



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Departamento de Ingeniería de la Construcción
y Proyectos de Ingeniería Civil

TESIS DOCTORAL

Estudio teórico-experimental de soportes
esbeltos de hormigón armado sometidos a
compresión con excentricidades y ángulos
de esviaje desiguales en sus extremos

AUTOR:

Luiz Carlos da Costa Lino Leite

DIRIGIDA POR:

Dr. José Luis Bonet Senach

Dr. Pedro F. Miguel Sosa

Valencia, Noviembre de 2011

Agradecimientos

Al Ministerio de Ciencia e Innovación de España y al Fondo Europeo de Desarrollo Regional por la cofinanciación de este Proyecto de Investigación (BIA2006-06429).

A mis tutores, Dr. José Luis Bonet Senach y Dr. Pedro F. Miguel Sosa, por su supervisión y apoyo, así como los consejos y conocimientos que me han aportado a lo largo del presente trabajo.

A los profesores, Dr. Luis Pallarés Rubio y Dr. Miguel Ángel Fernández Prada, por toda la aportación, ayuda y colaboración en el desarrollo del trabajo de investigación.

A los profesores, secretarias y compañeros del Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil de la Universtat Politècnica de València (UPV), quienes me han ofrecido sus conocimientos, ayuda y experiencia siempre que lo he necesitado.

Al personal técnico del Laboratorio de Elementos Estructurales de Hormigón del Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil de la UPV, por la valiosa ayuda en la fase experimental, y en especial a Lino Martínez Todolí, por la intensa participación en el desarrollo del programa experimental.

Al apoyo institucional de la UPV, así como el de todo el personal técnico y administrativo del Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH).

A la empresa Asland, FerroAtlantica y Basf, por sus aportaciones.

A la empresa Hidráulica Ferrer, por su entrega en la fabricación de las piezas para la realización del programa experimental.

A mis amigos que siempre me han apoyado e incentivado a seguir adelante.

A mi familia, por todo su incentivo, apoyo y comprensión en todo momento, a pesar de la distancia. Siempre han estado conmigo.

En especial, a mi esposa, Julie Lopes, por su compañía, paciencia, apoyo e incentivo incondicional. Su presencia a mi lado ha sido fundamental para llegar hasta aquí.

Valencia, Noviembre de 2011

Luiz Carlos da Costa Lino Leite

Resumen

Los soportes de hormigón armado, en general, están sometidos a una ley de momentos flectores no uniforme debido a la existencia de excentricidades desiguales en sus extremos. Además, el empleo de hormigón de alta resistencia en la construcción de estructuras ordinarias está cada vez más extendida, lo que supone la fabricación de soportes más esbeltos. Sin embargo, los ensayos experimentales existentes en la literatura técnica para soportes fabricados con hormigón de alta resistencia y sometidos a excentricidades distintas en los extremos son escasos y centran su estudio en el comportamiento de soportes cortos, fabricados con hormigón convencional y bajo esfuerzos de flexo-compresión recta.

Por otra parte, los códigos de diseño, en general, proponen métodos simplificados con la finalidad de predecir la carga de agotamiento de soportes esbeltos sometidos a esfuerzos de flexo-compresión con excentricidades desiguales en sus extremos. Sin embargo, los métodos simplificados han sido contrastados, en su gran mayoría, con soportes fabricados con hormigón convencional. La extrapolación de estos métodos a hormigones de alta resistencia sin un soporte científico y verificación experimental adecuados puede conducir a resultados poco fiables.

En la presente tesis doctoral se ha estudiado el comportamiento de 68 soportes esbeltos sometidos a compresión con excentricidades y ángulos de esviaje desiguales en sus extremos, fabricados con hormigón convencional y de alta resistencia. Estos ensayos tienen como objetivo conocer el comportamiento de este tipo de elementos estructurales y además han de servir para poder calibrar modelos numéricos y validar métodos simplificados.

La importancia de la investigación se centra en la contribución de aumentar el banco de datos experimentales disponibles con el fin de corroborar los métodos de diseño propuesto por las distintas normativas para soportes de hormigón armado sometidos a este tipo de sollicitación. Además, se propone una expresión para el cálculo del coeficiente de equivalencia C_m , teniendo en cuenta el comportamiento de este tipo de elementos estructurales, mediante una simulación numérica realizada con un programa de elementos finitos calibrado con los ensayos experimentales. La propuesta cubre los casos de soportes sollicitados a esfuerzos de flexo-compresión recta o esviada con excentricidades distintas en magnitud, dirección y sentido en cada extremo, fabricados con hormigón convencional o de alta resistencia.

Abstract

The reinforced concrete columns are, in general, subject to a law of non-uniform bending moment due to the existence of unequal end eccentricities. In addition, the use of high-strength concrete in the construction of ordinary structures is becoming increasingly common, which suppose the design of more slender columns. However, the literature review indicated that experimental studies for high-strength concrete columns subjected to different end eccentricities are scarce and focus their study on the behavior of short-length columns under one way flexural-compression loadings.

On the other hand, the design codes generally propose simplified methods in order to predict the ultimate load of slender columns under compression with unequal end eccentricities. However, the simplified methods have been verified, in most, with normal strength concrete columns. The extrapolation of these methods to high-strength concrete without scientific support and adequate experimental verification may lead to unreliable results.

The behavior of 68 slender columns under compression with different end eccentricities and skew angles cast with normal and high-strength concrete has been studied on this thesis. These experimental tests are aimed at understanding the behavior of this type of structural elements and also should serve to calibrate numerical models and to validate simplified methods.

The research importance focuses on the contribution of increasing the available experimental database in order to verify the design methods proposed by the different design codes for reinforced concrete columns subjected to this kind of solicitation. In addition, a parametric study was conducted to propose an expression for calculating the coefficient of equivalence C_m , taking into account the behavior of such structural elements, through a numerical finite element method calibrated with the experimental data. The proposed expression covers the normal and high-strength concrete slender flexural-compression columns under unequal eccentricities and skew angle loaded ends.

Resum

Els suports de formigó armat, en general, estan sotmesos a una llei de moments flectores no uniforme a causa de l'existència d'excentricitats desiguals als seus extrems. A més, l'ocupació de formigó d'alta resistència a la construcció d'estructures ordinàries està cada vegada més estesa, la qual cosa suposa la fabricació de suports més esvelts. No obstant això, els assajos experimentals existents en la literatura tècnica per a suports fabricats amb formigó d'alta resistència i sotmesos a excentricitats distintes als seus extrems són escassos i centren el seu estudi al comportament de suports curts, fabricats amb formigó convencional i esforços reduïts de flexo-compresió recta.

D'altra banda, els codis de disseny, en general, proposen mètodes simplificats amb la finalitat de predir la càrrega d'esgotament de suports esvelts sotmesos a esforços de flexo-compresió amb excentricitats desiguals als seus extrems. No obstant això, els mètodes simplificats han sigut contrastats, en la seua gran majoria, amb suports fabricats amb formigó convencional. L'extrapolació d'aquests mètodes a formigons d'alta resistència sense un suport científic i verificació experimental adequats pot conduir a resultats poc fiables.

A la present tesi doctoral s'ha estudiat el comportament de 68 suports esvelts sotmesos a compressió amb excentricitats i angles d'esbiaixada desiguals als seus extrems, fabricats amb formigó convencional i d'alta resistència. Aquests assajos tenen com a objectiu conèixer el comportament d'aquest tipus d'elements i a més han de servir per a poder calibrar models numèrics i validar mètodes simplificats.

La importància de la investigació es centra a la contribució d'augmentar el banc de dades experimentals disponibles a fi de corroborar els mètodes de disseny proposat per les distintes normatives per a suports de formigó armat sotmesos a aquest tipus de sol·licitació. A més, es proposa una expressió per al càlcul del coeficient d'equivalència C_m , tenint en compte el comportament d'aquest tipus d'elements estructurals, per mitjà d'una simulació numèrica realitzada amb un programa d'elements finits calibrat amb els assajos experimentals. La proposta cobreix els casos de suports sol·licitats amb esforços de flexo-compresió recta o esbiaixada amb excentricitats distintes en magnitud, direcció i sentit en cada extrem, fabricats amb formigó convencional o d'alta resistència.

Tabla de contenido

Agradecimientos	i
Resumen	ii
Abstract	iii
Resum	iv
Tabla de contenido	v
Lista de figuras	xi
Lista de tablas	xx
Nomenclatura	xxiii
Capítulo 1. Introducción	1.1
1.1. Antecedentes.....	1.1
1.2. Introducción.....	1.2
1.3. Objetivo general	1.4
1.4. Contenido del documento	1.5
Capítulo 2. Estado actual del conocimiento	2.1
2.1. Introducción teórica al pandeo de soportes	2.2
2.1.1. Carga crítica de pandeo	2.2
2.1.2. Excentricidades distintas en extremos.....	2.5
2.1.3. Estado Límite de Inestabilidad	2.10
2.2. Análisis de los métodos simplificados propuestos	2.15
2.2.1. Comprobación: métodos que aproximan la deformada del soporte	2.15
2.2.2. Dimensionamiento.....	2.20
2.2.3. Excentricidades desiguales en los extremos: coeficiente de equivalencia C_m	2.21
2.3. Análisis de los ensayos experimentales existentes en la literatura.....	2.24
2.4. Análisis paramétrico de la distribución de ensayos experimentales existentes en la literatura.....	2.29
2.4.1. Resistencia del hormigón (f_c)	2.29
2.4.2. Relación entre excentricidades (e_1/e_2).....	2.29

2.4.3. Excentricidad relativa (e_2/h)	2.29
2.4.4. Esbeltez geométrica (λ_g).....	2.30
2.4.5. Cuantía geométrica de armadura longitudinal (ρ_l)	2.30
2.4.6. Cuantía mecánica de armadura longitudinal (ω).....	2.30
2.4.7. Resistencia del acero (f_y)	2.30
2.4.8. Recubrimiento relativo (r_{mec}/h).....	2.32
2.4.9. Relación de lados (h/b)	2.32
2.4.10. Conclusiones del análisis paramétrico.....	2.32
Capítulo 3. Importancia de la investigación y objetivos específicos	3.1
3.1. Importancia de la investigación.....	3.2
3.2. Planteamiento de objetivos específicos	3.2
Capítulo 4. Programa experimental	4.1
4.1. Definición de los parámetros de estudio a considerar en la experimentación y su rango de variación	4.2
4.1.1. Análisis previo mediante la utilización de un modelo numérico	4.2
4.1.2. Definición de los valores concretos de cada parámetro analizado en el programa experimental.....	4.4
4.1.3. Ensayos realizados.....	4.9
4.2. Caracterización de los materiales	4.11
4.2.1. Hormigón.....	4.11
4.2.2. Acero	4.12
4.3. Diseño del ensayo.....	4.14
4.3.1. Procedimiento de ensayo.....	4.17
4.3.1.a. Preparación de la armadura.....	4.18
4.3.1.b. Preparación del encofrado	4.22
4.3.1.c. Hormigonado del soporte y de las probetas de control.....	4.22
4.3.1.d. Desmoldeo	4.25
4.3.1.e. Preparación del soporte a ser ensayado	4.25
4.3.1.f. Preparación del pórtico de ensayo.....	4.28
4.3.1.g. Posicionamiento del soporte en el pórtico de ensayo.....	4.30

4.3.1.h. Instrumentación	4.32
4.3.1.i. Rotura de las probetas de control	4.34
4.3.1.j. Configuración del ensayo en el programa de adquisición de datos	4.35
4.3.1.k. Inicio del ensayo.....	4.36
4.3.1.l. Finalización del ensayo	4.37
Capítulo 5. Análisis de los resultados experimentales.....	5.1
5.1. Cargas axiales máximas y últimas obtenidas en los ensayos	5.2
5.2. Deformaciones en acero y hormigón.....	5.4
5.3. Desplazamientos.....	5.9
5.4. Comportamiento de los soportes	5.11
5.4.1. Flexo-compresión recta	5.11
5.4.1.a. Modo de fallo en situación de carga máxima (N_{max})	5.14
5.4.1.b. Modo de fallo en situación de carga última (N_u).....	5.16
5.4.2. Flexo-compresión esviada	5.19
5.4.2.a. Modo de fallo en situación de carga máxima (N_{max})	5.23
5.4.2.b. Modo de fallo en situación de carga última (N_u).....	5.23
5.4.2.c. Desacoplamiento entre flectores.....	5.24
5.5. Análisis de las variables estudiadas.....	5.25
5.5.1. Influencia de la excentricidad adimensional (e_2/h)	5.26
5.5.2. Influencia de la relación entre excentricidades en extremos (β)	5.27
5.5.3. Análisis de los desplazamientos máximos	2.29
5.6. Verificación de métodos simplificados	5.32
5.6.1. Instrucción de hormigón estructural EHE-08 [17]	5.33
5.6.1.a. Flexo-compresión recta.....	5.33
5.6.1.b. Flexo-compresión esviada	5.33
5.6.2. Eurocódigo nº 2 (2004) [23].....	5.33
5.6.2.a. Flexo-compresión recta.....	5.33
5.6.2.b. Flexo-compresión esviada	5.36
5.6.3. Código americano ACI-318 (2008) [1]	5.36
5.6.3.a. Flexo-compresión recta.....	5.36

5.6.3.b. Flexo-compresión esviada	5.37
5.6.4. Contraste de los resultados experimentales con los métodos simplificados propuestos por las normativas	5.38
5.6.4.a. Flexo-compresión recta.....	5.38
5.6.4.b. Flexo-compresión esviada	5.45
Capítulo 6. Simulación numérica	6.1
6.1. Característica del modelo teórico de referencia (MTR)	6.2
6.2. Calibración del MTR	6.3
6.2.1. Carga máxima alcanzada en cada ensayo.....	6.4
6.2.2. Desplazamientos	6.12
6.2.2.a. Flexo-compresión recta.....	6.12
6.2.2.b. Flexo-compresión esviada	6.13
6.3. Simulación numérica	6.17
6.3.1. Flexo-compresión recta	6.18
6.3.2. Flexo-compresión esviada	6.22
Capítulo 7. Propuesta de un nuevo método simplificado para el cálculo del coeficiente de equivalencia C_m.....	7.1
7.1. Planteamiento teórico	7.2
7.1.1. Flexo-compresión recta	7.3
7.1.2. Flexo-compresión esviada	7.5
7.2. Análisis paramétrico	7.6
7.2.1. Flexo-compresión recta	7.7
7.2.1.a. Análisis de resultados obtenidos mediante la simulación numérica.....	7.8
7.2.1.b. Nueva propuesta de expresión para la obtención del coeficiente C_m .	7.11
7.2.1.c. Verificación del grado de precisión de la nueva expresión propuesta: flexo-compresión recta	7.13
7.2.2. Flexo-compresión esviada	7.19
7.2.2.a. Análisis de resultados obtenidos mediante la simulación numérica...	7.20
7.2.2.b. Verificación del grado de precisión de la nueva expresión propuesta: flexo-compresión esviada	7.26

7.3. Aplicación de la nueva expresión propuesta para el cálculo del coeficiente de equivalencia C_m	7.32
Capítulo 8. Síntesis, conclusiones y futuras líneas de investigación.....	8.1
8.1. Síntesis.....	8.1
8.2. Conclusiones.....	8.2
8.2.1. Conclusiones relativas a la revisión bibliográfica realizada.....	8.2
8.2.2. Conclusiones relativas al análisis de los resultados experimentales realizados	8.3
8.2.3. Conclusiones relativas a la comparación de los resultados experimentales con los métodos simplificados propuestos por las normativas.....	8.4
8.2.4. Conclusiones relativas a la simulación numérica realizada (MTR)	8.5
8.2.5. Conclusiones relativas a la nueva propuesta para obtención del coeficiente de equivalencia C_m	8.6
8.3. Futuras líneas de investigación.....	8.7
R. Referencias Bibliográficas	R.1
Anejo A. Ficha técnica de los ensayos.....	A.1
Anejo B. Medidas directas de los ensayos	B.1
B.1. Flexo-compresión recta:.....	B.3
B.2. Flexo-compresión esviada:	B.35
Anejo C. Determinación del módulo de elasticidad en compresión del hormigón utilizado en los ensayos experimentales.....	C.1
Anejo D. Ensayos experimentales existentes en la literatura	D.1
Anejo E. Contraste de los resultados experimentales con los métodos simplificados propuestos por las normativas	E.1
E.1. Contraste: flexo-compresión recta:	E.2
E.2. Contraste: flexo-compresión esviada:	E.7
Anejo F. Precisión del MTR en cuanto a las flechas alcanzadas en cada ensayo ..	F.1
F.1. Flexo-compresión recta:	F.2
F.2. Flexo-compresión esviada:	F.10
Anejo G. Gráficas obtenidas con la simulación numérica para las series completas de flexo-compresión esviada	G.1

Anejo H. Resultados del análisis paramétrico – diagramas de interacción	H.1
H.1. Flexo-compresión recta:	H.2
H.2. Flexo-compresión esviada:	H.7
Anejo I. Aplicación de la nueva expresión propuesta para el cálculo del coeficiente de equivalencia C_m.....	I.1

Lista de figuras

<i>Figura 1.1. Ejemplo de estructuras sometidas a una sollicitación de flexo-compresión esviada con excentricidades y ángulos de esviaje desiguales en extremos: a. Pila de puente; b. Pilar de esquina en pórtico de edificación.....</i>	1.3
<i>Figura 2.1. a. Equilibrio en posición deformada; b. Diagrama M-N en la sección central.....</i>	2.3
<i>Figura 2.2. Relación carga-flecha de un soporte sometido a flexo-compresión recta. Material elástico y lineal.....</i>	2.4
<i>Figura 2.3. Relación carga-flecha de un soporte sometido a flexo-compresión.</i>	2.5
<i>Figura 2.4. Soporte sometido a esfuerzo axial con momentos distintos en extremos. ..</i>	2.5
<i>Figura 2.5. $M_{max} = M_B$ en el extremo de la pieza.</i>	2.7
<i>Figura 2.6. Momento equivalente: a. Distribución de esfuerzos original. b. Distribución de esfuerzos equivalente.</i>	2.9
<i>Figura 2.7. Coeficiente de equivalencia C_m obtenido teóricamente con cálculo elástico-lineal (expresión 2.25).....</i>	2.10
<i>Figura 2.8. No-linealidad geométrica.....</i>	2.11
<i>Figura 2.9. Diagrama Momento-Curvatura de la sección.....</i>	2.11
<i>Figura 2.10. Situación de equilibrio.</i>	2.12
<i>Figura 2.11. Agotamiento frente a sollicitaciones normales del soporte.</i>	2.12
<i>Figura 2.12. Inestabilidad del soporte.....</i>	2.13
<i>Figura 2.13. Situaciones límite del soporte aislado.....</i>	2.13
<i>Figura 2.14. Distribución de esfuerzos: excentricidades distintas en extremos.</i>	2.14
<i>Figura 2.15. Diagrama de interacción de la sección transversal y del soporte sometido a excentricidades diferentes en extremos para distintas esbelteces geométricas.</i>	2.15
<i>Figura 2.16. Deformada senoidal propuesta por Faessel [48].</i>	2.16
<i>Figura 2.17. Situaciones límite: a. Equilibrio estable; b. Inestabilidad; c. Agotamiento por tensiones normales.....</i>	2.17
<i>Figura 2.18. Deformada senoidal propuesta por Robinson et al. (1975) [47].....</i>	2.17
<i>Figura 2.19. Intersección entre la directriz geométrica (relación entre momentos totales exteriores y la curvatura) y la directriz mecánica (relación entre los momentos internos y la curvatura) - Arenas de Pablo (1980) [5].</i>	2.18
<i>Figura 2.20. Columna modelo.....</i>	2.19

<i>Figura 2.21. Diagramas de interacción de la sección y del soporte.</i>	2.20
<i>Figura 2.22. Planteamiento del Estado Límite.</i>	2.20
<i>Figura 2.23. Martin y Oliviere (1966) [37]: a. Características del ensayo; b. Deformada de los soportes 412-1 y 412-2.</i>	2.25
<i>Figura 2.24. MacGregor y Bartter (1966) [34]: Característica de los ensayos realizados.</i>	2.26
<i>Figura 2.25. Sarker y Rangan (2003) [50]: a. Sección transversal; b. Esquema de aplicación de excentricidad en extremos; c. Rotura frágil de uno de los soportes ensayados.</i>	2.27
<i>Figura 2.26. Bradford (2005) [12]: a. Esquema de la sección transversal analizada por los autores; b. Foto de los soportes durante el ensayo.</i>	2.27
<i>Figura 2.27. Número de ensayos según el tipo de carga aplicada.</i>	2.28
<i>Figura 4.1. Ejemplo de resultado de la simulación numérica previa: a. Carga \times desplazamiento; b. Deformada en situación de carga máxima.</i>	4.4
<i>Figura 4.2. Croquis de la sección transversal de los soportes en la zona central y en la zona confinada y alzado de la ferralla.</i>	4.7
<i>Figura 4.3. Barras roscadas de diámetro 16 mm, con rosca de métrica 14 y 70 mm de longitud.</i>	4.13
<i>Figura 4.4. Diagrama tensión – deformación del acero.</i>	4.14
<i>Figura 4.5.a. Pórtico de ensayo; b. Sistema de aplicación de cargas: dispositivo móvil.</i>	4.15
<i>Figura 4.6. Placas del sistema de aplicación de cargas.</i>	4.16
<i>Figura 4.7. Sistema de aplicación de cargas.</i>	4.16
<i>Figura 4.8.a. Detalle de los extremos del soporte; b. Zuncho para evitar la rotura frágil.</i>	4.17
<i>Figura 4.9. Croquis de armado para los soportes objeto de ensayo.</i>	4.18
<i>Figura 4.10.a. Barras roscadas soldadas a la armadura; b. Estribos extras atados y placa auxiliar puesta en posición.</i>	4.19
<i>Figura 4.11.a. Disposición de bandas extensométricas en soportes con 6 redondos; b. Soportes con 4 redondos.</i>	4.20
<i>Figura 4.12. Procedimiento para el correcto pegado de las bandas extensométricas.</i>	4.21
<i>Figura 4.13.a. Detalle de los separadores colocados en la armadura; b. Armaduras preparadas para el hormigonado.</i>	4.21

<i>Figura 4.14. Armadura en el encofrado auto-vibrante preparado para el hormigonado.</i>	4.22
<i>Figura 4.15.a. Materiales separados para el inicio de las amasadas; b. Amasadora de eje vertical.</i>	4.23
<i>Figura 4.16.a. Probetas de control preparadas. b. Hormigón fresco en el encofrado.</i>	4.24
<i>Figura 4.17.a. Detalle de la agarradera metálica para izado del soporte; b. Curado del soporte.</i>	4.25
<i>Figura 4.18. Preparación del soporte: a. Flexo-compresión recta; b. Flexo-compresión esviada.</i>	4.26
<i>Figura 4.19. Esquema para obtenerse el desplazamiento del centro de gravedad de la pieza por triangulación de las medidas iniciales y finales de los captadores de desplazamiento.</i>	4.27
<i>Figura 4.20.a. Detalle del zuncho colocado en el extremo del soporte; b. Detalle de la placa de anclaje y de excentricidad sobre el cono de carga en el extremo inferior del soporte.</i>	4.27
<i>Figura 4.21.a. Dispositivo móvil posicionado para ensayo a flexo-compresión recta; b. Angulo y excentricidad posicionados para ensayo a flexo-compresión esviada.</i>	4.28
<i>Figura 4.22. Posicionamiento del dispositivo móvil → flexo-compresión recta ($\alpha = 0^\circ$): a. Relación entre excentricidades $\beta = 0.5$; b. Relación entre excentricidades $\beta = -0.5$.</i>	4.29
<i>Figura 4.23. Esquema de posicionamiento del dispositivo móvil para un ensayo con ángulo de esviaje superior $\alpha_1 = 0^\circ$; ángulo de esviaje inferior $\alpha_2 = 45^\circ$; excentricidad superior $e_1 = 12.5$ mm y excentricidad inferior $e_2 = 25$ mm.</i>	4.30
<i>Figura 4.24.a. Izado del soporte; b. Fase de aproximación del soporte al pórtico de carga mediante el uso de la carretilla elevadora.</i>	4.31
<i>Figura 4.25. Posición de las bandas extensométricas en las secciones instrumentadas.</i>	4.33
<i>Figura 4.26. Soporte posicionado en el pórtico de ensayo con toda la instrumentación conectada.</i>	4.34
<i>Figura 4.27.a. Probeta de control refrentada posicionada en la prensa hidráulica con la jaula de protección; b. Probeta de hormigón de alta resistencia tras la rotura.</i>	4.35
<i>Figura 4.28. Visualización en tiempo real de los resultados obtenidos del ensayo.</i>	4.36
<i>Figura 4.29. Rotura del soporte.</i>	4.37
<i>Figura 4.30. Retirada del espécimen.</i>	4.38

<i>Figura 4.31.a. Ficha técnica de ensayo; b. Medidas directas.</i>	4.39
<i>Figura 5.1. Notación empleada para identificar la localización de las bandas extensométricas.</i>	5.5
<i>Figura 5.2. Croquis de la sollicitación aplicada: (a) S05-A3; (b) S01-C3.</i>	5.6
<i>Figura 5.3. Medidas directas del ensayo S05-A3 ($A3_{\alpha0_{\beta3}_{eh2}_{\lambda30}_{HAR}_{\rho2}}$).</i>	5.6
<i>Figura 5.4. Posición de las bandas extensométricas ubicadas en las secciones instrumentadas (flexo-compresión esviada).</i>	5.7
<i>Figura 5.5. Medidas directas registradas por las bandas extensométricas en la sección central del soporte S01-C3 ($C3_{\alpha4_{\beta1}_{eh2}_{\lambda24}_{HAR}_{\rho1}}$); a. Acero; b. Hormigón.</i>	5.8
<i>Figura 5.6. Plano de deformación de la sección central (carga máxima) S01-C3 ($C3_{\alpha4_{\beta1}_{eh2}_{\lambda24}_{HAR}_{\rho1}}$).</i>	5.9
<i>Figura 5.7. Soporte S05-A3; a. Carga-flecha para la sección central; b. Deformada del soporte para distintos niveles de carga.</i>	5.10
<i>Figura 5.8. Soporte S01-C3; a. Carga-flecha para la sección central; b. Deformada del soporte para distintos niveles de carga.</i>	5.10
<i>Figura 5.9. Desplazamiento en planta de la sección central del soporte S01-C3.</i>	5.11
<i>Figura 5.10. Tipos de rotura: a. Frágil: salto de recubrimiento y pandeo de la armadura comprimida (S05-A1); b. Dúctil: fisuración distribuida y formación de rótula plástica (S03-A2).</i>	5.13
<i>Figura 5.11. Tipos de deformada en el soporte; a Sin formación de rótula plástica (Soporte S05-A1); b. Con formación de la rótula plástica (Soporte S09-A1).</i>	5.14
<i>Figura 5.12. Modos de fallo: a. Inestabilidad (Soporte S07-A1); b. Agotamiento (Soporte S10-A1).</i>	5.15
<i>Figura 5.13. Diagramas momento-axil reducidos ($\mu \times v$) de los ensayos experimentales y diagramas de interacción de la sección transversal ($\lambda_g = 0$) según el EC-2 (2004) [23] y la EHE-08 [17]; flexo-compresión recta.</i>	5.18
<i>Figura 5.14. Tipos de rotura: a. Frágil: salto de recubrimiento (soporte S03-C1); b. Dúctil: Fisuración distribuida (soporte S04-B2).</i>	5.22
<i>Figura 5.15. Influencia de la excentricidad adimensional (e_2/h): flexo-compresión recta.</i>	5.26
<i>Figura 5.16. Influencia de la excentricidad adimensional (e_2/h): flexo-compresión esviada.</i>	5.27
<i>Figura 5.17. Influencia de la relación entre excentricidades (β): flexo-compresión recta.</i>	5.28

<i>Figura 5.18. Influencia de la relación entre excentricidades (β): flexo-compresión esviada.</i>	5.28
<i>Figura 5.19. Análisis de los desplazamientos máximos registrados: flexo-compresión recta.</i>	5.29
<i>Figura 5.20. Análisis de los desplazamientos máximos registrados respecto al eje “x”: flexo-compresión esviada.</i>	5.31
<i>Figura 5.21. Carga desplazamiento: S05-A2 (HC); S02.A1 (HAR).</i>	5.32
<i>Figura 5.22. Verificación de métodos simplificados: resistencia del hormigón (f_c) (flexo-compresión recta).</i>	5.41
<i>Figura 5.23. Diagramas de interacción EC-2: flexo-compresión recta.</i>	5.43
<i>Figura 5.24. Diagramas de interacción - métodos simplificados propuestos: a. EC-2 (2004) [23] (1) amplificación de momento; b. EC-2 (2004) [23] (2) excentricidad adicional; c. ACI-318 (2008) [1] (1) rigidez EI teniendo en cuenta la armadura longitudinal; d. ACI-318 (2008) [1] (1) rigidez EI sin tener en cuenta la armadura longitudinal; e. EHE-08 [17]; f. Comparación entre métodos.</i>	5.44
<i>Figura 5.25. Verificación de métodos simplificados: resistencia del hormigón (f_c) flexo-compresión esviada.</i>	5.48
<i>Figura 6.1. Grado de precisión (ξ) en función de la resistencia del hormigón (f_c).</i>	6.7
<i>Figura 6.2. Salto de recubrimiento. Soporte fabricado con HAR.</i>	6.7
<i>Figura 6.3. Esquema del incremento de la excentricidad debido al salto de recubrimiento.</i>	6.8
<i>Figura 6.4. Sección transversal considerada con la utilización de distintos coeficientes k_3.</i>	6.8
<i>Figura 6.5. Precisión del MTR en cuanto a las flechas alcanzadas en los ensayos a flexo-compresión recta.</i>	6.13
<i>Figura 6.6. Ajuste de la excentricidad adimensional por imperfecciones: $e_{imp} = L/400$: a. Deformada (N_{max}); b. Diagrama carga – desplazamiento.</i>	6.16
<i>Figura 6.7. Ajuste de la excentricidad adimensional por imperfecciones: $e_{imp} = L/1000$: a. Deformada (N_{max}); b. Diagrama carga–desplazamiento.</i>	6.16
<i>Figura 6.8. Resultados de la simulación numérica - flexo-compresión recta.</i>	6.19
<i>Figura 6.9. Resultados de la simulación numérica - flexo-compresión recta (continuación).</i>	6.20
<i>Figura 6.10. Simulación numérica - flexo-compresión recta: Ratio C_m.</i>	6.21
<i>Figura 6.11. Simulación numérica - flexo-compresión esviada.</i>	6.23

<i>Figura 6.12. Simulación numérica - flexo-compresión esviada (serie C2); Momentos equivalentes.</i>	6.24
<i>Figura 6.13. Simulación numérica - flexo-compresión esviada (serie C2); Ratio $\mu_e/\mu_{\beta=1}$.</i>	6.25
<i>Figura 6.14. Ratio $\mu_e/\mu_{\beta=1}$ en función de los parámetros analizados: flexo-compresión esviada.</i>	6.26
<i>Figura 6.15. Simulación numérica: Flexo-compresión recta con las componentes de las excentricidades en cada eje de flexión (x, y).</i>	6.27
<i>Figura 7.1. Distribución de esfuerzos en soportes sometidos a excentricidades iguales en extremos.</i>	7.2
<i>Figura 7.2. Distribución de esfuerzos: excentricidades distintas en extremos.</i>	7.3
<i>Figura 7.3. Excentricidad equivalente: a. Distribución de esfuerzos original; b. Distribución de esfuerzos equivalente.</i>	7.4
<i>Figura 7.4. Soporte sometido a esfuerzo axial con momentos distintos en extremos.</i> ..	7.4
<i>Figura 7.5. Coeficiente de equivalencia C_m obtenido teóricamente con cálculo elástico-lineal.</i>	7.5
<i>Figura 7.6. Método del coeficiente de equivalencia C_m.</i>	7.7
<i>Figura 7.7. Diagramas de interacción de la sección ($\lambda_g = 0$) y del soporte ($\lambda_g \neq 0$).</i> ..	7.8
<i>Figura 7.8. Análisis de la influencia de la cuantía mecánica de armadura longitudinal (ω) en el coeficiente de equivalencia C_m a. $f_c = 30$ MPa; b. $f_c = 90$ MPa.</i>	7.9
<i>Figura 7.9. Análisis de la influencia del recubrimiento mecánico (r_{mec}/h) en el coeficiente de equivalencia C_m: a. $f_c = 30$ MPa; b. $f_c = 90$ MPa.</i>	7.9
<i>Figura 7.10. Análisis de la influencia de la resistencia del hormigón (f_c) en el coeficiente de equivalencia C_m: a. $\beta = -0.25$; b. $\beta = 0$.</i>	7.10
<i>Figura 7.11. Análisis de la influencia de la relación entre excentricidades ($\beta = e_1/e_2$) en el coeficiente de equivalencia C_m: a. $f_c = 30$ MPa; b. $f_c = 90$ MPa</i>	7.10
<i>Figura 7.12. Análisis de la influencia de la relación entre excentricidades ($\beta = e_1/e_2$) en el coeficiente de equivalencia C_m.</i>	7.11
<i>Figura 7.13. Coeficiente C_m en función del axil reducido (v) y del producto ($v \cdot \lambda_g^2$).</i> ..	7.12
<i>Figura 7.14. Coeficiente de equivalencia C_m en función del producto $v \cdot \lambda_g^2$.</i>	7.13
<i>Figura 7.15. Grado de precisión del coeficiente de equivalencia C_m en función de la relación entre excentricidades en extremos (β) – flexo-compresión recta.</i>	7.15

<i>Figura 7.16. Grado de precisión del coeficiente de equivalencia C_m en función de la esbeltez geométrica (λ_g) – flexo-compresión recta.</i>	7.16
<i>Figura 7.17. Grado de precisión del coeficiente de equivalencia C_m en función de la resistencia del hormigón (f_c) – flexo-compresión recta.</i>	7.16
<i>Figura 7.18. Grado de precisión del coeficiente de equivalencia C_m en función de la cuantía geométrica de armadura longitudinal (ω) – flexo-compresión recta.</i>	7.17
<i>Figura 7.19. Coeficiente de equivalencia C_m en función del producto $v \cdot \lambda_g^2$.</i>	7.18
<i>Figura 7.20. Superficie de interacción para los esfuerzos de primer orden para la esbeltez λ_g; Flexo-compresión esviada.</i>	7.20
<i>Figura 7.21. Flexo-compresión esviada: a. Distribución de esfuerzo original ($\alpha_1 \neq \alpha_2$; $e_1 \neq e_2$) b. Distribución de esfuerzos equivalentes (excentricidades y ángulos iguales en los extremos).</i>	7.21
<i>Figura 7.22. Esquema de sollicitación aplicada: Sección: rec1; $\alpha_1 = 26.57^\circ$; $\alpha_2 = VAR$; $\beta = 0.5$; $\omega = 0.25$; $f_c = 30$ MPa; $N = 0.50 \cdot N_{cr}$.</i>	7.22
<i>Figura 7.23. Diagrama de interacción μ_x-μ_y: Representación del momento reducido μ_1 en el extremo superior del soporte: $\alpha_1 = 26.57^\circ$.</i>	7.23
<i>Figura 7.24. Diagrama de interacción μ_x-μ_y: Representación del momento reducido μ_2 en el extremo inferior del soporte: $\alpha_2 = VAR$.</i>	7.23
<i>Figura 7.25. Diagrama de interacción μ_x-μ_y: Representación del momento reducido equivalente μ_e.</i>	7.24
<i>Figura 7.26. Diagrama de interacción μ_x-μ_y: Representación del momento reducido del caso patrón de referencia $\mu_{\beta=1}$, con excentricidades y ángulos de esviaje iguales en los extremos.</i>	7.25
<i>Figura 7.27. Diagrama de interacción μ_x-μ_y: Sección – rec1; $\beta = 0.5$; $\omega = 0.25$; $f_c = 30$ MPa; $N = 0.50 \cdot N_{cr}$.</i>	7.25
<i>Figura 7.28. Momentos reducidos equivalente (μ_e) y de referencia ($\mu_{\beta=1}$).</i>	7.26
<i>Figura 7.29. Obtención del grado de precisión de la nueva propuesta.</i>	7.27
<i>Figura 7.30. Grado de precisión del coeficiente de equivalencia C_m en función de la relación entre excentricidades en extremos (β) – flexo-compresión esviada.</i>	7.29
<i>Figura 7.31. Grado de precisión del coeficiente de equivalencia C_m en función del axil nivel de axil aplicado (v/v_{cr}) – flexo-compresión esviada.</i>	7.30
<i>Figura 7.32. Grado de precisión del coeficiente de equivalencia C_m en función de la resistencia del hormigón (f_c) – flexo-compresión esviada.</i>	7.30

<i>Figura 7.33. Grado de precisión del coeficiente de equivalencia C_m en función de esbeltez geométrica (λ_g) – flexo-compresión esviada.</i>	7.31
<i>Figura 7.34. Grado de precisión del coeficiente de equivalencia C_m en función del producto ($v \cdot \lambda_g^2$) – flexo-compresión esviada.</i>	7.31
<i>Figura 7.35. Representación gráfica del grado de precisión del método simplificado propuesto por la EHE-08 [17] con el coeficiente C_m propuesto por Austin (1961) [7] [(a); (c);(e)] y con el coeficiente de equivalencia C_m propuesto en el presente trabajo [(b); (d); (f)] en función de la esbeltez geométrica λ_g [(a); (b)], de la resistencia del hormigón f_c [(c); (d)] y del producto $v \cdot \lambda_g^2$ [(e); (f)].</i>	7.36
<i>Figura C.1.a. Prensa hidráulica utilizada para los ensayos de determinación del módulo de elasticidad del hormigón; b. Detalle de los captadores de desplazamiento ubicados en la probeta.</i>	C.2
<i>Figura C.2. Probetas de control utilizada en los ensayos (HC y HAR).</i>	C.3
<i>Figura C.3. Ciclo carga-descarga en el ensayo para obtención del módulo de elasticidad estático en compresión del hormigón.</i>	C.4
<i>Figura E.1. Verificación de métodos simplificados: cuantía geométrica de armadura longitudinal (ρ_l): flexo-compresión recta.</i>	E.2
<i>Figura E.2. Verificación de métodos simplificados: esbeltez geométrica (λ_g): flexo-compresión recta.</i>	E.3
<i>Figura E.3. Verificación de métodos simplificados: excentricidad adimensional (e_2/h): flexo-compresión recta.</i>	E.4
<i>Figura E.4. Verificación de métodos simplificados: relación entre excentricidades en extremos (β): flexo-compresión recta.</i>	E.5
<i>Figura E.5. Verificación de métodos simplificados: resistencia del hormigón (f_c): flexo-compresión recta.</i>	E.6
<i>Figura E.6. Verificación de métodos simplificados: relación entre ángulos de esviaje en extremos (α_1-α_2): flexo-compresión esviada.</i>	E.7
<i>Figura E.7. Verificación de métodos simplificados: excentricidad adimensional (e_2/h): flexo-compresión esviada.</i>	E.8
<i>Figura E.8. Verificación de métodos simplificados: relación entre excentricidades en extremos (β): flexo-compresión esviada.</i>	E.9
<i>Figura E.9. Verificación de métodos simplificados: resistencia del hormigón (f_c): flexo-compresión esviada.</i>	E.10

<i>Figura G.1. Simulación numérica - flexo-compresión esviada (serie B1); Momentos equivalentes: a. $\beta = -0.5$; b. $\beta = 0$; c. $\beta = 0.5$; d. Ratio $\mu_e/\mu_{\beta=1}$.....</i>	<i>G.2</i>
<i>Figura G.2. Simulación numérica - flexo-compresión esviada (serie B2); Momentos equivalentes: a. $\beta = -0.5$; b. $\beta = 0$; c. $\beta = 0.5$; d. Ratio $\mu_e/\mu_{\beta=1}$.....</i>	<i>G.3</i>
<i>Figura G.3. Simulación numérica - flexo-compresión esviada (serie C1); Momentos equivalentes: a. $\beta = -0.5$; b. $\beta = 0$; c. $\beta = 0.5$; d. Ratio $\mu_e/\mu_{\beta=1}$.....</i>	<i>G.4</i>
<i>Figura G.4. Simulación numérica - flexo-compresión esviada (serie C2); Momentos equivalentes: a. $\beta = -0.5$; b. $\beta = 0$; c. $\beta = 0.5$; d. Ratio $\mu_e/\mu_{\beta=1}$.....</i>	<i>G.5</i>
<i>Figura G.5. Simulación numérica - flexo-compresión esviada (serie C3); Momentos equivalentes: a. $\beta = -0.5$; b. $\beta = 0$; c. $\beta = 0.5$; d. Ratio $\mu_e/\mu_{\beta=1}$.....</i>	<i>G.6</i>
<i>Figura G.6. Simulación numérica - flexo-compresión esviada (serie C4); Momentos equivalentes: a. $\beta = -0.5$; b. $\beta = 0$; c. $\beta = 0.5$; d. Ratio $\mu_e/\mu_{\beta=1}$.....</i>	<i>G.7</i>
<i>Figura G.7. Simulación numérica - flexo-compresión esviada (serie C5); Momentos equivalentes: a. $\beta = -0.5$; b. $\beta = 0$; c. $\beta = 0.5$; d. Ratio $\mu_e/\mu_{\beta=1}$.....</i>	<i>G.8</i>
<i>Figura G.8. Simulación numérica - flexo-compresión esviada (serie C6); Momentos equivalentes: a. $\beta = -0.5$; b. $\beta = 0$; c. $\beta = 0.5$; d. Ratio $\mu_e/\mu_{\beta=1}$.....</i>	<i>G.9</i>
<i>Figura I.1. Grado de precisión de los métodos simplificados propuestos por la normativas en función de la esbeltez geométrica λ_g.</i>	<i>I.2</i>
<i>Figura I.2. Grado de precisión de los métodos simplificados propuestos por la normativas en función de la resistencia del hormigón f_c.</i>	<i>I.3</i>
<i>Figura I.3. Grado de precisión de los métodos simplificados propuestos por la normativas en función del producto $v \cdot \lambda_g^2$.</i>	<i>I.4</i>

Lista de tablas

<i>Tabla 2.1. Curvaturas límite c^* en función de la relación y_{01}/y_{02} - Arenas de Pablo (1980) [5].</i>	2.18
<i>Tabla 2.2. Expresiones del coeficiente de equivalencia C_m para soportes intraslacionales.</i>	2.22
<i>Tabla 2.3. Ensayos con excentricidades distintas en extremos encontrados en la literatura técnica analizada.</i>	2.28
<i>Tabla 2.4. Análisis de los ensayos experimentales existentes en la literatura referente a soportes sometidos a excentricidades distintas en extremos y a una sollicitación de flexo-compresión recta.</i>	2.31
<i>Tabla 4.1. Rango de variación de los parámetros analizados.</i>	4.2
<i>Tabla 4.2. Esbeltez geométrica y mecánica para las distintas secciones transversales de los soportes considerados en el presente trabajo.</i>	4.8
<i>Tabla 4.3. Programa experimental de ensayos ejecutados (flexo-compresión recta).</i>	4.9
<i>Tabla 4.4. Programa experimental de ensayos ejecutados (flexo-compresión esviada).</i>	4.10
<i>Tabla 4.5. Dosificación de los hormigones utilizados en kg/m^3</i>	4.12
<i>Tabla 4.6. Control de calidad del acero.</i>	4.13
<i>Tabla 5.1. Carga máxima, carga última, y resistencia del hormigón: flexo-compresión recta.</i>	5.3
<i>Tabla 5.2. Carga máxima, carga última, y resistencia del hormigón: flexo-compresión esviada.</i>	5.4
<i>Tabla 5.3. Observaciones y resultados (flexo-compresión recta).</i>	5.12
<i>Tabla 5.4. Deformaciones de los materiales (flexo-compresión recta).</i>	5.16
<i>Tabla 5.5. Observaciones y flechas máximas (flexo-compresión esviada).</i>	5.20
<i>Tabla 5.6. Deformaciones y modos de fallo (flexo-compresión esviada).</i>	5.21
<i>Tabla 5.7. Comparación entre el ángulo de inclinación de la fibra neutra (α_{FN}) y el ángulo del flector total (α_M) para la sección crítica en situación de carga máxima (N_{max}).</i>	5.25
<i>Tabla 5.8. Verificación de los métodos simplificados.</i>	5.38
<i>Tabla 5.9. Verificación de los métodos simplificados (flexo-compresión recta).</i>	5.39

<i>Tabla 5.10. Verificación de los códigos de diseño por parámetro analizado (flexo-compresión recta)</i>	5.40
<i>Tabla 5.11. Verificación de los métodos simplificados (flexo-compresión esviada).</i> .	5.46
<i>Tabla 5.12. Verificación de los códigos de diseño por parámetro analizado (flexo-compresión esviada)</i>	5.47
<i>Tabla 6.1. Calibración del modelo numérico – flexo-compresión recta</i>	6.5
<i>Tabla 6.2. Calibración del modelo numérico – flexo-compresión esviada</i>	6.6
<i>Tabla 6.3. Contraste del MTR calibrado con el coeficiente k_3 propuesto con los ensayos experimentales realizados.</i>	6.9
<i>Tabla 6.4. Contraste del MTR calibrado con el coeficiente k_3 propuesto con ensayos realizados por otros autores</i>	6.11
<i>Tabla 6.5. Grado de precisión del MTR respecto a las flechas alcanzadas en cada ensayo: sección central (1.50 m) - flexo-compresión recta.</i>	6.12
<i>Tabla 6.6. Grado de precisión del MTR respecto a las flechas alcanzadas en cada ensayo: sección central (1.50 m) - flexo-compresión esviada.</i>	6.15
<i>Tabla 6.7. Contraste del MTR calibrado con el coeficiente k_3 y con una excentricidad impuesta $e_{imp} = L/1000$: flexo-compresión esviada</i>	6.17
<i>Tabla 6.8. Precisión del coeficiente $C_{m,Code}$ propuesto por los códigos de diseño. Flexo-compresión recta.</i>	6.21
<i>Tabla 6.9. Precisión del coeficiente $C_{m,Code}$ propuesto por los códigos de diseño. Flexo-compresión esviada.</i>	6.25
<i>Tabla 6.10. Relaciones entre excentricidades según los ejes coordenados de flexión (β_x y β_y) y ángulo equivalente de esviaje (α_e) correspondientes a las series analizadas.</i>	6.27
<i>Tabla 6.11. Precisión del método propuesto por los códigos de diseño para flexo-compresión recta correspondiente a las componentes de las excentricidades en cada eje de flexión (x, y)</i>	6.28
<i>Tabla 7.1. Parámetros analizados: flexo-compresión recta.</i>	7.7
<i>Tabla 7.2. Grado de precisión del coeficiente de equivalencia C_m</i>	7.14
<i>Tabla 7.3. Parámetros analizados – flexo-compresión esviada</i>	7.19
<i>Tabla 7.4. Grado de precisión del coeficiente de equivalencia C_m propuesto: flexo-compresión esviada.</i>	7.27
<i>Tabla 7.5. Grado de precisión del coeficiente de equivalencia C_m propuesto por Austin (1961) [7] flexo-compresión esviada.</i>	7.29

<i>Tabla 7.6. Grado de precisión de los métodos simplificados con el coeficiente C_m propuesto por Austin (1961) [7] (expresión 7.2).</i>	7.32
<i>Tabla 7.7. Grado de precisión de los métodos simplificados con el coeficiente C_m propuesto en el presente trabajo (expresión 7.10).</i>	7.33
<i>Tabla 7.8. Grado de precisión de los métodos simplificados con el coeficiente C_m propuesto por Austin (1961) [7] (expresión 7.2) en función de λ_g, f_c y del producto $\nu \cdot \lambda_g^2$.</i>	7.34
<i>Tabla 7.9. Grado de precisión de los métodos simplificados con el coeficiente C_m propuesto el presente trabajo (expresión 7.10) en función de λ_g, f_c y del producto $\nu \cdot \lambda_g^2$.</i>	7.35
<i>Tabla D.1. Características de los ensayos con excentricidades distintas en extremos encontrados en la literatura técnica analizada.</i>	D.5

Nomenclatura

α	ángulo de esviaje;
α_1	ángulo de esviaje en el extremo superior (1) del soporte;
α_2	ángulo de esviaje en el extremo inferior (2) del soporte;
α_e	ángulo de esviaje equivalente;
α_{FN}	ángulo de inclinación de la fibra neutra;
α_M	ángulo de inclinación del momento flector total;
β	relación entre excentricidades;
β_x	componente de la relación entre excentricidades respecto al eje x de flexión;
β_y	componente de la relación entre excentricidades respecto al eje y de flexión;
δ_{Nmax}	flecha experimental en situación de carga máxima;
δ_{NS}	flecha obtenida con la simulación numérica;
δ_{Nu}	flecha experimental en situación de carga última;
δ_{test}	flecha obtenida experimentalmente;
δ_x	flecha experimental en la dirección x;
δ_y	flecha experimental en la dirección y;
δ_{xNmax}	flecha experimental en situación de carga máxima en la dirección x;
δ_{xNu}	flecha experimental en situación de carga última en la dirección x;
δ_{yNmax}	flecha experimental en situación de carga máxima en la dirección y;
δ_{yNu}	flecha experimental en situación de carga última en la dirección y;
Δx	desplazamiento del centro de gravedad de la sección en la dirección x;
Δy	desplazamiento del centro de gravedad de la sección en la dirección y;
ϵ_0	deformación del en el centro de gravedad de la sección;
$\epsilon_{C,max}$	deformación máxima del hormigón en compresión;
ϵ_{SC}	deformación del acero en la cara comprimida;
ϵ_{ST}	deformación del acero en la cara traccionada;
ϕ	díametro de la armadura;
λ_g	esbeltez geométrica del soporte;
λ_m	esbeltez mecánica del soporte;
μ	momento flector reducido;
μ_x	componente del momento flector reducido respecto al eje x de flexión;
μ_y	componente del momento flector reducido respecto al eje y de flexión;
μ_1	momento flector reducido en el extremo superior (1) del soporte;
μ_{1x}	componente del momento flector reducido μ_1 respecto al eje x de flexión;
μ_{1y}	componente del momento flector reducido μ_1 respecto al eje y de flexión;
μ_2	momento flector reducido en el extremo inferior (2) del soporte;
μ_{2x}	componente del momento flector reducido μ_2 respecto al eje x de flexión;
μ_{2y}	componente del momento flector reducido μ_2 respecto al eje y de flexión;

$\mu_{2\max}$	momento flector reducido de primer orden en el extremo de mayor excentricidad en valor absoluto;
μ_e	momento flector reducido equivalente;
μ_{ex}	componente del momento flector reducido equivalente μ_e respecto al eje x de flexión;
μ_{ey}	componente del momento flector reducido equivalente μ_e respecto al eje y de flexión;
$\mu_{M\max}$	momento flector reducido para la situación de momento máximo;
$\mu_{\beta=1}$	momento flector reducido de primer orden correspondiente al caso de referencia con excentricidades iguales en extremos;
$\mu_{\beta\neq 1}$	momento flector reducido de primer orden máximo en extremo correspondiente al caso de excentricidades distintas en extremos;
$\mu_{(\beta=1)x}$	componente del momento flector reducido de primer orden $\mu_{\beta=1}$ correspondiente al caso de referencia con excentricidades iguales en extremos respecto al eje x de flexión;
$\mu_{(\beta=1)y}$	componente del momento flector reducido de primer orden $\mu_{\beta=1}$ correspondiente al caso de referencia con excentricidades iguales en extremos respecto al eje y de flexión;
v	axil reducido;
v_{\max}	axil reducido en situación de carga máxima;
v_{cr}	axil reducido crítico;
ρ_l	cuantía geométrica de armadura longitudinal;
ω	cuantía mecánica de armadura longitudinal;
ξ	grado de precisión;
ξ_m	grado de precisión medio (promedio);
ξ_α	α_{FN}/α_M ;
A_c	área bruta de la sección transversal;
A_s	área total de la armadura longitudinal;
A_{s1}	área de la sección transversal del estribo;
A_{sc}	área del hormigón confinado;
b	dimensión de la sección transversal perpendicular a la dirección de flexión considerada;
c	curvatura;
c_x	componente de la curvatura respecto al eje x de la sección transversal;
c_y	componente de la curvatura respecto al eje y de la sección transversal;
$C.V.$	coeficiente de variación;
C_m	coeficiente de equivalencia;
$C_{m,Code}$	coeficiente de equivalencia calculado con la formulación propuesta por las normativas;
$C_{m,NS}$	coeficiente de equivalencia obtenido con la simulación numérica;
$C_{m,prop}$	coeficiente de equivalencia propuesto;
C_{mx}	componente del coeficiente de equivalencia respecto al eje x de flexión;
C_{my}	componente del coeficiente de equivalencia respecto al eje y de flexión;
E	módulo de elasticidad;
e_0	excentricidad de primer orden en extremo del soporte;

e_{0x}	componente de la excentricidad de primer orden respecto al eje x;
e_{0y}	componente de la excentricidad de primer orden respecto al eje y;
e_1	excentricidad del extremo superior del soporte;
e_{1x}	componente de la excentricidad del extremo superior del soporte respecto al eje x de flexión;
e_{1y}	componente de la excentricidad del extremo superior del soporte respecto al eje y de flexión;
e_2	excentricidad aplicada en extremo inferior del soporte;
e_{2x}	componente de la excentricidad del extremo inferior del soporte respecto al eje x de flexión;
e_{2y}	componente de la excentricidad del extremo inferior del soporte respecto al eje y de flexión;
e_2/h	excentricidad relativa;
e_e	excentricidad equivalente;
e_{ex}	componente de la excentricidad equivalente respecto al eje x;
e_{ey}	componente de la excentricidad equivalente respecto al eje y;
e_{imp}	excentricidad impuesta;
f_c	resistencia a compresión del hormigón;
f_{ck}	resistencia a compresión característica del hormigón;
f_{cm}	resistencia a compresión media del hormigón;
f_y	resistencia del acero;
f_{yk}	resistencia característica del acero;
H	carga horizontal aplicada en extremo del soporte;
h	dimensión de la sección transversal en la dirección de flexión considerada;
I	inercia de la sección;
k_3	factor que tiene en cuenta el salto de recubrimiento del hormigón;
L	longitud del soporte;
l_1	longitud del estribo;
l_p	longitud de pandeo;
M	momento flector aplicado;
M_d	momento flector de diseño;
$M_{e,tot}$	momento equivalente total;
M_{ex}	componente del momento equivalente en la dirección x de flexión;
M_{ey}	componente del momento equivalente en la dirección y de flexión;
M_{max}	momento máximo;
M_{tot}	momento flector total;
M_u	momento último (rotura);
M_x	componente del momento flector de primer orden respecto al eje x;
M_y	componente del momento flector de primer orden respecto al eje y;
N	carga axial aplicada;
N_{cr}	carga crítica del soporte;
$N_{cr,E}$	carga crítica de Euler;
N_d	carga axial de diseño;
N_{max}	carga axial máxima;
N_{method}	carga axial obtenida mediante la utilización del método simplificado;
N_{SN}	carga axial obtenida con la simulación numérica;

N_{test}	carga axial obtenida experimentalmente;
N_u	carga axial última (menor que N_{max});
r_{mec}	recubrimiento mecánico de la armadura longitudinal;
r_{mec}/h	recubrimiento relativo;
s_t	separación entre estribos;
W	cuantía volumétrica de confinamiento;
y_e	flecha equivalente;
y_i	flecha adquirida por la pieza en la sección i ;
y_{max}	flecha máxima;

Capítulo 1.

Introducción

1.1. Antecedentes

El proyecto de soportes esbeltos de hormigón sometidos a esfuerzos de flexo-compresión recta o esviada con excentricidades y ángulos de esviaje diferentes en sus extremos es una situación que se da con mucha frecuencia en pilas de puentes, en los pórticos 3D de edificación o en los soportes de los edificios con forjados bidireccionales (losas o reticulares). El empleo de hormigones de alta resistencia en la construcción de estructuras ordinarias de hormigón es cada vez más frecuente. No obstante, en la actualidad, el proyecto de estos soportes se resuelve mediante métodos aproximados que han sido solamente verificados para hormigones convencionales. La extrapolación de estos métodos a hormigones de alta resistencia sin un soporte científico y verificación experimental adecuados puede conducir a resultados poco fiables.

En este sentido, se realizó la propuesta del proyecto de investigación, denominado “Estudio teórico-experimental de soportes esbeltos de hormigón armado sometidos a compresión con excentricidades y ángulos de esviaje desiguales en sus extremos”, el cual ha sido aprobado y financiado en la convocatoria de enero de 2007 por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España (ref. BIA2006-06429) cuyo investigador principal es el Dr. Pedro F. Miguel Sosa. Este proyecto de investigación trata de cubrir la carencia de datos experimentales disponibles sobre el tema y proporcionar herramientas de diseño que confieran la seguridad adecuada a estos elementos estructurales.

Este proyecto es básicamente una continuación natural de la línea de investigación iniciada con el proyecto previamente subvencionado en la convocatoria de 2002 del Plan Nacional de I+D (HAR-SOPEX, ref. MAT2002-02461). En este último, cuya fecha de finalización fue 1/11/2005, se abordó el estudio de soportes esbeltos de hormigón de alta resistencia sometidos a flexo-compresión esviada con excentricidades de igual magnitud, dirección y sentido en sus extremos, con la elaboración de una tesis doctoral (Pallarés (2006) [47]). En el actual proyecto (BIA 2006-06429) se plantea el estudio de estos soportes con diferentes excentricidades y ángulos de esviaje en sus extremos. La presente tesis doctoral forma parte de este proyecto.

1.2. Introducción

En general, los soportes de hormigón armado, ya sea en estructuras de edificación o en la obra civil, en concreto en pilas de puentes, están sometidos a una sollicitación de flexo-compresión esviada como resultado de su posición en la estructura, la forma de la sección o la naturaleza de las acciones exteriores (figura 1.1). Además, dependiendo de la distribución de carga en la estructura de la cual forma parte el soporte y de las condiciones de apoyo en los extremos del mismo, las excentricidades de la carga axial aplicada en los extremos pueden ser iguales en dirección, magnitud y sentido, o desiguales tanto en la magnitud como en la dirección o el sentido.

Por otra parte, la utilización del hormigón de alta resistencia (HAR) en la construcción se está incrementando en los últimos años, y está siendo cada vez más aceptado tanto por proyectistas como por constructores. Las ventajas inmediatas de utilizar este tipo de hormigones en soportes, se centran en un incremento de la capacidad resistente o en un ahorro de material, dando lugar a secciones que, con una misma capacidad resistente, ocupan un menor espacio. Dicha reducción de sección da lugar a soportes cada vez más esbeltos, con el consiguiente aumento de los efectos de segundo orden.

La complejidad del comportamiento hasta rotura de los soportes esbeltos sometidos a combinaciones de esfuerzos como los descritos es muy elevada y, por ello, se requieren formulaciones simplificadas para su proyecto. Además, los distintos métodos simplificados de cálculo de soportes esbeltos sometidos a excentricidades distintas en los extremos han sido desarrollados para el caso de solicitaciones de flexo-compresión recta y para hormigones convencionales (resistencia a compresión simple no mayor de 50 MPa). Puesto que el comportamiento mecánico para este tipo de soportes no es posible extrapolarlo a soportes fabricados con hormigón de alta resistencia y sometidos a una solicitación de flexión recta o esviada, es necesario revisar los métodos simplificados de cálculo en rotura.

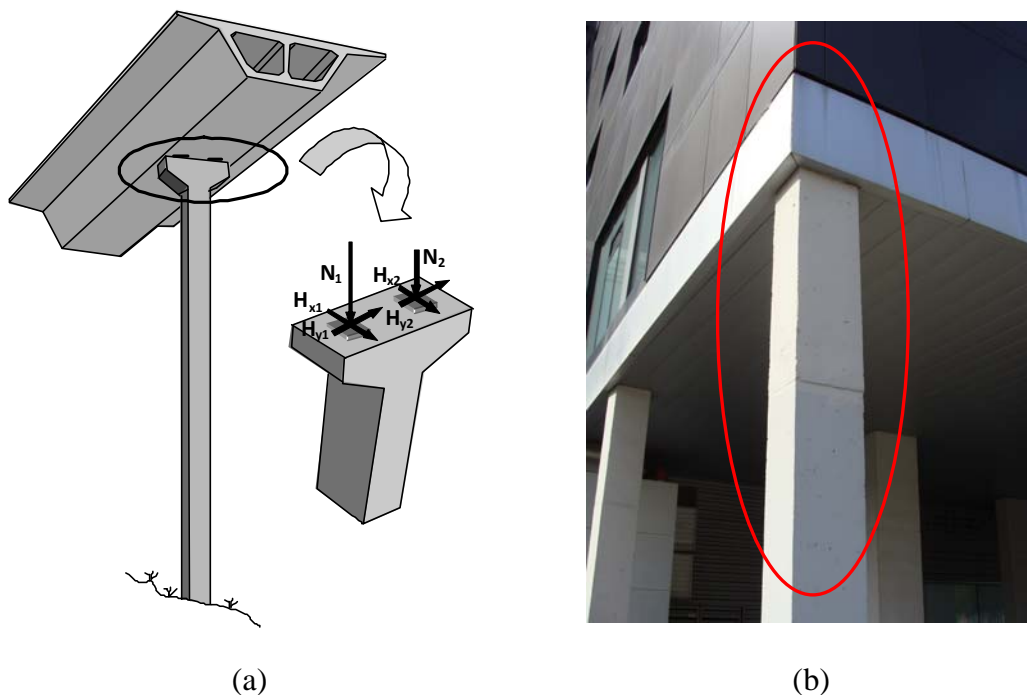


Figura 1.1. Ejemplo de estructuras sometidas a una solicitación de flexo-compresión esviada con excentricidades y ángulos de esviaje desiguales en extremos: a. Pila de puente; b. Pilar de esquina en pórtico de edificación.

La mayoría de los trabajos experimentales recogidos en la bibliografía se centran en el estudio de soportes biapoyados sometidos a excentricidades de igual magnitud, dirección y sentido en sus extremos y fabricados con hormigones convencionales. Esta carencia de ensayos experimentales, referente a soportes esbeltos sometidos a solicitaciones de flexo-compresión esviada con excentricidades y ángulos iguales o distintos en los extremos o a solicitaciones de flexo-compresión recta con excentricidades diferentes en los extremos, impide la calibración de los modelos numéricos y limita el desarrollo de métodos simplificados necesarios para el diseño de este tipo de estructuras. Es por ello que este vacío en el campo experimental para este tipo de estructuras y solicitaciones, se refleja en las distintas instrucciones (normas o códigos) para el proyecto de estructuras de hormigón, produciendo un claro

impedimento al desarrollo tecnológico en la construcción de soportes con estas características.

La carencia de datos experimentales en soportes fabricados con hormigón de alta resistencia sometidos a excentricidades diferentes en los extremos ha sido puesta de manifiesto por Sarker y Rangan (2003) [58] quienes indican que “resulta necesario realizar ensayos experimentales en soportes de HAR bajo excentricidades distintas en los con la finalidad de comprender el comportamiento de este tipo de soportes”. En el caso de ensayos de soportes de HAR sometidos a esfuerzos de flexo-compresión esviada y con excentricidades diferentes en los extremos no existen ensayos en la literatura técnica bajo este tipo de sollicitación. Puesto que dicha combinación de esfuerzos es muy común, tanto en pilas de puente como en las obras de edificación (soportes en esquina), resulta interesante y necesario la realización de una campaña experimental en soportes de HAR y convencional sometidos a esfuerzos de flexo-compresión esviada con diferentes excentricidades en sus extremos, tanto en magnitud, como en dirección y sentido.

Además, los códigos de diseño (EHE-08 [23], AISC (1963) [60], ACI-318 (2008) [1], EC-2 (2004) [29], MC-90 [25] y MC-2010 [38]) y distintos autores (Bonet et al. (2004) [14] y [15], (2005) [13], (2007) [16] y (2011) [17], Marí, A. (2002) [42], Barreiro, M. J. (2001) [9], entre otros) proponen métodos simplificados con la finalidad de predecir la carga de agotamiento de soportes esbeltos sometidos a esfuerzos de flexo-compresión con excentricidades desiguales en extremos. Sin embargo, dichos métodos han sido contrastados, en su gran mayoría, con soportes fabricados con hormigón convencional y su aplicación a soportes fabricados con hormigón de alta resistencia requiere continuar investigándose (Galano y Vignoli (2008) [35]).

1.3. Objetivo general

En este trabajo el objetivo fundamental se centra en desarrollar un programa experimental de análisis de soportes de hormigón convencional y de alta resistencia sometidos sollicitaciones de flexo-compresión con excentricidades y ángulos de esviaje desiguales en los extremos, en flexo-compresión recta o esviada, con el objetivo de analizar el comportamiento de este tipo de elemento estructural y presentar una base de datos de resultados experimentales que permita abordar el estudio de los soportes de hormigón con tales características con cierto respaldo empírico.

El trabajo se extiende desde la actividad propia del laboratorio como es el diseño del ensayo, definición y fabricación de las probetas, sistema de transmisión de carga, sistema de medidas necesarias para obtener los datos experimentales suficientes tanto para extraer conclusiones directas de ellos, como para compararlos con los resultados

obtenidos de los métodos simplificados. A continuación, a partir de los resultados experimentales se realiza una calibración de un modelo numérico que pueda representar con suficiente aproximación el comportamiento de los elementos estructurales ensayados.

Finalmente, se hace un análisis paramétrico con el modelo de elementos finitos calibrado para poder generalizar los resultados obtenidos experimentalmente y culminar con una propuesta de un método simplificado basado en los resultados obtenidos.

1.4. Contenido del documento

El presente documento está estructurado en 9 capítulos, el apartado de referencias bibliográficas y 8 anejos.

El Capítulo 1 corresponde a la introducción, en el se expone los antecedentes, la justificación del trabajo, el objetivo general de la tesis doctoral y el contenido del documento.

El Capítulo 2 está dedicado a la exposición del estado actual del conocimiento en relación a los ensayos experimentales de soportes de hormigón armado sometidos a esfuerzos de flexo-compresión con excentricidades y ángulos de esviaje distintos en los extremos. En este capítulo se hace una breve introducción teórica al pandeo de soportes esbeltos de hormigón armado, a continuación se citan los autores y sus contribuciones al ensayo de soportes de hormigón armado sometidos a esfuerzos de flexo-compresión recta y esviada, y por último, se hace un análisis de los resultados hallados en la bibliografía con la finalidad de buscar los vacíos experimentales en el tema.

Seguidamente, en el Capítulo 3, se presentan los objetivos específicos a alcanzar en este trabajo, justificando la importancia de la investigación realizada.

En el Capítulo 4 se describe el programa experimental desarrollado para la realización de este trabajo de investigación. En este capítulo se definen los parámetros analizados en el programa experimental, se caracterizan los materiales empleados en la fabricación de las probetas, se presenta el modelo del ensayo, el diseño del pórtico de ensayo, la instrumentación considerada para la medición de deformaciones en las armaduras y en el hormigón, desplazamientos y carga aplicada, y se hace una descripción detallada del procedimiento de ensayo.

A continuación, en el Capítulo 5, se presentan los resultados obtenidos para los soportes ensayados en el programa experimental, haciendo referencia a las cargas máxima y última alcanzadas en cada ensayo, a la resistencia del hormigón en cada soporte, a las deformaciones en acero y hormigón en las secciones instrumentadas y a

los desplazamientos obtenidos en las secciones críticas de la pieza bien como la deformada de la pieza para distintos niveles de carga. Además, se comparan los resultados obtenidos en los ensayos experimentales con los obtenidos utilizando los métodos simplificados propuesto por distintas normativas.

El modelo teórico de referencia (MTR) utilizado en este trabajo se describe en el Capítulo 6. En este mismo capítulo se realiza la calibración del MTR con los ensayos realizados en el programa experimental presentados en este trabajo y con ensayos experimentales realizados por otros autores. Finalmente, el modelo teórico de referencia calibrado es utilizado para la realización de una simulación numérica para cada una de las series completas del programa experimental con la finalidad de interpretar los resultados obtenidos y también para la generalización de los mismos.

En el Capítulo 7, se emplea el MTR calibrado para realizar el análisis de las principales variables que influyen en el coeficiente de equivalencia C_m para soportes sometidos a esfuerzos de flexo-compresión con excentricidades desiguales en extremos. A partir de los resultados obtenidos con un análisis paramétrico, se propone un nuevo método simplificado para la obtención del coeficiente de equivalencia C_m .

En el Capítulo 8, se sintetiza el trabajo realizado en la presente tesis doctoral y se presentan las principales conclusiones obtenidas a lo largo de la tesis, para finalmente se plantear las futuras líneas de investigación abiertas tras la finalización del estudio.

A continuación se presenta un listado de las referencias bibliográficas utilizadas en el presente trabajo.

Finalmente en el Anejo A al Anejo I figuran respectivamente:

- (A) Ficha técnica de cada uno de los ensayos realizados en el programa experimental;
- (B) Medidas directas obtenidas para cada uno de los ensayos;
- (C) Procedimiento para obtención del módulo de elasticidad en compresión de los dos tipos de hormigón utilizados en el programa experimental;
- (D) Una lista de los ensayos experimentales se soportes de hormigón armado sometidos a esfuerzos de flexo-compresión con excentricidades desiguales en los extremos existentes en la literatura técnica analizada;
- (E) Gráficas del contraste de los resultados experimentales con los métodos simplificados propuesto por las normativas en lo que se refiere a la carga máxima alcanzada en cada ensayo;

- (F) Contraste entre los ensayos experimentales y la simulación numérica, en lo que se refiere a los desplazamientos obtenidos en cada ensayo;
- (G) Gráficas obtenidas con la simulación numérica para las series de flexo-compresión esviada;
- (H) Resultados obtenidos en el análisis paramétrico (diagramas de interacción);
- (I) Comparación de los resultados obtenidos con la aplicación de la nueva expresión propuesta para la obtención del coeficiente de equivalencia C_m en los métodos simplificados propuestos por las distintas normativas analizadas.

Capítulo 2.

Estado actual del conocimiento

En este capítulo se repasa el estado actual del conocimiento, en lo que se refiere a los ensayos sobre soportes de hormigón convencional y de alta resistencia, sometidos a esfuerzos de flexo-compresión recta y esviada con excentricidades distintas en los extremos. Inicialmente, se hace una breve introducción teórica al pandeo de soportes esbeltos de hormigón. Seguidamente, se citan los autores y sus contribuciones al ensayo de soportes de hormigón armado sometidos a esfuerzos de flexo-compresión recta y esviada con excentricidades desiguales en sus extremos. Por último, se hace un análisis de los resultados hallados en la bibliografía con la finalidad de buscar los vacíos experimentales en el tema para justificar y elaborar un programa experimental de ensayos de soportes de hormigón armado bajo este tipo de solicitaciones.

2.1. Introducción teórica al pandeo de soportes

2.1.1. Carga crítica de pandeo

Los elementos lineales sometidos a flexión adquieren una posición deformada desplazada de su posición original. En estas circunstancias, la existencia de un esfuerzo axial de compresión en una pieza flectada supone una amplificación del momento flector debido al momento de segundo orden provocado por el producto del esfuerzo axial por la flecha adquirida en la posición de equilibrio. Este esfuerzo de segundo orden invalida el principio de proporcionalidad entre acciones y los momentos flectores en cada sección. Este efecto se conoce como *no-linealidad geométrica*. La amplificación de los flectores puede conducir al agotamiento de la estructura por solicitaciones normales, o a una situación de inestabilidad (pérdida de equilibrio) antes del agotamiento de la estructura.

La no-linealidad geométrica es debida a la consideración del equilibrio en la posición deformada. En este caso el esfuerzo total en cada una de las secciones del soporte se obtendrá como suma de los esfuerzos de primer orden, obtenidos con la estructura sin deformar, más los esfuerzos de segundo orden, considerando la estructura en la posición deformada

La deformada que adquiere una pieza depende fundamentalmente de su rigidez a flexión, es decir, del módulo de elasticidad del material y de la inercia correspondiente al plano de flexión. Como es sabido, en una estructura de hormigón, el módulo de elasticidad y la inercia son variables a lo largo de la directriz de la pieza, siendo función de los esfuerzos que la soliciten.

En la figura 2.1 se representa el comportamiento de una pieza de longitud L sometida a un esfuerzo axial de compresión con excentricidad (e_0). Para analizar correctamente el soporte es necesario plantear las ecuaciones de equilibrio en la posición deformada y no sobre la geometría original del pilar. De esta manera, el momento flector que actúa en una sección cualquiera se calcula con la expresión 2.1.

$$M_{\text{tot}} = N \cdot e_0 + N \cdot y_i \quad 2.1$$

donde:

M_{tot} – momento flector total;

N – axial aplicado;

e_0 – excentricidad de primer orden en extremos del soporte;

y_i – flecha adquirida por la pieza en una sección i .

Si sobre el soporte se aplican sucesivos incrementos del esfuerzo axial, se observa que para todos los niveles de axial no hay una posición de equilibrio. Así, existe un nivel

de axil denominado axil crítico ($N_{cr,E}$) para el cual las deformaciones que se producen en el soporte tienden al infinito, produciéndose el colapso de la estructura. Si el axil aplicado es inferior al axil crítico del soporte, el equilibrio del mismo será posible, en caso contrario, se producirá la inestabilidad de la estructura.

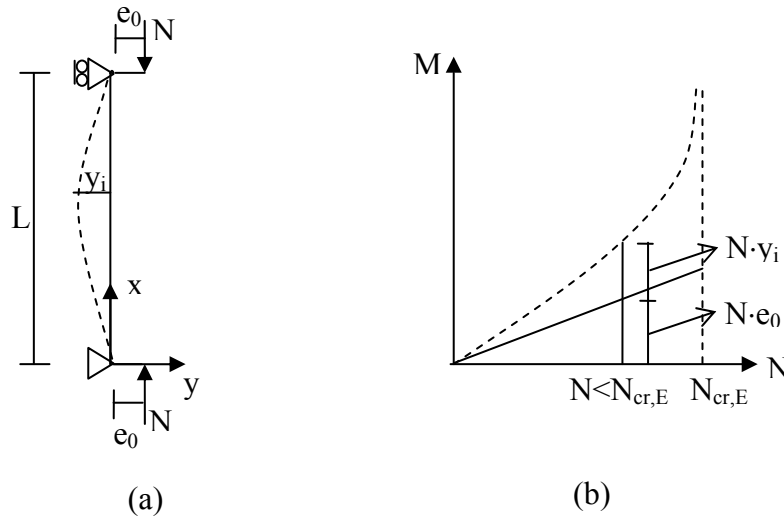


Figura 2.1. a. Equilibrio en posición deformada; b. Diagrama M-N en la sección central.

Si se considera que el material es elástico y lineal, tanto la inercia como el módulo de elasticidad serán constantes en cada sección para cualquier nivel de tensiones. En este caso la ecuación de equilibrio de los esfuerzos flectores correspondiente a una pieza de directriz recta, de inercia constante, doblemente articulada y para $e_0 = 0$, se obtiene a partir de la expresión:

$$N \cdot y = E \cdot I \cdot \frac{d^2 y}{dx^2} \quad 2.2$$

La solución de la ecuación diferencial 2.2 es:

$$y = A \cdot \operatorname{sen} \left(\sqrt{\frac{N}{E \cdot I}} \cdot x \right) + B \cdot \cos \left(\sqrt{\frac{N}{E \cdot I}} \cdot x \right) \quad 2.3$$

Las constantes A y B se calculan aplicando las condiciones de contorno:

$$x = 0; y = 0; \rightarrow B = 0$$

$$x = L; y = 0; \rightarrow 0 = A \cdot \operatorname{sen} \left(\sqrt{\frac{N}{E \cdot I}} \cdot L \right) \rightarrow A = 0 \Leftrightarrow \sqrt{\frac{N}{E \cdot I}} \cdot L = n \cdot \pi$$

Por tanto, para $n = 1$, se obtiene la carga crítica de Euler:

$$N_{cr,E} = \pi^2 \cdot \frac{E \cdot I}{L^2} \quad 2.4$$

Siendo así, y como se ha expuesto anteriormente, en el caso que el axil sea igual al crítico, el equilibrio es inestable; si es inferior ($N < N_{cr,E}$) la pieza tiende a adoptar una posición de equilibrio y en cambio para valores superiores al axil crítico ($N > N_{cr,E}$) es imposible encontrar una solución equilibrada al problema.

En el caso de una pieza sometida a una compresión excéntrica (figura 2.2), la ecuación de equilibrio (solución de Timoshenko) entre esfuerzos externos e internos es la siguiente:

$$H \cdot L + N \cdot y = -E \cdot I \cdot \frac{d^2y}{dx^2} \quad 2.5$$

Resolviendo la ecuación diferencial y aplicando las condiciones de contorno se obtiene la expresión de la deformada:

$$y = \frac{1 - \cos\left(\sqrt{\frac{N}{E \cdot I}} \cdot x\right)}{\cos\left(\sqrt{\frac{N}{E \cdot I}} \cdot L\right)} \cdot \left(\frac{H \cdot L}{N}\right) \quad 2.6$$

Para una carga vertical, N , y una fuerza horizontal H , se produce una excentricidad de segundo orden, que aumenta conforme aumenta el axil N , de modo gradual. En este caso existe siempre solución, excepto cuando el denominador de la ecuación se anula. Esta circunstancia se alcanza cuando el axil N es igual a la carga crítica de pandeo (expresión 2.7).

$$N = N_{cr,E} = \frac{\pi^2 \cdot EI}{(2 \cdot L)^2} \quad 2.7$$

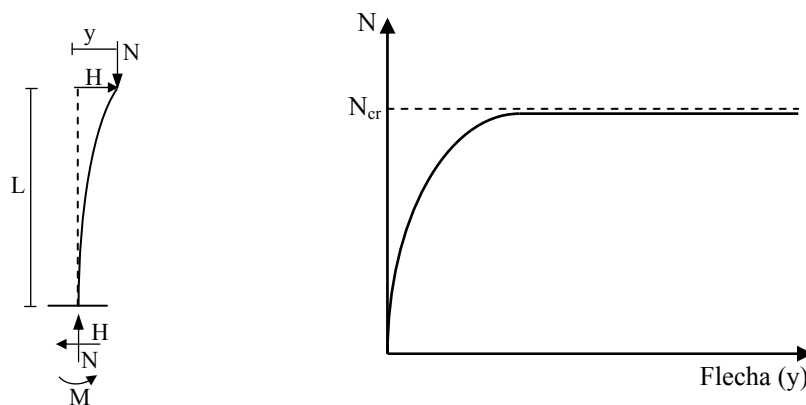


Figura 2.2. Relación carga-flecha de un soporte sometido a flexo-compresión recta. Material elástico y lineal.

En un material ideal, elástico y lineal, el axil crítico corresponde al axil crítico de Euler (expresión 2.4) mientras que en un material real, como el hormigón armado, cuyo

comportamiento es no lineal, el axil crítico tendrá un menor valor. En la figura 2.3 se representa la relación carga-flecha en un soporte sometido a flexo-compresión recta.

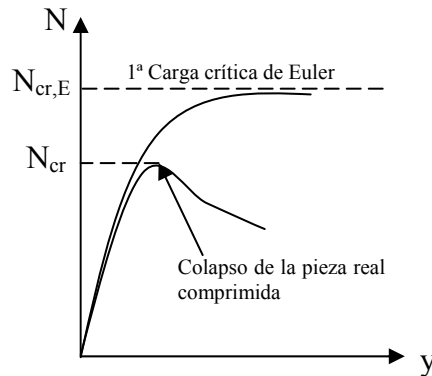


Figura 2.3. Relación carga-flecha de un soporte sometido a flexo-compresión.

2.1.2. Excentricidades distintas en extremos

En un soporte sometido a esfuerzo axial de compresión con excentricidades distintas en los extremos ($M_A \neq M_B$) (figura 2.4, Chen y Lui (1987) [20]), la ecuación de equilibrio en la posición deformada de la pieza, proporciona el momento flector que actúa en una sección cualquiera mediante la expresión 2.8.

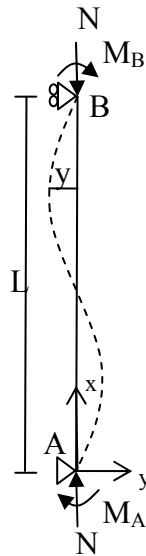


Figura 2.4. Soporte sometido a esfuerzo axial con momentos distintos en extremos.

$$M_{\text{tot}} = M_A + N \cdot y - \frac{M_A + M_B}{L} \cdot x \quad 2.8$$

donde:

M_{tot} – momento total;

N – axil aplicado;

M_A – momento en extremo inferior del soporte;

M_B – momento en extremo superior del soporte;

Igualando la expresión 2.8 al momento interno de la sección $[-EI \cdot (d^2y/dx^2)]$, se obtiene la expresión 2.9:

$$E \cdot I \cdot \frac{d^2y}{dx^2} + N \cdot y = \frac{M_A + M_B}{L} \cdot x - M_A \quad 2.9$$

Con $k^2 = N/E \cdot I$, esta ecuación puede reformularse como:

$$\frac{d^2y}{dx^2} + k^2 \cdot y = \frac{M_A + M_B}{L \cdot E \cdot I} \cdot x - \frac{M_A}{E \cdot I} \quad 2.10$$

La solución general de la ecuación diferencial 2.10 es:

$$y = A \cdot \text{sen}(k \cdot x) + B \cdot \text{cos}(k \cdot x) + \frac{M_A + M_B}{L \cdot E \cdot I \cdot k^2} \cdot x - \frac{M_A}{E \cdot I \cdot k^2} \quad 2.11$$

Aplicando las condiciones de contorno, se calculan las constantes A y B:

$$x = 0; y = 0; \rightarrow B = \frac{M_A}{E \cdot I \cdot k^2}$$

$$x = L; y = 0; \rightarrow A = -\frac{1}{E \cdot I \cdot k^2 \cdot \text{sen}(k \cdot L)} \cdot [M_A \cdot \text{cos}(k \cdot L) + M_B]$$

Con las constantes calculadas se puede escribir la expresión 2.11 de la siguiente manera:

$$y = -\frac{[M_A \cdot \text{cos}(k \cdot L) + M_B]}{E \cdot I \cdot k^2 \cdot \text{sen}(k \cdot L)} \cdot \text{sen}(k \cdot x) + \frac{M_A}{E \cdot I \cdot k^2} \cdot \text{cos}(k \cdot x) + \frac{M_A + M_B}{L \cdot E \cdot I \cdot k^2} \cdot x - \frac{M_A}{E \cdot I \cdot k^2} \quad 2.12$$

Derivando la expresión 2.12 respecto a x se obtiene:

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{[M_A \cdot \text{cos}(k \cdot L) + M_B]}{E \cdot I \cdot k \cdot \text{sen}(k \cdot L)} \cdot \text{cos}(k \cdot x) + \frac{M_A}{E \cdot I \cdot k} \cdot \text{sen}(k \cdot x) + \frac{M_A + M_B}{L \cdot E \cdot I \cdot k^2} \quad 2.13$$

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{[M_A \cdot \text{cos}(k \cdot L) + M_B]}{E \cdot I \cdot \text{sen}(k \cdot L)} \cdot \text{sen}(k \cdot x) + \frac{M_A}{E \cdot I} \cdot \text{cos}(k \cdot x) \quad 2.14$$

$$\frac{d^3y}{dx^3} = k \cdot \frac{[M_A \cdot \text{cos}(k \cdot L) + M_B]}{E \cdot I \cdot \text{sen}(k \cdot L)} \cdot \text{cos}(k \cdot x) + \frac{k \cdot M_A}{E \cdot I} \cdot \text{sen}(k \cdot x) \quad 2.15$$

La posición de la sección de momento máximo ($x_{M_{\max}}$), se obtiene igualando a cero el esfuerzo cortante $(-EI \cdot d^3y/dx^3)$:

$$\tan(k \cdot x_{M_{\max}}) = -\frac{[M_A \cdot \text{cos}(k \cdot L) + M_B]}{M_A \cdot \text{sen}(k \cdot L)} \quad 2.16$$

A partir de la expresión 2.16 se obtienen:

$$\operatorname{sen}(k \cdot x_{M_{\max}}) = \frac{[M_A \cdot \cos(k \cdot L) + M_B]}{\sqrt{M_A^2 + 2 \cdot M_A \cdot M_B \cdot \cos(k \cdot L) + M_B^2}} \quad 2.17$$

$$\operatorname{cos}(k \cdot x_{M_{\max}}) = \frac{-M_A \operatorname{sen}(k \cdot L)}{\sqrt{M_A^2 + 2 \cdot M_A \cdot M_B \cdot \cos(k \cdot L) + M_B^2}} \quad 2.18$$

El momento máximo (M_{\max}) se obtiene substituyendo los valores de $\operatorname{cos}(k \cdot x_{\max})$ y de $\operatorname{sen}(k \cdot x_{\max})$ de las expresiones 2.17 y 2.18 en la expresión $M = -E \cdot I \cdot (d^2y/dx^2)$, donde d^2y/dx^2 se calcula a partir de la expresión 2.14:

$$M_{\max} = -M_B \cdot \left[\sqrt{\frac{(M_A / M_B)^2 + 2(M_A / M_B) \cdot \cos(k \cdot L) + 1}{\operatorname{sen}^2(k \cdot L)}} \right] \quad 2.19$$

Si M_B es el mayor de los dos momentos actuantes, el término entre paréntesis en la expresión 2.19 representa el *factor de amplificación de momentos* para un soporte sometido a momentos desiguales en los extremos ($M_A \neq M_B$) y un esfuerzo axial N . Este factor de amplificación no depende apenas de la magnitud del axil aplicado, sino de la relación entre los momentos en los extremos.

Para las piezas sometidas a momentos con doble curvatura, el máximo momento flector puede situarse en el extremo del soporte ($M_{\max} = M_B$), como se muestra en la figura 2.5.

En estos casos, el factor de amplificación de momentos en la expresión 2.19 (M_A/M_B) no tiene sentido, ya que el momento máximo teórico estaría fuera de la longitud del soporte. Para valores dados de M_A , M_B y del axil N , se debe evaluar la expresión 2.16, y verificar si para dichos esfuerzos el valor de $x_{M_{\max}}$ se encuentra en el rango $0 \leq x_{M_{\max}} \leq L$. En caso contrario, la expresión 2.19 no es aplicable y el momento máximo ocurre en el extremo del soporte y es igual al mayor de los dos momentos en extremos.

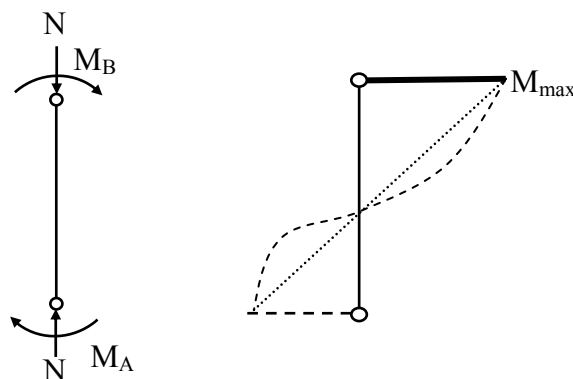


Figura 2.5. $M_{\max} = M_B$ en el extremo de la pieza.

La expresión 2.19 ha sido deducida para los casos en que la pieza se encuentra flectada con doble curvatura, sin embargo, la misma expresión puede también ser válida para piezas con simple curvatura, substituyendo M_B por $-M_B$. Siendo así, para un soporte flectado con simple curvatura, el momento máximo se calcula como se muestra en la expresión 2.20:

$$M_{\max} = M_B \cdot \left[\sqrt{\frac{(M_A / M_B)^2 - 2(M_A / M_B) \cdot \cos(k \cdot L) + 1}{\text{sen}^2(k \cdot L)}} \right] \quad 2.20$$

En este caso, como en las piezas sometidas a doble curvatura, dada una combinación de M_A , M_B y N , el momento máximo puede que se encuentre en uno de los extremos del soporte. Para verificar esta situación se debe calcular la posición de la sección de momento máximo ($x_{M_{\max}}$) a partir de la expresión 2.21 y verificar se dicha posición se encuentra en el rango $0 \leq x_{M_{\max}} \leq L$.

$$\tan(k \cdot x_{M_{\max}}) = - \frac{[M_A \cdot \cos(k \cdot L) - M_B]}{M_A \cdot \text{sen}(k \cdot L)} \quad 2.21$$

Si el valor de $x_{M_{\max}}$ calculado no se encuentra en la longitud del soporte el momento máximo ocurre en uno de los extremos de la pieza. La expresión 2.21 es la misma que la expresión 2.16, substituyendo M_B por $-M_B$.

Las expresiones 2.19 y 2.20 pueden ser escritas de forma combinada como se muestra en la expresión 2.22:

$$M_{\max} = |M_B| \cdot \left[\sqrt{\frac{(M_A / M_B)^2 + 2(M_A / M_B) \cdot \cos(k \cdot L) + 1}{\text{sen}^2(k \cdot L)}} \right] \quad 2.22$$

En la expresión 2.22, M_A/M_B es negativo para doble curvatura y positivo para simple curvatura.

En el caso que los momentos en extremos sean iguales en magnitud y sentido ($M_A = M_B$), la expresión 2.22 se reduce a:

$$M_{\max} = M \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot [1 - \cos(k \cdot L)]}{\text{sen}^2(k \cdot L)}} \quad 2.23$$

A partir de la expresión 2.22 se obtiene el momento máximo en un soporte sometido a momentos desiguales en sus extremos. Dicho momento puede situarse en unos de los extremos de la pieza u ocurrir en una sección cualquiera del soporte ($x_{M_{\max}}$) determinada por las expresiones 2.16 ó 2.21. Para el diseño de estructuras se necesitaría saber en donde ocurre el momento máximo en el soporte (en extremos, o a lo largo de la

longitud de la pieza), y también la localización de la sección de momento máximo ($x_{M_{\max}}$) cuando este ocurre a lo largo de la longitud del soporte.

El concepto de momento equivalente está representado esquemáticamente en la figura 2.6. Los momentos actuantes en los extremos del soporte (M_A y M_B) son sustituidos por un par de momentos equivalentes iguales en cada extremo ($M_e = N \cdot e_e$). La excentricidad equivalente aplicada en los extremos del soporte debe originar el mismo momento flector total que correspondería a la distribución de esfuerzos original. Matemáticamente se puede obtener el momento equivalente substituyendo M_e por M en la expresión 2.23 e igualando las expresiones 2.22 y 2.23.

$$|M_B| \cdot \left[\sqrt{\frac{(M_A / M_B)^2 + 2(M_A / M_B) \cdot \cos(k \cdot L) + 1}{\text{sen}^2(k \cdot L)}} \right] = M_e \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{[1 - \cos(k \cdot L)]}{\text{sen}^2(k \cdot L)}} \quad 2.24$$

De la expresión 2.24 se obtiene el momento equivalente (M_e):

$$M_e = \sqrt{\frac{(M_A / M_B)^2 + 2(M_A / M_B) \cdot \cos(k \cdot L) + 1}{2 \cdot [1 - \cos(k \cdot L)]}} \cdot |M_B| = C_m \cdot |M_B| \quad 2.25$$

donde C_m es el coeficiente de equivalencia entre momentos.

El valor de (k) puede obtenerse a partir de la siguiente expresión:

$$k = \frac{\pi}{L} \cdot \sqrt{\frac{N}{N_{cr}}} \quad 2.26$$

donde N representa la carga axial aplicada al soporte y N_{cr} representa la carga crítica de Euler definida en la expresión 2.4.

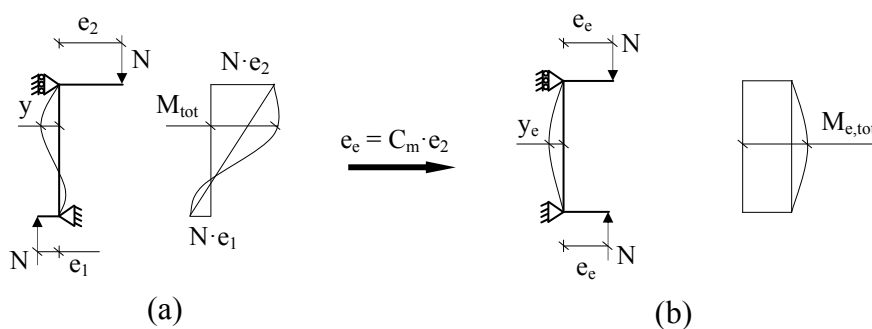


Figura 2.6. Momento equivalente: a. Distribución de esfuerzos original.
b. Distribución de esfuerzos equivalente.

En la figura 2.7 se representa gráficamente el coeficiente C_m definido teóricamente en la expresión 2.25 a partir de un cálculo elástico-lineal, en función del ratio (N/N_{cr}) para distintas relaciones de momento en extremos (M_A/M_B).

