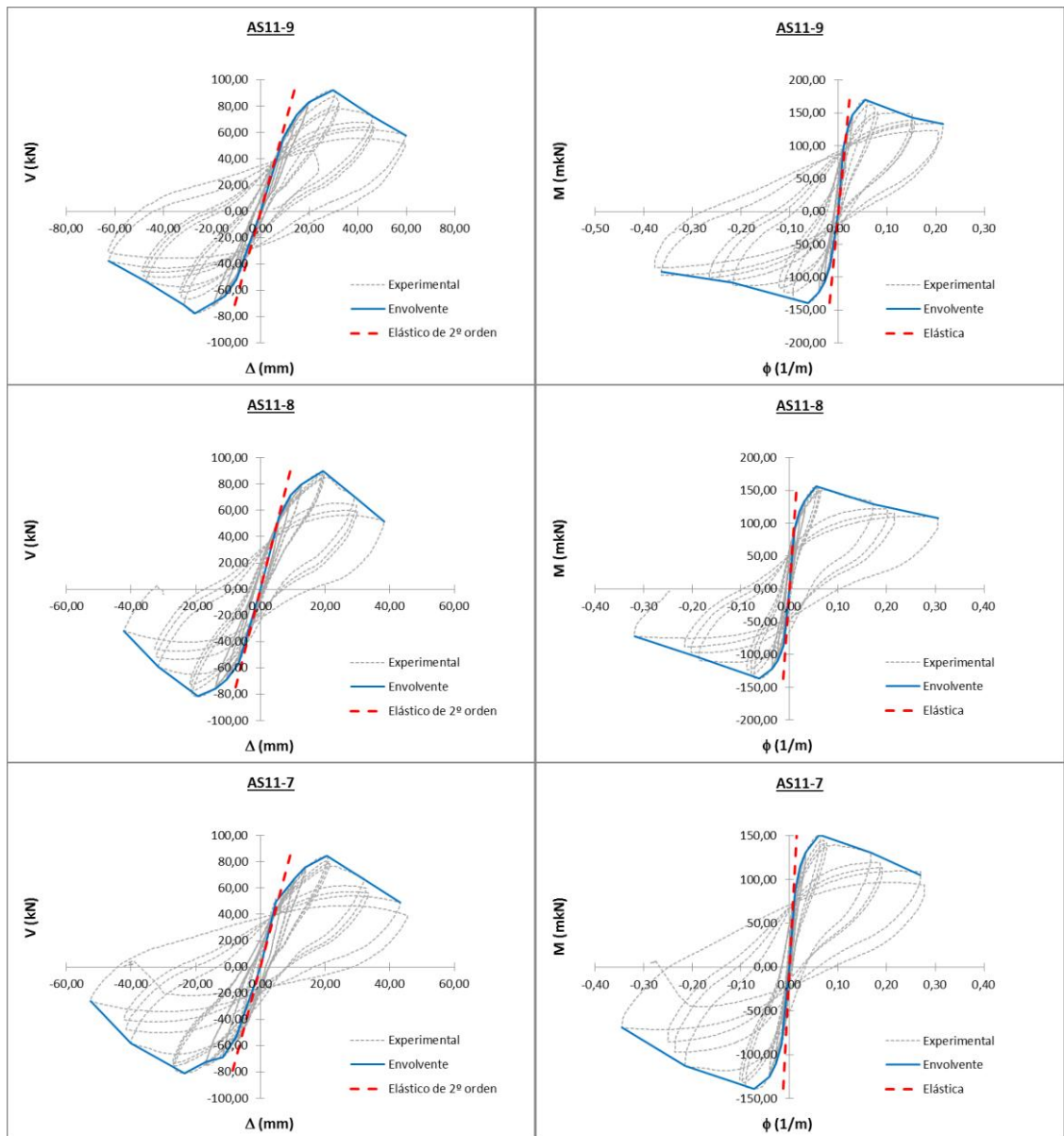


SERIE 1: Tipo de fibras (Añadiendo AS11-3, AS11-2R, AS11-1 y AS11-22)

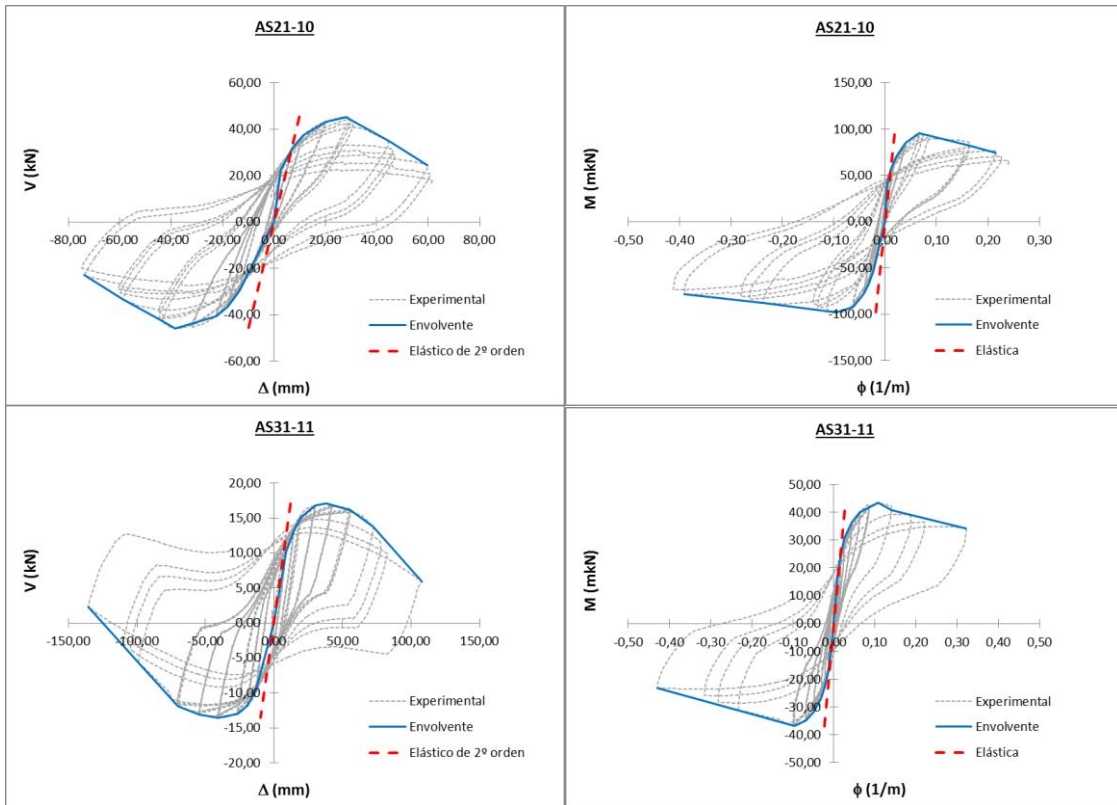




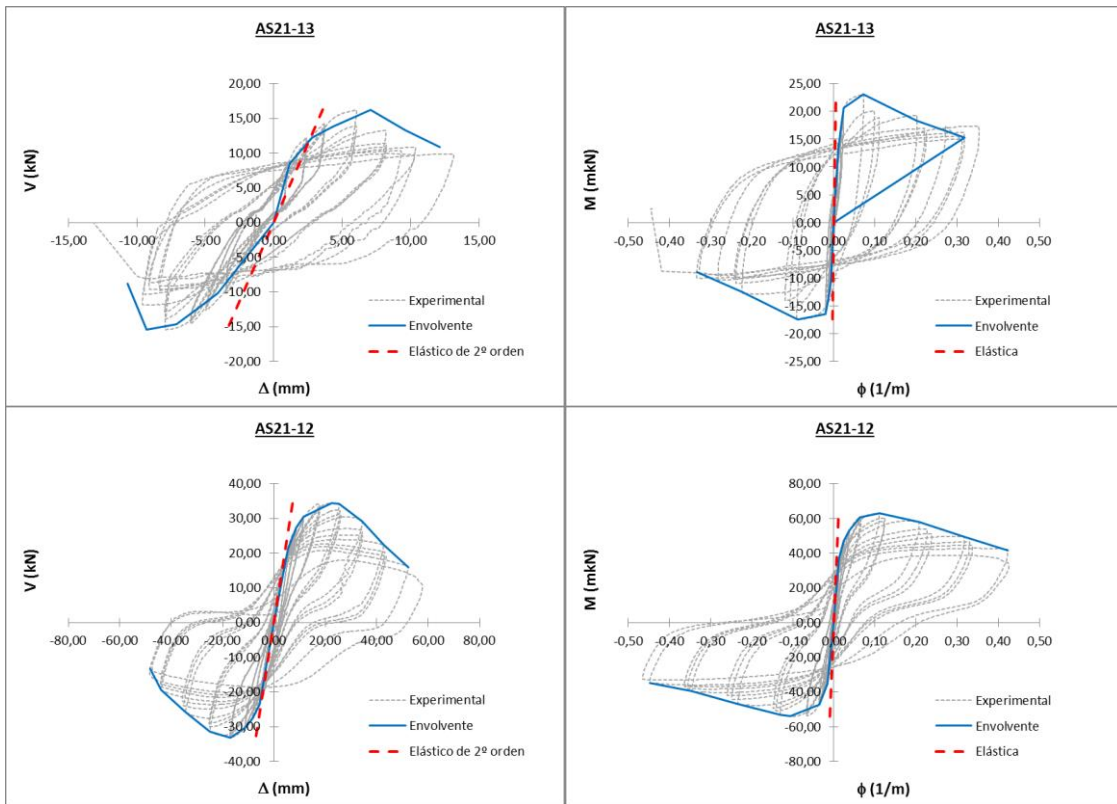
• **SERIE 1: Volumen de fibras** (Añadiendo AS11-3, AS11-2R, AS11-1 y AS11-22)