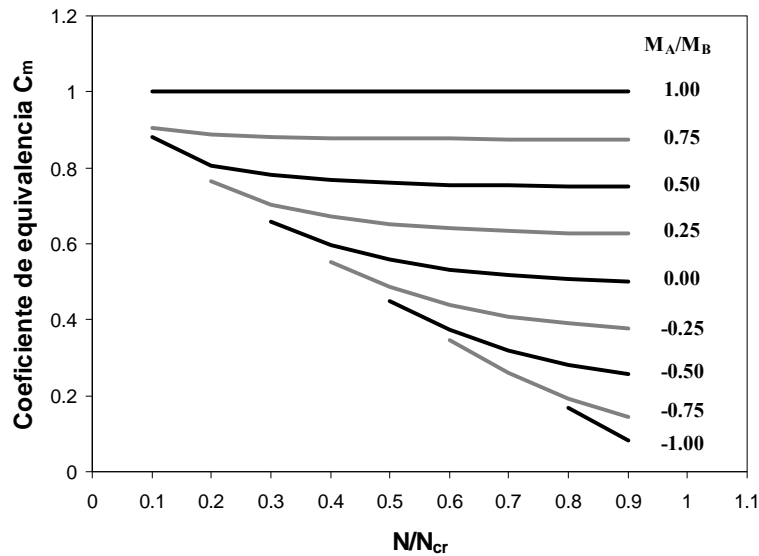


Figura 2.7. Coeficiente de equivalencia C_m obtenido teóricamente con cálculo elástico-lineal (expresión 2.25).

Se puede observar en la figura 2.7, que cuando la relación entre momentos en extremos del soporte (M_A/M_B) varía de simple curvatura ($M_A/M_B \geq 0$) a doble curvatura ($M_A/M_B < 0$) se incrementa considerablemente la influencia del ratio N/N_{cr} en el cálculo del coeficiente C_m .

Por otra parte, se puede también representar el coeficiente C_m en función de las excentricidades en extremos del soporte como se muestra en la expresión 2.27, donde e_e es la excentricidad equivalente y e_2 es la excentricidad de mayor valor absoluto en uno de los extremos del soporte (figura 2.6).

$$e_e = C_m \cdot e_2 \quad 2.27$$

2.1.3. Estado Límite de Inestabilidad

Como se ha expuesto anteriormente, la no-linealidad geométrica es debida a la consideración del equilibrio en la posición deformada. En este caso, el momento flector total que actúa en la sección se obtiene como suma del momento de primer orden, calculado con la estructura sin deformar, más el momento de segundo orden, considerando la estructura en la geometría deformada (figura 2.8). El momento de segundo orden que actúa en una sección del soporte es función de la deformada del soporte (y_i) en dicha sección, y por tanto depende de la distribución de curvaturas (c) a lo largo del soporte:

$$y_i = y_i(c) \quad 2.28$$

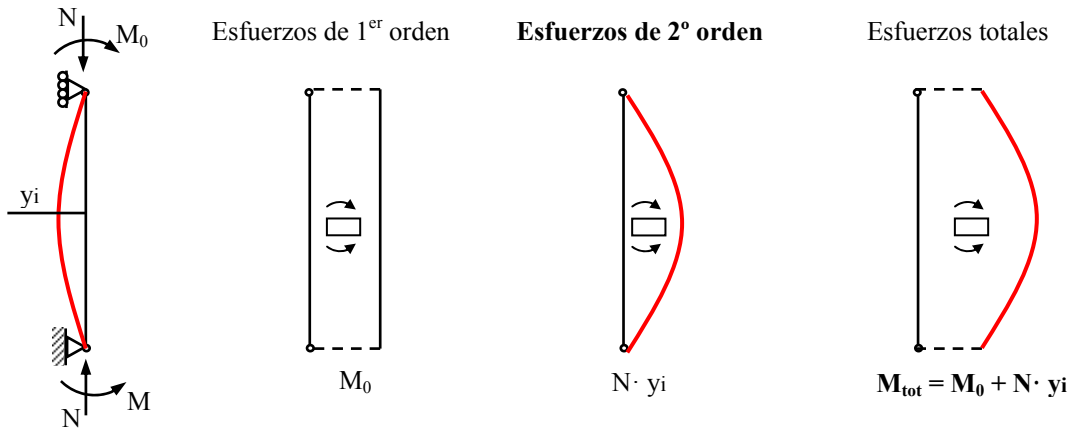


Figura 2.8. No-linealidad geométrica.

Por otro lado, el momento flector interno que es equilibrado por una sección cuando se produce una determinada curvatura (c_i) depende del comportamiento de los materiales (*no-linealidad mecánica*). En este sentido, los fenómenos más relevantes son la plastificación de la armadura, la relación constitutiva no-lineal del hormigón, la fisuración y las deformaciones diferidas. La respuesta de la sección puede simbolizarse mediante el “diagrama momento-curvatura” para axil constante (figura 2.9).

$$M = EI(c) \cdot c \tag{2.29}$$

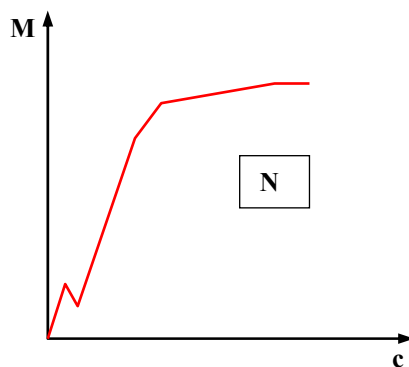


Figura 2.9. Diagrama Momento-Curvatura de la sección.

Por otra parte, si se estudia la estabilidad local de un soporte esbelto doblemente articulado de sección constante, sometido a un esfuerzo axial y momento flector iguales en extremos de la barra, la sección que determina el comportamiento del mismo se sitúa en centro-luz al ser la de mayor momento flector total (figura 2.8). Bajo dichas condiciones, para que el soporte adopte una posición de equilibrio, en la sección de centro-luz el esfuerzo total ha de ser igual al esfuerzo interno, es decir:

$$M_0 + N \cdot y_i(c_i) = EI(c_i) \cdot c_i \tag{2.30}$$

Puesto que tanto los esfuerzos internos como los esfuerzos exteriores son función de la curvatura de la sección “i”, es posible representar gráficamente la expresión 2.30

en un diagrama momento-curvatura (figura 2.10) con el fin de estudiar las distintas situaciones que pueden aparecer en el soporte.

Así, para un axil dado (N) el soporte adoptará una solución de equilibrio cuando se cumplan simultáneamente las siguientes condiciones:

- La existencia de un punto de intersección entre la curva que representa la respuesta interna de la sección y el esfuerzo total actuante;
- El momento flector total correspondiente a la intersección anterior sea inferior al momento de agotamiento de la sección (M_u).

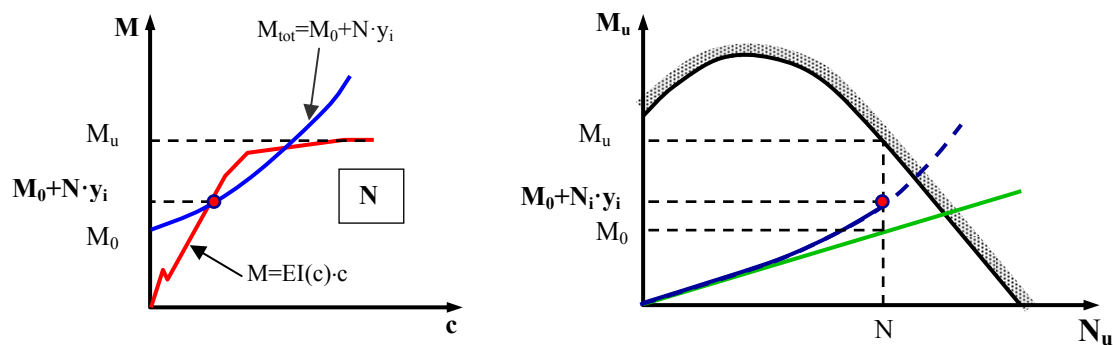


Figura 2.10. Situación de equilibrio.

Si se aumenta el esfuerzo axil aplicado puede producirse el agotamiento de la sección si el punto de intersección del momento total con la respuesta interna de la sección coincide con el momento de **agotamiento** de la sección (M_u) (figura 2.11).

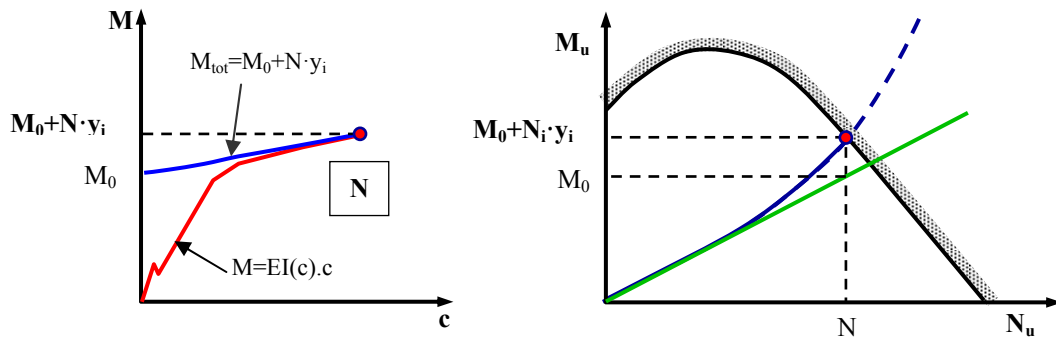


Figura 2.11. Agotamiento frente a solicitaciones normales del soporte.

Por el contrario, si al aumentar el esfuerzo axil del soporte no hay un punto de intersección entre el momento total y el esfuerzo interno, no existe una situación de equilibrio en la posición deformada del soporte, y se alcanza una situación de **inestabilidad** del mismo previa al agotamiento de los materiales (figura 2.12).

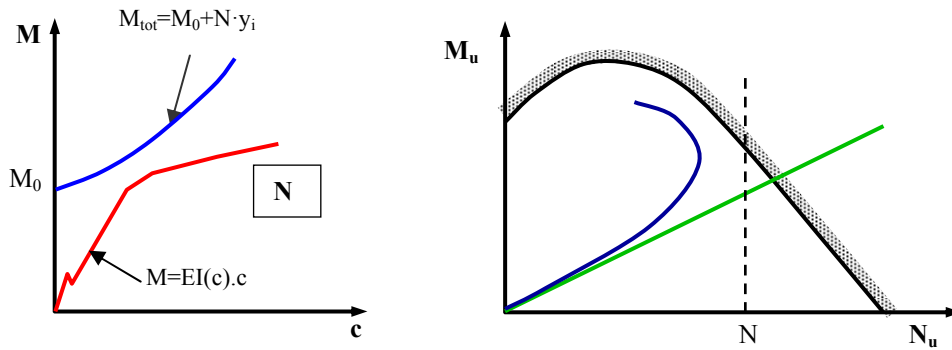


Figura 2.12. Inestabilidad del soporte.

Independientemente de la causa por la que se alcanzan las situaciones de estado límite del soporte (agotamiento o inestabilidad), estas pueden ser analizadas mediante el diagrama de interacción axil-momento. En la figura 2.13 se presenta el comportamiento de un soporte aislado sometido a un axil variable y con una excentricidad (e_i) igual en extremos. En la figura se representan los esfuerzos de primer orden y los esfuerzos totales para distintos niveles del esfuerzo axial. Existen dos situaciones límite en el soporte aislado: el agotamiento por tensiones normales de la sección de centro-luz (figura 2.13.a), que se alcanza cuando la curva correspondiente a los esfuerzos totales corta al diagrama de interacción axil-momento de la sección y, la inestabilidad del soporte (figura 2.13.b), que se alcanza cuando el soporte no es capaz de adoptar una posición de equilibrio a partir de un determinado esfuerzo axial para una excentricidad dada.

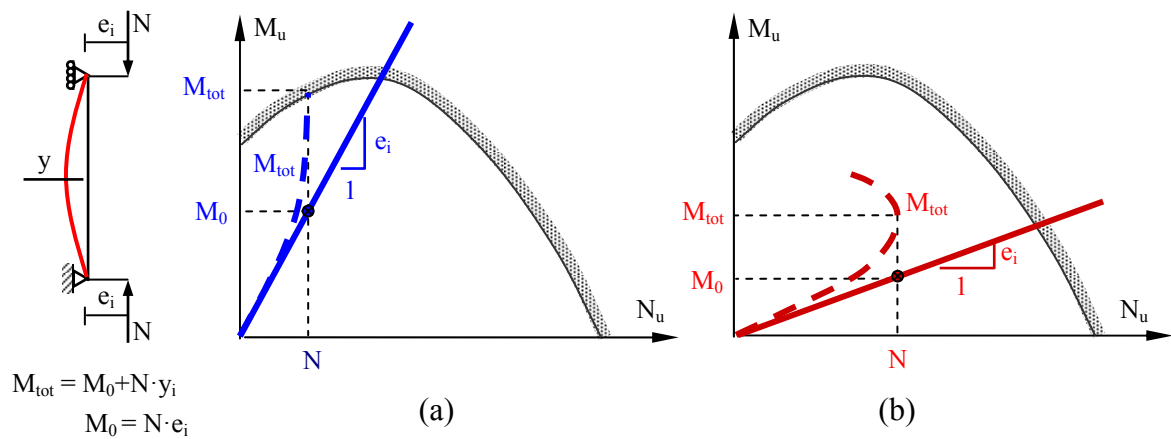


Figura 2.13. Situaciones límite del soporte aislado.

El lugar geométrico de los puntos N , M_0 obtenidos para diferentes excentricidades del axil aplicado es una línea curva que se denomina diagrama de interacción axil-momento del soporte. El diagrama de interacción axil-momento del soporte coincide el diagrama de interacción axil-momento de la sección cuando la esbeltez del soporte es nula.

En soportes que forman parte de una estructura intraslacional sometidos a excentricidades diferentes en extremos (figura 2.14), puede que no coincida la sección transversal de máximo esfuerzo de segundo orden con la sección de máximo momento de primer orden, que se sitúa en los extremos. En tal caso, la sección de máximo momento total se podrá situar bien en una sección intermedia (como suma del momento de primer más el de segundo orden) bien en una sección extrema (en dicho caso el momento total coincide con el momento de primer orden).

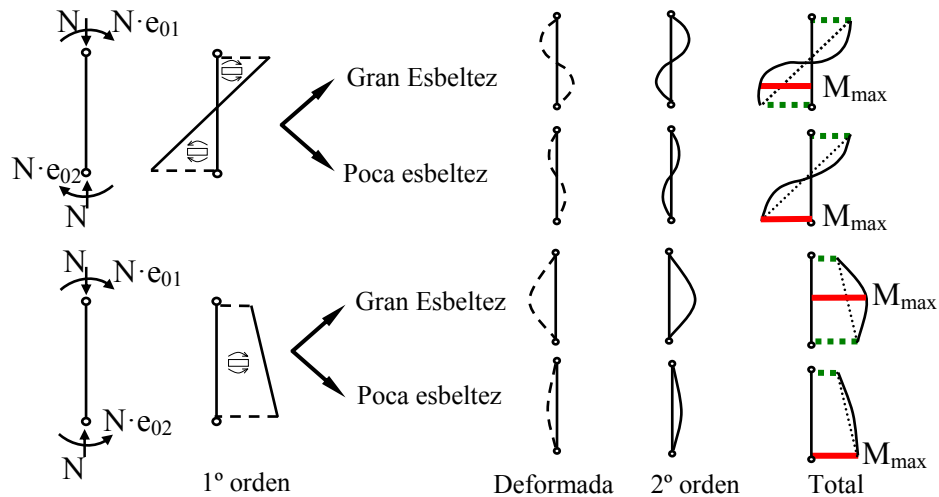


Figura 2.14. Distribución de esfuerzos: excentricidades distintas en extremos.

Por tanto, para analizar los soportes sometidos a excentricidades diferentes en los extremos, se deben realizar dos comprobaciones:

- En las secciones extremas del soporte, debido a los esfuerzos de primer orden;
- En la sección intermedia del soporte en la que se origine el máximo momento total.

Como los momentos aplicados en ambos extremos no son iguales, en el diagrama de interacción axil-momento del soporte se representan los esfuerzos de primer orden, para los que rompe la pieza, del extremo sometido al máximo momento flector. En la figura 2.15 se muestran los diagramas de interacción axil-momento de la sección transversal ($\lambda_g = 0$) y del soporte sometido a flexo-compresión recta con excentricidades distintas en extremos para distintos niveles de esbeltez geométrica.

Para soportes sometidos a grandes excentricidades, en general, la rotura se produce en la sección del extremo de máximo momento aplicado. En la figura 2.15 esta situación se identifica por la rama del diagrama de interacción del soporte que coincide con el diagrama de interacción de la sección transversal.

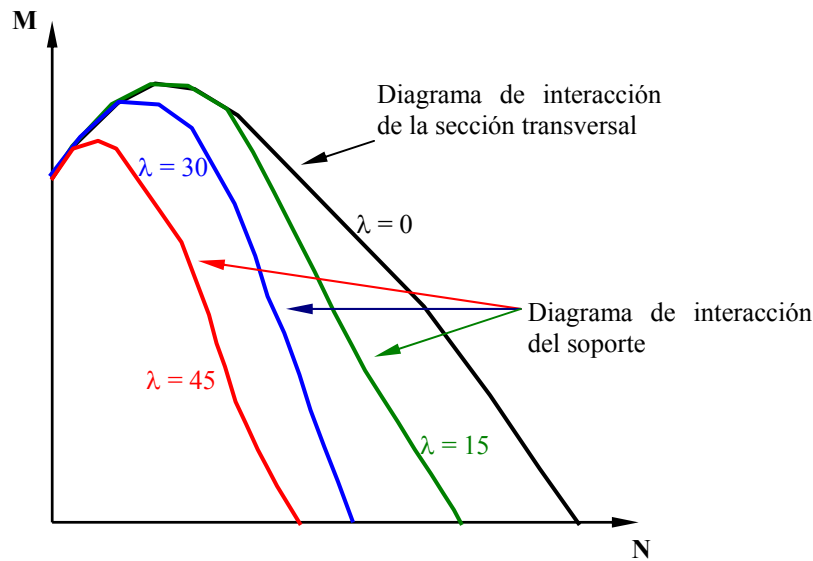


Figura 2.15. Diagrama de interacción de la sección transversal y del soporte sometido a excentricidades diferentes en extremos para distintas esbelteces geométricas.

2.2. Análisis de los métodos simplificados propuestos

A continuación, en los apartados 2.2.1 al 2.2.3, se hace un breve repaso en lo que se refiere a los métodos simplificados de análisis de soportes sometidos a excentricidades desiguales en los extremos.

2.2.1. Comprobación: métodos que aproximan la deformada del soporte

Los métodos de comprobación, son aplicables si se conoce la distribución y cuantía de armadura. En este caso es posible obtener la respuesta interna del soporte (diagrama momento-curvatura). Estos métodos se basan, por tanto, en determinar si para los esfuerzos aplicados se produce el equilibrio estable del soporte o el agotamiento de la sección crítica del soporte. Los esfuerzos de segundo orden se obtienen estableciendo una función conocida que aproxima la deformada del soporte. Esta simplificación permite de forma sencilla, obtener una relación entre la deformación total de la sección más solicitada y su curvatura (figura 2.17). Entre las aproximaciones de la deformada del soporte cabe destacar el método de la deformada senoidal (figura 2.16) que aproxima la deformación del soporte a una función sinusoidal.

Si la función que aproxima la deformada del soporte se define mediante un único parámetro (desplazamiento o curvatura de una sección) sólo es necesario plantear la ecuación de equilibrio en una única sección. En general, la determinación de la deformada supone el planteamiento del equilibrio en tantas secciones como parámetros se hayan utilizado para definirla.

Para definir la “directriz geométrica” del soporte, se puede utilizar el método basado en la deformada senoidal. Este método propone adaptar una función senoidal como expresión analítica de la deformada.

La primera propuesta en este sentido, fue realizada por Faessel [56] para soportes cargados axialmente con excentricidades iguales en sus extremos (figura 2.16).

$$y = y_i \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot x}{l}\right) \quad 2.31$$

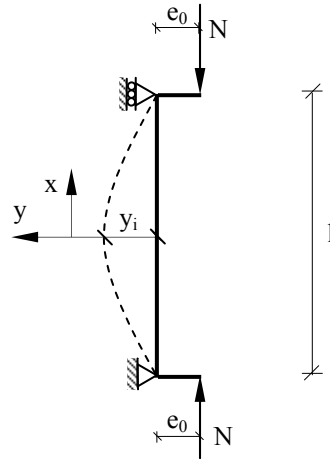


Figura 2.16. Deformada senoidal propuesta por Faessel [56].

El momento total aplicado en la sección de centro-luz se debe al momento de primer orden más el momento de segundo orden, que se obtiene a partir del producto del axil por la flecha.

$$M_{tot} = N \cdot e_0 + N \cdot y_i \quad 2.32$$

Para obtener el momento total (M_{tot}) en función de la curvatura (c) de la sección central se deriva dos veces la expresión 2.31, obteniéndose la directriz geométrica del soporte:

$$c = y'' = \frac{\pi^2}{l^2} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot x}{l}\right) = -\frac{\pi^2}{l^2} \cdot y \quad 2.33$$

$$x = 0; y = y_i \rightarrow y_i = \frac{l^2}{\pi^2} \cdot c$$

$$M_{tot} = N \cdot \left(e_0 + \frac{l^2}{\pi^2} \cdot c \right) \quad 2.34$$

Para estudiar el equilibrio del soporte se representa la directriz geométrica (expresión 2.34) en el diagrama momento-curvatura de la sección central (figura 2.17). Si existe intersección, hay una **posición equilibrio** entre los esfuerzos externos (M, N) y

los esfuerzos internos de la sección (N_i , M_i) sin que se produzca el **agotamiento** de la sección.

Si la directriz geométrica no corta en ningún punto a la curva momento-curvatura, para el axil aplicado el equilibrio del soporte es imposible, existe **inestabilidad**.

La hipótesis de la deformada senoidal presenta una incongruencia. Mientras que en apoyos la curvatura no debe ser nula porque existe un momento aplicado, la deformada senoidal propuesta tiene curvatura nula en dicha sección (expresión 2.32). Además éste método no permite tener en cuenta excentricidades distintas en los extremos.

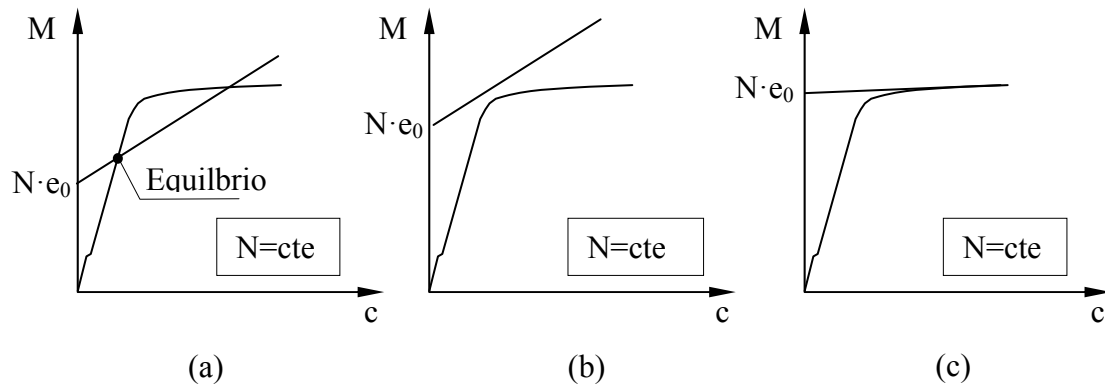


Figura 2.17. Situaciones límite: a. Equilibrio estable; b. Inestabilidad; c. Agotamiento por tensiones normales.

Estos motivos indujeron a Robinson et al. (1975) [55] a perfeccionar la deformada. Se propuso que la ley de excentricidades de la pieza debería de formularse según un arco de senoide respecto a la línea de presión, trayectoria que une los puntos de aplicación del axil en extremos de la pieza, idea que también desarrolló Arenas de Pablo (1980) [5] (figura 2.18).

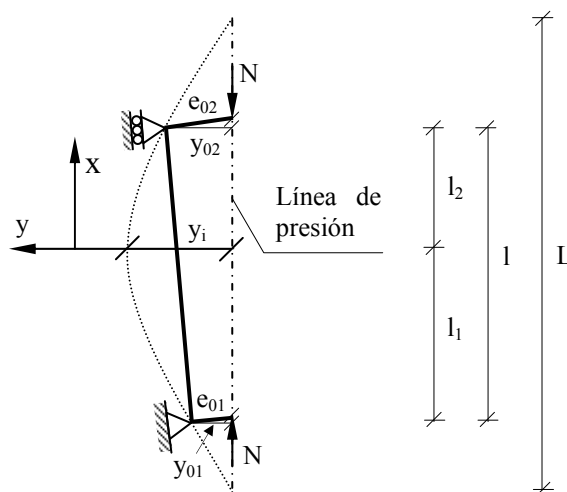


Figura 2.18. Deformada senoidal propuesta por Robinson et al. (1975) [55].

Con los ejes y símbolos indicados en la figura 2.18, la ecuación de la deformada es:

$$y = y_i \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot x}{L}\right) \quad 2.35$$

Operando con las expresiones 2.32 y 2.35, e imponiendo las condiciones de contorno se obtiene la expresión de la “directriz mecánica”, es decir, la relación entre los momentos totales y la curvatura en la sección central:

$$M = N \cdot y_i = N \cdot \frac{(c) \cdot l^2}{\left[\arccos\left(\frac{y_{01}}{y_i}\right) + \arccos\left(\frac{y_{02}}{y_i}\right) \right]^2} \quad 2.36$$

La intersección de esta curva que representa los momentos totales en la sección más solicitada con el diagrama momento-curvatura, proporciona, si existe, la posición de equilibrio (figura 2.17).

El momento total obtenido mediante la expresión 2.36, se ha determinado suponiendo que la máxima excentricidad y_i se produce en el interior del soporte. En el caso que se produjera fuera de las dimensiones físicas se debe de limitar la excentricidad mínima total y_i , a la excentricidad máxima en los extremos y_{02} , no siendo válida la relación hallada.

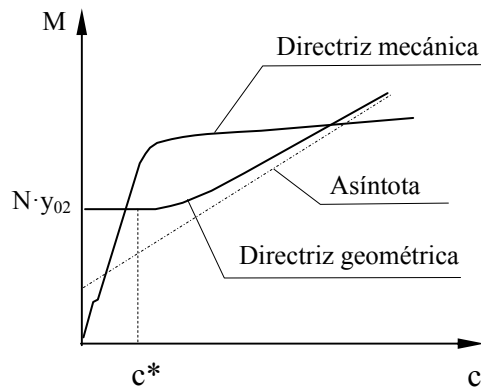


Figura 2.19. Intersección entre la directriz geométrica (relación entre momentos totales exteriores y la curvatura) y la directriz mecánica (relación entre los momentos internos y la curvatura) - Arenas de Pablo (1980) [5].

Como se aprecia en la figura 2.19, hasta una determinada curvatura (c^*) el momento total se mantiene constante e igual a $N \cdot y_{02}$, ya que con curvaturas menores el momento máximo se produce en el apoyo de mayor excentricidad. En la tabla 2.1, se indican los valores de la curvatura ($1/r^*$) para distintas relaciones y_{01}/y_{02} .

y_{01}/y_{02}	-1	-0.5	0	0.5	1
(c^*)	$\frac{\pi^2}{L^2} \cdot y_{02}$	$\frac{4 \cdot \pi^2}{9 \cdot L^2} \cdot y_{02}$	$\frac{\pi^2}{4 \cdot L^2} \cdot y_{02}$	$\frac{\pi^2}{9 \cdot L^2} \cdot y_{02}$	0

Tabla 2.1. Curvaturas límite c^* en función de la relación y_{01}/y_{02} - Arenas de Pablo (1980) [5].

Otro método de aproximación de la deformada del soporte que cabe resaltar es el método de la columna modelo. Se define como columna modelo a un pilar esbelto empotrado en su base y libre en el extremo superior (figura 2.20), siempre que la deformada producida por las cargas exteriores sea tal que la curvatura no presente puntos de inflexión (curvatura simple) (Jackobsen (1973) [27])

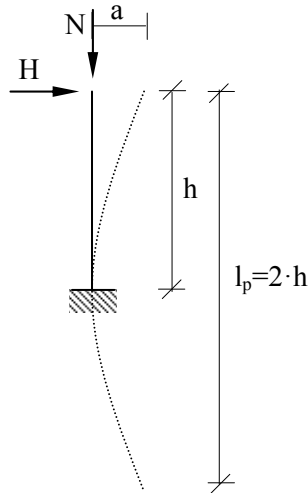


Figura 2.20. Columna modelo.

La flecha de la columna en su extremo libre se supone que es función de la longitud de la columna y de la curvatura de la base:

$$a = \frac{l_p^2}{10} \cdot c = 0.4 \cdot h^2 \cdot c \quad 2.37$$

donde: a flecha de la columna en su extremo libre;
 l_p longitud de pandeo de la columna;
 h altura del soporte;
 c curvatura de la sección de empotramiento.

El momento toral en la sección de empotramiento (figura 2.20) es igual a:

$$M = M_0 + H \cdot h + N \cdot (0.4 \cdot h^2 \cdot c) \quad 2.38$$

Este método puede aplicarse como un método de comprobación si se posee del diagrama momento-curvatura de la sección de empotramiento, o bien si se estima la curvatura de la sección de empotramiento se convierte en un método de diseño.

Jackobsen (1973) [27] propone diversas extensiones de este método para el caso de cargas aplicadas entre los extremos del soporte.

Este método sólo es válido para cargas instantáneas.

2.2.2. Dimensionamiento

Los métodos de dimensionamiento, tienen por objeto determinar la cuantía y distribución de armadura. Con este fin se determina el esfuerzo total de diseño, como suma del esfuerzo equivalente de primer orden ($N \cdot e_e$) más el incremento del esfuerzo flector producido por los efectos de segundo orden. Dicho incremento representa la diferencia entre el diagrama de interacción del soporte y el diagrama de interacción de la sección transversal para el axil de cálculo (figura 2.21 y figura 2.22).

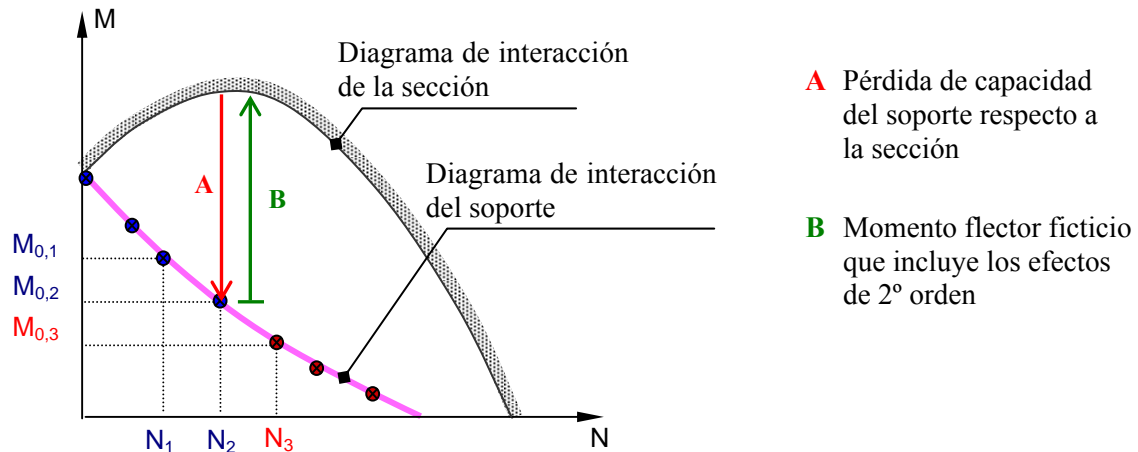


Figura 2.21. Diagramas de interacción de la sección y del soporte.

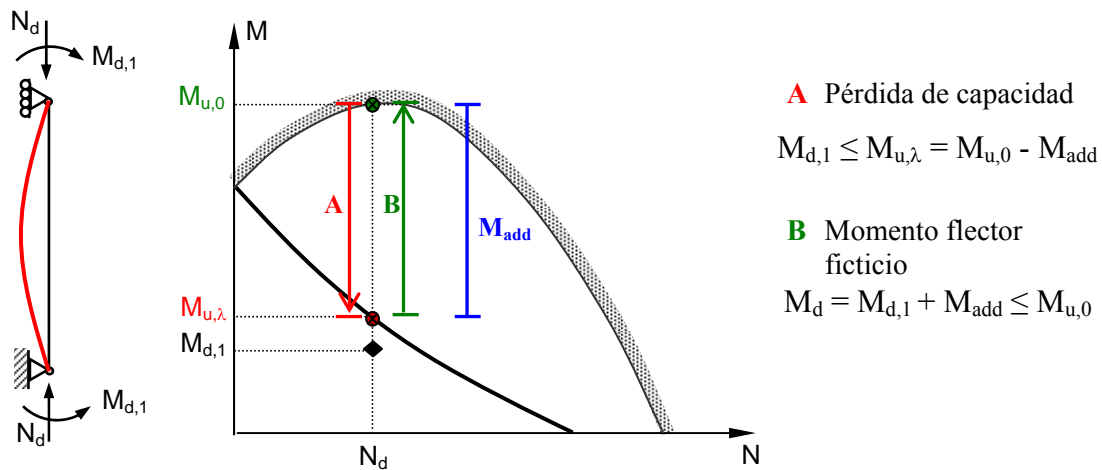


Figura 2.22. Planteamiento del Estado Límite.

Los códigos de diseño (AISC (1963) [60], ACI-318 (2008) [1], EC-2 (2004) [29], MC-90 [25] y MC-2010 [38]) proponen métodos simplificados con la finalidad de predecir la carga de agotamiento de soportes esbeltos sometidos a esfuerzos de flexo-compresión con excentricidades desiguales en extremos. Sin embargo, dichos métodos han sido contrastados con soportes fabricados con hormigón convencional y su aplicación a soportes fabricados con hormigón de alta resistencia requiere continuar investigándose (Galano y Vignoli (2008) [35]). En el Capítulo 5 (apartado 5.6) de la

presente tesis doctoral, se hace una descripción detallada de los métodos simplificados propuestos por dichos códigos de diseño.

Por otra parte, ensayos experimentales previos en soportes de alta resistencia sometidos a excentricidades iguales en extremos (Foster y Attard (1997) [32] [33], Claeson y Gylltoft (1998) [21] y Galano y Vingnoli (2008) [35] entre otros) demuestran que a igualdad de parámetros las columnas fabricadas con hormigón de alta resistencia son más frágiles que los soportes fabricados con hormigón convencional. Estos autores indican que es necesaria una mayor investigación experimental sobre la capacidad resistente y de deformación en soportes esbeltos fabricados con hormigón de alta resistencia para analizar la fiabilidad de aplicar los modelos numéricos y los métodos simplificados.

2.2.3. Excentricidades desiguales en los extremos: coeficiente de equivalencia C_m

Para la comprobación y diseño de soportes con excentricidades diferentes en extremos, los códigos de diseño plantean reducir el problema a un análisis de un soporte con una excentricidad equivalente (e_e) igual en sus extremos, que se calcula como producto de un coeficiente de equivalencia C_m , introducido en el apartado 2.1 (figura 2.6), por la máxima excentricidad aplicada en el extremo del soporte (e_2). A continuación, a partir de esta excentricidad (e_e) se obtienen los esfuerzos de diseño de la sección transversal del soporte (N_d , M_d) mediante el cálculo del factor de amplificación de momentos o de la excentricidad adicional. Finalmente, se diseña la armadura longitudinal del soporte o se calculan los esfuerzos de agotamiento aplicando un cálculo en rotura simplificado de la sección.

En la tabla 2.2, se indica una relación del coeficiente de equivalencia C_m propuesto por distintos autores y normativas. En dicha tabla se indican las variables de que depende cada una de las expresiones propuestas.

Como puede observarse en la tabla 2.2, no existe homogeneidad entre las diferentes propuestas, ni en las variables consideradas ni en el peso con el que influyen en el coeficiente de equivalencia. La expresión más comúnmente utilizada es la propuesta por Austin (1961) [7]. Dicha expresión ha sido utilizada por la mayoría de las instrucciones (AISC (1963) [60], ACI-318 (2008) [1], EC-2 (2004) [29], MC-90 [25]) y fue deducida a partir de la solución de la ecuación diferencial que se obtiene al plantear el equilibrio del soporte en su posición deformada suponiendo un comportamiento elástico y lineal del material, para cualquier relación de las excentricidades en extremos (e_1/e_2). Dicha expresión no incluye el comportamiento no-lineal de los soportes de hormigón armado.

Propuesta	Variables incluidas	Coefficiente de equivalencia (C_m)
Campus y Massonnet (1956) [19]	β	$\sqrt{0.3 \cdot (1 + \beta^2) + 0.4 \cdot \beta}$
Austin (1961) [7]	β	$0.6 + 0.4 \cdot \beta$
MacGregor et al. (1970) [41]	β	$0.75 + 0.25 \cdot \beta$
Robinson et al. (1975) [54]	β	$1.45 - 0.05 \cdot (4 - \beta)^2$
Trahair (1985) [64]	$\beta; N/N_{cr}$	$\frac{1 + \beta}{2} + \left[0.4 - 0.23 \cdot \left(\frac{N}{N_{cr}} \right) \right] \cdot \left(\frac{1 - \beta}{2} \right)^3$
Duan et al. (1989) [28]	$\beta; N/N_{cr}$	$1 + 0.25 \cdot \left(\frac{N}{N_{cr}} \right) - 0.6 \cdot \left(\frac{N}{N_{cr}} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot (1 - \beta)$
Sarker y Rangan (2003) [58]	$\beta; \lambda_m$	$a + (1 - a) \cdot \beta \rightarrow a = 0.975 - 0.00375 \cdot \lambda_m; \beta \geq -0.5$
Tikka y Mirza (2004) [61]	β	Propuesta 1: $0.6 + 0.4 \cdot \beta \geq 0.4$
Tikka y Mirza (2005) [62], [63]		Propuesta 2: $0.2 + 0.8 \cdot (0.5 + 0.5 \cdot \beta)^{1.1} \geq 0.3$
AISC (1963) [60]; ACI-318 (2008) [1]; EC-2 (2004) [29]; EHE-08 [23]; MC-90 [25]	β	$0.6 + 0.4 \cdot \beta \geq 0.4$
Pallarés et al. (2009) [48]	$\beta; \lambda_g; v; N/N_{cr}$	<p>Teórico elástico-lineal: $\begin{cases} C_m = \eta \cdot (N / N_{cr}) + \xi \geq C_{min} \\ \eta = 0.4 \cdot (\beta - 1); \xi = 0.15 \cdot \beta + 0.85 \\ C_{min} = 0.5 \cdot (\beta + 1) \geq 0.40 \end{cases}$</p> <p>No-lineal: $\begin{cases} C_m = (0.25 \cdot \beta + 0.75) - \frac{\lambda_g^2 \cdot v \cdot (1 - \beta)}{2500} \geq C_{min} \\ C_{min} = 0.45 \cdot \beta + 0.55 \geq 0.4 \end{cases}$</p>
β	Relación de excentricidades de primer orden en los extremos (e_1/e_2);	
$e_1; e_2$	Excentricidades de primer en los extremos (e_2 excentricidad de mayor valor absoluto);	
λ_m	Esbeltez mecánica del soporte;	
λ_g	Esbeltez geométrica del soporte;	
v	Axil reducido ($N/[A_c \cdot f_c]$);	
N	A_c	Área bruta de la sección transversal del soporte;
N_{cr}	f_c	Resistencia a compresión del hormigón;

Tabla 2.2. Expresiones del coeficiente de equivalencia C_m para soportes intraslacionales.

Sarker y Rangan (2003) [58] han deducido a partir de los resultados obtenidos mediante la aplicación de un programa de análisis no-lineal previamente calibrado con ensayos experimentales, una expresión del coeficiente C_m válida tanto para hormigones convencionales como de alta resistencia (hasta 101 MPa). Las variables analizadas por los autores en la simulación numérica han sido: la resistencia del hormigón (30, 60 y 100 MPa), la esbeltez geométrica (de 5.77 hasta 30), la excentricidad relativa, la relación entre momentos en los extremos y la cuantía geométrica de armadura (1%, 3% y 4%). La expresión deducida depende de la relación de excentricidades en extremos del soporte (e_1/e_2) y de la esbeltez mecánica del mismo (tabla 2.2).

Dichos autores señalan que la utilización del coeficiente de equivalencia C_m propuesto por la gran mayoría de las normativas, y basado en la propuesta de Austin

(1956) [7], se encuentra del lado de la inseguridad para soportes de esbeltez baja y media.

La expresión del coeficiente C_m propuesta por Tikka y Mirza (2004) [61] se basa en un análisis estadístico aplicado a los resultados obtenidos en una simulación numérica de 17000 soportes de hormigón armado de sección cuadrada sometidos a una sollicitación de flexo-compresión recta e instantánea. Los parámetros analizados han sido la resistencia del hormigón (hasta 55.2 MPa), la esbeltez geométrica del soporte (desde 10 hasta 30), la excentricidad relativa (desde 0.1 hasta 1), la relación entre momentos en extremos, la cuantía geométrica de armadura (desde 1.39% hasta el 4.9%) y la distribución de armadura. Tras un análisis estadístico concluyen que el factor C_m no depende ni del nivel de axil (N/N_{cr}) ni de la esbeltez del soporte. Además indican que la expresión propuesta por la mayoría de las normativas se encuentra del lado de la seguridad. Esta afirmación se contradice con la expuesta por Sarker y Rangan (2003) [29].

Un año después, Tikka y Mirza (2005) [62], [63] comprobaron que la expresión del coeficiente C_m que habían deducido para hormigón armado estos mismos autores [61] también es válida para soportes compuestos. Dicha verificación ha sido realizada a partir de los resultados obtenidos en una simulación numérica de 11000 soportes. Una vez más la resistencia del hormigón analizada corresponde al rango de los hormigones convencionales.

Por último, Pallarés et al. (2009) [48] han propuesto una expresión para el cálculo del coeficiente C_m a partir de una simulación numérica de 5968 soportes de sección cuadrada con la aplicación de un modelo calibrado mediante ensayos experimentales que incluyen tanto soportes de hormigón convencional como de alta resistencia. Las variables analizadas han sido la resistencia del hormigón (30 y 80 MPa), la esbeltez geométrica del soporte (10, 20 y 30), la distribución de la armadura, la cuantía mecánica de la armadura ($\omega = 0.06, 0.25, 0.50$ y 0.75), el coeficiente de fluencia ($\phi = 0, 1, 2$ y 3) y la relación de excentricidades en extremos del soporte (e_1/e_2). La expresión propuesta por dichos autores (tabla 2.2) depende de la relación de excentricidades (e_1/e_2), de la esbeltez geométrica (λ_g), de la resistencia del hormigón (f_c) y del nivel de axil aplicado. Esta expresión es válida para soportes solicitados a flexo-compresión recta, comportamiento instantáneo o diferido y para soportes fabricados con hormigón convencional o de alta resistencia, y es aplicable tanto para la comprobación como para el diseño de soportes de hormigón armado.

Por otra parte, las normativas aplican el coeficiente de equivalencia C_m en cada dirección de flexión del soporte de forma independiente en el caso de soportes sometidos a flexo-compresión esviada. Por consiguiente, existe una duda razonable sobre la bondad de la aplicación de dichos métodos simplificados a soportes sometidos a esfuerzos de flexo-compresión esviada.

2.3. Análisis de los ensayos experimentales existentes en la literatura

Tal y como se puede observar en la literatura analizada, los trabajos experimentales se centran en el estudio de soportes esbeltos fabricados con hormigón convencional y sometidos a excentricidades de igual magnitud, dirección y sentido y, fundamentalmente bajo solicitaciones de flexo-compresión recta e instantánea. En comparación con estos trabajos, son escasos los estudios experimentales de soportes sometidos a excentricidades desiguales en sus extremos y fabricados con hormigón de alta resistencia. A continuación, se indica un resumen de las referencias bibliográficas más significativas que analizan este tipo de solicitación.

Baumann (1935) [11] ensayó 3 soportes doblemente articulados de hormigón armado, de los cuales dos tienen una esbeltez geométrica igual a 12.6 y otro de esbeltez geométrica igual a 24. El autor utilizó cuantías de armadura de 0.97%, 0.98% y 2.01%, relación de excentricidades (e_1/e_2) igual a 0, resistencia del hormigón entre 24.3 y 30.3 MPa, y excentricidad relativa (e_2/h) de 0.167. Uno de los soportes tenía sección transversal rectangular (13 x 25 cm) y los otros dos tenían sección transversal cuadrada (250 x 250 mm). En el soporte con sección transversal rectangular, se tomó como eje de flexión el eje débil de la sección, paralelo a la mayor dimensión de la misma.

Martin y Olivieri (1966) [44] llevaron a cabo el análisis de 8 soportes biapoyados de hormigón armado de esbeltez geométrica igual a 40, cuantía geométrica de armadura igual a 2.49%, relación entre excentricidades (e_1/e_2) iguales a -0.5 y 1, resistencia del hormigón entre 24 y 37 MPa y, excentricidad relativa (e_2/h) entre 0 y 0.388. La sección analizada es rectangular. Se toma como eje de flexión para todos los ensayos el eje débil de la sección, paralelo a la mayor dimensión de la misma. En la figura 2.23 se representa un esquema con las características geométricas de los soportes ensayados, la instrumentación utilizada por los autores a lo largo de la longitud del soporte, la aplicación de las excentricidades en los extremos de la pieza, y la deformada para dos de los ensayos realizados.

Mehmel et al. (1969) [45] ensayaron 2 soportes biapoyados de hormigón armado de esbeltez geométrica igual a 14.5 y 21.7, cuantía geométrica de armadura del 1.12%, relación entre excentricidades (e_1/e_2) igual a 0, resistencias del hormigón de 35.9 y 37.4 MPa y excentricidades relativas (e_2/h) iguales a 0.17 y 0.503. Los dos soportes tenían sección transversal rectangular y se tomó como eje de flexión el eje débil de la sección en cada soporte.

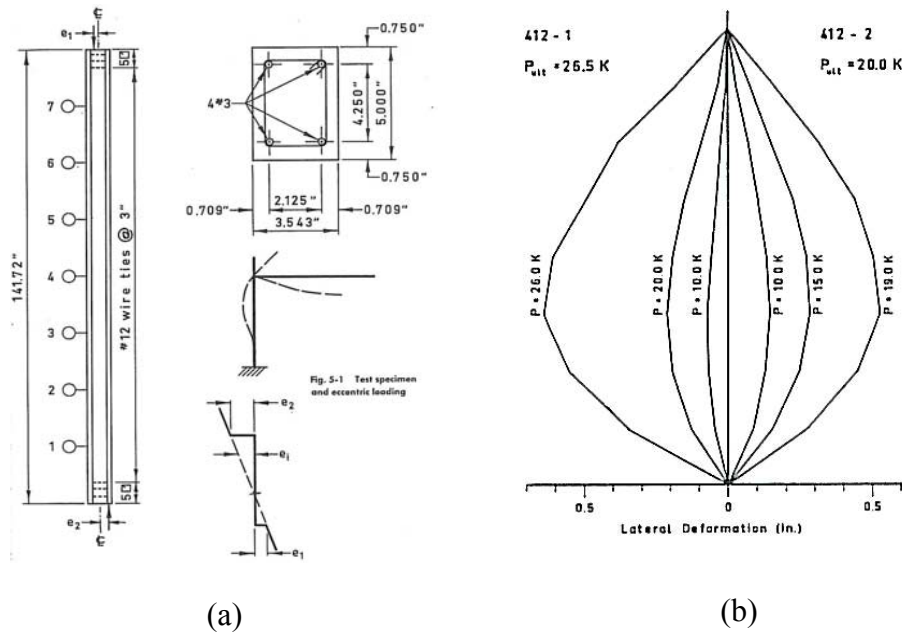


Figura 2.23. Martin y Oliviere (1966) [44]: a. Características del ensayo; b. Deformada de los soportes 412-1 y 412-2.

MacGregor y Barter (1966) [40] ensayaron 8 soportes de esbeltez geométrica igual a 27.3. Cuatro de estos soportes estaban biapoyados mientras que en los otros cuatro soportes restantes se les añadieron sendas vigas en los extremos para inducir una restricción al giro. Para cada tipo de soporte (biapoyado o con restricción) se aplicó dos excentricidades relativas (0.2 y 1.50). La relación de excentricidades aplicadas en extremos (e_1/e_2) era de -1. El hormigón utilizado tenía una resistencia entre 25 y 34 MPa. Se analizó el comportamiento del soporte bajo carga instantánea. La sección analizada era rectangular. Se tomó como eje de flexión para todos los ensayos el eje débil de la sección. En la figura 2.24 se muestra un esquema de los ensayos realizados, la geometría de la sección del soporte y las vigas en los extremos, y las excentricidades aplicadas para cada serie ensayada.

Robinson y Modjabi (1968) [56] llevaron a cabo un análisis de 3 soportes de hormigón armado de esbeltez geométrica igual a 30, cuantía geométrica de armadura igual a 2.05%, relación entre excentricidades (e_1/e_2) igual a 1, y excentricidades relativas (e_2/h) iguales a 0.005, 0.1 y 0.2. Los hormigones empleados en la fabricación de cada soporte tenían resistencia entre 40 y 44.9 MPa.

Robinson, Fouré y Bourghli (1975) [54] ensayaron un total de 16 soportes biapoyados de esbeltez geométrica igual a 30, cuantía geométrica de armadura igual al 2%, excentricidad relativa (e_2/h) entre 0 y 0.5 y la relación entre excentricidades (e_1/e_2) toman los siguientes valores: -1, -0.5, 0 y 0.5. La resistencia del hormigón variaba entre 28 y 42 MPa.

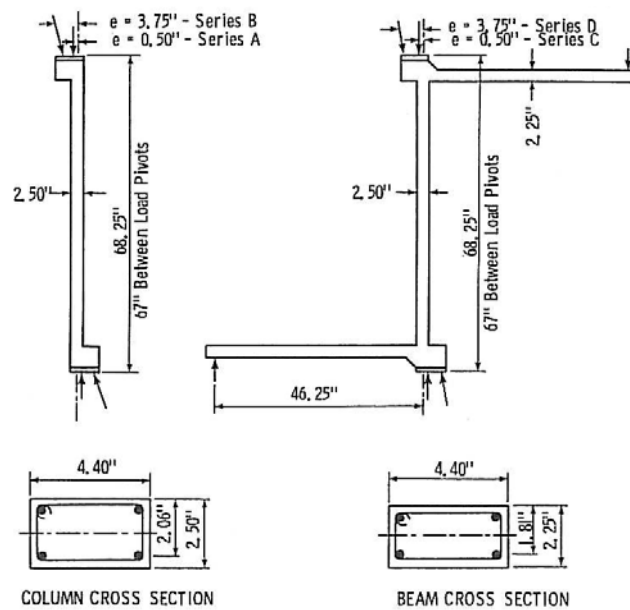


Figura 2.24. MacGregor y Bartter (1966) [40]: Característica de los ensayos realizados.

Robinson, Fouré y Sahébdjem. (1975) [55] ensayó 3 soportes de hormigón armado con resistencias entre 34.5 y 37 MPa, de esbeltez geométrica igual a 30, relación entre excentricidades (e_1/e_2) iguales a -0.5 y 0.5, excentricidades relativas (e_2/h) iguales a 0.1, 0.2 y 0.3 y con cuantía geométrica de armadura longitudinal igual al 1.51%.

Van Stekelenburg [54] llevó a cabo el análisis experimental de 19 soportes biapoyados de hormigón con resistencia a compresión entre 28 y 36 MPa. Las relaciones entre excentricidades (e_1/e_2) analizadas fueron de -1 y 1, excentricidad relativa (e_2/h) igual 0.2, cuantía geométrica de armadura longitudinal entre el 0.5% y el 3.18%. Las esbelteces geométricas analizadas fueron de 15.7 y 25.7 y todos los soportes ensayados tenían sección transversal cuadrada de 150 x 150 mm.

Rangan (1998-1999) [52] [53] ensayó 12 soportes biapoyados de sección rectangular (300 x 100 mm), de esbeltez geométrica igual a 13.86, cuantías geométrica de armadura igual al 2% y 3% y resistencia del hormigón de 60 MPa. Las relaciones entre excentricidades analizadas (e_1/e_2) fueron de -1, -0.666, -0.25, 0.08, 0.2, 0.375, 0.4, 0.5 y 0.625, variando la excentricidad relativa aplicada (e_2/h) entre 0.1 y 0.4.

Sarker (2001) [57] ensayó un total de 18 soportes biapoyados de sección cuadrada, de esbeltez geométrica igual a 8.75, cuantía geométrica de armadura igual al 2.95% y resistencia del hormigón entre 58 y 101 MPa. La relación entre excentricidades analizadas (e_1/e_2) varía entre 1 y -1 (1, 0.42, 0, -0.42, -1), variando la excentricidad relativa aplicada (e_2/h) entre 0 y 0.37.

En la figura 2.25 se muestran las características de de la sección transversal de los soportes ensayados experimentalmente por los autores (a), el esquema utilizado para aplicar las excentricidades en los extremos de la pieza (b) y una foto de la rotura de uno de los soportes ensayados (c).

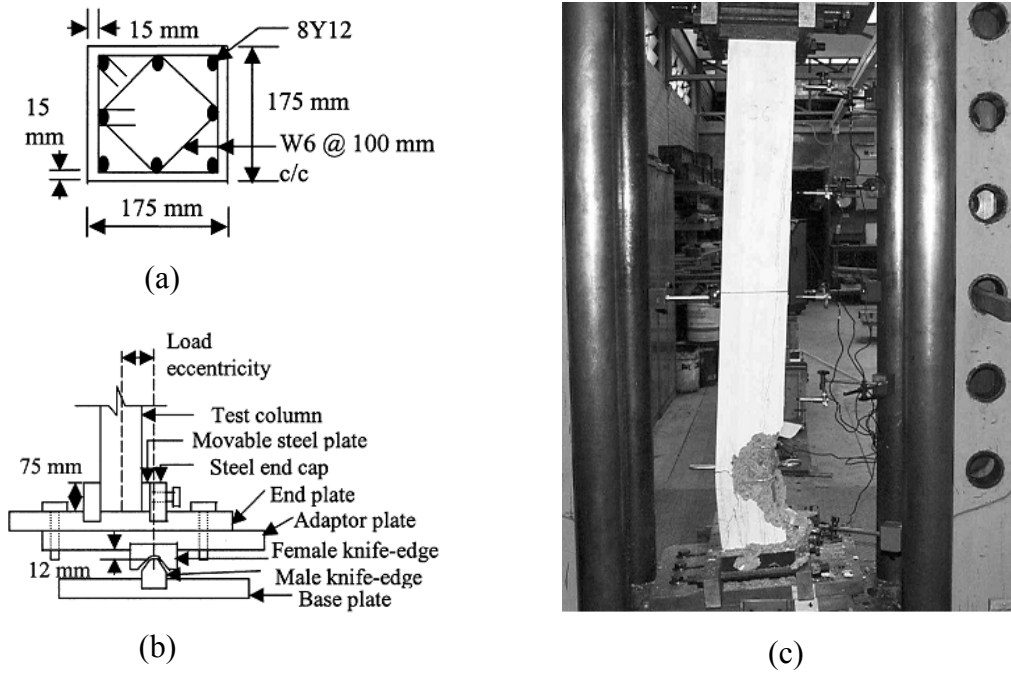


Figura 2.25. Sarker y Rangan (2003) [58]: a. Sección transversal; b. Esquema de aplicación de excentricidad en extremos; c. Rotura frágil de uno de los soportes ensayados.

Bradford (2005) [18] ensayó un total de 5 soportes biapoyados de sección cuadrada de esbeltez geométrica igual a 33.3, cuantía geométrica de armadura igual al 2% y de resistencia del hormigón a los 12 días de 29.3 MPa. Estos soportes fueron sometidos a una carga diferida en el tiempo con excentricidades diferentes en extremos. Las relaciones de excentricidades que fueron analizadas (e_1/e_2) variaban entre 1 y -1 (1, 0.5, 0, -0.5, -1), siendo la excentricidad relativa aplicada (e_2/h) de 0.33. En la figura 2.26 se representa un esquema de la sección transversal de los soportes analizados así como una imagen con los soportes ubicados en los pórticos de carga y sometidos a una carga diferida en el tiempo con valores entre 70 y 85 kN.

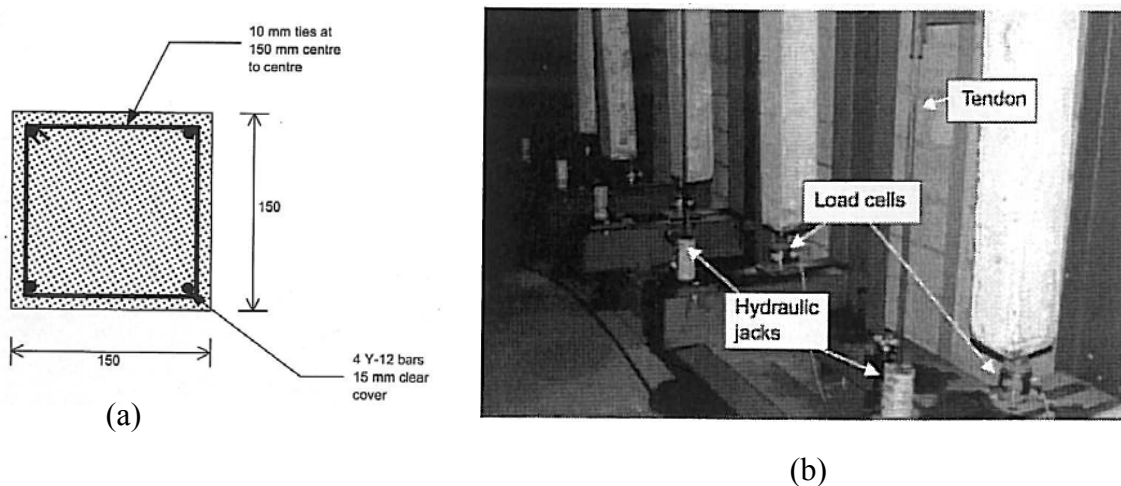


Figura 2.26. Bradford (2005) [18]: a. Esquema de la sección transversal analizada por los autores; b. Foto de los soportes durante el ensayo.

En la tabla 2.3 se presenta un resumen de los ensayos analizados en la literatura técnica en los que se aplicaron excentricidades distintas en los extremos, agrupados por autores. En el Anejo D se presenta un listado de todos los 74 ensayos realizados por dichos autores con las variables analizadas en cada caso.

Autores	Año	Numero de ensayos	Resistencia del hormigón	
			HAR ($f_c > 50\text{MPa}$)	HC ($f_c \leq 50\text{MPa}$)
Baumann [11]	1935	3	0	3
Martin y Olivieri [44]	1966	6	0	6
MacGregor y Barter [40]	1966	4	0	4
Van Stekelenburg [54]	1966	12	0	12
Mehmel et al. [45]	1969	2	0	2
Robinson et al. [54]	1975	13	0	13
Fouré et al. [55]	1975	3	0	3
Rangan [53]	1999	12	12	0
Sarker [57]	2001	15	15	0
Bradford [18]	2005	4	0	4
Total		74	27	47
HAR Hormigón de alta resistencia				
HC Hormigón convencional				

Tabla 2.3. Ensayos con excentricidades distintas en extremos encontrados en la literatura técnica analizada.

Por último, en la figura 2.27, se muestra gráficamente el número de ensayos disponibles en la bibliografía en función del tipo de excentricidad, de la existencia de flexión esviada o no y del tipo de carga, instantánea o sostenida en el tiempo, en donde se aprecia la inexistencia de experimentación sobre soportes esbeltos de hormigón sometidos a flexo-compresión esviada con diferentes excentricidades en sus extremos. Sarker y Rangan (2003) [58], en su trabajo, manifestaron también esta conclusión: “*existe una clara ausencia de datos experimentales sobre columnas de hormigón armado sometidas a excentricidades desiguales en extremos*”.

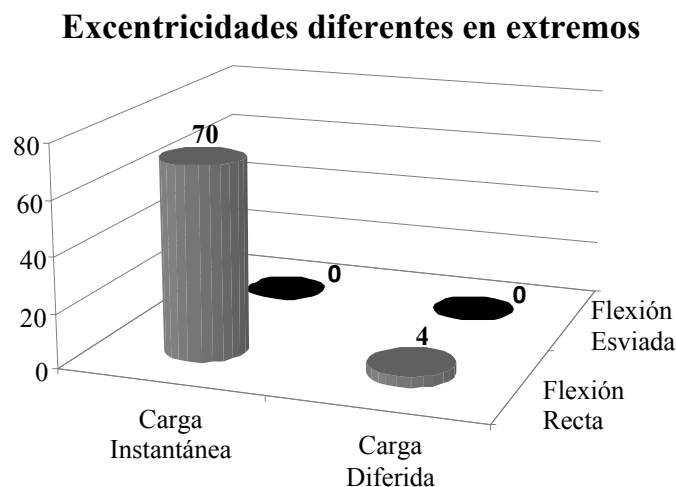


Figura 2.27. Número de ensayos según el tipo de carga aplicada.

2.4. Análisis paramétrico de la distribución de ensayos experimentales existentes en la literatura

En este apartado se hace un análisis de los parámetros que han sido estudiados en la literatura correspondiente a ensayos experimentales de soportes fabricados con hormigón armado sometidos a solicitaciones de flexo-compresión con excentricidades diferentes en extremos. La finalidad de este apartado es buscar los vacíos experimentales y definir los parámetros de ensayo con la finalidad de justificar y elaborar un programa experimental de ensayos de soportes de hormigón armado bajo este tipo de solicitación.

En la tabla 2.4 se representan las distribuciones de ensayos de la bibliografía analizada en función de distintos parámetros estudiados por los autores. A continuación, se analizan pormenorizadamente la distribución de ensayos en función de los parámetros objeto de estudio.

2.4.1. Resistencia del hormigón (f_c)

En la literatura técnica analizada se han encontrado 74 ensayos de soportes de hormigón armado sometidos a solicitaciones de flexo-compresión recta con excentricidades distintas en extremos ($e_1/e_2 \neq 1$), donde 47 se encuentra en el rango de los hormigones convencionales ($f_c \leq 50$ MPa), y 27 ensayos con soportes fabricados con hormigón de alta resistencia ($f_c > 50$ MPa), de los cuales apenas 5 superan los 60 MPa, y todos han sido realizados por los mismos autores (Sarker y Rangan (2003) [58]). Por lo tanto, la distribución de los ensayos en función de la resistencia del hormigón muestra un gran vacío experimental en el rango de los hormigones de alta resistencia, evidenciando la necesidad de nuevos datos experimentales para comprobar el comportamiento de soportes esbeltos fabricados con este tipo de hormigón bajo estos tipos de solicitaciones.

2.4.2. Relación entre excentricidades (e_1/e_2)

Los ensayos experimentales, respecto a la relación entre excentricidades en los extremos, se centran en valores entre -1 y 1. A partir de la distribución de los ensayos en función de este parámetro se verifica la escasez de ensayos experimentales con excentricidades distintas en extremos ($e_1/e_2 \neq 1$) y que la mayor parte de ellos (28) poseen una relación entre excentricidades igual a -1.

2.4.3. Excentricidad relativa (e_2/h)

A partir de la distribución de ensayos en función del valor de excentricidad relativa se observa que la mayoría de los valores analizados se centran entre 0.1 y 0.4, que es el rango usual utilizado en edificación.

2.4.4. Esbeltez geométrica (λ_g)

La mayoría de los ensayos experimentales de soportes fabricados con hormigón convencional (HC) centran su estudio en soportes de esbeltez geométrica (λ_g) entre 25 y 40. Sin embargo, todos los ensayos de soportes fabricados con hormigón de alta resistencia (HAR) son poco esbeltos ($\lambda_g < 15$), y todos realizados por los mismos autores (Rangan (1999) [53] y Sarker y Rangan (2003) [58]).

La utilización de hormigón de alta resistencia posibilita alcanzar mayores esbelteces a igualdad del resto de parámetros que en el hormigón convencional. Es por ello que resulta muy importante disponer de resultados experimentales que cubran mayores esbelteces ($\lambda_g \geq 20$) para soportes fabricados con este tipo de hormigón. Por consiguiente, existe un vacío experimental de ensayos de soportes fabricados con hormigón de alta resistencia y sometidos a excentricidades desiguales en extremos.

2.4.5. Cuantía geométrica de armadura longitudinal (ρ_l)

Para los ensayos analizados respecto a la cuantía geométrica de armadura longitudinal puede observarse que los valores de dicho parámetro se encuentran alrededor del 2%, que es también el rango usual utilizado en el campo de la edificación o la obra civil. Se aprecia también que no hay ensayos para cuantías geométricas elevadas.

2.4.6. Cuantía mecánica de armadura longitudinal (ω)

Puede observarse que la mayoría de los ensayos estudian cuantías mecánicas que oscilan entre 0.1 y 0.4, mostrándose el mayor número de ensayos para una cuantía mecánica alrededor de 0.2. En los ensayos analizados con soportes fabricados con hormigón de alta resistencia, el rango de la cuantía mecánica disminuye al aumentar la resistencia del hormigón y mantenerse constante la cuantía geométrica, observándose un intervalo de variación para este tipo de hormigón entre 0.1 y 0.23. Tanto para hormigones convencionales como para hormigones de alta resistencia, el rango de las cuantías mecánicas ensayadas coincide con las cuantías usuales en el campo de la edificación o la obra civil.

2.4.7. Resistencia del acero (f_y)

Respecto a la resistencia del acero en los ensayos de la bibliografía analizada, los valores se centran entre 400 y 500 MPa.

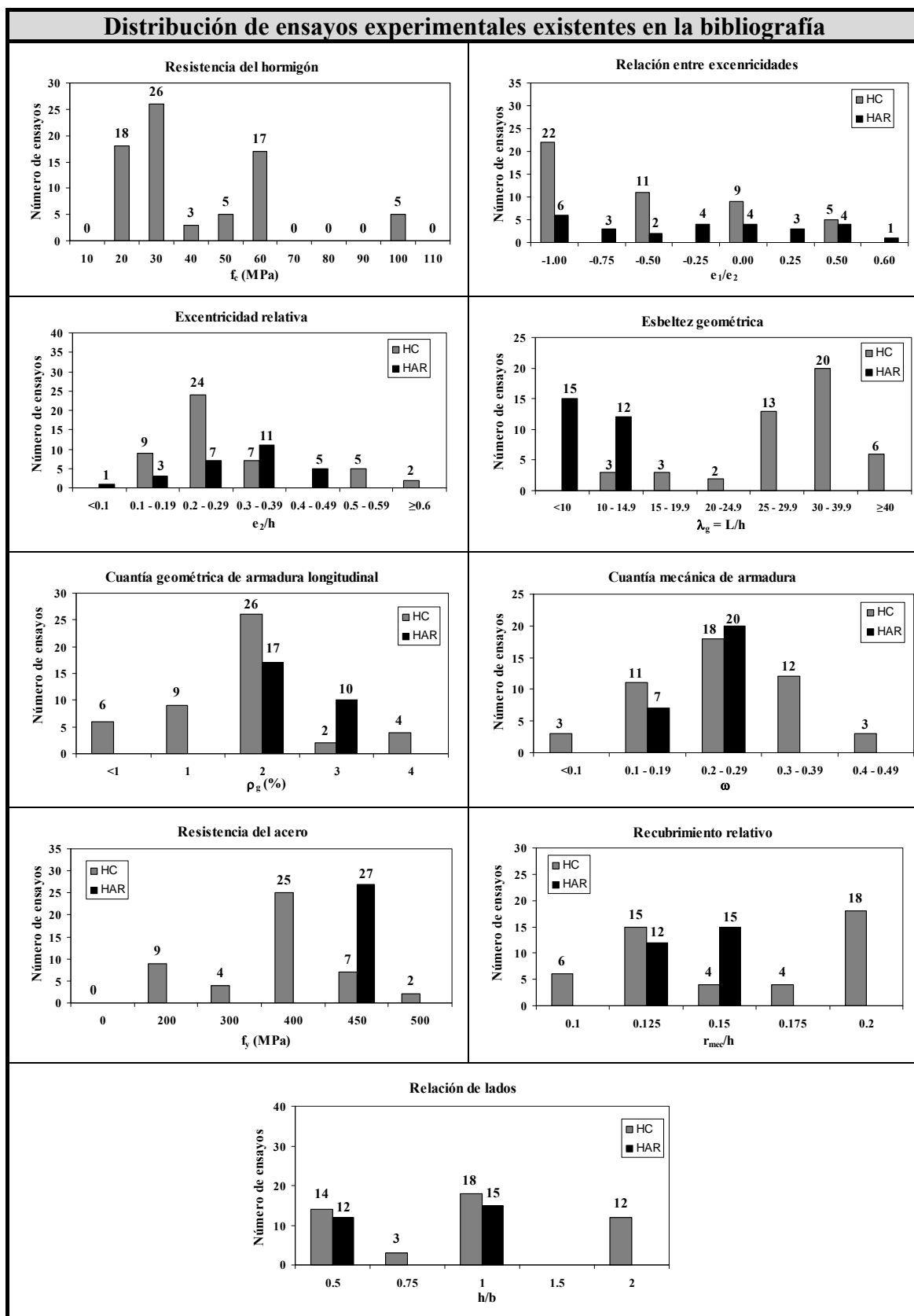


Tabla 2.4. Análisis de los ensayos experimentales existentes en la literatura referente a soportes sometidos a excentricidades distintas en extremos y a una sollicitación de flexo-compresión recta.

2.4.8. Recubrimiento relativo (r_{mec}/h)

Puede observarse que los valores analizados en los ensayos de la literatura se centran principalmente entre 0.125 y 0.175.

2.4.9. Relación de lados (h/b)

La mayoría de los soportes ensayados por los diversos autores en la bibliografía analizada poseen sección transversal cuadrada ($h/b = 1$) o rectangular con h/b igual a 0.5, siendo h la dimensión de la sección transversal en la dirección de flexión considerada. En los soportes de sección transversal rectangular, se tomó como eje de flexión para todos los ensayos el eje débil de la sección.

2.4.10. Conclusiones del análisis paramétrico

Tras el análisis de la distribución de ensayos en la bibliografía existente en lo que se refiere a ensayos de soportes con diferentes excentricidades en extremos se obtienen las siguientes conclusiones:

- No hay ensayos de soportes sometidos a esfuerzos de flexo-compresión esviada con excentricidades desiguales en extremos;
- Se centran en relaciones de excentricidad iguales a 1, 0.5 0, -0.5 y -1;
- La mayoría de los ensayos han sido realizados bajo carga instantánea, con excepción de los 5 soportes ensayados por Bradford (2005) [18], que estaban sometidos a una carga diferida en el tiempo.
- El rango de esbeltez geométrica que cubren es, o menor de 10, o entre 20 y 30 (habitual en edificación). Hay una laguna para esbelteces entre 10 y 25;
- Los valores relativos de excentricidad varían entre 0.1 y 0.4;
- Las cuantías geométricas de armaduras varían entre 2% y 3% y las mecánicas entre 0.1 y 0.3;
- Los aceros empleados poseen límite elástico entre 400 y 500 MPa;
- La mayoría de los soportes ensayados son de hormigón convencional;
- De los soportes fabricados con hormigón de alta resistencia, apenas 5 superan los 60 MPa de resistencia a compresión y todos han sido realizados por los mismos autores (Rangan (1999) [53] y Sarker y Rangan (2003) [58]);
- No existen ensayos de soportes con esbelteces geométrica mayores que 15 y fabricados con hormigón de alta resistencia.

Capítulo 3.

Importancia de la investigación y objetivos específicos

En este capítulo se justifica la importancia de la investigación realizada y se definen los objetivos específicos a alcanzar en la realización de la presente tesis doctoral.

En el capítulo anterior se ha presentado el estado actual del conocimiento, centrandó la atención fundamentalmente en los ensayos de soportes esbeltos de hormigón sometidos a sollicitaciones de flexo-compresión con excentricidades y ángulos de esviaje distintos en los extremos.

3.1. Importancia de la investigación

A la vista de la bibliografía analizada se pone de manifiesto la carencia de resultados experimentales de soportes fabricados con hormigón convencional sometidos a esfuerzos de fleco-compresión esviada con excentricidades y ángulos de esviaje desiguales en extremos, y fabricados con hormigón de alta resistencia, sometidos a sollicitaciones de flexo-compresión recta ($\lambda_g > 15$), y esviada con excentricidades distintas en magnitud, dirección y sentido en extremos.

Además, ensayos experimentales previos en soportes de alta resistencia sometidos a excentricidades iguales en extremos (Foster y Attard (1997) [32], Claeson y Gylltoft (1998) [21], Galano y Vingnoli (2008) [35], entre otros) demuestran que, a igualdad de parámetros, las columnas fabricadas con hormigón de alta resistencia se comportan de manera distinta a los soportes fabricados con hormigón convencional. Estos autores, por consiguiente, indican que es necesaria una mayor investigación experimental sobre la capacidad resistente y de deformación en soportes esbeltos fabricados con hormigón de alta resistencia para analizar la fiabilidad de aplicar los modelos numéricos y los métodos simplificados. Además, los métodos para la obtención del coeficiente C_m citados en el capítulo anterior (apartado 2.2.3) no han sido calibrados para soportes fabricados con hormigón de alta resistencia, con excepción de la expresión propuesta por Sarker y Rangan (2003) [29] y por Pallarés et al. (2009) [48].

La importancia de la investigación se centra en la contribución de aumentar el banco de datos experimentales disponibles con el fin de corroborar los métodos de diseño existentes en la bibliografía para soportes de hormigón armado sometidos a este tipo de sollicitación. Además, se propone un método simplificado de diseño de soportes sometidos a este tipo de sollicitación, teniendo en cuenta el comportamiento de este tipo de elementos estructurales, mediante una simulación numérica realizada con un programa de elementos finitos calibrado con los ensayos experimentales.

3.2. Planteamiento de objetivos específicos

En este apartado se detallan los objetivos específicos del presente trabajo, que han sido definidos tras la realización de la revisión del estado actual del conocimiento, atendiendo al objetivo general expuesto en el Capítulo 1 en relación al análisis de soportes de hormigón convencional y de alta resistencia sometidos a una sollicitación de flexo-compresión con excentricidades y ángulos de esviaje desiguales en sus extremos, en flexo-compresión recta o esviada.

A continuación se relacionan los objetivos específicos a alcanzar en la realización de la presente tesis doctoral:

1. Recopilar y analizar la literatura existente sobre ensayos experimentales de soportes esbeltos de hormigón armado sometidos a flexo-compresión con excentricidades y ángulos de esviaje desiguales en extremos;
2. Definir los parámetros y los rangos de variación a considerar en el programa experimental, tales como la esbeltez de la pieza, los ángulos de esviaje y las excentricidades consideradas, la forma de la sección transversal o las cuantías de armaduras utilizadas;
3. Diseñar un método de ensayo que permita representar y analizar el comportamiento de soportes de hormigón con excentricidades y ángulos de esviaje desiguales en extremos;
4. Proponer un programa experimental de ensayos que permita extraer conclusiones sobre el comportamiento de soportes de hormigón armado en flexo-compresión recta y esviada, con excentricidades y ángulos de esviaje desiguales en extremos;
5. Identificar el sistema de medida más adecuado que permita obtener datos suficientes a la hora de interpretar los fenómenos que reproducen el comportamiento del elemento;
6. Comprobar la bondad del ensayo propuesto;
7. Definir la metodología de ensayo;
8. Proveer un banco de datos a los investigadores, no sólo en cuanto a cargas máximas sino también en cuanto a deformaciones en las secciones críticas y en cuanto a la posición deformada de la estructura para diferentes niveles de carga;
9. Presentar un análisis de los resultados obtenidos en los ensayos experimentales, tanto a nivel individual de cada soporte como a nivel comparativo entre series de soportes;
10. Verificar la bondad de los métodos simplificados de diseño propuestos por distintas normativas para soportes de hormigón armado con las características presentadas en este trabajo contrastando los resultados obtenidos experimentalmente con los resultados obtenidos con la utilización de dichos métodos;
11. Calibrar un modelo numérico a partir de los resultados obtenidos en la campaña experimental;

12. Proceder a la aplicación exhaustiva del modelo calibrado con la finalidad de generar, mediante resultados numéricos, un amplio banco de datos que sirvan para deducir reglas prácticas o métodos simplificados de análisis y diseño de soportes de hormigón armado con las características descritas en este trabajo;
13. Deducir mediante la aplicación de un modelo numérico un método simplificado para el diseño de soportes sometidos a excentricidades distintas en magnitud, dirección y sentido en extremos, tanto en flexo-compresión recta como esviada;
14. Verificar la bondad del método propuesto.

Capítulo 4.

Programa experimental

En este capítulo se describe el programa experimental que se ha desarrollado para la realización de la presente tesis doctoral. En primer lugar, se definen los parámetros de estudio y su rango de variación, a continuación se caracterizan los materiales empleados para la realización de los ensayos, informando sobre sus características, y finalmente se realiza una descripción de todas las etapas para la realización del ensayo, desde el diseño del pórtico de carga y de las piezas utilizadas hasta la finalización del ensayo, haciendo una descripción detallada de cada etapa del procedimiento de ensayo.

4.1. Definición de los parámetros de estudio a considerar en la experimentación y su rango de variación

4.1.1. Análisis previo mediante la utilización de un modelo numérico

Para la propuesta de ensayos y el análisis de los resultados obtenidos en el programa experimental resulta de gran ayuda la utilización de un modelo numérico que sirva tanto para la interpretación de los resultados, como para la generalización de los mismos.

Con el objetivo de estudiar el comportamiento de los soportes ejecutados en el programa experimental se ha utilizado el modelo de análisis propuesto por Bonet (2001) [12]. Una descripción más detallada de las características de este modelo numérico se encuentra en el Capítulo 6 de este trabajo.

Se ha realizado una simulación numérica previa al análisis experimental para determinar los parámetros más importantes que influyen en la obtención del coeficiente de equivalencia C_m en el caso de soportes sometidos a flexo-compresión con excentricidades distintas en extremos.

En la tabla 4.1 se muestra los parámetros analizados y sus intervalos de variación. Se consideró fijo el tamaño y la forma de la sección transversal (cuadrada de 300 x 300 mm), el límite elástico del acero ($f_y = 500$ MPa) y el recubrimiento mecánico de las armaduras longitudinales (10% del canto) por considerarse en estudios previos (Bonet (2001) [12]) variables poco significativas desde el punto de vista de la evolución del coeficiente C_m . Se realizaron aproximadamente 1100 ensayos numéricos.

Parámetros	Valores considerados
Relación de excentricidades ($\beta = e_1/e_2$)	• -1,-0.5,0,0.5,1
Esbeltez geométrica del soporte ($\lambda_g=l_p/h$)	• 10, 20, 30
Distribución de la armadura	• En las cuatro esquinas y en las cuatro caras.
Tipología estructural	• Soporte aislado biapoyado
Esfuerzo axil	• Se divide como mínimo en diez niveles de axil definidos entre el axil nulo y el axil de agotamiento a compresión simple o el axil crítico del soporte
Resistencia del hormigón (f_c)	• 30, 60 y 90 MPa
Cuantía mecánica de armadura (ω)	• 0.06, 0.25, 0.50 y 0.75

Tabla 4.1. Rango de variación de los parámetros analizados.

El comportamiento hasta la rotura de los soportes es función de sus características geométricas (esbeltez y condiciones de vinculación) y mecánicas (resistencia del hormigón y resistencia, cuantía longitudinal y transversal de la armadura) y, de las acciones a las que están sometidos (flexión y carga axial).

Del análisis pormenorizado de los distintos ensayos numéricos se obtienen que el factor C_m en flexo-compresión recta está influenciado por el nivel de axil, la esbeltez y la relación entre excentricidades en extremos (β). Además, depende de la cuantía de armadura y de la resistencia del hormigón.

Los parámetros fundamentales que influyen en el comportamiento bajo cargas instantáneas de los soportes esbeltos sometidos a flexo-compresión esviada son, entre otros: la esbeltez, las excentricidades relativas, el ángulo de esviaje, el esfuerzo axil aplicado en los extremos, la resistencia del hormigón, la forma de la sección y la cuantía geométrica y disposición de la armadura longitudinal.

Además, utilizando el modelo numérico, se ha podido representar los posibles comportamientos de los soportes que serían ensayados en el programa experimental, tales como las cargas máximas alcanzadas y las deformadas a lo largo de la longitud del soporte. Esta simulación ha sido importante a la hora de definir las secciones que serían instrumentadas tanto con bandas extensométricas como con captadores de desplazamiento y para poder prever aproximadamente la carga máxima alcanzada en cada caso, teniendo en cuenta la limitación impuesta por el pórtico de carga utilizado en los ensayos y los desplazamiento máximos de los captadores de desplazamientos. De esta manera se ha podido definir el rango de variación de los parámetros estudiados, tales como las dimensiones de las secciones transversales consideradas, la esbeltez de la pieza, la cuantía de armadura longitudinal, la resistencia del hormigón, entre otras, que se definen a continuación en el apartado 4.1.2. Los ensayos han sido escogidos de tal manera que la sección de rotura se encontrase en el tercio central del soporte, para evitar una rotura por comportamiento seccional en extremos del soporte.

En la figura 4.1 se representa un ejemplo de los resultados obtenidos con la simulación numérica en donde se puede observar el diagrama carga flecha (a) y la deformada del soporte para el instante de carga máxima (b). Como los soportes ensayados durante la realización del presente trabajo están sometidos a excentricidades desiguales en cada extremo, la determinación de la sección crítica en cada caso no se da de manera directa. Por ello, con la ayuda de la simulación numérica, se ha podido definir las posiciones adecuadas para la colocación de la instrumentación (bandas extensométricas y captadores de desplazamientos) (figura 4.1.b) con la finalidad de poder representar correctamente el comportamiento del soporte tras la finalización del ensayo y definir a partir de los registros de los elementos de instrumentación la sección crítica del soporte para cada instante de carga durante en ensayo.

Las posiciones exactas de los elementos de instrumentación se definen a continuación en el apartado 4.3.1.h de este trabajo

En definitiva, durante el período de ejecución del presente trabajo, se ha hecho uso de un modelo numérico de elementos finitos capaz de reproducir adecuadamente los

ensayos de laboratorio realizados. El modelo se ha utilizado para realizar un análisis previo de los parámetros más importantes que deberían analizarse desde el punto de vista experimental, servir de apoyo para establecer el programa de ensayos, ayudar a la interpretación de los resultados experimentales y a la extrapolación de los mismos.

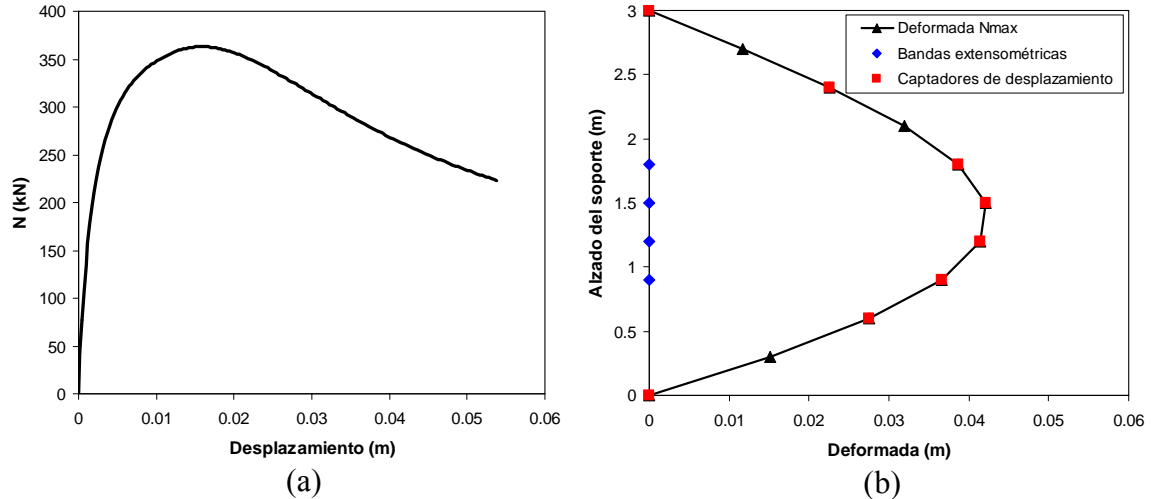


Figura 4.1. Ejemplo de resultado de la simulación numérica previa:
a. Carga \times desplazamiento; b. Deformada en situación de carga máxima.

4.1.2. Definición de los valores concretos de cada parámetro analizado en el programa experimental

En este apartado se describen los parámetros de estudio y variables considerados en el programa experimental para la realización de la campaña de ensayos. En el programa experimental se pretende obtener la comprobación del comportamiento de soportes esbeltos de hormigón convencional (HC) y de alta resistencia (HAR) sometidos a flexo-compresión con excentricidades y ángulos de esviaje distintos en sus extremos, dado los vacíos existentes en el estado actual del conocimiento para este tipo de situación.

La definición de los parámetros se basa en los resultados numéricos mencionados en el apartado anterior, y en la experiencia acumulada durante el desarrollo del proyecto de investigación HAR-SOPEX (MAT2002-02461), así como la limitación del propio laboratorio de ensayos y del número total de ensayos que es factible realizar en el período de ejecución del trabajo.

A continuación se hace un listado de los parámetros objeto de ensayo considerados en el programa experimental.

Resistencia del hormigón (f_c): en el programa experimental se han utilizado dos tipos de hormigón, un hormigón convencional con resistencia media de 30.5 MPa y un hormigón de alta resistencia de 89.8 MPa de resistencia media a compresión. Las resistencias son obtenidas a 28 días en probetas cilíndricas de acompañamiento de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura según la normativa UNE-EN 12390-3 [69].

Sección transversal del soporte (h × b): en los ensayos a flexo-compresión recta se han analizado soportes con secciones transversales de 100 × 200 mm y 150 × 200 mm, siempre tomando como eje de flexión el eje débil de la sección, paralelo a la mayor dimensión de la misma. En los ensayos a flexo-compresión esviada todos los soportes tenían una sección transversal cuadrada de 125 × 125 mm.

Cuantía geométrica de armadura longitudinal (ρ_l): en los soportes sometidos a esfuerzos de flexo-compresión recta se han dispuesto barras de acero corrugadas de 12 mm de diámetro como armadura longitudinal. Los soportes con sección transversal de 100 × 200 mm poseían dos configuraciones de armadura distintas. Una configuración con 4 barras dispuestas en las cuatro esquinas, que corresponde a una cuantía de armadura longitudinal de 2.26%, y una configuración con 6 barras que corresponde a una cuantía de 3.39%. En los pilares con sección transversal de 150 × 200 mm se han dispuesto 6 barras que corresponden a una cuantía de armadura longitudinal de 2.26%.

En los soportes sometidos a flexo-compresión esviada (125 × 125 mm) se han dispuesto 4 barras de acero, una en cada esquina, de diámetro 10 mm, que corresponde a una cuantía de armadura longitudinal de 2.01%.

En todos los casos, la cuantía geométrica de armadura longitudinal estaba en el rango utilizado en el campo de la edificación o la obra civil.

La cuantía de armadura longitudinal se obtiene como se indica en la expresión 4.1.

$$\rho_l = \frac{A_s}{A_c} \quad 4.1$$

donde: A_s = Área total de la armadura longitudinal;

A_c = Área de la sección transversal de la pieza.

Como armadura transversal, en los soportes sometidos a esfuerzos de flexo-compresión recta, se han dispuesto barras de 4 mm de diámetro separadas cada 0.15 m en la zona central del soporte, que corresponde a una cuantía volumétrica de confinamiento (W) de 0.26% para los soportes con sección transversal de 100 × 200 mm, y de 0.32% para los soportes con 150 × 200 mm de sección transversal. La cuantía volumétrica de confinamiento es calculada según la expresión 4.2.

$$W = \frac{W_{sc}}{W_c} = \frac{\sum A_{s1} \cdot l_1}{A_{sc} \cdot s_t} \quad 4.2$$

donde: A_{s1} = Área de la sección transversal del estribo;

l_1 = Longitud del estribo;

A_{sc} = Área del hormigón confinado;

s_t = Separación entre estribos.

En los soportes sometidos a esfuerzos de flexo-compresión esviada con sección transversal de 125×125 mm, como armadura transversal, se han dispuesto estribos de 5 mm de diámetro separados 0.15 m entre sí. Se ha modificado el diámetro de la armadura transversal de 4 mm a 5 mm debido a problemas de suministro durante la realización del proyecto. Esta configuración de armadura transversal corresponde a una cuantía volumétrica de confinamiento de 0.60%, lo que no supone una modificación sustancial del efecto de esta variable.

Puesto que todos los soportes ensayados poseían una cuantía volumétrica de confinamiento (W) por debajo del 1%, el efecto del confinamiento es despreciable (Yazzar (2000) [71]).

En los extremos de cada soporte, y a lo largo de una longitud de 0.15 m se aproximan más los estribos entre sí, tal y como se muestra en la figura 4.2, con el fin de crear zonas con una mayor capacidad resistente y de soportar en esta zona el incremento de tensiones derivadas del sistema de aplicación de la carga

Esbeltez de la pieza: la esbeltez geométrica (λ_g) se define como la relación entre la longitud de la pieza y la dimensión de la sección transversal en la dirección considerada. Se ha decidido fijar la altura de los soportes en 3 m y variar la sección transversal para obtener la variación de la esbeltez, ya que la maniobra de modificación de la altura del pórtico de carga es excesivamente compleja y costosa.

En los soportes sometidos a flexo-compresión recta, la flexión se hacía respecto al eje débil de la sección, paralelo a la mayor dimensión de la misma, con lo cual, la esbeltez geométrica de las piezas consideradas para dicho eje han sido de 20 y 30 para los soportes con sección transversal de 150×200 mm y 100×200 mm respectivamente.

Los soportes sometidos a esfuerzos de flexo-compresión esviada poseían sección transversal cuadrada de dimensiones 125×125 mm, lo que corresponde a una esbeltez geométrica de $\lambda_g = 24$. En todos los casos, el rango de esbeltez utilizado (entre 20 y 30) es muy habitual en edificación.

Se ha decidido ensayar estos valores de esbeltez geométrica para que se alcance la rotura del soporte en una sección intermedia, evitando la rotura en los extremos, lo que ha sido analizado en los ensayos numéricos previos realizados.

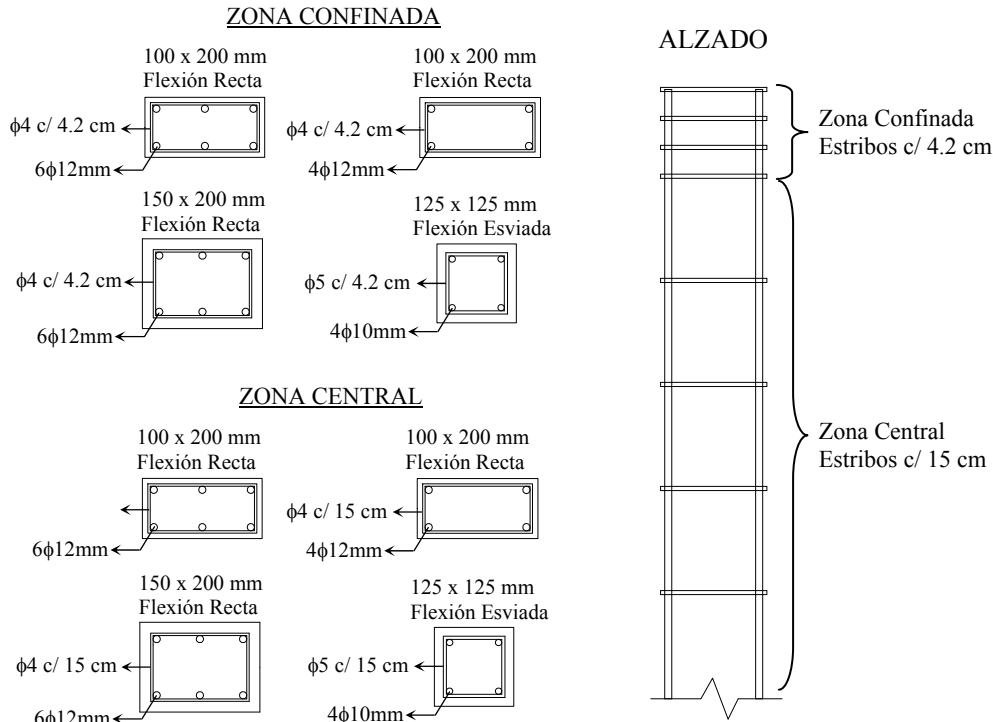


Figura 4.2. Croquis de la sección transversal de los soportes en la zona central y en la zona confinada y alzado de la ferralla.

La esbeltez mecánica de la pieza (λ_m) está definida como la relación entre la longitud del soporte y el radio de giro de la sección transversal en la dirección de flexión considerada. Las esbelteces geométrica y mecánica se calculan como se muestra en las expresiones 4.3 a 4.5. En la tabla 4.2, se presentan las esbelteces consideradas en el presente trabajo.

$$\lambda_g = \frac{l}{h} \quad 4.3$$

$$i = \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{12}\right) \cdot b \cdot h^3}{b \cdot h}}; i = \frac{h}{\sqrt{12}} \quad 4.4$$

$$\lambda_m = \frac{l}{i} = \lambda_g \cdot \sqrt{12} \quad 4.5$$

donde:

l = longitud de la pieza;

h = dimensión de la sección transversal en la dirección de flexión considerada;

b = dimensión de la sección en la dirección perpendicular a la de flexión considerada;

i = radio de giro de la sección en la dirección de considerada.

Tipo de flexión	Sección Transversal (mm)	l (m)	λ_g	λ_m
Recta	100 x 200	3	30	103.9
Recta	150 x 200	3	20	69.3
Esviada	125 x 125	3	24	83.1

Tabla 4.2. Esbeltez geométrica y mecánica para las distintas secciones transversales de los soportes considerados en el presente trabajo.

Relación entre excentricidades (β): la relación entre excentricidades consiste en la relación entre la excentricidad superior y la excentricidad inferior (e_1/e_2) de los soportes ensayados. En el programa experimental se analizan soportes con relaciones entre excentricidades (β) de 0.5, 0 y -0.5.

Excentricidad relativa (e_2/h): es la razón entre la mayor excentricidad aplicada en el extremo del soporte (e_2) por la altura (h) de la sección transversal en el plano de flexión considerado.

En el programa experimental se toman los valores de 0.1, 0.2 y 0.4 como excentricidades relativas. Con estos valores y con los valores de la relación entre excentricidades (β) se obtienen los valores de excentricidades (e_1 y e_2) para cada ensayo realizado, siendo:

- e_2 el módulo de la excentricidad de primer orden en el extremo del soporte de mayor valor, considerada positiva;
- e_1 el módulo de la excentricidad de primer orden en el extremo del soporte de menor valor, positiva si tiene el mismo signo que e_2 ;
- h el canto de la sección en el plano de flexión considerado.

Ángulo de esviaje (α): en el programa experimental los ángulos de esviaje superior (α_1) e inferior (α_2) eran de 0° , 22.5° y 45° de acuerdo con las características de cada serie de soportes ensayados. En flexo-compresión recta se han tomado $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$; en flexo-compresión esviada con ángulos de esviaje iguales en extremos se han tomado $\alpha_1 = \alpha_2 = 22.5^\circ$; y en los ensayos a flexo-compresión esviada con ángulos distintos en extremos se han tomado valores de $\alpha_1 \neq \alpha_2$ ($0^\circ/22.5^\circ$, $0^\circ/45^\circ$, $22.5^\circ/45^\circ$).

Recubrimiento relativo (r_{mec}/h): para todos los ensayos del programa experimental el recubrimiento relativo (r_{mec}/h) ha sido de 0.19. Este parámetro se caracteriza por la importancia a la hora de comparar los resultados obtenidos con los disponibles en la literatura técnica.

4.1.3. Ensayos realizados

El programa experimental de los ensayos realizados se muestra en la tabla 4.3 y en la tabla 4.4, en las que se indican las características concretas de cada uno de los ensayos agrupados por series.

Serie	Soporte	f_c (MPa)	ρ_1 (%)	λ_g	β (e_1/e_2)	e_2/h	α_1 (°)	α_2 (°)
A1	S01-A1	90	2.26	30	-0.5	0.1	0	0
	S02-A1	90	2.26	30	-0.5	0.2		
	S03-A1	90	2.26	30	-0.5	0.4		
	S04-A1	90	2.26	30	0	0.1		
	S05-A1	90	2.26	20	0	0.1		
	S06-A1	90	2.26	20	0	0.2		
	S07-A1	90	2.26	30	0	0.2		
	S08-A1	90	2.26	30	0	0.4		
	S09-A1	90	2.26	30	0.5	0.2		
	S10-A1	90	2.26	30	0.5	0.4		
	S11-A1	90	2.26	20	0.5	0.2		
	S12-A1	90	2.26	20	0.5	0.4		
A2	S01-A2	30	2.26	30	0	0.1	0	0
	S02-A2	30	2.26	30	0	0.2		
	S03-A2	30	2.26	30	0	0.4		
	S04-A2	30	2.26	30	-0.5	0.1		
	S05-A2	30	2.26	30	-0.5	0.2		
	S06-A2	30	2.26	30	-0.5	0.4		
	S07-A2	30	2.26	20	0	0.1		
	S08-A2	30	2.26	20	0	0.2		
A3	S01-A3	90	3.39	30	0	0.1	0	0
	S02-A3	90	3.39	30	0	0.2		
	S03-A3	90	3.39	30	0	0.4		
	S04-A3	90	3.39	30	-0.5	0.1		
	S05-A3	90	3.39	30	-0.5	0.2		
	S06-A3	90	3.39	30	-0.5	0.4		
A4	S01-A4	30	3.39	30	0	0.1	0	0
	S02-A4	30	3.39	30	0	0.2		
	S03-A4	30	3.39	30	0	0.4		
	S04-A4	30	3.39	30	-0.5	0.1		
	S05-A4	30	3.39	30	-0.5	0.2		
	S06-A4	30	3.39	30	-0.5	0.4		

Tabla 4.3. Programa experimental de ensayos ejecutados (flexo-compresión recta).

Serie	Soporte	f_c (MPa)	ρ_l (%)	λ_g	β (e_1/e_2)	e_2/h	α_1 (°)	α_2 (°)
B1	S01-B1	90	2.01	24	0	0.1	22.5	22.5
	S02-B1	90	2.01	24	0	0.2		
	S03-B1	90	2.01	24	0	0.4		
	S04-B1	90	2.01	24	0.5	0.2		
	S05-B1	90	2.01	24	0.5	0.4		
	S06-B1	90	2.01	24	-0.5	0.1		
	S07-B1	90	2.01	24	-0.5	0.2		
	S08-B1	90	2.01	24	0.5	0.1		
B2	S02-B2	30	2.01	24	0	0.2	22.5	22.5
	S03-B2	30	2.01	24	0	0.4		
	S04-B2	30	2.01	24	0.5	0.4		
	S05-B2	30	2.01	24	0.5	0.2		
C1	S01-C1	90	2.01	24	0.5	0.2	0	22.5
	S02-C1	90	2.01	24	0.5	0.4		
	S03-C1	90	2.01	24	-0.5	0.1		
	S04-C1	90	2.01	24	-0.5	0.2		
C2	S02-C2	90	2.01	24	0.5	0.4	0	45
	S03-C2	90	2.01	24	0	0.1		
	S04-C2	90	2.01	24	0	0.2		
	S05-C2	90	2.01	24	0	0.4		
	S06-C2	90	2.01	24	-0.5	0.1		
	S07-C2	90	2.01	24	0.5	0.1		
C3	S01-C3	90	2.01	24	0.5	0.2	22.5	45
	S02-C3	90	2.01	24	0.5	0.4		
	S03-C3	90	2.01	24	-0.5	0.1		
	S04-C3	90	2.01	24	0.5	0.1		
C4	S01-C4	30	2.01	24	0.5	0.1	0	22.5
	S02-C4	30	2.01	24	0.5	0.2		
C5	S01-C5	30	2.01	24	0	0.1	0	45
	S02-C5	30	2.01	24	0	0.2		
	S03-C5	30	2.01	24	0	0.4		
	S04-C5	30	2.01	24	-0.5	0.1		
	S05-C5	30	2.01	24	0.5	0.1		
C6	S01-C6	30	2.01	24	0.5	0.1	22.5	45
	S02-C6	30	2.01	24	0.5	0.2		
	S03-C6	30	2.01	24	-0.5	0.2		

Tabla 4.4. Programa experimental de ensayos ejecutados (flexo-compresión esviada).

En la tabla 4.3 se muestran las series de soportes sometidos a una sollicitación de flexo-compresión recta (32 soportes) con excentricidades distintas en extremos tanto de hormigón convencional como de alta resistencia, y en la tabla 4.4 se muestran las series

de soportes solicitados a flexo-compresión esviada (12 soportes) sometidos a excentricidades diferentes en extremos y ángulo de esviaje iguales ($22.5^\circ/22.5^\circ$) y las series de soportes solicitados a flexión esviada (24 soportes) sometidos a excentricidades y ángulos de esviaje diferentes en extremos ($0^\circ/22.5^\circ$, $0^\circ/45^\circ$ y $22.5^\circ/45^\circ$) fabricados tanto con hormigón convencional como de alta resistencia.

Para la puesta a punto del ensayo, además de los soportes relacionados en la tabla 4.3 y en la tabla 4.4, se han ensayado 3 prototipos, 2 sometidos a esfuerzos de flexo-compresión recta y 1 sometido a esfuerzos de flexo-compresión esviada para comprobar la bondad del diseño del ensayo y del sistema de aplicación de carga.

Además, hubo la necesidad de repetir 6 ensayos. Un soporte sometido a flexo-compresión recta debido a una excesiva velocidad de aplicación de la carga, y 6 soportes sometidos a flexo-compresión esviada, por problemas de tolerancia geométrica debido a la pequeña excentricidad aplicada ($e_2/h = 0.1$) combinada con pequeños ángulos de esviaje ($22.5^\circ/22.5^\circ$, $0^\circ/22.5^\circ$). En total, durante en el programa experimental se fabricaron 78 soportes.

4.2. Caracterización de los materiales

En este apartado se describen los materiales que se han empleado a lo largo del desarrollo del programa experimental. Los materiales básicos empleados para la fabricación de los soportes fueron: hormigón convencional (HC) y de alta resistencia (HAR) y acero corrugado para armar. Además, se utilizó acero mecanizado para la elaboración de las piezas auxiliares utilizadas en el proceso de ensayo.

4.2.1. Hormigón

Como se ha señalado anteriormente en este trabajo, se ha utilizado dos tipos de hormigón, uno convencional con resistencia media de 30.50 MPa y otro de alta resistencia con resistencia media de 89.44 MPa, ambas medidas a 28 días en probetas cilíndricas mediante el proceso definido en la norma UNE-EN 12390-3 [69]. Para ello se han utilizado dosificaciones sancionadas por la experiencia en trabajos de investigación desarrollados previamente en el Departamento de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de Ingeniería Civil de la Universitat Politècnica de València (Barrera (2005) [10]). Se han realizado ensayos previos de caracterización para confirmar o ajustar dichas dosificaciones a las necesidades del nuevo trabajo.

Para la fabricación de los hormigones correspondientes a este estudio se han utilizado los siguientes materiales:

Cemento: CEM I 52.5 R – Cemento ASLAND LAFARGE – Sagunto;

Áridos: Grava 4/7 caliza machacada – SOINVAL;

Arena 0/4 caliza, rodada lavada (Graveras Castellanas);

Adiciones: Humo de sílice densificado, FERROATLANTICA;
(Utilizado para la fabricación del HAR);

Aditivos: Para el HAR se han utilizado dos tipos de aditivos, un plastificante polifuncional a base de lignosulfanatos de última generación: BASF - Pozzolith 651N, y un superplastificante a base de éteres policarboxílicos de última generación: BASF - Glenium C355.

El módulo granulométrico de la grava era de 6.01 y el de la arena de 2.82. La dimensión máxima del árido estaba limitada por el recubrimiento a disponer entre la armadura longitudinal y el encofrado de cada soporte. Los dos tipos de hormigón eran de consistencia fluida.

El hormigón de alta resistencia debido a la baja relación agua/cemento (0.32), después de añadida el agua, muestra un aspecto terroso, sin ninguna cohesión. Por esa razón se han utilizado dos aditivos, un superplastificante, Glenium C355, de la marca comercial BASF que confiere a la mezcla un buen grado de viscosidad, y un plastificante, Pozzolith 651N, de la misma marca, que mejora la trabajabilidad del hormigón.

En la tabla 4.5 se presenta las dosificaciones para obtener un metro cúbico para cada tipo de hormigón empleado en el programa experimental.

Tipo de hormigón	Cemento	Agua	Arena	Grava	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
HC	348	220	1065	666	-	-	-
HAR	570	180	705	890	50	5.8	11.8

Tabla 4.5. Dosificación de los hormigones utilizados en kg/m^3 .

El módulo de elasticidad de cada hormigón analizado se ha medido según lo indicado en la normativa UNE-EN 83316 [65] y el procedimiento operativo para la obtención del mismo, bien como los valores obtenidos para cada tipo de hormigón se encuentran en el Anejo C de este trabajo.

4.2.2. Acero

Se ha utilizado acero corrugado de calidad B 500 SD, según la EHE-08 [23]. Se han empleado barras de diámetro de 10 y 12 mm como armadura longitudinal y barras de diámetro 4 y 5 mm como estribos. Además se han utilizado barras de diámetro 16 mm y 330 mm de longitud a las que se mecanizó una rosca de diámetro de 14 mm en una longitud de 70 mm como se muestra en la figura 4.3. Esta rosca servirá para su

anclaje al sistema de aplicación de carga, que se describirá en el apartado 4.3 de este capítulo.



Figura 4.3. Barras roscadas de diámetro 16 mm, con rosca de métrica 14 y 70 mm de longitud.

Del control de calidad de la armadura longitudinal se han obtenido los resultados mostrados en la tabla 4.6.

El lote 1 corresponde al acero empleado en los soportes sometidos a esfuerzos de flexo-compresión recta con sección transversal de 100 × 200 mm, el lote 2 a los soportes de 150 × 200 mm de sección transversal sometidos a esfuerzos de flexo-compresión recta, y el lote 3 a los soportes sometidos a esfuerzos de flexo-compresión esviada con sección transversal de 125 × 125 mm.

	Lote		
	1	2	3
Diámetro nominal (mm)	12	12	10
Límite elástico f_y (MPa)	538	530	503
ϵ_y (mm/mm)	0.0028	0.0027	0.0028
ϵ_{sh} (mm/mm)	0.0332	0.0328	0.0325
Resistencia a tracción f_t (MPa)	640	637	633
Relación f_t/f_y	1.19	1.20	1.26
ϵ_u (mm/mm)	0.18	0.201	0.201

Tabla 4.6. Control de calidad del acero.

En la figura 4.4 se muestran los resultados obtenidos del control de calidad de los aceros utilizados (UNE EN-10002-1 [66]). En todos los casos, el módulo de deformación del acero ha sido de 200000 MPa según UNE EN-10002-1 [66].

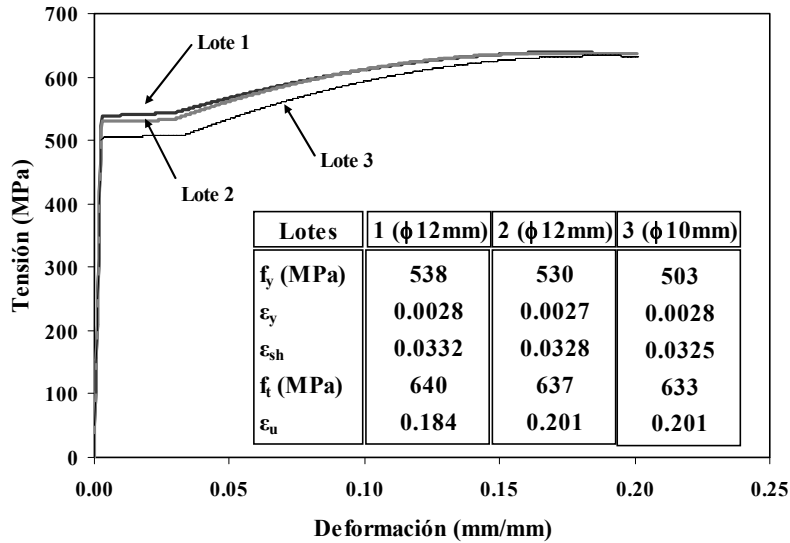


Figura 4.4. Diagrama tensión – deformación del acero.

4.3. Diseño del ensayo

En este apartado se lleva a cabo una descripción detallada del diseño del ensayo adoptado en este trabajo, con la caracterización de las piezas que componen dicho diseño.

Los requisitos que se han tenido en cuenta para el diseño del ensayo han sido:

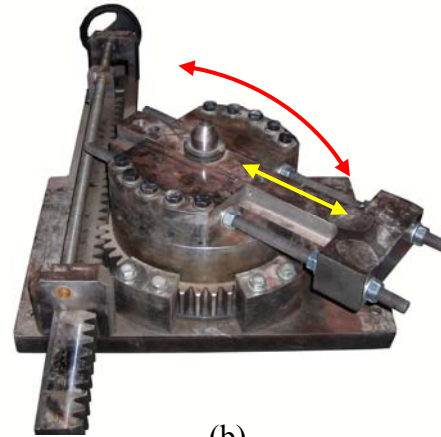
- Contemplar la posibilidad de ensayar soportes con distintas excentricidades y distintos ángulos de esviaje en cada extremo, generando las situaciones de flexo-compresión recta o esviada;
- Las condiciones de contorno aplicables al soporte en los extremos son de tipo articulación;
- Se debe poder predecir las secciones más desfavorables con el fin de orientar la instrumentación en las secciones convenientes;
- Se debe poder medir las deformaciones en el hormigón y en el acero en las secciones instrumentadas, bien como la flecha para distintos niveles de carga en diferentes secciones a lo largo de la longitud de la pieza;
- Tras el ensayo se debe poder reproducir el comportamiento del soporte durante el ensayo;
- El montaje del ensayo debe requerir la menor cantidad posible de recursos humanos y materiales;
- Se debe garantizar la seguridad del ensayo.

El pórtico utilizado en los ensayos (figura 4.5.a) fue inicialmente diseñado en un proyecto de investigación del Departamento de Ingeniería de la Construcción y de

Proyectos de Ingeniería Civil de la Universitat Politècnica de València (Yazzar (2000) [71]). Sobre dicho pórtico se ejecutaron los ensayos del proyecto de investigación MAT2002-02461 (Pallarés (2006) [47]) para soportes sometidos a esfuerzos de flexión esviada con excentricidad y ángulos de esviaje iguales en los extremos. Para la realización de ensayos de soportes sometidos a excentricidades distintas en magnitud, dirección y sentido se han tenido que realizar algunas modificaciones para la adecuación del mismo a los nuevos parámetros de estudio.



(a)



(b)

Figura 4.5.a. Pórtico de ensayo; b. Sistema de aplicación de cargas: dispositivo móvil.

Para aplicar excentricidades con magnitud y dirección diferentes en extremos, el grupo investigador perteneciente al proyecto de investigación BIA2006-06429, ha diseñado un dispositivo móvil (figura 4.5.b), de forma que el soporte y el actuador vertical se quedan orientados en posición completamente vertical. Sin embargo, la diferente excentricidad aplicada en los extremos del soporte genera una línea de carga inclinada y, por consiguiente, unos esfuerzos horizontales que se transmiten al pórtico de carga.

En la figura 4.6 se muestran las placas que constituyen el sistema de aplicación de carga. La variación del ángulo de esviaje se lleva a cabo girando la placa de excentricidad (1) sobre la placa de anclaje (2), dicha placa se fija mediante tornillos. Por otra parte, la variación de excentricidades se consigue acoplando el sistema cono-placa (3) a diferentes distancias sobre la placa de excentricidad (1).

El sistema de placas adoptado para la aplicación de la carga, consiste en dos placas que se posicionan en cada extremo del soporte tal y como se muestra en la figura 4.7.

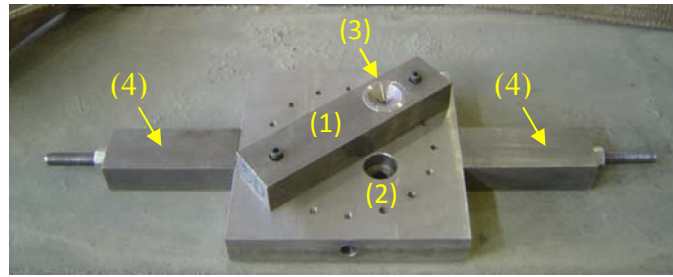


Figura 4.6. Placas del sistema de aplicación de cargas.

La primera de las placas, placa de anclaje (placa 2 en la figura 4.6 y en la figura 4.7.b), se une al soporte mediante tuercas que se atornillan a las barras roscadas de acero que han sido previamente soldadas a la armadura longitudinal del pilar. Sobre dicha placa se atornilla la placa de excentricidad (placa 1 en la figura 4.6 y en la figura 4.7.b), que define la posición exacta del punto de aplicación de carga con la ubicación del receptor del cono (figura 4.7.a). Este sistema permite asegurar el anclaje de la armadura del soporte a la placa 2 para transmitir las tracciones generadas por flexión en las mismas al aplicar la carga.

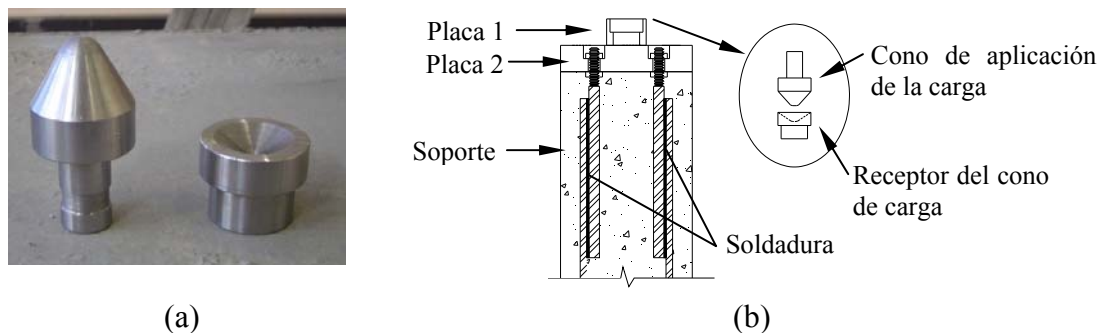
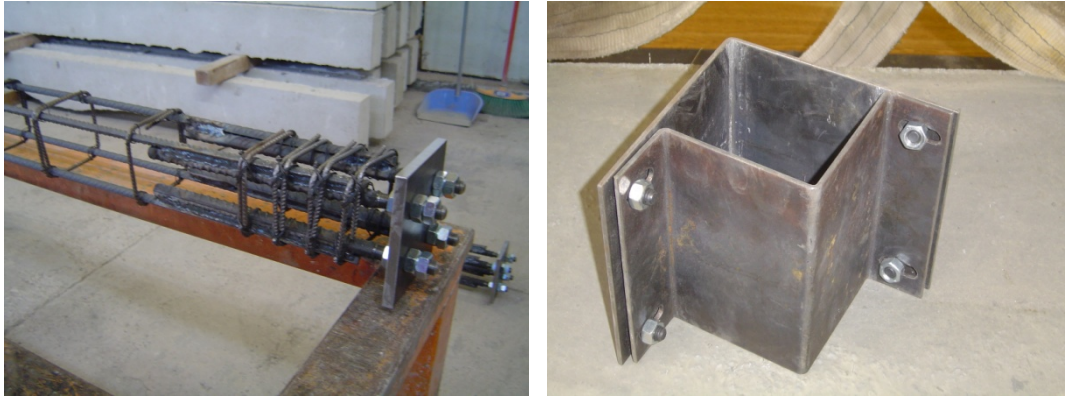


Figura 4.7. Sistema de aplicación de cargas.

Para poder ubicar el soporte en el pórtico de ensayo, es necesario sujetarlo en posición vertical con ayuda de una carretilla elevadora. A la placa de anclaje del extremo superior del soporte se atornilla dos placas metálicas, tal y como se indica en la figura 4.6 (4), consiguiendo así tener zonas desde las que colgar el pilar durante el proceso de izado del mismo.

Durante el desarrollo del proyecto de investigación MAT2002-02461, se realizaron ensayos previos con el fin de chequear la bondad del diseño elegido. A raíz de dichos ensayos previos se observó que si la sollicitación aplicada en el soporte corresponde a un esfuerzo de compresión compuesta se produce una rotura frágil en la cabeza del pilar, debida a la excesiva concentración de tensiones de compresión. Para solucionar ese problema, además de poner más estribos en los extremos de la ferralla (figura 4.8.a), se ha procedido al zunchado exterior de la cabeza de los soportes mediante placas de 4 mm de espesor (figura 4.8.b).



(a)

(b)

Figura 4.8.a. Detalle de los extremos del soporte; b. Zuncho para evitar la rotura frágil.

Para la puesta a punto del ensayo, sistema de aplicación de la carga e instrumentación, se han ensayado 3 prototipos, 2 sometidos a esfuerzos de flexo-compresión recta y 1 a esfuerzos de flexo compresión esviada y todos con excentricidades desiguales en extremos, comprobando la bondad del diseño para ensayar los pilares bajo estos tipos de sollicitaciones.

A continuación se describe el procedimiento de ensayo con sus distintas etapas, desde la preparación de la armadura hasta la finalización del ensayo.

4.3.1. Procedimiento de ensayo

El procedimiento de ensayo comprende las distintas etapas enumeradas a continuación:

- a) Preparación de la armadura;
- b) Preparación del encofrado;
- c) Hormigonado del soporte y de las probetas de control;
- d) Desmoldeo;
- e) Preparación del soporte a ser ensayado;
- f) Preparación del pórtico de ensayo;
- g) Posicionamiento del soporte en el pórtico de ensayo;
- h) Instrumentación;
- i) Rotura de las probetas de control;
- j) Configuración del ensayo en el programa de adquisición de datos;
- k) Inicio del ensayo;
- l) Finalización del ensayo;

A continuación se explica de forma detallada las operaciones que componen las distintas etapas.

4.3.1.a. Preparación de la armadura

El proceso de montaje de un soporte empieza por el encargo de la armadura de fábrica. Un esquema de las configuraciones de armado utilizadas en este trabajo se indica en la figura 4.9.

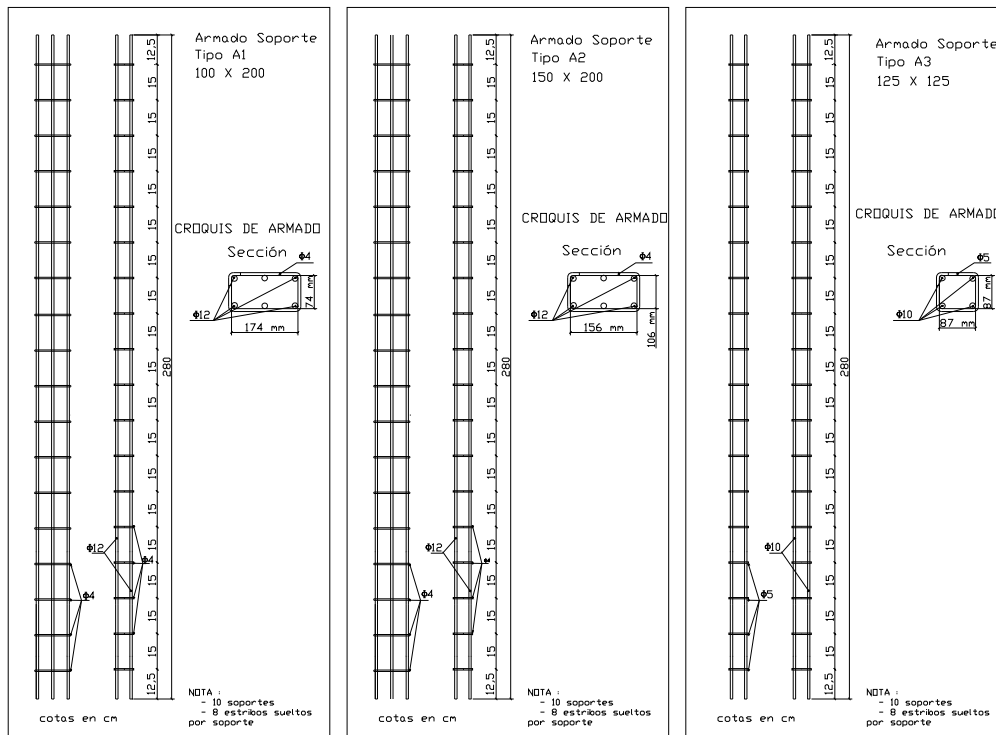


Figura 4.9. Croquis de armado para los soportes objeto de ensayo.

- Tipo A1 - soportes de sección transversal de 100×200 mm (flexión recta):
Armadura longitudinal: $6 \phi 12$ mm ($\rho_1 = 3.39\%$) ó $4 \phi 10$ mm ($\rho_1 = 2.26\%$).
Armadura transversal: estribos de diámetro $\phi 4$ mm cada 15 cm.
- Tipo A2 - soportes de sección transversal de 150×200 mm (flexión recta):
Armadura longitudinal: $6 \phi 12$ mm ($\rho_1 = 2.26\%$).
Armadura transversal: estribos de diámetro $\phi 4$ mm cada 15 cm.
- Tipo A3 - soportes de sección transversal de 125×125 mm (flexión esviada):
Armadura longitudinal: $4 \phi 10$ mm ($\rho_1 = 2.01\%$).
Armadura transversal: estribos de diámetro $\phi 5$ mm cada 15 cm.

Sobre los extremos de cada armadura se sueldan barras corrugadas de diámetro 16 mm y de 330 mm de longitud (figura 4.10.a), a las que se ha practicado una rosca de

métrica 14 en una longitud de 70 mm. Estas barras después del hormigonado de la pieza servirán como anclaje de las placas del sistema de aplicación de carga (figura 4.7.b).

En el extremo de la barra corrugada de diámetro 16 mm en cada extremo del pilar se coloca sendas placas auxiliares (figura 4.10.a y b) que a posteriori servirán como encofrado de la pieza en sus extremos. Como se muestra en la figura 4.10.a y b, las placas auxiliares son posicionadas con tuercas en la parte interior (2) (que se pierden tras el hormigonado) y en la parte exterior (3) (que se recuperan tras la retirada de las placas auxiliares con el pilar hormigonado).

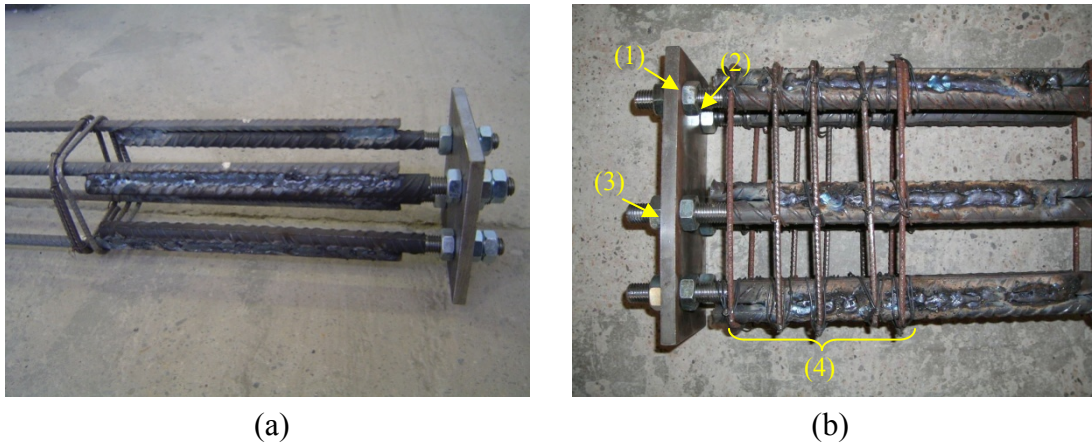


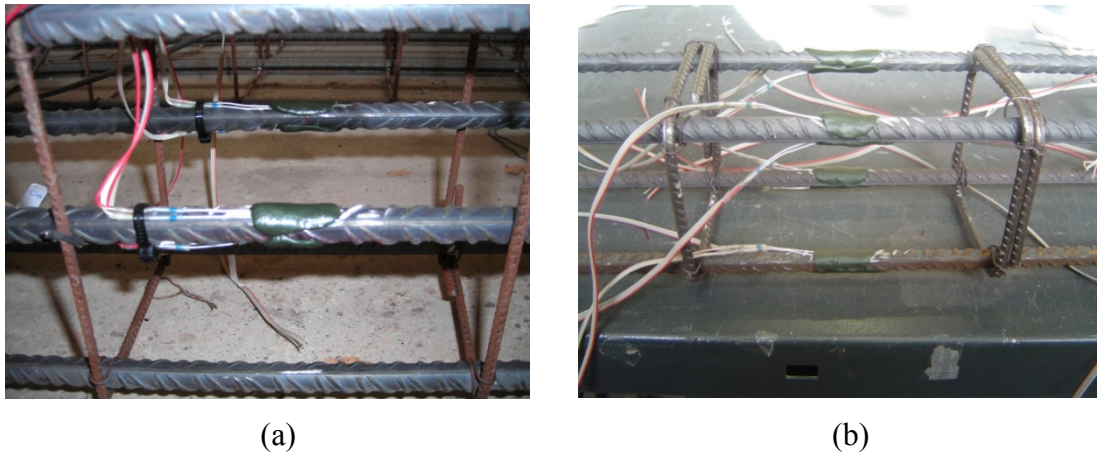
Figura 4.10.a. Barras roscadas soldadas a la armadura;
b. Estribos extras atados y placa auxiliar puesta en posición.

Después de soldadas las barras corrugadas de 330 mm de longitud se procede al atado de los estribos extras ((4) en la figura 4.10.b) en los extremos de la ferralla garantizando un buen confinamiento del hormigón en las cabezas del soporte. Dichos estribos deben tener un espaciado uniforme entre ellos y el último debe estar lo más próximo posible de la placa auxiliar con el fin de no dejar una longitud considerable sin armadura de confinamiento en esta zona.

Con los estribos extras atados, se debe fijar la distancia entre caras internas de las placas auxiliares en 2.86 metros que definirá la longitud final del soporte de 3 metros. Dicha distancia se deduce teniendo en cuenta que el cono de carga se introduce en el receptor 10 mm en cada extremo y el espesor de la placa de anclaje y de la placa de excentricidad en cada extremo es de 40 mm cada una. Puesto que el soporte está biarticulado, la longitud del soporte es la longitud de pandeo (distancia entre los puntos de momento flector nulo, es decir, entre las rótulas simuladas en el punto de contacto entre el cono y su receptor insertado sobre la placa de excentricidad).

Con las placas auxiliares en la posición correcta se marcan las distancias de las secciones que serán instrumentadas con las bandas extensométricas (definidas, a continuación, en el apartado 4.3.1.h) encargadas de medir la deformación en las barras de acero. Una vez marcadas las secciones de interés se procede al lijado de la superficie

en la cual se colocarán cada banda extensométrica. En los soportes con armadura transversal compuesta por seis barras sometidos a flexo-compresión recta se dispusieron dos bandas extensométricas diametralmente opuestas (figura 4.11.a) en cada sección instrumentada en la barra central de cada cara de la sección (dos bandas en la cara de compresión y dos bandas en la cara de tracción). Y en los soportes con cuatro barras sometidos a flexo-compresión recta o esviada se dispusieron dos bandas diametralmente opuestas en cada una de las cuatro barras de las secciones instrumentadas (figura 4.11.b).



*Figura 4.11.a. Disposición de bandas extensométricas en soportes con 6 redondos;
b. Soportes con 4 redondos.*

Se disponen dos bandas extensométricas diametralmente opuestas y de las que se obtiene la deformación longitudinal del eje de la misma como la media de las deformaciones registradas por cada una de las bandas.

Para el pegado de cada una de las bandas extensométricas se debe seguir el siguiente procedimiento (figura 4.12):

1. Quitar las corrugas de la barra en la región en la que se va a pegar la banda con una sierra de disco (comercial) en una longitud de 15 mm aproximadamente;
2. Alisar la zona con una lima para quitar las imperfecciones dejadas por la sierra de disco;
3. Limpiar la zona limada con acetona para que el pegamento suministrado por el fabricante se adhiera correctamente;
4. Aplicar una pequeña cantidad del pegamento sobre la banda extensométrica y colocarla sobre la superficie alisada en la misma dirección de la armadura longitudinal;
5. Aplicar una masilla protectora suministrada por el fabricante de las bandas extensométricas para protegerlas de las agresiones que puedan sufrir durante el transporte de la ferralla y el hormigonado del soporte;

6. Atar los cables de las dos bandas extensométricas de cada barra con abrazaderas de plástico para evitar posibles tirones durante el transporte de la ferralla y el hormigonado de la pieza;
7. Etiquetar cada banda extensométrica para la identificación de cada una tras el hormigonado de la pieza.



Figura 4.12. Procedimiento para el correcto pegado de las bandas extensométricas.

Una vez pegadas todas las bandas extensométricas, se disponen los separadores (figura 4.13.a) para asegurar que la armadura esté en posición recta a la hora de hormigonar la pieza, y garantizar principalmente los correctos recubrimientos geométricos en cada tipo de sección transversal a lo largo de la longitud del soporte. En los extremos de cada pilar las placas auxiliares definen el recubrimiento ya que poseen las dimensiones exactas de la sección transversal, sin embargo, debido a la gran longitud de la pieza, se ve necesaria la colocación de dichos separadores por lo menos en tres secciones igualmente espaciadas del soporte.



(a)



(b)

Figura 4.13.a. Detalle de los separadores colocados en la armadura;
b. Armaduras preparadas para el hormigonado.

4.3.1.b. Preparación del encofrado

Después de la preparación de la armadura, se procede a la preparación del encofrado para el hormigonado de la pieza. El encofrado está compuesto por una mesa vibrante y por dinteles que sirven para definir la sección transversal de cada pieza (figura 4.14). Antes de colocar la armadura en el encofrado se debe aplicar una camada de desencofrante en cada pieza del encofrado para facilitar a posteriori el desmoldeo del pilar. Una vez aplicada la camada de desencofrante, se monta el encofrado con las dimensiones correspondientes a la sección transversal del soporte que será fabricado (100 × 200 mm, 150 × 200 mm ó 125 × 125 mm).

Cuando la ferralla está ubicada en el encofrado se coloca un gato de apriete (1 en la figura 4.14) en cada extremo en las paredes de los dinteles del encofrado para garantizar de esta manera la correcta dimensión de la sección del soporte y evitar también la pérdida de hormigón durante el hormigonado de la pieza.

Con las operaciones descritas hasta el momento, la pieza se encuentra en condiciones de ser hormigonada.



Figura 4.14. Armadura en el encofrado auto-vibrante preparado para el hormigonado.

4.3.1.c. Hormigonado del soporte y de las probetas de control

En la etapa del hormigonado del soporte se pueden distinguir distintas fases, tales como la preparación de los materiales, el amasado de los mismos, la colocación del hormigón fresco en el encofrado, el vibrado y compactación del hormigón y la fabricación de las probetas de control. A continuación se describen detalladamente cada una de estas fases.

Preparación de los materiales: en esta fase se pesan los materiales utilizados: la arena, los áridos, el agua y el cemento para el hormigón convencional y de alta resistencia (figura 4.15.a), y el humo de sílice y los aditivos para el hormigón de alta resistencia. La arena y los áridos se conservan en habitación cerrada bajo condiciones estables de humedad y temperatura. La humedad de la arena se obtiene antes del amasado, mediante el secado de una muestra en estufa a 100°C durante 24 horas. La humedad se determina por diferencia entre los pesos de la muestra original y la secada

en estufa. La arena es cubierta con plástico durante el secado de la muestra para que conserve la humedad original. Con la humedad determinada, se corrige la cantidad de agua y arena a verter en la dosificación de manera que la relación entre la cantidad de agua y de cemento en la amasada sea de 0.63 para el hormigón convencional y de 0.32 para el hormigón de alta resistencia.

Amasado de los materiales: para mezclar los materiales utilizados en la fabricación del hormigón de cada soporte se utiliza una amasadora de eje vertical de 100 litros de capacidad (figura 4.15.b), de los cuales como máximo se pueden aprovechar 60 litros para garantizar una buena homogeneidad de la mezcla. Para cada pilar se fabrican también 2 probetas cilíndricas de control de 15 centímetros de diámetro por 30 centímetros de altura por amasada (10.5 litros), y sabiendo que el volumen de hormigón de los soportes de 100×200 mm, 150×200 mm y 125×125 mm de sección transversal es de 57.2, 85.8 y 44.7 litros respectivamente, es necesaria la realización de dos amasadas para fabricar cada soporte.

Con todos los materiales pesados se procede al vertido de los mismos en la amasadora siempre siguiendo el mismo orden: en primer lugar se vierte la arena y la grava, después de un minuto se vierte el cemento y el humo de sílice en el caso de ser hormigón de alta resistencia, pasado otro minuto se vierte el agua poco a poco durante un minuto y por último, después de dos minutos del vertido completo del agua, en el caso de se fabricar el hormigón de alta resistencia, se añaden los aditivos. Para un amasado óptimo, después de vertidos todos los materiales de la mezcla, son necesarios siete minutos antes de empezar a verter el hormigón del soporte y de las probetas de control.



(a)



(b)

Figura 4.15.a. Materiales separados para el inicio de las amasadas;
b. Amasadora de eje vertical.

Vertido, vibración y compactación del hormigón: una vez terminada la mezcla se procede al vertido del hormigón en el encofrado auto-vibrante. El hormigón de alta resistencia tiene la propiedad de ser tixotrópico, es decir, en estado de reposo es

especialmente consistente y la masa se endurece de tal manera que su trabajabilidad se hace muy difícil, sin embargo, frente a movimientos impuestos, la estructura del mismo se desordena resultando fluido otra vez. Con la finalidad de que el hormigón se mantenga en continuo movimiento aprovechando su propiedad tixotrópica, se utilizó una mesa vibrante (figura 4.14) que impone el vibrado externo de la pieza, desarrollada previamente en un trabajo de investigación del Departamento de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de Ingeniería de la Universitat Politècnica de València.

En la fabricación del soporte, en la primera amasada, se llena hasta la mitad el encofrado y se acciona los rotores de la mesa para la vibración y compactación del hormigón. Se procede entonces a la fabricación de las dos primeras probetas de control. Debido a la dificultad de compactación del hormigón de alta resistencia, en lugar de compactar las probetas de control en tres capas iguales con 25 golpes cada una, se llena la probeta en dos capas iguales y se compacta el hormigón en cada capa con aguja vibrante (UNE-EN-12390-2 [68]). Con ese procedimiento el hormigón de las probetas de control posee un aspecto similar al hormigón del soporte como se comprobó en los ensayos previos de caracterización.

Una vez terminada la fabricación de las dos primeras probetas de control (figura 4.16.a) se limpia la amasadora para la realización de la segunda amasada. Antes de llenar la mitad que queda del pilar en el encofrado se acciona los rotores de la mesa vibrante, aprovechando la tixotropía del hormigón, para garantizar una buena homogeneidad de la mezcla a lo largo del soporte. Con la segunda mitad del pilar terminada (figura 4.16.b) se fabrican las dos probetas de control de la segunda amasada.

Para facilitar el desmoldeo e izado del soporte, con el hormigón aún en estado fresco se colocan dos agarraderas metálicas a aproximadamente 750 mm de los extremos embebidas en la mezcla como se muestra en la figura 4.17.a. Una vez puestas las agarraderas metálicas, con una llana metálica, se quita el exceso de hormigón en la cara expuesta del encofrado, para dar un mejor acabado a esa región del pilar.



(a)



(b)

Figura 4.16.a. Probetas de control preparadas. b. Hormigón fresco en el encofrado.

Con el soporte hormigonado se debe extremar el curado del mismo en las horas siguientes a su fabricación, ya que el gran contenido de cemento genera un elevado calor de hidratación que ocasiona la pérdida de agua de la mezcla. Para favorecer el curado se procede a cubrir el hormigón fresco con plástico (figura 4.17.b) y a aportar una atmosfera húmeda pulverizando agua sobre las caras interiores de dicho plástico.



(a)



(b)

Figura 4.17.a. Detalle de la agarradera metálica para izado del soporte; b. Curado del soporte.

En trabajos de investigaciones anteriores (Barrera (2005) [10] y Pallarés (2006) [47]) se constataron que no hay significativas variaciones en la resistencia a 28 días de las probetas de control conservadas en cámara húmeda respecto a las conservadas al lado del soporte en las mismas condiciones ambientales a las que este está sometido. Por esta razón, las cuatro probetas de control se conservan en cámara húmeda bajo condiciones de temperatura y humedad constantes.

4.3.1.d. Desmoldeo

Pasadas 24 horas desde la fabricación del soporte, el hormigón ya tiene resistencia suficiente para su desmoldeo. Como las paredes del encofrado son desmontables, se puede izar el pilar de manera sencilla con el puente grúa del laboratorio, utilizando las agarraderas metálicas dispuestas en el soporte tras el hormigonado. Una vez desmoldeado, se almacena el soporte durante 28 días hasta su preparación para ser ensayado.

4.3.1.e. Preparación del soporte a ser ensayado

Un día antes del ensayo de cada soporte se procede al pegado de las bandas extensométricas sobre las caras de hormigón de las secciones instrumentadas (mismas secciones que se dispusieron las bandas extensométricas de acero), la ejecución de los orificios para la fijación de las escuadras metálicas en donde serán sujetos los captadores de desplazamiento, la preparación de los cables de todas las bandas extensométricas de acero y hormigón para la conexión de las mismas y la colocación de

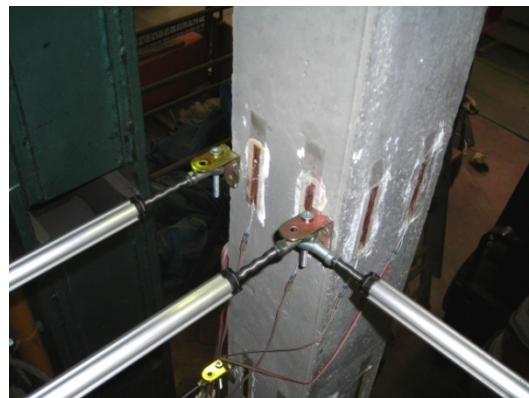
las placas que componen el sistema de aplicación de carga y de los zunchos para garantizar un mayor confinamiento en los extremos del soporte.

Para poder pegar las bandas en las caras de hormigón se procede a la limpieza y lijado de la zona de pegado con una máquina de lijar (comercial) para que la superficie del hormigón esté lisa a la hora de pegar dichas bandas. En este caso se lija una superficie de 60 x 10 mm puesto que las bandas extensométricas de hormigón tienen unas dimensiones de 50 x 5 mm.

Para el correcto pegado de las bandas de hormigón se utiliza como pegamento una mezcla de dos materiales según las especificaciones del fabricante, en este caso con un tiempo de pegado de aproximadamente una hora. En los ensayos de flexo-compresión recta se dispone una banda en cada sección instrumentada de la cara de compresión del soporte (figura 4.18.a), y en los ensayos de flexo-compresión esviada se disponen cuatro bandas por sección, dos en cada cara comprimida del pilar como se muestra en la figura 4.18.b, para poder deducir el plano de deformación de la pieza.



(a)



(b)

Figura 4.18. Preparación del soporte: a. Flexo-compresión recta; b. Flexo-compresión esviada.

Una vez pegadas las bandas de hormigón se procede a la ejecución de los orificios de fijación de las escuadras metálicas para la colocación de los captadores de desplazamiento. Los captadores de desplazamiento son colocados en seis secciones a lo largo de la longitud de cada pilar para poder sacar con exactitud la deformada de la pieza para diferentes niveles de carga, teniendo en cuenta que en los extremos el desplazamiento es nulo. Previamente, se ha simulado numéricamente la deformada del soporte deduciendo el número y la posición de los captadores para poder visualizar con suficiente aproximación dicha deformada. En los soportes sometidos a esfuerzos de flexo-compresión recta se coloca un captador por sección instrumentada (figura 4.18.a), y en los soportes sometidos a esfuerzos de flexo-compresión esviada se disponen grupos de tres captadores por sección (figura 4.18.b).

En los ensayos de flexo-compresión esviada, el desplazamiento de la directriz de la pieza se obtiene a partir de las extensiones registradas por los captadores mediante la triangulación de las medidas finales y iniciales de cada captador en cada sección instrumentada. Dichos datos son obtenidos de forma automática para cada instante de carga para el que se mide el desplazamiento. Con dichos datos y empleando relaciones trigonométricas deducidas de la figura 4.19 se obtiene el desplazamiento del centro de gravedad de la pieza (Δx , Δy) (Pallarés (2006) [47]).

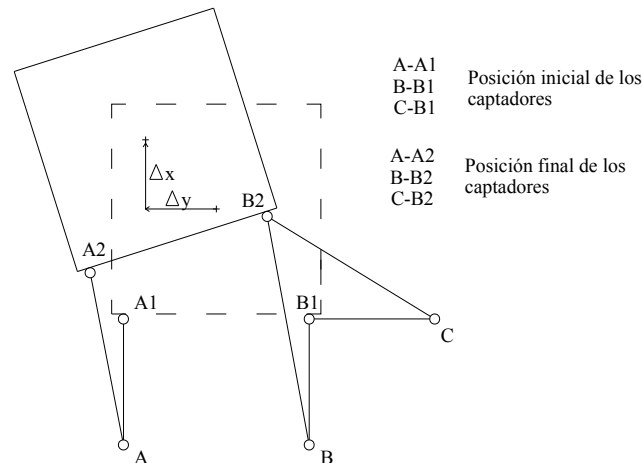
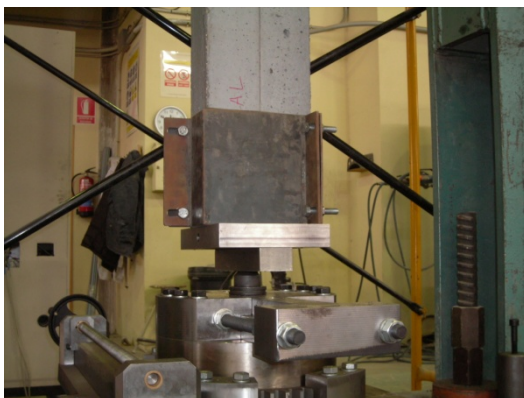


Figura 4.19. Esquema para obtenerse el desplazamiento del centro de gravedad de la pieza por triangulación de las medidas iniciales y finales de los captadores de desplazamiento.

Con las escuadras metálicas fijadas, se procede a la colocación de regletas en los cables de todas las bandas extensométricas para realizar su conexión al sistema de adquisición de datos.

Para finalizar la preparación del soporte se colocan en sus extremos los zunchos, tal y como se muestra en la figura 4.20.a, para aumentar el confinamiento del hormigón en dichas regiones, y la colocación de las placas que componen el sistema de aplicación de carga (figura 4.20.b).



(a)



(b)

Figura 4.20.a. Detalle del zuncho colocado en el extremo del soporte; b. Detalle de la placa de anclaje y de excentricidad sobre el cono de carga en el extremo inferior del soporte.

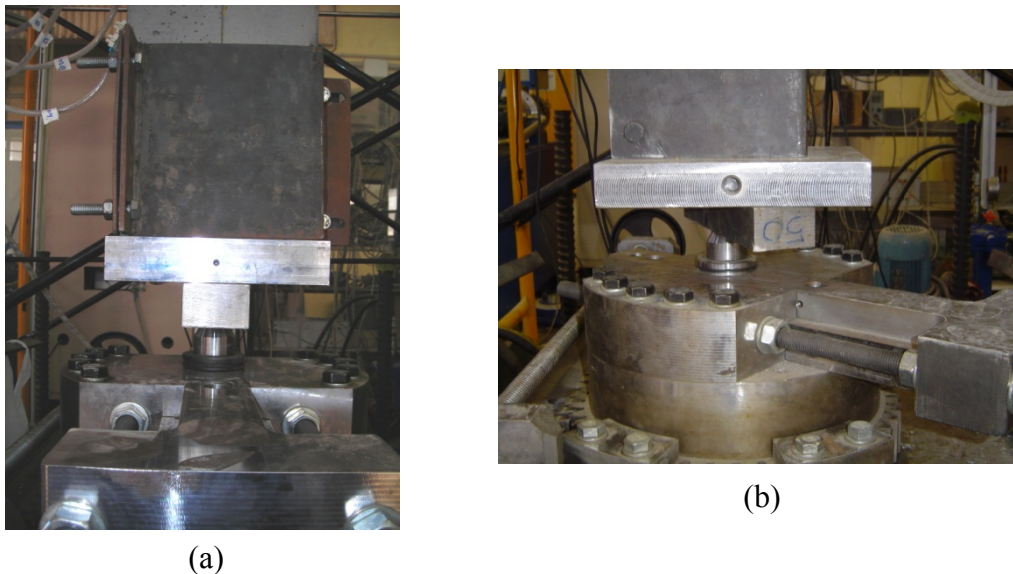
En esta etapa de preparación del soporte se debe extremar la atención por la necesidad de asegurar una gran precisión en los puntos de aplicación de las cargas en los extremos.

Con las etapas descritas hasta el momento el soporte está preparado para su colocación en el pórtico de ensayo.

4.3.1.f. Preparación del pórtico de ensayo

El pórtico de ensayo debe ser preparado con las características de cada ensayo, antes del posicionamiento del soporte (figura 4.21).

En los ensayos de flexo-compresión recta se debe disponer la correcta excentricidad en el dispositivo móvil ubicado en el extremo inferior del pórtico de carga y garantizar que esté posicionado siempre a 0° . Con la diferencia entre las excentricidades superior e inferior se posiciona el dispositivo móvil, tal y como se representa en la figura 4.22, para que los conos que aplican la carga estén en la correcta posición respecto a los conos receptores localizados en las placas de excentricidad del sistema de aplicación de carga, garantizando así la exactitud del punto de aplicación de la carga en cada extremo.



*Figura 4.21.a. Dispositivo móvil posicionado para ensayo a flexo-compresión recta;
b. Ángulo y excentricidad posicionados para ensayo a flexo-compresión esviada.*

En la figura 4.22 se representa un esquema del posicionamiento del dispositivo móvil para los soportes sometidos a esfuerzos de flexo-compresión recta ($\alpha = 0^\circ$) con relación entre excentricidades $\beta = 0.5$ (a) y $\beta = -0.5$ (b). El cono de aplicación de carga ubicado en el dispositivo móvil del extremo inferior del pórtico de ensayo se desplaza linealmente de acuerdo con la posición de las excentricidades superior y inferior, teniendo en cuenta que el cono de aplicación de carga superior ubicado en el actuador hidráulico tiene su posición fija.

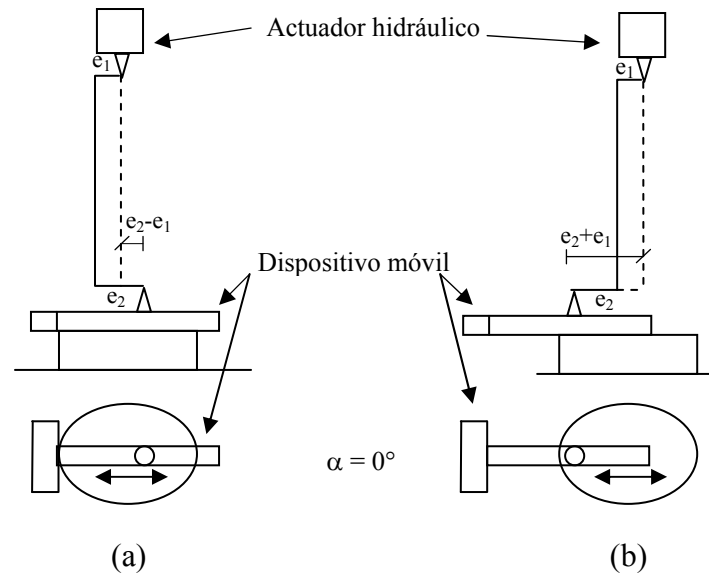


Figura 4.22. Posicionamiento del dispositivo móvil \rightarrow flexo-compresión recta ($\alpha = 0^\circ$):
 a. Relación entre excentricidades $\beta = 0.5$; b. Relación entre excentricidades $\beta = -0.5$.

En los ensayos de flexo-compresión esviada, para el correcto posicionamiento del dispositivo móvil, además de tener en cuenta las excentricidades superior e inferior, se debe extremar la atención también en los ángulos de esviaje en cada extremo del soporte, para poder girar el dispositivo el ángulo necesario asegurando la precisión de los puntos de aplicación de la carga, tal y como se representa en la figura 4.21.b.

El desplazamiento lineal y el giro del dispositivo móvil se obtienen por trigonometría a partir de los ángulos y excentricidades en cada extremo del soporte y teniendo en cuenta que el cono de aplicación de carga superior localizado en el actuador hidráulico es fijo y que el centro de giro del dispositivo móvil está desplazado 16 mm en el eje perpendicular al pórtico de ensayo respecto al centro del cono superior. El posicionamiento del dispositivo móvil se representa en el esquema de la figura 4.23.

Con el dispositivo móvil en la correcta posición (ángulo y excentricidad) el soporte puede ser posicionado en el pórtico de ensayo.

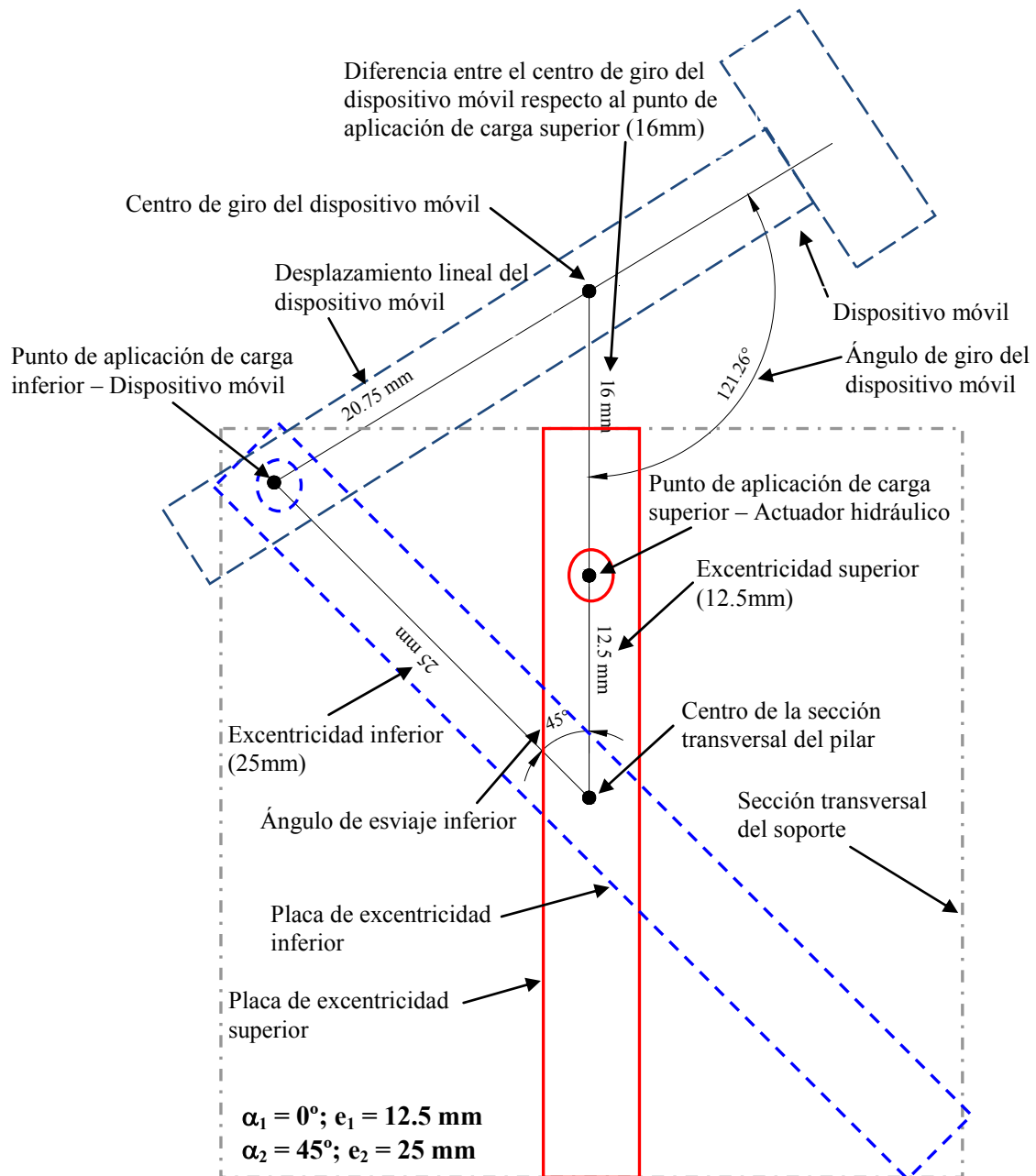


Figura 4.23. Esquema de posicionamiento del dispositivo móvil para un ensayo con ángulo de esviaje superior $\alpha_1 = 0^\circ$; ángulo de esviaje inferior $\alpha_2 = 45^\circ$; excentricidad superior $e_1 = 12.5 \text{ mm}$ y excentricidad inferior $e_2 = 25 \text{ mm}$.

4.3.1.g. Posicionamiento del soporte en el pórtico de ensayo

Una vez definidos el ángulo y la excentricidad del dispositivo móvil en el pórtico de carga y colocadas las placas que forman el sistema de aplicación de carga en el pilar, con el soporte en posición horizontal se procede al izado del mismo con la ayuda de dos placas metálicas atornilladas a la placa de anclaje superior tal y como se observa en la figura 4.24.a.

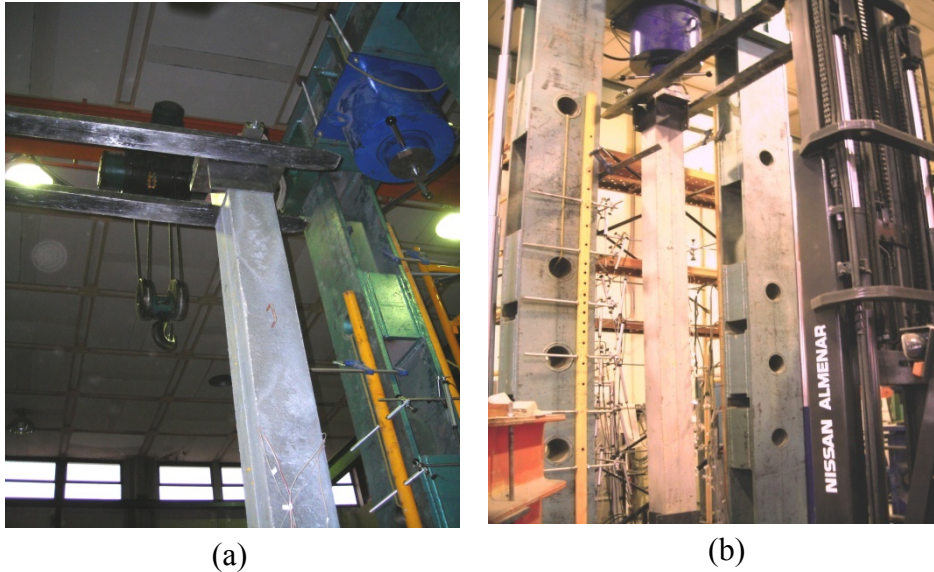


Figura 4.24.a. Izado del soporte; b. Fase de aproximación del soporte al pórtico de carga mediante el uso de la carretilla elevadora.

Para el correcto posicionamiento del soporte en el pórtico de ensayo, se exige movimientos precisos que se deben imponer al pilar. El proceso de colocación del soporte en el pórtico de ensayo se puede dividir en tres fases según la maquinaria empleada: fase de izado, fase de aproximación y fase de colocación del soporte sobre los conos de carga posicionados en el pórtico.

Fase de izado: el soporte pasa de estar en posición horizontal a vertical. Para el izado del pilar se emplea el puente grúa del laboratorio que sujeta el soporte de las placas metálicas atornilladas al sistema de aplicación de carga del extremo superior de la pieza.

Fase de aproximación: con el soporte en posición vertical, éste se cuelga en su extremo superior a las horquillas de una carretilla elevadora, por medio de las placas metálicas acopladas a la placa de anclaje (figura 4.24.b). Las horquillas de la carretilla tienen una longitud de 1.50 m que es superior a la de los apoyos estabilizadores del pórtico de ensayo, permitiendo que el soporte de 3 m de longitud se aproxime al pórtico en vertical y llegue a posiciones muy cercanas a las de ensayo.

Fase de colocación sobre los conos de carga: en el pórtico están posicionados los conos de carga sobre los que se deben apoyar los receptores de los conos que se encuentran insertados en las placas de excentricidad en el sistema de aplicación de carga del soporte. Con la carretilla estacionada y con movimientos precisos de las horquillas accionadas por sus propios hidráulicos, se permite la colocación de la pieza en posición exacta sobre el cono del extremo inferior del pórtico (figura 4.24).

Tras ubicar los receptores de los conos alineados con los conos de carga, la aproximación mediante el torno del cono ubicado en el actuador hidráulico, permite la

fijación del soporte siendo en este momento prescindible la actuación de la carretilla elevadora.

Con el soporte posicionado, y por motivos de seguridad, se atan cuerdas pasantes por la parte superior del dintel del pórtico a las placas metálicas acopladas en la placa de anclaje, con suficiente holgura como para no distorsionar las medidas tomadas del ensayo. Con eso, se asegura que el sistema de placas del extremo superior de la pieza no caiga al suelo tras la rotura del soporte durante el ensayo. También por seguridad, se colocan pantallas de metacrilato para proteger el ordenador y el sistema de adquisición de datos, y las personas que estén presenciando el ensayo, de los trozos de hormigón que puedan desprenderse de la pieza en el momento de la rotura.

4.3.1.h. Instrumentación

Una vez establecidas las medias para garantizar la seguridad en las inmediaciones del pórtico, se procede a la instrumentación del soporte. La instrumentación consiste en la conexión de los cables de las bandas extensométricas al sistema de adquisición de datos, así como la disposición de los captadores de desplazamiento a lo largo de la longitud del soporte que tratarán de caracterizar la deformada de la pieza.

La medición de las deformaciones se lleva a cabo mediante la utilización de bandas extensométricas dispuestas tanto en las barras longitudinales de acero como en la superficie de hormigón a la altura de las secciones instrumentadas del soporte. Las bandas extensométricas dispuestas en las barras de acero son del tipo HBM K-LY41-50/120-3-0.5M, y las bandas colocadas en las caras comprimidas del hormigón son del tipo HBM K-LY41-3/120-3-0.5M.

La nomenclatura empleada para la identificación de las bandas extensométricas ubicadas en la armadura longitudinal en cada sección es del tipo S1AT1 donde:

Los dos primeros caracteres indican la sección en que están ubicadas las bandas. S1 para la sección 1, que está a 0.90 m de altura; S2 para la sección 2, a 1.20 m de altura; S3 representa la sección central, a 1.50 m de altura; y S4 la sección 4, que está a 1.80 m de altura. La ubicación de dichas secciones instrumentadas se definió previamente a partir de la simulación numérica de los ensayos propuestos, con la posible identificación de las secciones críticas de cada soporte.

A continuación las 2 siguientes letras indican si la banda está ubicada en la cara de tracción (AT) o de compresión (AC), y para los soportes con 4 barras como armadura longitudinal, los números 1 ó 2 indican el lado en que se encuentra la banda extensométrica (figura 4.25).

En las bandas dispuestas en el hormigón se emplean la notación mostrada en la figura 4.25 después de los 2 caracteres que representan la sección en que están ubicadas dichas bandas.

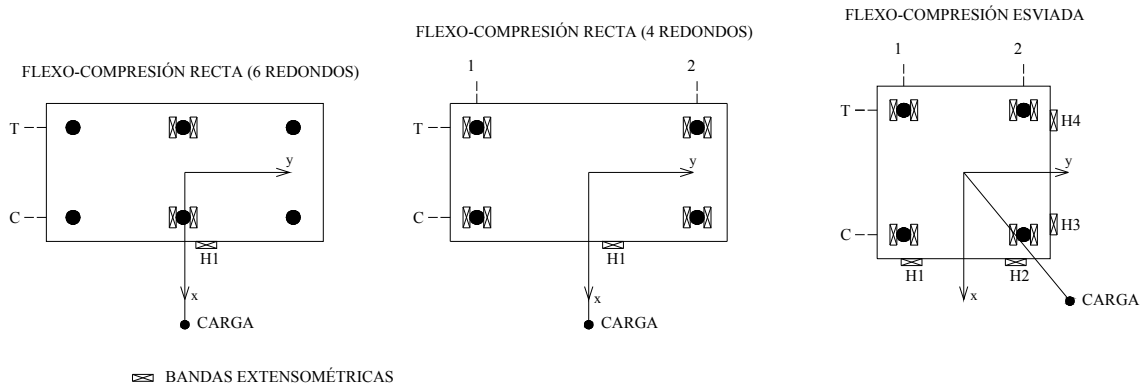


Figura 4.25. Posición de las bandas extensométricas en las secciones instrumentadas.

En los soportes ensayados a flexo-compresión recta se dispone 1 banda de hormigón en cada sección instrumentada (4 en total) en la cara de compresión de la pieza. En los soportes ensayados a flexo-compresión esviada se colocan 4 bandas por sección instrumentada (16 en total), siendo 2 en cada una de las 2 caras más comprimidas de la sección, para poder así sacar el plano de deformación de la sección junto con los datos obtenidos con las bandas dispuestas en la armadura longitudinal.

Respecto a los captadores de desplazamiento, con el objetivo de registrar la deformada del soporte se decidió instrumentar 6 secciones, situadas desde el borde inferior a 0.60, 0.90, 1.50, 1.80 y 2.10 metros. Como se describió anteriormente, en los soportes sometidos a esfuerzos de flexo-compresión recta se dispone un captador sobre cada una de las secciones de las que se desea obtener el movimiento del centro de gravedad de la pieza. En los soportes sometidos a esfuerzos de flexo-compresión esviada se disponen grupos de tres captadores sobre cada sección para poder así sacar la posición exacta del centro de gravedad de la pieza (Δx , Δy) para cualquier instante de carga.

Se colocan los captadores en seis secciones del soporte (figura 4.26). Con ello se obtiene el desplazamiento de la pieza a lo largo de ocho puntos equidistantes en su directriz, sabiéndose que en los extremos el desplazamiento es nulo y se mide el desplazamiento en seis puntos intermedios.

Con todos los elementos de la instrumentación conectados al sistema de adquisición de datos se procede a la rotura de las probetas de control y a la configuración del ensayo en el programa de adquisición de datos.



Figura 4.26. Soporte posicionado en el pórtico de ensayo con toda la instrumentación conectada.

4.3.1.i. Rotura de las probetas de control

Antes de empezar cada ensayo, y con el soporte ya preparado en el pórtico de carga, se procede al ensayo de las probetas de control con el fin de caracterizar la resistencia del hormigón empleado en la fabricación del soporte.

Para garantizar que las caras superior e inferior sean paralelas entre si durante la rotura de las probetas de control, la cara superior, que se queda expuesta tras la fabricación de la probeta, se refrenta mediante una fina capa de una mezcla comercial de azufre según lo especificado por la normativa UNE-EN 12390-3 [69] tal y como se muestra en la figura 4.27.a. Mediante este procedimiento, además, se elimina todo tipo de irregularidad de dicha cara.

En las probetas de hormigón de alta resistencia se recomienda refrentarlas un día antes del ensayo para que la mezcla de azufre adquiriera una resistencia suficiente para resistir las tensiones aplicadas por la prensa sin romperse antes que la probeta (Barrera (2005) [10]).

La rotura de las probetas de control fabricadas con hormigón de alta resistencia resulta ser muy explosiva debido a la poca ductilidad de este tipo de material. Siendo así, por motivo de seguridad, la probeta es ensayada dentro de una jaula metálica como se muestra en la figura 4.27.a y b. También se colocan pantallas de metacrilato alrededor de la prensa para proteger los equipos y las personas que estén en el laboratorio de los trozos de hormigón que puedan desprenderse durante la rotura (Yazzar 2000 [71]).



(a)



(b)

Figura 4.27.a. Probeta de control refrentada posicionada en la prensa hidráulica con la jaula de protección; b. Probeta de hormigón de alta resistencia tras la rotura.

Una vez ensayadas todas las probetas de control y caracterizada la resistencia del hormigón empleado en la fabricación del soporte se procede a la configuración del ensayo en el programa de adquisición de datos.

4.3.1.j. Configuración del ensayo en el programa de adquisición de datos

Una vez instrumentado el soporte mediante las bandas extensométricas y los captadores de desplazamiento, toda la instrumentación se conecta al sistema automático de adquisición de datos instalado en un equipo informático en el laboratorio de ensayo. El software de adquisición de datos consiste en un programa elaborado en LabView en el Departamento de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de Ingeniería Civil de la Universitat Politècnica de València.

El sistema de adquisición de datos permite la visualización, a través de graficas, de los resultados obtenidos del ensayo en tiempo real, tales como las deformaciones registradas por la bandas extensométricas y las flechas registradas por los captadores de desplazamiento, como se presenta en la figura 4.28. De esta manera, las medidas incoherentes recogidas durante el ensayo pueden ser observadas y el ensayo puede ser interrumpido si ello lo exigiera.

En el programa se puede configurar las graficas visualizadas de acuerdo con el interés de cada ensayo, y a partir de la visualización de dichas gráficas en tiempo real se permite controlar los parámetros del ensayo durante su realización.

Una vez configurados todos los elementos de instrumentación y definidos los parámetros que serán visualizados se procede a la toma de ceros de los elementos de instrumentación para el inicio del ensayo.

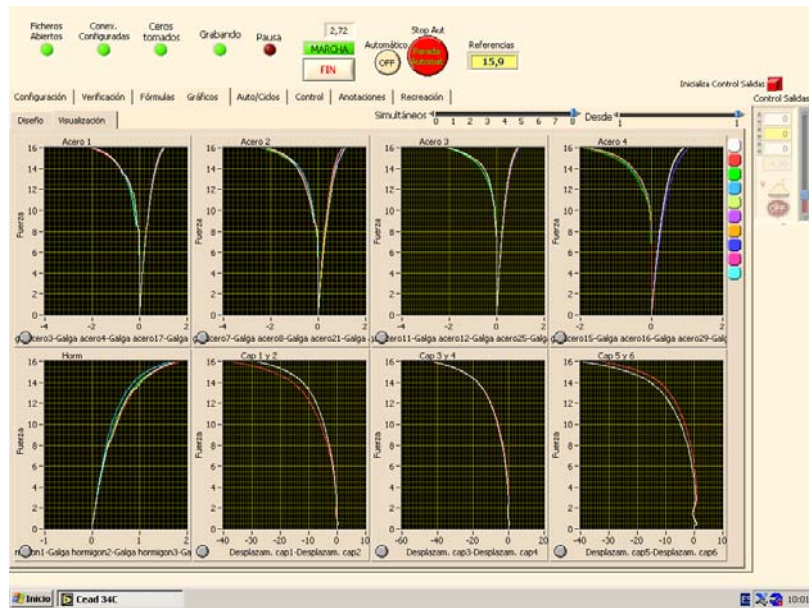


Figura 4.28. Visualización en tiempo real de los resultados obtenidos del ensayo.

4.3.1.k. Inicio del ensayo

Una vez se han tomado los ceros en los elementos de instrumentación se procede a la puesta en marcha del programa y del actuador hidráulico que aplica la carga sobre el extremo superior del soporte a través de una prensa manual.

Se pretende que la velocidad de carga del ensayo sea constante y alrededor de 20 kN/min, sin embargo, el modo de aplicar la carga depende de una apertura manual de la válvula que regula el paso de aceite por el actuador, lo que origina pequeñas variaciones de carga principalmente en el inicio del ensayo a bajos niveles de carga y en la rama de descenso tras alcanzar la carga máxima del ensayo.

Los soportes son ensayados hasta la rotura (figura 4.29) y el ensayo se detiene cuando se observa la rotura de la cara de compresión del pilar. Para observar la rama de descenso en las curvas (carga-variable medida) se ha controlado cuidadosamente la velocidad de la prensa en esta fase del ensayo.

El procesamiento de los datos obtenidos del ensayo se lleva a cabo posteriormente con ayuda de hojas de cálculo obtenidas directamente de la salida de datos del programa de adquisición de datos utilizado.



Figura 4.29. Rotura del soporte.

4.3.1.1. Finalización del ensayo

Tras la finalización del ensayo se procede a la retirada del soporte del pórtico de ensayo. En esa fase se debe extremar la atención por la seguridad de las personas implicadas en la operación, teniendo el cuidado que el soporte no se caiga al suelo durante su retirada del pórtico de carga.

Tras la desconexión de toda la instrumentación utilizada en el ensayo, se marca con rotulador las fisuras en la cara de tracción, y se procede a la retirada del soporte. Inicialmente se posiciona las horquillas de la carretilla elevadora por debajo de las placas metálicas atornilladas a la placa de anclaje superior del soporte para garantizar que el pilar esté apoyado en el momento de la recuperación del torno del cono ubicado en el actuador hidráulico.

Una vez recuperado el torno del cono ubicado en el actuador hidráulico se eleva con cuidado el soporte utilizando la carretilla elevadora para que el receptor de carga del sistema de aplicación de carga inferior se desconecte del cono de aplicación de carga inferior en el dispositivo móvil. Con el cono de aplicación de carga inferior totalmente fuera del receptor de carga se procede a la retirada del soporte con movimientos lentos de la carretilla hacia atrás, para evitar que el soporte deslice sobre las horquillas, tal y como se muestra en la figura 4.30.



Figura 4.30. Retirada del espécimen.

Con el soporte fuera del pórtico de ensayo y utilizando el puente grúa del laboratorio, se coloca el pilar otra vez en posición horizontal, y se recuperan las placas metálicas acopladas en extremos correspondientes al sistema de aplicación de carga.

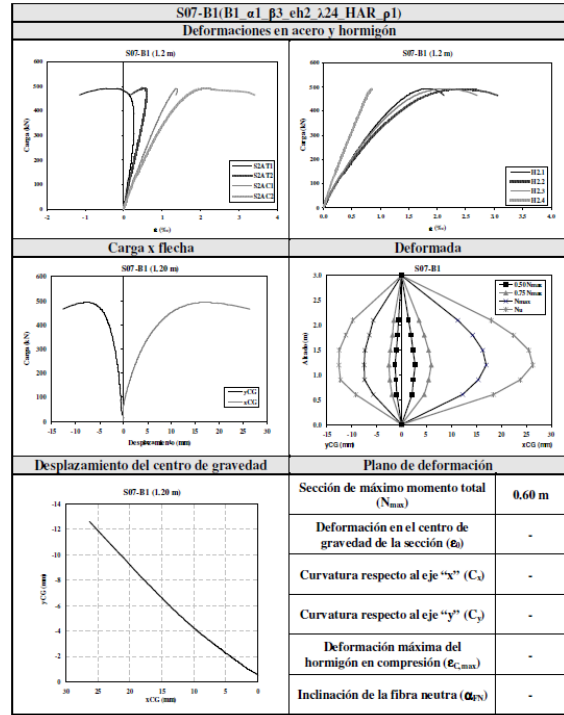
Para cada soporte ensayado se han definido unas fichas de ensayo, en donde se recogen los datos y características de cada soporte, las observaciones fotos registradas durante el ensayo. Además, se han representado las medidas más significativas de cada ensayo, como las gráficas carga \times deformaciones y carga \times desplazamientos con los datos registrados por las bandas extensométricas y captadores de desplazamiento respectivamente, las deformadas de los soportes para distintos niveles de carga, y para los ensayos de flexo-compresión esviada, el desplazamiento en planta bien como los datos obtenidos para la determinación del plano de deformación en la sección crítica (de máximo momento total) de cada soporte, como se muestra a modo de ejemplo en la figura 4.31.

En el Anejo A se presentan las fichas técnicas de cada uno de los 68 ensayos del programa experimental y en el Anejo B se presentan las medidas más importantes registradas para cada uno de los ensayos de forma detallada.

A continuación se representa un organigrama con un resumen de todos los pasos seguidos en la realización del programa experimental, desde la preparación de la armadura hasta la finalización del ensayo.

ESTUDIO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN ARMADO SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVAJAE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS						
FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS						
Soparte		S01		Serie		A1
Identificación		A1_a0_b3_ch1_330_f90_p1		Hormigonado		24/09/2008
				Rotura		22/10/2008
CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO						
f_c (MPa)		91.4		ϵ_s (mm)		-0.005
ρ (%)		2.26		ϵ_y (mm)		0.010
α_s (°)		0		β (°/s)		-0.5
α_y (°)		0		Esbeltez (λ_s)		30
h (m)		0.10		r_{max} (mm)		19
b (m)		0.20		Longitudinal		ϕ 12
e_y/h		0.1		Arm. Transversal		ϕ 4/15cm
CARGA APLICADA						
N_{max} (kN)						616.9
N_y (kN)						596.7
ACERO - ARM. LONGITUDINAL						
f_s (MPa)						538.1
$f_{s,lim}$ (MPa)						640.3
E_s (MPa)						209377
DOSFIFICACION - HORMIGÓN (kg/m³)						
Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
570	180	705	890	50	5.8	11.8
OBSERVACIONES						
- La rotura se produjo a 1.35 metros desde el extremo inferior del soporte; - La rotura fue frágil con una pequeña rama de descenso observada; - Se observó un gran salto de recubrimiento en la cara de compresión alrededor de la sección de rotura.						
FOTOS REGISTRADAS						

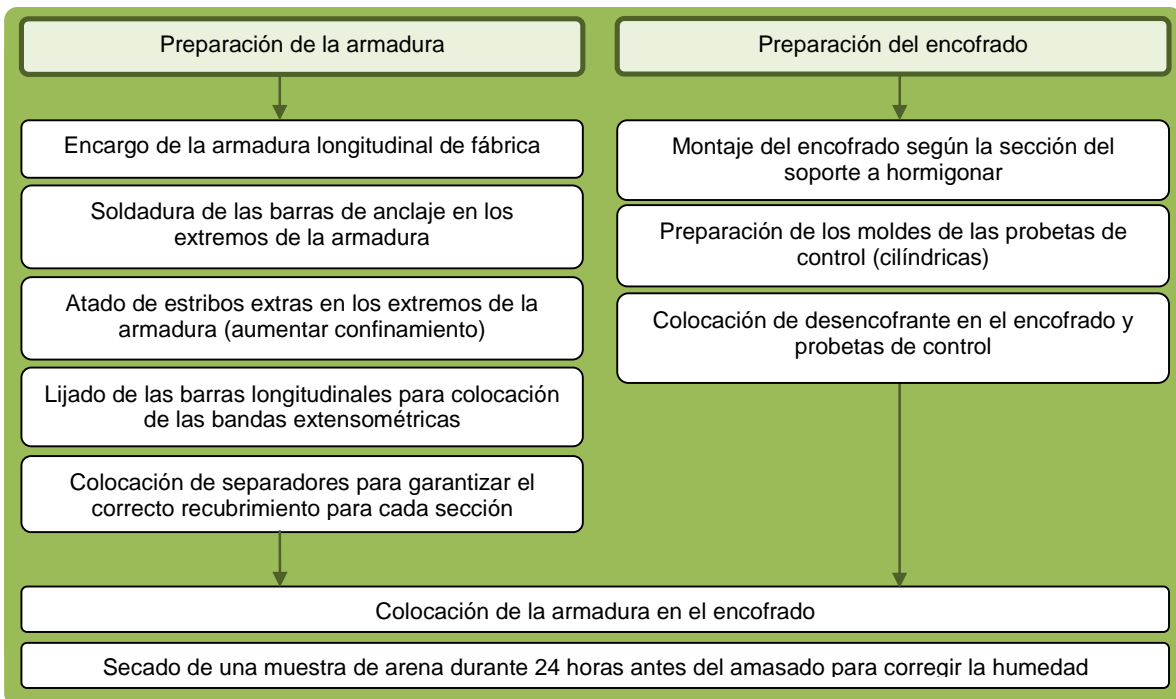
(a)



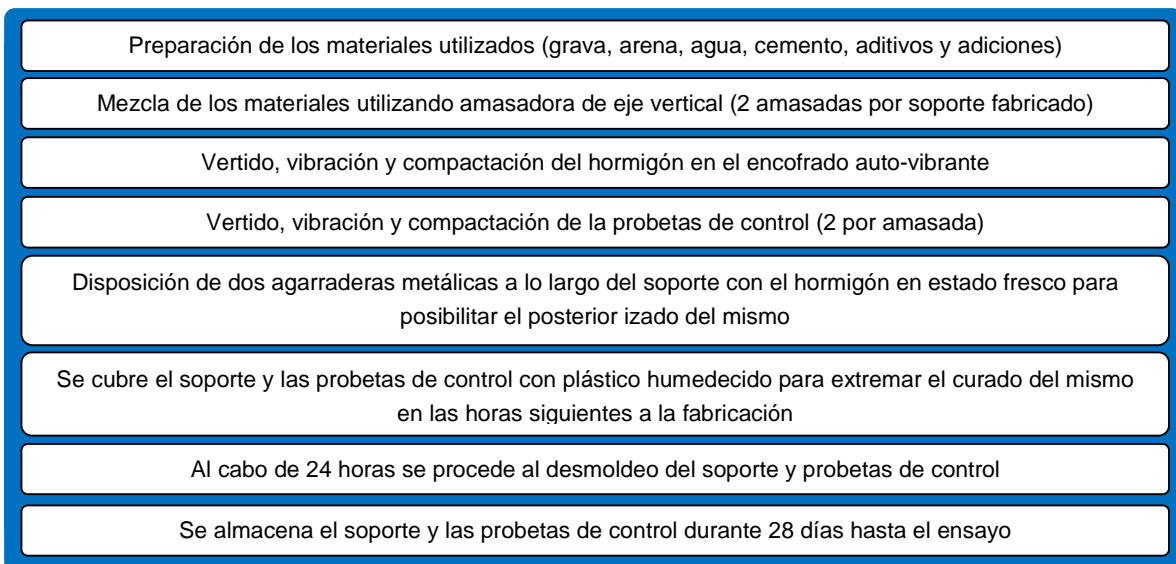
(b)

Figura 4.31.a. Ficha técnica de ensayo; b. Medidas directas.

Fase previa al hormigonado:



Hormigonado del soporte y probetas de control:



Realización del ensayo:

Pegado de bandas extensométricas sobre las caras de hormigón de las secciones instrumentadas

Fijación de escuadras metálicas para colocación de los captadores de desplazamiento en 6 secciones a lo largo de la longitud del soporte (0.60, 0.90, 1.20, 1.50, 1.80 y 2.00 metros)

Preparación de los cables de todas las bandas extensométricas (acero y hormigón) para su conexión al sistema de adquisición de datos

Colocación de zunchos en cada extremo del soporte (para aumentar el confinamiento en dichas zonas)

Colocación de las placas del sistema de aplicación de carga (placas de anclaje y excentricidades)

Preparación del pórtico de ensayo según las características de cada ensayo (ángulo de esviaje y excentricidades)

Izado del soporte y posicionamiento en vertical en el pórtico de ensayo

Instrumentación del soporte (conexión de los cables de las bandas extensométricas al sistema de adquisición de datos y disposición de los captadores de desplazamiento a lo largo de la pieza)

Rotura de las probetas de control

Configuración del ensayo en el programa de adquisición de datos (LabView)

Toma de ceros de los elementos de instrumentación y puesta en marcha del programa y del actuador hidráulico que aplica la carga sobre el extremo superior del soporte

Los soportes son ensayados hasta la rotura y el ensayo se detiene cuando se observa la rotura de la cara de compresión del pilar

Desconexión de toda instrumentación, registro fotográfico y marcado de fisuras en la cara de tracción

Retirada del soporte del pórtico de ensayo

Registro fotográfico de las posiciones de las fisuras

Procesamiento de los datos obtenidos (hojas de cálculo)



Preparación de la armadura



Barras soldadas en el extremo de la armadura



Estribos extras atados en extremos



Disposición de bandas extensométricas



Colocación de separadores



Armadura en el encofrado



Preparación de los materiales



Amasadora de eje vertical



Probetas de control preparadas



Hormigón fresco en el encofrado



Agarradera metálica para izado del soporte



Soporte recién hormigonado (curado)



Preparación del pórtico de ensayo



Zunchos y placas en extremo del soporte



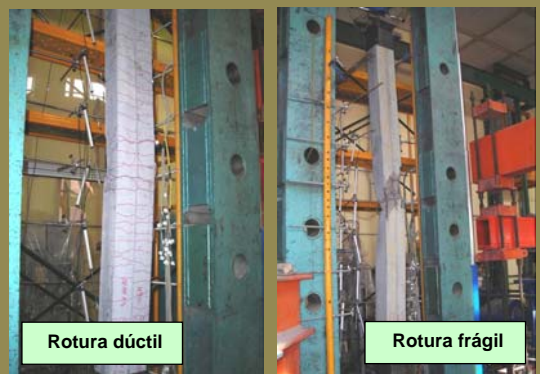
Galgas de hormigón y captadores posicionados



Captadores de desplazamiento posicionados



Rotura de las probetas de control



Rotura dúctil

Rotura frágil

Rotura del soporte

Capítulo 5.

Análisis de los resultados experimentales

Durante el desarrollo del programa experimental ha sido realizado el análisis de los resultados en tiempo real durante la realización del ensayo a través del propio sistema de adquisición de datos mediante un software desarrollado por el personal del Departamento de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de Ingeniería Civil y del Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH) de la Universitat Politècnica de València. Posteriormente, tras la realización del ensayo se analizan los resultados en gabinete mediante hojas de cálculo provenientes de la salida de datos del sistema de adquisición de datos.

En este capítulo se presentan los resultados directos obtenidos para los soportes ensayados del programa experimental, sometidos a esfuerzos de flexo-compresión recta y esviada, haciendo referencia a las cargas máxima y última alcanzadas en cada ensayo,

a las deformaciones en acero y hormigón en las secciones instrumentadas con bandas extensométricas y a los desplazamientos obtenidos de las medidas registradas por los captadores de desplazamiento ubicados a lo largo de la pieza. Además, se describen los tipos de comportamiento que se han registrado durante los ensayos (distribución de las fisuras, pandeo local de la armadura comprimida o salto de recubrimiento en la cara de compresión), así como el tipo de fallo del soporte (inestabilidad (I) o agotamiento frente a sollicitaciones normales (A)). Se hace también un análisis de la influencia de las variables involucradas en la capacidad resistente de los soportes y una comparación de los resultados con los métodos simplificados propuestos por distintas normativas (ACI-318 (2008) [1], EC-2 (2004) [29] y EHE-08 [23]).

5.1. Cargas axiales máximas y últimas obtenidas en los ensayos

Para analizar los resultados se han identificado dos situaciones en el proceso de carga: 1) de carga máxima, determinada por la situación del soporte en el instante en el que se alcanza la mayor carga axial aplicada (N_{max}); y 2) de carga última, que se corresponde con una carga axial N_u menor que N_{max} alcanzada una vez sobrepasada la situación de carga máxima y se caracteriza por la pérdida de capacidad resistente del soporte.

En la tabla 5.1 y en la tabla 5.2 se presentan las medidas obtenidas para las cargas máxima y última, y la resistencia a compresión simple del hormigón (f_c) utilizado en cada ensayo medida en probeta cilíndrica en el mismo día del ensayo (28 días).

Para identificar y caracterizar cada ensayo se le asigna un acrónimo del tipo presentado en la expresión 5.1.

$$A1_α0_β3_eh1_λ30_HAR_ρ1 \quad 5.1$$

El primero carácter y su número indican la serie a la que el soporte pertenece (A, B ó C), siendo la serie A compuesta por los soportes sometidos a flexo-compresión recta y las series B y C por los soportes sometidos a flexo-compresión esviada. A continuación se escribe un guión-bajo seguido de la letra α y un número que representa la combinación de ángulos de esviaje superior y inferior en cada ensayo (α_1, α_2): $\alpha_0 \rightarrow (0^\circ, 0^\circ)$; $\alpha_1 \rightarrow (22.5^\circ, 22.5^\circ)$; $\alpha_2 \rightarrow (0^\circ, 22.5^\circ)$; $\alpha_3 \rightarrow (0^\circ, 45^\circ)$ y $\alpha_4 \rightarrow (22.5^\circ, 45^\circ)$. Después de otro guión-bajo se escribe la letra β y un número que representa la relación entre la excentricidad superior e inferior del soporte (e_1/e_2), β_1 representa una relación de 0.5, β_2 una relación de 0 y β_3 una relación de -0.5 entre excentricidades. A continuación y separados también por un guión-bajo se escribe “eh” y un número que representa la relación entre la excentricidad del extremo inferior del soporte (de mayor valor absoluto) y el canto de la sección transversal respecto al eje de flexión considerado (e_2/h), “eh1” representa una relación de 0.1, “eh2” una relación de 0.2 y

“eh3” una relación de 0.4. Después de otro guión bajo viene la esbeltez geométrica del soporte representada por la letra λ seguida del valor de la esbeltez geométrica (20, 24 ó 30). A continuación y separados por otro guión se escribe HAR o HC indicando el tipo de hormigón utilizado para cada serie de ensayo (de alta resistencia o de resistencia convencional respectivamente). Finalmente, y separados también por un guión-bajo, aparece la cuantía de armadura longitudinal, donde “ ρ_1 ” representa una cuantía de 2.26% y “ ρ_2 ” representa una cuantía de 3.39%.