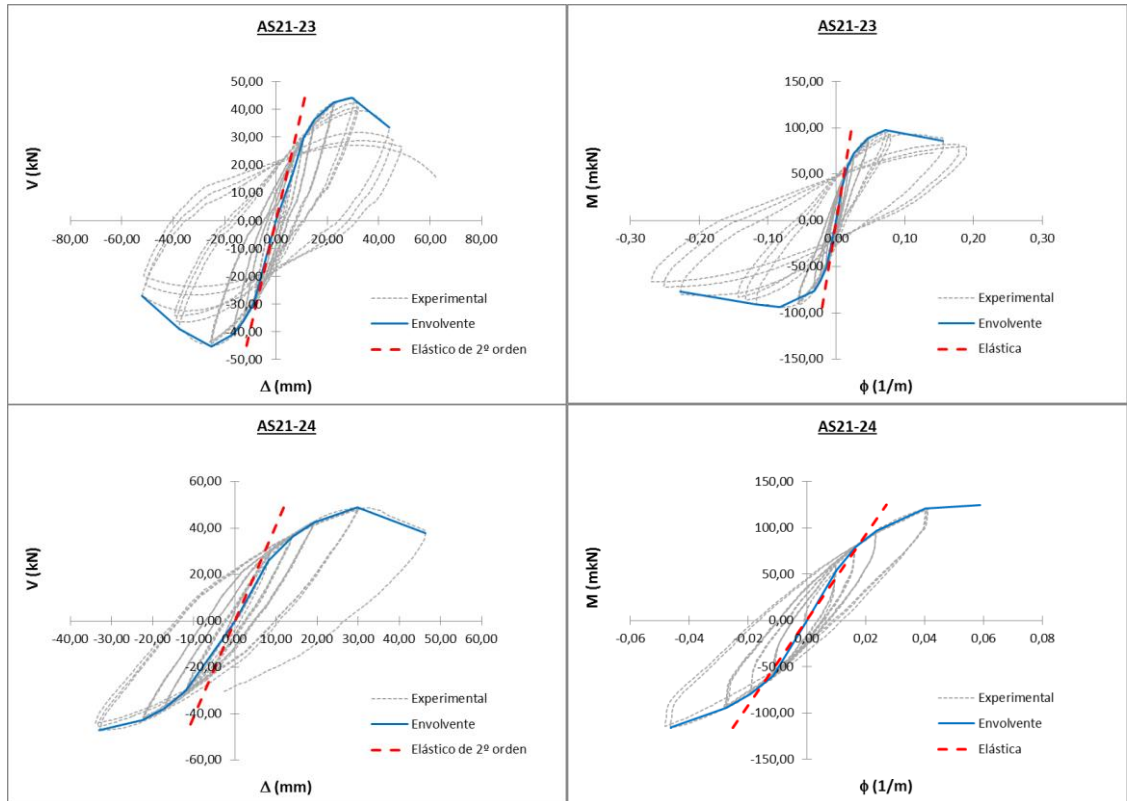


• **SERIE 2: Esbeltez (Añadiendo AS11-2R)**

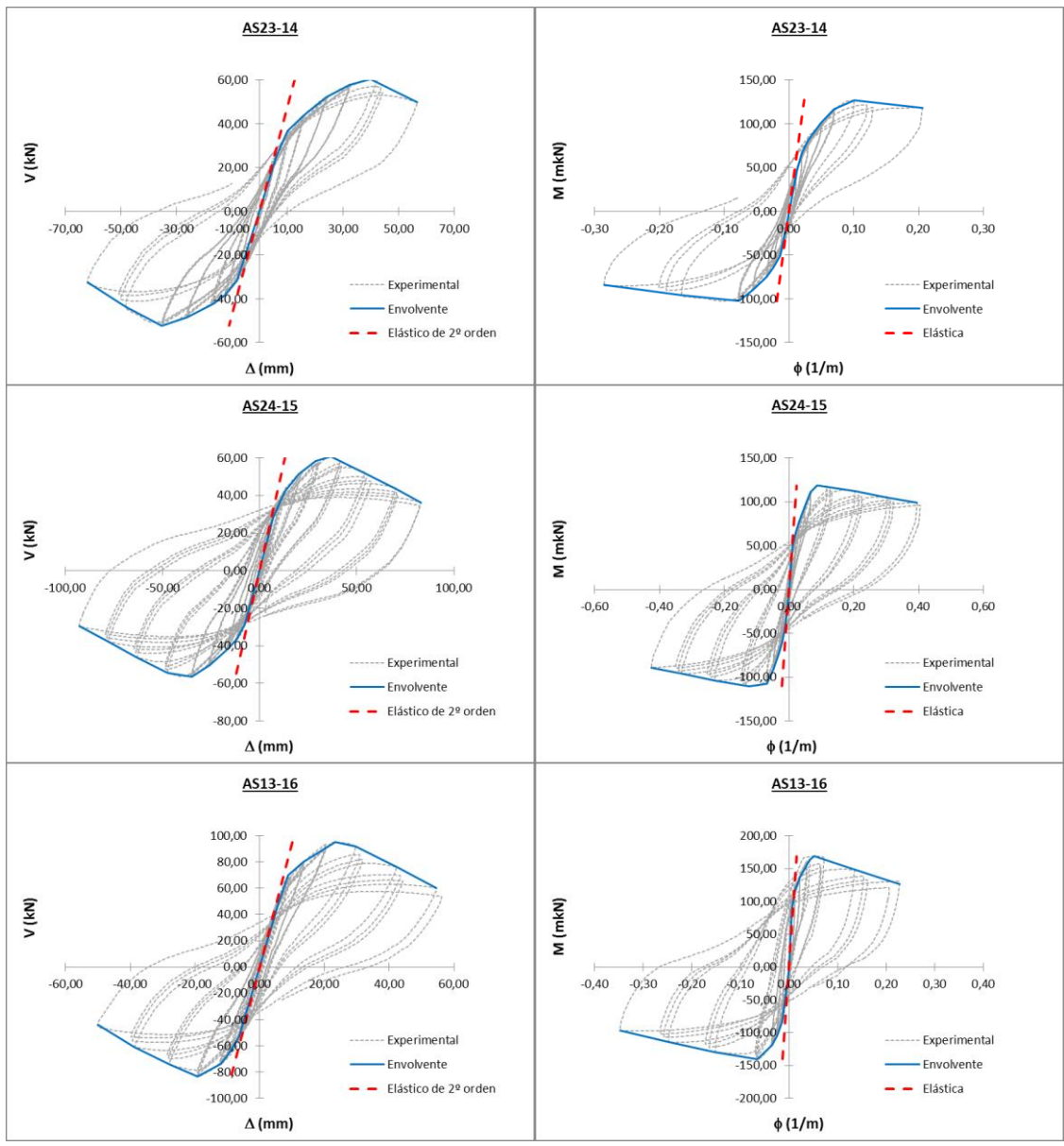


• **SERIE 2: Nivel de axil (Añadiendo AS21-10)**

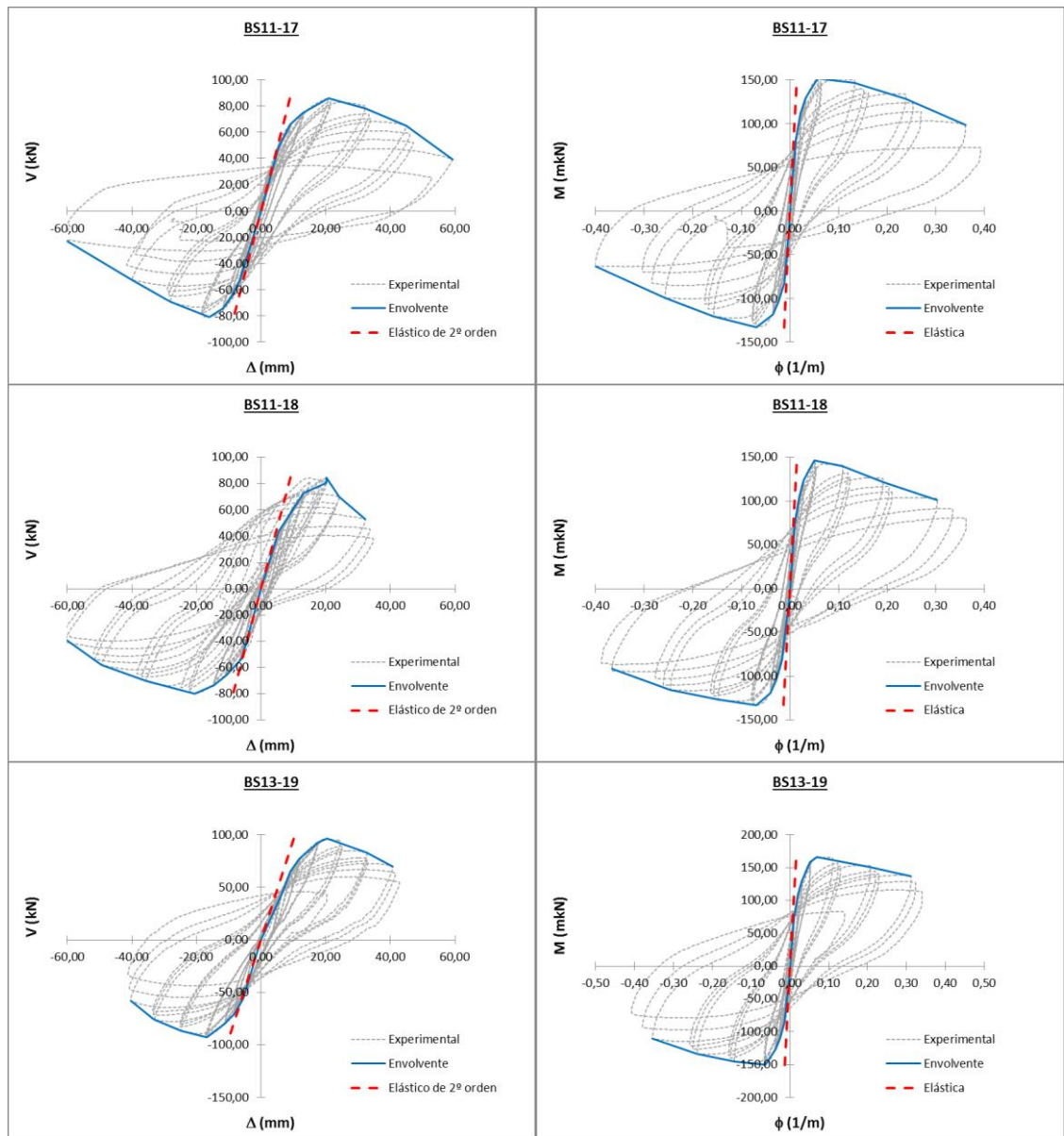




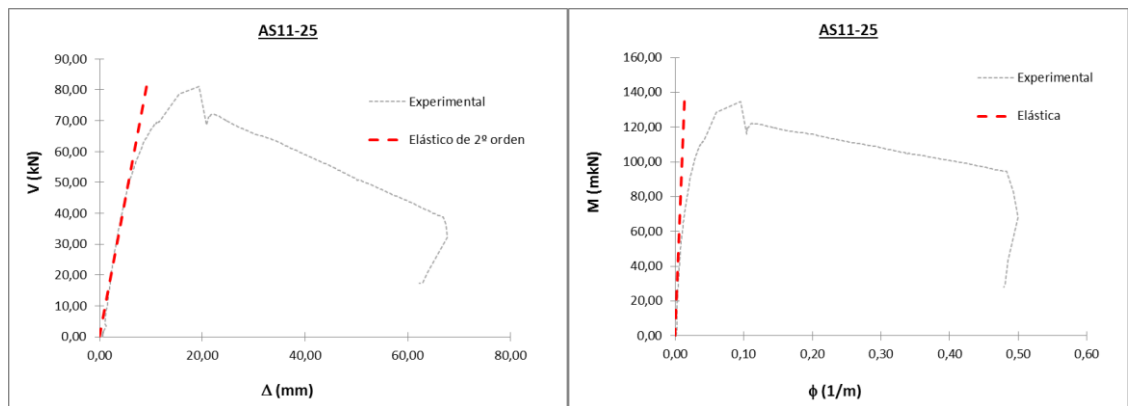
• **SERIE 3: Cuantía de la armadura longitudinal (Añadiendo AS11-1, AS11-22 y AS21-10)**



• **SERIE 4: Recubrimiento relativo (Añadiendo AS11-1, AS11-22 y AS13-16)**



• **SERIE 5: Tipo de carga (Añadiendo AS11-1 y AS11-22)**



ANEJO I

Anejo I: Longitud equivalente de la rótula plástica. Base de datos de los resultados existentes

En este anejo se recogen los valores de la longitud equivalente de la rótula plástica recopilados en las bases de datos consultadas.

Base de datos de resultados existentes

En la tabla siguiente se recogen los resultados para la relación (L_p/h) obtenidos por investigaciones existentes en la bibliografía, tanto para elementos en los que se ha aplicado la carga de forma cíclica como de forma monotónica.

- Para Carga Cíclica

Investigador	Referencia	f_c (MPa)	λ_v	ν	ρ_l	L_p/h
Park et al (1982)	1	23,10	2,19	0,26	1,79%	0,44
	2	41,40	2,19	0,21	1,79%	0,34
	3	21,40	2,19	0,42	1,79%	0,40
	4	23,50	2,19	0,60	1,79%	0,50
Baker A. (1981)	1	26,00	4,00	0,20	2,43%	0,54
	2	28,50	4,00	0,56	2,43%	0,61
	3	23,60	4,00	0,38	1,51%	0,73
	4	25,00	4,00	0,21	1,51%	0,55
Mander J. B. (1984)	A	26,00	4,27	0,10	-	0,37
	B	26,00	4,27	0,50	-	0,38
	C	26,00	4,27	0,30	-	0,40
	D	26,00	4,27	0,30	-	0,41
Zahn F. A. (1986)	1	36,20	4,00	0,23	1,51%	0,43
	2	28,80	4,00	0,43	1,51%	0,42
	3	32,30	4,00	0,23	1,51%	0,43
	4	27,00	4,00	0,42	1,51%	0,39
	5	32,30	4,00	0,13	2,43%	0,39
	6	27,00	4,00	0,58	2,43%	0,59
	7	28,30	4,00	0,23	1,51%	0,55
	8	40,10	4,00	0,39	1,51%	0,63
Sheikh et al (1993)	FS-9	32,40	6,00	0,76	2,44%	0,85
	ES-13	32,50	6,00	0,76	2,44%	1,10
	AS-3	33,16	6,00	0,60	2,44%	0,96
	AS-17	31,30	6,00	0,77	2,44%	1,05
	AS-18	32,75	6,00	0,77	2,44%	0,99
	AS-19	32,20	6,00	0,47	2,44%	1,16
Bayrak et al (1997)	ES-1HT	72,10	6,00	0,50	2,58%	1,15
	AS-2HT	71,70	6,00	0,36	2,58%	0,98
	AS-3HT	71,80	6,00	0,50	2,58%	0,91
	AS-4HT	71,90	6,00	0,50	2,58%	0,89
Bae y Bayrak (2005)	S24-2UT	43,40	6,00	0,50	1,25%	0,66
	S17-3UT	43,40	6,00	0,50	1,25%	0,91
	24-4UT	36,50	6,00	0,20	1,25%	0,49
	S24-5UT	41,40	6,00	0,20	1,25%	0,47

- Para Carga Monotónica

Investigador	Referencia	f_c (MPa)	λ_v	ν	ρ_l	L_p/h
Bayrak et al (1998)	AS-5HT	101,80	6,00	0,45	2,58%	0,86
	AS-6HT	101,90	6,00	0,46	2,58%	1,05
	AS-7HT	102,00	6,00	0,45	2,58%	0,88
	ES-8HT	102,20	6,00	0,47	2,58%	1,26
	RS-9HT	71,20	5,25	0,34	2,74%	1,02
	RS-10HT	71,10	5,25	0,50	2,74%	1,27
	RS-11HT	70,80	5,25	0,51	2,74%	1,13
	RS-12HT	70,90	5,25	0,34	2,74%	1,19
	RS-13HT	112,10	5,25	0,35	2,74%	0,85
	RS-14HT	112,10	5,25	0,46	2,74%	1,00
	RS-15HT	56,20	5,25	0,36	2,74%	0,78
	RS-16HT	56,20	5,25	0,37	2,74%	1,08
	RS-17HT	74,10	5,25	0,34	2,74%	0,85
	RS-18HT	74,10	5,25	0,50	2,74%	0,91
	RS-19HT	74,20	5,25	0,53	2,74%	0,98
	RS-20HT	74,20	5,25	0,34	2,74%	1,00
	WRS-21HT	91,30	7,35	0,47	2,74%	1,12
	WRS-22HT	91,30	7,35	0,31	2,74%	1,11
	WRS-23HT	72,20	7,35	0,33	2,74%	1,03
	WRS-24HT	72,20	7,35	0,50	2,74%	0,99
Mendis P. (2001)	G1	57,90	4,17	0,14	4,61%	0,31
	G2	57,90	4,17	0,14	4,61%	0,32
	H1	57,90	4,17	0,07	4,61%	0,30
	H2	57,90	4,17	0,25	4,61%	0,46
Pendyala et al (1994) (1996)	D1	33,20	3,42	0,20	4,61%	0,21
	D2	32,70	3,42	0,20	4,61%	0,38
	D3	38,70	3,42	0,17	4,61%	0,51
	D4	58,10	3,42	0,23	4,61%	0,25
	D5	64,30	3,42	0,10	4,61%	0,38
	D6	64,80	3,42	0,20	4,61%	0,57
	D7	62,80	3,42	0,06	3,84%	0,45
	D8	65,20	3,42	0,11	3,84%	0,38

Investigador	Referencia	f_c (MPa)	λ_v	ν	ρ_i	(L_p/h) Sol 1	(L_p/h) Sol 2
Barreda (2012)	N30-10.5-C0-2-00	32,20	10,50	0,00	2,20%	1,99	2,34
	N30-10.5-C0-2-15	31,80	10,50	0,14	2,20%	0,74	0,91
	N30-10.5-C0-2-30	31,60	10,50	0,30	2,20%	1,61	1,71
	N30-10.5-C0-2-45	34,50	10,50	0,42	2,20%	2,28	2,51
	N30-7.5-C0-2-30	30,10	7,50	0,30	2,30%	0,87	1,01
	N30-7.5-C0-2-45	33,00	7,50	0,42	2,30%	0,56	0,64
	N30-10.5-C0-1-30	42,20	10,50	0,23	1,40%	0,35	0,40
	N30-10.5-C0-1-45	35,20	10,50	0,51	1,40%	2,96	3,26
	N30-10.5-C0-3-15	33,50	10,50	0,15	3,20%	1,68	1,88
	N30-10.5-C0-3-30	29,50	10,50	0,31	3,20%	2,01	2,11
	H60-10.5-C0-2-00	55,80	10,50	0,00	2,20%	2,27	2,67
	H60-10.5-C0-2-15	54,10	10,50	0,15	2,20%	0,57	0,71
	H60-10.5-C0-2-30	60,50	10,50	0,29	2,20%	2,63	2,83
	H60-10.5-C0-2-45	63,90	10,50	0,43	2,20%	3,02	3,05
	H60-7.5-C0-2-30	63,00	7,50	0,29	2,30%	0,75	0,92
	H60-7.5-C0-2-45	67,70	7,50	0,40	2,30%	0,62	0,75
	H60-10.5-C0-1-15	57,80	10,50	0,16	1,40%	0,34	0,46
	H60-10.5-C0-1-30	58,50	10,50	0,30	1,40%	1,70	1,81
	H60-10.5-C0-3-30	61,60	10,50	0,29	3,20%	1,94	1,98
	H90-10.5-C0-2-00	85,70	10,50	0,00	2,20%	1,69	2,22
	H90-10.5-C0-2-15	90,50	10,50	0,15	2,20%	0,58	0,66
	H90-10.5-C0-2-30	90,10	10,50	0,30	2,20%	2,06	2,21
	H90-10.5-C0-2-45	93,20	10,50	0,44	2,20%	2,99	3,06
	H90-7.5-C0-2-30	100,40	7,50	0,27	2,30%	0,85	1,03
	H90-7.5-C0-2-45	94,00	7,50	0,41	2,30%	0,50	0,59
	H90-10.5-C0-1-15	90,30	10,50	0,15	1,40%	1,11	1,20
	H90-10.5-C0-1-30	96,20	10,50	0,29	1,40%	1,37	1,50
	H90-10.5-C0-3-15	89,60	10,50	0,15	3,20%	1,44	1,80
	H90-10.5-C0-3-30	94,40	10,50	0,29	3,20%	2,28	2,43
	N30-10.5-C3-2-30	41,00	10,50	0,25	2,20%	1,08	1,15
	N30-10.5-C3-2-45	34,20	10,50	0,43	2,20%	1,43	1,49
	N30-7.5-C3-2-30	35,80	7,50	0,27	2,30%	0,84	0,92
	N30-7.5-C3-2-45	35,00	7,50	0,41	2,30%	0,56	0,63
	H90-10.5-C3-2-45	92,00	10,50	0,44	2,20%	2,44	2,32
	H90-7.5-C3-2-30	86,40	7,50	0,31	2,30%	1,64	1,96
	H90-7.5-C3-2-45	78,20	7,50	0,50	2,30%	0,94	0,97
	H90-7.5-C2-2-30	95,70	7,50	0,28	2,30%	1,17	1,37
	H90-7.5-C2-2-45	89,20	7,50	0,45	2,30%	0,70	0,76

Se adjunta en la base de datos recopilada por la bibliografía, los resultados obtenidos en esta Tesis doctoral, tanto para carga cíclica como monotónica. Sólo se presentan los resultados arrojados por las envolventes idealizadas mediante el método aproximado y el método del Eurocódigo 8, así como, lo valores obtenidos con los perfiles de curvatura gracias al método propuesto por Pam y Ho.