Ensayo	Identificación	N_{max} (kN)	N_u (kN)	f_c (MPa)
S01-A1	A1_α0_β3_eh1_λ30_HAR_ρ1	616.92	596.70	91.4
S02-A1	A1_α0_β3_eh2_λ30_HAR_ρ1	590.63	574.98	87.8
S03-A1	A1_α0_β3_eh3_λ30_HAR_ρ1	287.77	130.28	85.4
S04-A1	A1_α0_β2_eh1_λ30_HAR_ρ1	497.21	(*)	86.8
S05-A1	A1_α0_β2_eh1_λ20_HAR_ρ1	1382.59	1329.54	90.4
S06-A1	A1_α0_β2_eh2_λ20_HAR_ρ1	1031.21	954.95	87.4
S07-A1	A1_α0_β2_eh2_λ30_HAR_ρ1	374.72	126.31	88.5
S08-A1	A1_α0_β2_eh3_λ30_HAR_ρ1	210.11	85.81	90.2
S09-A1	A1_α0_β1_eh2_λ30_HAR_ρ1	281.05	100.31	88.3
S10-A1	A1_α0_β1_eh3_λ30_HAR_ρ1	162.85	81.57	87.3
S11-A1	A1_α0_β1_eh2_λ20_HAR_ρ1	851.10	774.48	88.1
S12-A1	A1_α0_β1_eh3_λ20_HAR_ρ1	487.96	375.81	88.2
S01-A2	A2_α0_β2_eh1_λ30_HC_ρ1	334.32	130.58	30.1
S02-A2	A2_α0_β2_eh2_λ30_HC_ρ1	265.78	150.51	28.4
S03-A2	A2_α0_β2_eh3_λ30_HC_ρ1	168.25	88.48	30.0
S04-A2	A2_α0_β3_eh1_λ30_HC_ρ1	430.31	403.41	30.5
S05-A2	A2_α0_β3_eh2_λ30_HC_ρ1	329.65	128.26	32.5
S06-A2	A2_α0_β3_eh3_λ30_HC_ρ1	251.12	150.96	31.5
S07-A2	A2_α0_β2_eh1_λ20_HC_ρ1	751.87	660.21	32.6
S08-A2	A2_α0_β2_eh2_λ20_HC_ρ1	615.68	526.31	32.2
S01-A3	A3_α0_β2_eh1_λ30_HAR_ρ2	542.55	256.28	85.7
S02-A3	A3_α0_β2_eh2_λ30_HAR_ρ2	370.33	214.05	92.3
S03-A3	A3_α0_β2_eh3_λ30_HAR_ρ2	258.23	184.50	93.1
S04-A3	A3_α0_β3_eh1_λ30_HAR_ρ2	657.32	644.21	93.3
S05-A3	A3_α0_β3_eh2_λ30_HAR_ρ2	453.04	233.50	92.5
S06-A3	A3_α0_β3_eh3_λ30_HAR_ρ2	334.32	216.89	93.2
S01-A4	A4_α0_β2_eh1_λ30_HC_ρ2	382.57	145.88	34.3
S02-A4	A4_α0_β2_eh2_λ30_HC_ρ2	318.23	141.31	31.3
S03-A4	A4_α0_β2_eh3_λ30_HC_ρ2	192.64	120.86	30.7
S04-A4	A4_α0_β3_eh1_λ30_HC_ρ2	464.61	210.45	30.0
S05-A4	A4_α0_β3_eh2_λ30_HC_ρ2	352.67	180.07	28.2
S06-A4	A4_α0_β3_eh3_λ30_HC_ρ2	258.19	150.26	29.5

(*) Ensayo interrumpido antes de alcanzar la carga última.

Tabla 5.1. Carga máxima, carga última, y resistencia del hormigón: flexo-compresión recta.

Ensayo	Identificación	N_{max} (kN)	N_u (kN)	f_c (MPa)
S01-B1	B1_α1_β2_εh1_λ24_HAR_ρ1	514.9	458.7	85.3
S02-B1	B1_α1_β2_εh2_λ24_HAR_ρ1	387.1	268.3	83.0
S03-B1	B1_α1_β2_εh3_λ24_HAR_ρ1	198.8	166.5	85.9
S04-B1	B1_α1_β1_εh2_λ24_HAR_ρ1	279.4	207.4	87.4
S05-B1	B1_α1_β1_εh3_λ24_HAR_ρ1	175.6	118.4	90.3
S06-B1	B1_α1_β3_εh1_λ24_HAR_ρ1	610.8	567.6	89.2
S07-B1	B1_α1_β3_εh2_λ24_HAR_ρ1	492.1	466.1	84.9
S08-B1	B1_α1_β1_εh1_λ24_HAR_ρ1	505.4	466.1	86.4
S02-B2	B2_α1_β2_εh2_λ24_HC_ρ1	274.6	190.8	37.4
S03-B2	B2_α1_β2_εh3_λ24_HC_ρ1	175.0	155.2	35.1
S04-B2	B2_α1_β1_εh3_λ24_HC_ρ1	134.6	81.1	28.2
S05-B2	B2_α1_β1_εh2_λ24_HC_ρ1	234.5	173.3	31.7
S01-C1	C1_α2_β1_εh2_λ24_HAR_ρ1	306.9	234.1	89.5
S02-C1	C1_α2_β1_εh3_λ24_HAR_ρ1	178.9	110.6	93.6
S03-C1	C1_α2_β3_εh1_λ24_HAR_ρ1	648.1	625.4	95.3
S04-C1	C1_α2_β3_εh2_λ24_HAR_ρ1	502.0	473.1	92.3
S02-C2	C2_α3_β1_εh3_λ24_HAR_ρ1	183.0	154.2	91.5
S03-C2	C2_α3_β2_εh1_λ24_HAR_ρ1	587.1	575.2	91.4
S04-C2	C2_α3_β2_εh2_λ24_HAR_ρ1	409.0	373.8	99.1
S05-C2	C2_α3_β2_εh3_λ24_HAR_ρ1	245.1	231.3	95.3
S06-C2	C2_α3_β3_εh1_λ24_HAR_ρ1	640.8	620.9	98.3
S07-C2	C2_α3_β1_εh1_λ24_HAR_ρ1	527.4	494.5	89.5
S01-C3	C3_α4_β1_εh2_λ24_HAR_ρ1	340.1	304.5	88.1
S02-C3	C3_α4_β1_εh3_λ24_HAR_ρ1	200.6	174.4	88.0
S03-C3	C3_α4_β3_εh1_λ24_HAR_ρ1	694.9	684.8	86.5
S04-C3	C3_α4_β1_εh1_λ24_HAR_ρ1	512.1	487.6	86.3
S01-C4	C4_α2_β1_εh1_λ24_HC_ρ1	291.9	225.7	27.1
S02-C4	C4_α2_β1_εh2_λ24_HC_ρ1	232.9	179.5	29.9
S01-C5	C5_α3_β2_εh1_λ24_HC_ρ1	348.8	327.4	27.6
S02-C5	C5_α3_β2_εh2_λ24_HC_ρ1	244.5	188.2	29.1
S03-C5	C5_α3_β2_εh3_λ24_HC_ρ1	172.9	65.8	29.1
S04-C5	C5_α3_β3_εh1_λ24_HC_ρ1	389.8	355.9	31.3
S05-C5	C5_α3_β1_εh1_λ24_HC_ρ1	318.3	232.6	25.9
S01-C6	C6_α4_β1_εh1_λ24_HC_ρ1	313.7	207.8	33.3
S02-C6	C6_α4_β1_εh2_λ24_HC_ρ1	226.7	188.4	28.3
S03-C6	C6_α4_β3_εh2_λ24_HC_ρ1	299.2	229.3	27.0

Tabla 5.2. Carga máxima, carga última, y resistencia del hormigón: flexo-compresión esviada.

5.2. Deformaciones en acero y hormigón

En este apartado se presentan, a modo de ejemplo, los resultados obtenidos de las lecturas de las bandas extensométricas para dos de los ensayos del programa experimental, uno sometido a esfuerzos de flexo-compresión recta, y el otro a esfuerzos de flexo-compresión esviada.

En los ensayos a flexo-compresión recta (serie A) hay soportes con 4 redondos de 12 mm de diámetro y soportes con 6 redondos de 12 mm de diámetro de armadura longitudinal. Como ha sido explicado en el Capítulo 4, los soportes con 4 barras llevan 2 bandas extensométricas diametralmente opuestas en cada barra, con un total de 8 bandas por sección instrumentada y los soportes con 6 barras llevan 2 bandas diametralmente opuestas en cada una de las 2 barras centrales, con un total de 4 bandas por sección instrumentada. En los ensayos a flexo-compresión esviada (series B y C) todos los soportes poseen 4 barras de 10 mm como armadura longitudinal y llevan 8 bandas extensométricas por sección instrumentadas (2 diametralmente opuestas en cada barra). La deformación en cada armadura longitudinal se obtiene como la media entre las medidas de las 2 bandas extensométricas dispuestas en la barra.

Con la notación empleada en la nomenclatura de las bandas extensométricas planteada en el Capítulo 4, y recordada mediante la figura 5.1, se expone a modo de ejemplo, los resultados de los ensayos S05-A3 (A3_α0_β3_eh2_λ30_HAR_ρ2) y S01-C3 (C3_α4_β1_eh2_λ24_HAR_ρ1).

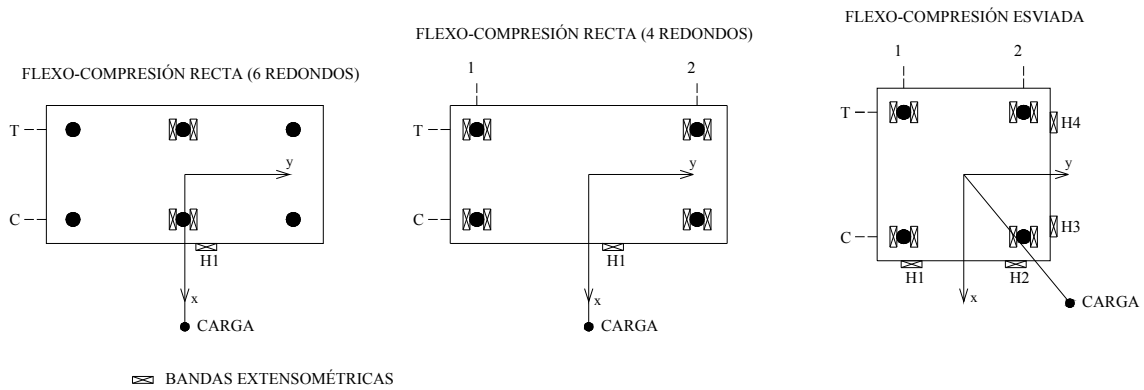


Figura 5.1. Notación empleada para identificar la localización de las bandas extensométricas.

El soporte S05-A3 posee una excentricidad superior de -0.01 m y una excentricidad inferior de 0.02 m, con una sección transversal de 0.1 × 0.2 m y sometido a un esfuerzo de flexo-compresión recta respecto al eje débil (0.1 m), lo que corresponde a una relación entre excentricidades $\beta = -0.5$ y una excentricidad relativa $e_2/h = 0.2$. El soporte S01-C3, de sección transversal de 0.125 × 0.125 m, y sometido a un esfuerzo de flexo-compresión esviada, posee en su extremo superior un ángulo de esviaje de 22.5° y una excentricidad de 0.0125 m, y en su extremo inferior un ángulo de esviaje de 45° y una excentricidad de 0.025 m, lo que corresponde a una relación entre excentricidades $\beta = 0.5$ y una excentricidad relativa $e_2/h = 0.2$.

En la figura 5.2 se representa un croquis de la sollicitación aplicada a los soportes, señalándose en dónde se aplica cada excentricidad y los respectivos ángulos de esviaje en cada extremo.

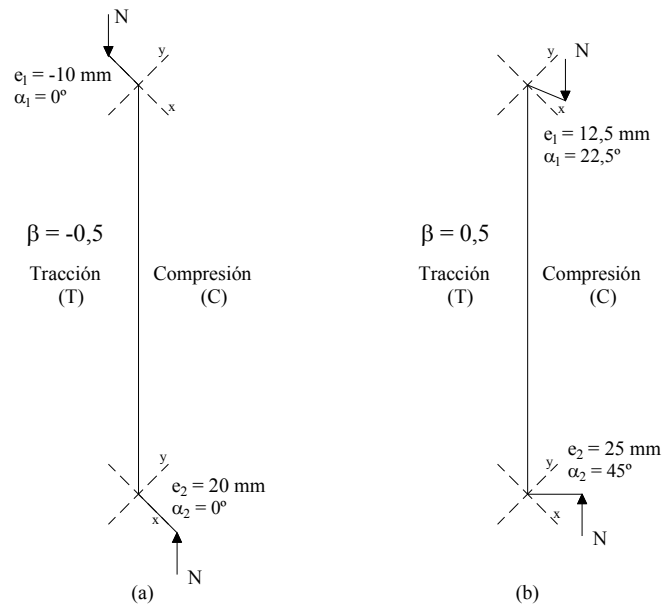


Figura 5.2. Croquis de la sollicitación aplicada: (a) S05-A3; (b) S01-C3.

En cada soporte se instrumentaron 4 secciones con bandas extensométricas, situadas desde el borde inferior a 0.90, 1.20, 1.50 y 1.80 metros. A continuación, en la figura 5.3 se representan 4 gráficas, una para cada sección instrumentada, con las medias de las deformaciones en tracción y compresión del acero y en el hormigón para el soporte S05-A3.

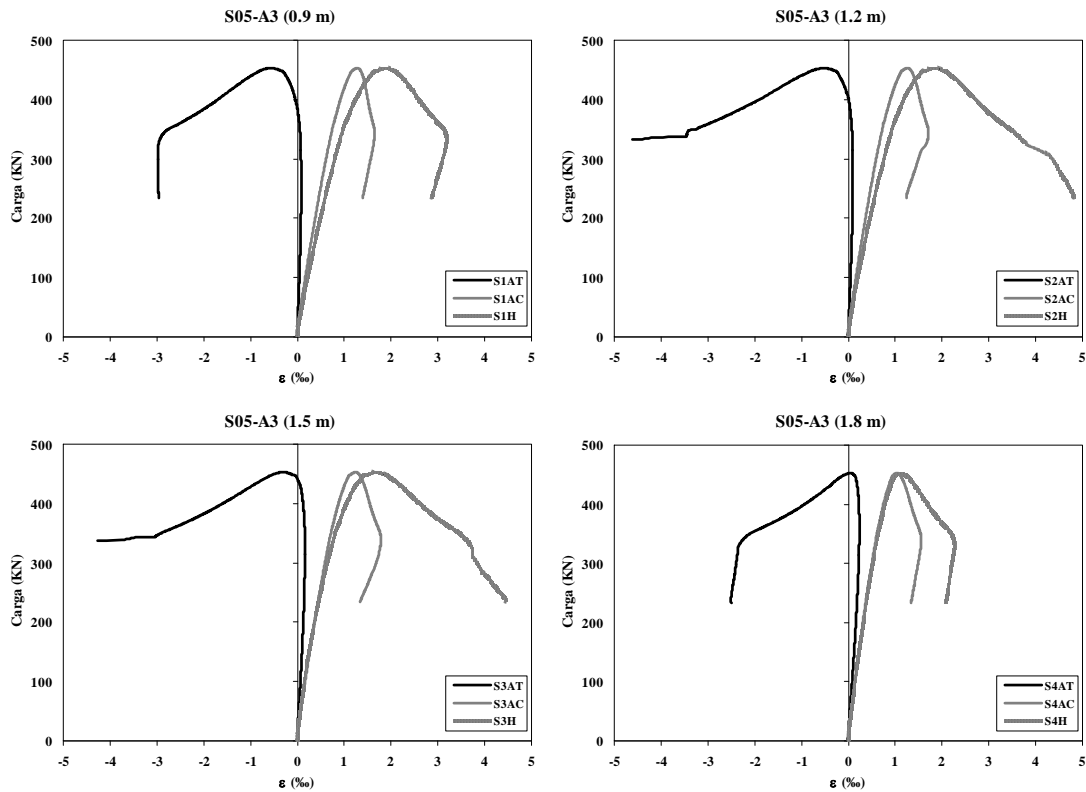


Figura 5.3. Medidas directas del ensayo S05-A3 (A3_α0_β3_εh2_λ30_HAR_ρ2).

Las gráficas de las bandas extensométricas nos muestra el comportamiento deformacional del soporte durante el ensayo. En este ensayo se puede observar las grandes deformaciones alcanzadas tanto en tracción como en compresión. En las secciones ubicadas a 1.20 y 1.50 metros, el hormigón en compresión supera la deformación del 4.5‰ y el acero en tracción llega a plastificar antes de la rotura del soporte. La sección de rotura está situada a 1.35 metros de altura, entre las secciones 2 y 3 instrumentadas con bandas extensométricas.

Para los soportes sometidos a flexo-compresión esviada, la determinación del plano de deformación de la sección no se da de manera directa con los resultados registrados por las bandas extensométricas, ya que hay una incertidumbre en la definición de este plano debido a los ángulos de esviaje y excentricidad distintos en los extremos de la pieza.

La obtención del plano de deformación de cada una de las cuatro secciones instrumentadas con bandas extensométricas se obtiene de ajustar un plano por mínimos cuadrados a las ocho deformaciones registradas por dichas bandas, tomándose el valor medio de la deformación de cada barra de acero entre las dos bandas dispuestas.

En la figura 5.4 se representa la sección transversal de los soportes sometidos a flexo-compresión esviada con las coordenadas en milímetros de las bandas extensométricas de acero y hormigón referentes al centro de gravedad de la sección transversal.

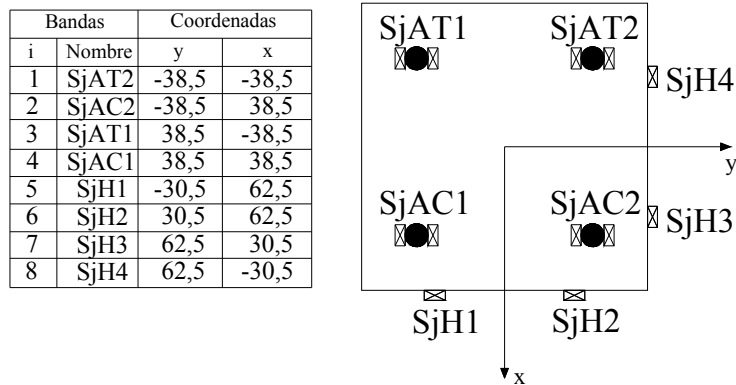


Figura 5.4. Posición de las bandas extensométricas ubicadas en las secciones instrumentadas (flexo-compresión esviada).

Con el ajuste por mínimos cuadrados se puede determinar la ecuación del plano de deformación y obtener los valores de curvaturas respecto a los dos ejes coordenados (c_x , c_y), la deformación del hormigón en el centro de gravedad de la sección (ϵ_0), la deformación máxima del hormigón en compresión ($\epsilon_{C,max}$) y el ángulo de inclinación de la fibra neutra (α_{FN}) para las cuatro secciones instrumentadas de cada soporte.

En la figura 5.5 se representa a modo de ejemplo los valores registrados por las bandas extensométricas de acero y hormigón en la sección central (1.50 m) del soporte S01-C3.

Los registros de las bandas extensométricas nos muestran que la armadura longitudinal ubicada en la esquina más traccionada de la pieza (S3AT1) plastifica antes de la rotura y que los registros de las bandas S3AT2 y S3AC1 presentan un comportamiento de compresión hasta que se alcanza la carga máxima y cambian su tendencia hasta la rotura, cuando están en tracción. Las bandas ubicadas en la armadura longitudinal en la esquina más comprimida del pilar (S3AC2) registran deformaciones de hasta un 3‰ en rotura. En el hormigón, las bandas ubicadas más cerca de la esquina más comprimida (H3.3 y H3.2) llegan a alcanzar deformaciones de más del 3.5‰ en rotura.

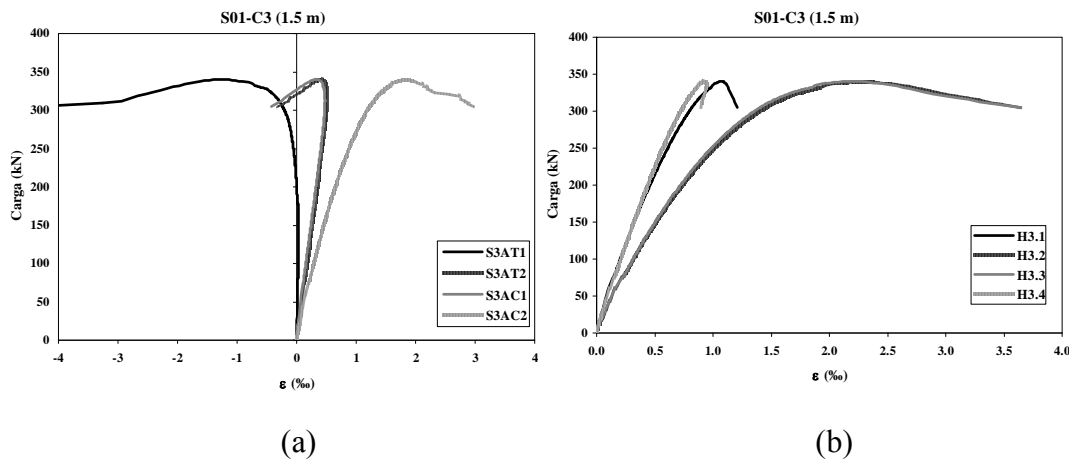


Figura 5.5. Medidas directas registradas por las bandas extensométricas en la sección central del soporte S01-C3 (C3_α4_β1_εh2_λ24_HAR_ρ1); a. Acero; b. Hormigón.

A continuación, en la figura 5.6 se muestra el plano de deformación de la sección central (1.50 m) del soporte S01-C3 tras el ajuste por mínimos cuadrados de las ocho deformaciones registradas en situación de carga máxima.

En este ensayo se alcanzó una carga máxima de 340.1 kN y tras la obtención del plano de deformación con la regresión lineal de los valores registrados por la bandas extensométricas (figura 5.6) se obtuvieron los siguientes valores: $c_x = 0.0203 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$; $c_y = 0.0214 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$; $\epsilon_0 = 0.35\text{‰}$; $\epsilon_{C\text{max}} = 2.95\text{‰}$; $\alpha_{FN} = 43.45^\circ$. Los valores obtenidos con la regresión lineal para todos soportes sometidos a flexo-compresión esviada se presentan en el Anejo B de este trabajo.

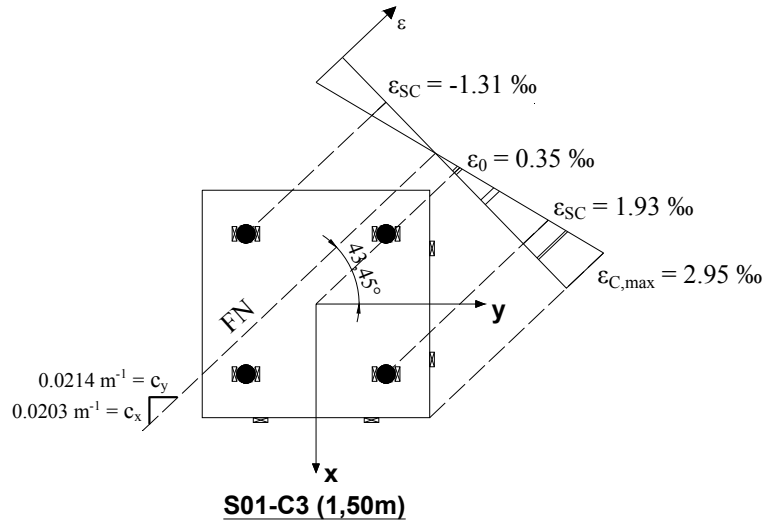


Figura 5.6. Plano de deformación de la sección central (carga máxima) S01-C3 (C3_α4_β1_εh2_λ24_HAR_ρ1).

5.3. Desplazamientos

Como se ha explicado en el Capítulo 4, de este trabajo, en los soportes sometidos a esfuerzos de flexo-compresión recta, se disponen 6 captadores de desplazamientos a lo largo de la longitud de la pieza, situados desde el borde inferior del pilar a 0.60, 1.20, 1.50, 1.80 y 2.10 metros. Así, y sabiendo que el desplazamiento en los extremos del soporte es nulo, se puede determinar la flecha en cada sección instrumentada para cualquier nivel de carga, bien como representar la deformada del soporte para distintos niveles de carga.

En el caso en que el soporte esté sometido a esfuerzos de flexo-compresión esviada, se colocan, en cada una de las 6 secciones instrumentadas, 3 captadores de desplazamientos para poder así hacer una triangulación, por trigonometría, mediante una hoja de cálculo con las medidas iniciales y finales registradas por los captadores en cada ensayo y definir el desplazamiento del centro de gravedad de la sección transversal en las direcciones de los dos ejes coordenados definidos en la sección (Δx , Δy). Además, con los resultados de la triangulación en las 6 secciones instrumentadas con los captadores de desplazamiento, se puede definir la deformada del soporte en las direcciones (x , y) para cualquier instante durante el ensayo.

En la figura 5.7, a modo de ejemplo, se representa el diagrama carga-flecha para la sección central (desplazamiento máximo bajo carga máxima) del soporte S05-A3 (A3_α0_β3_εh2_λ30_HAR_ρ2) sometido a esfuerzos de flexo-compresión recta bien como su deformada para distintos niveles de carga.

En la figura 5.7, bien como en los registros de las bandas extensométricas presentadas en la figura 5.3, se percibe un comportamiento con una considerable rama de descenso post pico (tras alcanzar la carga máxima N_{max}) alcanzando grandes deformaciones y grandes desplazamientos en rotura. En la figura 5.7.b se representa la deformada del soporte bajo distintos niveles de carga en función de la carga máxima soportada (N_{max}) hasta la carga de rotura (N_u).

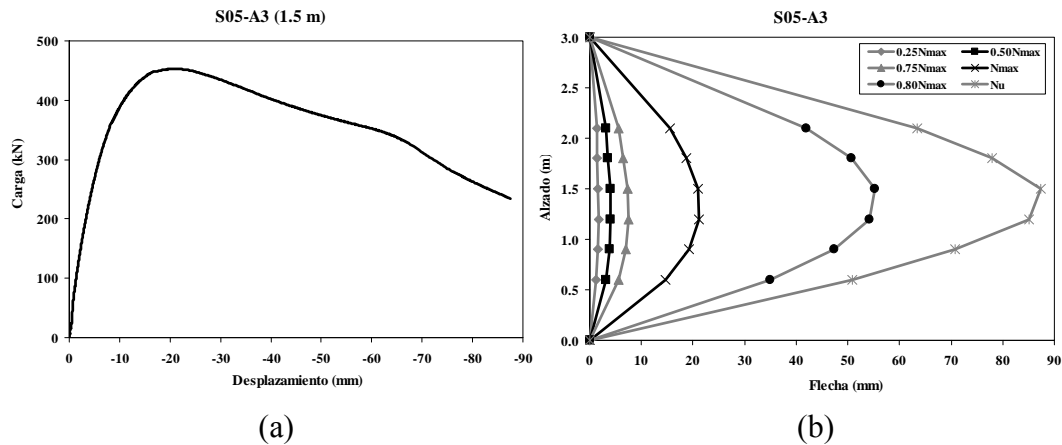


Figura 5.7. Soporte S05-A3; a. Carga-flecha para la sección central; b. Deformada del soporte para distintos niveles de carga.

En la figura 5.8 se representan el diagrama carga flecha en las direcciones (x, y) del centro de gravedad de la sección central, y la deformada a lo largo de la longitud de la pieza en los dos ejes coordenados para distintos niveles de carga del soporte S01-C3 (C3_α4_β1_εh2_λ24_HAR_ρ1) sometido a esfuerzos de flexo-compresión esviada.

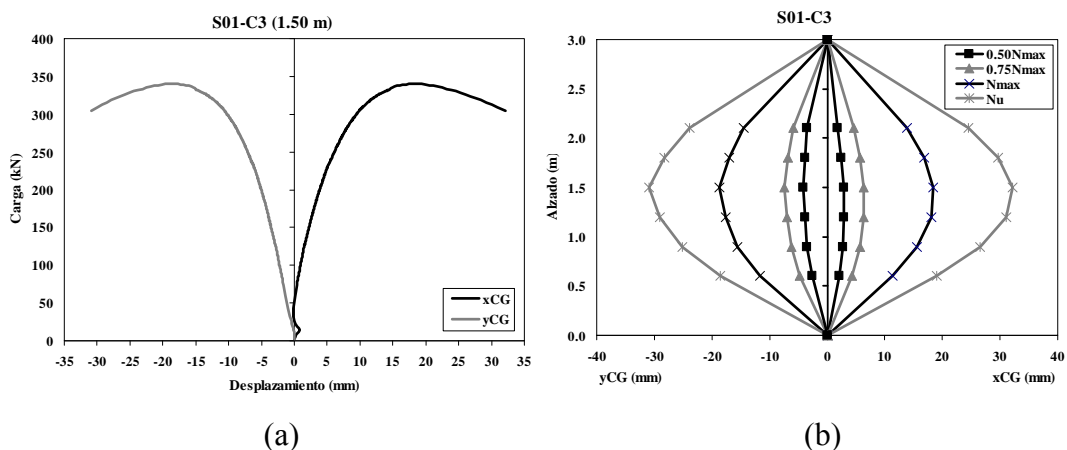


Figura 5.8. Soporte S01-C3; a. Carga-flecha para la sección central; b. Deformada del soporte para distintos niveles de carga.

Observando los registros de los captadores de desplazamiento para el ensayo S01-C3 (figura 5.8) se observa una gran simetría de los desplazamientos obtenidos respecto a los dos ejes (x, y) debido a las características del ensayo. En este ensayo, a diferencia de lo ocurrido con el soporte S05-A3, el soporte rompió poco después de alcanzar la

carga máxima, de una manera más frágil no presentando una rama de descenso importante.

Además, en los soportes sometidos a flexo-compresión esviada, se puede también representar el desplazamiento en planta del centro de gravedad de la sección transversal del soporte en cualquiera de las secciones instrumentadas con captadores de desplazamiento. En la figura 5.9 se muestra, a modo de ejemplo, el desplazamiento en planta de la sección central del soporte S01-C3.

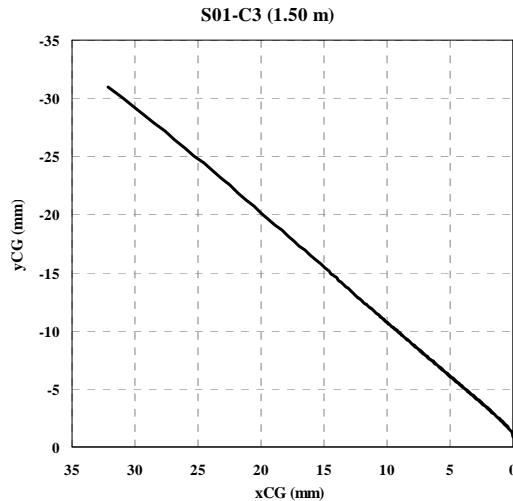


Figura 5.9. Desplazamiento en planta de la sección central del soporte S01-C3.

En el Anejo B de este trabajo se presentan para cada uno de los ensayos del programa experimental los resultados de las medidas directas más importantes realizadas.

5.4. Comportamiento de los soportes

A continuación se describen los tipos de comportamiento y observaciones que se han registrado durante los ensayos del programa experimental, así como la influencia de las variables analizadas en este comportamiento.

5.4.1. Flexo-compresión recta

En la tabla 5.3 se muestra, a modo de resumen, el comportamiento observado para todos los ensayos sometidos a flexo-compresión recta que han sido ejecutados en el programa experimental (columnas 2, 3 y 4). Además, se presentan las flechas en la sección de máximo momento total de cada soporte (sección crítica) y los modos de fallo según los criterios definidos a continuación en los apartados 5.4.1.a y 5.4.1.b para las situaciones de carga máxima (N_{max}) y última (N_u) de los soportes sometidos a esfuerzos de flexo-compresión recta (columnas 5 a 8).

Con el objeto de analizar el comportamiento del soporte hasta la rotura se realizan las siguientes observaciones:

- En los soportes cuya carga está muy centrada ($\beta = -0.5$ ó 0 y $e_2/h = 0.1$ ó 0.2), no se ha observado ninguna fisura aparente durante el ensayo, los desplazamientos son muy pequeños y no es hasta que se alcanza la situación de carga máxima cuando se produce una rotura explosiva (figura 5.10.a). En concreto, este comportamiento se ha producido en nueve casos (tabla 5.3, columna 2), observándose que esta rotura es más frecuente en soportes fabricados con hormigón de alta resistencia.

Soporte (1)	Observaciones			Situación de carga máxima (N_{max})		Situación de carga última (N_u)	
	Rotura explosiva (2)	Salto de Rec. (3)	Pandeo de la armadura (4)	$\delta_{N_{max}}$ (m) (5)	Modo de fallo (*) (6)	δ_{N_u} (m) (7)	Modo de fallo (*) (8)
S01-A1	Sí	Sí	No	0.0183	I/E	0.0261	A/C
S02-A1	Sí	Sí	No	0.0167	I/E	0.0225	A/C
S03-A1	No	Sí	No	0.0161	I	0.1000	A/T
S04-A1	Sí	Sí	No	0.0184	I/E	(**)	(**)
S05-A1	Sí	Sí	Sí	0.0248	I/C	0.0345	A/C
S06-A1	Sí	Sí	Sí	0.0251	I/C	0.0462	A/C
S07-A1	No	Sí	No	0.0174	I/E	0.1085	A/T
S08-A1	No	Sí	No	0.0294	I/E	0.1349	A/T
S09-A1	No	Sí	No	0.0204	I/E	0.1269	A/T
S10-A1	No	Sí	No	0.0550	A/T	0.1331	A/T
S11-A1	No	Sí	Sí	0.0307	I/C	0.0555	A/T
S12-A1	No	Sí	No	0.0451	A/T	0.0680	A/T
S01-A2	No	No	No	0.0169	I/E	0.0823	A/T
S02-A2	No	No	No	0.0148	I/E	0.0760	A/T
S03-A2	No	No	No	0.0225	I/E	0.0928	A/T
S04-A2	Sí	No	No	0.0112	I/E	0.0245	A/C
S05-A2	No	No	No	0.0172	I/E	0.0843	A/T
S06-A2	No	No	No	0.0184	I/E	0.0742	A/T
S07-A2	Sí	Sí	Sí	0.0187	I/C	0.0339	A/C
S08-A2	Sí	Sí	Sí	0.0199	I/C	0.0406	A/C
S01-A3	No	Sí	No	0.0189	I/E	0.0810	A/T
S02-A3	No	Sí	No	0.0216	I/E	0.0868	A/T
S03-A3	No	Sí	No	0.0498	I/T	0.0850	A/T
S04-A3	Sí	Sí	No	0.0172	I/E	0.0225	A/C
S05-A3	No	Sí	No	0.0192	I/E	0.0851	A/T
S06-A3	No	Sí	No	0.0213	I	0.0809	A/T
S01-A4	No	No	No	0.0164	I/E	0.0916	A/T
S02-A4	No	No	No	0.0156	I/E	0.0944	A/T
S03-A4	No	No	No	0.0369	I/E	0.1057	A/T
S04-A4	No	No	No	0.0114	I/E	0.0841	A/T
S05-A4	No	No	No	0.0162	I/E	0.0833	A/T
S06-A4	No	No	No	0.0183	I	0.0811	A/T

(*) I/T y I/C: Inestabilidad por plastificación de la armadura traccionada o comprimida respectivamente;
I: Inestabilidad; I/E: Inestabilidad elástica; A/T: Agotamiento por tracción; A/C: Agotamiento por compresión.

(**) Ensayo interrumpido antes de alcanzar la carga última.

Tabla 5.3. Observaciones y resultados (flexo-compresión recta).

- En el resto de soportes se ha observado que se produce una fisuración distribuida a lo largo de toda su longitud (figura 5.10.b), dando lugar a grandes desplazamientos previos a la rotura. En general, dichas fisuras aparecen a partir del momento en que se registran deformaciones de tracción en la armadura. En los soportes con una relación entre excentricidades (β) de 0.5 y excentricidades relativas (e_2/h) de 0.2 ó 0.4 las primeras fisuras suelen aparecer para bajos niveles de carga. Además en estas situaciones, tras alcanzar la situación de carga máxima, la deformación del soporte se concentra en la sección crítica (máximo momento total), formándose una rótula plástica. En este caso, conforme disminuye la carga aplicada, la curvatura se acumula en la sección crítica reduciéndose en el resto de las secciones (figura 5.10.b). Este tipo de situación proporciona un comportamiento más dúctil del soporte.

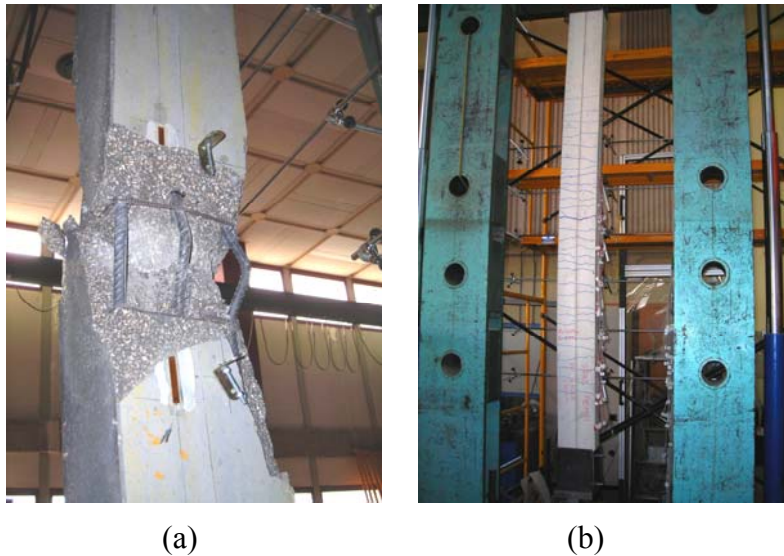


Figura 5.10. Tipos de rotura: a. Frágil: salto de recubrimiento y pandeo de la armadura comprimida (S05-A1); b. Dúctil: fisuración distribuida y formación de rótula plástica (S03-A2).

- En todos los casos, se ha observado que la forma de la deformada para la situación de carga máxima y última tiene una simple curvatura. (figura 5.11). Aunque la relación entre excentricidades (β) sea negativa y la deformada de primer orden si tenga doble curvatura, los efectos de segundo orden modifican dicha forma, no observándose ningún punto de inflexión a lo largo de la longitud del soporte para estas situaciones de carga.
- En general, se ha observado un salto de recubrimiento importante tras alcanzarse la situación de rotura en los soportes fabricados con hormigón de alta resistencia (figura 5.10.a) y en los soportes fabricados con hormigón convencional de esbeltez geométrica (λ_g) igual a 20 (S07-A2 y S08-A2) sometidos a una carga muy centrada ($\beta = 0$ y $e_2/h = 0.1$ y 0.2).

Según Collins et al. (1993) [22] en los soportes fabricados con hormigón de alta resistencia, el salto de recubrimiento en rotura está asociado a la formación de micro fisuras en el plano de la armadura longitudinal, lo que da lugar a una reducción en la capacidad resistente del soporte. Los soportes con valores de excentricidad relativa (e_2/h) iguales a 0.1 y 0.2, o con excentricidades en sentidos opuestos en cada extremo ($\beta = -0.5$) presentaron mayores saltos de recubrimiento (tabla 5.3, columna 4).

- En los soportes más esbeltos ($\lambda_g = 20$) y con valores de excentricidades relativas (e_2/h) iguales a 0.1 y 0.2, se observó, que para la situación de carga última (N_u), en rotura, la armadura comprimida pandeaba (tabla 5.3, columna 4 y figura 5.10.a).

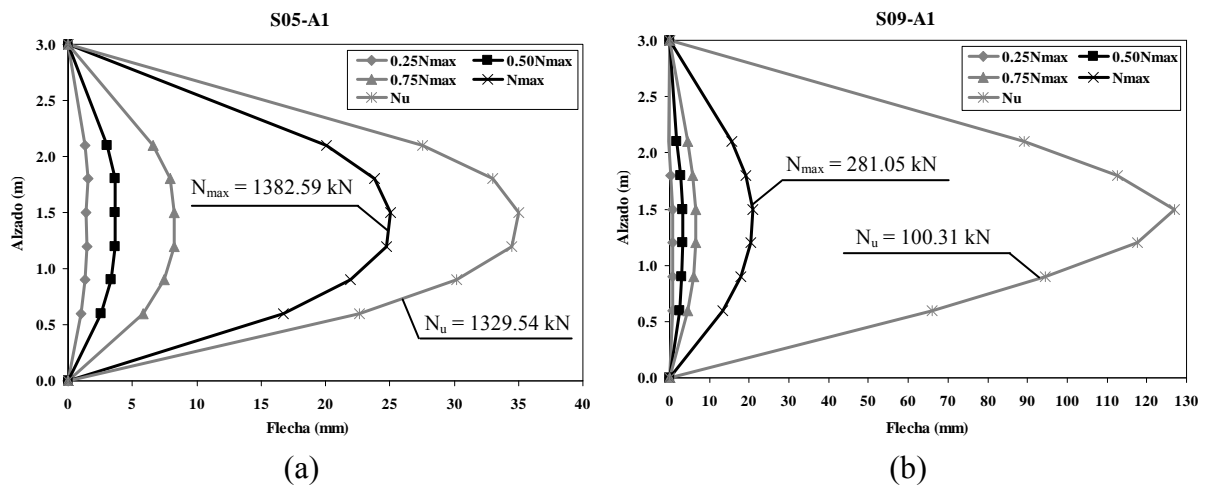


Figura 5.11. Tipos de deformada en el soporte; a Sin formación de rótula plástica (Soporte S05-A1); b. Con formación de la rótula plástica (Soporte S09-A1).

5.4.1.a. Modo de fallo en situación de carga máxima (N_{max})

Para identificar el modo de fallo en la situación de carga máxima (Agotamiento o Inestabilidad) se ha aplicado el criterio basado en fuerzas propuesto por Pallares et al. (2008) [49], según el cual para cada ensayo se representa en un mismo gráfico el esfuerzo axial aplicado en el soporte y el momento flector total (teniendo en cuenta los efectos de segundo orden) en la sección más desfavorable frente al desplazamiento. Para diferenciar entre el agotamiento (A) y la inestabilidad (I) del soporte se aplica el siguiente criterio: el tipo de fallo es por inestabilidad si en el instante en que se alcanza la carga máxima axial (N_{max}) el momento flector total es creciente (figura 5.12.a). En caso contrario, si se alcanza simultáneamente el máximo en carga axial y en momento totales para el mismo desplazamiento, el tipo de fallo será por agotamiento frente a sollicitaciones normales (figura 5.12.b).

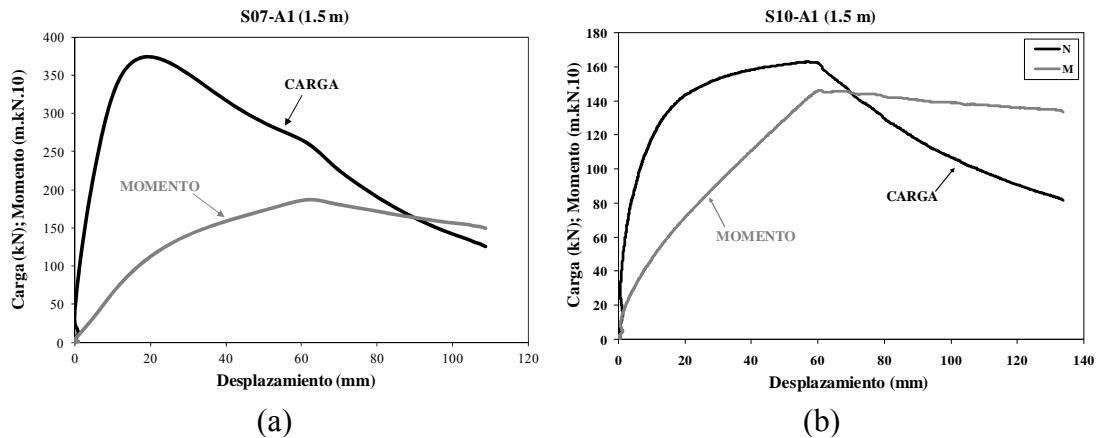


Figura 5.12. Modos de fallo: a. Inestabilidad (Soporte S07-A1); b. Agotamiento (Soporte S10-A1).

En la tabla 5.4 se presentan los valores medios de las deformaciones registradas para el acero en la cara traccionada o menos comprimida (ε_{ST}), para el acero de la cara comprimida (ε_{SC}) y para el hormigón (ε_{Cmax}), en las situaciones de carga máxima y carga última correspondientes a la sección de máximo momento total (sección crítica). Debido a que la posición de la sección crítica difiere en cada situación (de carga máxima y última), se indica su posición para ambos casos, señalándose que dicha sección crítica tiende a ubicarse en la sección central del soporte cuando se alcanza la carga última.

Con el fin de determinar con más precisión el tipo de fallo, además de aplicar el criterio propuesto por Pallares et al. (2008) [49], se ha analizado para la situación de carga máxima y carga última, el estado de deformaciones en la sección crítica del soporte (tabla 5.4) identificándose los siguientes modos de fallo (tabla 5.3):

- a) El modo de fallo por inestabilidad puede clasificarse en tres tipos:
 - Por una modificación substancial de la rigidez del soporte, bien por plastificación de la armadura de tracción (I/T), bien por plastificación de la armadura de compresión (I/C). Y si la inestabilidad se produce sin que los materiales plastifiquen, se clasificará como inestabilidad elástica (I/E).
- b) El modo de fallo por agotamiento puede clasificarse en tres tipos:
 - Agotamiento por tracción (A/T) si la armadura más traccionada ha plastificado. En caso contrario se clasifica como agotamiento por compresión del hormigón (A/C).

En los soportes (S03-A1, S06-A3 y S06-A4) no se ha identificado el tipo de inestabilidad (I) en situación de carga máxima por hallarse la sección crítica en una sección transversal no instrumentada con bandas extensométricas.

Tal y como puede observarse, comparándose la tabla 5.3 y la tabla 5.4, la gran mayoría de los soportes alcanzan la situación de inestabilidad para la situación de carga

máxima sin haber llegado a plastificar los materiales (I/E), a excepción de los soportes de esbeltez 20 y un único soporte de esbeltez 30 (S03-A3) cuya excentricidad relativa es alta ($\beta = 0$ y $e_2/h = 0.4$). Además, para la situación de carga última, únicamente dos soportes (S10-A1 y S12-A1) de esbeltez 30 y 20 respectivamente y de excentricidad alta ($\beta = 0.5$ y $e_2/h = 0.4$) fallan por agotamiento por tracción.

Soporte	Situación de carga máxima (N_{max})				Situación de carga última (N_u)			
	Posición sección crítica (m) (*)	ϵ_{ST} (‰)	ϵ_{SC} (‰)	$\epsilon_{C,max}$ (‰)	Posición sección crítica (m) (*)	ϵ_{ST} (‰)	ϵ_{SC} (‰)	$\epsilon_{C,max}$ (‰)
S01-A1	1.20	0.078	1.522	1.912	1.20	-0.235	1.672	2.220
S02-A1	0.90	-0.055	1.616	1.957	0.90	-0.357	1.725	2.206
S03-A1	0.60	-	-	-	1.20	-4.411	3.916	4.754
S04-A1	1.20	0.041	1.410	1.697	(**)	(**)	(**)	(**)
S05-A1	1.20	0.096	3.117	3.270	1.20	-0.666	3.555	4.113
S06-A1	0.90	-0.821	2.461	3.214	1.20	-2.446	3.722	4.396
S07-A1	0.90	-0.234	1.216	1.556	1.50	-3.610	3.536	4.269
S08-A1	0.90	-1.422	1.071	1.924	1.20	-3.779	4.632	5.155
S09-A1	1.20	-0.578	0.902	1.484	1.50	-4.586	4.786	5.287
S10-A1	1.20	-3.308	1.415	2.244	1.50	-8.211	3.854	4.624
S11-A1	1.20	-1.146	2.213	3.105	1.50	-3.773	3.730	4.574
S12-A1	1.20	-4.941	1.889	3.185	1.20	-5.559	1.590	3.753
S01-A2	1.20	-0.019	1.139	1.640	1.50	-3.586	4.365	4.491
S02-A2	0.90	-0.166	1.060	1.377	1.50	-4.814	3.977	4.386
S03-A2	0.90	-0.992	1.025	1.522	1.20	-7.945	3.861	4.752
S04-A2	0.90	0.375	1.374	1.548	1.20	-0.074	1.855	2.363
S05-A2	1.20	-0.063	1.282	1.574	1.20	-5.705	4.585	4.871
S06-A2	0.90	-0.784	1.190	1.700	1.20	-5.583	2.928	5.420
S07-A2	1.20	0.263	2.365	2.656	1.20	-0.814	4.314	4.414
S08-A2	0.90	-0.372	2.300	2.744	1.20	-1.816	4.187	4.511
S01-A3	1.20	0.124	1.332	1.611	1.50	-3.995	2.562	4.787
S02-A3	1.20	-0.484	1.215	1.593	1.50	-8.323	2.126	3.496
S03-A3	1.20	-3.263	1.058	2.586	1.20	-4.482	2.256	4.398
S04-A3	1.20	0.169	1.593	1.760	1.20	-0.042	1.749	2.020
S05-A3	0.90	-0.574	1.286	1.278	1.20	-5.710	1.239	4.790
S06-A3	0.60	-	-	-	1.20	-6.502	3.562	4.448
S01-A4	1.20	0.028	1.470	1.700	1.50	-5.040	-3.001	3.569
S02-A4	0.90	-0.133	1.255	1.465	1.50	-6.723	4.917	5.001
S03-A4	1.20	-1.512	1.480	2.150	1.20	-3.002	5.168	5.274
S04-A4	0.90	0.384	1.572	1.747	1.50	-5.119	3.956	4.223
S05-A4	0.90	-0.219	1.342	1.728	1.20	-3.228	3.789	4.074
S06-A4	0.60	-	-	-	1.20	-9.118	3.963	4.240

(*) Medida desde el extremo inferior del soporte

(**) Ensayo interrumpido antes de alcanzar la carga última.

Tabla 5.4. Deformaciones de los materiales (flexo-compresión recta).

5.4.1.b. Modo de fallo en situación de carga última (N_u)

También, se ha analizado para la situación de carga última el estado de deformaciones en la sección crítica del soporte (tabla 5.4), identificándose el modo de fallo por agotamiento (tabla 5.3) conforme a los criterios definidos anteriormente.

Tal y como era de esperar los soportes con excentricidad pequeña ($\beta = -0.5$ ó 0 y $e_2/h = 0.1$ ó 0.2) agotan por compresión del hormigón para la cuantía longitudinal (ρ_l) de 2.26% sin plastificar la armadura traccionada. Sin embargo, para la cuantía del 3.39%, los soportes agotan por tracción, a excepción del soporte S04-A3 que se encuentra muy comprimido. Al incrementar la armadura dispuesta en la cara comprimida (del 1.13% al 1.69%) se mejora la ductilidad del soporte y la capacidad resistente del mismo al plastificar la armadura traccionada antes de alcanzar la rotura de la sección. Este comportamiento es independiente del tipo de hormigón.

Se ha observado que en los soportes cuyo modo de fallo es por agotamiento por tracción (A/T), se produce una fisuración distribuida a lo largo de la pieza y se genera una rótula plástica tras alcanzar la carga máxima en el soporte. Sin embargo, en los soportes que agotan por compresión (A/C), la rotura es de carácter explosivo.

Por otra parte, puede observarse en la tabla 5.4 que las deformaciones en la cara comprimida de la sección transversal llegan a alcanzar un valor del 5.42‰ en los soportes de hormigón convencional y del 5.28‰ en los soportes de hormigón de alta resistencia. Estos valores son superiores a los señalados como deformación última en flexo-compresión en la EHE-08 [23], en el EC-2 (2004) [29] y en el ACI-318 (08) [1].

En la figura 5.13, se muestra la relación entre el axil reducido (v) y el momento total reducido (μ) correspondiente a la sección crítica del soporte para la situación de carga máxima de los ensayos experimentales. Se muestran las distintas respuestas del soporte variando la esbeltez geométrica λ_g (20 y 30), la excentricidad relativa e_2/h (0.1, 0.2 y 0.4), la cuantía geométrica de armadura longitudinal ρ_l (2.26% y 3.39%) y la resistencia del hormigón f_c (HC y HAR). Además, se ha representado el diagrama de interacción de la sección transversal ($\lambda_g = 0$) obtenido con el EC-2 (2004) [29], tomando el valor de la resistencia del hormigón el valor promedio para los soportes fabricados con hormigón convencional (30.84 MPa) y de alta resistencia (89.44 MPa). Se han indicado los puntos correspondientes a la situación de carga máxima (v_{max}) y de momento total máximo (μ_{Mmax}).

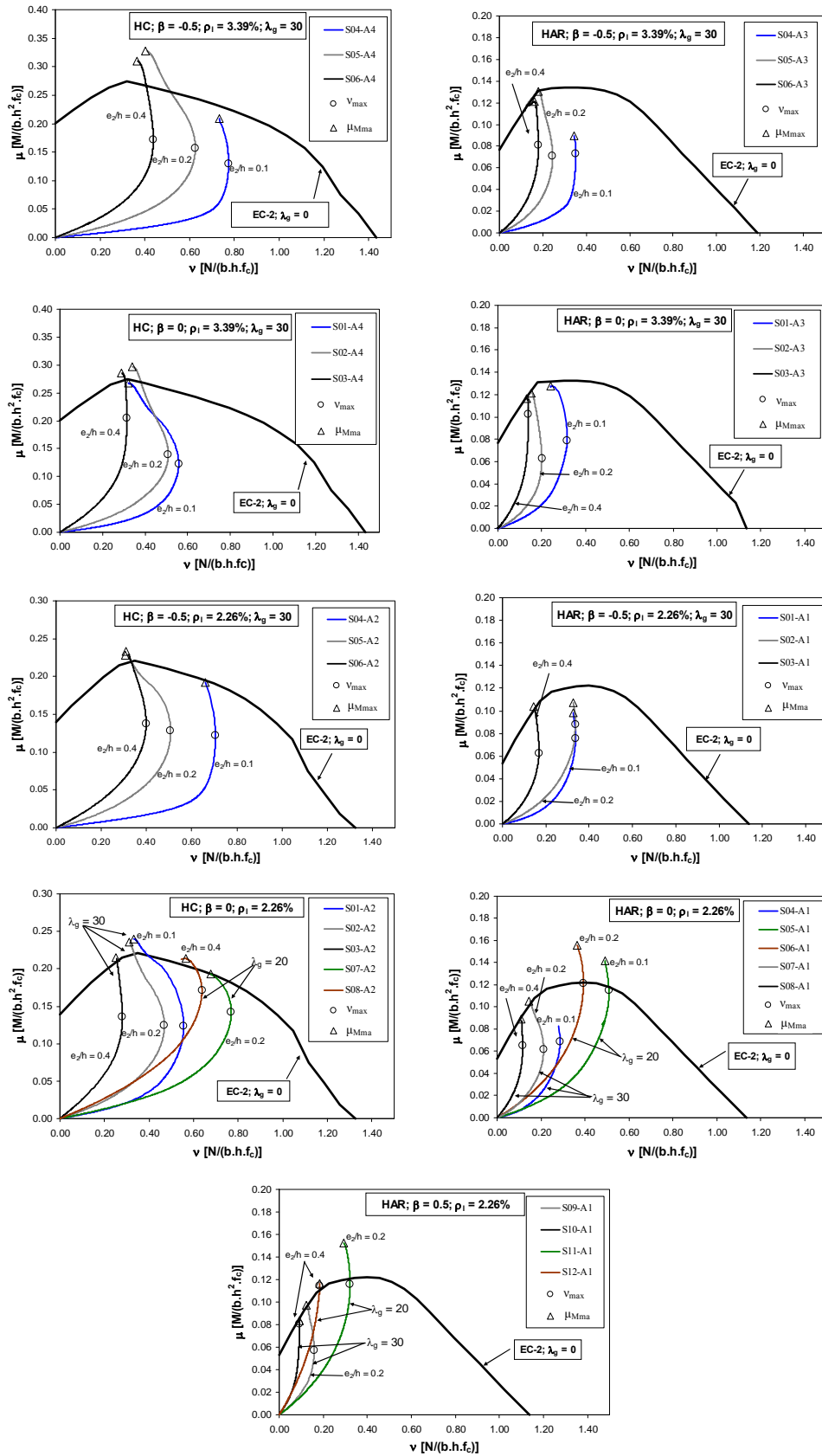


Figura 5.13. Diagramas momento-axil reducidos (μ - v) de los ensayos experimentales y diagramas de interacción de la sección transversal ($\lambda_g = 0$) según el EC-2 (2004) [29]; flexo-compresión recta.

En esta figura, se observa que los esfuerzos de agotamiento obtenidos en los ensayos experimentales (μ_{Mmax}) son similares a los calculados con el EC-2 (2004) [29], y se corresponden a las situaciones de agotamiento señaladas. Únicamente, en el caso de soportes fabricados con hormigón de alta resistencia y esbeltez 20 y los soportes S04-A4 y S05-A4 fabricados con hormigón convencional, se observa una mayor discrepancia entre los resultados. La subestimación de la deformación última en flexo-compresión en los hormigones por parte de las normativas puede ser una posible causa de esta diferencia. En estos ensayos la deformación del hormigón medida llega a alcanzar un valor del 4.57‰. El considerar una mayor deformación última, significa que en la armadura comprimida se puede tener en cuenta una mayor tensión y por consiguiente el momento de agotamiento calculado con el método simplificado se incrementa. En todo caso las normativas están del lado de la seguridad.

5.4.2. Flexo-compresión esviada

En la tabla 5.5 se muestra el resumen de las observaciones y los resultados que se han registrado en los 36 soportes sometidos a esfuerzos de flexo-compresión esviada.

Además, en la tabla 5.6, se presentan los modos de fallo de los soportes para las situaciones de carga mencionadas y los valores medios de las deformaciones registradas para el acero en la cara traccionada o menos comprimida (ϵ_{ST}), para el acero de la cara comprimida (ϵ_{SC}) y la deformación máxima del hormigón ($\epsilon_{C,max}$) obtenidas con la regresión lineal de los valores registrados por las galgas extensométricas de acero y hormigón para cada instante de carga. Debido a que la posición de la sección crítica difiere en cada situación (de carga máxima y última), se indica su posición para ambos casos, señalándose que dicha sección crítica tiende a ubicarse en la sección central del soporte cuando se alcanza la carga última.

Soporte	Observaciones			Situación de carga máxima (N _{max})				Situación de carga última (N _u)			
	Rotura Explosiva	Salto de Rec.	Pandeo de la armadura	δ _{xNmax} (m)	Sección (m) (*)	δ _{yNmax} (m)	Sección (m) (*)	δ _{xNu} (m)	Sección (m) (*)	δ _{yNu} (m)	Sección (m) (*)
S01_B1	Sí	Sí	No	0.0206	1.50	0.0036	1.20	0.0281	1.50	0.0056	1.20
S02_B1	No	Sí	No	0.0198	1.20	0.0076	1.50	0.0508	1.50	0.0212	1.50
S03_B1	No	Sí	No	0.0319	1.20	0.0184	1.50	0.0539	1.20	0.0307	1.50
S04_B1	No	Sí	No	0.0198	1.20	0.0076	1.50	0.0550	1.50	0.0232	1.50
S05_B1	No	Sí	No	0.0387	1.50	0.0134	1.50	0.0747	1.50	0.0206	1.50
S06_B1	Sí	Sí	Sí	0.0167	1.50	0.0054	1.20	0.0239	1.50	0.0107	1.20
S07_B1	No	Sí	Sí	0.0163	1.20	0.0074	1.20	0.0263	1.20	0.0126	1.20
S08_B1	Sí	Sí	Sí	0.0242	1.50	0.0058	1.50	0.0341	1.50	0.0103	1.50
S02_B2	No	No	No	0.0180	1.50	0.0052	1.50	0.0453	1.50	0.0208	1.50
S03_B2	No	No	No	0.0207	1.20	0.0070	0.90	0.0459	1.20	0.0179	1.20
S04_B2	No	No	No	0.0431	1.50	0.0141	1.50	0.0616	1.50	0.0309	1.50
S05_B2	No	No	No	0.0235	1.50	0.0027	1.50	0.0600	1.50	0.0124	1.50
S01_C1	No	Sí	No	0.0231	1.50	0.0039	1.20	0.0570	1.50	0.0087	1.20
S02_C1	No	Sí	No	0.0420	1.50	0.0114	1.20	0.0809	1.50	0.0182	1.20
S03_C1	Sí	Sí	Sí	0.0185	1.50	0.0030	1.20	0.0264	1.50	0.0073	1.20
S04_C1	Sí	Sí	Sí	0.0149	1.20	0.0124	1.50	0.0228	1.20	0.0188	1.50
S02_C2	No	Sí	No	0.0345	1.50	0.0208	1.50	0.0504	1.50	0.0305	1.50
S03_C2	Sí	Sí	Sí	0.0140	1.50	0.0127	1.50	0.0178	1.50	0.0161	1.50
S04_C2	Sí	Sí	Sí	0.0151	1.50	0.0157	1.50	0.0250	1.50	0.0255	1.50
S05_C2	No	Sí	Sí	0.0234	1.50	0.0249	1.50	0.0297	1.20	0.0320	1.50
S06_C2	Sí	Sí	Sí	0.0066	1.20	0.0173	1.50	0.0113	1.20	0.0245	1.50
S07_C2	Sí	Sí	Sí	0.0210	1.50	0.0104	1.20	0.0286	1.50	0.0182	1.50
S01_C3	No	Sí	Sí	0.0183	1.50	0.0186	1.50	0.0321	1.50	0.0309	1.50
S02_C3	No	Sí	Sí	0.0315	1.50	0.0274	1.50	0.0417	1.50	0.0365	1.50
S03_C3	Sí	Sí	Sí	0.0116	1.50	0.0166	1.50	0.0149	1.50	0.0204	1.50
S04_C3	No	Sí	Sí	0.0234	1.50	0.0093	1.50	0.0320	1.50	0.0141	1.50
S01_C4	No	Sí	Sí	0.0211	1.50	0.0052	1.20	0.0380	1.50	0.0138	1.50
S02_C4	No	No	No	0.0262	1.50	0.0028	1.50	0.0611	1.50	0.0115	1.50
S01_C5	No	Sí	Sí	0.0173	1.50	0.0051	1.20	0.0255	1.50	0.0108	1.50
S02_C5	No	No	No	0.0143	1.50	0.0124	1.50	0.0309	1.50	0.0285	1.50
S03_C5	No	No	No	0.0201	1.50	0.0174	1.50	0.0477	1.20	0.0455	1.50
S04_C5	Sí	Sí	Sí	0.0034	1.20	0.0139	1.50	0.0068	1.50	0.0276	1.50
S05_C5	Sí	Sí	Sí	0.0218	1.50	0.0034	1.50	0.0373	1.50	0.0110	1.50
S01_C6	No	Sí	Sí	0.0218	1.50	0.0030	1.50	0.0458	1.50	0.0164	1.50
S02_C6	No	Sí	Sí	0.0203	1.50	0.0111	1.50	0.0378	1.50	0.0255	1.50
S03_C6	No	Sí	Sí	0.0135	1.20	0.0104	1.20	0.0268	1.20	0.0254	1.20

(*) Medida desde el extremo inferior del soporte.

Tabla 5.5. Observaciones y flechas máximas (flexo-compresión esviada).

Soporte	Situación de carga máxima (N_{max})					Situación de carga última (N_u)				
	Sección Crítica (m) (*)	ϵ_{ST} (‰)	ϵ_{SC} (‰)	$\epsilon_{C,max}$ (‰)	Modo de fallo (**)	Sección Crítica (m) (*)	ϵ_{ST} (‰)	ϵ_{SC} (‰)	$\epsilon_{C,max}$ (‰)	Modo de fallo (**)
S01-B1	1.20	0.03	2.06	2.65	I/E	1.20	-0.43	2.47	3.21	A/C
S02-B1	0.90	-0.65	1.98	2.72	I/E	1.20	-2.70	3.95	5.33	A/C
S03-B1	0.90	-3.12	1.99	3.74	I/T	1.20	-8.31	4.73	6.07	A/T
S04-B1	1.20	-1.19	1.75	2.59	I/E	1.50	-15.35	4.61	9.06	A/T
S05-B1	1.20	-3.15	1.60	3.10	I/T	1.20	-8.79	1.61	4.99	A/T
S06-B1	0.90	0.17	2.47	2.93	I/C	1.20	-0.51	3.46	3.91	A/C
S07-B1	0.60	-	-	-	I	0.90	-1.39	3.04	4.15	A/C
S08-B1	1.50	-0.34	2.14	2.90	I/E	1.50	-1.42	2.93	4.01	A/C
S02-B2	0.90	-0.41	1.83	2.61	I/E	1.20	-2.86	5.24	6.23	A/C
S03-B2	0.60	-	-	-	I	0.90	-2.09	2.93	4.25	A/C
S04-B2	1.20	-2.84	2.15	3.50	I/T	1.20	-3.06	5.71	4.99	A/C
S05-B2	1.50	-0.51	1.69	1.77	I/E	1.50	-8.51	6.59	6.85	A/T
S01-C1	1.20	-1.02	1.63	2.36	I/E	1.50	-5.43	2.32	4.53	A/T
S02-C1	1.20	-3.29	1.76	3.26	I/T	1.20	-8.11	1.65	5.05	A/T
S03-C1	1.20	0.15	2.50	3.12	I/C	1.20	-0.54	2.76	3.94	A/C
S04-C1	0.90	-0.52	2.20	3.10	I/E	0.90	-1.43	2.49	4.03	A/C
S02-C2	1.20	-3.27	1.81	3.53	I/T	1.20	-7.71	3.98	5.64	A/T
S03-C2	1.20	-0.05	2.33	2.98	I/E	1.20	-0.39	3.02	3.54	A/C
S04-C2	0.90	-0.90	1.94	2.98	I/E	1.20	-2.21	3.09	3.38	A/C
S05-C2	0.90	-3.12	2.18	3.95	I/T	0.90	-5.52	3.00	5.63	A/T
S06-C2	1.20	0.08	2.50	3.06	I/C	1.20	-0.60	3.78	4.19	A/C
S07-C2	1.20	-0.29	2.35	3.01	I/E	1.20	-1.10	4.23	4.33	A/C
S01-C3	1.20	-1.31	1.93	2.95	I/E	1.50	-4.35	2.98	5.25	A/T
S02-C3	1.20	-2.91	1.85	3.45	I/T	1.20	-4.18	2.07	4.20	A/T
S03-C3	1.20	0.05	2.38	3.14	I/E	1.20	-0.25	2.81	3.63	A/C
S04-C3	1.50	-0.47	2.26	3.04	I/E	1.50	-1.26	2.52	3.80	A/C
S01-C4	1.50	-0.18	2.07	2.69	I/E	1.50	-2.00	2.15	4.70	A/C
S02-C4	1.50	-0.51	1.53	2.18	I/E	1.50	-5.04	6.85	7.12	A/T
S01-C5	1.20	0.16	2.29	2.89	I/E	1.20	-0.46	3.53	4.30	A/C
S02-C5	0.90	-0.69	1.90	2.71	I/E	1.20	-2.36	3.37	4.84	A/C
S03-C5	0.90	-1.76	1.97	3.20	I/E	0.90	-2.95	5.66	5.86	A/C
S04-C5	1.20	0.43	2.05	2.57	I/E	1.20	-0.34	3.56	4.18	A/C
S05-C5	1.50	-0.05	1.88	2.54	I/E	1.50	-2.66	5.92	6.86	A/C
S01-C6	1.50	-0.19	1.98	2.66	I/E	1.50	-4.68	5.77	7.53	A/C
S02-C6	1.50	-0.69	1.74	2.50	I/E	1.50	-3.57	5.37	6.21	A/C
S03-C6	0.60	-	-	-	I	1.20	-2.18	4.41	4.96	A/C

(*) Sección medida desde el extremo inferior del soporte

(**) I/T y I/C: Inestabilidad por plastificación de la armadura traccionada o comprimida respectivamente;
 I: Inestabilidad; I/E: Inestabilidad elástica;
 A/T: Agotamiento por tracción; A/C: Agotamiento por compresión.

Tabla 5.6. Deformaciones y modos de fallo (flexo-compresión esviada).

Con el objeto de analizar el comportamiento del soporte hasta la rotura de los soportes sometidos a flexo-compresión esviada se realizan las siguientes observaciones:

- En los soportes cuya carga está muy centrada ($\beta = -0.5$ ó 0 y $e_2/h = 0.1$ ó 0.2), no se ha observado ninguna fisura aparente durante el ensayo, los desplazamientos son muy pequeños y no es hasta que se alcanza la situación de carga máxima cuando se produce una rotura explosiva (figura 5.14.a). En concreto, este comportamiento se ha producido en 12 casos (tabla 5.5), observándose que esta rotura es más frecuente en soportes fabricados con hormigón de alta resistencia.
- En el resto de casos se ha observado que se produce una fisuración distribuida a lo largo de la longitud de la pieza (figura 5.14.b), dando lugar a grandes desplazamientos previos a la rotura. En general, dichas fisuras aparecen a partir del momento en que se registran deformaciones de tracción en la armadura. En los soportes con una relación de excentricidad (β) de 0.5 y excentricidades relativas (e_2/h) 0.2 ó 0.4 las primeras fisuras suelen aparecer para bajos niveles de carga.



(a)



(b)

*Figura 5.14. Tipos de rotura: a. Frágil: salto de recubrimiento (soporte S03-C1);
b. Dúctil: Fisuración distribuída (soporte S04-B2).*

- En general, se ha observado un salto del recubrimiento importante al alcanzarse la situación de rotura en los soportes fabricados con hormigón de alta resistencia (figura 5.14.a). Los soportes con valores de excentricidad relativa (e_2/h) iguales a 0.1 y 0.2 , ó con excentricidades en sentidos opuestos en cada extremo ($\beta = -0.5$) presentaron mayores saltos de recubrimiento.
- Los soportes con valores de excentricidad (e_2/h) iguales a 0.1 y 0.2 , de forma general, han presentado en la situación de rotura, un pandeo local de la

armadura longitudinal en la esquina más comprimida del soporte (tabla 5.5 y figura 5.14.a).

- En todos los casos, se ha observado que la forma de la deformada para la situación de carga máxima y última respecto a los dos ejes principales de la sección tiene una simple curvatura, tal y como se muestra en la figura 5.8.b. Aunque la relación de excentricidad (β) sea negativa y la deformada de primer orden si tiene doble curvatura, los efectos de segundo orden modifican dicha forma, no observándose ningún punto de inflexión a lo largo del soporte para estas situaciones de carga.

5.4.2.a. Modo de fallo en situación de carga máxima (N_{max})

Para identificar el modo de fallo en la situación de carga máxima (Agotamiento o Inestabilidad) se ha aplicado el mismo criterio definido en el apartado 5.4.1.a de este trabajo.

Según el criterio anteriormente explicado, todos los soportes sometidos a esfuerzos de flexo-compresión esviada, se encontraban en una situación de inestabilidad frente a solicitaciones normales para la situación de carga máxima (tabla 5.6).

En los soportes (S07-B1; S03-B2 y S03-C6) no se ha identificado el tipo de inestabilidad (I) por hallarse la sección crítica en una sección transversal no instrumentada con galgas extensométricas.

Tal y como puede observarse, la mayoría de soportes con grandes excentricidades ($e_2/h = 0.4$) alcanzan la situación de inestabilidad por la plastificación de la armadura más traccionada (I/T). Modo de fallo en situación de carga última (N_u)

También, se ha analizado para la situación de carga última el estado de deformaciones en la sección crítica del soporte (tabla 5.6), identificándose el modo de fallo de agotamiento conforme a los siguientes criterios:

- a) Agotamiento por tracción (A/T) - si la armadura más traccionada ha plastificado;
- b) Agotamiento por compresión (A/C) – si se produce el agotamiento de la sección por compresión del hormigón.

Tal y como era de esperar, todos los soportes con excentricidad pequeña ($e_2/h = 0.1$) agotan por compresión del hormigón. Los soportes con una excentricidad intermedia ($e_2/h = 0.2$), dependiendo de la relación entre excentricidades en extremos (β), pueden agotar bien por compresión del hormigón ($\beta = -0.5$ ó $\beta = 0$) o por plastificación de la armadura más traccionada ($\beta = 0.5$), con excepción del soporte S02-C6 que agota por compresión del hormigón pase a tener una relación entre excentricidades de $\beta = 0.5$. En los casos de soportes solicitados con una carga más

excéntrica ($e_2/h = 0.4$) el comportamiento en rotura depende del tipo de hormigón utilizado: para los soportes fabricados con hormigón convencional el agotamiento se da por compresión del hormigón, sin embargo, los soportes fabricados con hormigón de alta resistencia agotan por plastificación de la armadura más traccionada.

Cabe resaltar que, como en los casos de flexo-compresión recta, las bandas extensométricas ubicadas en el hormigón en las caras más comprimidas de la sección transversal, llegan a registrar valores de deformaciones por encima del 4.5% tanto en hormigón convencional como en hormigón de alta resistencia. Estos valores son superiores a los señalados como deformación última en flexo-compresión en la EHE-08 [23], en el EC-2 (2004) [29] y el ACI-318 (08) [1]

5.4.2.b. Desacoplamiento entre flectores

En los ensayos de flexo-compresión esviada, por una parte, a partir de los resultados obtenidos de las medidas registradas por las bandas extensométricas se puede obtener las ecuaciones del plano de deformación para cada nivel de carga y por consiguiente la posición y el ángulo de inclinación de la fibra neutra, tal y como se ha explicado en el apartado 5.2.

Por otra parte, a partir de las medidas registradas por los captadores de desplazamiento, descritas en el apartado 5.3, se obtiene de manera indirecta los momentos flectores de primer orden según los ejes principales de inercia ($M_x = N \cdot e_{0y}$; $M_y = N \cdot e_{0x}$) así como los momentos flectores totales según dichos ejes [$M_{tot,x} = N \cdot (e_{0y} + \delta_y)$; $M_{tot,y} = N \cdot (e_{0x} + \delta_x)$], siendo e_{0x} y e_{0y} las excentricidades de primer y δ_x y δ_y los desplazamientos totales para un determinado nivel de carga en una sección determinada según cada eje principal.

A partir de estas medidas se puede comparar la dirección del momento flector total aplicado sobre la sección, y obtenido como la composición vectorial de los flectores totales según cada eje principal, con la dirección de la fibra neutra. Por se tratar de una sección transversal cuadrada, si resulta que ambas direcciones son paralelas se puede verificar el desacoplamiento entre los flectores totales aplicados sobre dicha sección.

En la tabla 5.7 se representan los valores de los ángulos de inclinación de la fibra neutra (α_{FN}) y de los ángulos de inclinación del momento flector total (α_M) en la sección crítica (máximo momento total) para la situación de carga máxima (N_{max}) de los soportes sometidos a esfuerzos de flexo-compresión esviada ejecutados en el programa experimental. Se representan también la diferencia, en valor absoluto, entre los valores de α_{FN} y α_M y el ratio entre las dos medidas ($\xi_\alpha = \alpha_{FN}/\alpha_M$). Cuanto más próxima de cero sea la diferencia y más próximo a la unidad sea el ratio ξ_α , se tendrá un mayor paralelismo entre el momento flector aplicado y la dirección de la fibra neutra.

De los resultados de la diferencia entre los valores de α_{FN} y α_M y del ratio ξ_α , se puede observar, de manera general, un buen grado de paralelismo entre la fibra neutra y el eje del momento flector total, de lo que se deduce el desacoplamiento entre las direcciones de los momentos flectores en los ensayos experimentales realizados.

Soporte	α_{FN} (°)	α_M (°)	$ \alpha_{FN}-\alpha_M $ (°)	ξ_α	Soporte	α_{FN} (°)	α_M (°)	$ \alpha_{FN}-\alpha_M $ (°)	ξ_α	
S01_B1	13.41	13.45	0.04	1.00	S04_C2	41.20	44.50	3.30	0.93	
S02_B1	18.92	20.87	1.95	0.91	S05_C2	44.46	45.60	1.14	0.98	
S03_B1	24.92	26.32	1.40	0.95	S06_C2	64.46	66.70	2.24	0.97	
S04_B1	21.50	21.76	0.26	0.99	S07_C2	28.43	29.40	0.97	0.97	
S05_B1	19.90	20.86	0.96	0.95	S01_C3	43.42	42.20	1.22	1.03	
S06_B1	19.26	20.50	1.24	0.94	S02_C3	39.31	40.06	0.75	0.98	
S07_B1	(*)	(*)	(*)	(*)	S03_C3	57.21	55.80	1.41	1.03	
S08_B1	13.48	15.87	2.39	0.85	S04_C3	25.98	25.80	0.18	1.01	
S02_B2	14.51	19.53	5.02	0.74	S01_C4	15.44	13.90	1.54	1.11	
S03_B2	(*)	(*)	(*)	(*)	S02_C4	3.62	9.81	6.19	0.37	
S04_B2	15.08	20.26	5.18	0.74	S01_C5	19.43	25.08	5.65	0.77	
S05_B2	13.56	13.55	0.01	1.00	S02_C5	38.38	42.67	4.29	0.90	
S01_C1	10.34	13.07	2.73	0.79	S03_C5	41.34	43.38	2.04	0.95	
S02_C1	13.18	16.11	2.93	0.82	S04_C5	77.91	72.00	5.91	1.08	
S03_C1	12.72	14.45	1.73	0.88	S05_C5	8.00	14.84	6.84	0.54	
S04_C1	35.32	32.90	2.42	1.07	S01-C6	13.69	16.48	2.79	0.83	
S02_C2	31.99	32.42	0.43	0.99	S02-C6	29.31	32.59	3.28	0.90	
S03_C2	41.12	41.33	0.21	0.99	S03_C6	(*)	(*)	(*)	(*)	
C.V. = Coeficiente de variación;									Promedio	0.91
(*) Sección crítica no instrumentada con bandas extensométricas;									C.V.	0.17

Tabla 5.7. Comparación entre en ángulo de inclinación de la fibra neutra (α_{FN}) y el ángulo del flector total (α_M) para la sección crítica en situación de carga máxima (N_{max}).

Las observaciones descritas en los apartados anteriores serán consideradas para la calibración de modelos numéricos y métodos simplificados de análisis de soportes con estas características. En especial, se tendrá en cuenta la reducción de la capacidad resistente en soportes fabricados con hormigón de alta resistencia debido al salto de recubrimiento del hormigón asociado a la formación de micro fisuras durante la puesta en carga de la pieza.

5.5. Análisis de las variables estudiadas

En este apartado se muestran las conclusiones más relevantes en cuanto el análisis de las variables estudiadas.

Para facilitar la comprensión de los resultados se han definido tres series para los soportes sometidos a esfuerzos de flexo-compresión recta:

- Serie 1: soportes de esbeltez 30 y cuantía geométrica de armadura del 2.26%;
- Serie 2: soportes de esbeltez 30 y cuantía geométrica de armadura del 3.39%;
- Serie 3: soportes de esbeltez 20 y cuantía geométrica de armadura del 2.26%.

Para los soportes sometidos a esfuerzos de flexo-compresión esviada se han definido cuatro series dependiendo de la relación entre los ángulos de esviaje de la carga aplicada en los extremos del soporte:

- Serie 1: $\alpha_1 = \alpha_2 = 22.5^\circ$;
- Serie 2: $\alpha_1 = 0^\circ$; $\alpha_2 = 22.5^\circ$;
- Serie 3: $\alpha_1 = 0^\circ$; $\alpha_2 = 45^\circ$;
- Serie 4: $\alpha_1 = 22.5^\circ$; $\alpha_2 = 45^\circ$.

5.5.1. Influencia de la excentricidad adimensional (e_2/h)

El axil reducido correspondiente a la carga máxima [$v = N_{\max}/(b \cdot h \cdot f_c)$] en función de la excentricidad adimensional (e_2/h) para los soportes sometidos a esfuerzos de flexo-compresión recta y esviada se analiza a partir de la figura 5.15 y de la figura 5.16 respectivamente.

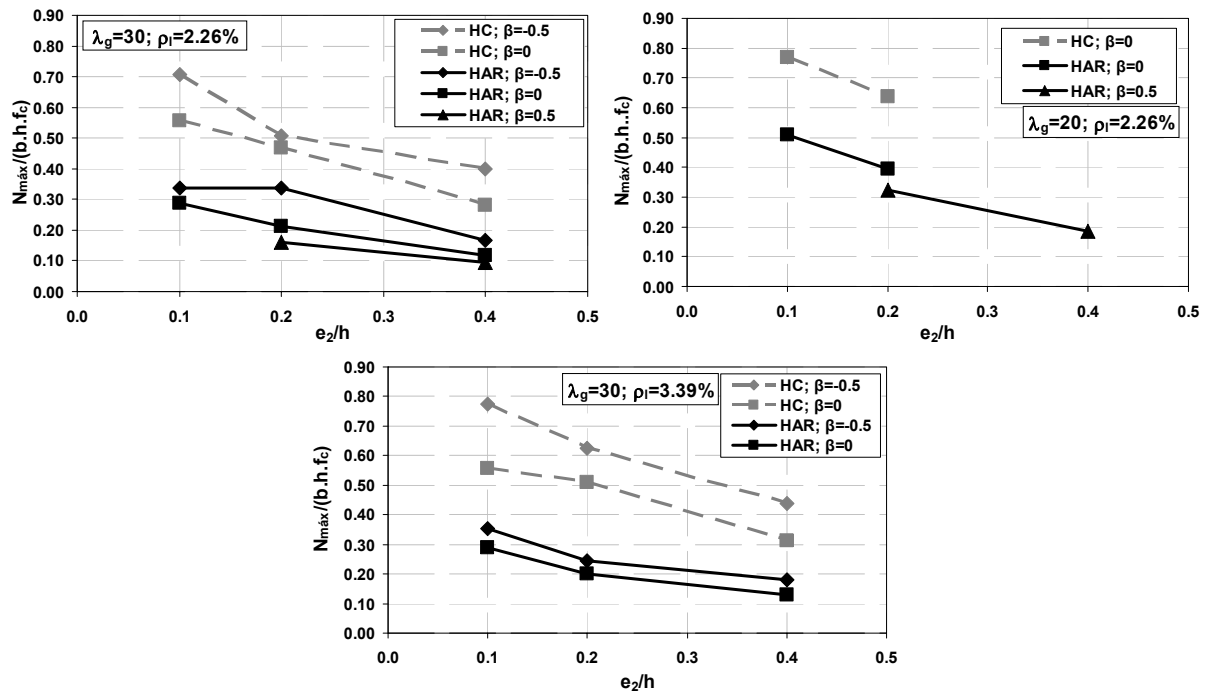


Figura 5.15. Influencia de la excentricidad adimensional (e_2/h): flexo-compresión recta.

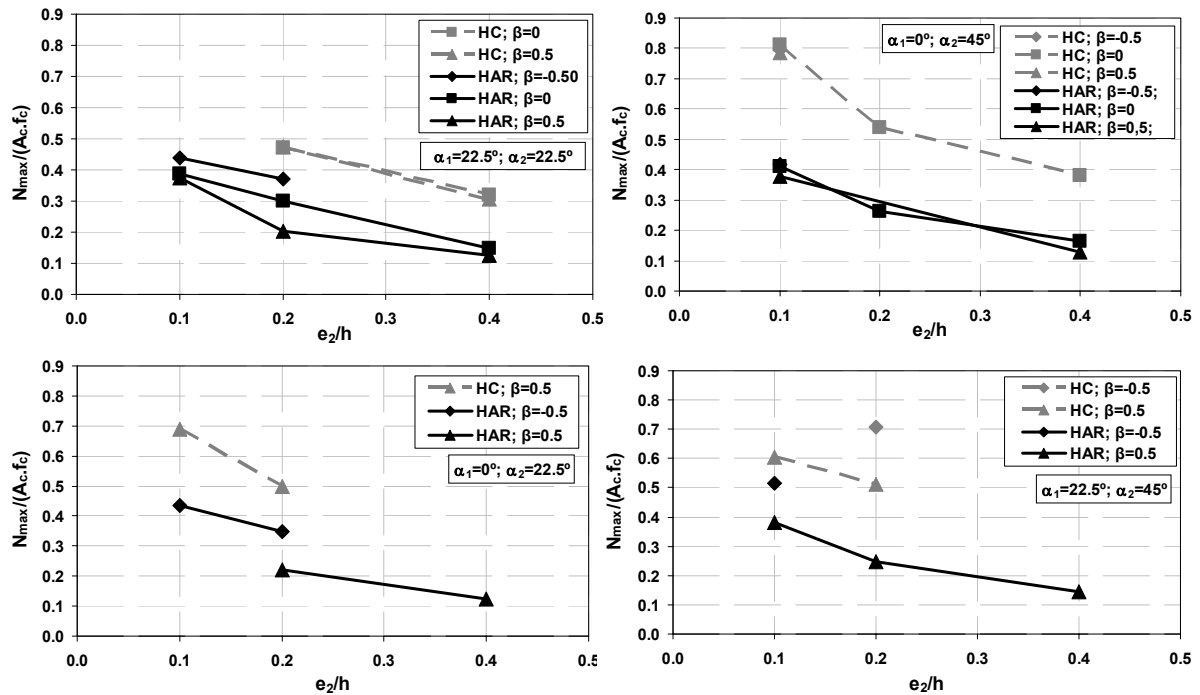


Figura 5.16. Influencia de la excentricidad adimensional (e_2/h): flexo-compresión esviada.

Tal y como era de esperar, el axil reducido decrece conforme se incrementa la excentricidad adimensional e_2/h , la relación de excentricidades en extremos β , la resistencia del hormigón f_c (HC y HAR) y la esbeltez del soporte λ_g , y decrece la cuantía de armadura ρ_l .

Se puede observar también que, en general, la diferencia de la capacidad resistente respecto a los distintos tipos de hormigón (HC y HAR), a la relación entre excentricidades β y a la combinación de ángulos de esviaje en extremos, se mantiene constante con el incremento de la excentricidad adimensional. Esta tendencia se observa tanto para los soportes sometidos a esfuerzos de flexo-compresión recta como esviada.

5.5.2. Influencia de la relación entre excentricidades en extremos (β)

En la figura 5.17 y en la figura 5.18 se muestra el axil reducido correspondiente a la carga axial máxima [$v = N_{max}/(b \cdot h \cdot f_c)$] en función de la relación entre excentricidades en extremos ($\beta = e_1/e_2$) para los soportes sometidos a esfuerzos de flexo-compresión recta y esviada respectivamente.

En general, se puede observar que la capacidad resistente de los soportes decrece conforme se incrementan los valores de la relación entre las excentricidades.

Sin embargo, en los soportes sometidos a esfuerzos de flexo-compresión esviada (figura 5.18) en los casos con excentricidad adimensional (e_2/h) igual a 0.1 en las serie 1 y 3 ($\alpha_1 = \alpha_2 = 22.5^\circ$ y $\alpha_1 = 0^\circ; \alpha_2 = 45^\circ$, respectivamente) y para los soportes fabricados con HC en la serie 1, apenas se observa variación de la capacidad resistente del soporte.

Este comportamiento puede deberse a los pequeños desplazamientos observados en estos casos en la situación de axil máximo, en donde toda la pieza se encuentra comprimida, caracterizándose por una situación preponderantemente de flexo-compresión esviada, pero con las componentes de las excentricidades en cada eje principal muy centradas.

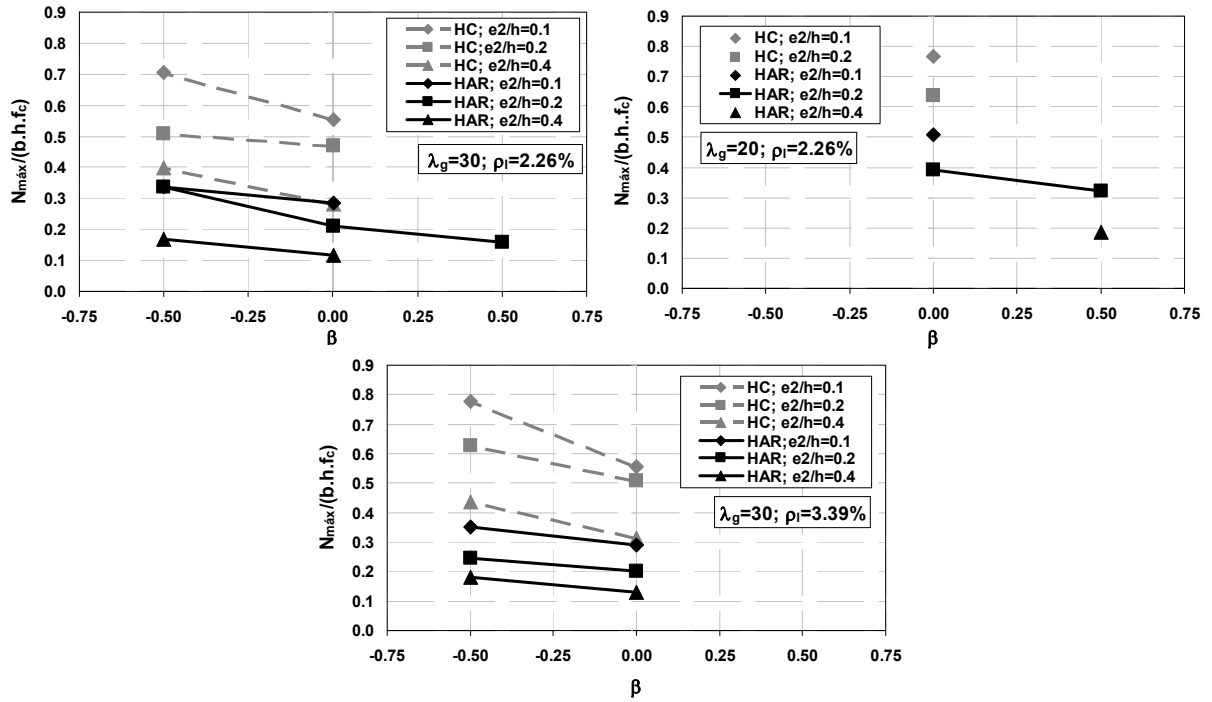


Figura 5.17. Influencia de la relación entre excentricidades (β): flexo-compresión recta.

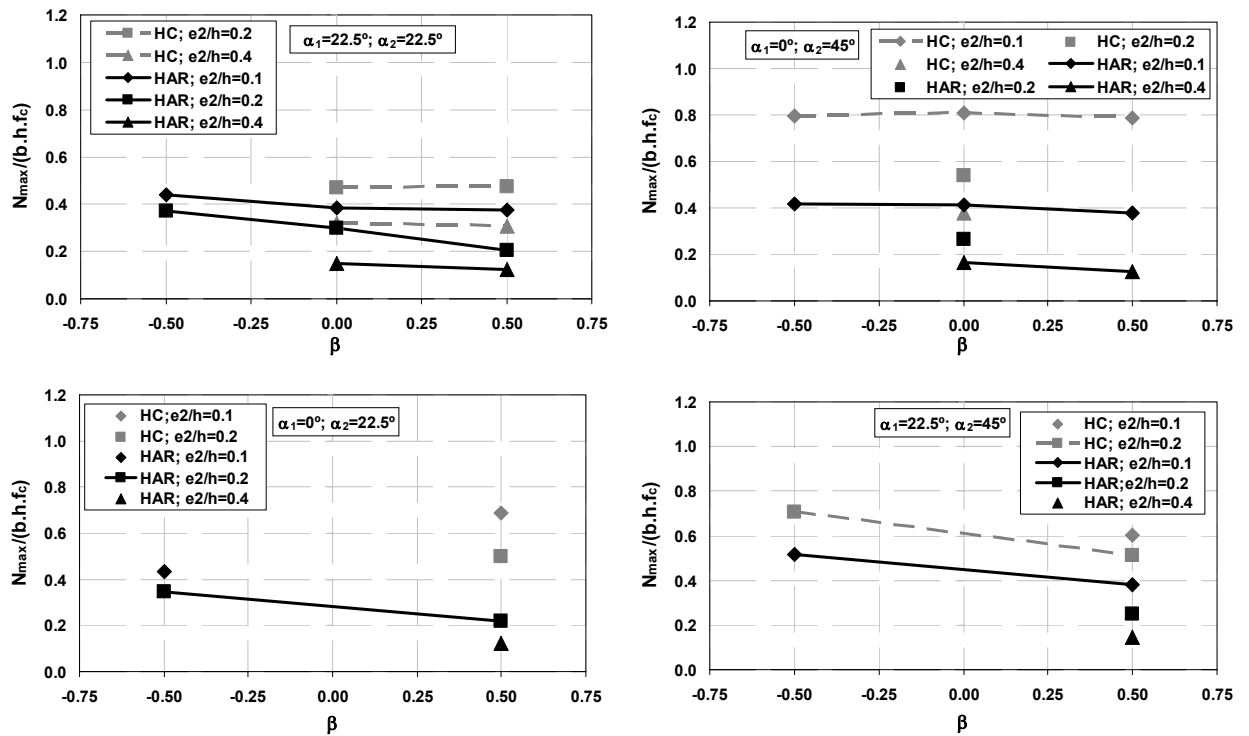


Figura 5.18. Influencia de la relación entre excentricidades (β): flexo-compresión esviada.