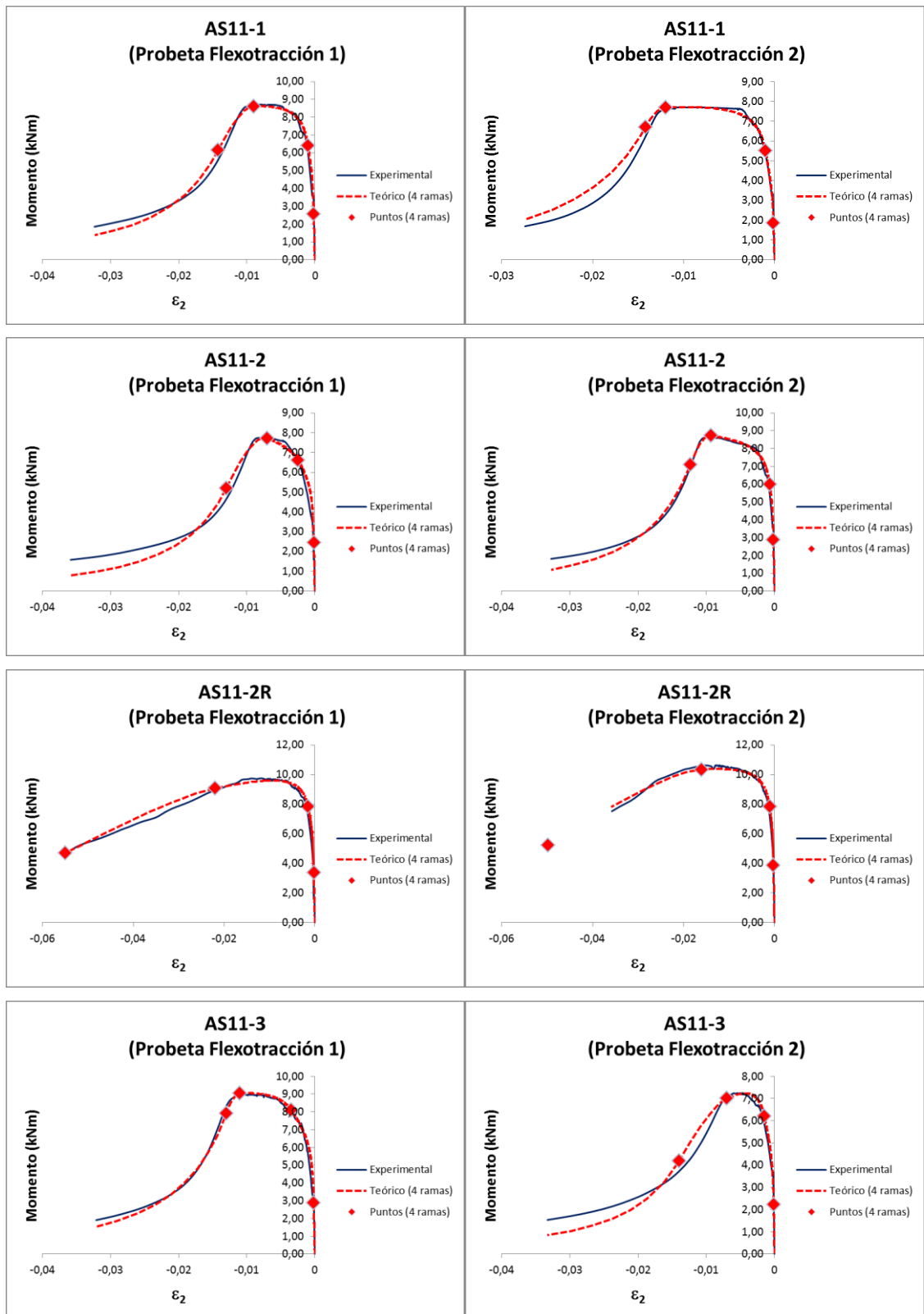
Investigador	Referencia	f_c (MPa)	λ_v	ν	ρ_l	L_p/h (MA)	L_p/h (EC8)	L_p/h (P&H)
Castro C. (2015)	AS11-1	132,66	5,77	0,20	1,16%	0,19	0,18	0,44
	AS11-22	117,94	5,77	0,20	1,16%	0,32	0,29	0,41
	AS11-2R	125,09	5,77	0,20	1,16%	0,31	0,27	0,43
	AS11-3	119,35	5,77	0,20	1,16%	0,24	0,23	0,52
	AS11-20	119,29	5,77	0,20	1,16%	0,42	0,33	0,40
	AS11-21	126,44	5,77	0,20	1,16%	0,28	0,27	0,41
	AS11-4	125,19	5,77	0,20	1,16%	0,36	0,30	0,52
	AS11-5	122,25	5,77	0,20	1,16%	0,24	0,22	0,43
	AS11-6	121,63	5,77	0,20	1,16%	0,42	0,36	0,56
	AS11-7	127,37	5,77	0,20	1,16%	0,30	0,23	0,42
	AS11-8	130,60	5,77	0,20	1,16%	0,30	0,24	0,43
	AS11-9	134,71	5,77	0,20	1,16%	0,39	0,30	0,57
	AS21-10	148,07	7,50	0,20	1,05%	0,56	0,41	0,54
	AS31-11	128,95	10,71	0,20	0,96%	0,90	0,47	0,79
	AS21-12	142,28	7,50	0,10	1,05%	0,38	0,36	0,58
	AS21-13	133,98	7,50	0,00	1,05%	0,11	0,08	1,08
	AS21-23	121,70	7,50	0,30	1,05%	0,59	0,40	0,58
	AS21-24	133,32	7,50	0,40	1,05%	3,78	2,86	0,46
	AS23-14	121,70	7,50	0,30	1,05%	0,47	0,33	0,55
	AS24-15	127,93	7,50	0,20	4,19%	0,39	0,38	0,55
	AS13-16	125,79	5,77	0,20	2,06%	0,37	0,32	0,42
	BS11-17	121,87	5,77	0,20	1,16%	0,30	0,30	0,40
	BS11-18	122,04	5,77	0,20	1,16%	0,16	0,15	0,43
	BS13-19	123,21	5,77	0,20	2,06%	0,22	0,21	0,42
	AS11-25	120,56	5,77	0,20	1,16%	0,89	0,94	0,44

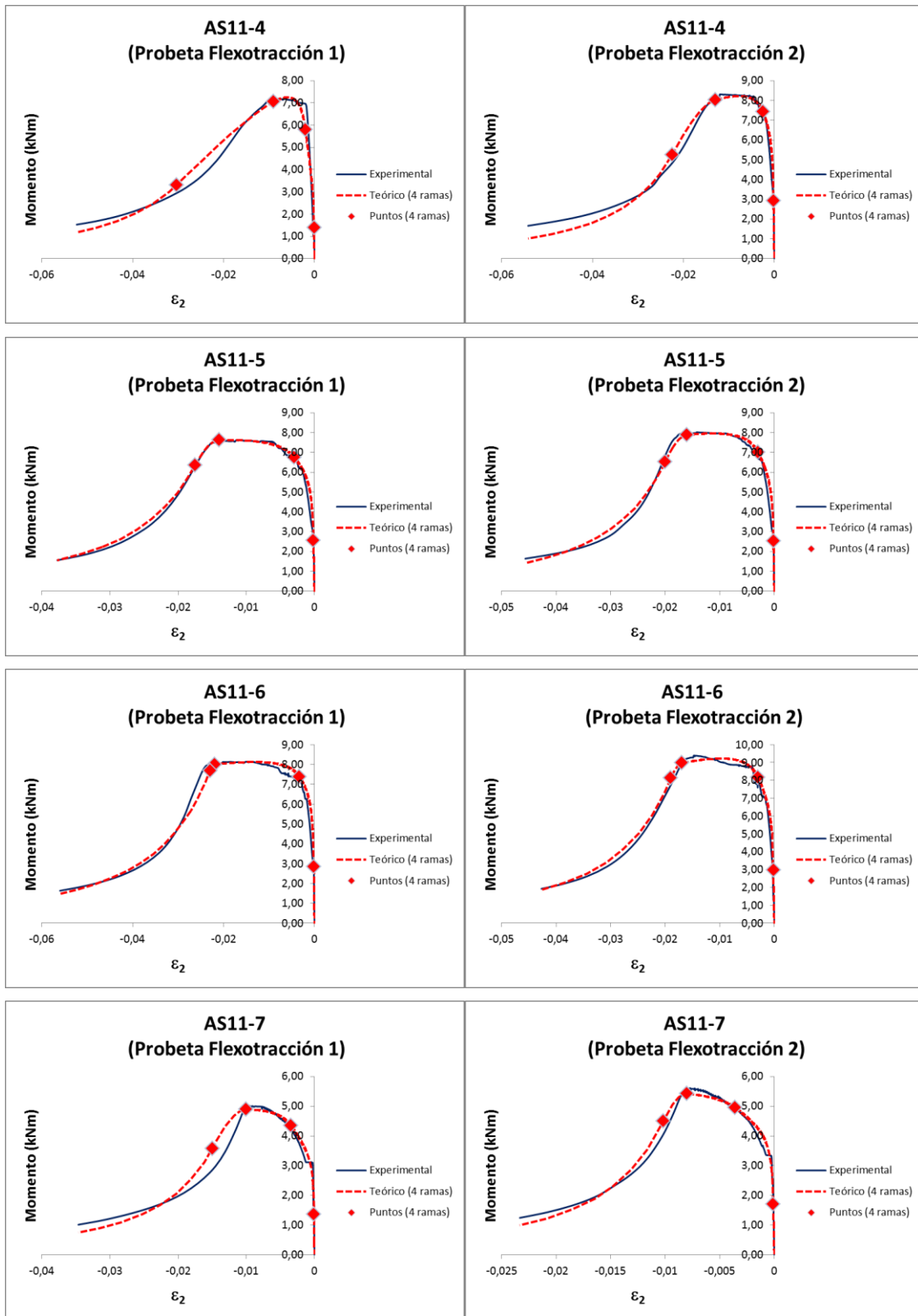
ANEJO J

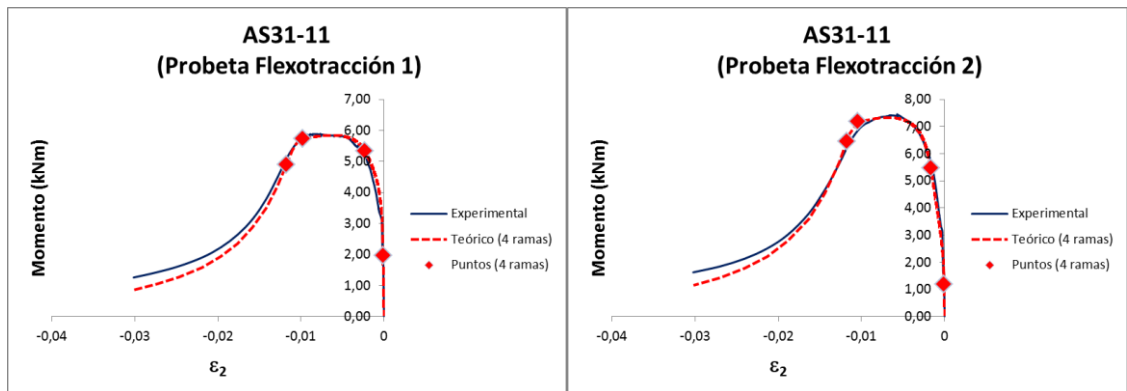
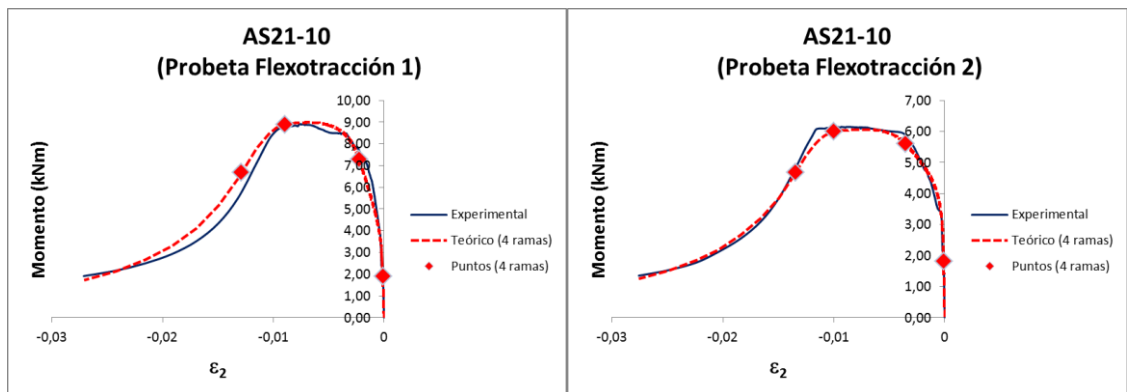
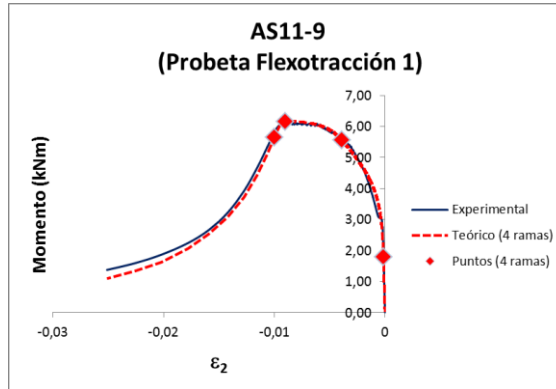
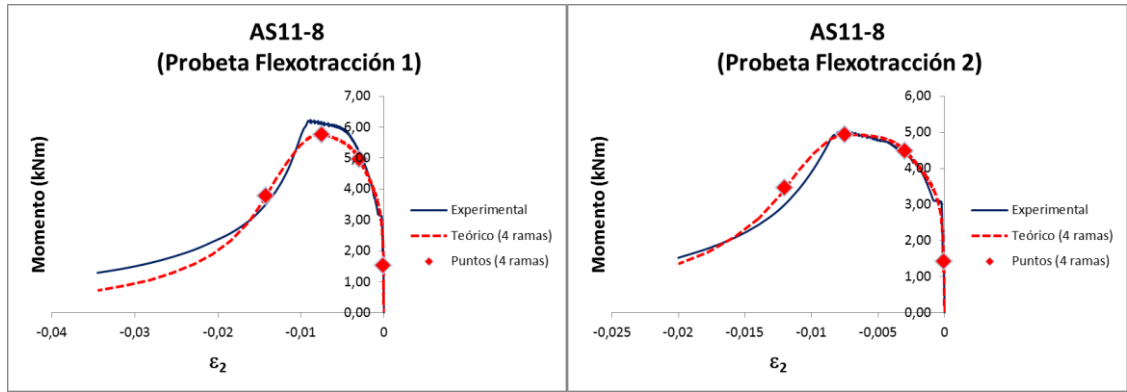
Anejo J: Comportamiento a tracción del hormigón: Análisis inverso

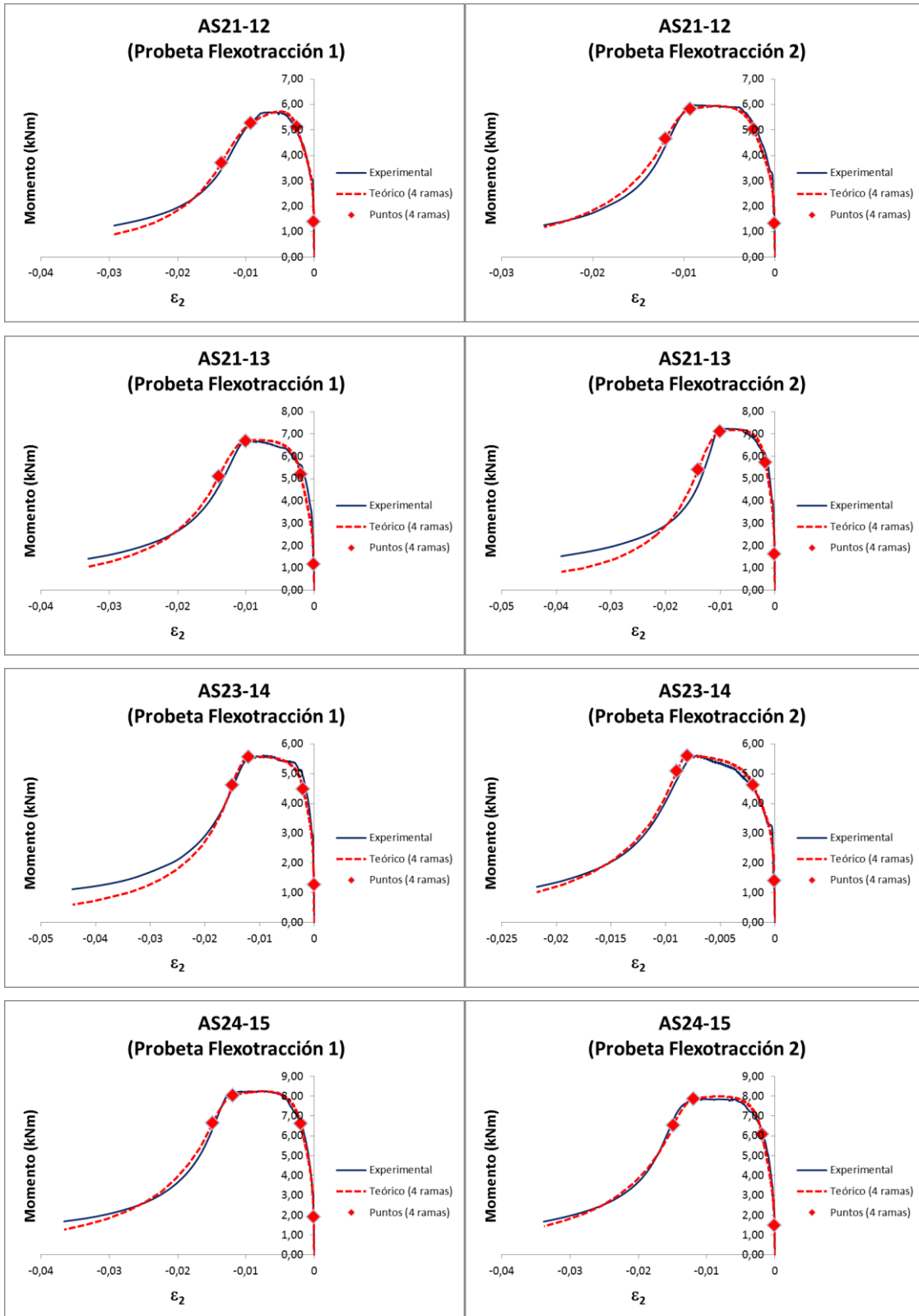
En este anejo se recopilan las gráficas σ - ε en tracción, resultantes del análisis inverso para todos los hormigones fabricados.

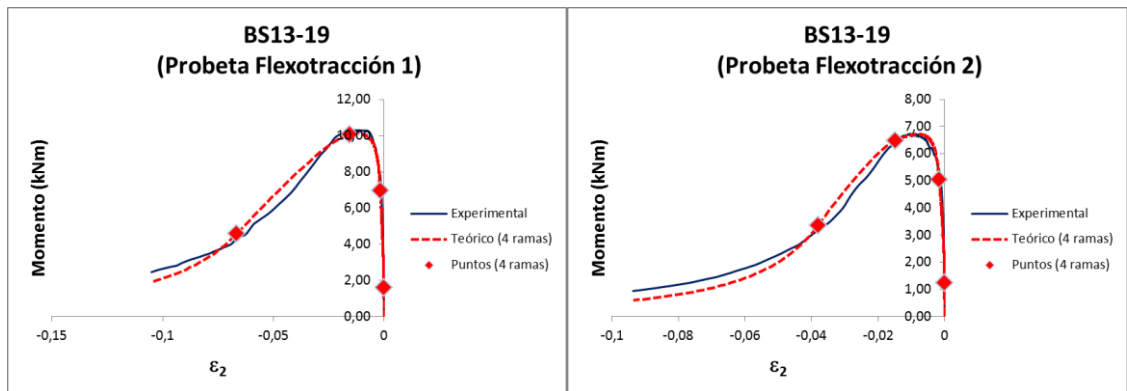
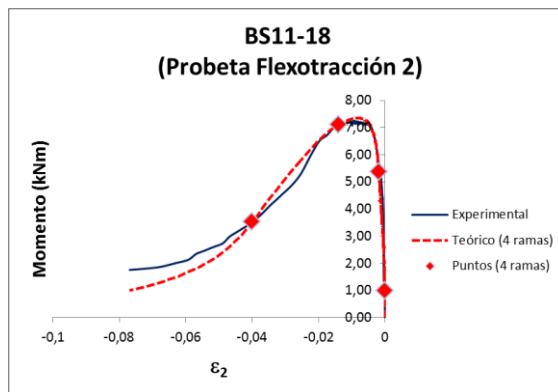
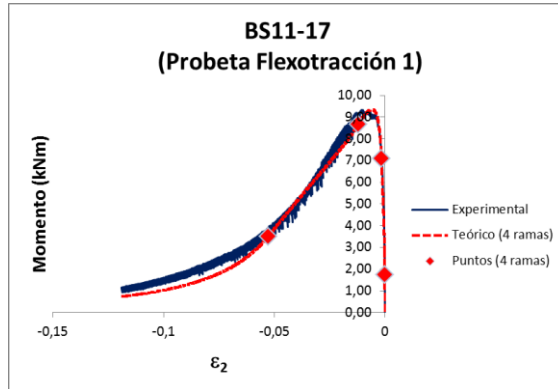
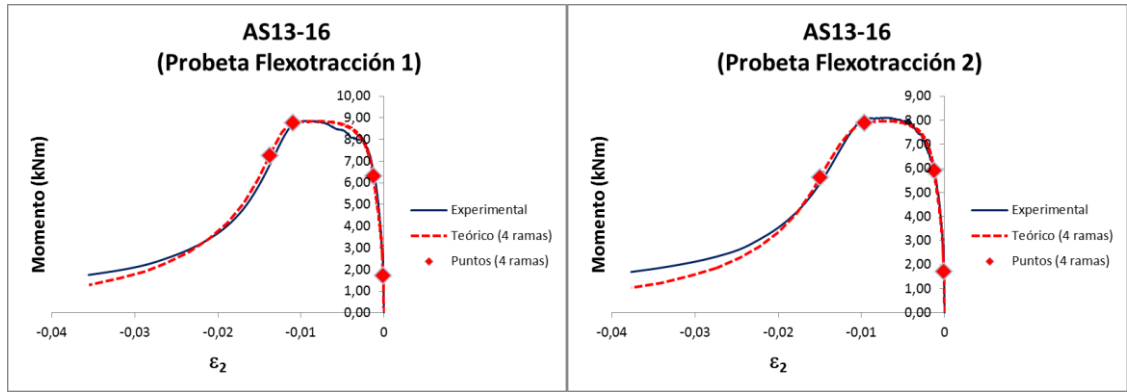
Comportamiento a tracción del hormigón: Análisis inverso