5.5.3. Análisis de los desplazamientos máximos

En la figura 5.19 se muestra la flecha máxima registrada en los ensayos para el axil máximo resistido (N_{max}) y para el axil último (N_u) para los soportes sometidos a esfuerzos de flexo-compresión recta. Se representa la sección de máximo desplazamiento.

Puede observarse que cuando la excentricidad aplicada en el soporte es pequeña (e_2/h igual a 0.1 ó 0.2) los desplazamientos del soporte son pequeños: entre 0.01 y 0.02 m para el soporte de esbeltez 30 y; entre 0.02 y 0.03 m para el soporte de esbeltez 20, siendo la flecha mínima de $L/268$ para el caso de sollicitación más centrada. Por otra parte, los desplazamientos son notablemente superiores para e_2/h igual a 0.4, incrementándose conforme aumenta la relación entre excentricidades (β). La flecha máxima registrada ha sido de $L/54$ para $e_2/h = 0.4$, $\beta = 0.5$ y hormigón de alta resistencia.

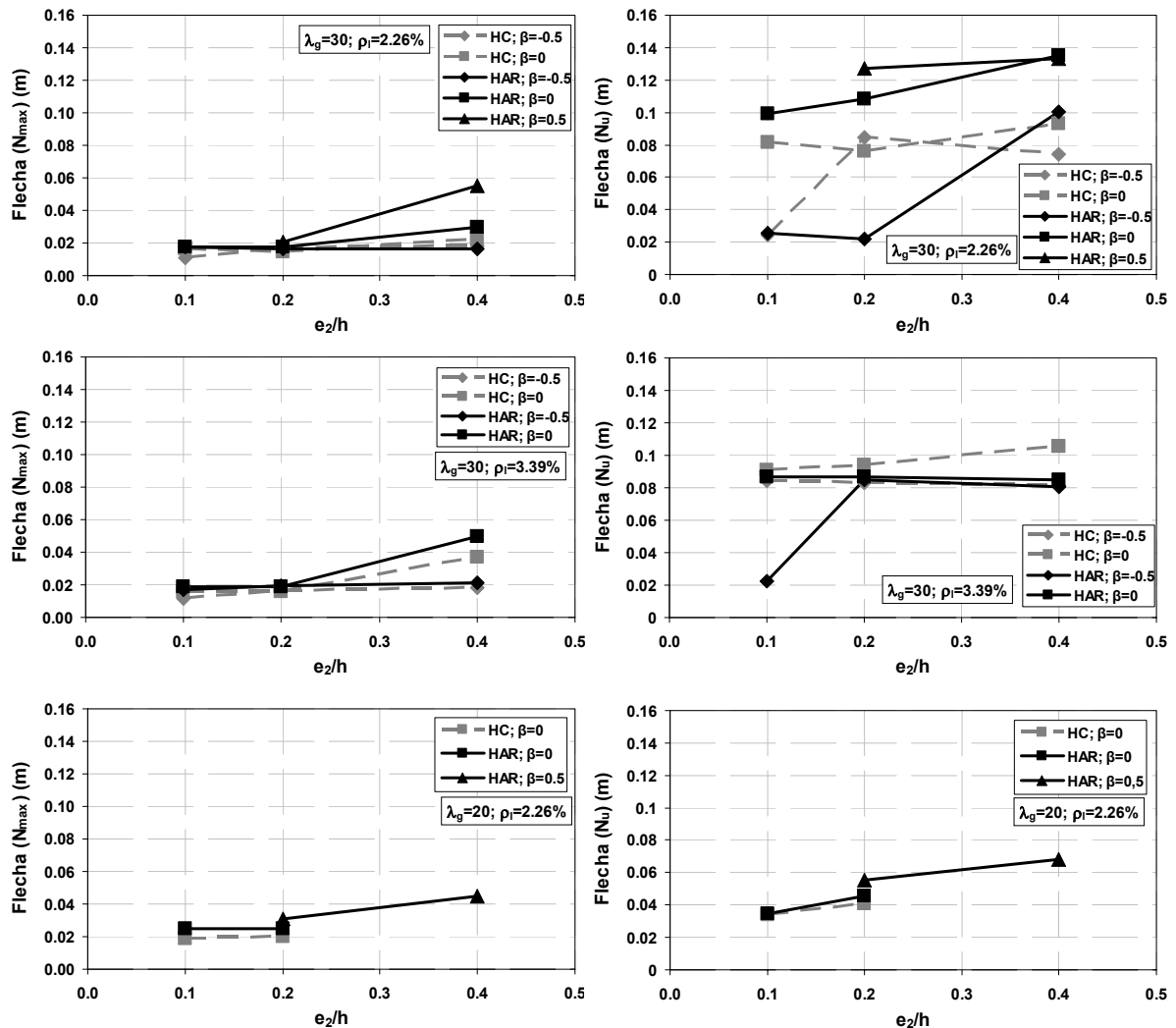


Figura 5.19. Análisis de los desplazamientos máximos registrados: flexo-compresión recta.

En general, la flecha que se registra en el soporte para la carga última (N_u) es notablemente superior a la obtenida para la carga máxima (N_{max}). Siendo la flecha mínima de $L/118$ y la máxima de $L/22.5$. Cabe señalar que en los soportes más comprimidos ($e_2/h = 0.1$, $\beta = -0.5$ y $\lambda_g = 20$) la diferencia entre los desplazamientos entre ambas situaciones ha sido menor.

En los ensayos de flexo-compresión recta, los desplazamientos para los soportes con una carga más centrada (e_2/h igual a 0.1 ó 0.2) y para relaciones entre excentricidades de $\beta = -0.5$ han sido los más pequeños (entre 0.01 y 0.025 metros), y se han incrementado en el caso de excentricidades relativas (e_2/h) de 0.4 con el incremento de la relación entre excentricidades en extremos (β).

La flecha máxima registrada respecto al eje “x” de flexión en los ensayos de flexo-compresión esviada para las situaciones de axil máximo (N_{max}) y último (N_u) se representa en la figura 5.20. Las flechas respecto al eje “y” de flexión poseen la misma tendencia observada en la figura 5.20.

Las flechas mínimas, tal y como era de esperar, han sido registradas para los casos de soportes más comprimidos con una relación entre excentricidades en extremos (β) igual a -0.5, excentricidad relativa (e_2/h) igual a 0.1 y ángulos de esviaje superior e inferior (α_1 ; α_2) iguales a 0° y 45° respectivamente, tanto para hormigón convencional ($L/882$) como para hormigón de alta resistencia ($L/455$). Las flechas máximas registradas para la situación de carga última han sido de $L/49$ para hormigón convencional ($\beta = 0.5$; $e_2/h = 0.4$; $\alpha_1 = \alpha_2 = 22.5^\circ$) y de $L/37$ para hormigón de alta resistencia ($\beta = 0.5$; $e_2/h = 0.4$; $\alpha_1 = 0^\circ$; $\alpha_2 = 22.5^\circ$).

Del análisis de la figura 5.19 y de la figura 5.20 se puede observar que para los mismos valores de excentricidad relativa (e_2/h) y de relaciones entre excentricidades (β), las flechas obtenidas por los soportes fabricados con hormigón convencional, en general, son muy similares a las obtenidas por los soportes de hormigón de alta resistencia, en consecuencia, la flecha máxima del soporte no está influenciada de manera significativa por la resistencia del hormigón.

Este comportamiento no se observa en los soportes S02-A1 y S05-A2 ($\lambda_g = 30$; $\rho_1 = 2.26\%$; $\beta = -0.5$, $e_2/h = 0.2$) para la situación de carga última y flexo-compresión recta, que pase a tener las mismas características de aplicación de carga, el soporte fabricado con HC (S05-A2) ha presentado una flecha del entorno del 0.08 m mientras que el soporte fabricado con HAR (S02-A1) ha presentado una flecha del entorno del 0.02 m en situación de carga última. Esto se debe a que el soporte fabricado con HC (S05-A2) falla por agotamiento por tracción (A/T) registrando grandes desplazamientos en rotura con una importante rama de descenso tras alcanzar la carga máxima, mientras que el soporte fabricado con HAR falla por agotamiento por compresión del hormigón (A/C) con pequeños desplazamientos en situación de rotura, que ocurre poco después de que el

soporte haya alcanzado la carga máxima, sin presentar una rama descenso, tal y como se puede observar a partir de los diagramas carga-flecha representados en la figura 5.21.

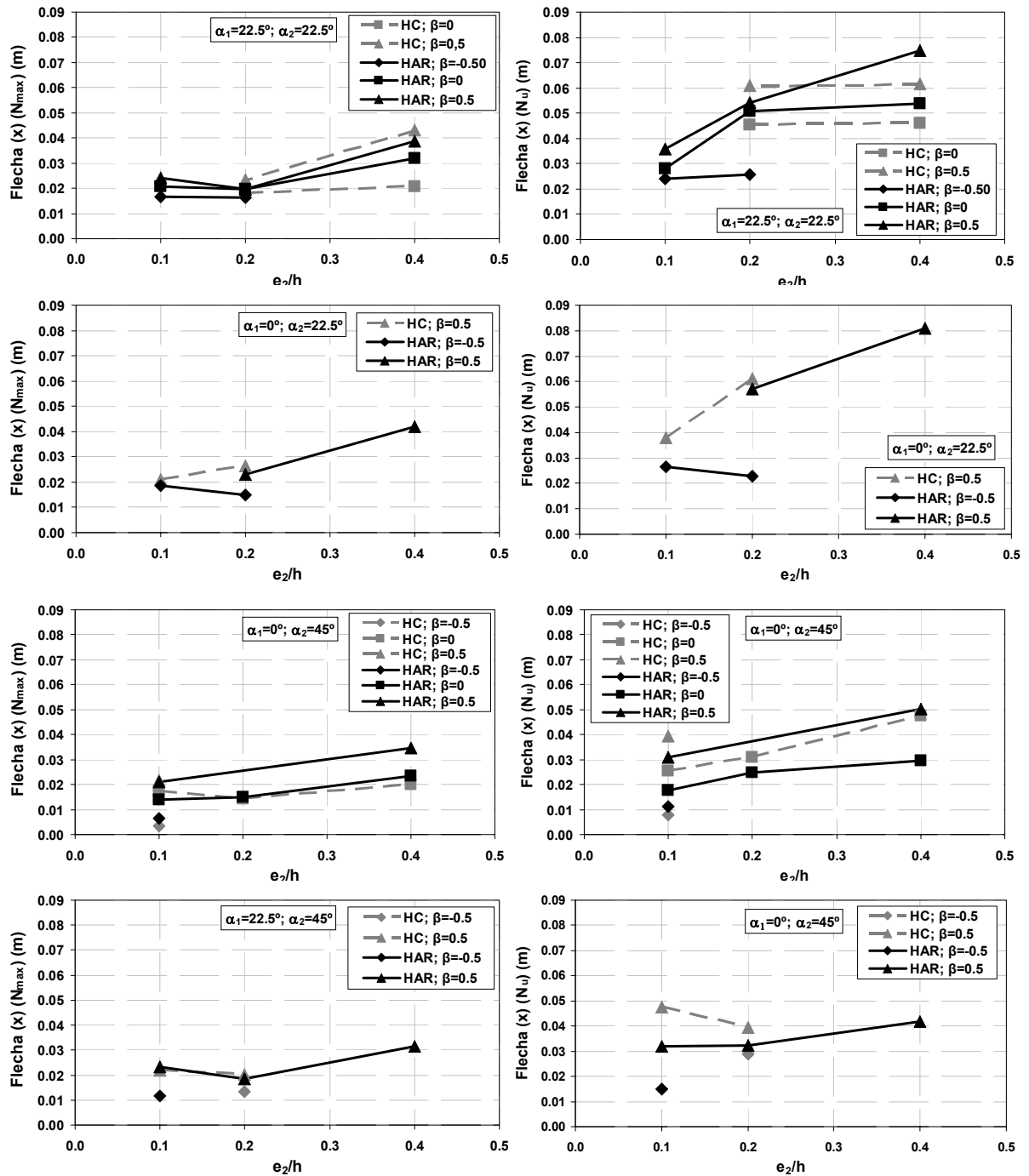


Figura 5.20. Análisis de los desplazamientos máximos registrados respecto al eje "x": flexo-compresión esviada.

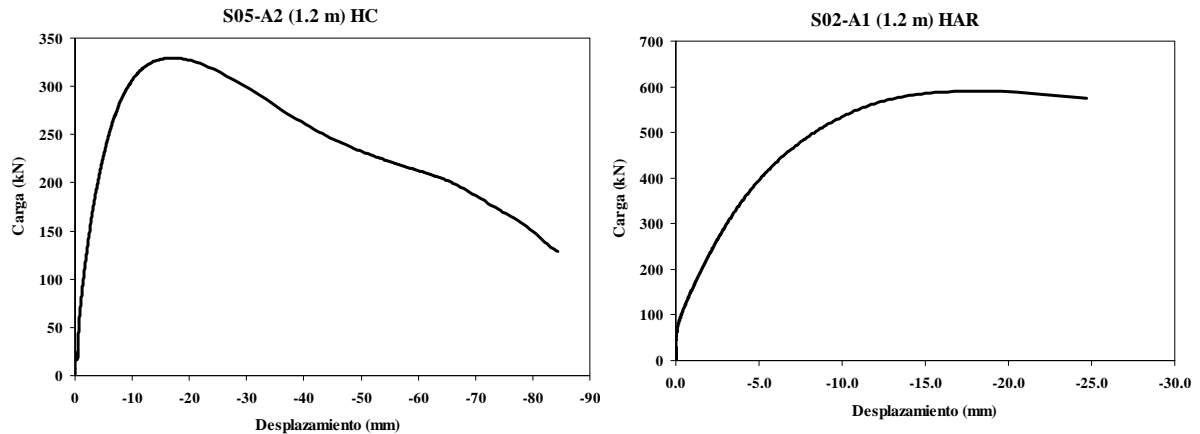


Figura 5.21. Carga desplazamiento: S05-A2 (HC); S02.A1 (HAR).

5.6. Verificación de métodos simplificados

Se ha realizado una comparación entre los resultados experimentales y los métodos simplificados propuestos por distintas normativas (ACI-318 (2008) [1], EC-2 (2004) [29] y EHE-08 [23]), en lo que se refiere a la carga máxima alcanzada en cada ensayo.

Para el cálculo de los esfuerzos de segundo orden se han seguido los siguientes artículos o secciones: para la EHE-08 [23] el artículo 43.5; para el ACI-318 (2008) [1] la sección 10.10.6 (ec 10.11 a 10.14); y para el EC-2 (2004) [29] el artículo 5.8.7 y 5.8.8. Para el cálculo de los esfuerzos de agotamiento de la sección se han aplicado los siguientes artículos o secciones: para la EHE-08 [23], el artículo 42.1 tomándose como diagrama de cálculo del hormigón el diagrama parábola rectángulo (Art. 39.5.a) donde el factor α_{cc} , que tiene en cuenta el cansancio del hormigón, se toma el valor de la unidad (Art. 39.4); para el ACI-318 (2008) [1] la sección 10.3 tomándose como diagrama de cálculo del hormigón el bloque rectangular equivalente (Sección 10.2) en donde se toma la tensión máxima del hormigón $0.85 \cdot f_c$ (Sección 10.2.7.1); y para el EC-2 (2004) [29] el artículo 6.1 tomándose como ecuación constitutiva el diagrama parábola rectángulo (Art 3.1.7) y el coeficiente α_{cc} igual a la unidad (Art 3.1.6).

En todos los casos se ha tomado como resistencia del hormigón la resistencia media de los soportes fabricados con hormigón convencional (30.50 MPa) y con hormigón de alta resistencia (89.44 MPa). Además, se han tomado todos los coeficientes de seguridad de los materiales y los coeficientes de seguridad adicionales que se aplican en los distintos métodos de con valores unitarios para realizar este análisis comparativo.

5.6.1. Instrucción de hormigón estructural EHE-08 [23]

5.6.1.a. Flexo-compresión recta

En la instrucción española EHE-08 [23] para soportes de sección y armadura constante se dimensiona la sección para una excentricidad total igual a la que se indica en la expresión 5.2 :

$$e_{\text{tot}} = e_e + e_a \geq e_2 \quad 5.2$$

donde: e_e excentricidad de cálculo de primer orden equivalente:

$$e_e = 0.6 \cdot e_2 + 0.4 \cdot e_1 \geq 0.4 \cdot e_2 \quad \text{para soportes intraslacionales,}$$

$$e_e = e_2 \quad \text{para soportes traslacionales;}$$

e_2 excentricidad de cálculo máxima de primer orden;

e_1 excentricidad de cálculo mínima de primer orden;

e_a excentricidad ficticia que evalúa los efectos de segundo orden:

$$e_a = (1 + 0.12 \cdot \beta) \cdot (\varepsilon_y + 0.0035) \cdot \frac{h + 20 \cdot e_e}{h + 10 \cdot e_e} \cdot \frac{l_0^2}{50 \cdot i_c} \quad 5.3$$

h canto de la sección según el plano de flexión;

ε_y deformación del acero para la tensión de cálculo f_{yd} ;

l_0 longitud de pandeo;

i_c radio de giro de la sección de hormigón en la dirección considerada;

β factor de armado dado por:

$$\beta = \frac{(d - d')^2}{4 \cdot i_s^2} \quad 5.4$$

siendo: d canto útil de la armadura inferior;

d' canto útil de la armadura superior;

i_s radio de giro de las armaduras

5.6.1.b. Flexo-compresión esviada

La EHE-08 [23] comenta que para los casos de soportes sometidos a esfuerzos de flexo-compresión esviada se puede analizar separadamente cada eje principal de flexión de manera independiente con las respectivas componentes de las excentricidades en cada eje.

5.6.2. Eurocódigo nº 2 (2004) [29]

5.6.2.a. Flexo-compresión recta

El EC-2 (2004) [29], para estimar la rigidez del soporte propone la siguiente expresión:

$$EI = K_c E_{cd} I_c + K_s E_s I_s \quad 5.5$$

- donde: E_{cd} módulo de elasticidad de diseño del hormigón;
 I_c momento de inercia de la sección bruta de hormigón;
 E_s módulo de elasticidad de diseño de la armadura longitudinal;
 I_s momento de inercia de la armadura respecto al centro de gravedad de la sección transversal;
 K_c factor definido por:

$$K_c = \frac{(k_1 \cdot k_2)}{1 + \varphi_{ef}} \quad 5.6$$

- donde: φ_{ef} coeficiente de fluencia equivalente. Se toma el valor nulo por tratarse de ensayos no diferidos en el tiempo;

- k_1 factor que depende de la resistencia del hormigón y definido por la expresión 5.7:

$$k_1 = \sqrt{f_{ck} / 20} \quad (f_{ck} \text{ en MPa}) \quad 5.7$$

- f_{ck} resistencia característica del hormigón. En este análisis se toma el valor de la resistencia del hormigón (f_c) definida en cada ensayo;

- k_2 factor que depende del axil reducido (ν) y de la esbeltez mecánica del soporte (λ_m), definida por la expresión 5.8:

$$k_2 = \nu \cdot (\lambda_m / 170) \leq 20 \quad 5.8$$

- K_s factor que tiene en cuenta la contribución de la armadura longitudinal, tomado igual a la unidad;

El cálculo del módulo de deformación del hormigón se realiza a partir de la siguiente la expresión:

$$E_{cd,eff} = \frac{E_{cm}}{\gamma_{cE} \cdot (1 + \varphi_{eff})} \quad 5.9$$

- donde: γ_{cE} coeficiente parcial de seguridad igual a 1.2. Para este análisis comparativo se toma el valor igual a la unidad;

- E_{cm} módulo de deformación secante del hormigón igual a:
 $E_c = 22000 \cdot (f_{cm} / 10)^{0.3}$ (f_{cm} en MPa) 5.10;

- f_{cm} resistencia media a compresión simple del hormigón. En este análisis se toma el valor de la resistencia del hormigón (f_c) definida en cada ensayo;

- φ_{eff} coeficiente de fluencia equivalente. Se toma el valor nulo por tratarse de ensayos no diferidos en el tiempo.

El EC-2 (2004) [29], así como el ACI-318 (2008) [1], para tener en cuenta los efectos de segundo orden, propone el método de amplificación de momentos (Sección 5.8.7.3).

El momento total amplificado de diseño está definido por la expresión 5.11:

$$M_{Ed} = M_{0Ed} \cdot \left[1 + \frac{\beta}{(N_B / N_{Ed}) - 1} \right] \quad 5.11$$

donde: M_{0Ed} momento de primer orden;
 N_{Ed} carga axial aplicada;
 N_B axil crítico del soporte;
 β π^2/c_0 , siendo c_0 un factor que depende de la distribución de los momentos de primer orden en extremos.

Además, en la Sección 5.8.8, para soportes aislados, el EC-2 (2004) [29] recomienda también el método basado en la curvatura nominal. Este método consiste en la obtención del momento de segundo orden obtenido con una excentricidad adicional (e_2), que a su vez se obtiene a partir de la longitud de pandeo del soporte y de una curvatura estimada.

Para este caso, el momento de diseño está definido por la expresión 5.12:

$$M_{Ed} = M_{0Ed} + M_2 \quad 5.12$$

donde: M_{0Ed} es el momento de primer orden y M_2 es el momento nominal de segundo orden definido por la siguiente expresión:

$$M_2 = N_{Ed} \cdot e_2 \quad 5.13$$

donde: N_{Ed} carga axial aplicada;
 e_2 excentricidad adicional igual a $(1/r) \cdot l_0^2/c$;
 l_0 longitud de pandeo del soporte;
 c factor de depende de la distribución de curvaturas, tomado igual a π^2 en este análisis;
 $1/r$ curvatura definida por:
 $1/r = K_r \cdot K_\phi \cdot (1/r_0)$ 5.14

donde: $1/r_0$ $\varepsilon_{yd}/(0.45 \cdot d)$;
 ε_{yd} f_{yd}/E_S ;
 d canto útil de la sección;
 K_ϕ factor que tiene en cuenta los efectos diferidos tomado igual a la unidad en este análisis;
 K_r factor de corrección que depende de la carga axial definido por la expresión 5.15;

$$K_r = (v_u - v) / (v_u - v_{bal}) \leq 1 \quad 5.15$$

siendo: v áxil reducido aplicado [$N_{ed}/(A_c \cdot f_{cd})$];
 v_u $1 + \omega$;
 ω $(A_s \cdot f_{yd}) / (A_c \cdot f_{cd})$;
 A_s área total de la armadura longitudinal;
 A_c área bruta de la sección transversal;
 v_{bal} 0.4.

Este mismo método es recomendado por el MC-2010 [38] en el artículo 7.3.7.1 considerando un nivel 2 de aproximación.

Cabe resaltar, que para momentos de primer orden desiguales en extremos, el EC-2 (2004) [29] propone la misma expresión que el ACI-318 (2008) [1] para el cálculo del coeficiente de equivalencia C_m , sin embargo, acota su valor mínimo a 0.4.

En el análisis comparativo se utilizan los dos métodos propuestos por el EC-2 (2004) [29]: el método de amplificación de momentos denominado en este trabajo como “EC-2 (1)” y el método de la curvatura nominal denominado en este trabajo como “EC-2 (2)”.

5.6.2.b. Flexo-compresión esviada

El EC-2 (2004) [29] permite desacoplar los efectos de segundo orden según los dos ejes principales aplicando los métodos separadamente para cada eje principal con sus características.

5.6.3. Código americano ACI-318 (2008) [1]

5.6.3.a. Flexo-compresión recta

El ACI-318 (2008) [1] recomienda, para tener en cuenta los efectos de segundo orden, la aplicación del método de la amplificación de momentos para el diseño de soportes intraslacionales. Este procedimiento consiste en obtener previamente el valor del áxil y de los momentos en extremos por medio de un análisis de primer orden y dimensionar el soporte para el mismo valor de áxil y para un momento amplificado para estructuras intraslacionales igual a:

$$M_c = \delta_{ns} \cdot M_2 \quad 5.16$$

$$\delta_{ns} = \frac{C_m}{1 - \phi \cdot \frac{N_d}{N_{cr}}} \quad 5.17$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot EI}{l_p^2} \quad 5.18$$

- donde: M_c momento mayorado de diseño del soporte;
 δ_{ns} factor de amplificación de momentos en estructuras intraslacionales;
 M_2 momento máximo mayorado de los extremos, tomado con signo positivo;
 N_{cr} axil crítico del soporte;
 C_m coeficiente de equivalencia entre momentos en extremos:

$$C_m = 0.6 + 0.4 \cdot \frac{M_1}{M_2} \quad 5.19$$

- donde: M_1 momento mínimo en extremos tomado con el signo que le corresponda en relación a M_2 ($|M_2| > |M_1|$);

- N_d carga axial aplicada;
 ϕ factor de reducción de la resistencia del hormigón y que se toma igual a la unidad para realizar este análisis comparativo;
 EI rigidez del soporte, que puede aproximarse por una de las siguientes expresiones:

$$EI = \frac{(0.2 \cdot E_c I_g + E_s I_{se})}{1 + \beta_d} \quad 5.20$$

$$EI = \frac{0.4 \cdot E_c I_g}{1 + \beta_d} \quad 5.21$$

- I_{se} momento de inercia de la armadura respecto al centro de gravedad de la sección transversal;
 I_g momento de inercia de la sección bruta respecto al centro de gravedad.

En este análisis comparativo se verifica el método propuesto por el ACI -318 (2008) [1] respecto a las cargas máxima obtenidas en los ensayos experimentales, utilizando los valores de la rigidez del soporte definidos por la expresión 5.20 [ACI (1)], teniendo en cuenta la armadura longitudinal, y por la expresión 5.21 [ACI (2)], sin tener en cuenta la armadura.

Para el cálculo del módulo de deformación del hormigón se aplica la expresión 5.22:

$$E_c = 4700 \cdot \sqrt{f_c} \quad (f_c \text{ en MPa}) \quad 5.22$$

5.6.3.b. Flexo-compresión esviada

Según el ACI-318 (2008) [1], para soportes en flexo-compresión esviada, las componentes del momento según cada eje principal se deben amplificar separadamente, en base a las condiciones de restricción de cada eje. Si las condiciones de rigidez son distintas para cada uno de los ejes principales, resultarán diferentes factores de amplificación.

5.6.4. Contraste de los resultados experimentales con los métodos simplificados propuestos por las normativas

En esta sección se exponen los resultados obtenidos para la totalidad de ensayos considerados en el programa experimental desarrollado, en lo que se refiere a la carga máxima alcanzada, comparándolos con los métodos simplificados propuestos por las normativas (EHE-08 [23], EC-2 (2004) [29], ACI-318 (2008) [1]), descritos en los apartados anteriores.

El grado de precisión se evalúa a través de la relación entre los axiles obtenidos en el ensayo y en el método simplificado correspondiente (N_{test}/N_{method}), de tal forma que si el valor obtenido es mayor que la unidad el método está del lado de la seguridad.

En la tabla 5.8 se representa un resumen de los resultados para todos los ensayos del programa experimental, representando el promedio del grado de precisión obtenido y el coeficiente de variación (C.V.) correspondientes a cada método utilizado.

	EHE-08 Expresión 5.2	EC-2 (1) Expresión 5.11	EC-2 (2) Expresión 5.12	ACI-318 (1) Expresión 5.20	ACI-318 (2) Expresión 5.21
Promedio	1.62	1.86	2.00	1.67	1.51
C.V.	0.25	0.28	0.37	0.25	0.25

C.V. Coeficiente de variación;

Tabla 5.8. Verificación de los métodos simplificados.

De manera general los métodos simplificados propuestos por la EHE-08 [23], por el EC-2 (2004) [29] y por el ACI-318 (2008) [1] se encuentran del lado de la seguridad, aunque con coeficientes de variación elevados ($C.V. \geq 25\%$).

A continuación, en los apartados 5.6.4.a y 5.6.4.b, se hace un análisis más detallado de la comparación de los métodos simplificados propuestos por dichas normativas con los resultados obtenidos experimentalmente para los casos de flexo-compresión recta y esviada respectivamente.

5.6.4.a. Flexo-compresión recta

En la tabla 5.9 se muestran los resultados del contraste para los soportes sometidos a esfuerzos de flexo-compresión recta ejecutados en el programa experimental. Se puede observar que la totalidad de los métodos de diseño analizados se encuentran del lado de la seguridad para este tipo de sollicitación. Sin embargo, los métodos propuestos por el EC-2 (2004) [29] y por el ACI-318 (2008) [1] poseen un coeficiente de variación elevado (superior al 25%). De los métodos analizados, el propuesto por la EHE-08 [23], presenta una solución más centrada, con promedio de 1.30 (del lado de la seguridad) y coeficiente de variación $C.V. = 0.16$.

Soporte	N _{test} (kN)	N _{EHE-08} (kN)	Ratio	N _{EC-2} (1) (kN)	Ratio	N _{EC-2} (2) (kN)	Ratio	N _{ACI} (1) (kN)	Ratio	N _{ACI} (2) (kN)	Ratio
S01-A1	616.92	408.03	1.51	189.58	3.25	252.97	2.44	245.33	2.51	308.00	2.00
S02-A1	590.63	315.82	1.87	171.11	3.45	229.44	2.57	229.19	2.58	283.33	2.08
S03-A1	287.77	221.03	1.30	143.26	2.01	227.77	1.26	203.76	1.41	246.88	1.17
S04-A1	497.21	355.60	1.40	181.67	2.74	238.63	2.08	234.76	2.12	290.84	1.71
S05-A1	1382.59	1170.41	1.18	846.74	1.63	1179.69	1.17	759.56	1.82	923.15	1.50
S06-A1	1031.21	868.00	1.19	610.99	1.69	853.77	1.21	656.76	1.57	775.12	1.33
S07-A1	374.72	259.57	1.44	155.47	2.41	211.47	1.77	217.49	1.72	267.20	1.40
S08-A1	210.11	180.71	1.16	123.47	1.70	169.27	1.24	186.57	1.13	224.55	0.94
S09-A1	281.05	223.93	1.26	142.82	1.97	195.38	1.44	205.93	1.36	250.85	1.12
S10-A1	162.85	152.22	1.07	109.47	1.49	148.92	1.09	167.01	0.98	197.03	0.83
S11-A1	851.10	757.76	1.12	561.51	1.52	736.97	1.15	607.62	1.40	708.89	1.20
S12-A1	487.96	490.29	1.00	323.87	1.51	491.96	0.99	443.02	1.10	508.00	0.96
S01-A2	334.32	230.66	1.45	206.77	1.62	182.08	1.84	172.91	1.93	172.08	1.94
S02-A2	265.78	187.10	1.42	178.04	1.49	161.52	1.65	156.33	1.70	153.81	1.73
S03-A2	168.25	142.51	1.18	131.08	1.28	135.66	1.24	137.28	1.23	136.47	1.23
S04-A2	430.31	252.98	1.70	215.68	2.00	189.35	2.27	178.59	2.41	178.18	2.42
S05-A2	329.65	224.47	1.47	200.93	1.64	179.90	1.83	171.56	1.92	173.61	1.90
S06-A2	251.12	174.32	1.44	157.21	1.60	155.31	1.62	153.25	1.64	153.97	1.63
S07-A2	751.87	652.66	1.15	629.11	1.20	819.79	0.92	532.41	1.41	533.92	1.41
S08-A2	615.68	526.52	1.17	520.24	1.18	579.66	1.06	450.36	1.37	450.36	1.37
S01-A3	542.55	403.19	1.35	268.36	2.02	311.80	1.74	279.32	1.94	293.44	1.85
S02-A3	370.33	344.76	1.07	227.87	1.63	284.89	1.30	264.04	1.40	281.15	1.32
S03-A3	258.23	245.98	1.05	180.26	1.43	231.82	1.11	228.90	1.13	242.59	1.06
S04-A3	657.32	466.81	1.41	280.87	2.34	334.19	1.97	293.18	2.24	314.28	2.09
S05-A3	453.04	388.33	1.17	251.22	1.80	308.05	1.47	277.93	1.63	296.68	1.53
S06-A3	334.32	302.36	1.11	209.05	1.60	264.57	1.26	252.02	1.33	268.08	1.25
S01-A4	382.57	296.04	1.29	263.00	1.45	250.67	1.53	221.93	1.72	186.62	2.05
S02-A4	318.23	237.60	1.34	229.10	1.39	220.94	1.44	199.64	1.59	166.46	1.91
S03-A4	192.64	192.04	1.00	188.92	1.02	186.85	1.03	171.35	1.12	145.70	1.32
S04-A4	464.61	299.13	1.55	257.81	1.80	250.69	1.85	221.87	2.09	178.71	2.60
S05-A4	352.67	249.46	1.41	234.05	1.51	229.08	1.54	205.96	1.71	165.34	2.13
S06-A4	258.19	212.93	1.21	210.82	1.22	204.51	1.26	186.66	1.38	154.94	1.67
Promedio		1.30		1.77		1.51		1.64		1.58	
C.V.		0.16		0.31		0.28		0.26		0.28	
P₀₅		1.03		1.19		1.01		1.11		0.95	
P₉₅		1.62		2.97		2.35		2.46		2.26	

C.V. = Coeficiente de variación; P₀₅ = percentil del 5%; P₉₅ = percentil del 95%

Tabla 5.9. Verificación de los métodos simplificados (flexo-compresión recta).

La gran mayoría de los ensayos se encuentran del lado de la seguridad, con excepción de los siguientes casos:

- Los soportes S08-A1, S10-A1 y S12-A1 con un ratio de 0.94, 0.83 y 0.96 respectivamente, para el método del ACI-318 (2008) [1] calculando la rigidez del soporte (EI) sin tener en cuenta la armadura longitudinal (expresión 5.21);

- El soporte S10-A1 con un ratio de 0.98 para el método del ACI-318 (2008) [1] calculando la rigidez del soporte (EI) teniendo en cuenta la armadura longitudinal (expresión 5.20);
- El soporte S12-A1 ($N_{test}/N_{method} = 0.99$) y el soporte S07-A2 ($\lambda_g = 20$) ($N_{test}/N_{method} = 0.92$) para el método basado en la curvatura nominal (2) del EC-2 (2004) [29].

Los casos que se encuentran del lado de la inseguridad, con excepción del soporte S07-A2, son de soportes fabricados con hormigón de alta resistencia.

En la tabla 5.10 se representa el promedio y el coeficiente de variación del ratio (N_{test}/N_{method}) para los distintos parámetros analizados en flexo-compresión recta.

En general, los métodos simplificados analizados están más del lado de la seguridad conforme los soportes son más esbeltos y decrece la excentricidad adimensional (e_2/h), la relación entre excentricidades (β), la cuantía de armadura longitudinal (ρ_l).

			Ratio (N_{test}/N_{method})				
			EHE-08	EC2 (1)	EC2 (2)	ACI-318 (1)	ACI-318 (2)
ρ_l	2.26%	Promedio	1.32	1.87	1.54	1.67	1.49
		C.V.	0.17	0.34	0.32	0.28	0.29
	3.39%	Promedio	1.25	1.60	1.46	1.61	1.73
		C.V.	0.14	0.22	0.20	0.22	0.26
λ_g	20	Promedio	1.13	1.45	1.08	1.45	1.29
		C.V.	0.06	0.15	0.11	0.16	0.15
	30	Promedio	1.33	1.84	1.61	1.69	1.65
		C.V.	0.15	0.32	0.26	0.26	0.28
e_2/h	0.1	Promedio	1.40	2.00	1.78	2.02	1.96
		C.V.	0.12	0.31	0.26	0.16	0.19
	0.2	Promedio	1.33	1.81	1.54	1.66	1.59
		C.V.	0.16	0.33	0.26	0.20	0.22
	0.4	Promedio	1.15	1.49	1.21	1.24	1.21
		C.V.	0.12	0.18	0.15	0.16	0.23
β	-0.5	Promedio	1.43	2.02	1.78	1.91	1.87
		C.V.	0.15	0.34	0.26	0.24	0.23
	0	Promedio	1.24	1.62	1.40	1.56	1.50
		C.V.	0.12	0.28	0.24	0.20	0.22
	0.5	Promedio	1.11	1.62	1.17	1.21	1.03
		C.V.	0.10	0.14	0.16	0.17	0.16
f_c	HC	Promedio	1.34	1.46	1.51	1.66	1.81
		C.V.	0.14	0.18	0.25	0.21	0.23
	HAR	Promedio	1.26	2.01	1.52	1.63	1.41
		C.V.	0.17	0.30	0.31	0.30	0.28

C.V. = Coeficiente de variación;

Tabla 5.10. Verificación de los códigos de diseño por parámetro analizado (flexo-compresión recta)

Del análisis de la tabla 5.10 se observa que, en general, tanto el error medio como el coeficiente de variación se incrementan para relaciones de excentricidades $\beta = -0.50$,

excentricidad adimensional $e_2/h = 0.1$, esbeltez geométrica $\lambda_g = 30$ y para hormigón de alta resistencia.

Cabe señalar, que el grado de precisión medio que se obtiene al aplicar el método de amplificación de momentos (expresión 5.11) del EC-2 (2004) [29] en el caso de los soportes de hormigón de alta resistencia, difiere considerablemente (del orden del 55%) del de los soportes fabricados con hormigón convencional, incrementándose el error medio con el incremento de la resistencia del hormigón. Sin embargo, utilizando los métodos propuesto por el ACI-318 (2008) [1], el método de la excentricidad adicional (expresión 5.12) del EC-2 (2004) [29] y el método de la EHE-08 [23], el grado de precisión medio que se obtiene no presenta grandes diferencias para ambos tipos de hormigón (figura 5.22).

En la figura 5.22, a modo de ejemplo, se representa gráficamente el ratio (N_{test}/N_{method}) en función de la resistencia del hormigón para los métodos simplificados analizados.

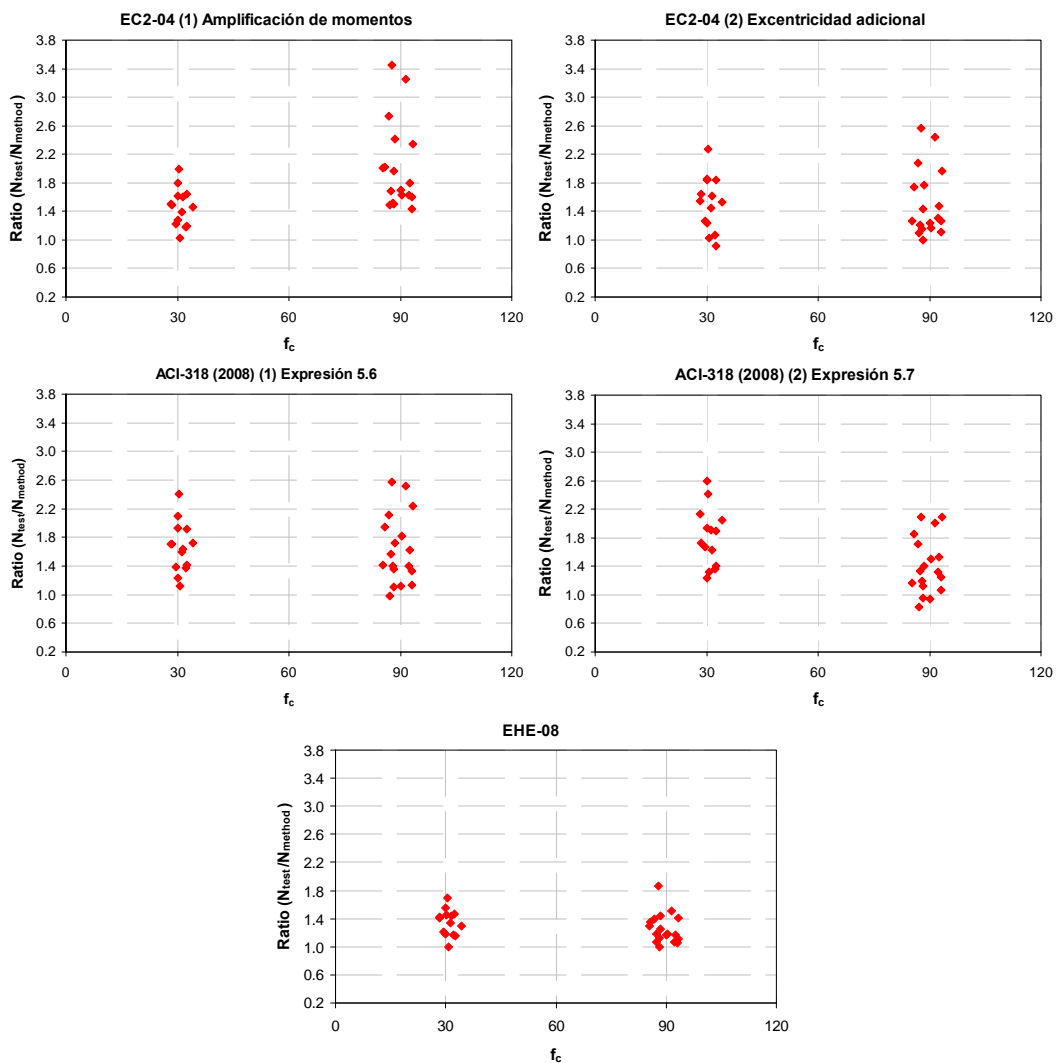


Figura 5.22. Verificación de métodos simplificados: resistencia del hormigón (f_c) (flexo-compresión recta).

Del análisis de las gráficas de la figura 5.22 se aprecia claramente que el método propuesto por la EHE-08 [23] presenta el mejor grado de precisión entre las normativas analizadas, tanto para hormigón convencional como para hormigón de alta resistencia, mientras que el EC-2 (2004) [29], al utilizar el método de amplificación de momentos, presenta una mayor dispersión de resultados para hormigón de alta resistencia comparado con los resultados obtenidos utilizando el mismo método para hormigón convencional.

Como conclusión, la aplicación de los métodos de diseño propuestos por la EHE-08 [23], EC-2 (2004) [29] y ACI-318 (2008) [1] (con la finalidad de prever la carga máxima de los ensayos ejecutados sometidos a solicitaciones de flexo-compresión recta) dan lugar a resultados del lado de la seguridad pero con un coeficiente de variación elevado. Además, el grado de precisión depende de la excentricidad adimensional (e_2/h), de la relación entre excentricidades en extremos (β), de la esbeltez geométrica (λ_g), de la cuantía geométrica de armadura longitudinal (ρ_l) y de la resistencia del hormigón (f_c).

A continuación, en la figura 5.23, se muestran en un diagrama de interacción adimensional los resultados correspondientes a los ensayos experimentales de los soportes sometidos a flexo-compresión recta, señalándose el momento de agotamiento de la sección (μ_{Mmax}) y el de primer orden en el extremo de mayor excentricidad (μ_{2max}). Además, se ha representado el diagrama de interacción de la sección transversal ($\lambda_g = 0$) y de primer orden de los soportes ($\lambda_g = 20$ y $\lambda_g = 30$) aplicando el método de amplificación de momentos propuesto por el EC-2 (2004) [29].

En esta figura se observa que el método simplificado propuesto por el EC-2 (2004) [29] (amplificación de momentos) se encuentra del lado de la seguridad, principalmente para soportes fabricados con hormigón de alta resistencia y valores pequeños de excentricidad adimensional e_2/h (0.1 ó 0.2) (tabla 5.10). Este comportamiento es debido a que el método del EC-2 (2004) [29] infravalora la rigidez nominal del soporte (EI) obteniéndose valores de axil crítico (N_{cr}) inferiores al real.

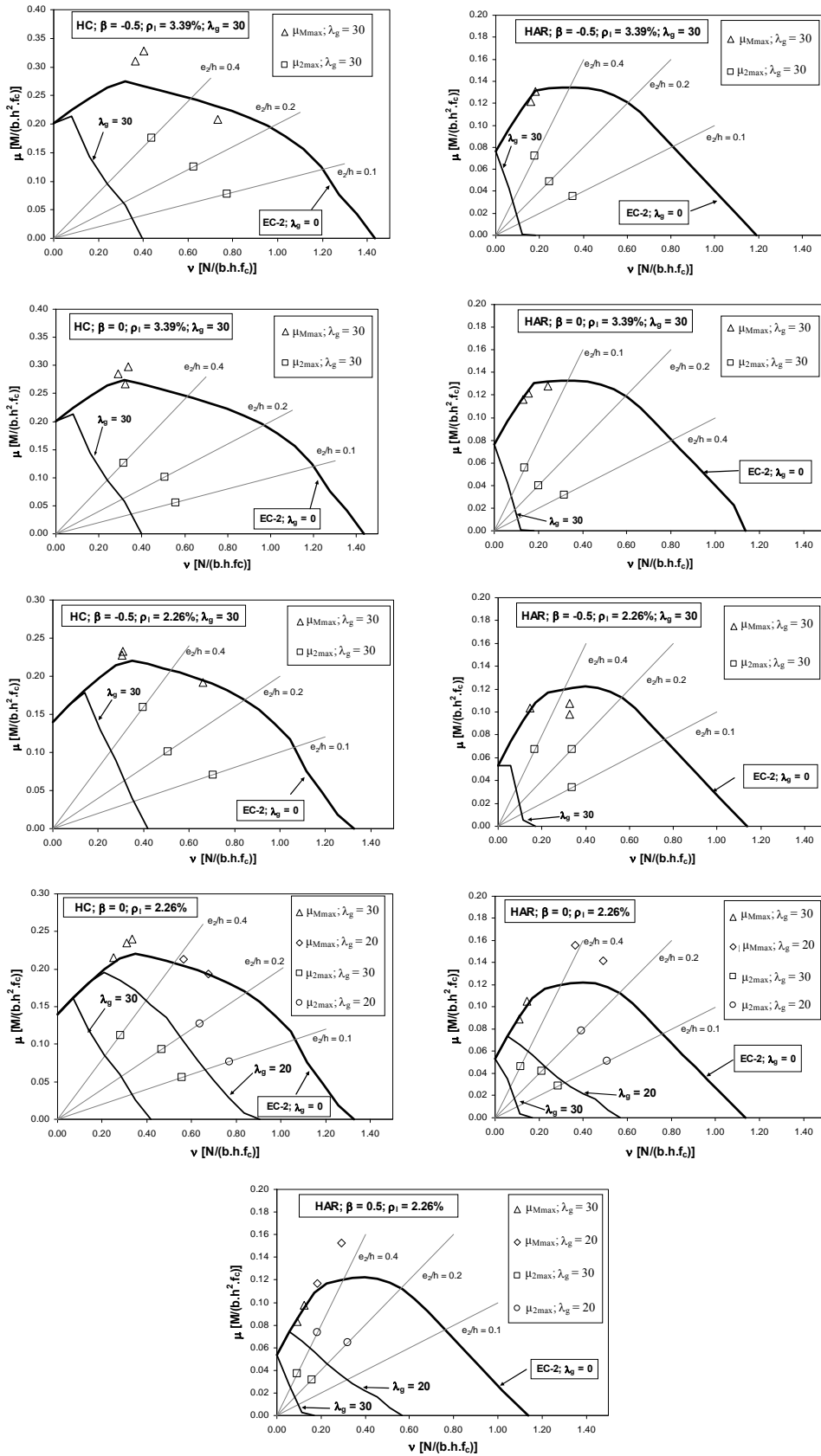


Figura 5.23. Diagramas de interacción EC-2: flexo-compresión recta.

Por último, en las gráficas presentadas en la figura 5.24, se puede hacer una comparación de los diagramas de interacción momento-axil reducidos (μ - v) obtenidos con la utilización de los métodos simplificados propuestos por las normativas y analizados en los apartados anteriores para soportes fabricados con hormigón de alta resistencia.

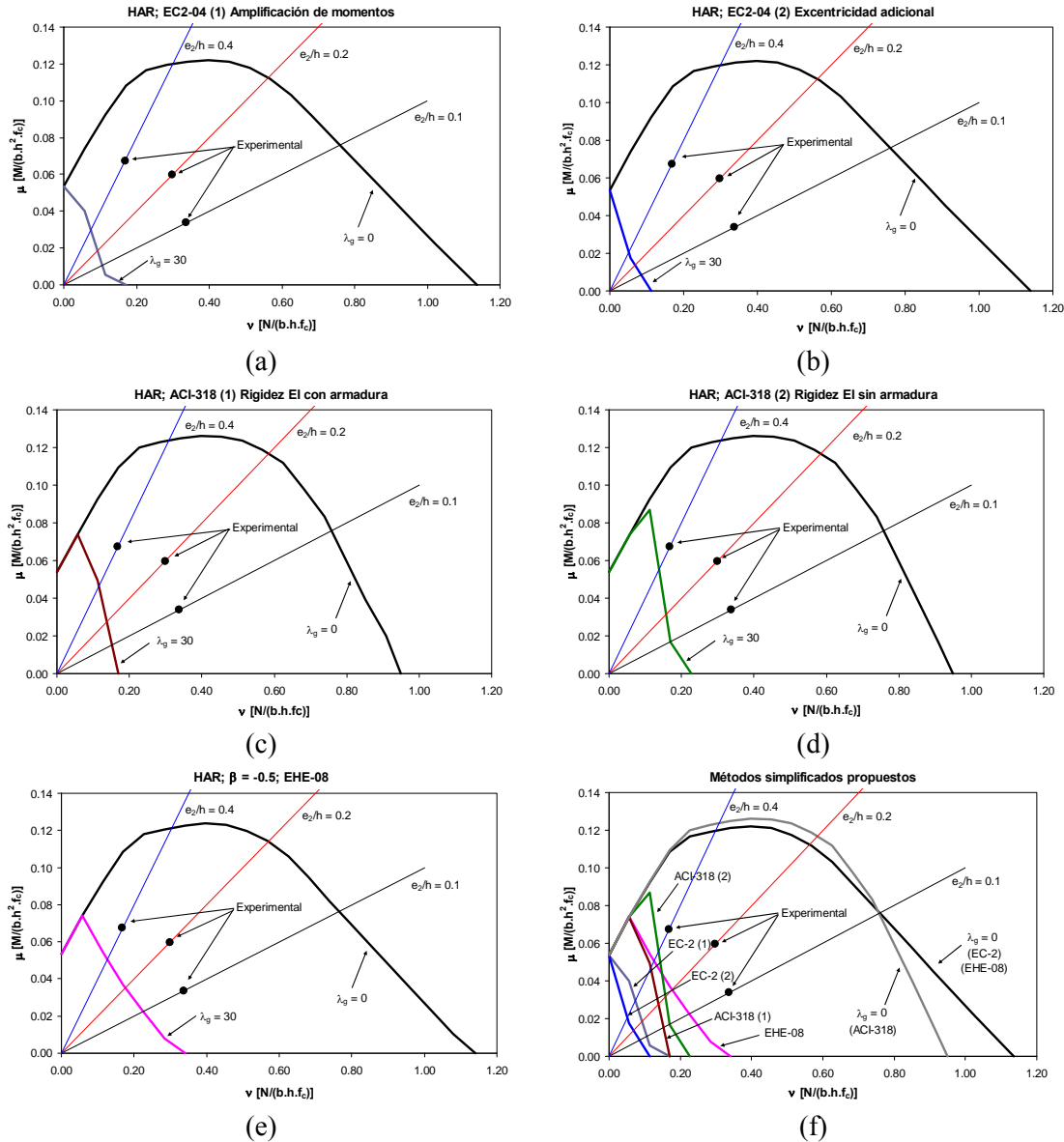


Figura 5.24. Diagramas de interacción - métodos simplificados propuestos: a. EC-2 (2004) [29] (1) amplificación de momento; b. EC-2 (2004) [29] (2) excentricidad adicional; c. ACI-318 (2008) [1] (1) rigidez EI teniendo en cuenta la armadura longitudinal; d. ACI-318 (2008) [1] (1) rigidez EI sin tener en cuenta la armadura longitudinal; e. EHE-08 [23]; f. Comparación entre métodos.

Se representan los diagramas momento-axil reducidos de la sección transversal ($\lambda_g = 0$) y de primer orden del soporte ($\rho_1 = 2.26\%$; $\lambda_g = 30$; $\beta = -0.5$), obtenidos utilizando el método de amplificación de momento (a) y de la excentricidad adicional

(b) propuestos por el EC-2 (2004) [29], el método propuesto por el ACI-318 (2008) [1] teniendo en cuenta la armadura longitudinal en el cálculo de la rigidez nominal del soporte EI (c) y no teniéndola en cuenta (d), el método propuesto por la EHE-08 [23] (e) y finalmente, una gráfica resumen con todos los diagramas representados simultáneamente (f) para facilitar la comparación entre los distintos diagramas. Además se representan los puntos obtenidos experimentalmente que representan el momento de primer orden en el extremo de mayor excentricidad para la situación de carga axial máxima (N_{\max}).

Del análisis de las gráficas de la figura 5.24, se puede observar, tal y como se ha concluido anteriormente en la figura 5.23, que los métodos propuestos por el EC-2 (2004) [29], al infravalorar la rigidez nominal (EI) obteniéndose valores de axil crítico (N_{cr}) inferiores al real, tienen la tendencia de presentar valores más conservadores respecto a los obtenidos con el ACI-318 (2008) [1] y con la EHE-08 [23], principalmente para valores pequeños de excentricidad adimensional (e_2/h). Además, se observa que con la utilización del método propuesto por la EHE-08 [23], se obtiene un diagrama de interacción del soporte más próximo al real, justificando los resultados de promedio más centrados (próximos a la unidad), y una menor dispersión de los resultados obtenidos con este método.

5.6.4.b. Flexo-compresión esviada

En la tabla 5.11 se muestran los resultados del contraste para los soportes sometidos a esfuerzos de flexo-compresión esviada.

Tal y como se ha observado en los casos de flexo-compresión recta, los métodos simplificados propuestos por la normativa se encuentran del lado de la seguridad para los casos de flexo-compresión esviada, con coeficientes de variación (C.V.) para cada método analizado muy similares a los presentados en el apartado anterior, aunque, en general, con un incremento del error medio, con excepción del método propuesto por el ACI-318 (2008) [1] (2) utilizando la expresión 5.21. Una vez más el método propuesto por la EHE-08 [23] ha presentado una solución más centrada (promedio de 1.91 con coeficiente de variación C.V. = 0.16).

El incremento en el error medio obtenido en los casos de soportes sometidos a esfuerzos de flexo-compresión esviada puede deberse al desacoplamiento de los flectores respecto a los ejes principales de flexión. Los métodos simplificados, al analizar separadamente los dos ejes de flexión, utilizan las componentes de las excentricidades y hacen el análisis en flexo-compresión recta en cada eje correspondiente de manera independiente. La combinación de los ángulos de esviaje y de las excentricidades en cada extremo de los soportes da lugar a componentes de menor valor absoluto respecto a cada eje coordinado. Tal y como se ha observado en el apartado anterior, el error medio tiende a incrementarse con la disminución de la

excentricidad adimensional (e_2/h) para flexo-compresión recta, presentando valores más del lado de la seguridad.

Soporte	N_{test} (kN)	N_{EHE-08} (kN)	Ratio	N_{EC-2} (1) (kN)	Ratio	N_{EC-2} (2) (kN)	Ratio	N_{ACI} (1) (kN)	Ratio	N_{ACI} (2) (kN)	Ratio
S01-B1	514.88	267.77	1.92	244.76	2.10	192.20	2.68	260.35	1.98	331.66	1.55
S02-B1	387.08	204.36	1.89	177.04	2.19	159.86	2.42	228.81	1.69	283.14	1.37
S03-B1	198.76	145.01	1.37	125.71	1.58	130.40	1.52	186.52	1.07	223.74	0.89
S04-B1	279.41	183.03	1.53	154.46	1.81	205.35	1.36	216.59	1.29	266.08	1.05
S05-B1	175.55	124.12	1.41	107.26	1.64	114.92	1.53	165.62	1.06	197.19	0.89
S06-B1	610.77	309.17	1.98	250.22	2.44	190.96	3.20	275.75	2.22	357.02	1.71
S07-B1	492.10	241.98	2.03	210.70	2.34	171.27	2.87	249.55	1.97	315.02	1.56
S08-B1	505.43	244.44	2.07	205.31	2.46	172.32	2.93	251.15	2.01	317.98	1.59
S02-B2	274.55	163.64	1.68	186.39	1.47	129.67	2.12	172.13	1.60	186.71	1.47
S03-B2	174.97	114.54	1.53	124.81	1.40	104.01	1.68	133.86	1.31	141.49	1.24
S04-B2	134.58	89.59	1.50	100.43	1.34	85.16	1.58	108.64	1.24	110.98	1.21
S05-B2	234.54	133.41	1.76	156.70	1.50	112.79	2.08	149.91	1.56	157.17	1.49
S01-C1	306.92	197.61	1.55	157.48	1.95	159.62	1.92	221.02	1.39	273.78	1.12
S02-C1	178.92	134.53	1.33	108.89	1.64	123.45	1.45	171.10	1.05	205.32	0.87
S03-C1	648.09	295.98	2.19	240.49	2.69	186.60	3.47	280.24	2.31	366.46	1.77
S04-C1	502.00	228.17	2.20	196.29	2.56	167.22	3.00	253.67	1.98	324.19	1.55
S02-C2	182.97	119.40	1.53	108.54	1.69	111.65	1.64	169.18	1.08	201.13	0.91
S03-C2	587.14	252.50	2.33	220.59	2.66	171.95	3.41	265.43	2.21	342.00	1.72
S04-C2	408.97	199.99	2.05	172.26	2.37	156.66	2.61	242.18	1.69	308.30	1.33
S05-C2	245.08	136.73	1.79	123.54	1.98	122.26	2.00	190.77	1.28	230.45	1.06
S06-C2	640.83	284.56	2.25	229.78	2.79	185.29	3.46	280.37	2.29	367.53	1.74
S07-C2	527.44	234.10	2.25	206.75	2.55	168.73	3.13	255.29	2.07	325.76	1.62
S01-C3	340.06	167.86	2.03	152.87	2.22	139.38	2.44	214.61	1.58	264.59	1.29
S02-C3	200.63	112.29	1.79	104.81	1.91	106.30	1.89	162.31	1.24	190.37	1.05
S03-C3	694.91	271.24	2.56	241.20	2.88	172.87	4.02	270.59	2.57	348.28	2.00
S04-C3	512.11	222.12	2.31	212.57	2.41	200.74	2.55	249.65	2.05	316.34	1.62
S01-C4	291.92	161.94	1.80	196.69	1.48	124.41	2.35	170.71	1.71	175.27	1.67
S02-C4	232.91	137.79	1.69	158.87	1.47	114.63	2.03	148.87	1.56	154.79	1.50
S01-C5	348.81	156.63	2.23	206.67	1.69	116.93	2.98	178.05	1.96	183.62	1.90
S02-C5	244.45	130.35	1.88	174.11	1.40	107.68	2.27	156.25	1.56	162.05	1.51
S03-C5	172.90	96.35	1.79	118.34	1.46	88.41	1.96	122.44	1.41	126.04	1.37
S04-C5	389.76	179.50	2.17	227.76	1.71	128.47	3.03	191.80	2.03	203.22	1.92
S05-C5	318.27	143.98	2.21	191.01	1.67	111.87	2.85	167.86	1.90	170.80	1.86
S01-C6	313.74	162.76	1.93	215.75	1.45	123.64	2.54	180.18	1.74	192.34	1.63
S02-C6	226.73	116.45	1.95	149.95	1.51	99.82	2.27	142.62	1.59	146.54	1.55
S03-C6	226.73	137.95	2.17	186.93	1.60	110.15	2.72	166.27	1.80	170.44	1.76
Promedio		1.91		1.95		2.44		1.70		1.45	
C.V.		0.16		0.24		0.27		0.24		0.22	
P₀₅		1.40		1.40		1.51		1.06		0.89	
P₉₅		2.31		2.72		3.46		2.29		1.90	

C.V. = Coeficiente de variación; P₀₅ = percentil del 5%; P₉₅ = percentil del 95%

Tabla 5.11. Verificación de los métodos simplificados (flexo-compresión esviada).

De todos los casos sometidos a esfuerzos de flexo-compresión esviada con ángulos de esviaje y excentricidades desiguales en extremos, únicamente 4 soportes han

presentado un ratio (N_{test}/N_{method}) menor que la unidad (del lado de la inseguridad): S03-B1, S05-.B1, S02-C1 y S02-C2, con ratios de 0.89, 0.89, 0.87 y 0.91 respectivamente, siendo todos los casos de soportes fabricados con hormigón de alta resistencia y con una excentricidad adimensional de carga (e_2/h) de 0.4 y para el método propuesto por el ACI-318 (2008) [1] (2) utilizando la expresión 5.21 (rigidez EI sin tener en cuenta la armadura longitudinal). Esto puede deberse a la subestimación de la deformación última en flexo-compresión en los hormigones de alta resistencia por parte de la normativa, ya que en estos ensayos la deformación del hormigón medida llega a alcanzar un valor del 5.64‰ en rotura (S02-C2).

En la tabla 5.12 se relacionan los resultados obtenidos para los casos de soportes sometidos a esfuerzos de flexo-compresión esviada en función de los parámetros analizados: combinación de ángulos de esviaje en extremos ($\alpha_1-\alpha_2$), excentricidad adimensional (e_2/h), relación entre excentricidades en extremos (β) y resistencia del hormigón (f_c).

		Ratio (N_{test}/N_{method})					
		EHE-08	EC2 (1)	EC2 (2)	ACI-318 (1)	ACI-318 (2)	
$\alpha_1-\alpha_2$	22.5°-22.5°	Promedio	1.72	1.86	2.16	1.58	1.34
		C.V.	0.15	0.23	0.30	0.25	0.21
	0°-22.5°	Promedio	1.79	1.97	2.37	1.67	1.41
		C.V.	0.19	0.28	0.31	0.27	0.24
	22.5°-45°	Promedio	2.10	2.00	2.63	1.80	1.56
		C.V.	0.13	0.27	0.25	0.23	0.20
	0°-45°	Promedio	2.04	2.00	2.67	1.77	1.54
		C.V.	0.13	0.25	0.23	0.22	0.22
e_2/h	0.1	Promedio	2.16	2.21	3.04	2.07	1.74
		C.V.	0.09	0.23	0.15	0.11	0.08
	0.2	Promedio	1.88	1.88	2.32	1.64	1.43
		C.V.	0.12	0.22	0.19	0.12	0.13
	0.4	Promedio	1.56	1.63	1.69	1.19	1.06
		C.V.	0.12	0.13	0.12	0.11	0.17
β	-0.5	Promedio	2.19	2.38	3.22	2.15	1.75
		C.V.	0.08	0.20	0.13	0.11	0.09
	0	Promedio	1.86	1.85	2.33	1.61	1.40
		C.V.	0.15	0.24	0.24	0.21	0.20
	0.5	Promedio	1.80	1.81	2.15	1.54	1.35
		C.V.	0.17	0.21	0.25	0.23	0.24
f_c	HC	Promedio	1.88	1.51	2.32	1.64	1.58
		C.V.	0.13	0.07	0.20	0.14	0.14
	HAR	Promedio	1.93	2.22	2.52	1.73	1.38
		C.V.	0.18	0.18	0.31	0.28	0.25

C.V. = Coeficiente de variación;

Tabla 5.12. Verificación de los códigos de diseño por parámetro analizado (flexo-compresión esviada)

En general, los métodos simplificados están más del lado de la seguridad conforme decrece la excentricidad adimensional (e_2/h), la relación entre excentricidades en extremos (β), con el incremento de la resistencia del hormigón y para las combinaciones de ángulos de esviaje en extremos ($\alpha_1-\alpha_2$) de 22.5°-45° y 0°-45°.

En la figura 5.25, a modo de ejemplo, se representa gráficamente el ratio ($N_{\text{test}}/N_{\text{method}}$) en función de la resistencia del hormigón para los métodos simplificados analizados para soportes sometidos a flexo-compresión esviada.

Una vez más, tal y como se ha observado en el apartado 5.6.4.a, el grado de precisión medio que se obtiene al aplicar el método de amplificación de momentos (1) del EC-2 (2004) [29] en el caso de los soportes de hormigón de alta resistencia, difiere considerablemente (del orden del 70%) del de los soportes fabricados con hormigón convencional, incrementándose el error medio con el incremento de la resistencia del hormigón. Sin embargo, utilizando los métodos propuesto por el ACI-318 (2008) [1], el método de la excentricidad adicional (2) del EC-2 (2004) [29] y el método de la EHE-08 [23], el grado de precisión medio obtenido no presenta grandes diferencias respecto a la resistencia del hormigón (figura 5.25).

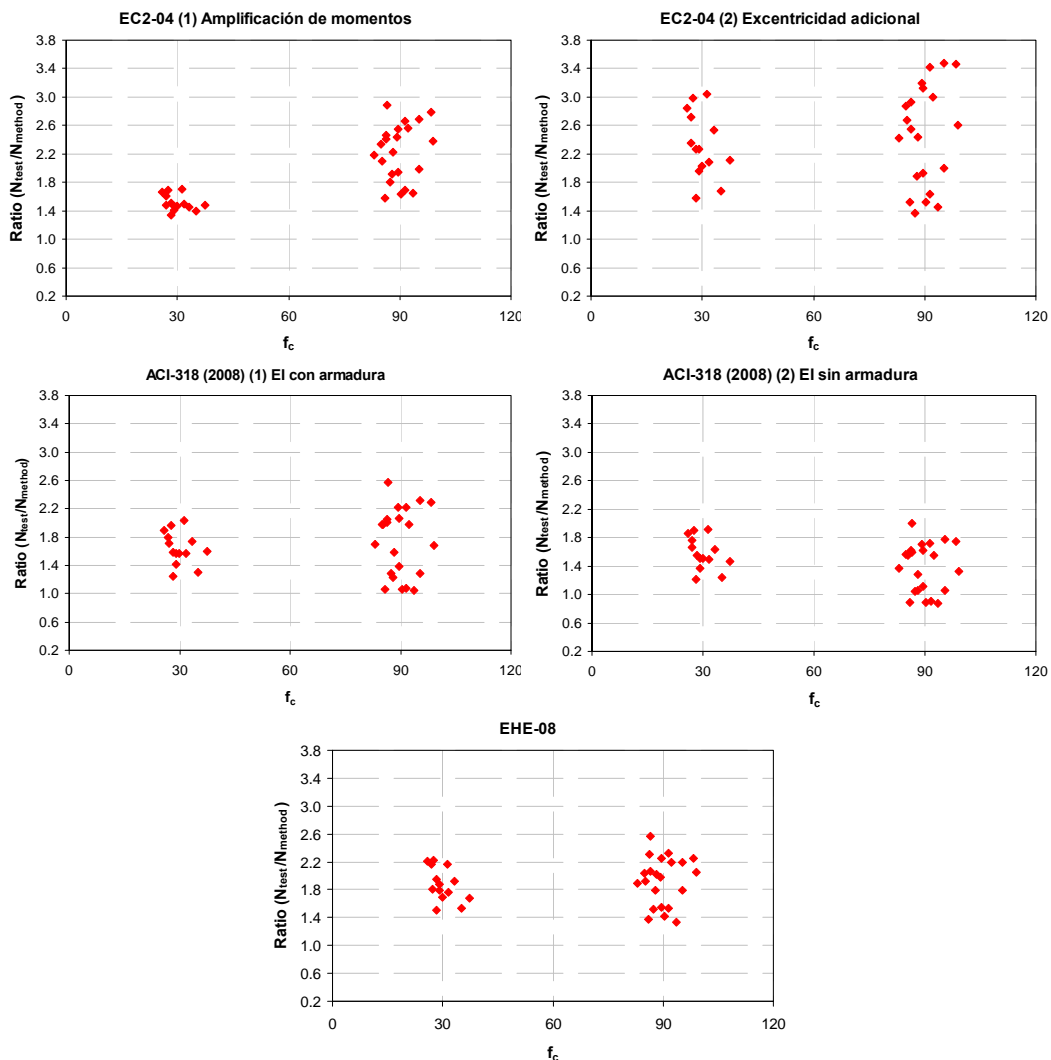


Figura 5.25. Verificación de métodos simplificados: resistencia del hormigón (f_c) flexo-compresión esviada.

Además, tal y como se ha observado en el análisis de los soportes sometidos a flexo-compresión recta (apartado 5.6.4.a), el método de amplificación de momentos del

EC-2 (2004) [29], al infravalorar la rigidez nominal (EI) obteniéndose valores de axil crítico (N_{cr}) inferiores al real, da lugar a resultados más conservadores para los casos de soportes sometidos a cargas muy centradas ($e_2/h = 0.1$ ó 0.2 ; $\beta = -0.5$ ó 0) y fabricados con hormigón de alta resistencia.

Como conclusión, la aplicación de los métodos de diseño propuestos por la EHE-08 [23], EC-2 (2004) [29] y ACI-318 (2008) [1] con la finalidad de prever la carga máxima de los ensayos ejecutados en este trabajo sometidos a sollicitaciones de flexo-compresión esviada dan lugar a resultados del lado de la seguridad pero con un coeficiente de variación elevado. Los promedios del ratio (N_{test}/N_{method}) han sido superior al obtenido para los soportes sometidos a flexo-compresión recta. Además, el grado de precisión depende notablemente de los parámetros analizados.

En el Anejo E del presente trabajo se muestran gráficamente los resultados obtenidos al aplicar los distintos métodos simplificados según los parámetros analizados para todos los soportes del programa experimental (flexo-compresión recta y esviada), en donde se puede observar gráficamente las tendencias presentadas en la tabla 5.10 y en la tabla 5.12.

Capítulo 6.

Simulación numérica

Para el análisis de los resultados obtenidos en el programa experimental resulta de gran ayuda la utilización de un modelo numérico que sirva tanto para la interpretación de los resultados como para la generalización de los mismos.

En este capítulo se describen, en primer lugar las características del modelo teórico de referencia (MTR) utilizado en este trabajo (Bonet (2001) [12]). A continuación se realiza la calibración del MTR con los ensayos realizados en el programa experimental presentado en este trabajo y con los 74 ensayos experimentales con soportes sometidos a excentricidades desiguales en extremos realizados por otros autores encontrados en la literatura técnica (Anejo D). Finalmente, el Modelo Teórico de Referencia calibrado es utilizado para la realización de una simulación numérica para cada una de las series completas del programa experimental descrito en el Capítulo 4 de este trabajo con la

finalidad de ayudar a interpretar los resultados obtenidos y también para la generalización de los mismos.

6.1. Característica del modelo teórico de referencia (MTR)

Con el objetivo de estudiar el comportamiento de los soportes ejecutados en el programa experimental se ha utilizado el modelo de análisis propuesto por Bonet (2001) [12]. Dicho modelo se basa en las siguientes hipótesis:

- La sección plana permanece plana después de aplicada la solicitación;
- Adherencia perfecta entre el acero y el hormigón;
- Se desprecian los efectos que se deriven de la deformación por cortante y por torsión;
- Se aplica una carga monotónica;
- El modelo numérico aplicado está basado en la técnica de los elementos finitos por rigidez e incluye, entre otras, las siguientes características básicas:
 - Elemento finito unidimensional propuesto por Marí (1984) [43] de trece grados de libertad. Dicho elemento consta de tres nodos. Cada uno de los nodos extremos tiene seis grados de libertad (tres translaciones y tres giros), mientras que el nodo central tiene un único grado de libertad u_3 , que es el desplazamiento en la dirección axial del elemento;
 - Comportamiento no lineal del hormigón;
 - Comportamiento no lineal del acero: diagrama bilineal (MC-90 [25]);
 - No linealidad geométrica: grandes deformaciones, a partir de la consideración de la matriz geométrica y grandes desplazamientos, a partir de realizar el equilibrio en la posición deformada de la estructura mediante la actualización de las coordenadas de los nodos;

Una más detallada información de este modelo numérico puede encontrarse en Bonet (2001) [12]. En este mismo trabajo se muestra el nivel de ajuste de este modelo en comparación con los resultados de 173 ensayos experimentales recogidos en la bibliografía. Estos ensayos corresponden a soportes biapoyados sometidos a excentricidades iguales en extremos $e_1/e_2 = 1$; excentricidad relativa $e_2/h = 0.1$ a 5.14 ; esbeltez mecánica $\lambda_m = 10$ a 207 ; cuantía geométrica de armadura longitudinal $\rho_1 = 0.9\%$ a 9.8% ; resistencia del acero $f_y = 387$ a 684 MPa; resistencia del hormigón en probeta cilíndrica $f_c = 18.58$ a 97 MPa; coeficiente de fluencia $\phi = 0$ a 3.29 ; ángulo de esviaje de 0° a 90° . El grado de precisión (ξ) se evalúa a través del ratio entre el axil obtenido con la simulación numérica (N_{SN}) y el axil obtenido experimentalmente (N_{test}) El ratio obtenido varía entre 0.64 a 1.19 , con un valor medio de 0.98 y un coeficiente de variación de 0.12 .

Además, se ha verificado la exactitud de este modelo numérico comparando con 66 ensayos experimentales disponibles en la literatura (Robinson et al. (1975) [54], ACI SP-13 (1966) [4], Sarker y Rangan (2003) [58]) correspondientes a soportes biapoyados sometidos a excentricidades desiguales en extremos. Para los soportes analizados ($e_1/e_2 = -1$ a 0.54 ; $e_2/h = 0.09$ a 1.5 ; $\lambda_m = 33$ a 138 ; $\rho_l = 0.5\%$ a 4% ; $f_y = 280$ a 505 MPa; $f_c = 24,3$ a 101 MPa) el ratio varía entre 0.82 y 1.41 con un valor medio de 1.06 (del lado de la seguridad) y con un coeficiente de variación de 0.15 (Pallarés et al (2009) [48]).

El modelo numérico posee un grado de precisión aceptable tanto para los soportes con excentricidades iguales en extremos como desiguales.

6.2. Calibración del MTR

Se ha considerado para la calibración del modelo numérico las siguientes ecuaciones constitutivas:

- En compresión, la ecuación propuesta por el CM-90 [25] para el hormigón convencional y modificado para hormigones de alta resistencia por el CEB-228 (1995) [26] para la relación tensión-deformación uniaxial en compresión. Y la ecuación de Collins et al (1993) [22], en donde se considera la posible disminución de la resistencia a compresión del hormigón de alta resistencia debido al salto de recubrimiento característico en el comportamiento de este tipo de material (coeficiente k_3).

Para tener en cuenta la disminución de la resistencia del hormigón en la columna debido al salto de recubrimiento observado principalmente en los soportes fabricados con hormigón de alta resistencia, se ha aplicado un factor (k_3) a la resistencia media obtenida con las probetas de control para cada ensayo. Diversas investigaciones (Collins et al (1993) [22], Lloyd and Rangan (1995) [39], Ibrahim and MacGregor (1997) [37]) mostraron que el factor k_3 puede ser adecuadamente expresado en función de la resistencia media del hormigón (f_{cm}) medida en probeta cilíndrica.

El ACI Committee 363 (1984) [2] [3] recomienda la utilización de un valor constante de k_3 igual a 0.85 . Sin embargo, Ibrahim y MacGregor (1997) [37] analizaron los datos de 49 ensayos experimentales de soportes con resistencia del hormigón mayor que 40 MPa para evaluar el factor k_3 , en donde mostraron que k_3 varía entre 0.82 y 1.20 con la variación de la resistencia media del hormigón (f_{cm}) de 40 a 130 MPa. Su análisis mostró también que el valor de 0.85 recomendado por el ACI Committee 363 (1984) [2] [3] puede ser razonablemente utilizado como un valor límite inferior de k_3 para columnas sometidas a cargas con excentricidades en extremos.

En el presente trabajo, para la calibración del MTR, se ha utilizado, para la obtención del factor k_3 , la ecuación propuesta por Popovics (1973) [51] y modificada

posteriormente por Collins et al (1993) [22] (expresión 6.1) basada en un estudio probabilístico.

$$k_3 = 0.6 + \frac{10}{f_{cm}} \leq 1 \quad 6.1$$

6.2.1. Carga máxima alcanzada en cada ensayo

La calibración del modelo numérico se ha realizado con los ensayos experimentales ejecutados en este trabajo. El grado de precisión (ξ) se obtiene como cociente entre la carga axial máxima registrada en cada ensayo experimental (N_{test}) y la carga axial máxima calculada mediante el modelo numérico (N_{NS}) (expresión 6.2):

$$\xi = \frac{N_{test}}{N_{NS}} \quad 6.2$$

En la tabla 6.1 y en la tabla 6.2 se observan los resultados del contraste de los resultados experimentales de los soportes sometidos a flexo-compresión recta y esviada respectivamente, con los obtenidos al utilizar el MTR con el modelo propuesto por el MC-90 [25] y por Collins et al (1993) [22] teniendo en cuenta el salto del recubrimiento ($f_c = k_3 \cdot f_{cm} \rightarrow k_3 \leq 1$) o no teniéndolo en cuenta ($k_3 = 1$).

Tanto en flexo-compresión recta como en esviada, la disminución significativa de la carga alcanzada en los ensayos, principalmente por los soportes fabricados con HAR (series A1, A3, B1, C1, C2 y C3), comparando con los resultados de los modelos propuestos por el MC-90 [25] y por Collins et al (1993) [22] con $k_3 = 1$, parece estar asociada al salto del recubrimiento característico en este tipo de material.

Del análisis de la tabla 6.1 y de la tabla 6.2 se puede observar que la utilización del coeficiente k_3 propuesto por Collins et al (1993) [22] mejora significativamente los resultados para los soportes fabricados con hormigón de alta resistencia, pasando de un promedio del lado de la inseguridad (menor que la unidad) para los modelos propuestos por el MC-90 [25] y por Collins et al (1993) [22] con $k_3 = 1$, a una situación del lado de la seguridad con un promedio de 1.05 en flexo-compresión recta y de 1.11 en flexo-compresión esviada, con coeficientes de variación de 0.11 y 0.08 respectivamente, utilizando el factor k_3 calculado según la expresión 6.1.

En la figura 6.1 se muestran gráficamente el grado de precisión ($\xi = N_{test}/N_{NS}$) en función de la resistencia del hormigón (f_c) para los soportes sometidos a flexo-compresión recta (a) y esviada (b).

Ensayo	N _{test} (kN)	MC-90		Collins (k ₃ = 1)		Collins (k ₃ = 0.6+10/f _{cm})	
		N _{NS} (kN)	ξ	N _{NS} (kN)	ξ	N _{NS} (kN)	ξ
S01-A1	616.92	721.96	0.85	671.25	0.92	518.32	1.19
S02-A1	590.63	591.75	1.00	550.82	1.07	434.12	1.36
S03-A1	287.77	371.43	0.77	350.44	0.82	292.76	0.98
S04-A1	497.21	618.10	0.80	574.06	0.87	449.98	1.10
S05-A1	1382.59	1679.95	0.82	1685.85	0.82	1262.69	1.09
S06-A1	1031.21	1280.14	0.81	1257.33	0.82	974.34	1.06
S07-A1	374.72	471.61	0.79	435.28	0.86	348.78	1.07
S08-A1	210.11	277.32	0.76	259.37	0.81	220.74	0.95
S09-A1	281.05	378.04	0.74	348.46	0.81	284.82	0.99
S10-A1	162.85	203.54	0.80	190.48	0.85	168.13	0.97
S11-A1	851.10	1048.99	0.81	1008.94	0.84	809.23	1.05
S12-A1	487.96	546.07	0.89	481.69	1.01	459.01	1.06
S01-A2	334.32	335.87	1.00	343.04	0.97	328.87	1.02
S02-A2	265.78	256.76	1.04	261.09	1.02	255.04	1.04
S03-A2	168.25	174.75	0.96	174.18	0.97	170.81	0.99
S04-A2	430.31	376.66	1.14	386.37	1.11	368.48	1.17
S05-A2	329.65	337.10	0.98	341.97	0.96	321.73	1.02
S06-A2	251.12	230.70	1.09	232.30	1.08	222.36	1.13
S07-A2	751.87	796.67	0.94	801.90	0.94	746.59	1.01
S08-A2	615.68	640.64	0.96	642.67	0.96	602.36	1.02
S01-A3	542.55	656.19	0.83	634.61	0.85	501.13	1.08
S02-A3	370.33	515.97	0.72	478.99	0.77	389.32	0.95
S03-A3	238.23	317.76	0.75	290.50	0.82	261.71	0.91
S04-A3	657.32	772.56	0.85	720.82	0.91	565.42	1.16
S05-A3	453.04	646.71	0.70	603.16	0.75	481.18	0.94
S06-A3	334.32	433.36	0.77	408.56	0.82	344.34	0.97
S01-A4	382.57	403.12	0.95	407.60	0.94	380.53	1.01
S02-A4	318.23	304.98	1.04	308.24	1.03	295.30	1.08
S03-A4	192.64	204.96	0.94	205.17	0.94	205.68	0.94
S04-A4	464.61	412.28	1.13	422.83	1.10	406.63	1.14
S05-A4	352.67	343.07	1.03	350.69	1.01	342.95	1.03
S06-A4	258.19	259.73	0.99	262.19	0.98	255.34	1.01
Promedio global		0.90		0.92		1.05	
C.V.		0.14		0.11		0.09	
Promedio HC		1.01		1.00		1.04	
C.V.		0.07		0.06		0.06	
Promedio HAR		0.81		0.86		1.05	
C.V.		0.09		0.09		0.11	

C.V. = Coeficiente de variación;

Tabla 6.1. Calibración del modelo numérico – flexo-compresión recta.

Ensayo	N _{test} (kN)	MC-90		Collins (k ₃ = 1)		Collins (k ₃ = 0.6+10/f _{cm})	
		N _{NS} (kN)	ξ	N _{NS} (kN)	ξ	N _{NS} (kN)	ξ
S01-B1	514.9	647.43	0.80	638.91	0.81	482.93	1.07
S02-B1	387.1	477.39	0.81	467.71	0.83	362.00	1.07
S03-B1	198.8	272.41	0.73	265.20	0.75	217.93	0.91
S04-B1	279.4	393.39	0.71	380.92	0.73	298.54	0.94
S05-B1	175.6	201.35	0.87	195.86	0.90	166.65	1.05
S06-B1	610.8	759.14	0.80	752.37	0.81	561.74	1.09
S07-B1	492.1	597.92	0.82	593.85	0.83	452.06	1.09
S08-B1	505.4	574.98	0.88	563.57	0.90	428.35	1.18
S02-B2	274.6	291.42	0.94	295.24	0.93	265.04	1.04
S03-B2	175.0	175.52	1.00	175.93	0.99	163.51	1.07
S04-B2	134.6	124.03	1.09	124.56	1.08	121.61	1.11
S05-B2	234.5	217.31	1.08	221.95	1.06	208.40	1.13
S01-C1	306.9	407.76	0.75	393.58	0.78	307.66	1.00
S02-C1	178.9	206.66	0.87	199.39	0.90	170.19	1.05
S03-C1	648.1	768.99	0.84	756.48	0.86	560.22	1.16
S04-C1	502.0	604.64	0.83	594.29	0.84	448.01	1.12
S02-C2	183.0	420.59	0.90	406.04	0.93	314.16	1.20
S03-C2	587.1	218.98	0.84	212.35	0.86	176.98	1.03
S04-C2	409.0	664.51	0.88	651.54	0.90	488.13	1.20
S05-C2	245.1	512.82	0.80	495.72	0.83	375.71	1.09
S06-C2	640.8	285.30	0.86	277.54	0.88	223.28	1.10
S07-C2	527.4	761.06	0.84	745.11	0.86	550.40	1.16
S01-C3	340.1	595.25	0.89	582.22	0.91	439.86	1.20
S02-C3	200.6	390.75	0.87	378.98	0.90	296.14	1.15
S03-C3	694.9	206.65	0.97	201.79	0.99	168.72	1.19
S04-C3	512.1	727.58	0.96	721.89	0.96	541.97	1.28
S01-C4	291.9	567.69	0.90	556.83	0.92	423.33	1.21
S02-C4	232.9	270.04	1.08	279.03	1.05	272.36	1.07
S01-C5	348.8	213.86	1.09	219.20	1.06	208.85	1.12
S02-C5	244.5	294.86	1.18	305.05	1.14	296.04	1.18
S03-C5	172.9	238.80	1.02	244.67	1.00	234.45	1.04
S04-C5	389.8	154.65	1.12	155.32	1.11	150.13	1.15
S05-C5	318.3	346.89	1.12	357.62	1.09	334.54	1.17
S01-C6	313.7	260.62	1.22	269.73	1.18	266.86	1.19
S02-C6	226.7	305.94	1.03	313.97	1.00	289.19	1.08
S03-C6	299.2	198.89	1.14	203.80	1.11	197.07	1.15
Promedio global		0.94		0.94		1.11	
C.V.		0.15		0.13		0.07	
Promedio HC		1.09		1.07		1.12	
C.V.		0.07		0.06		0.04	
Promedio HAR		0.84		0.86		1.11	
C.V.		0.08		0.07		0.08	

C.V. = Coeficiente de variación;

Tabla 6.2. Calibración del modelo numérico – flexo-compresión esviada.

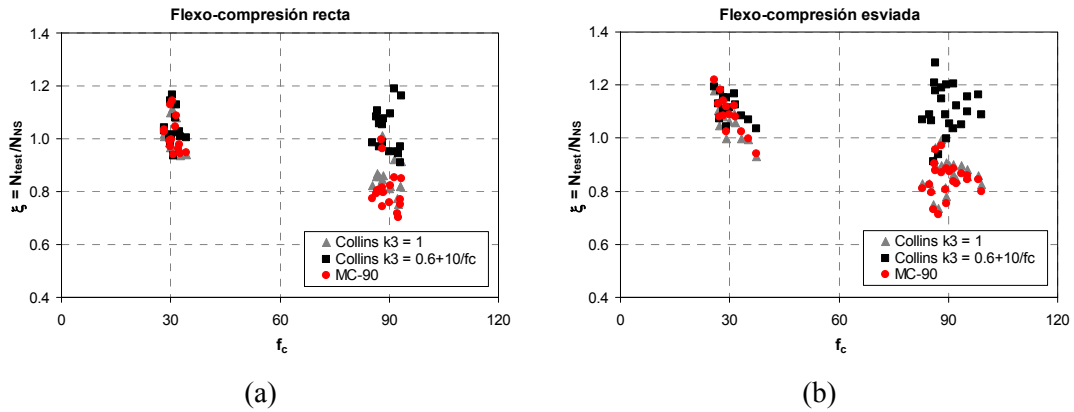


Figura 6.1. Grado de precisión (ξ) en función de la resistencia del hormigón (f_c).

En las gráficas de la figura 6.1 se puede observar claramente que la utilización del coeficiente k_3 propuesto por Collins et al (1993) [22] incrementa significativamente el grado de precisión, situándose del lado de la seguridad para los soportes fabricados con HAR, como se ha expuesto anteriormente, y apenas afecta a los resultados de los soportes fabricados con HC, visto que en los soportes fabricados con este tipo de material no se observa el salto de recubrimiento.

Según Collins et al (1993) [22], debido a la muy baja permeabilidad de la mayoría de los hormigones de alta resistencia, el curado ideal de la pieza solo ocurre en la capa exterior de la columna. Esto da lugar a esfuerzos de contracción entre la capa exterior e interior de la pieza y a formación de microfisuras en esta región.

Además, la retracción del HAR alrededor de las barras de la armadura longitudinal parece estar asociada a formación de microfisuras en el plano de las armaduras longitudinales, tal y como se muestra en la figura 6.2.

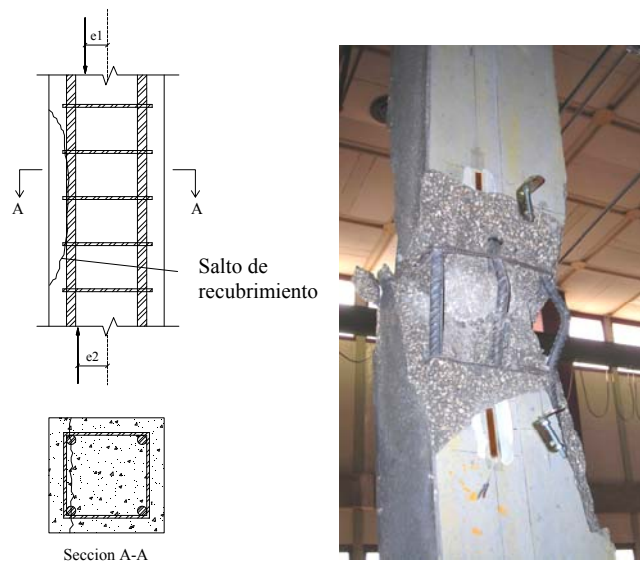


Figura 6.2. Salto de recubrimiento. Soporte fabricado con HAR.

Bajo altas cargas axiales, la combinación de estos dos efectos puede producir el desprendimiento del recubrimiento de hormigón en la cara más comprimida del soporte. Una vez ocurrido el salto del recubrimiento, la sección efectiva reducida no es capaz de resistir a la carga aplicada, que se encuentra ahora con un incremento de la excentricidad debido al desplazamiento del centro de gravedad de la sección, tal y como se representa en la figura 6.3. (Collins et al (1993) [22], Attard y Stewart (1997) [6], Foster (1999) [33]).

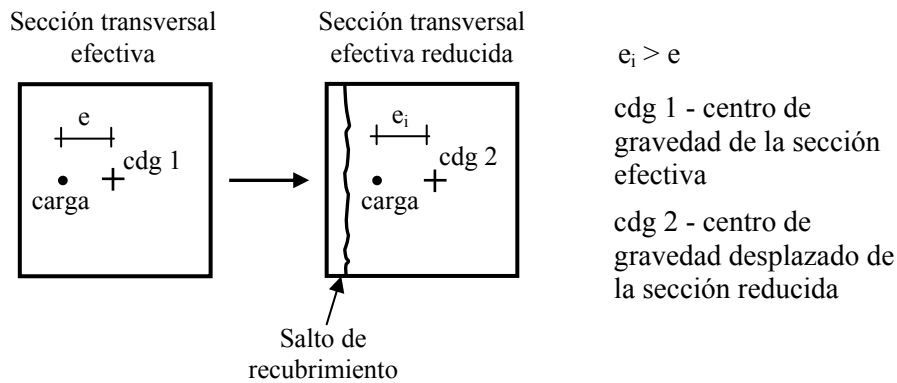


Figura 6.3. Esquema del incremento de la excentricidad debido al salto de recubrimiento.

En definitiva, la utilización del coeficiente k_3 propuesto por Collins et al (1993) [22] mejora significativamente los resultados considerando el salto del recubrimiento como una disminución de la resistencia a compresión del hormigón, principalmente en los soportes fabricados con HAR. Sin embargo, la minoración de la resistencia del hormigón utilizando este método se aplica a toda la sección transversal de la pieza, sin tener en cuenta que el núcleo del hormigón no ha sido afectado por el salto del recubrimiento.

En este trabajo, para simular el salto de recubrimiento del hormigón, se ha decidido hacer un nuevo ajuste del MTR, aplicando el coeficiente k_3 en la parte exterior de la sección transversal, minorando así la resistencia del hormigón en esta zona y manteniendo la resistencia original en el núcleo de la sección delimitado por la línea neutra de la armadura transversal ($k_3 = 1$), tal y como se muestra en la figura 6.4.

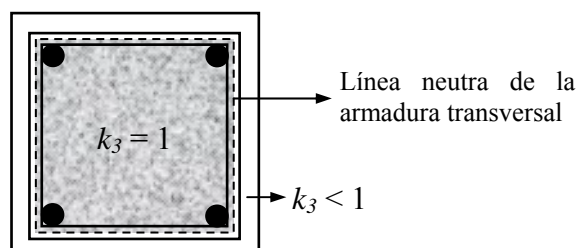


Figura 6.4. Sección transversal considerada con la utilización de distintos coeficientes k_3 .

A partir de este planteamiento se ha hecho una calibración del coeficiente k_3 con los ensayos experimentales realizados en este trabajo, y también con ensayos realizados por otros autores (Rangan (1999) [53], Sarker (2001) [57] y Pallarés (2006) [47]). En la

simulación numérica se ha utilizado distintos valores de k_3 constantes (0.60, 0.65, 0.70, 0.80, 0.90) para los ensayos de cada uno de los autores, con el fin de ajustar una expresión para el cálculo de dicho coeficiente. Con los resultados obtenidos de la simulación numérica se propone la siguiente expresión para el valor de k_3 en el contorno de la sección transversal para elementos sin confinamiento:

$$k_3 = 0.05 + \frac{55}{f_{cm}} \rightarrow (k_3 \leq 1) \tag{6.3}$$

A continuación, en la tabla 6.3, se presentan los resultados del contraste del MTR con los 68 ensayos experimentales realizados en este trabajo utilizando el coeficiente k_3 propuesto.

$k_3 = 0.05 + 55/f_{cm} \rightarrow (k_3 \leq 1)$									
Ensayos	Tipo de hormigón	N_{test} (KN)	N_{NS} (KN)	ξ (N_{test}/N_{NS})	Ensayos	Tipo de hormigón	N_{test} (KN)	N_{NS} (KN)	ξ (N_{test}/N_{NS})
S01-A1	HAR	616.92	569.08	1.08	S02_B2	HC	274.55	295.24	0.93
S02-A1	HAR	590.63	473.96	1.25	S03_B2	HC	174.97	175.93	0.99
S03-A1	HAR	287.77	309.18	0.93	S04-B2	HC	134.58	124.56	1.08
S04-A1	HAR	497.21	496.15	1.00	S05-B2	HC	234.54	221.95	1.06
S05-A1	HAR	1382.59	1386.37	1.00	S01_C1	HAR	306.92	304.82	1.01
S06-A1	HAR	1031.21	1050.67	0.98	S02_C1	HAR	178.92	164.66	1.09
S07-A1	HAR	374.72	375.08	1.00	S03_C1	HAR	648.09	557.33	1.16
S08-A1	HAR	210.11	227.93	0.92	S04_C1	HAR	502.00	446.99	1.12
S09-A1	HAR	281.05	302.58	0.93	S02_C2	HAR	182.97	173.08	1.06
S10-A1	HAR	162.85	172.67	0.94	S03_C2	HAR	587.14	491.41	1.19
S11-A1	HAR	851.10	848.98	1.00	S04_C2	HAR	408.97	359.34	1.14
S12-A1	HAR	487.96	466.62	1.05	S05_C2	HAR	245.08	215.80	1.14
S01-A2	HC	334.32	347.07	0.96	S06_C2	HAR	640.83	538.46	1.19
S02-A2	HC	265.78	264.04	1.01	S07_C2	HAR	527.44	444.60	1.19
S03-A2	HC	168.25	177.22	0.95	S01_C3	HAR	340.06	296.46	1.15
S04-A2	HC	430.31	390.67	1.10	S02_C3	HAR	200.63	167.50	1.20
S05-A2	HC	329.65	345.97	0.95	S03_C3	HAR	694.91	564.51	1.23
S06-A2	HC	251.12	234.22	1.07	S04_C3	HAR	512.11	434.75	1.18
S07-A2	HC	751.87	803.48	0.94	S01_C4	HC	291.92	279.03	1.05
S08-A2	HC	615.68	644.10	0.96	S02_C4	HC	232.91	219.20	1.06
S01-A3	HC	542.55	536.86	1.01	S01_C5	HC	348.81	305.05	1.14
S02-A3	HAR	370.33	412.81	0.90	S02_C5	HC	244.45	244.67	1.00
S03-A3	HAR	238.23	268.66	0.89	S03_C5	HC	172.90	155.32	1.11
S04-A3	HAR	657.32	613.85	1.07	S04_C5	HC	389.76	357.62	1.09
S05-A3	HAR	453.04	516.27	0.88	S05-C5	HC	318.27	269.73	1.18
S06-A3	HAR	334.32	357.23	0.94	S01-C6	HC	313.74	313.97	1.00
S01-A4	HC	382.57	412.30	0.93	S02-C6	HC	226.73	203.80	1.11
S02-A4	HC	318.23	311.35	1.02	S03_C6	HC	299.16	270.99	1.10
S03-A4	HC	192.64	213.42	0.90				Promedio total	1.04
S04-A4	HC	464.61	426.79	1.09				C.V.	0.09
S05-A4	HC	352.67	353.62	1.00				Promedio HAR	1.05
S06-A4	HC	258.19	264.11	0.98				C.V.	0.10
S01_B1	HAR	514.88	502.49	1.02				Promedio HC	1.03
S02_B1	HAR	387.08	375.21	1.03				C.V.	0.07
S03_B1	HAR	198.76	217.89	0.91				Promedio FR	0.99
S04_B1	HAR	279.41	299.24	0.93				C.V.	0.08
S05_B1	HAR	175.55	163.27	1.08				Promedio FE	1.09
S06_B1	HAR	610.77	577.70	1.06				C.V.	0.07
S07_B1	HAR	492.10	469.94	1.05					
S08_B1	HAR	505.43	439.60	1.15					

C.V. = Coeficiente de variación;

Tabla 6.3. Contraste del MTR calibrado con el coeficiente k_3 propuesto (ensayos propios).

Tal y como puede observarse en la tabla 6.3, el MTR calibrado con el factor k_3 propuesto (expresión 6.3) presenta una buena aproximación con los resultados experimentales con un promedio global de 1.04 con coeficiente de variación de 0.09. Para los soportes fabricados con hormigón convencional (HC) el promedio ha sido de 1.03 con coeficiente de variación de 0.07, y para los soportes fabricados con hormigón de alta resistencia (HAR), el promedio ha sido de 1.05 con un coeficiente de variación de 0.10. Si tenemos en cuenta el tipo de sollicitación aplicada, para los soportes sometidos a esfuerzos de flexo-compresión recta (FR) el promedio ha sido de 0.99 con coeficiente de variación de 0.07 y para los soportes sometidos a esfuerzos de flexo-compresión esviada (FE) el promedio ha sido de 1.09, con un coeficiente de variación de 0.08.

Se ha realizado también la comparación de los resultados obtenidos con la aplicación del MTR calibrado con el coeficiente k_3 propuesto con más 74 ensayos realizados por otros autores (Rangan (1999) [53], Sarker (2001) [57] y Pallarés (2006) [47]), tal y como se representa en la tabla 6.4.

Del análisis de la tabla 6.4 se puede observar que los resultados obtenidos con el Modelo Teórico de Referencia (MTR) calibrado, en general, se encuentran del lado de la seguridad ($\xi \geq 1$) para los ensayos considerados.

Cabe resaltar que en el caso del contraste del MTR calibrado con los ensayos realizados por Pallarés (2006) [47], puede observarse una tendencia más conservadora de los resultados (promedio de 1.20). Esta tendencia puede estar relacionada con la naturaleza de la rotura en los ensayos realizados por el autor, en donde no se evidenciaba claramente el salto de recubrimiento en la cara de compresión del hormigón. En todo caso los resultados están del lado de la seguridad.

Además se ha verificado la exactitud del MTR calibrado comparando con los demás ensayos experimentales de soportes sometidos a excentricidad desiguales en extremos, bajo carga instantánea, relacionados en el Anejo D de la presente tesis doctoral (Baumann [11], Martin y Olivieri [44], MacGregor y Barter [40], Van Stekelenburg [54], Mehmél et al. [45], Robinson et al. [54], Fouré et al. [55]). Para los soportes analizados el valor medio del ratio ($\xi = N_{\text{test}}/N_{\text{NS}}$) ha sido de 1.05 (del lado de la seguridad) con un coeficiente de variación de 0.27.

La dispersión de los resultados obtenidos es razonable con la variación típica para este tipo de pruebas de laboratorio. A la vista de los resultados puede concluirse que hay una buena aproximación entre los resultados obtenidos con el modelo numérico y los ensayos experimentales, utilizando el coeficiente k_3 propuesto.

Pallarés (2006) [47]								
Ensayo	N _{test} (KN)	N _{NS} (KN)	ξ (N _{test} /N _{NS})	Ensayo	N _{test} (KN)	N _{NS} (KN)	ξ (N _{test} /N _{NS})	
1	923.67	772.92	1.20	23	244.42	196.64	1.24	
2	473.90	393.08	1.21	24	111.45	89.46	1.25	
3	175.20	158.16	1.11	25	913.05	707.52	1.29	
4	924.67	724.41	1.28	26	439.06	410.77	1.07	
5	397.60	354.96	1.12	27	216.14	188.15	1.15	
6	166.10	139.16	1.19	28	106.29	87.98	1.21	
7	899.90	702.54	1.28	29	552.77	456.66	1.21	
8	436.50	335.67	1.30	30	355.61	321.28	1.11	
9	142.00	131.63	1.08	31	184.39	174.94	1.05	
10	922.90	722.37	1.28	32	107.41	89.72	1.20	
11	467.80	354.38	1.32	33	496.71	403.48	1.23	
12	134.80	121.41	1.11	34	342.02	267.23	1.28	
13	1088.28	842.60	1.29	35	145.11	140.58	1.03	
14	736.34	565.52	1.30	36	90.55	72.57	1.25	
15	362.63	284.39	1.28	37	456.97	372.08	1.23	
16	150.77	124.46	1.21	38	226.34	236.60	0.96	
17	1020.03	753.23	1.35	39	126.23	121.92	1.04	
18	604.43	487.27	1.24	40	70.89	65.27	1.09	
19	284.23	228.41	1.24	41	429.71	356.26	1.21	
20	127.55	104.03	1.23	42	267.26	221.18	1.21	
21	878.71	718.97	1.22	43	131.80	113.51	1.16	
22	441.69	437.08	1.01	44	76.57	59.36	1.29	
						Promedio	1.20	
						C.V.	0.08	
Sarker (2001) [57]				Rangan (1999) [53]				
Ensayo	N _{test} (KN)	N _{NS} (KN)	ξ (N _{test} /N _{NS})	Ensayo	N _{test} (KN)	N _{NS} (KN)	ξ (N _{test} /N _{NS})	
C1	1045	1085.98	0.96	1	666	818.62	0.81	
C2	1194	1190.68	1.00	2	776	950.07	0.82	
C3	1268	1176.20	1.08	3	1125	1321.80	0.85	
C4	1333	1158.91	1.15	4	771	864.94	0.89	
C5	1326	1217.28	1.09	5	421	496.88	0.85	
C6	1670	1590.41	1.05	6	429	444.68	0.96	
C7	647	682.60	0.95	7	996	722.77	1.38	
C8	742	773.85	0.96	8	557	492.10	1.13	
C9	803	778.22	1.03	9	619	543.83	1.14	
C10	898	791.09	1.14	10	671	526.48	1.27	
C11	969	774.45	1.25	11	1420	1454.62	0.98	
C12	999	808.83	1.24	12	1430	1270.69	1.13	
C13	926	805.13	1.15				Promedio	1.02
C14	1064	943.40	1.13				C.V.	0.19
C15	1201	947.26	1.27					
C16	1239	953.33	1.30					
C17	1361	1000.93	1.36					
C18	1439	967.46	1.49					
			Promedio					1.14
			C.V.					0.13

C.V. = Coeficiente de variación;

Tabla 6.4. Contraste del MTR calibrado con el coeficiente k_3 propuesto con ensayos realizados por otros autores.

En definitiva, la aplicación del Modelo Teórico de Referencia (MTR) con la utilización del factor k_3 propuesto en este trabajo (expresión 6.3), para la reducción de la resistencia del hormigón en la zona de la sección transversal afectada por el salto de recubrimiento característico en el comportamiento de este tipo de material, presenta un buen grado de precisión respecto a los resultados de los 68 ensayos experimentales

realizados en este trabajo y a los ensayos realizados por otros autores analizados, en lo que se refiere a la carga máxima alcanzada en cada ensayo.

6.2.2. Desplazamientos

El modelo numérico, además de poder predecir con buena aproximación la carga máxima alcanzada en cada ensayo, también debe ser capaz de predecir variables tan importantes como la deformada del soporte para distintos niveles de carga y su diagrama carga-flecha para poder así interpretar mejor el comportamiento de dichos elementos estructurales. Por ello, se ha analizado también la precisión del Modelo Teórico de Referencia (MTR) calibrado en cuanto al gráfico carga-desplazamiento para la sección más solicitada y en cuanto a la deformada del elemento estructural para la situación de carga máxima del soporte.

6.2.2.a. Flexo-compresión recta

En la tabla 6.5 se muestra el grado de precisión ($\xi = \delta_{\text{test}}/\delta_{\text{NS}}$) del MTR respecto a las flechas alcanzadas en situación de carga máxima (N_{max}) en la sección central del soporte (1.50 m) para los ensayos de flexo-compresión recta, siendo δ_{test} la flecha registrada en el ensayo experimental y δ_{NS} la flecha obtenida con la simulación numérica utilizando el MTR calibrado para la situación de carga máxima. Se puede observar un buen grado de precisión del MTR con un coeficiente de variación de 0.03 y un promedio de 1.03.

Soporte	δ_{test} (mm)	δ_{NS} (mm)	ξ	Soporte	δ_{test} (mm)	δ_{NS} (mm)	ξ	
S01-A1	20.30	19.67	1.03	S04-A2	15.88	15.55	1.02	
S02-A1	20.33	19.19	1.06	S05-A2	16.06	15.91	1.01	
S03-A1	20.19	19.33	1.04	S06-A2	18.80	18.63	1.01	
S04-A1	21.30	20.77	1.03	S07-A2	14.97	14.67	1.02	
S05-A1	19.58	20.79	0.94	S08-A2	17.02	16.04	1.06	
S06-A1	21.68	22.53	0.96	S01-A3	23.41	21.66	1.08	
S07-A1	22.74	21.14	1.08	S02-A3	24.61	22.91	1.07	
S08-A1	25.36	23.64	1.07	S03-A3	34.39	31.70	1.08	
S09-A1	23.69	22.20	1.07	S04-A3	21.15	20.25	1.04	
S10-A1	30.20	27.89	1.08	S05-A3	21.66	20.37	1.06	
S11-A1	25.80	26.10	0.99	S06-A3	24.92	23.54	1.06	
S12-A1	41.67	40.47	1.03	S01-A4	18.73	18.43	1.02	
S01-A2	17.48	17.26	1.01	S02-A4	20.77	20.56	1.01	
S02-A2	18.59	18.49	1.01	S03-A4	32.23	31.41	1.03	
S03-A2	26.49	25.72	1.03	S04-A4	16.36	16.14	1.01	
C.V. = Coeficiente de variación;							Promedio	1.03
							C.V.	0.03

Tabla 6.5. Grado de precisión del MTR respecto a las flechas alcanzadas en cada ensayo: sección central (1.50 m) - flexo-compresión recta.

En la figura 6.5 se representa, a modo de ejemplo, la precisión del modelo numérico en cuanto a las flechas alcanzadas por los soportes sometidos a esfuerzos de

flexo-compresión recta. Se presentan los diagramas carga-desplazamiento para la sección más solicitada de los soportes S07-A1 (HAR) y S05-A2 (HC) y las deformadas para el instante de carga máxima (N_{max}) para los soportes S05-A3 (HAR) y S05-A4 (HC).

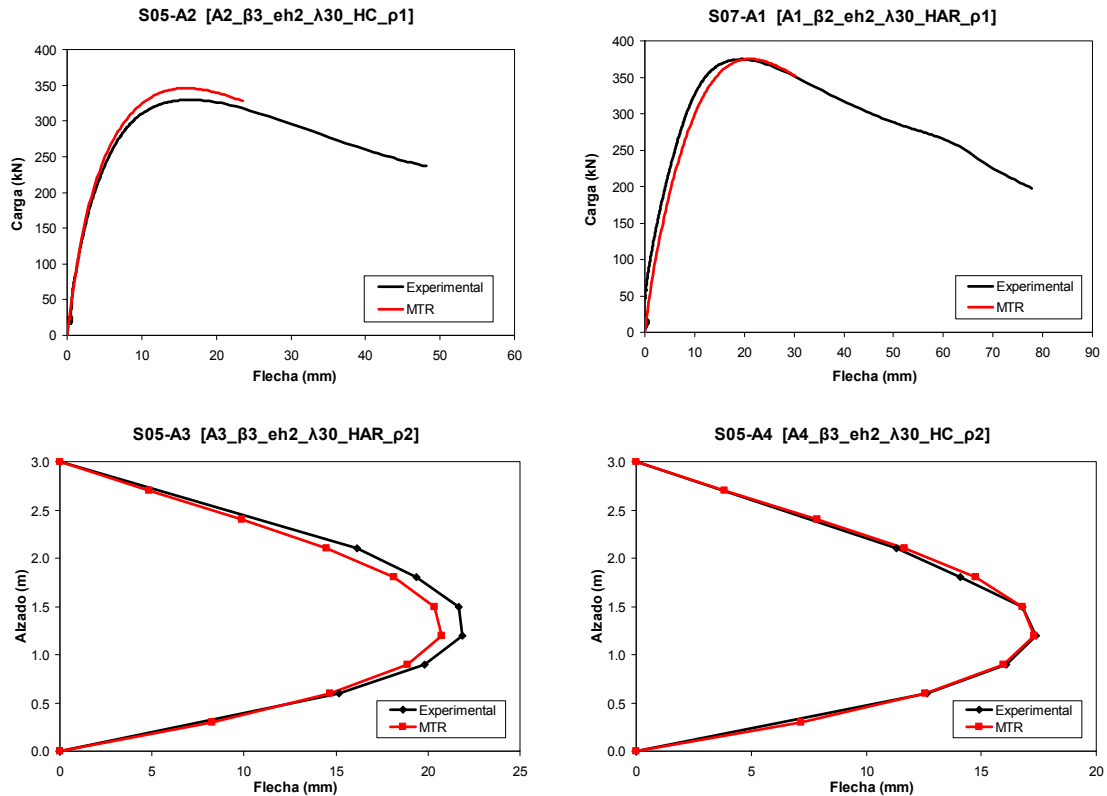


Figura 6.5. Precisión del MTR en cuanto a las flechas alcanzadas en los ensayos a flexo-compresión recta.

Se puede observar, del análisis de las gráficas de la figura 6.5, que el Modelo Teórico de Referencia (MTR) calibrado muestra un grado de precisión aceptable respecto a las flechas alcanzadas en los ensayos experimentales, representando con suficiente aproximación el comportamiento de los soportes sometidos a esfuerzos de flexo-compresión recta con excentricidades desiguales en los extremos. La respuesta para el resto de los ensayos experimentales sometidos a esfuerzos de flexo-compresión recta ha sido similar a la mostrada en la figura 6.5 (Anejo F).

6.2.2.b. Flexo-compresión esviada

Para los ensayos experimentales de los soportes sometidos a esfuerzos de flexo-compresión esviada, principalmente con pequeñas excentricidades de carga ($e_2/h = 0.1$ y 0.2) y valores de relación entre excentricidades ($\beta = e_1/e_2$) iguales a 0 ó -0.5 , uno de los aspectos que han afectado la respuesta de la columna ha sido un incremento de la excentricidad de la carga aplicada debido a las imperfecciones geométricas ocasionadas durante el proceso de fabricación de la pieza. Por ello, se ha realizado un ajuste del modelo numérico para estos ensayos. Cabe resaltar que en los soportes sometidos a

flexo-compresión recta no se ha observado ese fenómeno debido a que en estos casos la flexión se daba respecto al eje débil de la sección, minimizando los problemas ocasionados por el incremento de excentricidad debido a estas imperfecciones.

La tolerancia geométrica marca una región en el interior de la cual debe encontrarse el elemento. Galambos y Surovek [34], por ejemplo, recomiendan tener en cuenta un incremento de excentricidad de $L/1000$ para soportes sometidos a cargas con excentricidades en extremos (donde L es la longitud de pandeo del soporte). Por otra parte, el Eurocódigo 2 (2004) [29] recomienda la utilización de un incremento de excentricidad de $L/400$ en la dirección más desfavorable, teniendo en cuenta las imperfecciones geométricas ocasionadas con un control de ejecución normal de la pieza.

A partir de estas indicaciones se ha procedido con un ajuste del modelo numérico para diferentes valores del incremento de la excentricidad.

Se ha realizado el ajuste utilizando distintos valores de incremento de excentricidad para los ensayos de flexo-compresión esviada. Inicialmente se ha realizado la simulación con el valor recomendado por el Eurocódigo 2 (2004) [29] ($L/400$) y a partir de ahí se ha ido modificando los valores hasta un valor de $L/1000$.

En la tabla 6.6 se muestra el grado de precisión ($\xi = \delta_{\text{test}}/\delta_{\text{NS}}$) del MTR respecto a las flechas alcanzadas en situación de carga máxima (N_{max}) en la sección central del soporte (1,50 m) para los ensayos de flexo-compresión esviada respecto a los ejes de flexión (x , y) utilizando la excentricidad impuesta recomendada por el Eurocódigo 2 (2004) [29] ($L/400$) y la recomendada por Galambos y Surovek [34] ($L/1000$), siendo δ_{test} la flecha registrada en el ensayo experimental y δ_{NS} la flecha obtenida con la simulación numérica utilizando el MTR calibrado para la situación de carga máxima.

Con la simulación numérica, se ha verificado que el valor del incremento de excentricidad recomendado por el Eurocódigo 2 (2004) [29] es muy alto para el tipo de control de ejecución realizado en laboratorio, principalmente respecto al eje de la sección transversal con menor componente de excentricidad (más desfavorable), con un promedio respecto al eje “ x ” de 1.06 con coeficiente de variación de 0.20, y respecto al eje “ y ” (eje más desfavorable en la mayoría de los ensayos en donde se ha aplicado la excentricidad impuesta) con un promedio de 1.27 con coeficiente de variación muy elevado de 1.75 (tabla 6.6 y figura 6.6).

Se ha llevado a cabo entonces, el ajuste con valores menores de excentricidad impuesta (e_{imp}), y al final se ha verificado que el valor de $e_{\text{imp}} = L/1000$ recomendado por Galambos y Surovek [34] posee un buen grado de aproximación con los resultados experimentales de los soportes sometidos a esfuerzos de flexo-compresión esviada en lo que se refiere a las flechas obtenidas en cada ensayo.

Soporte	$e_{imp} = L/400$						$e_{imp} = L/1000$					
	Eje x			Eje y			Eje x			Eje y		
	δ_{test} (mm)	δ_{NS} (mm)	ξ	δ_{test} (mm)	δ_{NS} (mm)	ξ	δ_{test} (mm)	δ_{NS} (mm)	ξ	δ_{test} (mm)	δ_{NS} (mm)	ξ
S01-B1	20.56	18.25	1.13	-3.28	8.62	-0.38	20.56	21.93	0.94	-3.28	-2.27	1.44
S02-B1	19.83	22.83	0.87	-7.57	-0.54	14.16	19.83	21.19	0.94	-7.57	-6.80	1.11
S03-B1	31.88	24.21	1.32	-17.96	-12.62	1.42	31.88	24.22	1.32	-17.96	-12.59	1.43
S04-B1	20.45	22.75	0.90	-7.63	-9.98	0.77	20.45	22.48	0.91	-7.63	-9.85	0.78
S05-B1	38.67	34.96	1.11	-13.45	-12.97	1.04	38.67	34.69	1.11	-13.45	-12.84	1.05
S06-B1	16.69	19.21	0.87	-5.42	-5.81	0.93	16.69	19.20	0.87	-5.42	-5.82	0.93
S07-B1	16.35	18.77	0.87	-7.22	-7.35	0.98	16.35	18.77	0.87	-7.22	-7.36	0.98
S08-B1	21.37	22.34	0.96	-5.76	-5.27	1.09	21.37	22.33	0.96	-5.76	-5.28	1.09
S02-B2	18.02	17.07	1.06	-5.22	-5.71	0.91	18.02	17.06	1.06	-5.22	-5.73	0.91
S03-B2	20.72	21.23	0.98	-6.94	-8.92	0.78	20.72	20.97	0.99	-6.94	-8.77	0.79
S04-B2	43.10	26.62	1.62	-14.07	-13.73	1.03	43.10	26.12	1.65	-14.07	-13.39	1.05
S05-B2	23.52	18.60	1.26	-2.67	-7.23	0.37	23.52	18.33	1.28	-2.67	-7.11	0.37
S01-C1	23.10	24.16	0.96	-2.60	-4.91	0.53	23.10	23.88	0.97	-2.60	-4.84	0.54
S02-C1	41.99	37.10	1.13	-9.41	-9.08	1.04	41.99	37.11	1.13	-9.41	-9.05	1.04
S03-C1	18.43	19.34	0.95	-3.02	-4.27	0.71	18.43	19.07	0.97	-3.02	-4.17	0.72
S04-C1	14.90	17.18	0.87	-11.50	-11.65	0.99	14.90	17.18	0.87	-11.50	-11.66	0.99
S02-C2	34.54	31.20	1.11	-20.78	-17.43	1.19	34.54	31.22	1.11	-20.78	-17.39	1.19
S03-C2	14.35	17.02	0.84	-12.67	-12.40	1.02	14.35	17.25	0.83	-12.67	-12.60	1.01
S04-C2	15.18	17.85	0.85	-15.68	-15.20	1.03	15.18	17.85	0.85	-15.68	-15.20	1.03
S05-C2	23.45	19.31	1.21	-23.93	-20.97	1.14	23.45	19.11	1.23	-23.93	-20.76	1.15
S06-C2	6.20	8.93	0.70	-17.28	-16.38	1.06	6.20	8.93	0.69	-17.28	-16.37	1.06
S07-C2	18.88	19.98	0.95	-10.37	-10.44	0.99	18.88	19.97	0.95	-10.37	-10.45	0.99
S01-C3	18.34	17.94	1.02	-18.63	-16.42	1.14	18.34	17.94	1.02	-18.63	-16.42	1.13
S02-C3	31.50	26.82	1.17	-27.40	-22.76	1.20	31.50	26.84	1.17	-27.40	-22.74	1.21
S03-C3	11.60	11.95	0.97	-16.60	-10.32	1.61	11.60	11.96	0.97	-16.60	-10.33	1.61
S04-C3	21.13	19.08	1.11	-9.25	-10.48	0.88	21.13	19.08	1.11	-9.25	-10.49	0.88
S01-C4	19.32	16.95	1.14	-5.04	-4.82	1.05	19.32	16.67	1.16	-5.04	-4.71	1.07
S02-C4	24.44	19.48	1.25	-2.83	-4.40	0.64	24.44	19.19	1.27	-2.83	-4.33	0.65
S01-C5	17.28	12.62	1.37	-5.02	-7.51	0.67	17.28	12.38	1.40	-5.02	-7.35	0.68
S02-C5	14.05	13.34	1.05	-12.38	-11.54	1.07	14.05	13.12	1.07	-12.38	-11.35	1.09
S03-C5	20.03	17.85	1.12	-17.23	-16.68	1.03	20.03	17.42	1.15	-17.23	-16.27	1.06
S04-C5	2.38	4.27	0.56	-13.89	-15.50	0.90	2.38	4.17	0.57	-13.89	-15.22	0.91
S05-C5	19.27	15.51	1.24	-3.36	-5.80	0.58	19.27	15.25	1.26	-3.36	-5.66	0.59
S01-C6	19.91	14.75	1.35	-3.00	-8.15	0.37	19.91	14.50	1.37	-3.00	-7.98	0.38
S02-C6	17.80	16.13	1.10	-11.08	-12.12	0.91	17.80	15.90	1.12	-11.08	-11.94	0.93
S03-C6	11.35	8.46	1.34	-10.42	-10.39	1.00	11.35	8.27	1.37	-10.42	-10.16	1.03
	Promedio	1.06		Promedio	1.27		Promedio	1.07		Promedio	0.97	
	C.V.	0.20		C.V.	1.75		C.V.	0.20		C.V.	0.27	

C.V. = Coeficiente de variación;

Tabla 6.6. Grado de precisión del MTR respecto a las flechas alcanzadas en cada ensayo: sección central (1.50 m) - flexo-compresión esviada.

En general se ha obtenido un buen ajuste con la excentricidad impuesta de L/1000 con un promedio respecto al eje “x” de flexión de 1.07 con coeficiente de variación de 0.20 y respecto al eje “y” de flexión de 0.97 con coeficiente de variación de 0.27.

En la figura 6.6 y en la figura 6.7 se representan gráficamente, para el soporte S02-B1 ($f_c = 83$ MPa; $\alpha_1 = \alpha_2 = 22.5^\circ$; $\beta = 0$; $e_2/h = 0.2$), la comparación entre los resultados experimentales y los resultados obtenidos con la simulación numérica utilizando el valor de excentricidad impuesta de L/400 recomendado por el Eurocódigo 2 (2004) [29] y de L/1000 recomendado por Galambos y Surovek [34] respectivamente.

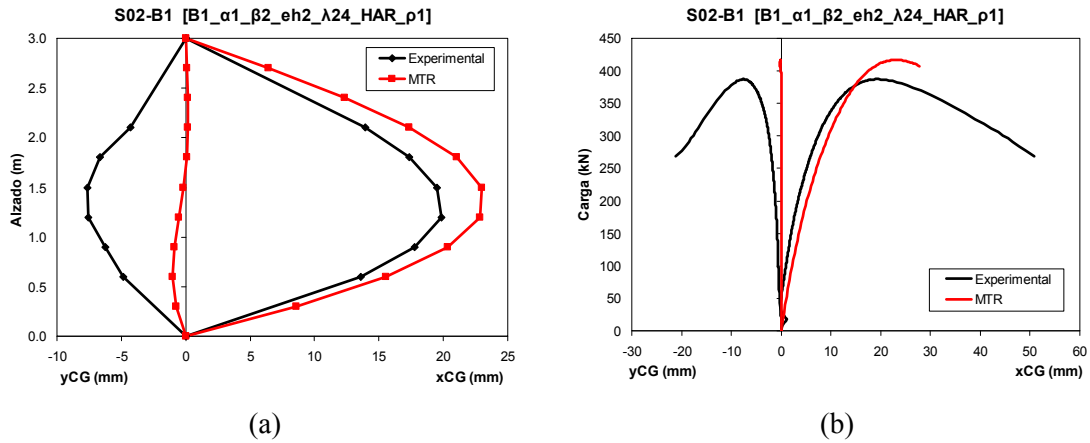


Figura 6.6. Ajuste de la excentricidad adimensional por imperfecciones: $e_{imp} = L/400$:
a. Deformada (N_{max}); b. Diagrama carga – desplazamiento.

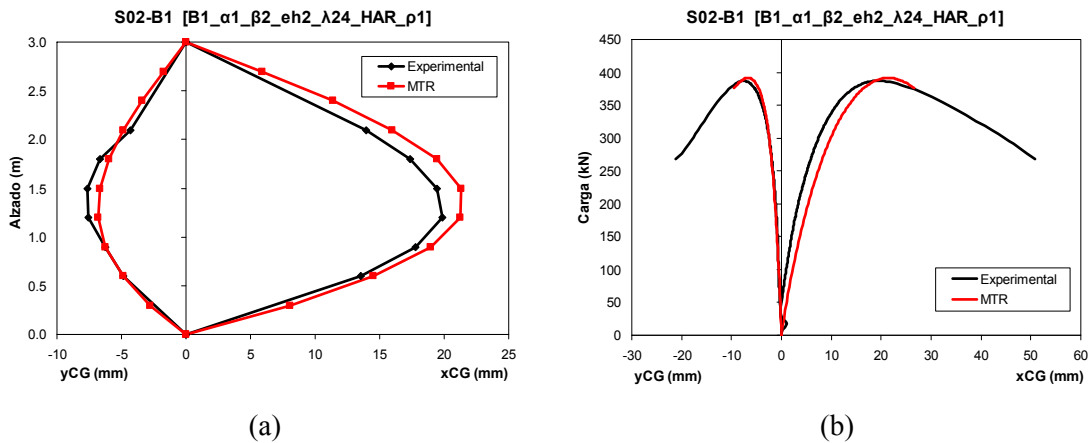


Figura 6.7. Ajuste de la excentricidad adimensional por imperfecciones: $e_{imp} = L/1000$:
a. Deformada (N_{max}); b. Diagrama carga – desplazamiento.

Cabe resaltar que la utilización de la excentricidad impuesta con el valor de $L/1000$ en los ensayos de flexo-compresión esviada no ha influenciado de manera significativa en el grado de precisión del MTR respecto a las cargas máximas alcanzadas, mejorando simplemente el comportamiento de los soportes respecto al desplazamiento.

En la tabla 6.7 se puede observar el grado de precisión ($\xi = N_{test}/N_{NS}$) para los ensayos de flexo-compresión esviada utilizándose la excentricidad impuesta de $L/1000$.

Comparando la tabla 6.3 (sin excentricidad impuesta) con la tabla 6.7 (excentricidad impuesta de $L/1000$) se observa que el valor promedio para los ensayos de flexo-compresión esviada no se altera (1.09), evidenciando la poca influencia de la aplicación de la excentricidad impuesta en el grado de precisión del MTR para las cargas máximas alcanzadas en cada ensayo.

SopORTE	N_{test} (KN)	N_{NS} (KN)	ξ (N_{test}/N_{NS})	SopORTE	N_{test} (KN)	N_{NS} (KN)	ξ (N_{test}/N_{NS})
S01-B1	514.88	502.49	1.02	S04-C2	408.97	359.34	1.14
S02-B1	387.08	375.21	1.03	S05-C2	245.08	215.80	1.14
S03-B1	198.76	217.89	0.91	S06-C2	640.83	538.46	1.19
S04-B1	279.41	299.24	0.93	S07-C2	527.44	444.60	1.19
S05-B1	175.55	163.27	1.08	S01-C3	340.06	296.46	1.15
S06-B1	610.77	577.70	1.06	S02-C3	200.63	167.50	1.20
S07-B1	492.10	469.94	1.05	S03-C3	694.91	564.51	1.23
S08-B1	505.43	439.60	1.15	S04-C3	512.11	434.75	1.18
S02-B2	274.55	295.24	0.93	S01-C4	291.92	279.03	1.05
S03-B2	174.97	175.93	0.99	S02-C4	232.91	219.20	1.06
S04-B2	134.58	124.56	1.08	S01-C5	348.81	305.05	1.14
S05-B2	234.54	221.95	1.06	S02-C5	244.45	244.67	1.00
S01-C1	306.92	304.82	1.01	S03-C5	172.90	155.32	1.11
S02-C1	178.92	164.66	1.09	S04-C5	389.76	357.62	1.09
S03-C1	648.09	557.33	1.16	S05-C5	318.27	269.73	1.18
S04-C1	502.00	446.99	1.12	S01-C6	313.74	313.97	1.00
S02-C2	182.97	306.14	1.23	S02-C6	226.73	203.80	1.11
S03-C2	587.14	173.08	1.06	S03-C6	299.16	270.99	1.10
Promedio							1.09
C.V.							0.07

C.V. = Coeficiente de variación;

Tabla 6.7. Contraste del MTR calibrado con el coeficiente k_3 y con una excentricidad impuesta $e_{imp} = L/1000$: flexo-compresión esviada.

En el Anejo F de este trabajo se representan las gráficas con los contratos para los diagramas carga-desplazamiento y para las deformadas registradas en situación de carga máxima (N_{max}) para todos los soportes del programa experimental, utilizando para los casos de flexo-compresión esviada la excentricidad impuesta recomendada por Galambos y Surovek [34] ($e_{imp} = L/1000$) debido al problema de tolerancias observadas en estas piezas ocasionados por las imperfecciones geométricas.

6.3. Simulación numérica

Con el Modelo Teórico de Referencia (MTR) calibrado descrito en los apartados anteriores, para cada una de las series experimentales que han sido objeto de análisis, se ha generado mediante la simulación numérica la serie completa con el objetivo de analizar el nivel de precisión que se obtiene al aplicar el método del coeficiente de equivalencia C_m propuesto por Austin (1961) [7] (expresión 6.4) y utilizado por la mayoría de los códigos de diseño (AISC (1963) [60], ACI-318 (2008) [1], EC-2 (2004) [29], EHE-08 [23], MC-90 [25]). Cabe señalar que existe unanimidad en la expresión utilizada por los mismos:

$$C_m = 0.6 + 0.4 \cdot \beta \geq 0.4 \quad 6.4$$

donde β es la relación entre excentricidades en extremos del soporte (e_1/e_2).

Para los casos de soportes sometidos a esfuerzos de flexo-compresión recta, este coeficiente se aplica al mayor flector en valor absoluto aplicado en uno de los extremos del soporte (M) (expresión 6.5). Por otra parte, si el soporte está sometido a una

solicitud de flexo-compresión esviada se calcula cada coeficiente de equivalencia en cada dirección de flexión de forma independiente y se aplica al mayor momento flector en valor absoluto de cada dirección de flexión también de forma independiente (M_x ; M_y) (expresión 6.6).

$$- \text{ Flexión recta: } M_e = C_m \cdot M \quad 6.5$$

$$- \text{ Flexión Esviada: } M_{ex} = C_{mx} \cdot M_x \leftrightarrow M_{ey} = C_{my} \cdot M_y \quad 6.6$$

donde M_{ei} es el momento equivalente.

6.3.1. Flexo-compresión recta

Los ensayos numéricos de flexo-compresión recta se han agrupado en seis series:

- Serie 1 (A1- λ 20): HAR, $\rho_l = 2.26\%$;
- Serie 2 (A2- λ 20): HC, $\rho_l = 2.26\%$;
- Serie 3 (A1- λ 30): HAR, $\rho_l = 3.39\%$;
- Serie 4 (A2- λ 30): HC, $\rho_l = 3.39\%$;
- Serie 5 (A3- λ 30): HAR, $\rho_l = 2.26\%$;
- Serie 6 (A4- λ 30): HC, $\rho_l = 2.26\%$.

Se ha realizado una simulación numérica para cada una de las series en donde se ha tomando como resistencia del hormigón para los soportes fabricados con hormigón convencional $f_{cm} = 30.8$ MPa y para los de alta resistencia $f_{cm} = 89.4$ MPa. Dichas resistencias corresponden con las resistencias medias de cada una de las series de hormigón convencional y de alta resistencia respectivamente.

En la figura 6.8 y en la figura 6.9 se muestra, para cada serie, los diagramas de interacción adimensionales de la sección ($\lambda_g = 0$) y del soporte ($\lambda_g \neq 0$) para distintas relaciones de excentricidades β (1, 0.5, 0 y -0.5). En el caso en que la relación de excentricidad sea distinta de la unidad se representa el momento máximo de primer orden en extremo del soporte ($N \cdot e_2$) y si es igual a la unidad, el momento de primer orden aplicado en extremo. También, se ha obtenido el ratio entre el coeficiente de equivalencia calculado con la formulación propuesta por las normativas ($C_{m,Code}$) y el coeficiente de equivalencia calculado con la simulación numérica a igualdad de axil aplicado en el soporte ($C_{m,NS}$):

$$C_{m,NS} = \frac{\mu_{\beta=1}}{\mu_{\beta \neq 1}} \quad 6.7$$

donde:

$\mu_{\beta=1}$ momento reducido de primer orden correspondiente al caso de referencia con excentricidades iguales en extremos;

$\mu_{\beta \neq 1}$ momento reducido de primer orden máximo en extremo correspondiente al caso de excentricidades distintas en extremos.

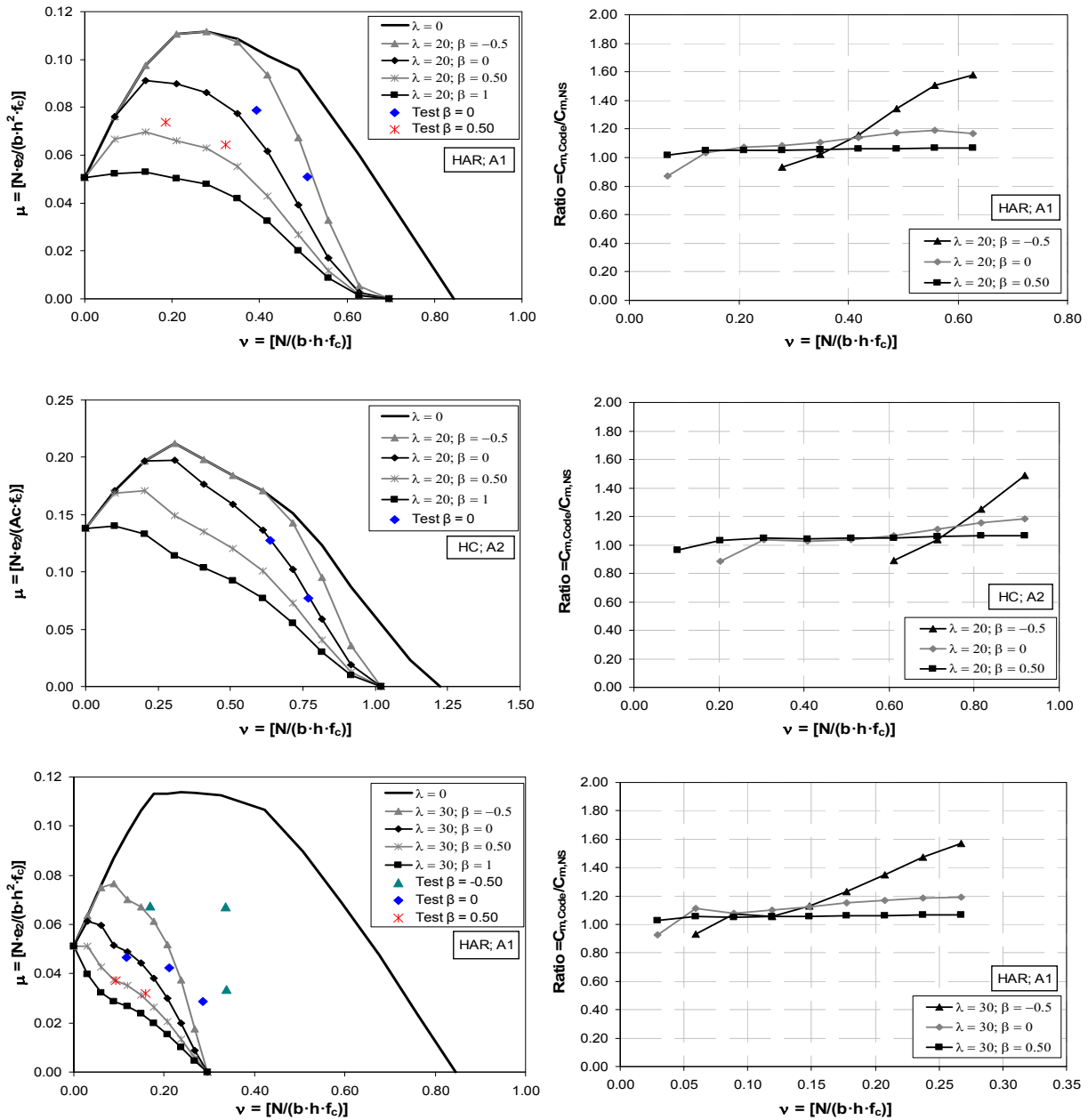


Figura 6.8. Resultados de la simulación numérica - flexo-compresión recta.

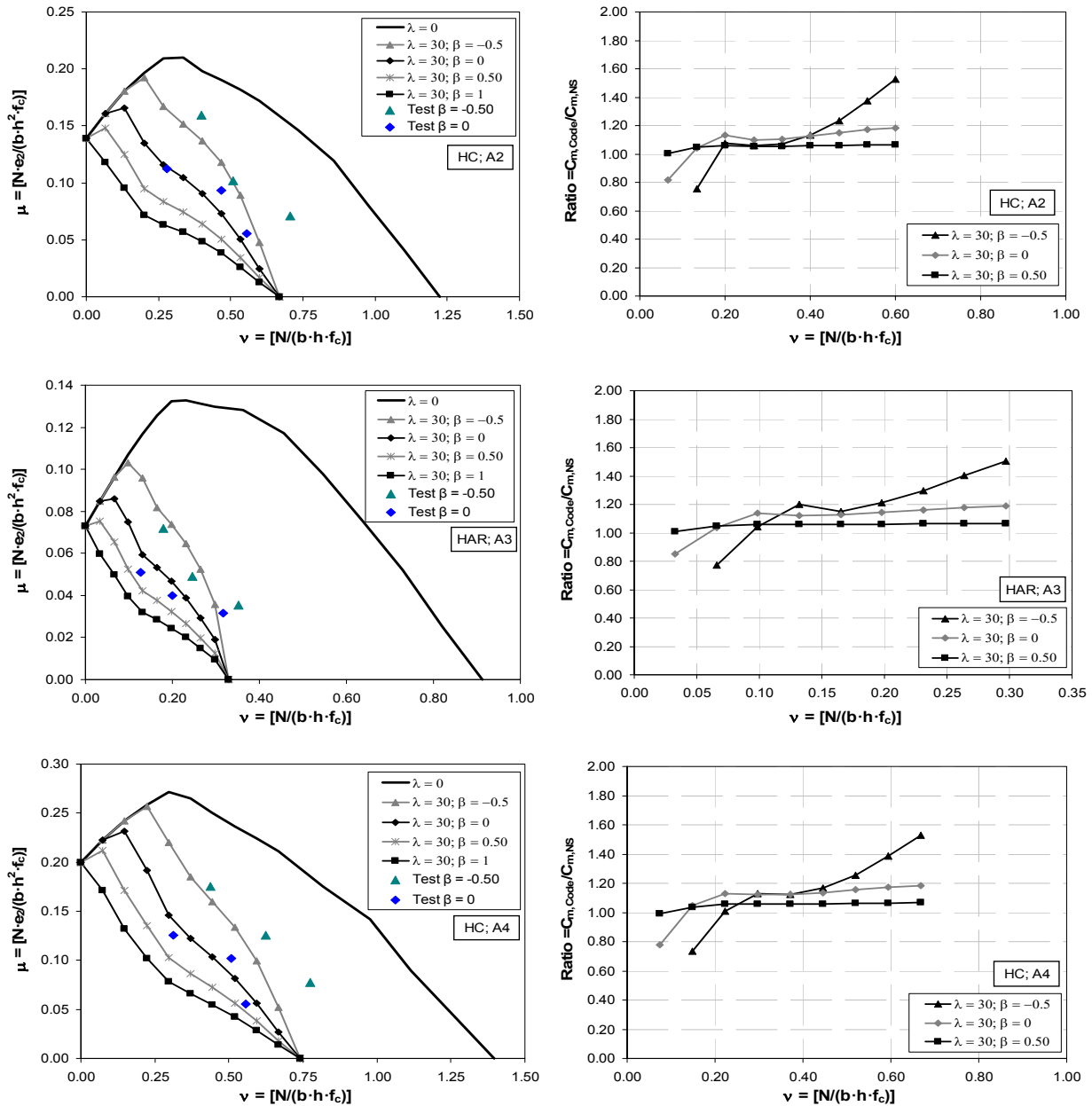


Figura 6.9. Resultados de la simulación numérica - flexo-compresión recta (continuación).

Puede observarse el grado de aproximación que tienen los resultados experimentales respecto a la simulación numérica. Por otra parte, también puede observarse que la relación entre los coeficientes de equivalencia depende del axil aplicado en el soporte, con una tendencia a aumentar mientras el nivel de axil se incrementa. En la gran mayoría de los casos esta relación está por encima de la unidad (es decir, del lado de la seguridad). Sin embargo, conforme la relación de excentricidades disminuye, existe una mayor dispersión de resultados, presentando resultados inseguros para niveles de axil bajos, y excesivamente seguros para niveles de axil cercanos al axil crítico del soporte.

En la figura 6.10 se presenta el ratio entre los distintos coeficientes de equivalencia ($C_{m,Code}/C_{m,NS}$) en función de los parámetros más importantes. En la tabla 6.8, se indica los valores estadísticos más representativos de dicho ratio.

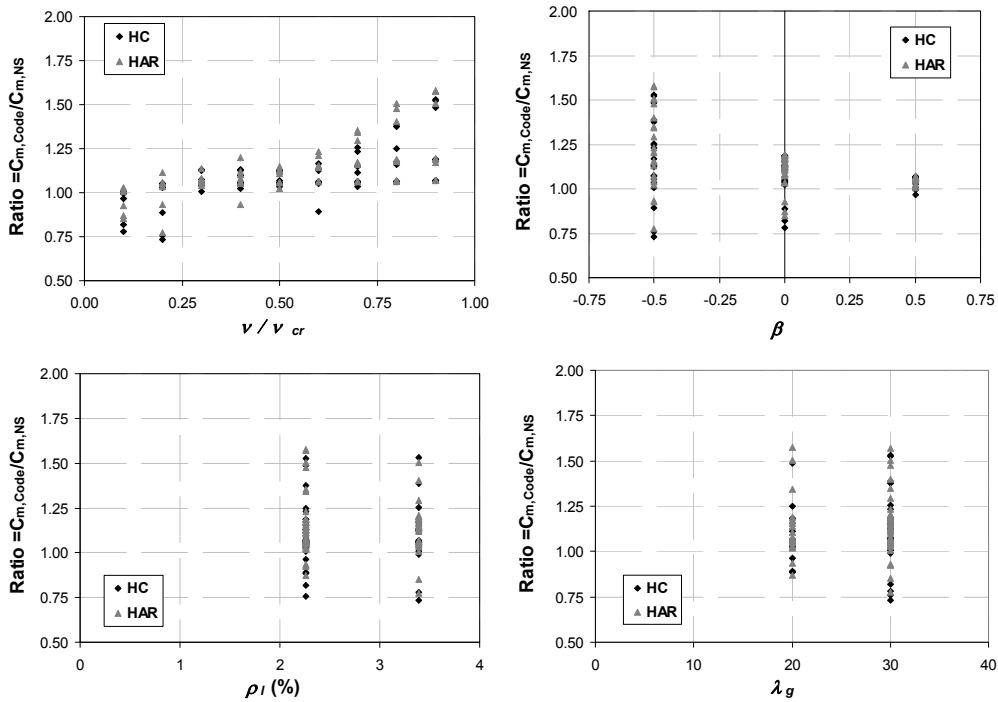


Figura 6.10. Simulación numérica - flexo-compresión recta: Ratio C_m .

		Promedio	C.V.	Min	Max
Tipo de hormigón	HC	1.09	12.92%	0.73	1.53
	HAR	1.12	13.18%	0.77	1.58
β	-0.5	1.19	18.84%	0.73	1.58
	0	1.09	9.09%	0.78	1.19
	0.5	1.05	1.94%	0.96	1.07
v/v_{cr}	< 0.3	1.00	10.42%	0.73	1.14
	0.3 – 0.6	1.09	5.55%	0.89	1.23
	> 0.6	1.21	13.32%	1.04	1.58
ρ_l (%)	2.26	1.11	12.98%	0.76	1.58
	3.39	1.11	13.39%	0.73	1.53
λ_g	20	1.10	13.14%	0.87	1.58
	30	1.11	13.10%	0.73	1.57
TOTAL		1.11	13.08%	0.73	1.58

C.V. = Coeficiente de variación; Min = Valor mínimo; Max = Valor máximo;

Tabla 6.8. Precisión del coeficiente $C_{m,Code}$ propuesto por los códigos de diseño. Flexo-compresión recta.

Se puede observar que la aplicación del coeficiente C_m para soportes fabricados con hormigón de alta resistencia está más del lado de la seguridad que para soportes fabricados con hormigón convencional; que para axiles bajos (menor del 30% del axil crítico del soporte v_{cr}) existen numerosos casos del lado de la inseguridad; y que para axiles altos (mayor del 60% del axil crítico del soporte v_{cr}) la totalidad de casos se encuentran del lado de la seguridad. Si se analiza el ratio en función de la relación entre

excentricidades (β) se observa que existe una gran dispersión de resultados conforme β decrece, principalmente cuando los soportes flectan con doble curvatura ($\beta < 0$). No existe una variación significativa en cuanto a la cuantía de armadura longitudinal y la esbeltez geométrica del soporte. En todo caso, el valor promedio es de 1.11 (del lado de la seguridad) con un coeficiente de variación del 13.08%.

6.3.2. Flexo-compresión esviada

Los ensayos numéricos de los soportes sometidos a esfuerzos de flexo-compresión esviada se han agrupado en ocho series dependiendo de la relación entre los ángulos de esviaje de la carga aplicada en los extremos del soporte (α_1/α_2): $22.5^\circ/22.5^\circ$, $0^\circ/22.5^\circ$, $0^\circ/45^\circ$ y $22.5^\circ/45^\circ$, y de la resistencia del hormigón (HC y HAR). Se ha tomado como resistencia media de los ensayos para el hormigón convencional (HC) 30.5 MPa e para el hormigón de alta resistencia (HAR) 89.8 MPa.

Para cada serie se ha aplicado la siguiente metodología:

- Mediante la simulación numérica se han obtenido los diagramas de interacción de la sección transversal ($\lambda_g = 0$) y del soporte ($\lambda_g \neq 0$) con distintas relaciones de excentricidades β (1; 0.5; 0; -0.5). Los valores representados en el gráfico corresponden al momento flector aplicado en el borde inferior del soporte (μ_2), que corresponde con el ángulo de esviaje inferior y la excentricidad de mayor magnitud (e_2/h). El diagrama de interacción se representa con valores adimensionales. Además, sobre dicho diagrama se representan aquellos resultados de los ensayos experimentales correspondientes a la serie analizada (figura 6.11);
- Para cada relación de excentricidades se calculan los momentos equivalentes (M_{ex} , M_{ey}) aplicando el coeficiente de equivalencia (C_m) propuesto por Austin (1961) [7] y utilizado por la mayoría de los códigos de diseño (AISC (1963) [60], ACI-318 (2008) [1], EC-2 (2004) [29], EHE-08 [23], MC-90 [25]) en cada eje de flexión. A continuación, se calcula el ángulo equivalente de esviaje α_e y el momento reducido equivalente μ_e :

$$\left. \begin{array}{l} M_{ex} = C_{mx} \cdot M_x \\ M_{ey} = C_{my} \cdot M_y \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \alpha_e = \text{atan}(M_{ey}/M_{ex}) \\ \mu_e = \sqrt{\left(\frac{M_{ex}}{b \cdot h^2 \cdot f_c}\right)^2 + \left(\frac{M_{ey}}{h \cdot b^2 \cdot f_c}\right)^2} \end{array} \right. \quad 6.8$$

$$\begin{array}{l} C_{mx} = 0.6 + 0.4 \cdot \beta_x > 0.4 \\ C_{my} = 0.6 + 0.4 \cdot \beta_y > 0.4 \end{array}$$

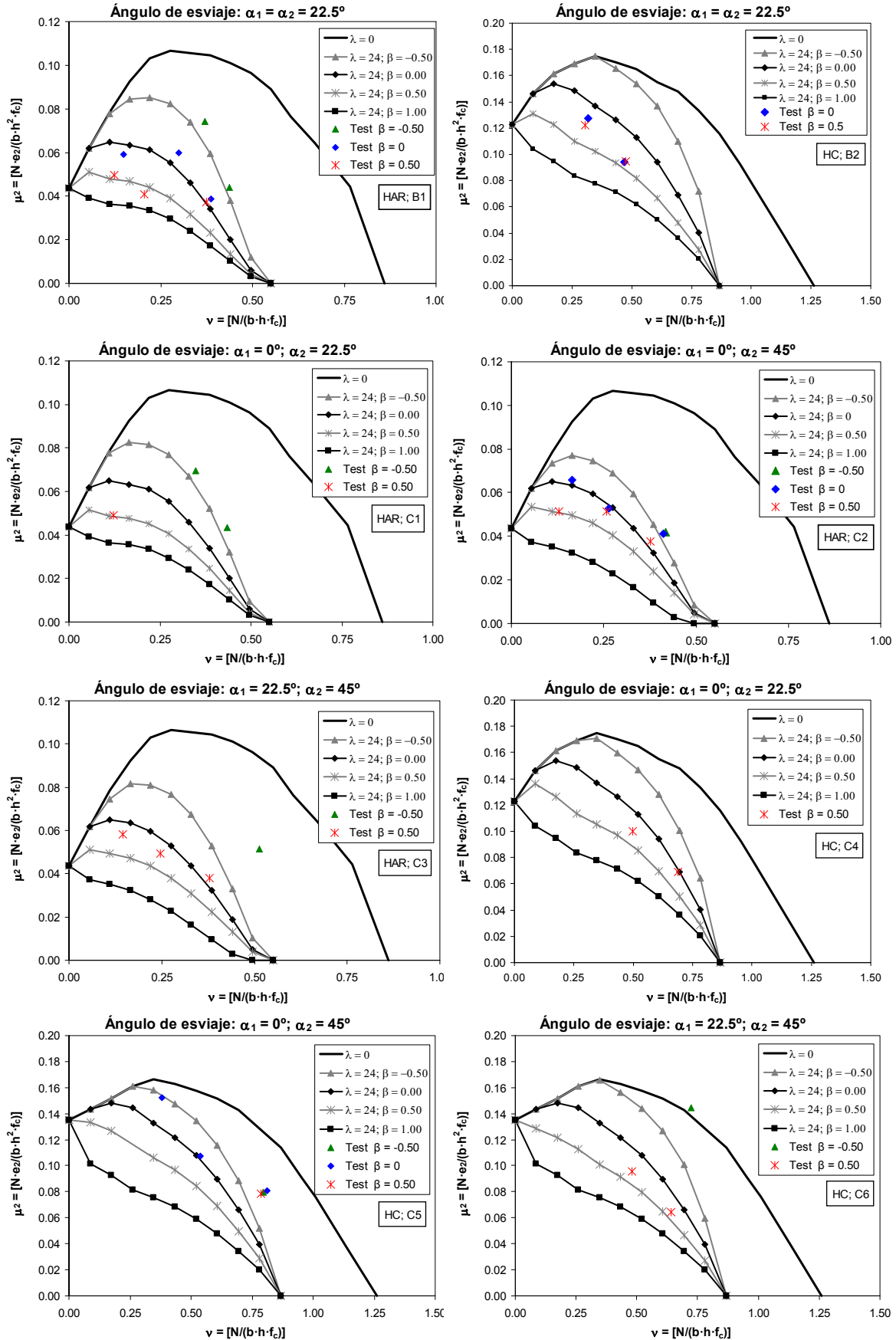


Figura 6.11. Simulación numérica - flexo-compresión esviada.

En la figura 6.12 se muestra la aplicación de este procedimiento para la serie C2 y para cada relación de excentricidades, aplicándolo tanto para el diagrama de interacción del soporte obtenido con la simulación numérica como con los resultados experimentales, si existen, para la serie analizada. Además, se ha obtenido con la simulación numérica el diagrama de interacción de la sección ($\lambda_g = 0$) y del soporte ($\lambda_g \neq 0$) para el ángulo equivalente α_e y relación de excentricidades iguales en extremos ($\beta = 1$), obteniéndose para cada nivel de axil un flector reducido de referencia $\mu_{\beta=1}$. Los resultados de este método, conforme a la aplicación de los códigos de diseño, estarán del lado de la seguridad si el momento equivalente obtenido μ_e es superior al momento $\mu_{\beta=1}$.

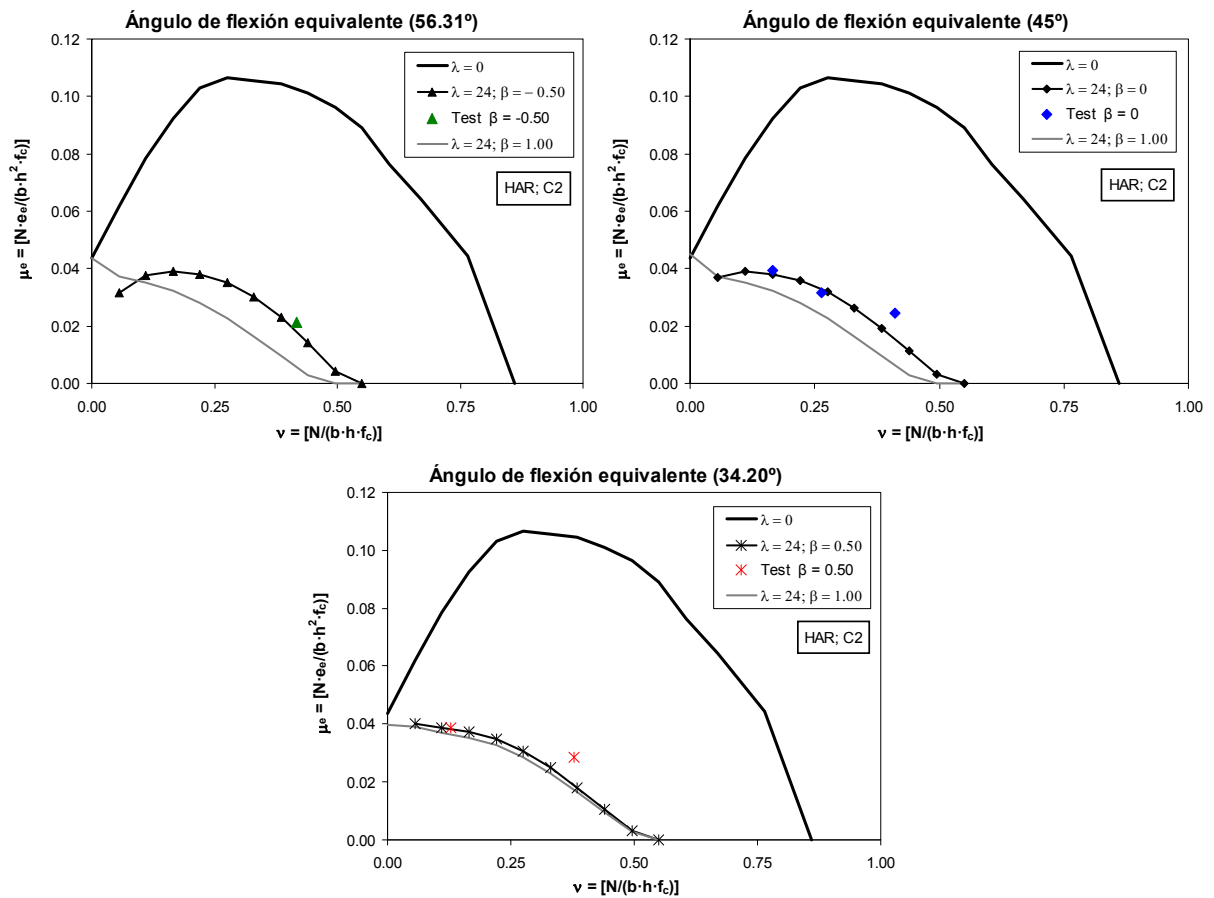


Figura 6.12. Simulación numérica - flexo-compresión esviada (serie C2); Momentos equivalentes.

A continuación, en la figura 6.13 se muestra la relación entre el momento reducido equivalente (μ_e) y el momento reducido de referencia ($\mu_{\beta=1}$). En general, este ratio se muestra creciente con la relación (v/v_{cr}) siendo: v el nivel de axil reducido considerado, y v_{cr} el axil reducido crítico del soporte.

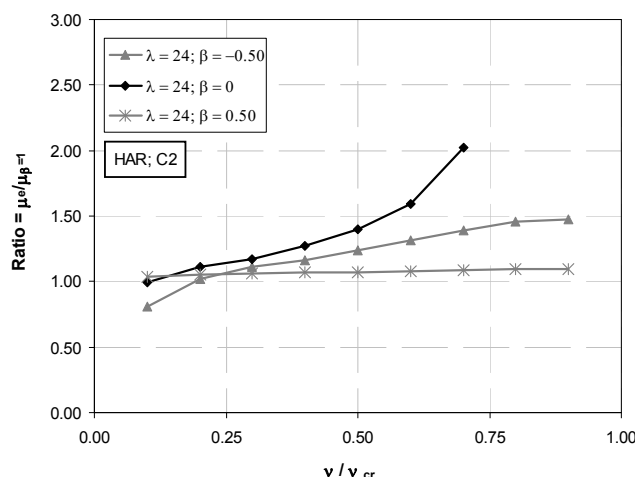


Figura 6.13. Simulación numérica - flexo-compresión esviada (serie C2); Ratio $\mu_e/\mu_{\beta=1}$.

Este procedimiento ha sido aplicado para las ocho series en flexión esviada que se han definido. Las gráficas referentes a las otras series se presentan en el Anejo G.

En la tabla 6.9 se muestran los parámetros estadísticos más representativos del ratio $\mu_e/\mu_{\beta=1}$. Además, en la figura 6.14 se muestra gráficamente el ratio $\mu_e/\mu_{\beta=1}$ para la totalidad de series analizadas en función de los parámetros objeto de análisis

		Promedio	C.V	P ₀₅	P ₉₅
Tipo de Hormigón	HC	1.07	0.10	0.90	1.30
	HAR	1.14	0.14	0.90	1.42
β	-0.5	1.15	0.19	0.81	1.49
	0	1.11	0.12	0.87	1.37
	0.5	1.06	0.02	1.03	1.08
Relación entre ángulos de esviaje	22.5° - 22.5°	1.08	0.14	0.88	1.38
	0° - 22.5°	1.09	0.12	0.91	1.36
	0° - 45°	1.13	0.13	0.97	1.43
	22.5° - 45°	1.12	0.16	0.90	1.59
v/v_{cr}	< 0.3	0.96	0.12	0.71	1.07
	0.3 - 0.6	1.10	0.11	0.97	1.31
	> 0.6	1.20	0.12	1.06	1.49
TOTAL		1.10	0.14	0.90	1.42

C.V. = Coeficiente de variación; P₀₅ = Percentil del 5%; P₉₅ = Percentil del 95%;

Tabla 6.9. Precisión del coeficiente $C_{m,Code}$ propuesto por los códigos de diseño. Flexo-compresión esviada.

Puede observarse como los resultados para hormigón de alta resistencia difieren de los de hormigón convencional tanto en la media como en el coeficiente de variación. En este caso el nivel de precisión es menor para los soportes fabricados con hormigón de alta resistencia y para este tipo de material hay resultados más del lado de la inseguridad (Ratio $\mu_e/\mu_{\beta=1} < 1$). Sin embargo, de manera general, para los dos tipos de hormigón los resultados se encuentran del lado de la seguridad.

También, el ratio $\mu_e/\mu_{\beta=1}$ muestra una mayor dispersión de resultados para valores de $\beta = 0$ y $\beta = -0.50$. Para niveles de axil inferiores al 30% del axil crítico y valores de

relación entre excentricidades de $\beta = -0.5$ se observa un gran número de ensayos del lado de la inseguridad. Se puede observar que para relaciones entre los ángulos de esviaje (α_1/α_2) no hay una variación importante entre los resultados respecto a las combinaciones utilizadas. El método es más preciso para hormigón convencional, para valores intermedios de niveles de axil reducido (entre el 30% y el 60% del axil crítico del soporte) y para relaciones entre excentricidades en extremos de $\beta = 0.50$.

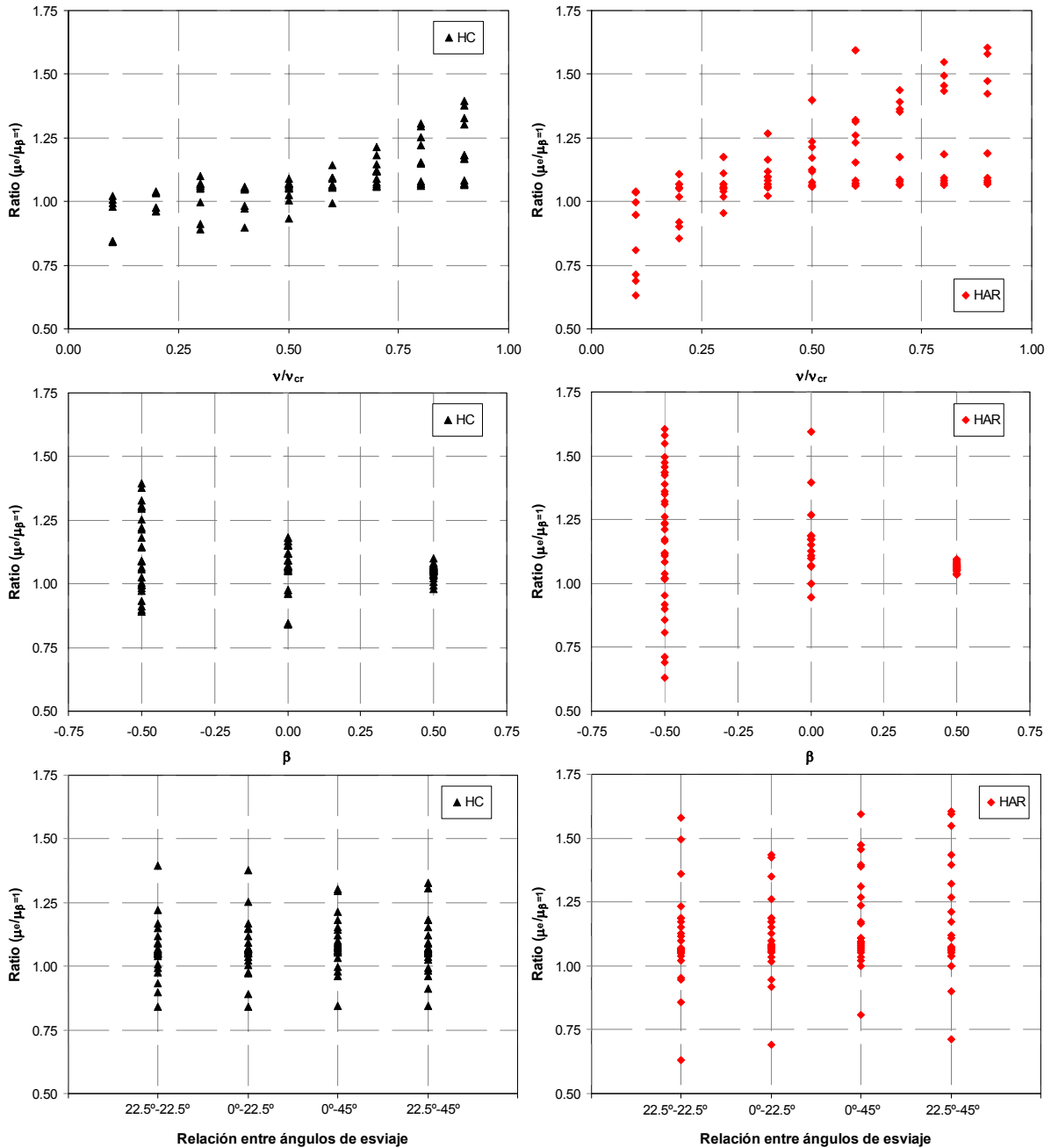


Figura 6.14. Ratio $\mu_e/\mu_{\beta=1}$ en función de los parámetros analizados: flexo-compresión esviada.

Para poder explicar las razones por las cuales se obtiene una mayor dispersión de resultados en los casos de relaciones entre excentricidades de $\beta = -0.5$, hay que calcular las relaciones de excentricidades según los ejes coordenados de flexión (β_x y β_y) correspondientes a las series analizadas (tabla 6.10).

α_1 (°)	22.5	22.5	22.5	0	0	0	0	0	0	22.5	22.5	22.5
α_2 (°)	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	45	45	45	45	45	45
β	-0.5	0	0.5	-0.5	0	0.5	-0.5	0	0.5	-0.5	0	0.5
$\beta_x = M_{1x}/M_{2x}$	-0.5	0	0.50	-0.54	0	0.54	-0.71	0	0.71	-0.65	0	0.65
$\beta_y = M_{1y}/M_{2y}$	-0.5	0	0.50	0	0	0	0	0	0.00	-0.27	0	0.27
α_e (°)	22.5	22.5	22.5	31.85	22.5	16.93	56.31	45	34.20	50.87	45	39.43

Tabla 6.10. Relaciones entre excentricidades según los ejes coordenados de flexión (β_x y β_y) y ángulo equivalente de esviaje (α_e) correspondientes a las series analizadas.

En la figura 6.15 y en la tabla 6.11 se muestra el grado de precisión para los coeficientes (β_x y β_y) señalados en flexo-compresión recta para las componentes de las excentricidades en cada eje de flexión por separado.

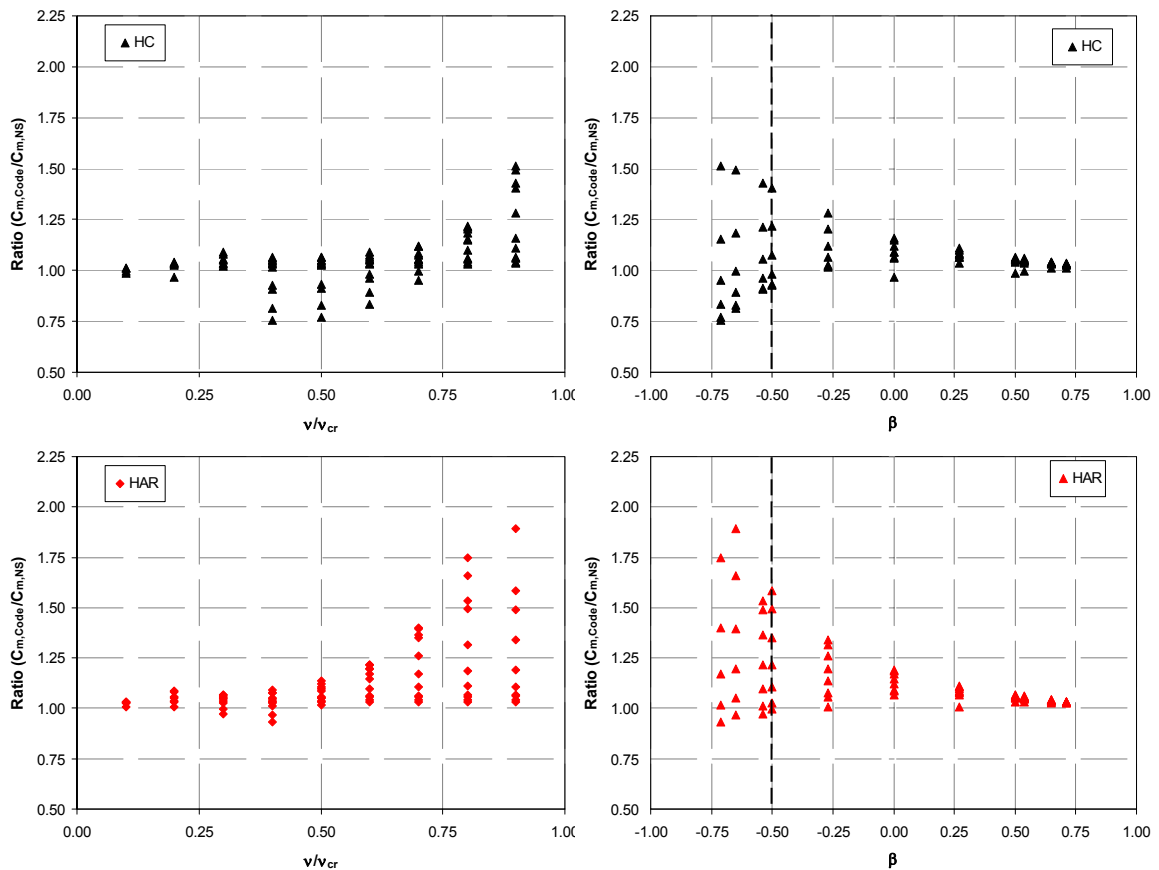


Figura 6.15. Simulación numérica: Flexo-compresión recta con las componentes de las excentricidades en cada eje de flexión (x, y).

		Promedio	C.V.	P ₀₅	P ₉₅
Tipo de hormigón	HC	1.06	0.12	0.84	1.27
	HAR	1.12	0.19	1.00	1.52
β	< -0.50	1.13	0.30	0.77	1.68
	-0.50 - 0.50	1.11	0.10	0.99	1.34
	> 0.50	1.04	0.01	1.02	1.06
v/v_{cr}	< 0.30	1.03	0.03	0.99	1.08
	0.30 - 0.60	1.03	0.08	0.84	1.17
	> 0.60	1.18	0.20	1.03	1.57
	TOTAL	1.09	0.16	0.92	1.46

C.V. = Coeficiente de variación; P₀₅ = Percentil del 5%; P₉₅ = Percentil del 95%;

Tabla 6.11. Precisión del método propuesto por los códigos de diseño para flexo-compresión recta correspondiente a las componentes de las excentricidades en cada eje de flexión (x, y).

Puede observarse, que los casos de mayor imprecisión en flexo-compresión esviada coinciden con los respectivos en flexo-compresión recta con las componentes de la excentricidad para cada eje de flexión considerado (x, y) con valores de $\beta_x < -0.50$ y niveles de axil altos: $v/v_{cr} > 0.60$.

Como conclusión, el método aplicado por los distintos códigos de diseño para flexo-compresión esviada se sitúa del lado de la seguridad (ratio medio total del 1.10) con un coeficiente de variación del 14%. Se ha detectado una mayor imprecisión para el caso de soportes con hormigón de alta resistencia (HAR), y para relaciones entre las componentes de las excentricidades en cada eje de flexión considerado (β_x o β_y) inferiores a -0.50.

Capítulo 7.

Propuesta de un nuevo método simplificado para el cálculo del coeficiente de equivalencia C_m

El modelo teórico de referencia (MTR) previamente calibrado se ha empleado en este capítulo para realizar el análisis de las principales variables que influyen en el coeficiente de equivalencia C_m para soportes sometidos a esfuerzos de flexo-compresión con excentricidades desiguales en los extremos.

A partir de los resultados obtenidos con un análisis paramétrico, realizado utilizando el MTR calibrado (Capítulo 6), se propone un nuevo método simplificado para la obtención del coeficiente de equivalencia C_m . En un principio, se analizan los soportes sometidos a flexo-compresión recta con excentricidades diferentes en los extremos a partir de los resultados obtenidos con el modelo teórico de referencia, y a

continuación se generaliza el estudio para los casos de flexo-compresión esviada con excentricidades y ángulos de esviaje desiguales en los extremos.

7.1. Planteamiento teórico

En el caso de soportes sometidos a excentricidades iguales en los extremos, la sección de centro-luz está sometida al máximo momento flector total, puesto que en esta sección, la flecha y los momentos de segundo orden son máximos, tal y como se representa en la figura 7.1.

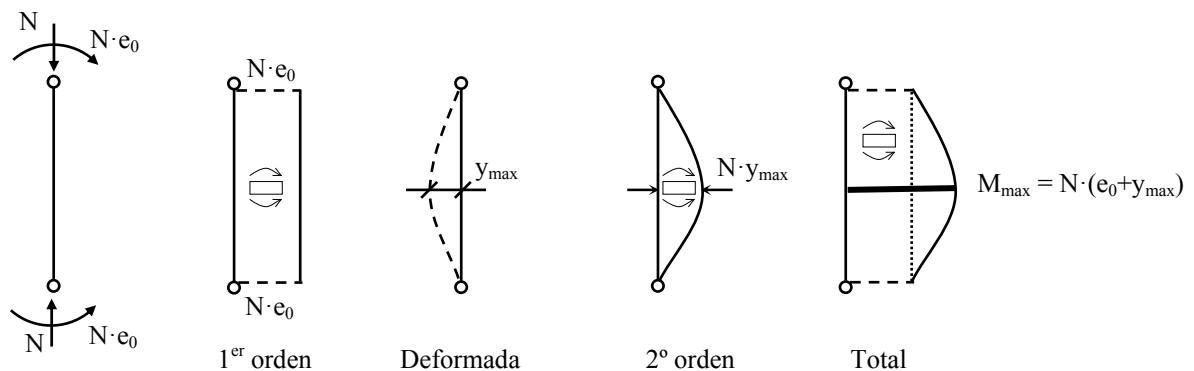


Figura 7.1. Distribución de esfuerzos en soportes sometidos a excentricidades iguales en extremos.

Sin embargo, la determinación de la sección transversal crítica en soportes sometidos a excentricidades diferentes en extremos no es tan evidente. En estos casos, tal y como se ha explicado en el Capítulo 2 de este trabajo y recordado mediante la figura 7.2, la sección transversal de máximo momento total (incluyendo los momentos de segundo orden) puede que no coincida con la sección de máximo momento de primer orden, que se sitúa en el extremo de mayor excentricidad. En los casos en que el momento total máximo a lo largo del soporte supera el momento de primer orden en el extremo, deberá tenerse en cuenta, como una sección crítica, aquella de máximo momento total. La definición de las secciones críticas depende fundamentalmente de la distribución de los momentos flectores, nivel de axil y esbeltez de la pieza.

Por tanto, para analizar los soportes sometidos a excentricidades diferentes en los extremos, mediante métodos simplificados, se deben de realizar dos comprobaciones:

1. En las secciones extremas del soporte, debido a los esfuerzos de primer orden;
2. En la sección intermedia del soporte de máximo momento total.

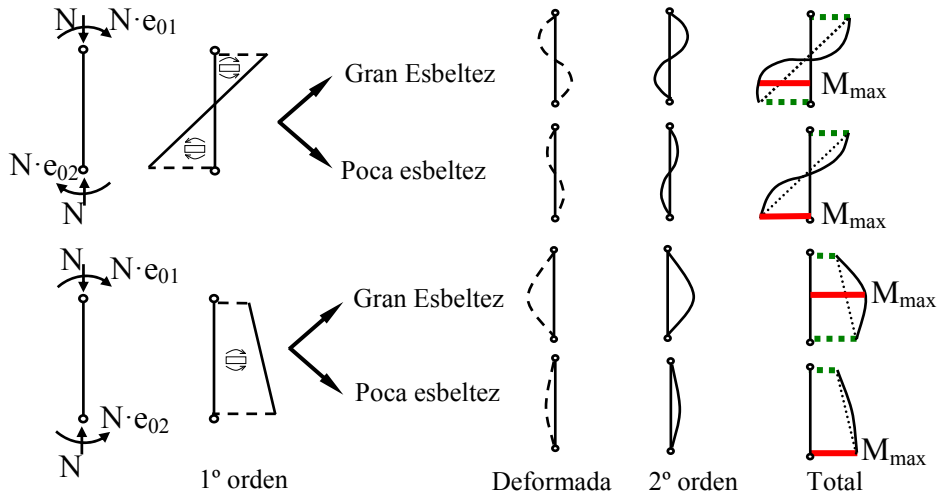


Figura 7.2. Distribución de esfuerzos: excentricidades distintas en extremos.

Por otra parte, los métodos simplificados que se presentan en la literatura técnica suelen aplicarse a soportes con excentricidades de primer orden iguales en los extremos. Por ello, cuando un soporte está sometido a excentricidades desiguales en los extremos, flectando con curvatura simple o doble, es habitual simplificar el problema a uno con una excentricidad equivalente (e_e), utilizando para eso el coeficiente de equivalencia C_m (expresión 7.1). Dicha excentricidad equivalente aplicada en los extremos del soporte debe originar el mismo momento flector total que correspondería a la distribución de esfuerzos original (figura 7.3).

$$e_e = C_m \cdot e_2 \quad 7.1$$

donde: e_e excentricidad equivalente;
 C_m coeficiente de equivalencia;
 e_2 máxima excentricidad de primer orden tomada con signo positivo.

El soporte es entonces diseñado para esta excentricidad equivalente igual en los dos extremos de la pieza. La mayoría de los códigos de diseño recomiendan la ecuación simplificada propuesta por Austin (1961) [7] (expresión 7.2) para el cálculo de la excentricidad equivalente, tal y como se ha explicado en el Capítulo 2 de este trabajo.

$$C_m = 0.6 + 0.4 \cdot \beta \geq 0.4 \quad 7.2$$

siendo $\beta = e_1/e_2$ la relación entre excentricidades en extremos del soporte.

7.1.1. Flexo-compresión recta

Como se ha expuesto en el Capítulo 2, y recordado mediante la figura 7.3, la excentricidad equivalente (e_e) se obtiene como producto del coeficiente de equivalencia (C_m) por la máxima excentricidad aplicada al soporte (e_2) de tal forma que el momento

flector total máximo obtenido en soporte original (figura 7.3.a) sea el mismo que en el soporte equivalente (figura 7.3.b).

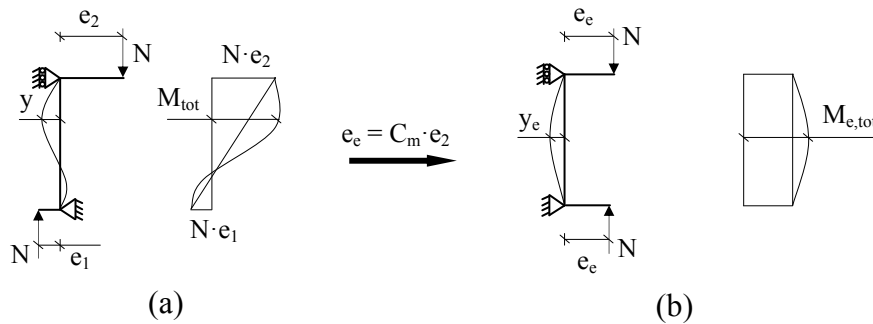


Figura 7.3. Excentricidad equivalente: a. Distribución de esfuerzos original; b. Distribución de esfuerzos equivalente.

En el Capítulo 2 se ha obtenido teóricamente el coeficiente de equivalencia C_m para un soporte sometido a un esfuerzo axial con distintas excentricidades en los extremos ($M_A \neq M_B$) (figura 7.4) planteando la ecuación de equilibrio en la posición deformada de la pieza y asumiendo un comportamiento elástico y lineal de los materiales (Chen y Lui (1987) [20]).

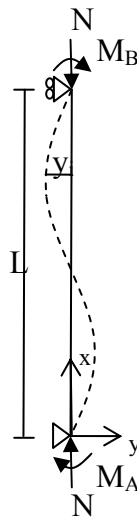


Figura 7.4. Soporte sometido a esfuerzo axial con momentos distintos en extremos.

A partir de este planteamiento se ha obtenido la expresión que define el momento equivalente ($M_{e,tot}$ en la figura 7.3) tal y como se recuerda mediante la expresión 7.3:

$$M_e = \sqrt{\frac{(M_A / M_B)^2 + 2(M_A / M_B) \cdot \cos(k \cdot L) + 1}{2 \cdot [1 - \cos(k \cdot L)]}} \cdot |M_B| = C_m \cdot |M_B| \quad 7.3$$

donde C_m es el coeficiente de equivalencia entre momentos, L es la longitud del soporte y k se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$k = \frac{\pi}{L} \cdot \sqrt{\frac{N}{N_{cr}}} \tag{7.4}$$

siendo N la carga axial aplicada al soporte y N_{cr} la carga crítica de Euler.

Puede observarse que el factor C_m esta en función de las relación entre momentos en extremos (M_A/M_B) y de la relación entre el esfuerzo axial aplicado y el axil crítico del soportes (N/N_{cr}). Como se ha mencionado en el Capítulo 2 y recordado mediante la figura 7.5, cuando la relación entre momentos en extremos del soporte (M_A/M_B) varía de simple curvatura ($M_A/M_B \geq 0$) a doble curvatura ($M_A/M_B < 0$) se incremente considerablemente la influencia del ratio N/N_{cr} en el coeficiente C_m .

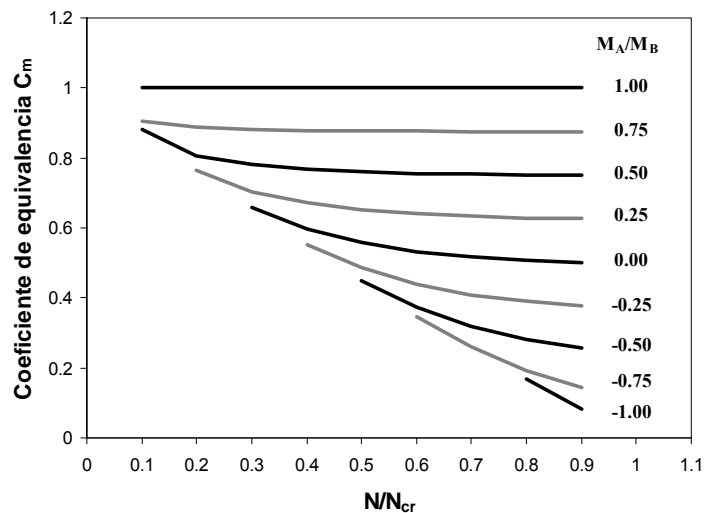


Figura 7.5. Coeficiente de equivalencia C_m obtenido teóricamente con cálculo elástico-lineal.

7.1.2. Flexo-compresión esviada

La aplicación del coeficiente de equivalencia C_m para soportes sometidos a esfuerzos de flexo-compresión esviada requiere una generalización del mismo. Para ello, se aplican las expresiones deducidas para flexo-compresión recta componente a componente según cada eje principal de inercia de la sección. Es decir, que el coeficiente C_m se obtiene para cada una de las direcciones de forma independiente, a partir de las componentes de las excentricidades de primer orden en los extremos del soporte (expresión 7.5).

$$C_{mx} = e_{ex}/e_{2x} \leftrightarrow C_{my} = e_{ey}/e_{2y} \tag{7.5}$$

donde: e_{ex}, e_{ey} componentes de la excentricidad equivalente;
 C_{mx}, C_{my} coeficientes de equivalencia en cada dirección principal;
 e_{2x}, e_{2y} componentes de la excentricidad máxima en el extremo del soporte.

Estos coeficientes proporcionan las componentes de la excentricidad equivalente en cada dirección principal de la sección transversal:

$$e_{ex} = C_{mx} \cdot e_{2x} \leftrightarrow e_{ey} = C_{my} \cdot e_{2y} \quad 7.6$$

Con eso se puede calcular el módulo (expresión 7.7) y el ángulo de inclinación (expresión 7.8) de la excentricidad equivalente esviada:

$$e_e = \sqrt{e_{ex}^2 + e_{ey}^2} = \sqrt{(C_{mx} \cdot e_{2x})^2 + (C_{my} \cdot e_{2y})^2} \quad 7.7$$

$$\alpha_e = \arctg(e_{ey}/e_{ex}) = \arctg[(C_{my} \cdot e_{2y})/(C_{mx} \cdot e_{2x})] \quad 7.8$$

donde: e_e módulo de la resultante de la excentricidad equivalente;
 α_e ángulo del momento flector esviado equivalente.

7.2. Análisis paramétrico

En el Capítulo 2 (tabla 2.2) de este trabajo se ha presentado las expresiones simplificadas para el cálculo del coeficiente C_m propuesta por distintos autores, en la cual se pone de manifiesto la falta de homogeneidad entre las diferentes propuestas, entre las variables consideradas y entre el peso con el que influyen dichas variables. La expresión más comúnmente utilizada es la propuesta por Austin (1961) [7] (expresión 7.2) y ha sido adoptada por la gran mayoría de las normativas (AISC (1963) [60], ACI-318 (2008) [1], EC-2 (2004) [29], EHE-08 [23], MC-90 [25]).

La expresión 7.2 fue deducida a partir de la solución de la ecuación diferencial que se obtiene al plantear el equilibrio del soporte en su posición deformada suponiendo un comportamiento elástico y lineal del material, para cualquier relación de las excentricidades en extremos (e_1/e_2). Sin embargo, los soportes de hormigón armado no se rigen por las teorías clásicas, especialmente en una situación de colapso del soporte (por agotamiento o por inestabilidad).

En este capítulo se propone una nueva expresión simplificada para el cálculo del coeficiente de equivalencia C_m a partir de un análisis paramétrico de las variables que influyen en su obtención, utilizando el modelo teórico de referencia (MTR) previamente calibrado como se describió en el Capítulo 6. A continuación se verifica el grado de precisión de la nueva propuesta resaltando la mejora conseguida respecto a la propuesta más comúnmente utilizada (expresión 7.2).

En primer lugar se realiza un análisis paramétrico para soportes sometidos a esfuerzos de flexo-compresión recta con excentricidades diferentes en los extremos, analizando la influencia de las distintas variables, para a continuación, proponer una nueva expresión para el cálculo del coeficiente C_m . Finalmente, se verifica la bondad de la nueva expresión para los soportes sometidos a flexo-compresión esviada con ángulos

de esviaje y excentricidades desiguales en extremos a través de una nueva campaña de ensayos numéricos de soportes con tales características.

7.2.1. Flexo-compresión recta

El coeficiente de equivalencia C_m se obtiene numéricamente para cada nivel- j de axil (N_j) aplicado en el soporte como cociente entre el máximo momento flector de primer orden $(M_e)_{SN}$ correspondiente al caso patrón (excentricidades iguales en extremos) y el máximo momento de primer orden correspondiente al caso de carga- i $(M_{i1})_{SN}$, tal y como se representa en la figura 7.6 y en la expresión 7.9:

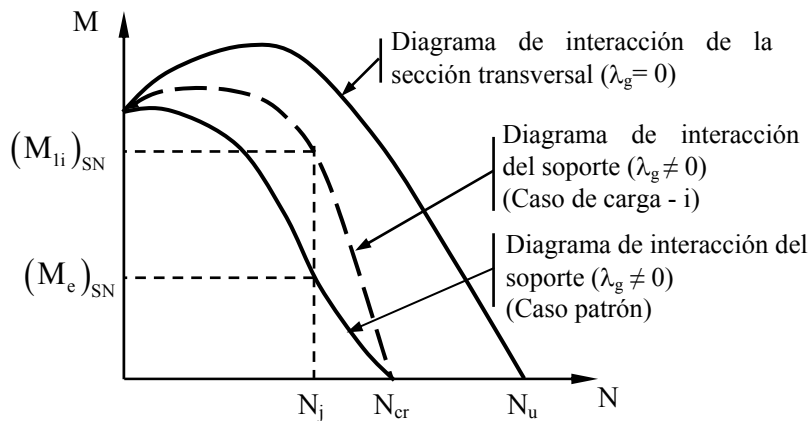


Figura 7.6. Método del coeficiente de equivalencia C_m .

$$C_m = \frac{(M_e)_{SN}}{(M_{i1})_{SN}} \quad 7.9$$

El modelo numérico descrito en el capítulo anterior se ha empleado en este apartado para realizar el análisis de las principales variables que influyen en el coeficiente de equivalencia C_m para soportes sometidos a esfuerzos de flexo-compresión recta con excentricidades desiguales en los extremos. En la tabla 7.1 se presentan los parámetros analizados y sus intervalos de variación.

Parámetros	Valores considerados
Recubrimiento mecánico (r_{mec}/h)	• 0.10; 0.15 y 0.20
Resistencia del hormigón (f_c) (MPa)	• 30; 50; 60; 70; 80; 90 y 100
Cuantía mecánica de armadura longitudinal (ω)	• 0.06; 0.25 y 0.50
Relación entre excentricidades (β)	• -1; -0.75; -0.50; -0.25; 0; 0.25; 0.50; 0.75
Esbeltez geométrica ($\lambda_g = l/h$)	• 15; 20; 25; 30
Esfuerzo axial	• 10 niveles de axil definidos entre el axil nulo y el axil de agotamiento a compresión simple o el axil crítico del soporte

Tabla 7.1. Parámetros analizados: flexo-compresión recta.