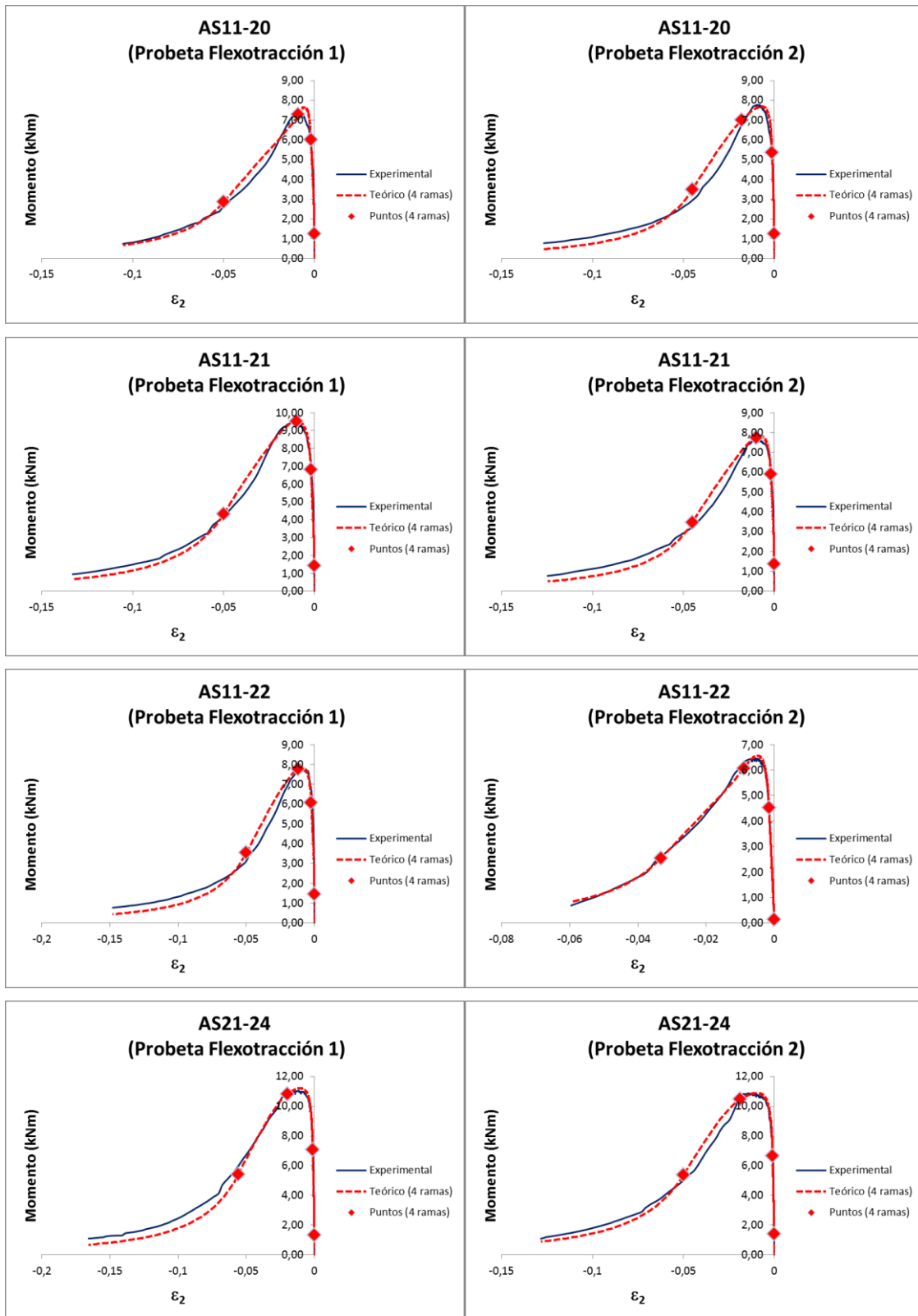


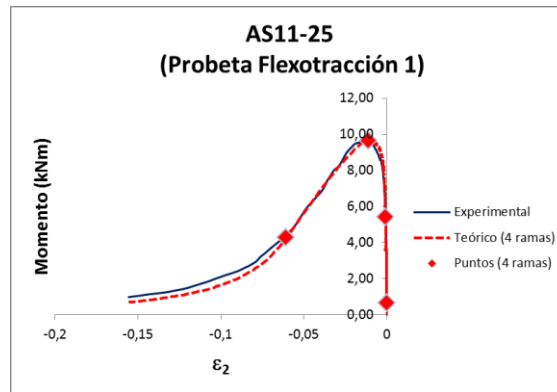












ANEJO K

Anejo K: Métodos simplificados: Capacidad de deformación

En este anejo se encuentran los resultados obtenidos para cada soporte al evaluar la capacidad de deformación a partir de los métodos simplificados empleados.

Métodos Simplificados. Capacidad de deformación

En las tablas siguientes se recogen los resultados obtenidos de la capacidad de deformación a nivel elemento y a nivel sección. Estos valores se han obtenido mediante los métodos simplificados recogidos por Panagiotakos y Fardis (2001) y el Eurocódigo 8 (2012). Además se hace una comparación con los valores experimentales obtenidos mediante la idealización con el Método Aproximado y con el recogido en el Eurocódigo 8.

A nivel sección

Valores obtenidos mediante la idealización con el Método Aproximado

Referencia	MÉTODO APROXIMADO					EI
	My (kNm)	ϕ_y (1/m)	$\phi_y \cdot h$	ϕ_u (1/m)	$\phi_u \cdot h$	
AS11-1	102,332	0,021	0,005	0,214	0,056	7142,33
AS11-22	97,36	0,034	0,009	0,218	0,057	3812,15
AS11-2R	100,37	0,034	0,009	0,234	0,061	4143,21
AS11-3	98,02	0,023	0,006	0,276	0,072	5667,49
AS11-20	101,08	0,034	0,009	0,141	0,037	3920,45
AS11-21	99,48	0,036	0,009	0,246	0,064	3731,06
AS11-4	107,65	0,029	0,008	0,263	0,068	4979,37
AS11-5	101,06	0,029	0,008	0,239	0,062	4630,49
AS11-6	104,80	0,030	0,008	0,219	0,057	4650,75
AS11-7	108,59	0,030	0,008	0,213	0,055	4831,48
AS11-8	110,02	0,027	0,007	0,180	0,047	5430,66
AS11-9	115,99	0,031	0,008	0,200	0,052	5229,27
AS21-10	72,49	0,034	0,007	0,249	0,050	2984,40
AS31-11	30,12	0,044	0,006	0,298	0,042	908,27
AS21-12	43,86	0,028	0,006	0,254	0,051	2093,65
AS21-13	15,20	0,017	0,003	0,166	0,033	1200,72
AS21-23	71,68	0,036	0,007	0,192	0,038	2671,87
AS21-24	90,48	0,031	0,006	0,053	0,011	3951,77
AS23-14	86,12	0,046	0,009	0,300	0,060	2486,71
AS24-15	85,80	0,055	0,011	0,410	0,082	2071,80
AS13-16	115,85	0,028	0,007	0,226	0,059	5800,62
BS11-17	106,71	0,030	0,008	0,246	0,064	4748,97
BS11-18	104,85	0,046	0,012	0,370	0,096	3105,13
BS13-19	118,56	0,037	0,010	0,309	0,080	4243,97
AS11-25	50,49	0,033	0,009	0,305	0,079	4028,75
Valor medio	89,56	0,03	0,01	0,24	0,06	3938,61
Desviación típica (σ)	27,53	0,01	0,00	0,07	0,02	1489,17
Coefficiente de Variación (CV %)	30,74%	25,17%	23,51%	29,87%	31,12%	37,81%
Percentil (5 %)	19,67	0,02	0,00	0,08	0,02	996,01
Percentil (95 %)	117,79	0,05	0,01	0,40	0,09	6739,82

Valores obtenidos mediante la idealización con el Método del Eurocódigo 8

Referencia	MÉTODO EC8					EI
	M_y (kNm)	ϕ_y (1/m)	$\phi_{y \cdot h}$	ϕ_u (1/m)	$\phi_{u \cdot h}$	
AS11-1	120,060	0,027	0,007	0,214	0,056	5032,70
AS11-22	115,20	0,044	0,011	0,218	0,057	2795,52
AS11-2R	116,96	0,043	0,011	0,234	0,061	2995,19
AS11-3	118,46	0,028	0,007	0,276	0,072	4382,04
AS11-20	118,76	0,047	0,012	0,141	0,037	2822,18
AS11-21	111,53	0,038	0,010	0,246	0,064	3191,80
AS11-4	127,35	0,038	0,010	0,263	0,068	3558,21
AS11-5	118,75	0,039	0,010	0,239	0,062	3246,78
AS11-6	126,35	0,042	0,011	0,219	0,057	3146,47
AS11-7	130,47	0,043	0,011	0,213	0,055	3214,82
AS11-8	131,54	0,040	0,010	0,180	0,047	3506,56
AS11-9	140,99	0,043	0,011	0,200	0,052	3429,87
AS21-10	89,26	0,038	0,008	0,249	0,050	2042,04
AS31-11	35,11	0,056	0,008	0,298	0,042	673,44
AS21-12	49,67	0,033	0,007	0,254	0,051	1644,30
AS21-13	18,20	0,020	0,004	0,166	0,033	965,07
AS21-23	80,16	0,046	0,009	0,192	0,038	2031,83
AS21-24	84,45	0,025	0,005	0,053	0,011	4238,44
AS23-14	97,64	0,051	0,010	0,300	0,060	2089,56
AS24-15	86,86	0,052	0,010	0,410	0,082	2049,06
AS13-16	140,11	0,043	0,011	0,226	0,059	3538,67
BS11-17	123,84	0,034	0,009	0,246	0,064	3943,36
BS11-18	130,79	0,058	0,015	0,370	0,096	2354,60
BS13-19	133,89	0,043	0,011	0,309	0,080	3483,55
AS11-25	52,03	0,035	0,009	0,305	0,079	3388,05
Valor medio	103,94	0,04	0,01	0,24	0,06	2950,56
Desviación típica (σ)	33,97	0,01	0,00	0,07	0,02	1030,12
Coefficiente de Variación (CV %)	32,68%	23,10%	25,13%	29,87%	31,12%	34,91%
Percentil (5 %)	23,27	0,02	0,00	0,08	0,02	760,93
Percentil (95 %)	140,72	0,06	0,01	0,40	0,09	4837,51