Se ha considerado fijo el tamaño y la forma de la sección transversal (cuadrada de 120 x 120 mm) y la distribución de la armadura longitudinal (1 barra en cada esquina).

La combinación de los parámetros adoptados ha dado lugar aproximadamente a 2700 ensayos numéricos.

Cabe resaltar que cuando los soportes están sometidos a esfuerzos de flexo-compresión con excentricidades desiguales en cada extremo, el momento máximo puede situarse en uno de los extremos de la pieza siendo igual al momento de agotamiento de la sección (figura 7.7). En estos casos no tiene sentido el cálculo del coeficiente de equivalencia C_m y por ello han sido excluidos del análisis. Al final se han considerado 2145 ensayos numéricos en el análisis.

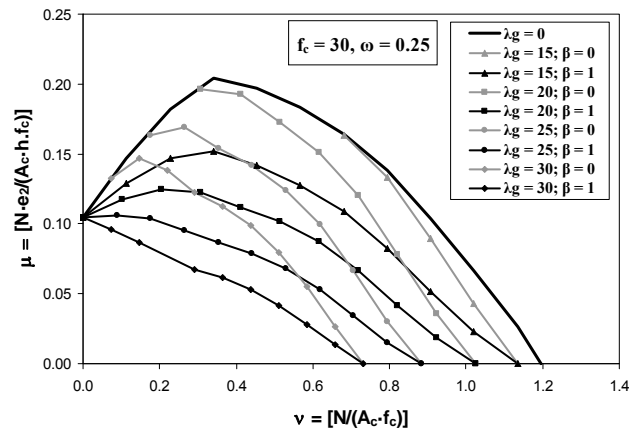


Figura 7.7. Diagramas de interacción de la sección ($\lambda_g = 0$) y del soporte ($\lambda_g \neq 0$).

7.2.1.a. Análisis de resultados obtenidos mediante la simulación numérica

Se ha realizado el análisis del coeficiente C_m obtenido con la simulación numérica en función de los distintos parámetros considerados. En la figura 7.8, figura 7.9 y en la figura 7.10, se representa el coeficiente C_m en función del axil reducido [$v = N / (A_c \cdot f_c)$], siendo N la carga axial aplicada al soporte, A_c el área bruta de la sección transversal y f_c la resistencia a compresión del hormigón.

Puede observarse, que de manera general, la tendencia del coeficiente C_m es de disminuir a medida que se incrementan los efectos de segundo orden (aumento del axil reducido y de la esbeltez del soporte).

En la figura 7.8, puede observarse la influencia de la cuantía mecánica de armadura longitudinal (ω) para hormigón convencional (figura 7.8.a) y hormigón de alta resistencia (figura 7.8.b). Tal y como era de esperar, conforme se incrementa la cuantía de armadura para un mismo nivel de axil reducido son menores los efectos de segundo orden y, por consiguiente, el coeficiente de equivalencia es mayor

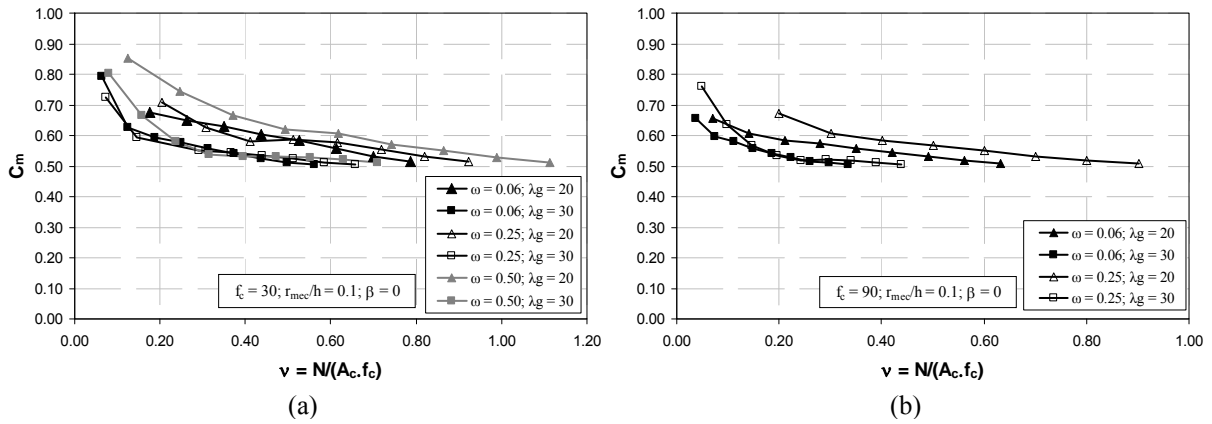


Figura 7.8. Análisis de la influencia de la cuantía mecánica de armadura longitudinal (ω) en el coeficiente de equivalencia C_m a. $f_c = 30$ MPa; b. $f_c = 90$ MPa.

En la figura 7.9 se muestra la influencia del recubrimiento mecánico de la armadura longitudinal (r_{mec}/h) para los ensayos con una relación entre excentricidades en extremos de $\beta = -0.5$, con hormigón convencional (figura 7.9.a) y con hormigón de alta resistencia (figura 7.9.b). Puede observarse que para los soportes de hormigón convencional y de alta resistencia apenas se nota una pequeña influencia de r_{mec}/h en el coeficiente C_m para niveles bajos de axil reducido ($v < 0.30$). Sin embargo, para los soportes de hormigón de alta resistencia y esbeltez $\lambda_g = 20$, con el aumento del recubrimiento mecánico el coeficiente C_m disminuye para un mismo nivel de axil reducido.

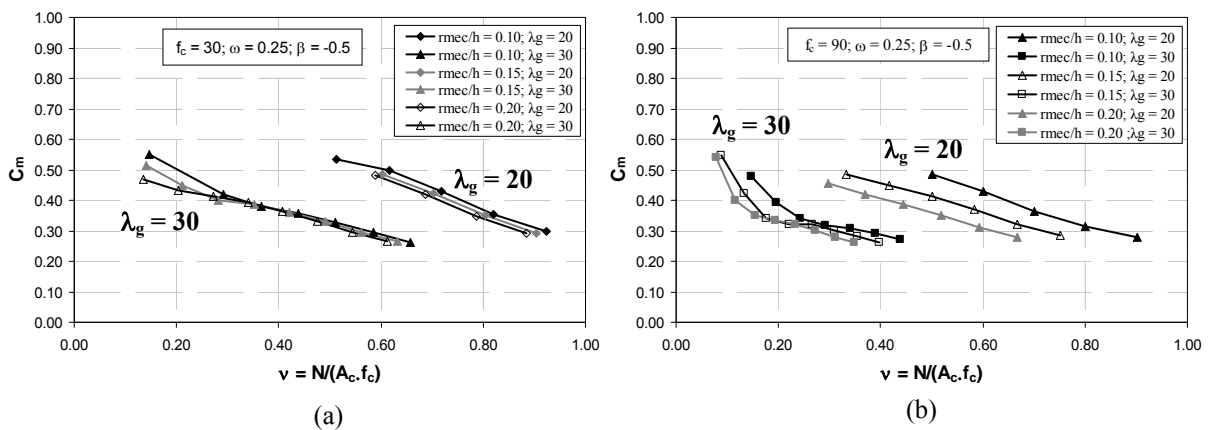


Figura 7.9. Análisis de la influencia del recubrimiento mecánico (r_{mec}/h) en el coeficiente de equivalencia C_m : a. $f_c = 30$ MPa; b. $f_c = 90$ MPa.

La influencia de la resistencia a compresión del hormigón (f_c) para relaciones entre excentricidades (β) iguales a -0.25 y 0 , se representa en la figura 7.10. Se puede observar, que para un mismo nivel de axil reducido (v), el coeficiente de equivalencia C_m disminuye ligeramente con la disminución de la resistencia del hormigón, presentando una mayor influencia para valores negativos de la relación entre excentricidades en extremos ($\beta < 0$).

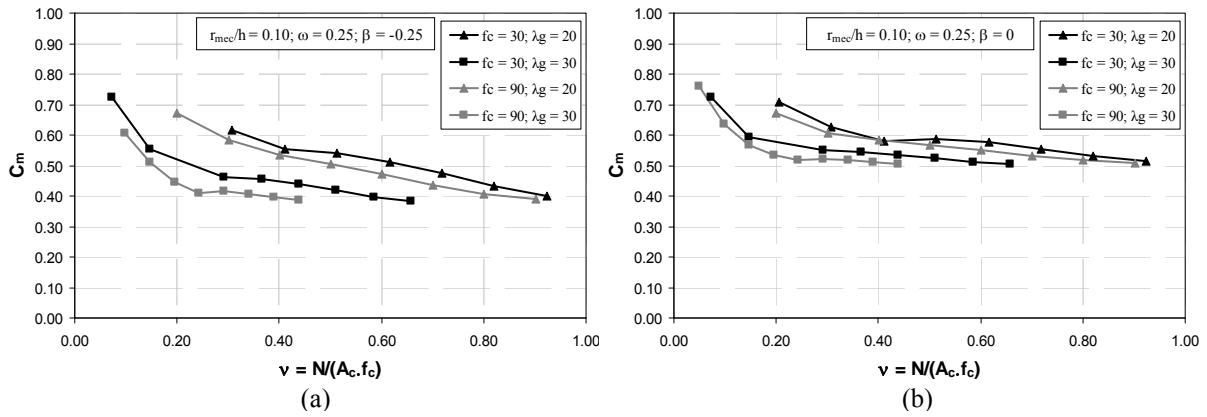


Figura 7.10. Análisis de la influencia de la resistencia del hormigón (f_c) en el coeficiente de equivalencia C_m : a. $\beta = -0.25$; b. $\beta = 0$.

En la figura 7.11 se representa la influencia de la relación entre excentricidades (β) en el coeficiente de equivalencia C_m para los soportes de hormigón convencional (figura 7.11.a) y de alta resistencia (figura 7.11.b) manteniendo constantes los demás parámetros: cuantía mecánica de armadura longitudinal (ω) igual a 0.25; recubrimiento relativo (r_{mec}/h) igual a 0.10; y la esbeltez geométrica (λ_g) igual a 30.

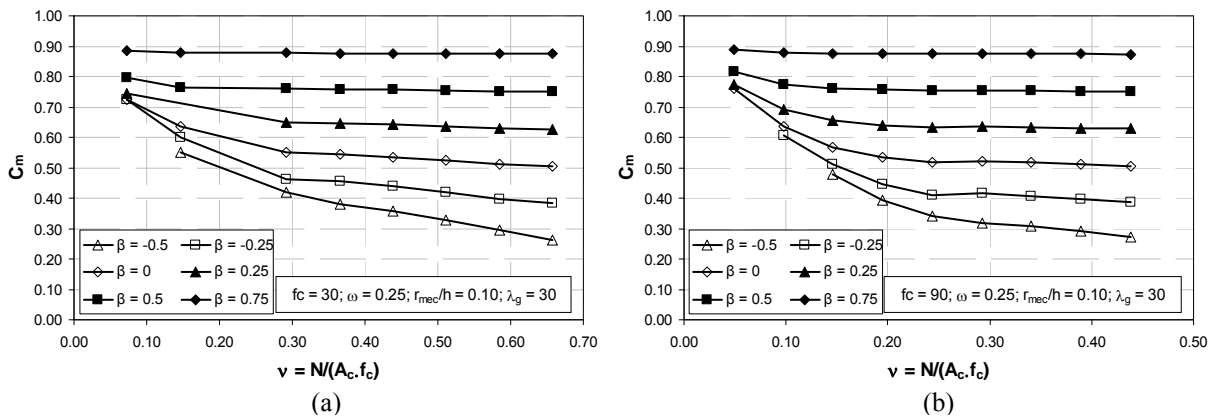


Figura 7.11. Análisis de la influencia de la relación entre excentricidades ($\beta = e_1/e_2$) en el coeficiente de equivalencia C_m : a. $f_c = 30$ MPa; b. $f_c = 90$ MPa

Se puede observar, tal y como se ha expuesto en el análisis teórico realizado en el Capítulo 2 y recordado en el apartado 7.1.1, que la influencia del axil reducido (v) en la obtención del coeficiente de equivalencia C_m se incrementa cuando la relación entre excentricidades de primer orden en extremos varía de simple curvatura ($\beta \geq 0$) a una situación de doble curvatura ($\beta < 0$).

Del análisis de las gráficas de la figura 7.12, se puede observar también la influencia de la relación entre excentricidades en extremos ($\beta = e_1/e_2$) en el coeficiente C_m . Para los casos en que los soportes flectan con doble curvatura ($\beta < 0$) se nota una mayor influencia de los parámetros analizados en el coeficiente C_m , principalmente en los soportes de esbeltez geométrica (λ_g) igual a 20. Por otro lado, como era de se

esperar, mientras los valores de β se aproximan de 1 (curvatura simple) se observa apenas una pequeña influencia en los resultados para valores pequeños de axil reducido ($v \leq 0.20$).

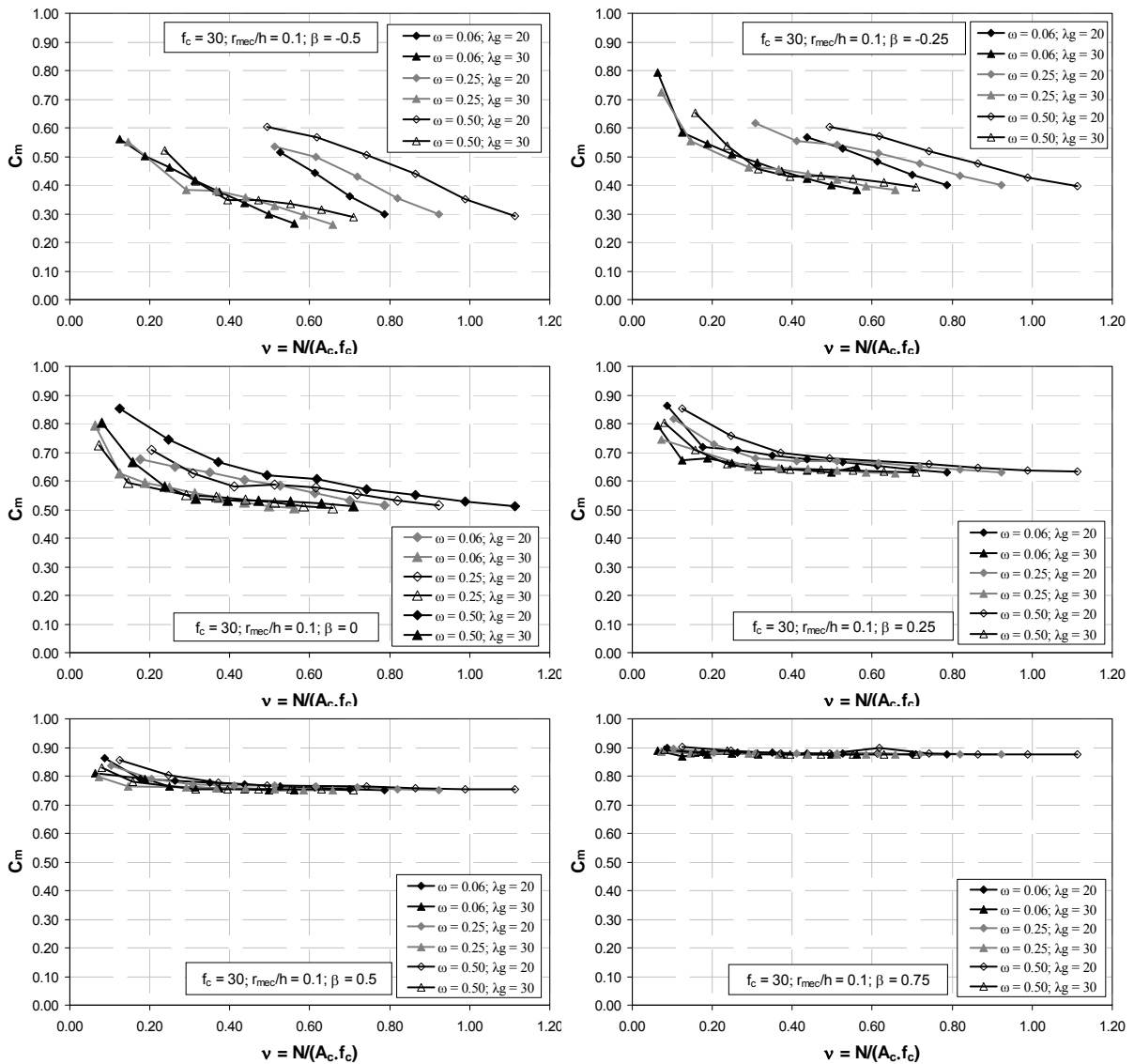


Figura 7.12. Análisis de la influencia de la relación entre excentricidades ($\beta = e_1/e_2$) en el coeficiente de equivalencia C_m .

7.2.1.b. Nueva propuesta de expresión para la obtención del coeficiente C_m

En su trabajo, Pallarés et al. (2009) [48], han verificado a partir del análisis de los resultados numéricos que el coeficiente C_m depende de forma lineal con N/N_{cr} , y puesto que esta relación es proporcional al producto $v \cdot \lambda_g^2$ (axil reducido por la esbeltez geométrica elevada al cuadrado), se puede representar el coeficiente C_m en función de $v \cdot \lambda_g^2$.

En la figura 7.13 se puede observar que a pesar de que el coeficiente C_m varía con la influencia de la cuantía mecánica de armadura longitudinal (ω) y de la esbeltez

geométrica del soporte (λ_g), al representar C_m en función de $v \cdot \lambda_g^2$, los resultados obtenidos se superponen ligeramente.

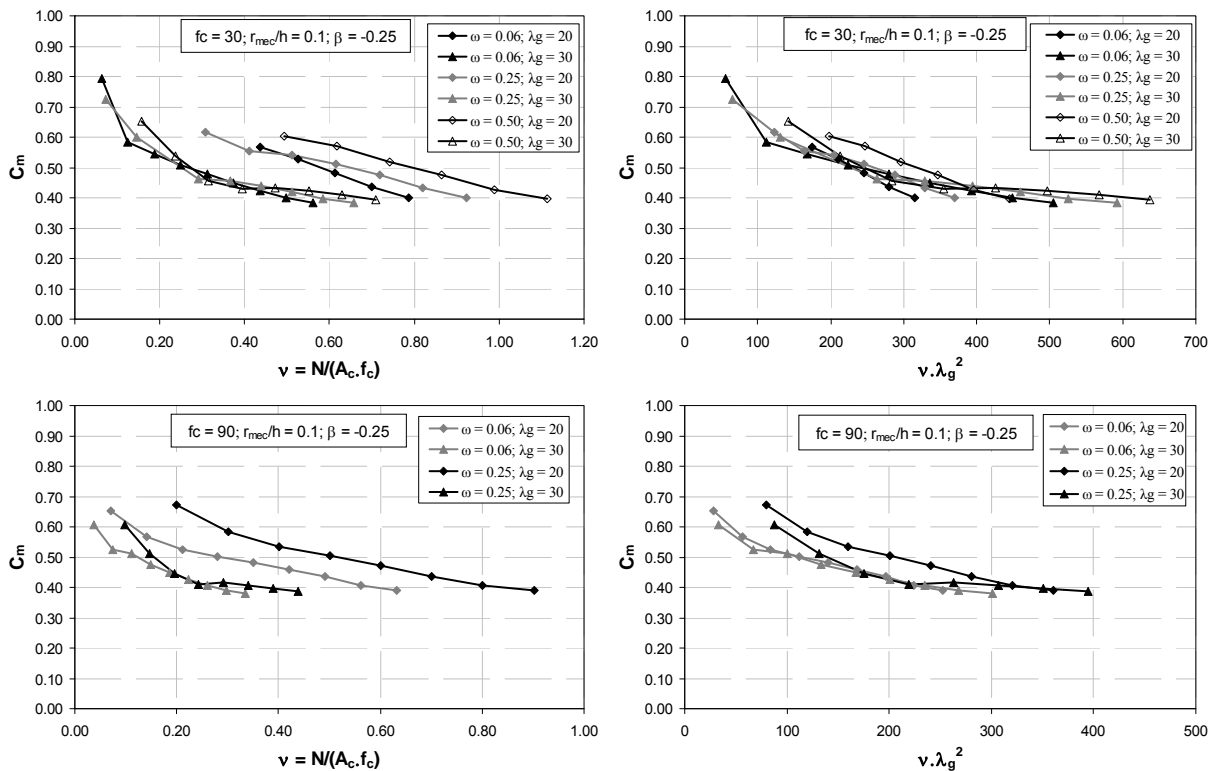


Figura 7.13. Coeficiente C_m en función del axil reducido (v) y del producto ($v \cdot \lambda_g^2$).

La nueva propuesta para el cálculo del coeficiente C_m presentada en este trabajo (expresión 7.10) se ha definido ajustando la expresión propuesta por Pallarés et al. (2009) [48] para los ensayos numéricos realizados con el MTR calibrado. Así, como en su propuesta, en la nueva expresión presentada, el coeficiente C_m también es independiente de la disposición y cuantía de armadura, ya que para su obtención no hace falta calcular el axil de agotamiento a compresión simple del soporte (N_u) o bien la rigidez a flexión (EI) para estimar el axil crítico del soporte (N_{cr}), como ocurre en algunas de las expresiones propuestas por otros autores (tabla 2.2; Capítulo 2).

A partir de los resultados obtenidos en la simulación numérica, se ha realizado un estudio comparativo entre posibles expresiones para la obtención del coeficiente C_m en función de $v \cdot \lambda_g^2$.

La nueva propuesta para la obtención del coeficiente de equivalencia C_m (expresión 7.10) se define a partir de la envolvente superior de los resultados obtenidos con la simulación numérica, situándose del lado de la seguridad y está definida por la siguiente expresión:

$$C_m = 1 - \frac{v \cdot \lambda_g^2}{600} \geq C_{\min} \Rightarrow C_{\min} = 0.40 \cdot \beta + 0.60 \geq 0.40 \quad 7.10$$

- donde: v axil reducido [$N/(A_c \cdot f_c)$];
 N carga axial aplicada;
 A_c área de la sección transversal;
 f_c resistencia del hormigón;
 λ_g esbeltez geométrica del soporte;
 β relación entre excentricidades en extremos del soporte.

En la figura 7.14, a modo de ejemplo, se representan los resultados obtenidos con la simulación numérica en comparación con la nueva propuesta de coeficiente C_m para soportes sometidos a esfuerzos de flexo-compresión recta con excentricidades desiguales en los extremos.

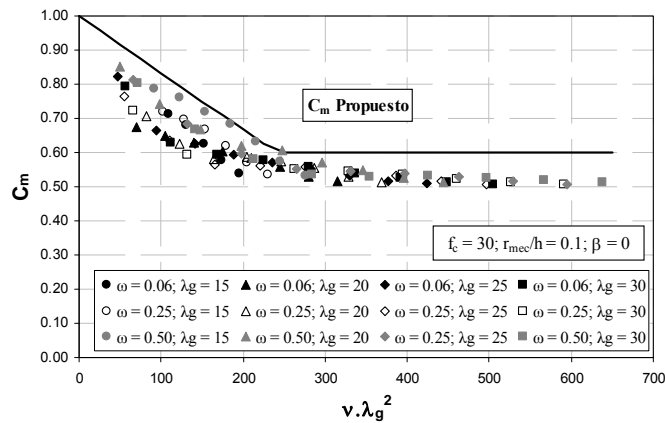


Figura 7.14. Coeficiente de equivalencia C_m en función del producto $v \cdot \lambda_g^2$.

En la nueva propuesta (expresión 7.10), el coeficiente C_m es independiente de la disposición y cuantía de armadura, ya que para su obtención no hace falta calcular el axil de agotamiento a compresión simple del soporte (N_u) o bien la rigidez a flexión (EI) para estimar el axil crítico del soporte (N_{cr}), como ocurre en algunas de las expresiones propuestas por otros autores (tabla 2.2; Capítulo 2).

Además, la propuesta realizada (expresión 7.10) es de fácil aplicación, por depender de parámetros conocidos en la etapa del diseño, y es aplicable tanto para la comprobación como para el diseño de soportes.

7.2.1.c. Verificación del grado de precisión de la nueva expresión propuesta: flexo-compresión recta

En la tabla 7.2 se muestra el grado de precisión de la nueva expresión propuesta (expresión 7.10), de la expresión propuesta por Pallarés et al. (2009) [48] y de la expresión propuesta por Austin (1961) [7], que es utilizada por la mayoría de las normativas (expresión 7.2). Para ello se utiliza el ratio medio (ξ_m) definido por la siguiente expresión:

$$\xi_m = \left(\frac{C_{m,prop}}{C_{m,NS}} \right) \quad 7.11$$

donde $C_{m,prop}$ es el valor del coeficiente de equivalencia obtenido con la expresión propuesta en cada caso y $C_{m,NS}$ es el coeficiente de equivalencia que se obtiene con la simulación numérica. Si el ratio es superior a la unidad el resultado está de lado de la seguridad.

	e_1/e_2	C_m Austin [7]	C_m Pallarés et al. [48]	C_m Nueva Propuesta	e_1/e_2	C_m Austin [7]	C_m Pallarés et al. [48]	C_m Nueva Propuesta
ξ_m	-0.75	0.96	1.32	1.29	0.25	1.04	1.11	1.12
C.V.		0.36	0.34	0.14		0.07	0.05	0.06
P ₀₅		0.49	0.70	1.04		0.89	1.02	1.05
P ₉₅		1.59	2.12	1.69		1.11	1.18	1.24
ξ_m	-0.50	1.09	1.27	1.30	0.50	1.04	1.08	1.07
C.V.		0.23	0.17	0.09		0.03	0.03	0.04
P ₀₅		0.67	0.89	1.11		0.97	1.03	1.04
P ₉₅		1.48	1.59	1.51		1.07	1.12	1.16
ξ_m	-0.25	1.03	1.16	1.22	0.75	1.02	1.04	1.03
C.V.		0.18	0.12	0.07		0.01	0.01	0.01
P ₀₅		0.73	0.91	1.09		1.00	1.02	1.01
P ₉₅		1.28	1.40	1.37		1.03	1.06	1.05
ξ_m	0	1.03	1.13	1.17	Total	1.04	1.15	1.16
C.V.		0.12	0.08	0.06		0.16	0.16	0.11
P ₀₅		0.79	0.95	1.05		0.75	0.95	1.02
P ₉₅		1.18	1.27	1.31		1.32	1.52	1.38

ξ_m = Promedio; C.V. = Coeficiente de variación; P₀₅ = Percentil del 5%; P₉₅ = Percentil del 95%;

Tabla 7.2. Grado de precisión del coeficiente de equivalencia C_m .

Respecto a la relación entre excentricidades en extremos (β), se observa que para los soportes flectados con doble curvatura ($\beta < 0$) se obtiene una mayor dispersión en los resultados que para los soportes flectados con simple curvatura ($\beta \geq 0$). Los resultados obtenidos utilizando la nueva expresión propuesta (expresión 7.10) para la obtención del coeficiente C_m mejora significativamente la seguridad respecto a las expresiones propuestas por Austin (1961) [7] y por Pallarés et al. (2009) [48] principalmente para los casos de soportes flectados con doble curvatura.

De la figura 7.15 a la figura 7.18 se representa gráficamente la relación ($\xi_m = C_{m,prop}/C_{m,NS}$) en función de las variables analizadas (β ; λ_g ; f_c ; ω). Se puede observar de manera general que la nueva expresión propuesta (expresión 7.10), mejora significativamente la seguridad respecto a las expresiones propuestas por Austin (1961) [7] y por Pallarés et al. (2009) [48], tal y como se ha observado en la tabla 7.2.

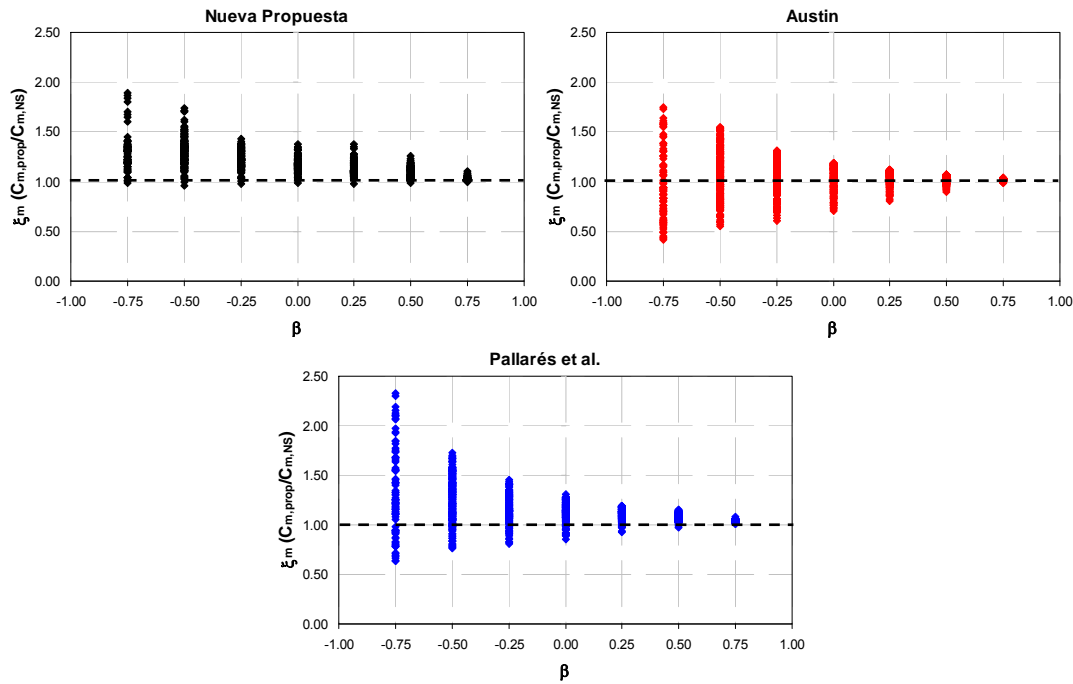


Figura 7.15. Grado de precisión del coeficiente de equivalencia C_m en función de la relación entre excentricidades en extremos (β) – flexo-compresión recta.

En la figura 7.16 se puede observar que utilizando la propuesta de Austin (1961) [7], principalmente para los soportes de baja esbeltez geométrica ($\lambda_g \leq 20$), muchos de los resultados se encuentran del lado de la inseguridad. La expresión propuesta por Pallarés et al. (2009) [48] mejora ligeramente esta inseguridad respecto a la propuesta de Austin (1961) [7], sin embargo sigue presentando muchos valores inseguros para soportes con esbeltez baja. Por otra parte, utilizando la nueva expresión propuesta (expresión 7.10) casi la totalidad de los casos analizados se encuentran del lado de la seguridad, independientemente de la esbeltez geométrica considerada.

El grado de precisión (ξ_m) de las propuestas para obtención del coeficiente C_m en función de la resistencia del hormigón (f_c) y de la cuantía mecánica de armadura longitudinal (ω) respectivamente, se representa en la figura 7.17 y en la figura 7.18. Se puede observar que estas variables no influyen de manera significativa en el grado de precisión (ξ_m). En todo caso la utilización de la nueva expresión propuesta presenta una significativa mejora en la seguridad respecto a las expresiones propuestas por Austin (1961) [7] y por Pallarés et al. (2009) [48].

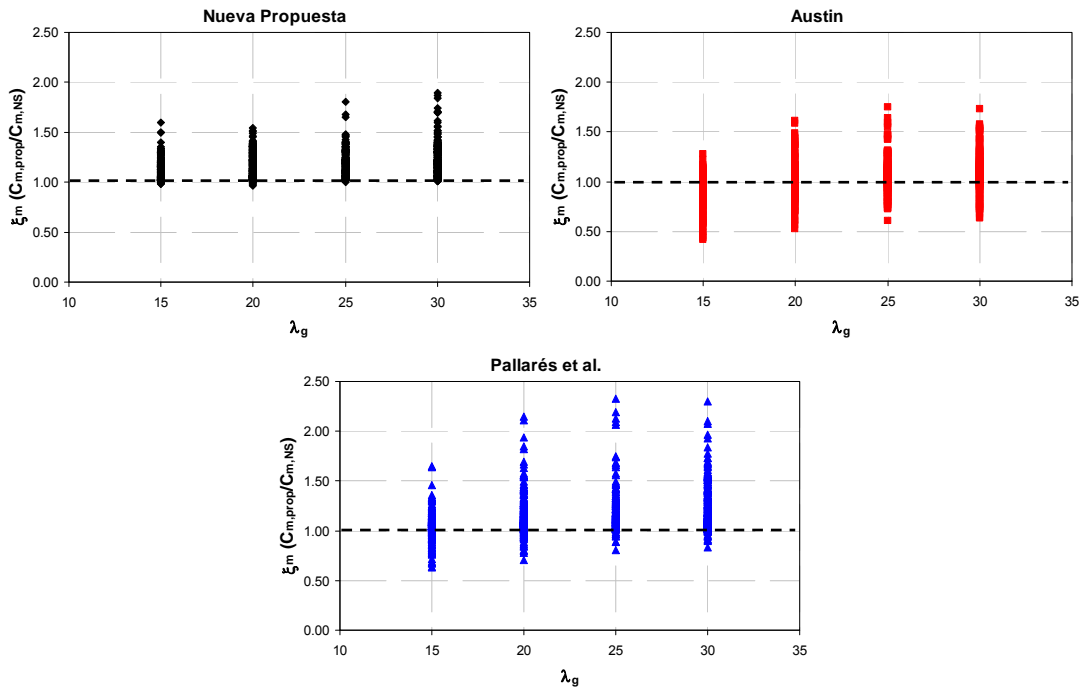


Figura 7.16. Grado de precisión del coeficiente de equivalencia C_m en función de la esbeltez geométrica (λ_g) – flexo-compresión recta.

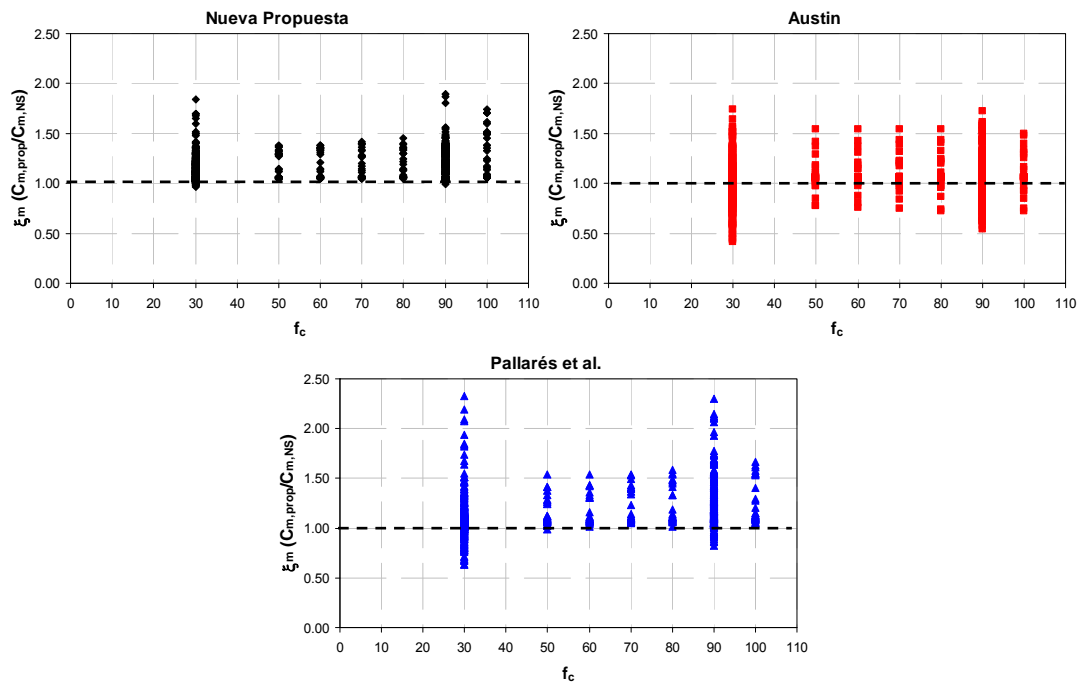


Figura 7.17. Grado de precisión del coeficiente de equivalencia C_m en función de la resistencia del hormigón (f_c) – flexo-compresión recta.

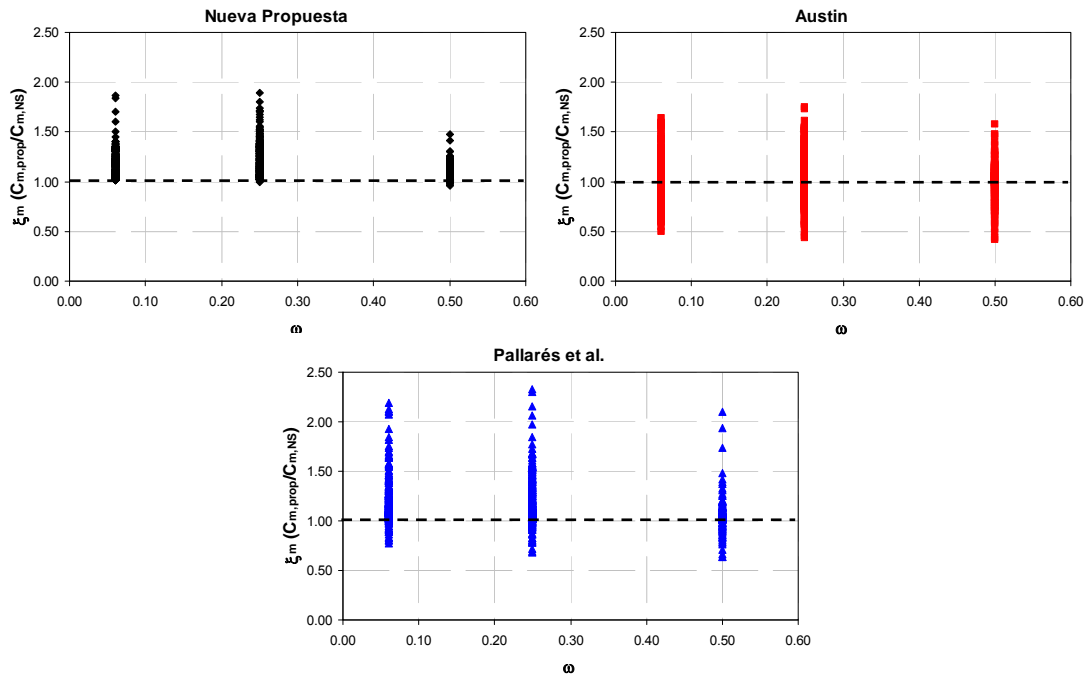


Figura 7.18. Grado de precisión del coeficiente de equivalencia C_m en función de la cuantía geométrica de armadura longitudinal (ω) – flexo-compresión recta.

En la figura 7.19 se muestra una comparación entre los resultados obtenidos con la simulación numérica realizada con el MTR calibrado, la nueva propuesta para la obtención del coeficiente C_m realizada en este trabajo (expresión 7.10) y las propuestas realizadas por Pallarés et al. (2009) [48] y por Austin (1961) [7] en función del producto $\nu \cdot \lambda_g^2$.

Tal y como se puede observar del análisis de la tabla 7.2 y de la figura 7.15 a la figura 7.19, la expresión propuesta por Austin (1961) [7] presenta una solución más centrada respecto a los resultados numéricos con un ratio medio de 1.04 y un coeficiente de variación de 0.16. Sin embargo, muchos valores están del lado de la inseguridad para valores del producto $\nu \cdot \lambda_g^2$ bajos y medianos y para soportes flectados con doble curvatura ($\beta < 0$).

La propuesta realizada por Pallarés et al. (2009) [48] se ajusta mejor a los resultados de la simulación numérica (figura 7.19), sin embargo, así como ocurre con la propuesta de Austin (1961) [7], para los casos en que el soporte flecta con doble curvatura ($\beta < 0$) y para valores bajos del producto $\nu \cdot \lambda_g^2$ muchos de los valores obtenidos con la propuesta se quedan del lado de la inseguridad. Estas situaciones ocurren independientemente de la esbeltez geométrica (15, 20, 25 ó 30).

Cabe resaltar que Sarker y Rangan (2003) [58] ya indicaron que para soportes de esbeltez media y baja se daban casos del lado de la inseguridad.

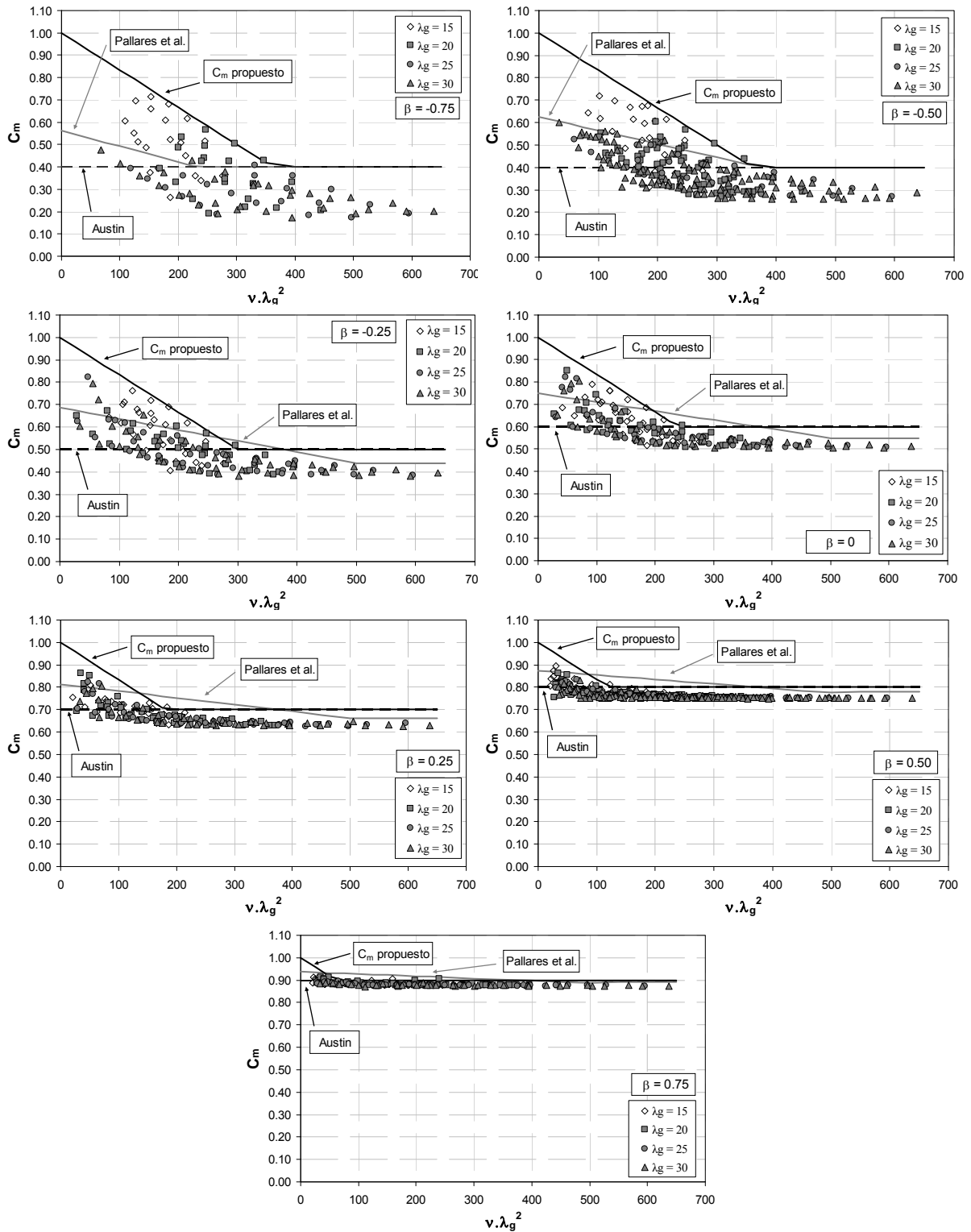


Figura 7.19. Coeficiente de equivalencia C_m en función del producto $v \cdot \lambda_g^2$.

En definitiva, con la nueva expresión propuesta en este trabajo (expresión 7.10), se ha obtenido un ratio medio de 1.16 con un coeficiente de variación de 0.11, situándose del lado de la seguridad para casi la totalidad de los casos. La propuesta ha presentado una significativa mejoría respecto a las expresiones propuestas por Austin (1961) [7] y

Pallarés et al. (2009) [48] principalmente para los casos de soportes flectados con doble curvatura ($\beta < 0$) y para valores bajos de axil reducido (v) y del producto $v \cdot \lambda_g^2$.

7.2.2. Flexo-compresión esviada

El MTR calibrado en el capítulo anterior se ha empleado en este apartado para realizar el análisis de las principales variables que influyen en el coeficiente de equivalencia C_m para soportes sometidos a esfuerzos de flexo-compresión esviada con excentricidades y ángulos de esviaje desiguales en los extremos. En la tabla 7.3 se presentan los parámetros analizados y sus intervalos de variación. Se han tomado valores constantes de r_{mec}/h (relación entre el recubrimiento mecánico y el canto de la sección transversal) igual a 0.15. La combinación de los parámetros adoptados ha dado lugar a aproximadamente 3400 ensayos numéricos

De la misma manera que en los casos de soportes sometidos a flexo-compresión recta, cuando los soportes están sometidos a esfuerzos de flexo-compresión esviada con distintas excentricidades en cada extremo, el momento máximo puede situarse en uno de los extremos de la pieza siendo igual al momento de agotamiento de la sección transversal (figura 7.7); siendo así estos casos específicos han sido excluidos, y al final, se han considerado 2648 ensayos numéricos en el análisis.

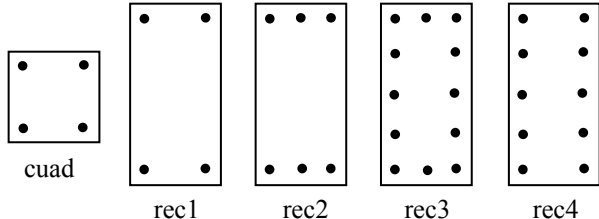
Parámetros	Valores considerados
Sección transversal (mm)	• cuadrada: 120 x 120 y rectangular: 120 x 240
Sección transversal y distribución de armadura	
Cuantía mecánica de armadura (ω)	• 0.06; 0.25 y 0.50
Resistencia del hormigón (f_c) (MPa)	• 30 y 90
Relación entre excentricidades (β)	• -1; -0.50; -0.25; 0; 0.25; 0.50; 1
Ángulo de esviaje constante (α_1)	• 0°; 22.5°; 26.57°; 45°; 63.43°; 90°
Ángulo de esviaje variable (α_2)	• 0°; 5.04°; 10.31°; 16.1°; 22.5°; 26.57°; 40.89°; 45°; 53.95°; 63.43°; 70.57°; 90°
Esbeltez geométrica ($\lambda_g = l/h$)	• 20 y 30
Esfuerzo axial (v/v_{cr})	• 0.10; 0.25; 0.30; 0.35; 0.50 y 0.70

Tabla 7.3. Parámetros analizados – flexo-compresión esviada.

En el Anejo H de este trabajo se presentan las gráficas obtenidas en la simulación numérica (diagramas de interacción) para la obtención del coeficiente de equivalencia tanto en flexo-compresión recta como esviada.

7.2.2.a. Análisis de resultados obtenidos mediante la simulación numérica

El análisis de los soportes sometidos a flexo-compresión esviada se ha realizado a partir de la superficie de interacción de los esfuerzos de primer orden (N ; M_x ; M_y). Se representa los diagramas de interacción correspondientes para un nivel de axil determinado (M_x , M_y) y para una relación de momentos (M_x/M_y) fijada, que representa el corte por un plano horizontal y por un plano bisector, a la superficie de interacción respectivamente (figura 7.20).

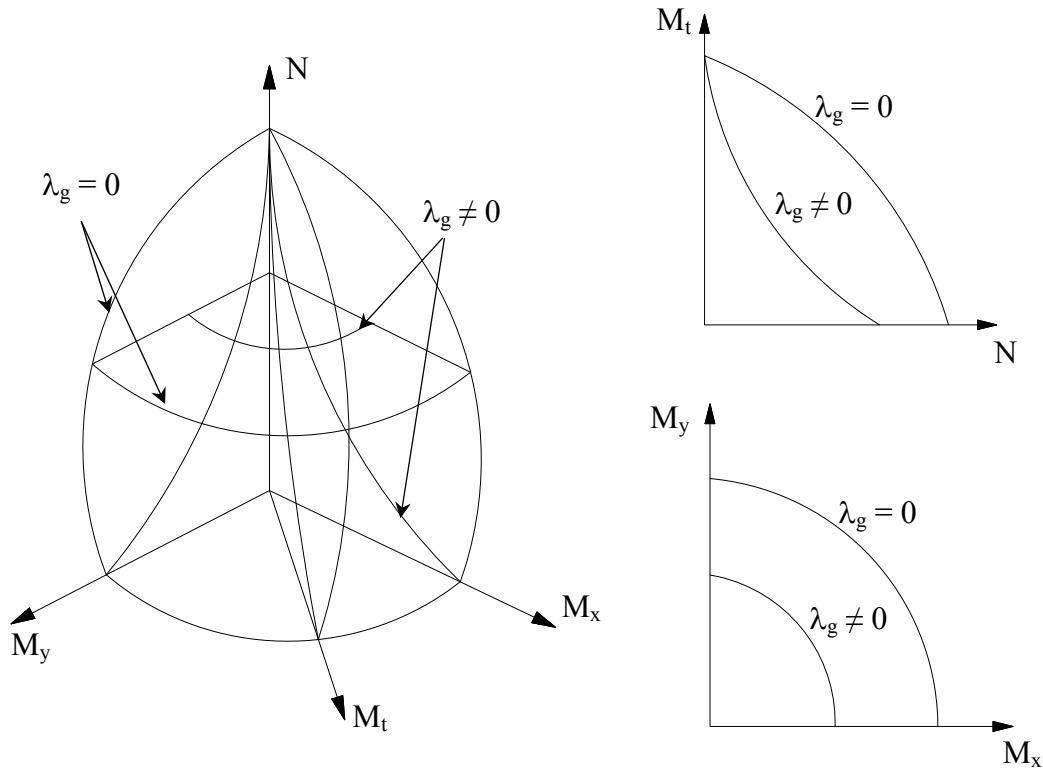


Figura 7.20. Superficie de interacción para los esfuerzos de primer orden para la esbeltez λ_g ; Flexo-compresión esviada.

Para el análisis del coeficiente C_m , en este apartado, se utilizan los diagramas de interacción adimensionales (μ_x - μ_y) en función de los momentos reducidos para distintos niveles de axil constante (tabla 7.3):

$$\mu_x = \frac{M_x}{A_c \cdot h \cdot f_c} \leftrightarrow \mu_y = \frac{M_y}{A_c \cdot b \cdot f_c} \quad 7.12$$

donde:

- μ_x momento flector reducido según el eje x;
- μ_y momento flector reducido según el eje y;
- M_x momento de primer orden aplicado en el extremo del soporte según el eje x;
- M_y momento de primer orden aplicado en el extremo del soporte según el eje y;
- A_c área bruta de la sección transversal;
- h canto de la sección transversal perpendicular al eje de flexión x;

- b ancho de la sección transversal paralelo al eje de flexión x;
- f_c resistencia del hormigón.

Se ha realizado una comprobación del coeficiente de equivalencia C_m calculado con la nueva expresión propuesta en el apartado 7.2.1.b (expresión 7.10) para los casos de soportes sometidos a esfuerzos de flexo-compresión esviada con excentricidades y ángulos de esviaje desiguales en los extremos, para poder así verificar el grado de precisión del nuevo método respecto a los soportes sometidos a este tipo de solicitaciones.

En los soportes sometidos a flexo-compresión esviada con excentricidades y ángulos de esviaje desiguales en los extremos, la aplicación del coeficiente de equivalencia C_m para cada eje de flexión (C_{mx} y C_{my}) de manera independiente da lugar a un soporte con una distribución de esfuerzos equivalente con excentricidades y ángulos de esviaje iguales en extremo, tal y como se muestra en el esquema de la figura 7.21.

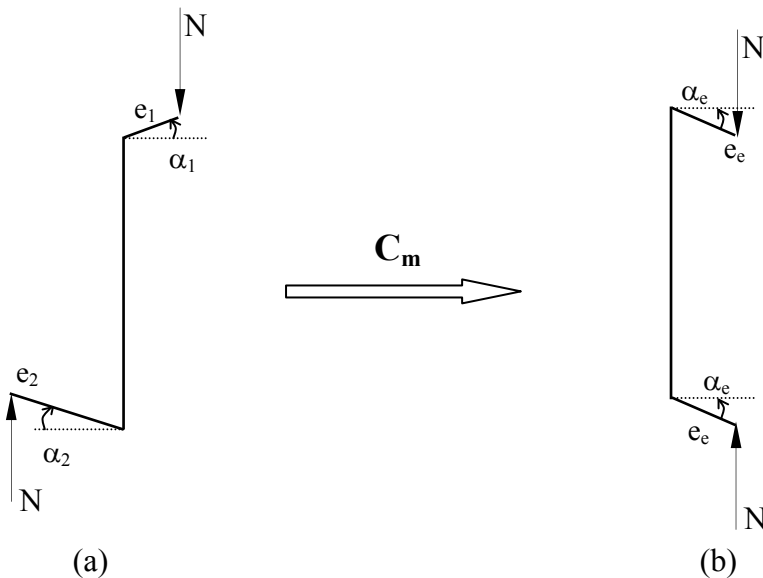


Figura 7.21. Flexo-compresión esviada: a. Distribución de esfuerzo original ($\alpha_1 \neq \alpha_2$; $e_1 \neq e_2$)
 b. Distribución de esfuerzos equivalentes (excentricidades y ángulos iguales en los extremos).

La comprobación del coeficiente de equivalencia C_m para los casos de flexo-compresión esviada con excentricidades y ángulos de esviaje desiguales en los extremos (figura 7.21.a) se hace comparando el valor del módulo del momento reducido equivalente (μ_e) obtenido con la distribución de esfuerzos equivalente (figura 7.21.b) con el módulo del momento reducido para el caso de referencia con ángulos de esviaje y excentricidades iguales en extremos ($\mu_{\beta=1}$). En este apartado se explica el procedimiento utilizado para la realización de dicha comprobación.

El análisis se hace a partir del diagrama de interacción μ_x - μ_y para un nivel de axil reducido (v) constante. A continuación, se explica la metodología seguida para la

elaboración de los diagramas de interacción $\mu_x-\mu_y$, a partir de un caso particular de un soporte (figura 7.22) con ángulo de esviaje superior (α_1) igual a 26.57° , ángulo de esviaje inferior (α_2) variable (de 0° a 90°), relación entre excentricidades en extremos $\beta = e_1/e_2$ igual a 0.5, siendo e_1 y e_2 el módulo de las excentricidades en los extremos y e_2 la máxima excentricidad en valor absoluto, sección transversal rectangular, armaduras iguales en las cuatro esquinas, esbeltez geométrica (λ_g) igual a 20 y un nivel de axil (N/N_{cr}) igual a 0.5. La misma metodología ha sido empleada para todos los casos considerados en el análisis paramétrico.

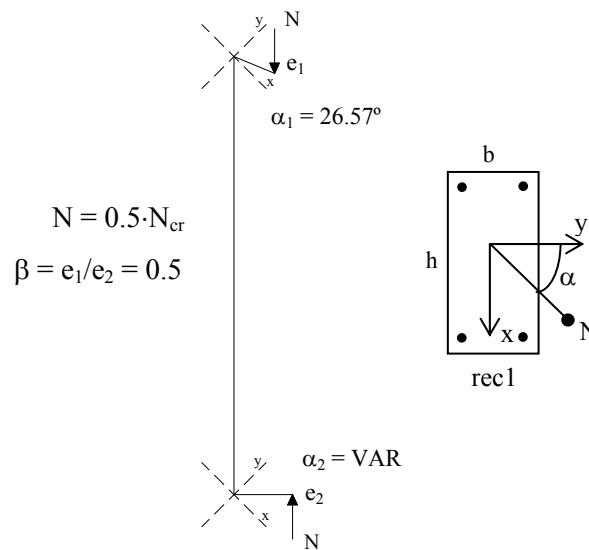


Figura 7.22. Esquema de solicitación aplicada: Sección: rec1; $\alpha_1 = 26.57^\circ$; $\alpha_2 = VAR$; $\beta = 0.5$; $\omega = 0.25$; $f_c = 30 \text{ MPa}$; $N = 0.50 \cdot N_{cr}$.

De la figura 7.23 a la figura 7.26 se explica paso a paso la construcción de los diagramas de interacción $\mu_x-\mu_y$, para el análisis del caso representado en la figura 7.22. En todas las gráficas se representa, como referencia, el diagrama de interacción de la sección transversal de la sección transversal del soporte ($\lambda_g = 0$).

En la figura 7.23 se representa el diagrama de interacción del soporte ($\mu_x-\mu_y$) para el momento reducido en el extremo superior [$\mu_1 = N \cdot e_1 / (f_c \cdot b \cdot h)$] correspondiente al ángulo de esviaje superior (α_1) constante e igual a 26.57° variando el ángulo de esviaje inferior (α_2) de 0° a 90° .

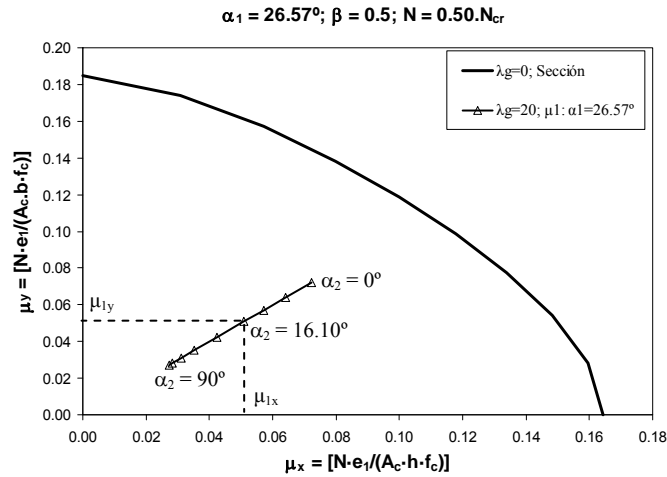


Figura 7.23. Diagrama de interacción μ_x - μ_y : Representación del momento reducido μ_1 en el extremo superior del soporte: $\alpha_1 = 26.57^\circ$.

En la figura 7.24 se representa el diagrama de interacción del soporte (μ_x - μ_y) para el momento reducido en el extremo inferior [$\mu_2 = N \cdot e_2 / (f_c \cdot b \cdot h)$] al variar el ángulo de esviaje inferior (α_2) de 0° a 90° manteniendo el ángulo de esviaje superior (α_1) constante e igual a 26.57° .

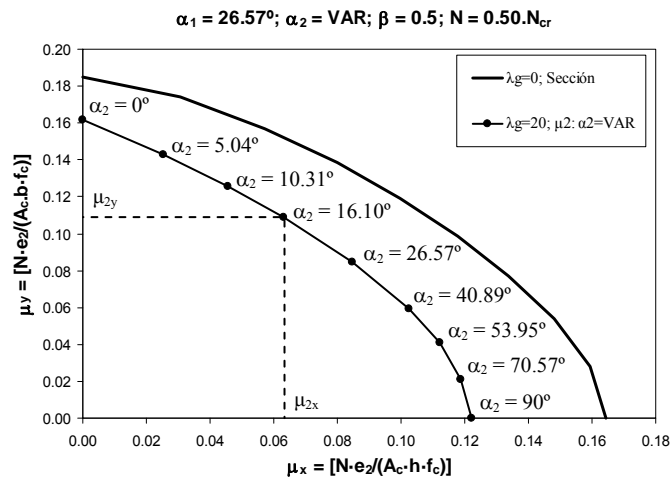


Figura 7.24. Diagrama de interacción μ_x - μ_y : Representación del momento reducido μ_2 en el extremo inferior del soporte: $\alpha_2 = \text{VAR}$.

A partir de las componentes en cada eje de los momentos reducidos superiores (μ_{1x} , μ_{1y}) y inferiores (μ_{2x} , μ_{2y}), se calcula las componentes del momento equivalente (μ_{ex} , μ_{ey}) utilizando el coeficiente de equivalencia para cada eje de flexión (x, y) de forma independiente (C_{mx} , C_{my}) calculados con la expresión propuesta para el cálculo del coeficiente de equivalencia C_m .

Cabe resaltar, que debido a la combinación entre las excentricidades en cada extremo (e_1 , e_2) y sus respectivos ángulos de esviaje (α_1 , α_2), el cálculo del momento reducido equivalente para cada eje coordenado (μ_{ex} , μ_{ey}) se hace a partir de las

componentes de los momento reducidos de primer orden calculados en el extremo en donde la excentricidad en el eje correspondiente (e_{1x} ; e_{2x} ; e_{1y} y e_{2y}) posea mayor valor absoluto (expresión 7.13).

$$\mu_{ex} = C_{mx} \cdot \max(\mu_{1x}, \mu_{2x}) \leftrightarrow \mu_{ey} = C_{my} \cdot \max(\mu_{1y}, \mu_{2y}) \quad 7.13$$

donde:

- μ_{ex} ; μ_{ey} momento flector reducido equivalente para cada eje principal;
- C_{mx} ; C_{my} coeficiente de equivalencia calculado con la nueva expresión propuesta para cada eje principal;
- $\max(\mu_{1x}, \mu_{2x})$ máximo valor entre μ_{1x} y μ_{2x} ;
- $\max(\mu_{1y}, \mu_{2y})$ máximo valor entre μ_{1y} y μ_{2y} .

En la figura 7.25 se representa diagrama de interacción μ_x - μ_y para el momento reducido equivalente (μ_e) calculado a partir de los momentos reducidos superior (μ_1) e inferior (μ_2) utilizando la nueva expresión propuesta en el presente trabajo (expresión 7.10) para la obtención del coeficiente de equivalencia C_m .

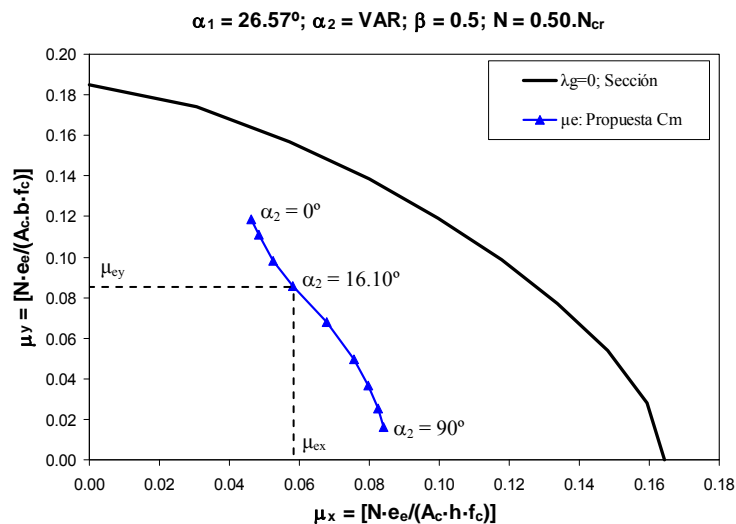


Figura 7.25. Diagrama de interacción μ_x - μ_y : Representación del momento reducido equivalente μ_e .

En la figura 7.26 se representa diagrama de interacción del soporte (μ_x - μ_y) para el momento reducido del caso de referencia con excentricidades y ángulos de esviaje iguales los extremos ($\mu_{\beta=1} \rightarrow e_1 = e_2$; $\alpha_1 = \alpha_2$) variando α_1 y α_2 de 0° a 90° .

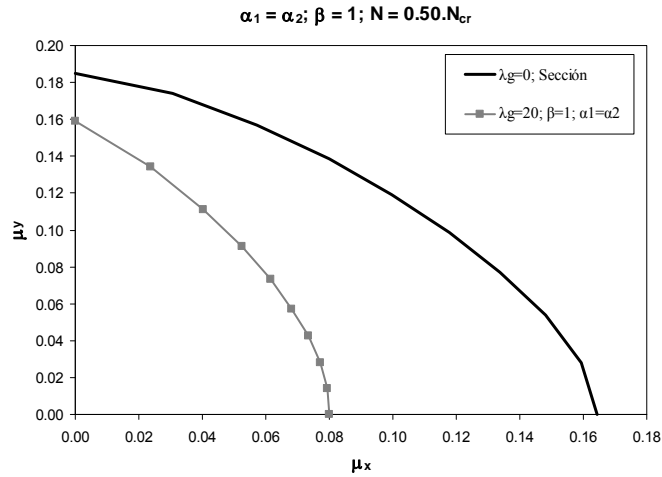


Figura 7.26. Diagrama de interacción μ_x - μ_y : Representación del momento reducido del caso patrón de referencia $\mu_{\beta=1}$, con excentricidades y ángulos de esviaje iguales en los extremos.

En la figura 7.27. Se representan los diagramas de interacción μ_x - μ_y , para un nivel de axil reducido (v) constante, de la sección transversal del soporte ($\lambda_g = 0$), para el caso de referencia con excentricidades y ángulos de esviaje iguales en extremos ($\mu_{\beta=1}$; $\lambda_g = 20$; $e_1 = e_2$; $\alpha_1 = \alpha_2$), para el extremo superior del soporte con ángulo de esviaje constante (μ_1 : $\lambda_g = 20$; $\alpha_1 = 26.57^\circ$), para el extremo inferior del soporte con ángulo de esviaje variable (μ_2 : $\lambda_g = 20$; $\alpha_2 = \text{VAR}$) y finalmente, para los momentos equivalentes μ_e (μ_{ex} y μ_{ey}) calculados de manera independiente para cada eje coordenado (x , y) con la expresión propuesta en este trabajo para el cálculo del coeficiente C_m (expresión 7.10).

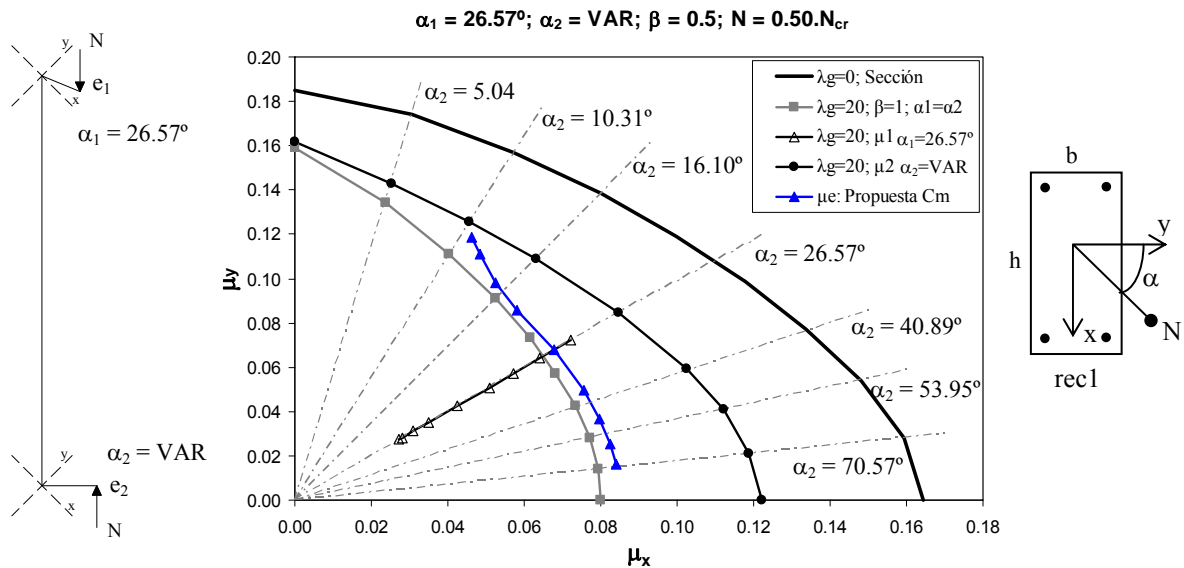


Figura 7.27. Diagrama de interacción μ_x - μ_y : Sección – rec1; $\beta = 0.5$; $\omega = 0.25$; $f_c = 30 \text{ MPa}$; $N = 0.50 \cdot N_{cr}$.

La verificación del coeficiente de equivalencia C_m propuesto se ha hecho comparando el módulo del momento reducido equivalente (expresión 7.14) calculado con la nueva expresión propuesta para el cálculo del coeficiente C_m , con el respectivo

módulo del momento reducido para el mismo ángulo de esviaje equivalente (α_e) y para el caso de referencia con excentricidades y ángulos de esviaje iguales en extremos ($\mu_{\beta=1} \rightarrow e_1 = e_2; \alpha_1 = \alpha_2$) (expresión 7.15) como se representa en la figura 7.28.

$$\mu_e = \sqrt{\mu_{ex}^2 + \mu_{ey}^2} = \sqrt{(C_{mx} \cdot \mu_{2x})^2 + (C_{my} \cdot \mu_{2y})^2} \quad 7.14$$

$$\mu_{\beta=1} = \sqrt{\mu_{(\beta=1)x}^2 + \mu_{(\beta=1)y}^2} \quad 7.15$$

Si el módulo de los momentos reducidos obtenidos con la propuesta (μ_e) se encuentran por encima del módulo de los momentos reducidos obtenidos con el caso de referencia ($\mu_{\beta=1} \rightarrow \beta = 1; \alpha_1 = \alpha_2$) la propuesta está del lado de la seguridad.

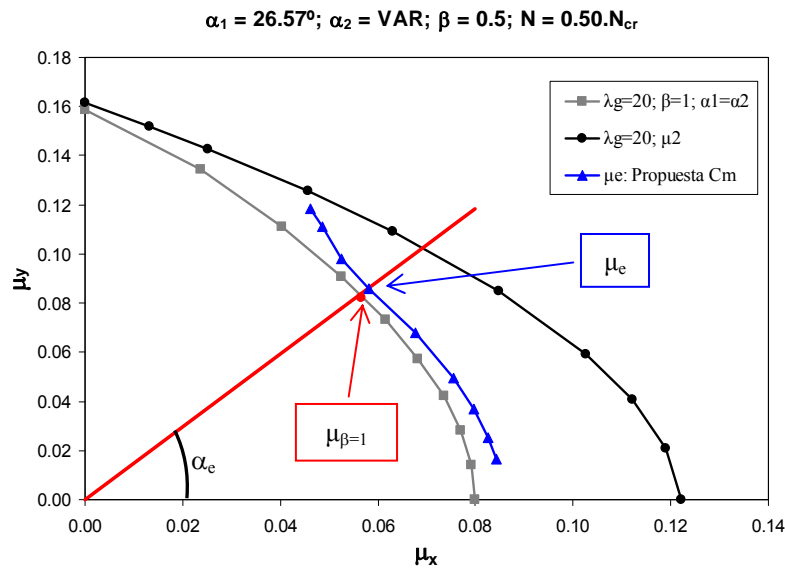


Figura 7.28. Momentos reducidos equivalente (μ_e) y de referencia ($\mu_{\beta=1}$).

7.2.2.b. Verificación del grado de precisión de la nueva expresión propuesta: flexo-compresión esviada

El grado de precisión de la propuesta se obtiene a través del cociente entre el módulo del momento reducido equivalente (μ_e) y el módulo del momento reducido para la situación de referencia ($\mu_{\beta=1}$) para el mismo ángulo de esviaje equivalente (α_e) como se muestra en la figura 7.29. El grado de precisión está definido por la expresión 7.16:

$$\xi_m = \left(\frac{\mu_e}{\mu_{\beta=1}} \right) \quad 7.16$$

En la tabla 7.4 se muestra el grado de precisión (ξ_m) de la aplicación de la nueva propuesta (expresión 7.10) respecto a los resultados obtenidos numéricamente para soportes sometidos a esfuerzos de flexo-compresión esviada con excentricidades y ángulos de esviaje desiguales en los extremos para los distintos parámetros analizados en la simulación numérica.

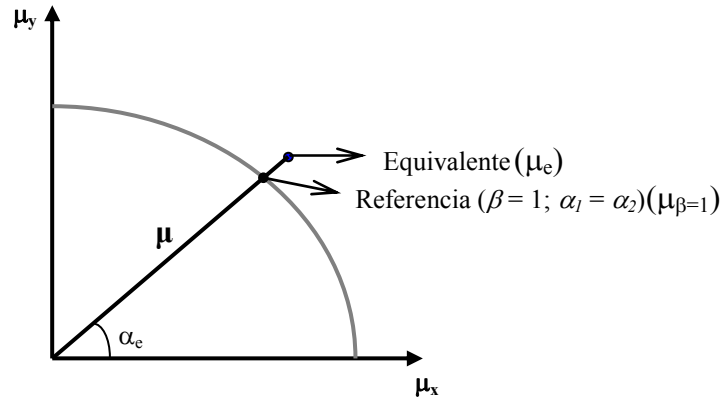


Figura 7.29. Obtención del grado de precisión de la nueva propuesta.

β	-1	ξ_m	1.65	f_c (MPa)	30	ξ_m	1.11	v/v_{cr}	0.10	ξ_m	1.21	Tipo de sección	ξ_m	1.22		
		C.V.	0.14			C.V.	0.10			C.V.	0.13		C.V.	0.17		
		P ₀₅	1.35			P ₀₅	1.01			P ₀₅	1.01		P ₀₅	1.01		
		P ₉₅	1.98			P ₉₅	1.32			P ₉₅	1.50		P ₉₅	1.66		
	-0.5	ξ_m	1.50		90	ξ_m	1.18		0.25	ξ_m	1.18		rec1	ξ_m	1.13	
		C.V.	0.11			C.V.	0.15			C.V.	0.13			C.V.	0.11	
		P ₀₅	1.26			P ₀₅	1.01			P ₀₅	1.01			P ₀₅	1.00	
		P ₉₅	1.73			P ₉₅	1.58			P ₉₅	1.53			P ₉₅	1.35	
	-0.25	ξ_m	1.30		λ_g	20	ξ_m		1.13	0.30	ξ_m		1.17	rec2	ξ_m	1.10
		C.V.	0.13				C.V.		0.12		C.V.		0.15		C.V.	0.09
		P ₀₅	1.09				P ₀₅		1.01		P ₀₅		1.01		P ₀₅	1.01
		P ₉₅	1.65				P ₉₅		1.38		P ₉₅		1.45		P ₉₅	1.30
	0	ξ_m	1.22	30		ξ_m	1.18	0.35	ξ_m		1.12	rec3	ξ_m	1.12		
		C.V.	0.11			C.V.	0.14		C.V.		0.13		C.V.	0.10		
		P ₀₅	1.05			P ₀₅	1.01		P ₀₅		1.01		P ₀₅	1.01		
		P ₉₅	1.48			P ₉₅	1.54		P ₉₅		1.44		P ₉₅	1.34		
	0.25	ξ_m	1.12	ω		0.06	ξ_m	1.16	0.50		ξ_m	1.11	rec4	ξ_m	1.10	
		C.V.	0.07				C.V.	0.12			C.V.	0.11		C.V.	0.08	
		P ₀₅	1.03				P ₀₅	1.01			P ₀₅	1.01		P ₀₅	1.01	
		P ₉₅	1.28				P ₉₅	1.48			P ₉₅	1.36		P ₉₅	1.28	
	0.5	ξ_m	1.10		0.25	ξ_m	1.15	0.70	ξ_m	1.13	TOTAL	ξ_m	1.14			
		C.V.	0.08			C.V.	0.13		C.V.	0.11		C.V.	0.13			
		P ₀₅	1.02			P ₀₅	1.01		P ₀₅	1.01		P ₀₅	1.01			
		P ₉₅	1.29			P ₉₅	1.47		P ₉₅	1.33		P ₉₅	1.44			
	1	ξ_m	1.08		0.50	ξ_m	1.10					ξ_m	1.14			
		C.V.	0.08			C.V.	0.07					C.V.	0.13			
		P ₀₅	1.00			P ₀₅	1.01					P ₀₅	1.01			
		P ₉₅	1.27			P ₉₅	1.24					P ₉₅	1.44			

ξ_m = Promedio; C.V. = Coeficiente de variación; P₀₅ = Percentil del 5%; P₉₅ = Percentil del 95%;

Tabla 7.4. Grado de precisión del coeficiente de equivalencia C_m propuesto: flexo-compresión esviada.

Como era de esperar, se observa en la tabla 7.4 una tendencia similar del grado de precisión de la nueva expresión propuesta en el caso de soportes sometidos a esfuerzos de flexo-compresión esviada, calculando el coeficiente C_m para cada eje coordinado de manera independiente, respecto a los resultados obtenidos con los soportes sometidos a esfuerzos de flexo-compresión recta con excentricidades desiguales en extremos.

Cabe resaltar que para los soportes flectados con doble curvatura ($\beta < 0$) y para valores bajos de axil reducido ($v/v_{cr} \leq 0.30$) el método presenta una mayor dispersión de los resultados.

Respecto a la resistencia del hormigón (f_c) se observa que para los soportes de hormigón de alta resistencia el método se sitúa ligeramente más del lado de la seguridad y la dispersión de los resultados ha sido un poco mayor respecto a los soportes de resistencia convencional.

Respecto al tipo de sección transversal analizado, se puede observar que para una sección transversal cuadrada el método posee una mayor dispersión ($\xi_m = 1.22$ y C.V. = 0.17) respecto a los casos con sección transversal rectangular. Para las secciones rectangulares analizadas, la distribución de la armadura tiene poca influencia en el grado de precisión de la propuesta, presentando resultados similares para las 4 configuraciones de armado consideradas en la simulación numérica (rec1, rec2, rec3 y rec4).

Se puede observar que no hay una significativa variación del grado de precisión de la expresión propuesta respecto a los dos valores de esbeltez geométrica analizados ($\lambda_g = 20$ y 30).

A continuación, en la tabla 7.5 se representa el grado de precisión (ξ_m) de la aplicación de la expresión propuesta por Austin (1961) [7] y utilizada por la mayoría de las normativas (AISC (1963) [60], ACI-318 (2008) [1], EC-2 (2004) [29], EHE-08 [23], MC-90 [25]) respecto a los resultados obtenidos numéricamente para soportes sometidos a esfuerzos de flexo-compresión esviada con excentricidades y ángulos de esviaje desiguales en extremos para los distintos parámetros analizados en la simulación numérica.

Además, de la figura 7.30 a la figura 7.34, se representa gráficamente el grado de precisión (ξ_m) respecto a las variables analizadas (β ; v/v_{cr} ; f_c ; λ_g ; $v \cdot \lambda_g^2$) para el coeficiente de equivalencia C_m propuesto en este trabajo (expresión 7.10) y el propuesto por Austin (1961) [7] y utilizado por la mayoría de los códigos de diseño (expresión 7.2). Se puede observar, tal y como se ha observado en los caso de flexo-compresión recta, que la nueva expresión propuesta (expresión 7.10), mejora significativamente la seguridad respecto a las expresiones propuestas por Austin (1961) [7], principalmente para los casos de soportes flectados con doble curvatura ($\beta < 0$), niveles bajos y medianos de axil reducido ($v/v_{cr} \leq 0.30$) y para los casos de esbeltez geométrica $\lambda_g = 20$.

β	-1	ξ_m	1.08	f_c (MPa)	30	ξ_m	1.06	v/v_{cr}	0.10	ξ_m	0.98	Tipo de sección	cuad	ξ_m	1.08
		C.V.	0.23			C.V.	0.06			C.V.	0.12			C.V.	0.08
		P ₀₅	0.66			P ₀₅	0.99			P ₀₅	0.68			P ₀₅	0.97
		P ₉₅	1.37			P ₉₅	1.17			P ₉₅	1.10			P ₉₅	1.21
	-0.5	ξ_m	1.04	90	ξ_m	1.08	0.25	ξ_m	1.04	rec1	ξ_m	1.07			
		C.V.	0.17		C.V.	0.09		C.V.	0.06		C.V.	0.08			
		P ₀₅	0.73		P ₀₅	1.00		P ₀₅	0.98		P ₀₅	0.98			
		P ₉₅	1.25		P ₉₅	1.24		P ₉₅	1.10		P ₉₅	1.19			
	-0.25	ξ_m	1.14	20	ξ_m	1.06	0.30	ξ_m	1.05	rec2	ξ_m	1.06			
		C.V.	0.11		C.V.	0.07		C.V.	0.08		C.V.	0.06			
		P ₀₅	0.98		P ₀₅	0.99		P ₀₅	0.96		P ₀₅	1.00			
		P ₉₅	1.31		P ₉₅	1.19		P ₉₅	1.18		P ₉₅	1.17			
	0	ξ_m	1.09	30	ξ_m	1.09	0.35	ξ_m	1.05	rec3	ξ_m	1.07			
		C.V.	0.06		C.V.	0.07		C.V.	0.04		C.V.	0.07			
		P ₀₅	0.98		P ₀₅	1.00		P ₀₅	1.00		P ₀₅	1.01			
		P ₉₅	1.17		P ₉₅	1.20		P ₉₅	1.12		P ₉₅	1.17			
	0.25	ξ_m	1.07	0.06	ξ_m	1.04	0.50	ξ_m	1.07	rec4	ξ_m	1.06			
		C.V.	0.05		C.V.	0.04		C.V.	0.06		C.V.	0.05			
		P ₀₅	1.00		P ₀₅	0.98		P ₀₅	1.00		P ₀₅	1.01			
		P ₉₅	1.14		P ₉₅	1.13		P ₉₅	1.17		P ₉₅	1.14			
	0.5	ξ_m	1.06	0.25	ξ_m	1.07	0.70	ξ_m	1.11	TOTAL	ξ_m	1.07			
		C.V.	0.05		C.V.	0.07		C.V.	0.08		C.V.	0.07			
		P ₀₅	1.00		P ₀₅	0.99		P ₀₅	1.01		P ₀₅	0.99			
		P ₉₅	1.14		P ₉₅	1.19		P ₉₅	1.27		P ₉₅	1.19			
1	ξ_m	1.05	0.50	ξ_m	1.06					ξ_m	1.07				
	C.V.	0.04		C.V.	0.05					C.V.	0.07				
	P ₀₅	1.00		P ₀₅	1.00					P ₀₅	0.99				
	P ₉₅	1.12		P ₉₅	1.15					P ₉₅	1.19				

ξ_m = Promedio; C.V. = Coeficiente de variación; P₀₅ = Percentil del 5%; P₉₅ = Percentil del 95%;

Tabla 7.5. Grado de precisión del coeficiente de equivalencia C_m propuesto por Austin (1961) [7] flexo-compresión esviada.

En la figura 7.30 se puede observar que la nueva expresión propuesta mejora considerablemente el nivel de seguridad para los soportes flectado con doble curvatura ($\beta < 0$), tal y como se ha observado en el análisis de los casos en que el soporte está sometido a esfuerzos de flexo-compresión recta (apartado 7.2.1.c).

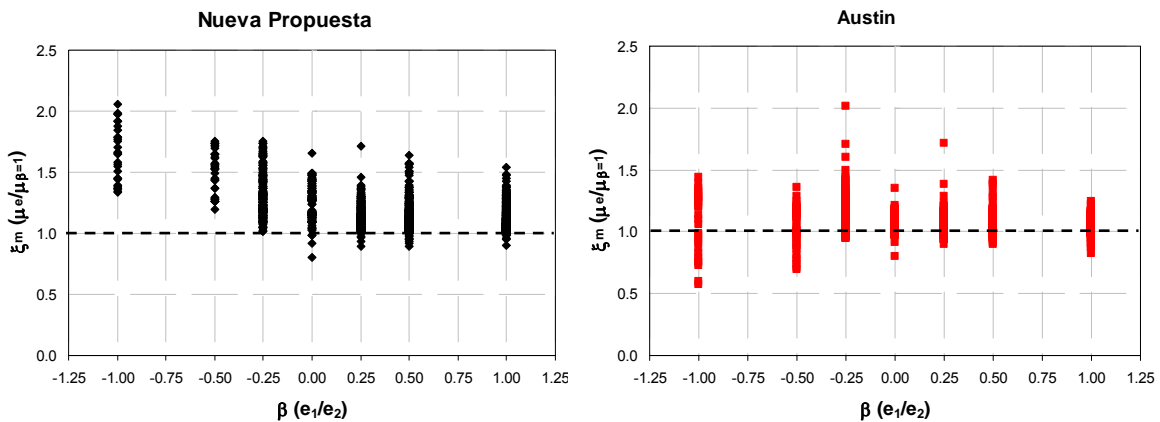


Figura 7.30. Grado de precisión del coeficiente de equivalencia C_m en función de la relación entre excentricidades en extremos (β) – flexo-compresión esviada.

En la figura 7.31 se representa el grado de precisión del coeficiente C_m en función del nivel de axil reducido (v/v_{cr}). Se puede observar que cuando se utiliza la expresión propuesta por Austin (1961) [7] para niveles bajos y medianos de axil reducido se producen numerosos casos inseguros. La utilización de la nueva propuesta (expresión 7.10) mejora significativamente la seguridad para estos casos, en donde casi la totalidad de los casos considerados se encuentran del lado de la seguridad.

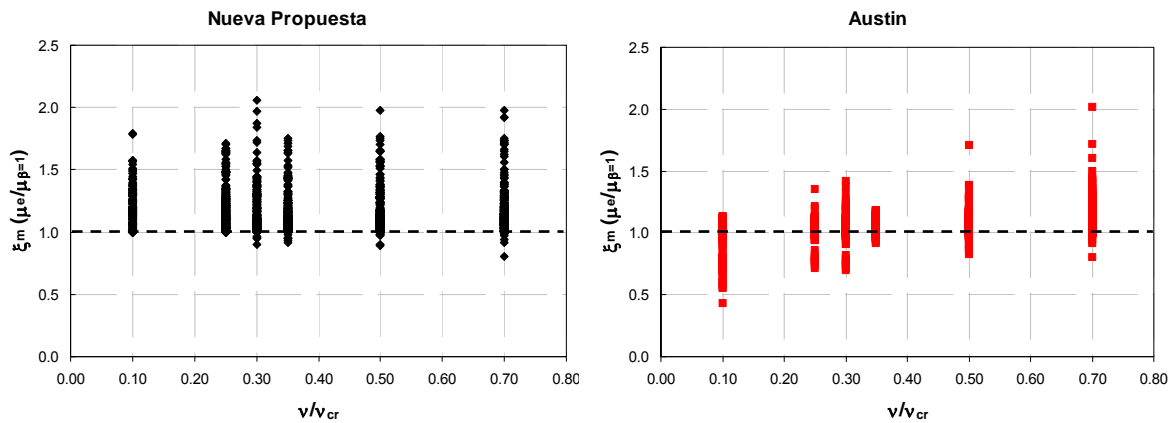


Figura 7.31. Grado de precisión del coeficiente de equivalencia C_m en función del axil nivel de axil aplicado (v/v_{cr}) – flexo-compresión esviada.

En la figura 7.32 se representa gráficamente el grado de precisión (ξ_m) de las propuestas para obtención del coeficiente C_m en función de la resistencia del hormigón (HC: $f_c = 30$ MPa y HAR: $f_c = 90$ MPa). Se puede observar que esta variable no influye de manera significativa en el grado de precisión (ξ_m). En todo caso la utilización de la nueva expresión propuesta presenta una significativa mejora en la seguridad respecto a la expresión propuesta por Austin (1961) [7], principalmente para los soportes de HAR.

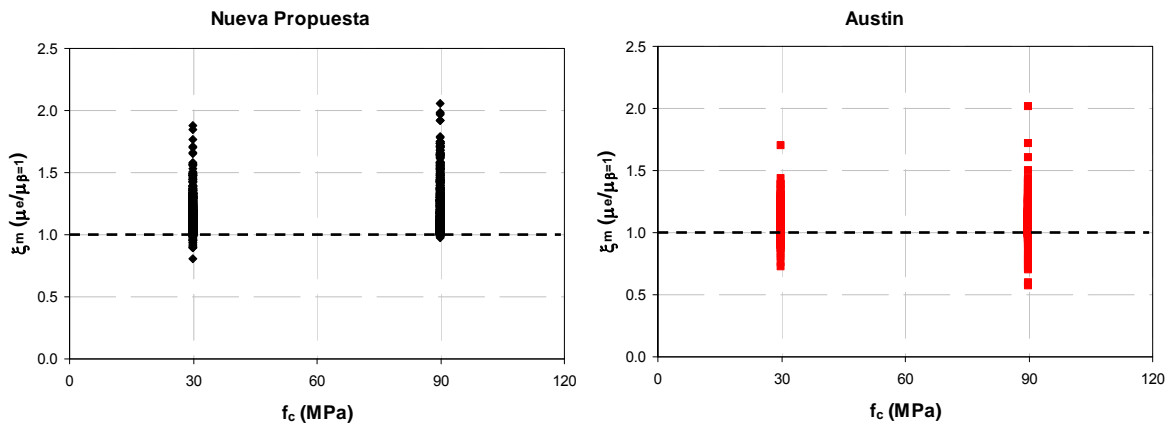


Figura 7.32. Grado de precisión del coeficiente de equivalencia C_m en función de la resistencia del hormigón (f_c) – flexo-compresión esviada.

En la figura 7.33 se representa el grado de precisión (ξ_m) en función de la esbeltez geométrica del soporte (λ_g). Para los casos de soportes con una esbeltez geométrica mediana ($\lambda_g = 20$) la expresión propuesta por Austin (1961) [7] da lugar a numerosos

casos inseguros. Esta situación también se ha observado en el análisis de los soportes sometidos a flexo-compresión recta (apartado 7.2.1.c). Una vez más, la utilización de la nueva propuesta definida en la expresión 7.10 incrementa el ratio $(\mu_e/\mu_{\beta=1})$, situándose del lado de la seguridad para casi la totalidad de los casos analizados.

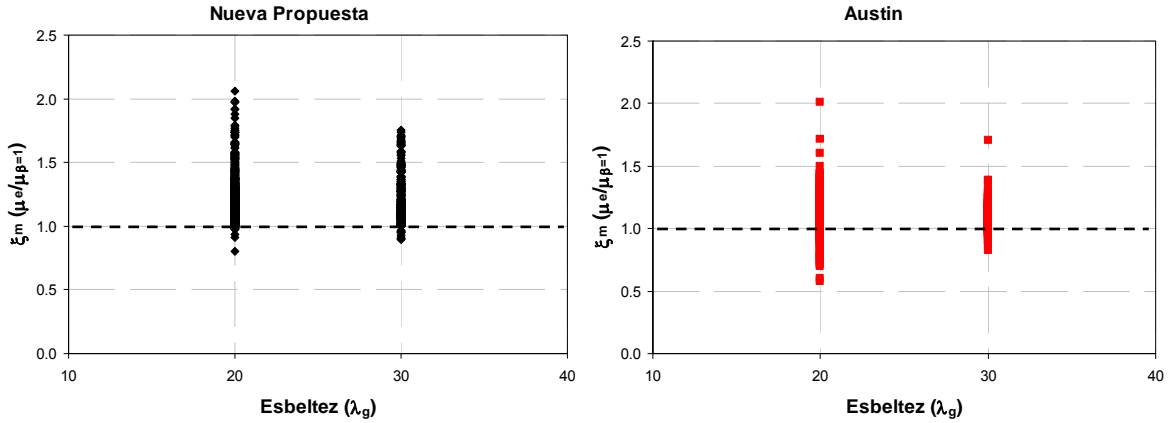


Figura 7.33. Grado de precisión del coeficiente de equivalencia C_m en función de esbeltez geométrica (λ_g) – flexo-compresión esviada.

Por último, en la figura 7.34 se representa el grado de precisión (ξ_m) respecto al producto $(\lambda_g^2 \cdot v)$ para los coeficientes de equivalencia C_m propuestos en este trabajo (expresión 7.10) y el propuesto por Austin (1961) [7] y utilizado por la mayoría de los códigos de diseño (expresión 7.2). Se puede observar, tal y como se ha observado en el caso de flexo-compresión recta, que para valores pequeños de $(v \cdot \lambda_g^2)$ la utilización del coeficiente C_m propuesto por Austin (1961) [7] lugar a muchos valores del lado de la inseguridad. La nueva propuesta mejora significativamente el nivel de seguridad para estos casos.