Valores obtenidos con el Método simplificado de Panagiotakos y Fardis

Referencia	MÉTODO SIMPLIFICADO PANAGIOTAKOS Y FARDIS					
	M_y (kNm)	ϕ_y (1/m)	ϕ_{y-h}	ϕ_u (1/m)	ϕ_{u-h}	EI
AS11-1	109,115	0,022	0,006	0,041	0,011	4856,46
AS11-22	100,941	0,022	0,006	0,029	0,007	4489,07
AS11-2R	104,443	0,023	0,006	0,033	0,009	4634,29
AS11-3	100,927	0,023	0,006	0,030	0,008	4446,31
AS11-20	101,254	0,023	0,006	0,029	0,008	4487,99
AS11-21	105,430	0,023	0,006	0,034	0,009	4676,00
AS11-4	104,698	0,023	0,006	0,033	0,009	4644,97
AS11-5	102,596	0,023	0,006	0,031	0,008	4559,40
AS11-6	103,028	0,023	0,006	0,030	0,008	4565,84
AS11-7	105,898	0,023	0,006	0,035	0,009	4701,77
AS11-8	107,028	0,023	0,006	0,038	0,010	4752,37
AS11-9	111,598	0,022	0,006	0,044	0,011	4984,96
AS21-10	70,897	0,029	0,006	0,105	0,021	2461,54
AS31-11	29,672	0,042	0,006	0,068	0,010	711,79
AS21-12	44,549	0,029	0,006	0,105	0,021	1552,71
AS21-13	12,779	0,021	0,004	0,088	0,018	614,36
AS21-23	68,420	0,020	0,004	0,027	0,005	3357,55
AS21-24	71,992	0,016	0,003	0,029	0,006	4542,06
AS23-14	73,762	0,029	0,006	0,094	0,019	2574,22
AS24-15	73,236	0,028	0,006	0,050	0,010	2611,75
AS13-16	111,698	0,022	0,006	0,034	0,009	5056,03
BS11-17	108,033	0,022	0,006	0,029	0,008	4812,59
BS11-18	108,028	0,023	0,006	0,029	0,008	4800,61
BS13-19	118,116	0,022	0,006	0,031	0,008	5347,99
AS11-25	100,920	0,023	0,006	0,030	0,008	4453,65
Valor medio	89,96	0,02	0,01	0,05	0,01	3947,85
Desviación típica (σ)	27,48	0,00	0,00	0,03	0,00	1369,55
Coefficiente de Variación (CV %)	30,55%	19,64%	12,38%	56,09%	43,40%	34,69%
Percentil (5 %)	17,85	0,02	0,00	0,03	0,01	643,59
Percentil (95 %)	116,19	0,04	0,01	0,11	0,02	5260,40

Comparación de entre los valores teóricos del Método simplificado con los experimentales obtenidos mediante el Método Aproximado

COMPARATIVA MÉTODO SIMPLIFICADO PANAGIOTAKOS Y FARDIS CON MÉTODO APROXIMADO				
Referencia	M_y (Modelo)/ M_y (MA)	ϕ_y (Modelo)/ ϕ_y (MA)	ϕ_u (Modelo)/ ϕ_u (MA)	EI (Modelo)/EI (MA)
AS11-1	1,07	1,09	0,19	0,68
AS11-22	1,04	0,66	0,13	1,18
AS11-2R	1,04	0,67	0,14	1,12
AS11-3	1,03	0,98	0,11	0,78
AS11-20	1,00	0,66	0,21	1,14
AS11-21	1,06	0,63	0,14	1,25
AS11-4	0,97	0,77	0,12	0,93
AS11-5	1,02	0,77	0,13	0,98
AS11-6	0,98	0,75	0,14	0,98
AS11-7	0,98	0,74	0,16	0,97
AS11-8	0,97	0,83	0,21	0,88
AS11-9	0,96	0,72	0,22	0,95
AS21-10	0,98	0,84	0,42	0,82
AS31-11	0,99	0,94	0,23	0,78
AS21-12	1,02	1,03	0,42	0,74
AS21-13	0,84	1,22	0,53	0,51
AS21-23	0,95	0,57	0,14	1,26
AS21-24	0,80	0,52	0,56	1,15
AS23-14	0,86	0,62	0,31	1,04
AS24-15	0,85	0,51	0,12	1,26
AS13-16	0,96	0,79	0,15	0,87
BS11-17	1,01	0,75	0,12	1,01
BS11-18	1,03	0,49	0,08	1,55
BS13-19	1,00	0,59	0,10	1,26
AS11-25	2,00	0,68	0,10	1,11
Valor medio	1,02	0,75	0,21	1,01
Desviación típica (σ)	0,22	0,18	0,13	0,23
Coefficiente de Variación (CV %)	21,28%	24,48%	64,82%	22,49%
Percentil (5 %)	0,81	0,50	0,09	0,56
Percentil (95 %)	1,72	1,18	0,55	1,46

Comparación de entre los valores teóricos del Método simplificado con los experimentales obtenidos mediante el Método del Eurocódigo 8

Referencia	COMPARATIVA MÉTODO SIMPLIFICADO PANAGIOTAKOS Y FARDIS CON MÉTODO EC8			
	M_y (Modelo)/ M_y (EC8)	ϕ_y (Modelo)/ ϕ_y (EC8)	ϕ_u (Modelo)/ ϕ_u (EC8)	EI (Modelo)/EI (EC8)
AS11-1	0,91	0,82	0,19	0,96
AS11-22	0,88	0,51	0,13	1,61
AS11-2R	0,89	0,52	0,14	1,55
AS11-3	0,85	0,81	0,11	1,01
AS11-20	0,85	0,48	0,21	1,59
AS11-21	0,95	0,59	0,14	1,47
AS11-4	0,82	0,59	0,12	1,31
AS11-5	0,86	0,57	0,13	1,40
AS11-6	0,82	0,53	0,14	1,45
AS11-7	0,81	0,52	0,16	1,46
AS11-8	0,81	0,56	0,21	1,36
AS11-9	0,79	0,52	0,22	1,45
AS21-10	0,79	0,76	0,42	1,21
AS31-11	0,85	0,74	0,23	1,06
AS21-12	0,90	0,86	0,42	0,94
AS21-13	0,70	1,07	0,53	0,64
AS21-23	0,85	0,44	0,14	1,65
AS21-24	0,85	0,63	0,56	1,07
AS23-14	0,76	0,56	0,31	1,23
AS24-15	0,84	0,54	0,12	1,27
AS13-16	0,80	0,52	0,15	1,43
BS11-17	0,87	0,66	0,12	1,22
BS11-18	0,83	0,39	0,08	2,04
BS13-19	0,88	0,52	0,10	1,54
AS11-25	1,94	0,64	0,10	1,31
Valor medio	0,88	0,61	0,21	1,33
Desviación típica (σ)	0,23	0,15	0,13	0,29
Coefficiente de Variación (CV %)	25,53%	24,96%	64,82%	21,53%
Percentil (5 %)	0,72	0,40	0,09	0,73
Percentil (95 %)	1,64	1,00	0,55	1,92

A nivel elemento

Así como a nivel sección se emplea sólo un método simplificado, a nivel elemento aplican dos, el del Panagiotakos y Fardis y el del Eurocódigo 8.

En las tablas siguientes se muestran los valores obtenidos para los distintos soportes de este tesis doctoral, tanto los obtenidos mediante los métodos simplificados, como los experimentales y la comparativa entre ellos.

Valores obtenidos mediante la idealización con el Método Aproximado

Referencia	MÉTODO APROXIMADO (EXPERIMENTAL)				
	θ_y	Δy (m)	θ_u	Δu (m)	EI
AS11-1	0,007	0,01	0,017	0,02	7142,33
AS11-22	0,008	0,01	0,023	0,03	3812,15
AS11-2R	0,008	0,01	0,023	0,04	4143,21
AS11-3	0,007	0,01	0,022	0,03	5667,49
AS11-20	0,008	0,01	0,019	0,03	3920,45
AS11-21	0,008	0,01	0,023	0,03	3731,06
AS11-4	0,008	0,01	0,029	0,04	4979,37
AS11-5	0,008	0,01	0,021	0,03	4630,49
AS11-6	0,009	0,01	0,029	0,04	4650,75
AS11-7	0,008	0,01	0,022	0,03	4831,48
AS11-8	0,007	0,01	0,019	0,03	5430,66
AS11-9	0,012	0,02	0,028	0,04	5229,27
AS21-10	0,011	0,02	0,032	0,05	2984,40
AS31-11	0,013	0,02	0,049	0,07	908,27
AS21-12	0,006	0,01	0,023	0,03	2093,65
AS21-13	0,003	0,01	0,007	0,01	1200,72
AS21-23	0,011	0,02	0,028	0,04	2671,87
AS21-24	0,013	0,02	0,026	0,04	3951,77
AS23-14	0,014	0,02	0,037	0,06	2486,71
AS24-15	0,015	0,02	0,042	0,06	2071,80
AS13-16	0,008	0,01	0,025	0,04	5800,62
BS11-17	0,008	0,01	0,024	0,04	4748,97
BS11-18	0,008	0,01	0,023	0,03	3105,13
BS13-19	0,008	0,01	0,023	0,04	4243,97
AS11-25	0,007	0,01	0,021	0,03	4028,75
Desviación típica (σ)	0,003	0,004	0,008	0,012	1489,175
Coficiente de Variación (Cv %)	28,84%	28,84%	32,56%	32,56%	37,81%
Percentil (5 %)	0,00	0,01	0,01	0,01	996,01
Percentil (95 %)	0,01	0,02	0,05	0,07	6739,82

Valores obtenidos mediante la idealización con el Método recogido en el Eurocódigo 8

Referencia	MÉTODO EUROCÓDIGO 8 (EXPERIMENTAL)				
	θ_y	Δy (m)	θ_u	Δu (m)	EI
AS11-1	0,008	0,01	0,143	0,21	5032,70
AS11-22	0,010	0,02	0,145	0,22	2795,52
AS11-2R	0,010	0,02	0,156	0,23	2995,19
AS11-3	0,008	0,01	0,184	0,28	4382,04
AS11-20	0,011	0,02	0,094	0,14	2822,18
AS11-21	0,009	0,01	0,164	0,25	3191,80
AS11-4	0,012	0,02	0,176	0,26	3558,21
AS11-5	0,010	0,01	0,159	0,24	3246,78
AS11-6	0,013	0,02	0,146	0,22	3146,47
AS11-7	0,012	0,02	0,142	0,21	3214,82
AS11-8	0,011	0,02	0,120	0,18	3506,56
AS11-9	0,016	0,02	0,133	0,20	3429,87
AS21-10	0,016	0,02	0,166	0,25	2042,04
AS31-11	0,031	0,05	0,198	0,30	673,44
AS21-12	0,008	0,01	0,169	0,25	1644,30
AS21-13	0,004	0,01	0,111	0,17	965,07
AS21-23	0,018	0,03	0,128	0,19	2031,83
AS21-24	0,013	0,02	0,035	0,05	4238,44
AS23-14	0,020	0,03	0,200	0,30	2089,56
AS24-15	0,015	0,02	0,273	0,41	2049,06
AS13-16	0,011	0,02	0,151	0,23	3538,67
BS11-17	0,008	0,01	0,164	0,25	3943,36
BS11-18	0,010	0,02	0,247	0,37	2354,60
BS13-19	0,009	0,01	0,206	0,31	3483,55
AS11-25	0,007	0,01	0,203	0,30	3388,05
Desviación típica (σ)	0,005	0,008	0,048	0,072	1030,115
Coefficiente de Variación (Cv %)	44,51%	44,51%	29,87%	29,87%	34,91%
Percentil (5 %)	0,01	0,01	0,05	0,08	760,93
Percentil (95 %)	0,03	0,04	0,27	0,40	4837,51

Valores obtenidos con el Método simplificado de Panagiotakos y Fardis

Referencia	MÉTODO SIMPLIFICADO PANAGIOTAKOS Y FARDIS					
	My (kNm)	θ_y	Δy (m)	θ_u	Δu (m)	EI
AS11-1	109,115	0,011	0,017	0,014	0,021	4856,46
AS11-22	100,941	0,011	0,017	0,012	0,018	4489,07
AS11-2R	104,443	0,011	0,017	0,013	0,020	4634,29
AS11-3	100,927	0,011	0,017	0,013	0,019	4446,31
AS11-20	101,254	0,011	0,017	0,012	0,019	4487,99
AS11-21	105,430	0,011	0,017	0,013	0,020	4676,00
AS11-4	104,698	0,011	0,017	0,013	0,020	4644,97
AS11-5	102,596	0,011	0,017	0,013	0,019	4559,40
AS11-6	103,028	0,011	0,017	0,013	0,019	4565,84
AS11-7	105,898	0,011	0,017	0,013	0,020	4701,77
AS11-8	107,028	0,011	0,017	0,014	0,021	4752,37
AS11-9	111,598	0,011	0,017	0,015	0,022	4984,96
AS21-10	70,897	0,014	0,022	0,027	0,041	2461,54
AS31-11	29,672	0,021	0,031	0,025	0,038	711,79
AS21-12	44,549	0,014	0,022	0,027	0,041	1552,71
AS21-13	12,779	0,010	0,016	0,022	0,033	614,36
AS21-23	68,420	0,010	0,015	0,011	0,017	3357,55
AS21-24	71,992	0,008	0,012	0,010	0,015	4542,06
AS23-14	73,762	0,014	0,021	0,025	0,038	2574,22
AS24-15	73,236	0,014	0,021	0,018	0,027	2611,75
AS13-16	111,698	0,011	0,017	0,013	0,020	5056,03
BS11-17	108,033	0,011	0,017	0,012	0,019	4812,59
BS11-18	108,028	0,011	0,017	0,012	0,019	4800,61
BS13-19	118,116	0,011	0,017	0,013	0,019	5347,99
AS11-25	100,92	0,01	0,017	0,013	0,020	4453,65
Desviación típica (σ)	27,485	0,002	0,004	0,005	0,008	1369,551
Coficiente de Variación (Cv %)	30,55%	19,64%	19,64%	34,09%	34,09%	34,69%
Percentil (5 %)	17,85	0,01	0,01	0,01	0,02	643,59
Percentil (95 %)	116,19	0,02	0,03	0,03	0,04	5260,40

Valores obtenidos con el Método simplificado recogido en el Eurocódigo 8

Referencia	MÉTODO SIMPLIFICADO EC 8					
	My (kNm)	θ_y	Δy (m)	θ_u	Δu (m)	EI
AS11-1	109,115	0,013	0,019	0,016	0,024	4238,466
AS11-22	100,941	0,013	0,019	0,014	0,021	3918,178
AS11-2R	104,443	0,013	0,019	0,015	0,022	4046,166
AS11-3	100,927	0,013	0,019	0,014	0,021	3885,589
AS11-20	101,254	0,013	0,019	0,014	0,021	3918,988
AS11-21	105,430	0,013	0,019	0,015	0,022	4082,760
AS11-4	104,698	0,013	0,019	0,015	0,022	4055,611
AS11-5	102,596	0,013	0,019	0,014	0,021	3979,924
AS11-6	103,028	0,013	0,019	0,014	0,021	3987,043
AS11-7	105,898	0,013	0,019	0,015	0,022	4104,744
AS11-8	107,028	0,013	0,019	0,016	0,023	4148,840
AS11-9	111,598	0,013	0,019	0,016	0,024	4348,521
AS21-10	70,897	0,016	0,024	0,020	0,030	2220,980
AS31-11	29,672	0,022	0,033	0,026	0,038	664,532
AS21-12	44,549	0,016	0,024	0,019	0,029	1400,417
AS21-13	12,779	0,012	0,018	0,016	0,024	534,241
AS21-23	68,420	0,012	0,018	0,013	0,019	2911,713
AS21-24	71,992	0,009	0,014	0,011	0,017	3795,081
AS23-14	73,762	0,016	0,024	0,020	0,030	2321,465
AS24-15	73,236	0,016	0,023	0,018	0,027	2350,278
AS13-16	111,698	0,013	0,019	0,014	0,022	4403,105
BS11-17	108,033	0,013	0,019	0,014	0,021	4199,720
BS11-18	108,028	0,013	0,019	0,014	0,021	4190,473
BS13-19	118,116	0,013	0,019	0,014	0,021	4657,137
AS11-25	100,920	0,013	0,019	0,014	0,021	3891,098
Desviación típica (σ)	27,485	0,002	0,003	0,003	0,004	1176,167
Coficiente de Variación (Cv %)	30,55%	17,09%	17,09%	18,86%	18,86%	34,09%
Percentil (5 %)	17,85	0,01	0,02	0,01	0,02	573,33
Percentil (95 %)	116,19	0,02	0,03	0,02	0,04	4580,93

	COMPARATIVA M. SIMPLIFICADO PANAGIOTAKOS CON M. APROXIMADO			COMPARATIVA M. SIMPLIFICADO PANAGIOTAKOS CON M. EC 8		
Referencia	θ_y (Modelo)/ θ_y (MA)	θ_u (Modelo)/ θ_u (MA)	EI (Modelo)/EI (MA)	θ_y (Modelo)/ θ_y (EC8)	θ_u (Modelo)/ θ_u (EC8)	EI (Modelo)/EI (EC8)
AS11-1	1,59	0,86	0,68	1,39	0,10	0,96
AS11-22	1,41	0,54	1,18	1,09	0,08	1,61
AS11-2R	1,45	0,56	1,12	1,09	0,08	1,55
AS11-3	1,67	0,56	0,78	1,41	0,07	1,01
AS11-20	1,37	0,64	1,14	0,99	0,13	1,59
AS11-21	1,39	0,57	1,25	1,29	0,08	1,47
AS11-4	1,36	0,44	0,93	0,92	0,07	1,31
AS11-5	1,40	0,60	0,98	1,17	0,08	1,40
AS11-6	1,29	0,44	0,98	0,89	0,09	1,45
AS11-7	1,35	0,60	0,97	0,93	0,09	1,46
AS11-8	1,52	0,74	0,88	1,07	0,12	1,36
AS11-9	0,97	0,53	0,95	0,69	0,11	1,45
AS21-10	1,27	0,85	0,82	0,91	0,16	1,21
AS31-11	1,66	0,51	0,78	0,67	0,13	1,06
AS21-12	2,27	1,18	0,74	1,84	0,16	0,94
AS21-13	2,99	3,28	0,51	2,46	0,20	0,64
AS21-23	0,95	0,41	1,26	0,57	0,09	1,65
AS21-24	0,60	0,39	1,15	0,60	0,29	1,07
AS23-14	1,05	0,69	1,04	0,70	0,13	1,23
AS24-15	0,96	0,42	1,26	0,91	0,06	1,27
AS13-16	1,36	0,52	0,87	0,99	0,09	1,43
BS11-17	1,49	0,51	1,01	1,38	0,08	1,22
BS11-18	1,33	0,55	1,55	1,09	0,05	2,04
BS13-19	1,31	0,54	1,26	1,22	0,06	1,54
AS11-25	1,58	0,62	1,11	1,58	0,07	0,00
Desviación típica (σ)	0,452	0,564	0,227	0,417	0,052	0,391
Coefficiente de Variación (Cv %)	31,75%	80,28%	22,49%	37,45%	49,07%	30,60%
Percentil (5 %)	0,70	0,40	0,56	0,58	0,05	0,19
Percentil (95 %)	2,77	2,65	1,46	2,28	0,26	1,92
	COMPARATIVA M. SIMPLIFICADO EUROCÓDIGO 8 CON M. APROXIMADO			COMPARATIVA M. SIMPLIFICADO EUROCÓDIGO 8 CON M. EC 8		
Referencia	θ_y (Modelo)/ θ_y (MA)	θ_u (Modelo)/ θ_u (MA)	EI (Modelo)/EI (MA)	θ_y (Modelo)/ θ_y (EC8)	θ_u (Modelo)/ θ_u (EC8)	EI (Modelo)/EI (EC8)
AS11-1	1,83	0,96	0,59	1,59	0,11	0,84
AS11-22	1,62	0,61	1,03	1,25	0,09	1,40
AS11-2R	1,66	0,62	0,98	1,24	0,09	1,35
AS11-3	1,91	0,63	0,69	1,61	0,08	0,89
AS11-20	1,57	0,72	1,00	1,13	0,15	1,39
AS11-21	1,59	0,64	1,09	1,47	0,09	1,28
AS11-4	1,55	0,50	0,81	1,06	0,08	1,14
AS11-5	1,61	0,68	0,86	1,34	0,09	1,23
AS11-6	1,47	0,50	0,86	1,02	0,10	1,27
AS11-7	1,54	0,67	0,85	1,07	0,11	1,28
AS11-8	1,74	0,83	0,76	1,22	0,13	1,18
AS11-9	1,12	0,57	0,83	0,79	0,12	1,27
AS21-10	1,40	0,62	0,74	1,00	0,12	1,09
AS31-11	1,78	0,52	0,73	0,72	0,13	0,99
AS21-12	2,52	0,83	0,67	2,04	0,11	0,85
AS21-13	3,44	2,38	0,44	2,83	0,14	0,55
AS21-23	1,09	0,46	1,09	0,66	0,10	1,43
AS21-24	0,71	0,44	0,96	0,72	0,32	0,90
AS23-14	1,17	0,54	0,93	0,78	0,10	1,11
AS24-15	1,07	0,43	1,13	1,02	0,07	1,15
AS13-16	1,56	0,57	0,76	1,13	0,10	1,24
BS11-17	1,71	0,58	0,88	1,58	0,09	1,07
BS11-18	1,52	0,63	1,35	1,25	0,06	1,78
BS13-19	1,50	0,60	1,10	1,40	0,07	1,34
AS11-25	1,81	0,66	0,97	1,80	0,07	1,15
Desviación típica (σ)	0,512	0,374	0,195	0,478	0,050	0,246
Coefficiente de Variación (Cv %)	31,62%	54,38%	22,07%	37,61%	46,54%	21,12%
Percentil (5 %)	0,82	0,43	0,49	0,68	0,06	0,64
Percentil (95 %)	3,16	1,95	1,28	2,60	0,27	1,68