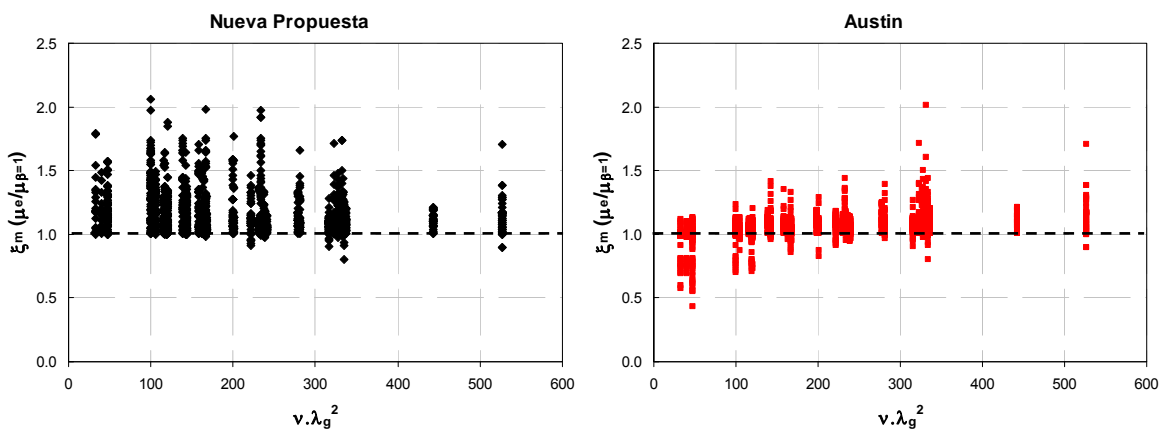


Figura 7.34. Grado de precisión del coeficiente de equivalencia C_m en función del producto $(v \cdot \lambda_g^2)$ – flexo-compresión esviada.

En definitiva, con la aplicación de la nueva expresión propuesta en este trabajo para el cálculo del coeficiente de equivalencia C_m (expresión 7.10) en soportes sometidos a esfuerzos de flexo-compresión esviada con excentricidades y ángulos de esviaje

desiguales en cada extremo, se ha obtenido un ratio total medio (ξ_m) de 1.14 con un coeficiente de variación (C.V.) de 0.13, situándose del lado de la seguridad para casi la totalidad de los casos considerados.

7.3. Aplicación de la nueva expresión propuesta para el cálculo del coeficiente de equivalencia C_m

En este apartado se comparan las cargas máximas obtenidas en los ensayos de soportes con excentricidades desiguales en los extremos realizados en el programa experimental del presente trabajo y en los ensayos realizados por otros autores (Anejo D) con las cargas máximas obtenidas utilizando los métodos simplificados propuestos por las distintas normativas y analizados en el apartado 5.6 del Capítulo 5 de la presente tesis doctoral (EHE-08 [23], EC-2 (2004) [29] y ACI-318 (2008) [1]). En los métodos simplificados se utiliza la expresión propuesta por Austin (1961) [7] (expresión 7.2) o la nueva expresión propuesta en este trabajo (expresión 7.10) para la obtención del coeficiente de equivalencia C_m , comparando los resultados obtenidos en ambos casos.

En la tabla 7.6 y en la tabla 7.7 se representa el grado de precisión de la aplicación de los métodos simplificados propuestos por las normativas respecto a los resultados experimentales, utilizando, respectivamente, el coeficiente C_m propuesto por Austin (1961) [7] (tabla 7.6) y el coeficiente C_m propuesto en el presente trabajo (tabla 7.7). Al igual que en el Capítulo 5, se analizan los métodos propuestos por la EHE-08 [23], el método de amplificación de momentos (1) y de la excentricidad adicional (2) propuestos por el EC-2 (2004) [29] y el método propuesto por el ACI-318 (2008) [1] utilizando la expresión para obtención de la rigidez nominal del soporte (EI) teniendo en cuenta la armadura longitudinal (1) y sin tenerla en cuenta (2).

Se representa el promedio (ξ_m) de la relación entre la carga máxima obtenida en cada ensayo y obtenida con la utilización del coeficiente C_m propuesto por Austin (1961) [7] (expresión 7.2) ($\xi_m = N_{\text{test}}/N_{C_m, \text{Austin}}$) y con la carga máxima obtenida utilizándose el coeficiente C_m propuesto en este trabajo (expresión 7.10) ($\xi_m = N_{\text{test}}/N_{C_m, \text{prop}}$).

	EHE-08	EC-2 (1)	EC-2 (2)	ACI-318 (1)	ACI-318 (2)
$\xi_m (N_{\text{test}}/N_{C_m, \text{Austin}})$	1.34	1.64	1.57	1.50	1.41
C.V.	0.32	0.32	0.45	0.29	0.31
P ₀₅	0.78	0.89	0.77	0.80	0.80
P ₉₅	2.20	2.67	3.01	2.22	2.09

ξ_m = Promedio; C.V. = Coeficiente de variación; P₀₅ = Percentil del 5%; P₉₅ = Percentil del 95%;

Tabla 7.6. Grado de precisión de los métodos simplificados con el coeficiente C_m propuesto por Austin (1961) [7] (expresión 7.2).

	EHE-08	EC-2 (1)	EC-2 (2)	ACI-318 (1)	ACI-318 (2)
$\xi_m (N_{test}/N_{Cm,prop})$	1.62	1.98	1.79	1.72	1.62
C.V.	0.30	0.34	0.39	0.24	0.25
P ₀₅	1.02	1.21	1.06	1.13	1.04
P ₉₅	2.59	3.38	3.23	2.47	2.36

ξ_m = Promedio; C.V. = Coeficiente de variación; P₀₅ = Percentil del 5%; P₉₅ = Percentil del 95%;

Tabla 7.7. Grado de precisión de los métodos simplificados con el coeficiente C_m propuesto en el presente trabajo (expresión 7.10).

Del análisis de las tablas se puede observar que, en general, la utilización de las dos expresiones propuestas para la obtención del coeficiente C_m dan lugar a resultados con promedios del lado de la seguridad ($\xi_m \geq 1$) para los métodos simplificados analizados, pero con coeficientes variación elevados (C.V. ≥ 0.24). Los valores promedios obtenidos con la nueva propuesta son ligeramente superiores a los obtenidos con la utilización de la propuesta de Austin (1961) [7], sin embargo, con un coeficiente de variación (C.V.) ligeramente inferior.

Cabe resaltar que la utilización de la expresión propuesta por Austin (1961) [7], en los métodos simplificados analizados, da lugar a numerosos casos del lado de la inseguridad ($\xi_m \leq 1$), aunque el promedio total se sitúe del lado de la seguridad. Sin embargo, utilizando la nueva expresión propuesta para la obtención del coeficiente C_m , la totalidad de casos analizados se encuentra del lado de la seguridad con la utilización de los métodos simplificados propuestos por las distintas normativas (EHE-08 [23], EC-2 (2004) [29] y ACI-318 (2008) [1]).

En la tabla 7.8 se representa el grado de precisión utilizando la expresión propuesta por Austin (1961) [7] ($\xi_m = N_{test}/N_{Cm,Austin}$) en los métodos simplificados propuestos por las normativas en función de la esbeltez geométrica del soporte (λ_g), de la resistencia del hormigón (f_c) y del producto $v \cdot \lambda_g^2$.

Se puede observar que para valores bajos y medianos de la esbeltez geométrica (λ_g), para soportes fabricados con hormigón de alta resistencia y para valores del producto $v \cdot \lambda_g^2$ menores que 100, los métodos simplificados propuestos por las normativas dan lugar a resultados del lado de la inseguridad, con valores promedios (ξ_m) que varían del 0.74 para soportes fabricados con hormigón de resistencia (f_c) superior a 100 MPa (EC-2 (1)) al 0.99 para soportes de esbeltez geométrica (λ_g) entre 10 y 20 (EHE-08).

Cabe resaltar que los ensayos de soportes fabricados con hormigón de resistencia superior a 100 MPa fueron realizados por los mismos autores (Sarker y Rangan (2003) [58]) y poseen esbeltez geométrica (λ_g) menor que 10. Estos autores, en su trabajo, comentaron que para sus ensayos experimentales, el método simplificado propuesto por

el ACI-318 (2008) [1] utilizando el C_m propuesto por Austin (1961) [7] daba lugar a resultados inseguros, tal y como se ha confirmado en el presente análisis.

		EHE-08	EC-2 (1)	EC-2 (2)	ACI-318 (1)	ACI-318 (2)
$\lambda_g \leq 10$	$\xi_m (N_{test}/N_{Cm,Austin})$	0.81	0.90	0.81	0.83	0.83
	C.V.	0.12	0.12	0.13	0.16	0.17
	P ₀₅	0.68	0.75	0.67	0.62	0.61
	P ₉₅	0.93	1.06	0.94	0.99	1.00
$10 < \lambda_g \leq 20$	$\xi_m (N_{test}/N_{Cm,Austin})$	0.99	1.33	0.97	1.23	1.06
	C.V.	0.13	0.18	0.11	0.18	0.19
	P ₀₅	0.79	1.03	0.87	0.95	0.86
	P ₉₅	1.18	1.68	1.17	1.55	1.40
$20 < \lambda_g \leq 30$	$\xi_m (N_{test}/N_{Cm,Austin})$	1.54	1.81	1.86	1.66	1.57
	C.V.	0.25	0.27	0.37	0.23	0.24
	P ₀₅	1.06	1.31	1.08	1.06	0.90
	P ₉₅	2.24	2.72	3.15	2.30	2.13
$\lambda_g \geq 30$	$\xi_m (N_{test}/N_{Cm,Austin})$	1.11	1.98	1.40	1.78	1.81
	C.V.	0.09	0.13	0.09	0.10	0.09
	P ₀₅	0.99	1.71	1.28	1.60	1.65
	P ₉₅	1.23	2.30	1.56	2.03	2.03
$f_c < 50$	$\xi_m (N_{test}/N_{Cm,Austin})$	1.37	1.55	1.55	1.59	1.62
	C.V.	0.23	0.21	0.33	0.20	0.23
	P ₀₅	1.01	1.05	0.91	1.04	1.02
	P ₉₅	2.06	2.10	2.63	2.02	2.17
$50 \leq f_c < 100$	$\xi_m (N_{test}/N_{Cm,Austin})$	1.36	1.79	1.66	1.46	1.22
	C.V.	0.38	0.35	0.52	0.35	0.31
	P ₀₅	0.75	0.89	0.78	0.80	0.80
	P ₉₅	2.25	2.79	3.40	2.31	1.99
$f_c \geq 100$	$\xi_m (N_{test}/N_{Cm,Austin})$	0.76	0.86	0.74	0.75	0.74
	C.V.	0.16	0.18	0.17	0.20	0.20
	P ₀₅	0.61	0.68	0.59	0.60	0.59
	P ₉₅	0.90	1.04	0.88	0.93	0.92
$\nu \cdot \lambda_g^2 \leq 100$	$\xi_m (N_{test}/N_{Cm,Austin})$	0.97	1.24	1.02	0.97	0.88
	C.V.	0.32	0.30	0.34	0.20	0.16
	P ₀₅	0.72	0.81	0.73	0.63	0.60
	P ₉₅	1.66	1.80	1.76	1.26	1.04
$100 < \nu \cdot \lambda_g^2 \leq 400$	$\xi_m (N_{test}/N_{Cm,Austin})$	1.46	1.79	1.75	1.60	1.41
	C.V.	0.29	0.32	0.44	0.25	0.21
	P ₀₅	1.00	1.06	0.91	1.04	0.96
	P ₉₅	2.25	2.75	3.25	2.29	1.89
$\nu \cdot \lambda_g^2 \geq 400$	$\xi_m (N_{test}/N_{Cm,Austin})$	1.43	1.65	1.67	1.79	1.93
	C.V.	0.24	0.12	0.32	0.12	0.13
	P ₀₅	1.11	1.41	1.21	1.51	1.54
	P ₉₅	2.19	1.97	2.91	2.09	2.33

ξ_m = Promedio; C.V. = Coeficiente de variación; P₀₅ = Percentil del 5%; P₉₅ = Percentil del 95%;

Tabla 7.8. Grado de precisión de los métodos simplificados con el coeficiente C_m propuesto por Austin (1961) [7] (expresión 7.2) en función de λ_g , f_c y del producto $\nu \cdot \lambda_g^2$.

A continuación, en la tabla 7.9, se representa el grado de precisión de los métodos simplificados utilizando la expresión para la obtención del coeficiente C_m propuesta en el presente trabajo (expresión 7.10).

		EHE-08	EC-2 (1)	EC-2 (2)	ACI-318 (1)	ACI-318 (2)
$\lambda_g \leq 10$	$\xi_m (N_{test}/N_{Cm,prop})$	1.17	1.36	1.20	1.26	1.26
	C.V.	0.12	0.14	0.12	0.10	0.10
	P ₀₅	1.01	1.12	1.04	1.10	1.09
	P ₉₅	1.42	1.67	1.42	1.45	1.45
$10 < \lambda_g \leq 20$	$\xi_m (N_{test}/N_{Cm,prop})$	1.22	1.78	1.24	1.54	1.35
	C.V.	0.16	0.34	0.22	0.20	0.18
	P ₀₅	1.00	1.20	1.01	1.18	1.03
	P ₉₅	1.48	2.67	1.67	2.06	1.63
$20 < \lambda_g \leq 30$	$\xi_m (N_{test}/N_{Cm,prop})$	1.79	2.10	2.04	1.83	1.72
	C.V.	0.27	0.33	0.35	0.23	0.24
	P ₀₅	1.18	1.38	1.23	1.17	1.07
	P ₉₅	2.67	3.46	3.46	2.48	2.48
$\lambda_g \geq 30$	$\xi_m (N_{test}/N_{Cm,prop})$	1.58	2.52	1.74	2.06	2.09
	C.V.	0.14	0.13	0.10	0.09	0.07
	P ₀₅	1.31	2.12	1.53	1.87	1.94
	P ₉₅	1.83	2.88	1.95	2.30	2.28
$f_c < 50$	$\xi_m (N_{test}/N_{Cm,prop})$	1.60	1.83	1.74	1.78	1.81
	C.V.	0.24	0.32	0.31	0.19	0.21
	P ₀₅	1.13	1.21	1.07	1.28	1.28
	P ₉₅	2.43	2.87	2.79	2.41	2.49
$50 \leq f_c < 100$	$\xi_m (N_{test}/N_{Cm,prop})$	1.65	2.20	1.89	1.69	1.43
	C.V.	0.36	0.33	0.45	0.29	0.25
	P ₀₅	1.01	1.21	1.05	1.13	1.00
	P ₉₅	2.78	3.50	3.61	2.50	2.11
$f_c \geq 100$	$\xi_m (N_{test}/N_{Cm,prop})$	1.29	1.52	1.30	1.32	1.30
	C.V.	0.11	0.12	0.12	0.11	0.12
	P ₀₅	1.12	1.32	1.12	1.15	1.13
	P ₉₅	1.46	1.72	1.46	1.49	1.47
$v \cdot \lambda_g^2 \leq 100$	$\xi_m (N_{test}/N_{Cm,prop})$	1.29	1.66	1.35	1.30	1.21
	C.V.	0.25	0.25	0.25	0.15	0.15
	P ₀₅	1.01	1.14	1.03	1.09	1.01
	P ₉₅	1.88	2.56	1.87	1.70	1.49
$100 < v \cdot \lambda_g^2 \leq 400$	$\xi_m (N_{test}/N_{Cm,prop})$	1.75	2.18	1.96	1.81	1.60
	C.V.	0.31	0.37	0.40	0.24	0.19
	P ₀₅	1.10	1.21	1.05	1.26	1.14
	P ₉₅	2.70	3.68	3.55	2.51	2.17
$v \cdot \lambda_g^2 \geq 400$	$\xi_m (N_{test}/N_{Cm,prop})$	1.61	1.83	1.83	1.94	2.09
	C.V.	0.22	0.18	0.29	0.12	0.14
	P ₀₅	1.25	1.45	1.35	1.58	1.60
	P ₉₅	2.34	2.36	3.05	2.35	2.58

ξ_m = Promedio; C.V. = Coeficiente de variación; P₀₅ = Percentil del 5%; P₉₅ = Percentil del 95%;

Tabla 7.9. Grado de precisión de los métodos simplificados con el coeficiente C_m propuesto el presente trabajo (expresión 7.10) en función de λ_g , f_c y del producto $v \cdot \lambda_g^2$.

Se puede observar, comparando la tabla 7.8 con la tabla 7.9, una significativa mejora en el nivel de seguridad alcanzado principalmente en los casos de esbeltez geométrica (λ_g) bajas y medianas, para soportes fabricados con hormigón de alta resistencia y para valores del producto $v \cdot \lambda_g^2$ menores que 100, con todos los casos analizados situados del lado de la seguridad con la utilización de la nueva expresión propuesta para la obtención del coeficiente de equivalencia C_m .

A continuación en la figura 7.35, a modo de ejemplo, se muestran gráficamente los resultados presentados en la tabla 7.8 y en la tabla 7.9 utilizando el método simplificado propuesto por la EHE-08 [23]. Se representan los 68 ensayos experimentales realizados en el presente trabajo y los ensayos realizados por otros autores (Anejo D).

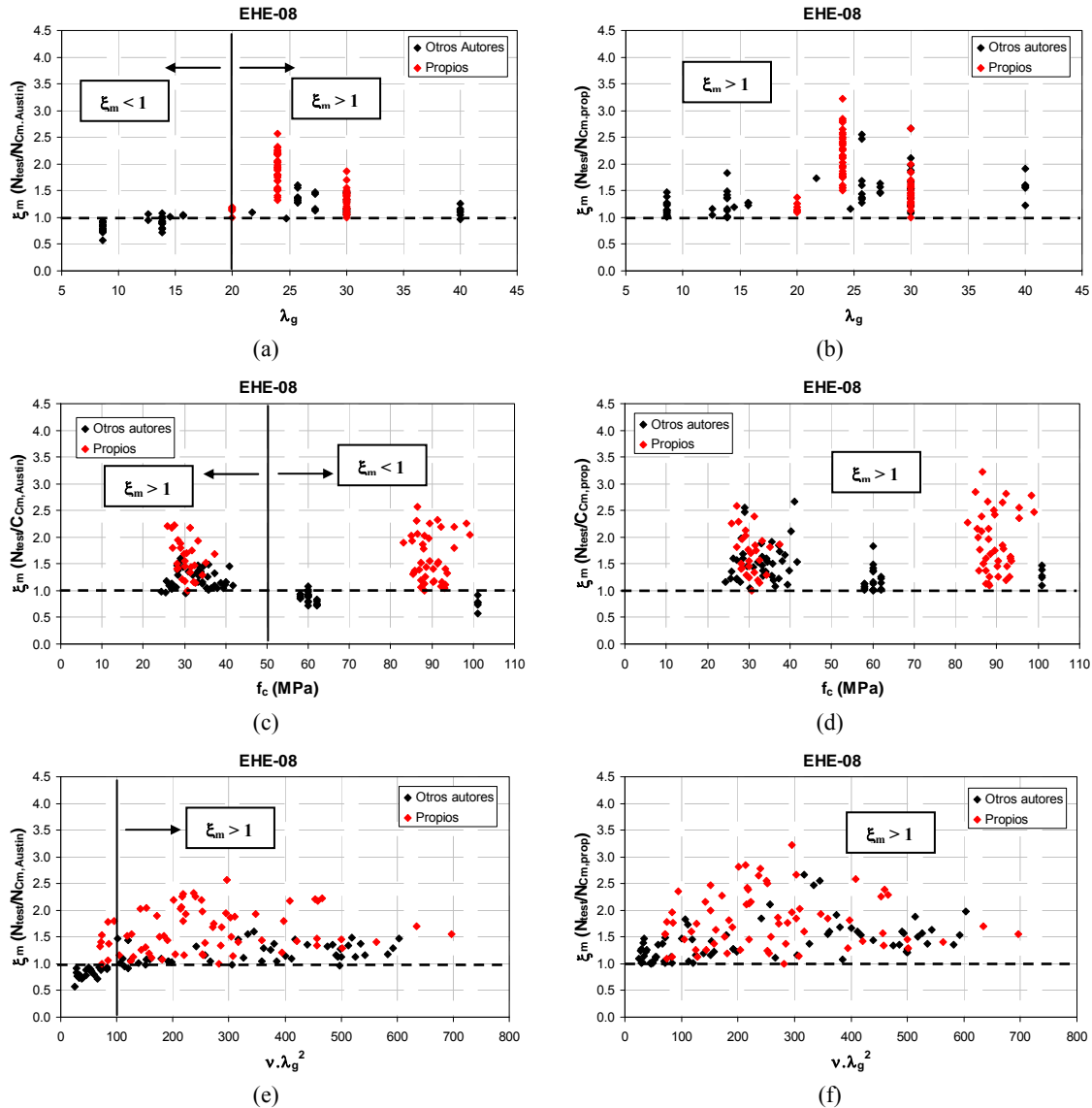


Figura 7.35. Representación gráfica del grado de precisión del método simplificado propuesto por la EHE-08 [23] con el coeficiente C_m propuesto por Austin (1961) [7] [(a); (c); (e)] y con el coeficiente de equivalencia C_m propuesto en el presente trabajo [(b); (d); (f)] en función de la esbeltez geométrica λ_g [(a); (b)], de la resistencia del hormigón f_c [(c); (d)] y del producto $v \cdot \lambda_g^2$ [(e); (f)].

En las gráficas de la figura 7.35 se puede observar los casos puntuales que se sitúan del lado de la inseguridad ($\xi_m < 1$) utilizándose el coeficiente C_m propuesto por Austin (1961) [7], y la mejora del nivel de seguridad para estos casos sustituyendo la expresión para el cálculo del coeficiente C_m por la expresión 7.10 propuesta en el presente trabajo

Los resultados de la aplicación de los métodos simplificados propuestos por el EC-2 (2004) [29] y por el ACI-318 (2008) [1] poseen la misma tendencia que los

presentados en la figura 7.35 para el método propuesto por la EHE-08 [23]. En el Anejo I se presentan las gráficas para todos los métodos analizados en función de la esbeltez geométrica del soporte (λ_g), de la resistencia del hormigón (f_c) y del producto $\nu \cdot \lambda_g^2$.

En definitiva, la utilización de la nueva expresión propuesta en el presente trabajo para el cálculo del coeficiente de equivalencia C_m (expresión 7.10) mejora de manera significativa la seguridad en la aplicación de los métodos simplificados propuestos por las distintas normativas (EHE-08 [23], EC-2 (2004) [29] y ACI-318 (2008) [1]), principalmente para los casos de soportes con esbelteces bajas y medianas ($\lambda_g \leq 20$), fabricados con hormigón de alta resistencia ($f_c \geq 50$ MPa) y para valores del producto $\nu \cdot \lambda_g^2$ menores que 100.

Capítulo 8.

Síntesis, conclusiones y futuras líneas de investigación

En el presente capítulo se indican los principales hitos del trabajo realizado, se relacionan las principales conclusiones alcanzadas durante la realización de la presente tesis doctoral y finalmente se indican las futuras líneas de investigación abiertas tras la finalización del estudio.

8.1. Síntesis

En el Capítulo 2 se ha realizado el análisis del estado del conocimiento haciendo una breve introducción teórica al pandeo de soportes, analizando los métodos simplificados propuestos y haciendo una revisión bibliográfica en el campo de los ensayos experimentales de soportes de hormigón armado sometidos a esfuerzos de flexo-compresión recta y esviada con excentricidades y ángulos de esviaje desiguales en

sus extremos, fabricados con hormigón convencional y de alta resistencia, cuyo principal resultado ha sido poner de manifiesto la necesidad de cubrir el vacío de datos experimentales referentes a soportes de hormigón armado bajo este tipo de solicitaciones, principalmente en lo que se refiere a los soportes fabricados con hormigón de alta resistencia.

Se ha planteado el desarrollo de un programa experimental para el análisis de soportes esbeltos de hormigón armado sometidos a esfuerzos de flexo-compresión con excentricidades y ángulos de esviaje desiguales en extremos fabricados con hormigón convencional y de alta resistencia. Para ello se ha diseñado un ensayo experimental capaz de reproducir el comportamiento de dichos soportes sometidos a esfuerzos de flexo-compresión recta y esviada con las condiciones anteriormente descritas.

En este estudio, 68 soportes de hormigón armado han sido ensayados variando la resistencia del hormigón (HC y HAR), la esbeltez geométrica (λ_g), la cuantía geométrica de armadura longitudinal (ρ_l), la relación entre excentricidades en extremos ($\beta = e_1/e_2$), la excentricidad relativa aplicada (e_2/h) y los ángulos de esviaje en extremos (α_1 y α_2). Se ha proporcionado información acerca de la capacidad resistente y de deformación y se ha descrito el comportamiento en las situaciones de carga máxima y última de los soportes.

Con los resultados obtenidos en el programa experimental presentado en este trabajo y de ensayos realizados por otros autores se ha podido calibrar el modelo numérico propuesto por Bonet (2001) [12] (MTR) para soportes de hormigón armado con las características analizadas. Para la calibración del MTR se ha tenido en cuenta el salto de recubrimiento característico en el comportamiento de los soportes fabricados con HAR con la utilización del factor k_3 .

Finalmente, utilizando el MTR calibrado, se ha realizado un análisis paramétrico para el análisis de las principales variables que influyen en el coeficiente de equivalencia C_m , presentando una nueva propuesta para el cálculo de dicho coeficiente para soportes de hormigón armado fabricados con hormigón convencional y de alta resistencia sometidos a esfuerzos de flexo-compresión recta o esviada con excentricidades y ángulos de esviaje desiguales en los extremos.

8.2. Conclusiones

8.2.1. Conclusiones relativas a la revisión bibliográfica realizada

- La mayoría de los trabajos experimentales existentes en la literatura centran su estudio en soportes esbeltos sometidos a solicitaciones de flexo-compresión recta bajo comportamiento instantáneo. En comparación con estos trabajos, son

escasos los estudios experimentales de soportes sometidos a excentricidades desiguales en sus extremos;

- Existe un vacío experimental de ensayos de soportes esbeltos fabricados con hormigón de alta resistencia y sometidos a excentricidades desiguales en extremos;
- No existe homogeneidad entre las diferentes propuestas para el cálculo del coeficiente de equivalencia C_m , ni en las variables consideradas ni en el peso con el que influyen;
- Los códigos de diseño proponen la utilización de métodos simplificados para predecir la carga de agotamiento de soportes esbeltos, que han sido previamente contrastados con soportes fabricados con hormigón convencional, y su aplicación a soportes de alta resistencia se requiere continuar investigando.

8.2.2. Conclusiones relativas al análisis de los resultados experimentales realizados

- Se ha definido un criterio para clasificar el modo de fallo de los soportes combinando el criterio basado en fuerzas propuesto por Pallarés et al (2008) [49] y el estado de deformaciones de los materiales en la sección crítica (de máximo momento total) del soporte, definiéndose cinco situaciones posibles: inestabilidad (por tracción, por compresión y elástica) y agotamiento (por tracción y por compresión) para las situaciones de carga máxima (N_{max}) y última (N_u);
- Se ha constatado que la mayoría de los soportes estudiados alcanzan la situación de inestabilidad en carga máxima sin haber llegado a plastificar los materiales;
- Para la situación de carga última se ha observado que si el soporte agota por tracción, la fisuración es distribuida y se genera una rótula plástica en la sección crítica una vez se ha alcanzado la carga máxima. En caso contrario (agotamiento por compresión) no se observa una distribución de fisuras clara, la rotura es poco dúctil y normalmente de carácter explosivo;
- Respecto al comportamiento en rotura, en las situaciones en que la carga axial está más centrada ($\beta = -0.5$ y 0 y $e_2/h = 0.1$ o 0.2) es frecuente que la rotura del soporte sea de carácter explosivo en los soportes fabricados con hormigón de alta resistencia;
- Al incrementar la armadura dispuesta en la cara comprimida en los ensayos de flexo-compresión recta (del 1.13% al 1.69%) se ha mejorado la ductilidad del soporte y la capacidad resistente del mismo al plastificar la armadura

traccionada antes de alcanzar la rotura de la sección. Este comportamiento es independiente del tipo de hormigón;

- Independientemente del tipo de rotura, se ha registrado en los soportes de hormigón de alta resistencia un salto del recubrimiento generalizado lo que supone una pérdida de capacidad resistente de la sección. Este fenómeno es importante considerarlo en la calibración de modelos numéricos;
- Las deformaciones que se han obtenido en el hormigón en la situación de carga última son superiores a las indicadas en los códigos de diseño (ACI-318 (2008) [1], EC-2 (2004) [29] y EHE-08 [23]) lo que supone una infravaloración de los momentos de agotamiento en situaciones de carga cercanas al axil de balanceo;
- A partir de la comparación entre el ángulo de inclinación de la fibra neutra (α_{FN}) y el ángulo de inclinación del momento flector total (α_M) en los soportes sometidos a esfuerzos de flexo-compresión esviada (sección transversal cuadrada), se ha podido observar, de manera general, un buen grado de paralelismo entre la fibra neutra y el eje del esfuerzo flector total, de lo que se deduce el desacoplamiento entre las direcciones de los esfuerzos flectores en los ensayos experimentales realizados;
- Del análisis de las variables estudiadas se ha verificado que el axil reducido (v) decrece conforme se incrementan la excentricidad relativa e_2/h , la relación de excentricidades β , la resistencia del soporte f_c y la esbeltez del soporte λ_g y, decrece la cuantía de armadura longitudinal ρ_l ;
- Se ha podido observar que para los mismos valores de excentricidad relativa (e_2/h) y de relaciones entre excentricidades (β), las flechas obtenidas por los soportes fabricados con hormigón convencional, en general, son muy similares a las obtenidas por los soportes de hormigón de alta resistencia, indicando que la flecha máxima del soportes no está influenciada de manera significativa por la resistencia del hormigón.

8.2.3. Conclusiones relativas a la comparación de los resultados experimentales con los métodos simplificados propuestos por las normativas

- Se han comparado los resultados experimentales con los métodos propuestos por el ACI-318 (2008) [1], EC-2 (2004) [29] y por la EHE-08 [23]. Estos códigos de diseño se sitúan del lado de la seguridad pero con un coeficiente de variación elevado ($C.V. \geq 25\%$). Además, el grado de precisión depende de los parámetros estudiados;
- En general, los métodos simplificados analizados están más del lado de la seguridad conforme los soportes son más esbeltos y decrece la excentricidad

adimensional (e_2/h), la relación entre excentricidades (β), la cuantía de armadura longitudinal (ρ_l);

- El grado de precisión medio que se ha obtenido al aplicar el método de amplificación de momentos propuesto por el EC-2 (2004) [29], en el caso de los soportes de hormigón de alta resistencia, difiere considerablemente del obtenido para soportes fabricados con hormigón convencional, incrementándose el error medio con el incremento de la resistencia del hormigón;
- La utilización de los métodos propuesto por el ACI-318 (2008) [1], el método de la excentricidad adicional propuesto por el EC-2 (2004) [29] y el método de la EHE-08 [23], el grado de precisión medio que se obtiene no presenta grandes diferencias respecto a la resistencia del hormigón considerada (HC y HAR);
- Se ha observado un incremento en el error medio obtenido en los casos de soportes sometidos a esfuerzos de flexo-compresión esviada debido al desacoplamiento de los flectores respecto a los ejes principales de flexión. La combinación de los ángulos de esviaje y de las excentricidades en cada extremo de los soportes dan lugar a componentes de excentricidad de menor valor absoluto respecto a cada eje coordenado. El error medio tiende a incrementarse con la disminución de la excentricidad adimensional (e_2/h) para flexo-compresión recta, presentando valores más del lado de la seguridad;
- Los métodos propuestos por el EC-2 (2004) [29], al infravalorar la rigidez nominal (EI) obteniéndose valores de axil crítico (N_{cr}) inferiores al real, tienen la tendencia de presentar valores más conservadores respecto a los obtenidos con el ACI-318 (2008) [1] y con la EHE-08 [23], principalmente para valores pequeños de excentricidad adimensional (e_2/h). Además, se ha observado que con la utilización del método propuesto por la EHE-08 [23], se obtiene un diagrama de interacción del soporte más próximo al real, justificando los resultados de promedio más centrados (próximos a la unidad), y una menor dispersión de los resultados obtenidos con este método;

8.2.4. Conclusiones relativas a la simulación numérica realizada (MTR)

- Se ha propuesto la utilización de un factor k_3 ($k_3 = 0.05 + 55/f_{cm} \leq 1$) para tener en cuenta el salto de recubrimiento del hormigón de alta resistencia. Dicho factor minorra la resistencia del hormigón en el borde exterior de la sección transversal, manteniendo así las características del material en el núcleo de hormigón que no es afectado por este salto de recubrimiento. El núcleo de hormigón no afectado está delimitado por el centro de gravedad de la armadura transversal;

- La utilización del factor k_3 mejora significativamente los resultados considerando el salto del recubrimiento como una disminución de la resistencia a compresión del hormigón en el borde exterior de la sección transversal;
- Se ha constatado que el modelo numérico calibrado posee un buen grado de precisión respecto a los ensayos experimentales realizados en el presente trabajo en lo que refiere a las cargas máximas alcanzadas en cada ensayo, con un promedio general de 1.04 (del lado de la seguridad) y un coeficiente de variación del 9%;
- Para los soportes sometidos a flexo-compresión recta ,respecto a las flechas obtenidas en cada ensayo, se ha observado un buen grado de precisión del MTR con un coeficiente de variación del 3% y un promedio de 1.03;
- En los soportes sometidos a flexo-compresión esviada se ha utilizado una excentricidad impuesta con valor de $L/1000$ debido a las imperfecciones geométricas ocasionadas durante el proceso de fabricación de la pieza. En general, se ha obtenido un buen ajuste con la utilización de la excentricidad impuesta, con un promedio respecto al eje “x” de flexión de 1.07 con coeficiente de variación de 0.20 y respecto al eje “y” de flexión de 0.97 con coeficiente de variación de 0.27;
- La aplicación del coeficiente C_m para soportes fabricados con hormigón de alta resistencia está más del lado de la seguridad que para soportes fabricados con hormigón convencional. Para axiles bajos (menor del 30% del axil crítico del soporte v_{cr}) existen numerosos casos del lado de la inseguridad; y que para axiles altos (mayor del 60% del axil crítico del soporte v_{cr}) la totalidad de casos se encuentran del lado de la seguridad. El valor promedio ha sido de 1.11 (del lado de la seguridad) con un coeficiente de variación del 13.08% para los soportes sometidos a flexo-compresión recta, mientras que para los casos de flexo-compresión esviada el promedio ha sido de 1.10 con un coeficiente de variación del 14%.

8.2.5. Conclusiones relativas a la nueva propuesta para obtención del coeficiente de equivalencia C_m

- A partir de un análisis paramétrico se ha realizado una propuesta de una nueva expresión para la obtención del coeficiente de equivalencia C_m :

$$C_m = 1 - \frac{v \cdot \lambda_g^2}{600} \geq C_{\min} \Rightarrow C_{\min} = 0.40 \cdot \beta + 0.60 \geq 0.40 ;$$

- La expresión propuesta por Austin (1961) [7] y utilizada por la mayoría de los códigos de diseño presenta una solución más centrada respecto a los resultados numéricos obtenidos en el análisis paramétrico. Sin embargo, muchos valores

están del lado de la inseguridad para valores del producto ($\lambda_g^2 \cdot v$) bajos y medianos;

- La nueva expresión para el cálculo del coeficiente de equivalencia C_m propuesta en este trabajo mejora el nivel de seguridad respecto a la expresión propuesta por Austin (1961) [7], principalmente para los casos de soportes flectados con doble curvatura ($\beta < 0$) y para valores bajos de axil reducido (v) y del producto ($\lambda_g^2 \cdot v$), situándose del lado de la seguridad para casi la totalidad de los casos, tanto para los soportes sometidos a flexo-compresión recta como esviada con excentricidades y ángulos de esviaje desiguales en los extremos;
- La utilización de la nueva expresión propuesta mejora de manera significativa la seguridad en la aplicación de los métodos simplificados propuestos por las distintas normativas comparando con los resultados obtenidos utilizando la expresión propuesta por Austin (1961) [7], principalmente para los casos de soportes con esbelteces bajas y medianas ($\lambda_g \leq 20$), fabricados con hormigón de alta resistencia ($f_c \geq 50$ MPa) y para valores del producto $v \cdot \lambda_g^2$ menores que 100;
- La propuesta realizada es de fácil aplicación, por depender de parámetros conocidos en la etapa del diseño de soportes, y es aplicable tanto para la comprobación como para el diseño de soportes.

8.3. Futuras líneas de investigación

A continuación se indican posibles líneas de trabajos futuros en relación con la investigación desarrollada:

- Llevar a cabo un estudio de soportes esbeltos de hormigón armado con el mismo tipo de solicitaciones abordado en el presente trabajo, pero, bajo cargas sostenidas en el tiempo;
- Plantear un análisis de soportes con secciones transversales distintas a las planteadas en el presente trabajo;
- Elaborar un programa experimental de soportes de alta resistencia con la utilización de hormigón reforzado con fibras de acero para evaluar la mejoría que las fibras aportarían en la disminución del salto de recubrimiento observado en los soportes fabricados con hormigón de alta resistencia, al “coser” las micro fisuras que dan origen al desprendimiento del recubrimiento del hormigón durante el proceso de carga;
- Realizar una campaña experimental con soportes de hormigón armado bajo distintas configuraciones de carga a las realizados en el presente trabajo;

- Plantear un estudio experimental de soportes con secciones compuestas (acero y hormigón) tales como: secciones de acero embebido en hormigón armado (SRC); secciones circulares de acero rellenas de hormigón armado (CFT) y secciones rectangulares de acero rellenas de hormigón armado (RCFT), y bajo las solicitaciones planteadas en la presente tesis doctoral para evaluar el comportamiento de este tipo de elemento estructural;
- Analizar numéricamente la nueva expresión para la obtención del coeficiente de equivalencia C_m propuesta en la presente tesis doctoral para otras secciones transversales y para configuraciones de carga distintas a las planteadas en el presente trabajo.

R. Referencias Bibliográficas

- [1] ACI Committee 318-08: “Building Code Requirements for Reinforced Concrete”, American Concrete Institute, Detroit, 2008.
- [2] ACI Committee 363: “State of the Art Report on High Strength Concrete (ACI363R-92)”, American Concrete Institute, 1992.
- [3] ACI Committee 363: “State of the Art Report on HSC”, ACI Journal, Vol. 81, No. 4, July-August, 1984. pp. 383-411.
- [4] ACI Special Publication SP-13: Symposium on reinforced concrete columns. Detroit: ACI American Concrete Institute, 1966.

- [5] Arenas de Pablo, J. J.: “Cálculo de soportes de hormigón armado en teoría de segundo orden. Ábacos de dimensionamiento”, Editores Técnicos Asociados, S.A., 1980.
- [6] Attarsd, M. M. and Stewart, M. G.: “An Improved Stress Block Model for High Strength Concrete”, Research Report No. 154.10.1997, ISBN 0 7259 10070, The University of Newcastle, Australia 1997, pp.42.
- [7] Austin, W. J.: “Strength and design of metal beam-columns” Journal of the Structural Division, ASCE, V.87, ST4, April 1961, pp 1-34.
- [8] Bae, S. and Bayrak, O.: “Seismic Performance of Full-Scale Reinforced Concrete Columns”. ACI Structural Journal, V.105, n°2, 2008, pp 123-133.
- [9] Barreiro, M. J.: “Proyecto de soportes esbeltos de hormigón armado sometidos a flexo-compresión esviada”. Tesisna D’Espesielitat, Intensificació d’Analisi i Projecte d’Estructures. Departament d’Enginyeria de la Construcció. Universitat Politècnica de Catalunya. Junio de 2001.
- [10] Barrera, A.: “Diseño de un modelo experimental para el estudio del comportamiento de la rótula plástica en soportes de hormigón convencional y de alta resistencia”, Trabajo de Investigación, Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España, Enero 2005.
- [11] Baumann, O.: “Die Knickung der Eisenbeton - Säulen”, Laboratorie Fédéral d’Essai des Matériaux, Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich, 1935, pp 56.
- [12] Bonet, J. L.: “Método simplificado de cálculo de soportes esbeltos de hormigón armado de sección rectangular sometidos a compresión y flexión biaxial”, Tesis Doctoral, Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España, Mayo 2001.
- [13] Bonet J.L.; Fernandez M.A.; Romero M.L.; Miguel P.F.: “Capacity of RC rectangular sections subjected to biaxial bending: simplification to an increased uniaxial bending moment”. Magazine of Concrete Research, (ISSN 0024-9831), V. 57, pp 469 – 483, 2005.
- [14] Bonet J. L.; Miguel P. F.; Fernández M. A.; Romero M. L. “Analytical approach to failure surfaces in reinforced concrete sections subjected to axial loads and

- biaxial bending”. *Journal of Structural Engineering-ASCE*, (ISSN 0733-9445), V.130, pp 2006 – 2015, 2004.
- [15] Bonet J. L.; Miguel P. F.; Fernández M. A.; Romero M. L.: “Biaxial bending moment magnifier method”. *Engineering Structures*, (ISSN 0141-0296), pp 2007 – 2019, 2004.
- [16] Bonet J.L.; Romero M.L.; Fernández M.A.; Miguel P.F.: “Design method for slender columns subjected to biaxial bending based on second-order eccentricity”. *Magazine of Concrete Research*, (ISSN 0024-9831), V. 59, pp 3 – 19, 2007.
- [17] Bonet J.L.; Romero M.L.; Miguel P.F.: “Effective flexural stiffness of slender reinforced concrete columns under axial forces and biaxial bending”. *Engineering Structures*, (ISSN 0141-0296), V.33, pp 881 – 893, 2011
- [18] Bradford, M. A.: “Shrinkage and creep response of slender reinforced concrete columns under gradient, theory and test results”, *Magazine of Concrete Research*, 57, N°4, May 2005, pp 235-246.
- [19] Campus, F. and Massonnet, C.: “Research on the buckling of I-columns in A37 steel obliquely loaded”, *Bulletin N°17 IRSIA: Comptes Rendus de Recherches*, Brussels, 1956.
- [20] Chen W.F. and Lui E.M.: “Structural stability. Theory and implementation”, Elsevier Science Publishing Co., 1987.
- [21] Claeson, C. and Gylltoft, K.: “Slender high-strength concrete columns subjected to eccentric loading” *Journal of Structural Engineering ASCE* V.124 N°3 Mar. 1998, pp 233-240.
- [22] Collins, Michael .P.; Mitchel, Denis and Macgregor, James G.: “Structural Design Considerations for High-Strength Concrete” *Concrete International*, May 1993 pp 27-34
- [23] Comisión Permanente del Hormigón: “Instrucción de Hormigón Estructural. EHE-08”, Ministerio de Fomento, 2008.
- [24] Comité Euro-internacional du béton: “Buckling and Instability – Progress Report”, C.E.B. Bulletin N°155, 1983.
- [25] Comité Euro-internacional du béton: “CEB-FIB Model Code 1990”, C.E.B. Bulletin N° 203-215, 1993.

- [26] Comité Euro-internacional du béton: “High Performance Concrete. Recommended extensions to the Model Code 90 research needs”, C.E.B. Bulletin N°228, 1995.
- [27] Comité Euro-internacional du béton: “Manual of buckling and instability”, C.E.B. Bulletin N°123, 1978.
- [28] Duan, L.; Sohal, I.S. and Chen, W.F.: “On beam-column moment amplification factor”, Engineering Journal, AISC, V26; N°4, 1989, pp 130-135.
- [29] European Committee for Standardization: “Eurocode 2: Design of Concrete Structure – Part 1: General Rules and Rules for Buildings”, EN 1992-1-1, December 2004.
- [30] European Committee for Standardization: “Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures – Part 1: General and Common Rules for Buildings”, 2004.
- [31] European Committee for Standardization: “Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 2: Bridges”, EN 1998-2 November 2005.
- [32] Foster, S. J. and Attard, M. M.: “Experimental tests on eccentrically loaded high-strength concrete columns” ACI Structural Journal V.94 N°3, May-June 1997 pp 295-302.
- [33] Foster, S. J.: “Design and Detailing of High Strength Concrete Columns”, UNICIV Report No. R375. ISBN: 85841 342 6. School of Civil and Environmental Engineering, The University of New South Wales, Australia, March-1999.
- [34] Galambos, T. V. and Surovek, A. E.: “Structural Stability of Steel: Concepts and Applications for Structural Engineers”, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey. 2008.
- [35] Galano, L. and Vignoli, A.: “Strength and ductility of HSC and SCC slender columns subjected to short-term eccentric load” ACI Structural Journal, V.105 N°3 May-June 2008 pp 259-269.
- [36] Ho, J. C. M. and Pam, H. J.: “Inelastic design of low-axially loaded high-strength reinforced concrete columns” Engineering Structures, Volume 25, Issue 8, July 2003, Pages 1083-109.

- [37] Ibrahim, Hisham H. H. and MacGregor, James G.: “Modification of the ACI Rectangular Stress Block of High-Strength Concrete”, ACI Structural Journal Vol. 94, No. 1, January 1997, pp. 40-48.
- [38] International federation for structural concrete (fib): "Model Code 2010" fib bulletin nº 55 y 56, 2010.
- [39] Lloyd, N. A. and Rangan, B. V.: “High Strength Concrete Column under Eccentric Compression”, Research Report No. 1/95, School of Civil Engineering, Curtin University of Technology, Perth, Western Australia, 1995.
- [40] MacGregor, J. G. and Barter, S. L.: “Long eccentrically loaded concrete columns bent in double curvature”, Symposium on Reinforced Concrete Columns, SP-13, Paper nº6, Farmington Hills, ACI-1966, pp139-156.
- [41] MacGregor, J. G.; Breen, J. E. and Pfrang, E. O.: “Design of slender concrete columns”, A.C.I. Structural Journal, V.67, N° 1, 1970, pp 6-28.
- [42] Marí, A.R.: “Contribuciones de los métodos numéricos al proyecto de estructuras de hormigón armado y pretensado”. V Congreso Métodos Numéricos en Ingeniería. Madrid, Mayo de 2002.
- [43] Marí, A. R.: “Nonlinear geometric, material and time dependent analysis of three dimensional reinforced and prestressed concrete frames” Report N° USB/SESM-84/12, Department of Civil Engineering, University of California, Berkley, California, USA, June 1984.
- [44] Martin, I. and Olivieri, E.: “Test of slender reinforced concrete columns bent in double curvature”, Symposium on Reinforced Concrete Columns, SP-13, Paper nº5, Farmington Hills, ACI-1966, pp121-138.
- [45] Mehmel, A.; Schwarz, H.; Kasperek, K. H.; Makovi, J.: “Tragverhalten ausmittig beanspruchter Stahlbetondruckglieder”, In: Bulletin No. 24, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Berlin, 1969.
- [46] Nemecek, J. and Bittnar, Z.: “Experimental Investigation and Numerical Simulation of post-peak behavior and size effects of reinforced concrete columns” Materials and Structures, V. 37, N° 4, Apr 2004, pp 161-169.
- [47] Pallarés, L.: “Estudio experimental de soportes esbeltos de hormigón de alta resistencia sometidos a esfuerzos combinados de compresión y flexión biaxial”, Tesis Doctoral, Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de

Ingeniería Civil, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España, Marzo 2006.

- [48] Pallarés, L.; Bonet, J.L.; Fernandez, M.A.; Miguel, P.F.: “ C_m factor for non-uniform moment diagram in RC columns”, *Engineering structures*, V.31, July 2009, pp 1589-1599.
- [49] Pallarés, L.; Bonet, J.L.; Fernandez, M.A.; Miguel, P.F.: “Experimental research on high strength concrete slender columns subjected to compression and biaxial bending forces”, *Engineering structures*, V. 30, Issue 7, July 2008, pp 1879-1894.
- [50] Pallarés, L.; Bonet, J.L.; Miguel, P.F.; Fernandez, M.A.: “The influence of the weak axis on the behavior of high strength RC slender columns subjected to biaxial bending” *Engineering Structures*, Volume 31, Issue 2, February 2009, Pages 487-497.
- [51] Popovics, S., “A Numerical Approach to the Complete Stress-Strain Curve of Concrete”, *Cement and Concrete Research*, V. 3, No 5, May 1973, pp 583-599.
- [52] Rangan, B. V. “High-Performance High Strength Concrete: Design Recommendations”, *Concrete International*, Vol. 20, No. 11, November 1998, pp. 63-68.
- [53] Rangan, B. V. “Studies on High-Performance High-Strength Concrete (HPHSC) Columns”, SP 186-44 ACI/CANMET International Conference, Gramado, Brazil, June 1-4, 1999, pp 745-764.
- [54] Robinson, J. R.; Fouré, B.; Bourghli, A.Y.: “Le flambement des poteaux en béton armé chargés avec des excentricités différentes a leurs extrémités”, *Annales de l’Institut Technique du Bâtiments et des Travaux Publics (Paris)*, Serie: Beton n° 150, Supplément au N°333, Novembre 1975, pp 46-74.
- [55] Robinson, J. R.; Fouré, B.; Sahébdjem, A.: “Flambement des poteaux carrés en béton armé chargés hors d’un plan de symétrie”, *Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics*, Supplément au N°327, Avril 1975, pp 44.
- [56] Robinson, J. R.; Modjabi, S.S.: “La prévision des charges de flambement des poteaux en béton arme par la méthode de M.P. Faessel”, *Annales de l’Institut Technique de Bâtiment et des Travaux Publics (Paris)*, V.21, N°249, Sept 1968, pp 1295-1316.

- [57] Sarker, P. K.: “Study of high strength concrete columns”, PHD Thesis, School of Engineering, Department of Civil Engineering, Curtin University of Technology, Australia, October 2001.
- [58] Sarker, P. K.; Rangan, B. V.: “Reinforced concrete columns under unequal load eccentricities”, A.C.I. Structural Journal, V.100, N°4, July-August 2003, pp 519-528.
- [59] Sheikh, S. A.; Shah, D. V.; Khoury, S. S.: “Confinement of High-Strength Concrete Columns” ACI Structural Journal, V.91, N°1, 1994 pp 100-111.
- [60] Specification for Design Fabrication and Erection of Structural Steel for Buildings, American Institute of Steel Construction, New York, 1963, pp 97.
- [61] Tikka, T. K.; Mirza, S. A.: “Equivalent uniform moment diagram factor for reinforced concrete columns”, A.C.I. Structural Journal, V.101, N° 4, July-August 2004, pp 521-531.
- [62] Tikka, T. K.; Mirza, S. A.: “Equivalent uniform moment diagram factor for composite columns in minor axis bending”, A.C.I. Structural Journal, V.102, N° 1, January-February 2005, pp 120-130.
- [63] Tikka, T. K.; Mirza, S. A.: “Equivalent uniform moment diagram factor for composite columns in major axis bending”, Journal of Structural Engineering, V.131, N° 4, April 1, 2005, pp 569-581.
- [64] Trahair, N. S.: “Design strength of steel beam-column”, Structural Engineering Report N°132, Department of Civil Engineering, University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada, 1985.
- [65] UNE 83316: “Ensayos de hormigón – Determinación del módulo de elasticidad en compresión”. Asociación española de normalización y certificación, AENOR. Diciembre, 2000.
- [66] UNE-EN 10002-1. “Materiales Metálicos. Ensayos de tracción. Parte 1: Método de ensayo a temperatura ambiente”. Asociación española de normalización y certificación, AENOR. Julio 2002.
- [67] UNE-EN 12390-1: “Ensayos de hormigón endurecido – Parte 1: Forma, medidas y otras características de las probetas y moldes”. Asociación española de normalización y certificación, AENOR. Diciembre, 2000.

- [68] UNE-EN 12390-2: “Ensayos de hormigón endurecido – Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia”. Asociación española de normalización y certificación, AENOR. Diciembre, 2000.
- [69] UNE-EN 12390-3: “Ensayos de hormigón endurecido – Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas”. Asociación española de normalización y certificación, AENOR. Diciembre, 2000.
- [70] UNE-EN 197-1:2000: “Cemento – Parte 1: Composición, especificación y criterio de conformidad para cementos comunes”. Asociación española de normalización y certificación, AENOR. Diciembre, 2000.
- [71] Yazzar, S. A.: “Estudio de la ductilidad de elementos comprimidos con hormigón de alta resistencia sometidos a cargas cíclicas de flexión”, Tesis Doctoral, Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España, Enero 2000.

Anejo A.

Ficha técnica de los ensayos

En este anejo se presentan las fichas técnicas de cada uno de los ensayos de de todas las series del programa experimental, en donde se presentan las características de cada uno de los ensayos, las fechas de hormigonado y rotura de los soportes, la dosificación empleada en la fabricación del hormigón, las fotos de cada ensayo y las observaciones más importantes obtenidas durante la realización de los ensayos.

ESTUDIO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN ARMADO SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVIAJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S01	Serie	A1	Hormigonado	24/09/2008
Identificación	A1_α0_β3_εh1_λ30_fc90_ρ1	Tipo de flexión	Recta	Rotura	22/10/2008

	CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO			
	f_c (MPa)	91.4	e₁ (m)	-0.005
	ρ (%)	2.26	e₂ (m)	0.010
	α₁ (°)	0	β (e₁/e₂)	-0.5
	α₂ (°)	0	Esbeltez (λ_g)	30
	h (m)	0.10	r_{mec} (mm)	19
	b (m)	0.20	Arm. Longitudinal	4φ12
	e₂/h	0.1	Arm. Transversal	φ4c/15cm
	CARGA APLICADA			
	N_{max} (kN)	616.9		
N_n (kN)	596.7			
ACERO - ARM. LONGITUDINAL				
f_y (MPa)	538.1			
f_{max} (MPa)	640.3			
E_s (MPa)	209377			

DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
570	180	705	890	50	5.8	11.8

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 1.35 metros desde el extremo inferior del soporte;
- La rotura fue frágil con una pequeña rama de descenso observada;
- Se observó un gran salto de recubrimiento en la cara de compresión alrededor de la sección de rotura.

FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN ARMADO SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVAIAJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S02	Serie	A1	Hormigonado	26/09/2008
Identificación	A1_α0_β3_εh2_λ30_fc90_ρ1	Tipo de flexión	Recta	Rotura	24/10/2008

	CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO			
	f_c (MPa)	86.4	e₁ (m)	-0.010
ρ (%)	2.26	e₂ (m)	0.020	
α₁ (°)	0	β (e₁/e₂)	-0.5	
α₂ (°)	0	Esbeltez (λ_g)	30	
h (m)	0.10	r_{mec} (mm)	19	
b (m)	0.20	Arm. Longitudinal	4φ12	
e₂/h	0.2	Arm. Transversal	φ4c/15cm	
CARGA APLICADA				
N_{max} (kN)		591.6		
N_u (kN)		574.9		
ACERO - ARM. LONGITUDINAL				
f_y (MPa)		538.1		
f_{max} (MPa)		640.3		
E_s (MPa)		209377		

DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
570	180	705	890	50	5.8	11.8

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 1.35 metros desde el extremo inferior del soporte;
- La rotura fue frágil con una pequeña rama de descenso observada;
- Se observó un gran salto de recubrimiento en la cara de compresión alrededor de la sección de rotura.

FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN ARMADO SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVAIAJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S03	Serie	A1	Hormigonado	30/09/2008
Identificación	A1_a0_β3_εh3_λ30_fc90_p1	Tipo de flexión	Recta	Rotura	28/10/2008

	CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO			
	f_c (MPa)	85.1	e₁ (m)	-0.020
ρ (%)	2.26	e₂ (m)	0.040	
α₁ (°)	0	β (e₁/e₂)	-0.5	
α₂ (°)	0	Esbeltez (λ_g)	30	
h (m)	0.10	r_{mec} (mm)	19	
b (m)	0.20	Arm. Longitudinal	4Φ12	
e₂/h	0.4	Arm. Transversal	Φ4c/15cm	
CARGA APLICADA				
N_{max} (kN)		287.7		
N_{ti} (kN)		130.2		
ACERO - ARM. LONGITUDINAL				
f_v (MPa)		538.1		
f_{max} (MPa)		640.3		
E_s (MPa)		209377		

DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
570	180	705	890	50	5.8	11.8

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 1.20 metros desde el extremo inferior del soporte;
- Se evidenció una gran rama de descenso en el comportamiento pos-pico del soporte;
- Se observó un salto de recubrimiento en la cara de compresión alrededor de la sección de rotura.

FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN ARMADO SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVIAJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

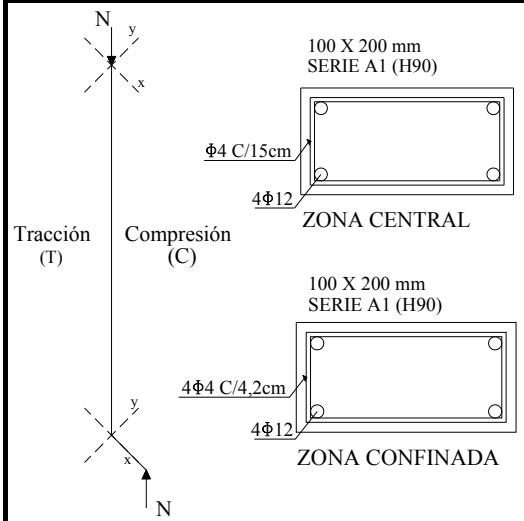
FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S04	Serie	A1	Hormigonado	02/10/2008
Identificación	A1_α0_β2_εh1_λ30_fc90_ρ1	Tipo de flexión	Recta	Rotura	30/10/2008

CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO			
f_c (MPa)	86.8	e₁ (m)	0
ρ (%)	2.26	e₂ (m)	0.010
α₁ (°)	0	β (e₁/e₂)	0
α₂ (°)	0	Esbeltez (λ_g)	30
h (m)	0.10	r_{mec} (mm)	19
b (m)	0.20	Arm. Longitudinal	4φ12
e₂/h	0.1	Arm. Transversal	φ4c/15cm

CARGA APLICADA	
N_{max} (kN)	497.2
N_u (kN)	485.8

ACERO - ARM. LONGITUDINAL	
f_y (MPa)	538.1
f_{max} (MPa)	640.3
E_s (MPa)	209377



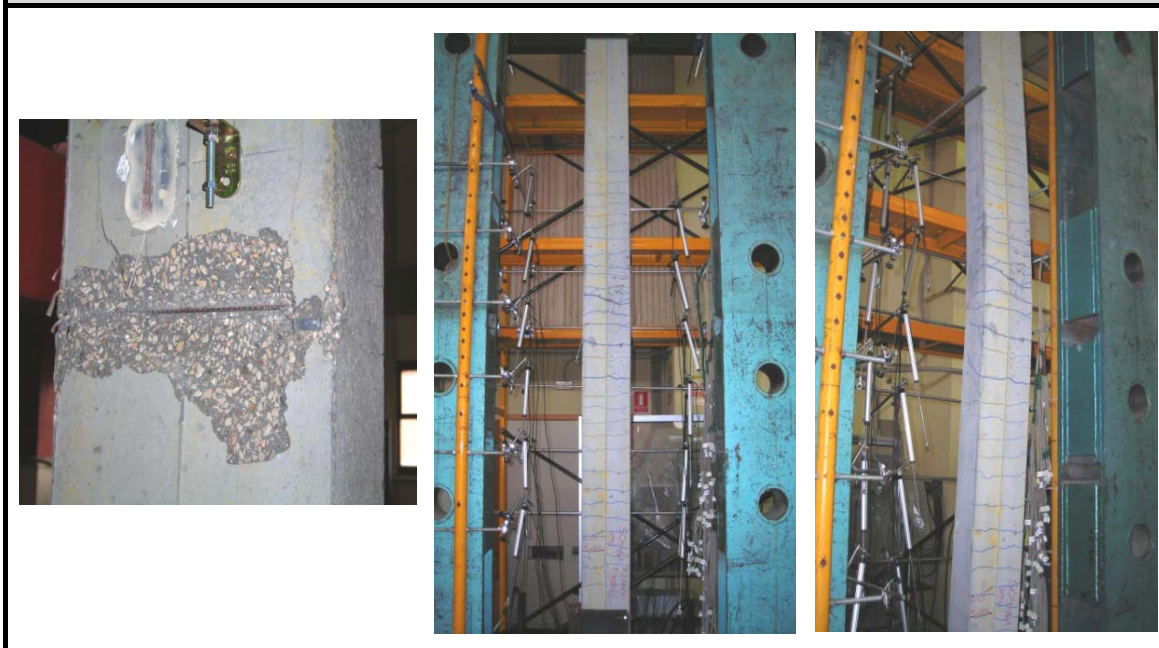
DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
570	180	705	890	50	5.8	11.8

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 1.45 metros desde el extremo inferior del soporte;
- No se notó un importante salto de recubrimiento;
- Poco después de alcanzar la carga máxima (a 485.8 kN) el soporte perdió rigidez con la apertura de grandes fisuras en la cara de tracción y la carga bajó de golpe a los 230 kN. A partir de ahí el soporte mantuvo la rama de descenso hasta los 148.5 kN cuando se produjo la rotura en la cara de compresión.

FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN ARMADO SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVAIAJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S05	Serie	A1	Hormigonado	07/10/2008
Identificación	A1_α0_β2_εh1_λ20_fc90_ρ1	Tipo de flexión	Recta	Rotura	04/11/2008

	CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO			
	f_c (MPa)	90.4	e₁ (m)	0
ρ (%)	2.26	e₂ (m)	0.015	
α₁ (°)	0	β (e₁/e₂)	0	
α₂ (°)	0	Esbeltez (λ_g)	20	
h (m)	0.15	r_{mec} (mm)	28	
b (m)	0.20	Arm. Longitudinal	6φ12	
e₂/h	0.1	Arm. Transversal	φ4c/15cm	
CARGA APLICADA				
N_{max} (kN)		1382.6		
N_u (kN)		1329.5		
ACERO - ARM. LONGITUDINAL				
f_v (MPa)		530.1		
f_{max} (MPa)		637.4		
E_s (MPa)		206029		

DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
570	180	705	890	50	5.8	11.8

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 1.35 metros desde el extremo inferior del soporte;
- Rotura muy frágil. La sección de rotura se quedó destrozada en todas las caras del soporte, con salto de recubrimiento en las caras de tracción y compresión;
- La tres armaduras de compresión pandearon en la sección de rotura entre los estribos;
- Los estribos que delimitaban la sección de rotura se rompieron.

FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN ARMADO SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVIAJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S06	Serie	A1	Hormigonado	14/10/2008
Identificación	A1_α0_β2_λ20_fc90_ρ1	Tipo de flexión	Recta	Rotura	11/11/2008

	CARGA APLICADA			
	f_c (MPa)	87.0	e₁ (m)	0
ρ (%)	2.26	e₂ (m)	0.030	
α₁ (°)	0	β (e₁/e₂)	0	
α₂ (°)	0	Esbeltez (λ_g)	20	
h (m)	0.15	r_{mec} (mm)	28	
b (m)	0.20	Arm. Longitudinal	6φ12	
e₂/h	0.2	Arm. Transversal	φ4c/15cm	

CARGA APLICADA

N_{max} (kN)	1031.2
N_u (kN)	957.9

ACERO - ARM. LONGITUDINAL

f_y (MPa)	530.1
f_{max} (MPa)	637.4
E_s (MPa)	206029

DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
570	180	705	890	50	5.8	11.8

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 1.20 metros desde el extremo inferior del soporte;
- Rotura muy frágil. La sección de rotura se quedó destrozada en todas las caras del soporte, con salto de recubrimiento en las caras de tracción y compresión;
- La tres armaduras de compresión pandearon en la sección de rotura entre los estribos;
- Los estribos que delimitaban la sección de rotura se rompieron.

FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN ARMADO SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVAIAJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S07	Serie	A1	Hormigonado	16/10/2008
Identificación	A1_a0_β2_eh2_λ30_fc90_p1	Tipo de flexión	Recta	Rotura	13/11/2008

	CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO			
	f_c (MPa)	88.5	e₁ (m)	0
ρ (%)	2.26	e₂ (m)	0.020	
α₁ (°)	0	β (e₁/e₂)	0	
α₂ (°)	0	Esbeltez (λ_g)	30	
h (m)	0.10	r_{mec} (mm)	19	
b (m)	0.20	Arm. Longitudinal	4φ12	
e₂/h	0.2	Arm. Transversal	φ4c/15cm	
CARGA APLICADA				
N_{max} (kN)		374.7		
N_i (kN)		126.3		
ACERO - ARM. LONGITUDINAL				
f_v (MPa)		538.1		
f_{max} (MPa)		640.3		
E_s (MPa)		209377		

DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
570	180	705	890	50	5.8	11.8

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 1.35 metros desde el extremo inferior del soporte;
- Se observó una gran rama de descenso con la carga bajando a la mitad de la carga máxima alcanzada;
- Gran deformada con flechas de cerca de 11 cm en la sección central (1.50 metros) en rotura;
- En la cara de tracción las fisuras principales delimitaron la sección de rotura tal y como se observa en las fotos registradas.

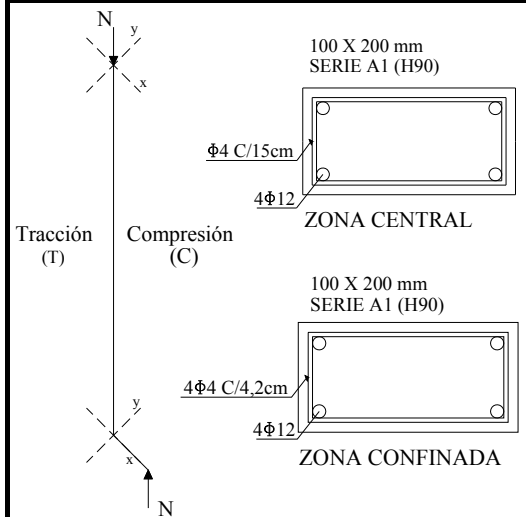
FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN ARMADO SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVAIAJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S08	Serie	A1	Hormigonado	24/10/2008
Identificación	A1_α0_β2_εh3_λ30_fc90_ρ1	Tipo de flexión	Recta	Rotura	21/11/2008



CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO

f_c (MPa)	90.5	e₁ (m)	0
ρ (%)	2.26	e₂ (m)	0.040
α₁ (°)	0	β (e₁/e₂)	0
α₂ (°)	0	Esbeltez (λ_g)	30
h (m)	0.10	r_{mec} (mm)	19
b (m)	0.20	Arm. Longitudinal	4Φ12
e₂/h	0.4	Arm. Transversal	Φ4c/15cm

CARGA APLICADA

N_{max} (kN)	210.1
N_u (kN)	85.8

ACERO - ARM. LONGITUDINAL

f_y (MPa)	538.1
f_{max} (MPa)	640.3
E_s (MPa)	209377

DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
570	180	705	890	50	5.8	11.8

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 1.35 metros desde el extremo inferior del soporte;
- Se observó una gran rama de descenso con la carga bajando a la mitad de la carga máxima alcanzada;
- En rotura se produjo un salto de recubrimiento en la sección de rotura de la cara de compresión;
- Gran deformada con flechas de cerca de 13.5 cm en la sección central (1.50 metros) en rotura;
- Fisuras distribuidas en la cara de tracción a lo largo de todo el soporte.

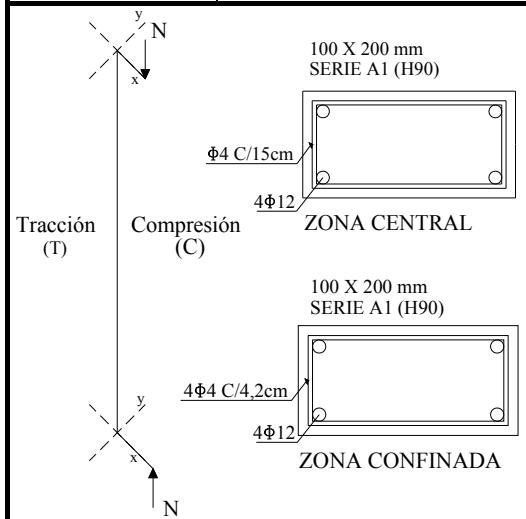
FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN ARMADO SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVIAJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S09	Serie	A1	Hormigonado	31/10/2008
Identificación	A1_α0_β1_εh2_λ30_fc90_ρ1	Tipo de flexión	Recta	Rotura	28/11/2008



CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO

f_c (MPa)	88.3	e₁ (m)	0.010
ρ (%)	2.26	e₂ (m)	0.020
α₁ (°)	0	β (e₁/e₂)	0
α₂ (°)	0	Esbeltez (λ_g)	30
h (m)	0.10	r_{mec} (mm)	19
b (m)	0.20	Arm. Longitudinal	4φ12
e₂/h	0.2	Arm. Transversal	φ4c/15cm

CARGA APLICADA

N_{max} (kN)	281.0
N_u (kN)	100.3

ACERO - ARM. LONGITUDINAL

f_v (MPa)	538.1
f_{max} (MPa)	640.3
E_s (MPa)	209377

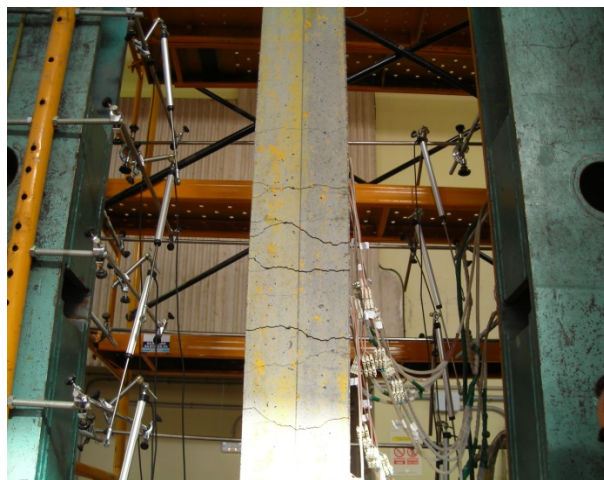
DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
570	180	705	890	50	5.8	11.8

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo en la sección central (1.50 metros desde el extremo inferior);
- Se observó una gran rama de descenso con la carga bajando a la mitad de la carga máxima alcanzada;
- No se observó salto de recubrimiento en la cara de compresión;
- Gran deformada con flechas de cerca de 13 cm en la sección central (1.50 metros) en rotura;
- Las barras en la sección central de la cara de compresión llegaron a presentar un comportamiento de tracción en la rama de descenso debido a la grande deformada alcanzado por la pieza (ver gráficas en el eje B).

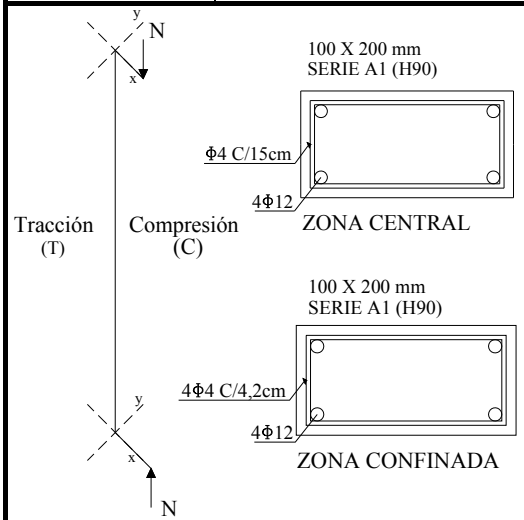
FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN ARMADO SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVAIAJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S10	Serie	A1	Hormigonado	04/11/2008
Identificación	A1_α0_β1_εh3_λ30_fc90_ρ1	Tipo de flexión	Recta	Rotura	02/12/2008



CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO

f_c (MPa)	87.9	e₁ (m)	0.020
ρ (%)	2.26	e₂ (m)	0.040
α₁ (°)	0	β (e₁/e₂)	0.5
α₂ (°)	0	Esbeltez (λ_g)	30
h (m)	0.10	r_{mec} (mm)	19
b (m)	0.20	Arm. Longitudinal	4φ12
e₂/h	0.4	Arm. Transversal	φ4c/15cm

CARGA APLICADA

N_{max} (kN)	162.8
N_u (kN)	81.6

ACERO - ARM. LONGITUDINAL

f_y (MPa)	538.1
f_{max} (MPa)	640.3
E_s (MPa)	209377

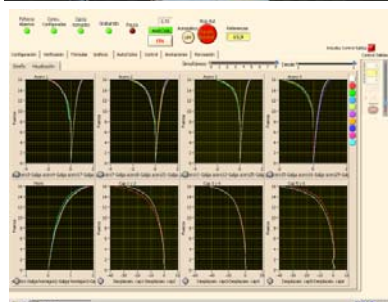
DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
570	180	705	890	50	5.8	11.8

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 1.35 metros desde el extremo inferior del soporte;
- Se observó una gran rama de descenso con la carga bajando a la mitad de la carga máxima alcanzada;
- Pequeño salto de recubrimiento en la cara de compresión;
- Gran deformada con flechas de cerca de 13.2 cm en la sección central (1.50 metros) en rotura;
- A bajo niveles de carga todas las bandas extensométricas registraban que las barras en la cara de tracción ya estaban traccionadas (ver gráficas en el ejejo B).

FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN ARMADO SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVAIAJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S11	Serie	A1	Hormigonado	07/11/2008
Identificación	A1_a0_β1_εh2_λ20_fc90_p1	Tipo de flexión	Recta	Rotura	05/12/2008

<p style="font-size: small;">150 X 200 mm SERIE A1 (H90)</p> <p style="font-size: small;">φ4 C/15cm</p> <p style="font-size: small;">6φ12</p> <p style="text-align: center;">ZONA CENTRAL</p> <p style="font-size: small;">150 X 200 mm SERIE A1 (H90)</p> <p style="font-size: small;">4φ4 C/4,2cm</p> <p style="font-size: small;">6φ12</p> <p style="text-align: center;">ZONA CONFINADA</p>	CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO			
	f_c (MPa)	88.6	e₁ (m)	0.015
ρ (%)	2.26	e₂ (m)	0.030	
α₁ (°)	0	β (e₁/e₂)	0.5	
α₂ (°)	0	Esbeltez (λ_g)	30	
h (m)	0.15	r_{mec} (mm)	28	
b (m)	0.20	Arm. Longitudinal	6φ12	
e₂/h	0.2	Arm. Transversal	φ4c/15cm	
CARGA APLICADA				
N_{max} (kN)		851.0		
N_{ti} (kN)		774.5		
ACERO - ARM. LONGITUDINAL				
f_v (MPa)		530.1		
f_{max} (MPa)		637.4		
E_s (MPa)		206029		

DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
570	180	705	890	50	5.8	11.8

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 1.35 metros desde el extremo inferior del soporte;
- Rotura frágil. Gran salto de recubrimiento en la cara de compresión;
- Se observó el pandeo de las tres armaduras en la cara de compresión entre estribos en la sección de rotura;
- Las barras en la cara de tracción llegaron a plastificar antes de la rotura.

FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN ARMADO SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVIAJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S12	Serie	A1	Hormigonado	11/11/2008
Identificación	A1_α0_β1_εh3_λ20_fc90_ρ1	Tipo de flexión	Recta	Rotura	09/12/2008

	CARGA APLICADA			
	f_c (MPa)	88.2	e_1 (m)	0.030
	ρ (%)	2.26	e_2 (m)	0.060
	α_1 (°)	0	β (e_1/e_2)	0.5
	α_2 (°)	0	Esbeltez (λ_g)	30
	h (m)	0.15	r_{mec} (cm)	2.8
	b (m)	0.20	Arm. Longitudinal	6 ϕ 12
	e_2/h	0.4	Arm. Transversal	ϕ 4c/15cm
CARGA APLICADA				
N_{max} (kN)		487.9		
N_u (kN)		375.8		
ACERO - ARM. LONGITUDINAL				
f_y (MPa)		530.1		
f_{max} (MPa)		637.4		
E_s (MPa)		206029		

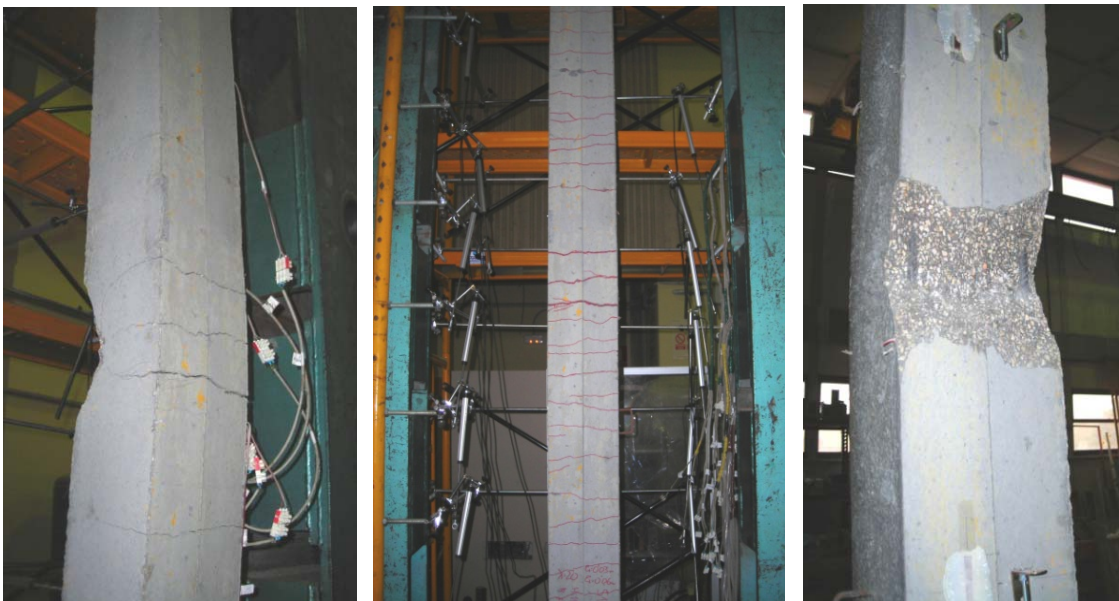
DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
570	180	705	890	50	5.8	11.8

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 1.20 metros desde el extremo inferior del soporte;
- Se observó un pequeño salto del recubrimiento en la cara de compresión;
- No se observó el pandeo de las armaduras en compresión;
- Las barras en la cara de compresión llegaron a plastificar antes de la rotura;
- Se alcanzó una flecha de cerca de 7 cm en la sección central en rotura (1.50 metros).

FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN ARMADO SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVAIAJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

SopORTE	S01	Serie	A2	Hormigonado	04/06/2008
Identificación	A2_α0_β2_εh1_λ30_fc30_p1	Tipo de flexión	Recta	Rotura	02/07/2008

<p style="text-align: center;">100 X 200 mm SERIE A2 (H30)</p> <p style="text-align: center;">Φ4 C/15cm 4Φ12 ZONA CENTRAL</p> <p style="text-align: center;">100 X 200 mm SERIE A2 (H30)</p> <p style="text-align: center;">4Φ4 C/4.2cm 4Φ12 ZONA CONFINADA</p>	CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO			
	f_c (MPa)	30.1	e₁ (m)	0
ρ (%)	2.26	e₂ (m)	0.010	
α₁ (°)	0	β (e₁/e₂)	0	
α₂ (°)	0	Esbeltez (λ_g)	30	
h (m)	0.10	r_{mec} (cm)	1.9	
b (m)	0.20	Arm. Longitudinal	4Φ12	
e₂/h	0.1	Arm. Transversal	Φ4c/15cm	
CARGA APLICADA				
N_{max} (kN)		334.3		
N_u (kN)		130.6		
ACERO - ARM. LONGITUDINAL				
f_v (MPa)		538.1		
f_{max} (MPa)		640.3		
E_s (MPa)		209377		

DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
348	220	1065	666	-	-	-

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo en la sección central del soporte a 1.50 metros desde el extremo inferior;
- No se observó salto de recubrimiento;
- En la rama pos-pico se mantuvo la carga observándose una gran rama de descenso;
- Flecha de cerca de 8.2 cm en la sección central (1.50 metros) en rotura;
- Fisuras distribuidas en la cara de tracción a lo largo de todo el soporte.

FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN ARMADO SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVIAJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S02	Serie	A2	Hormigonado	05/06/2008
Identificación	A2_α0_β2_εh_λ30_fc30_ρ1	Tipo de flexión	Recta	Rotura	03/07/2008

CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO

f_c (MPa)	28.4	e₁ (m)	0
ρ (%)	2.26	e₂ (m)	0.020
α₁ (°)	0	β (e₁/e₂)	0
α₂ (°)	0	Esbeltez (λ_g)	30
h (m)	0.10	r_{mec} (cm)	1.9
b (m)	0.20	Arm. Longitudinal	4φ12
e₂/h	0.2	Arm. Transversal	φ4c/15cm

CARGA APLICADA

N_{max} (kN)	265.8
N_u (kN)	150.5

ACERO - ARM. LONGITUDINAL

f_y (MPa)	538.1
f_{max} (MPa)	640.3
E_s (MPa)	209377

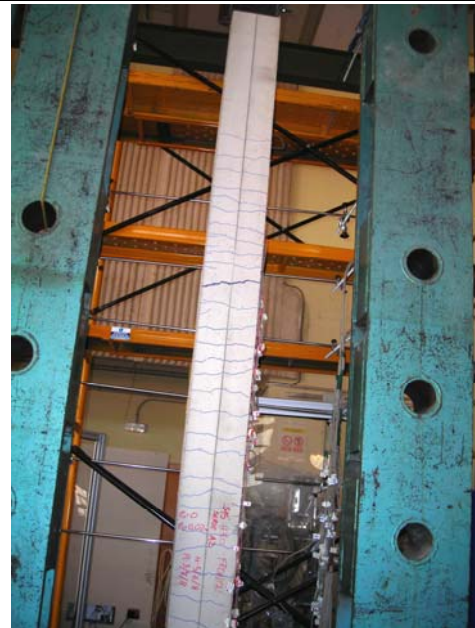
DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
348	220	1065	666	-	-	-

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo en la sección central del soporte a 1.50 metros desde el extremo inferior;
- No se observó salto de recubrimiento;
- En la rama pos-pico se mantuvo la carga observándose una gran rama de descenso;
- Flecha de cerca de 7.6 cm en la sección central (1.50 metros) en rotura;
- Fisuras distribuidas en la cara de tracción a lo largo de todo el soporte.

FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN ARMADO SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVIAJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S03	Serie	A2	Hormigonado	06/06/2008
Identificación	A2_α0_β2_εh3_λ30_fc30_p1	Tipo de flexión	Recta	Rotura	04/07/2008

<p style="text-align: center;">100 X 200 mm SERIE A2 (H30)</p> <p style="text-align: center;">φ4 C/15cm 4φ12 ZONA CENTRAL</p> <p style="text-align: center;">100 X 200 mm SERIE A2 (H30)</p> <p style="text-align: center;">4φ4 C/4,2cm 4φ12 ZONA CONFINADA</p> <p style="text-align: center;">Tracción (T) Compresión (C)</p>	CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO			
	f_c (MPa)	30.0	e₁ (m)	0
	ρ (%)	2.26	e₂ (m)	0.040
	α₁ (°)	0	β (e₁/e₂)	0
	α₂ (°)	0	Esbeltez (λ_g)	30
	h (m)	0.10	r_{mec} (cm)	1.9
	b (m)	0.20	Arm. Longitudinal	4φ12
	e₂/h	0.4	Arm. Transversal	φ4c/15cm
	CARGA APLICADA			
	N_{max} (kN)		168.3	
N_{ti} (kN)		88.5		
ACERO - ARM. LONGITUDINAL				
f_v (MPa)		538.1		
f_{max} (MPa)		640.3		
E_s (MPa)		209377		

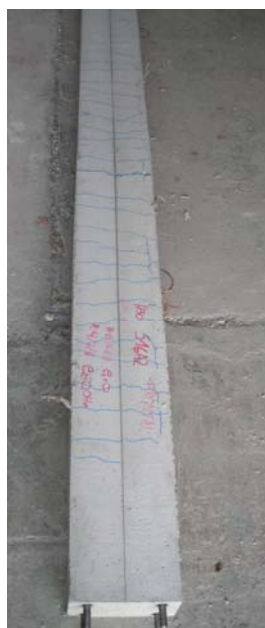
DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
348	220	1065	666	-	-	-

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo en la sección central del soporte a 1.50 metros desde el extremo inferior;
- No se observó salto de recubrimiento;
- En la rama pos-pico se mantuvo la carga observándose una gran rama de descenso hasta la rotura;
- Flecha en rotura de cerca de 9.3 cm en la sección ubicada a 1.20 metros del extremo inferior del soporte;
- Fisuras distribuidas en la cara de tracción a lo largo de todo el soporte.

FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN ARMADO SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVIAJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S04	Serie	A2	Hormigonado	17/06/2008
Identificación	A2_α0_β3_εh1_λ30_fc30_ρ1	Tipo de flexión	Recta	Rotura	15/07/2008

	CARGA APLICADA			
	f_c (MPa)	30.5	e₁ (m)	-0.005
ρ (%)	2.26	e₂ (m)	0.010	
α₁ (°)	0	β (e₁/e₂)	-0.5	
α₂ (°)	0	Esbeltez (λ_g)	30	
h (m)	0.10	r_{mec} (cm)	1.9	
b (m)	0.20	Arm. Longitudinal	4φ12	
e₂/h	0.1	Arm. Transversal	φ4c/15cm	
CARGA APLICADA				
N_{max} (kN)		430.3		
N_u (kN)		403.4		
ACERO - ARM. LONGITUDINAL				
f_y (MPa)		538.1		
f_{max} (MPa)		640.3		
E_s (MPa)		209377		

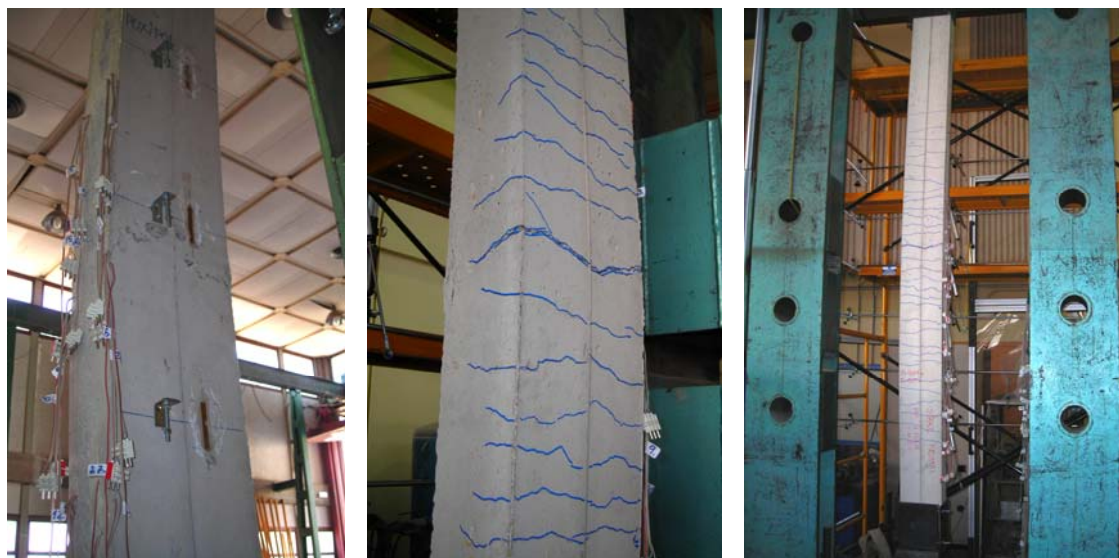
DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
348	220	1065	666	-	-	-

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 1.42 metros desde el extremo inferior del soporte;
- El soporte alcanzó la carga máxima soportada con todas las bandas extensométricas registrando deformaciones de compresión;
- No se observó salto de recubrimiento;
- En la rama pos-pico cuando la carga era de aproximadamente 400 kN la carga bajo rápidamente hasta aproximadamente 220 kN.

FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN ARMADO SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVAIAJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S05	Serie	A2	Hormigonado	18/06/2008
Identificación	A2_α0_β3_εh2_λ30_fc30_ρ1	Tipo de flexión	Recta	Rotura	16/07/2008

<p style="text-align: center;">100 X 200 mm SERIE A2 (H30)</p> <p style="text-align: center;">Φ4 C/15cm 4Φ12 ZONA CENTRAL</p> <p style="text-align: center;">100 X 200 mm SERIE A2 (H30)</p> <p style="text-align: center;">4Φ4 C/4,2cm 4Φ12 ZONA CONFINADA</p>	CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO			
	f_c (MPa)	32.5	e₁ (m)	-0.010
ρ (%)	2.26	e₂ (m)	0.020	
α₁ (°)	0	β (e₁/e₂)	-0.5	
α₂ (°)	0	Esbeltez (λ_g)	30	
h (m)	0.10	r_{mec} (cm)	1.9	
b (m)	0.20	Arm. Longitudinal	4Φ12	
e₂/h	0.2	Arm. Transversal	Φ4c/15cm	
CARGA APLICADA				
N_{max} (kN)		329.7		
N_{ti} (kN)		128.3		
ACERO - ARM. LONGITUDINAL				
f_v (MPa)		538.1		
f_{max} (MPa)		640.3		
E_s (MPa)		209377		

DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
348	220	1065	666	-	-	-

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 1.20 metros desde el extremo inferior del soporte;
- Al alcanzar la carga máxima ninguno de los materiales (acero y hormigón) habían alcanzado su máxima capacidad resistente;
- No se observó salto de recubrimiento;
- Gran rama de descenso en el comportamiento pos-pico;
- El acero en tracción en la sección a 1.20 m del extremo inferior plastificó a aproximadamente 220 kN en la rama pos-pico.

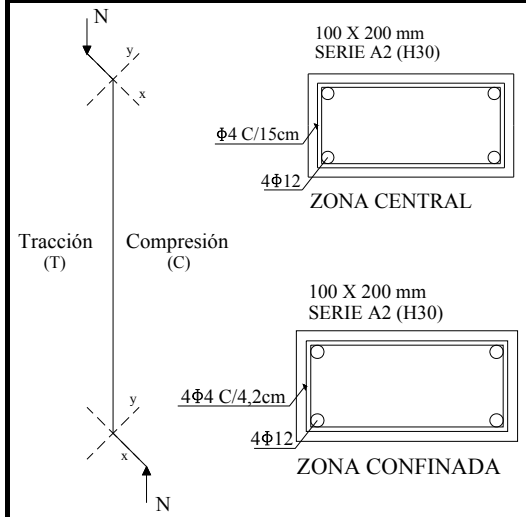
FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN ARMADO SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVIAJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S06	Serie	A2	Hormigonado	19/06/2008
Identificación	A2_α0_β3_εh3_λ30_fc30_ρ1	Tipo de flexión	Recta	Rotura	17/07/2008



CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO			
f_c (MPa)	31.5	e₁ (m)	-0.020
ρ (%)	2.26	e₂ (m)	0.040
α₁ (°)	0	β (e₁/e₂)	-0.5
α₂ (°)	0	Esbeltez (λ_g)	30
h (m)	0.10	r_{mec} (cm)	1,9
b (m)	0.20	Arm. Longitudinal	4φ12
e₂/h	0.4	Arm. Transversal	φ4c/15cm

CARGA APLICADA	
N_{max} (kN)	251.1
N_u (kN)	151.0
ACERO - ARM. LONGITUDINAL	
f_y (MPa)	538.1
f_{max} (MPa)	640.3
E_s (MPa)	209377

DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
348	220	1065	666	-	-	-

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 1.20 metros desde el extremo inferior del soporte;
- Al alcanzar la carga máxima ninguno de los materiales (acero y hormigón) habían alcanzado su máxima capacidad resistente;
- No se observó salto de recubrimiento;
- Gran rama de descenso en el comportamiento pos-pico;
- El acero en tracción en la sección a 1.20 m del extremo inferior plastificó en rotura.

FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN ARMADO SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVAIAJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S07	Serie	A2	Hormigonado	24/06/2008
Identificación	A2_α0_β2_εh1_λ20_fc30_p1	Tipo de flexión	Recta	Rotura	22/07/2008

	CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO			
	f_c (MPa)	32.6	e₁ (m)	0
ρ (%)	2.26	e₂ (m)	0.015	
α₁ (°)	0	β (e₁/e₂)	0	
α₂ (°)	0	Esbeltez (λ_g)	20	
h (m)	0.15	r_{mec} (cm)	2.8	
b (m)	0.20	Arm. Longitudinal	6φ12	
e₂/h	0.1	Arm. Transversal	φ4c/15cm	
CARGA APLICADA				
N_{max} (kN)		751.9		
N_u (kN)		660.2		
ACERO - ARM. LONGITUDINAL				
f_v (MPa)		530.1		
f_{max} (MPa)		637.4		
E_s (MPa)		206029		

DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
348	220	1065	666	-	-	-

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 1.20 metros desde el extremo inferior del soporte;
- El soporte rompió poco después de alcanzar la carga máxima y se observó un salto de recubrimiento debido al pandeo local de la armadura de compresión en la sección de rotura;
- En la rama pos-pico la carga bajó rápidamente hasta la rotura;
- En carga máxima y en la sección central el hormigón presentaba deformaciones de cerca de 2.5‰.

FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN ARMADO SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVIAJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S08	Serie	A2	Hormigonado	25/06/2008
Identificación	A2_α0_β2_εh2_λ20_fc30_ρ1	Tipo de flexión	Recta	Rotura	23/07/2008

	CARGA APLICADA			
	f_c (MPa)	32.2	e₁ (m)	0
ρ (%)	2.26	e₂ (m)	0.030	
α₁ (°)	0	β (e₁/e₂)	0	
α₂ (°)	0	Esbeltez (λ_g)	20	
h (m)	0.15	r_{mec} (cm)	2.8	
b (m)	0.20	Arm. Longitudinal	6Φ12	
e₂/h	0.2	Arm. Transversal	Φ4c/15cm	
CARGA APLICADA				
N_{max} (kN)		615.7		
N_u (kN)		526.3		
ACERO - ARM. LONGITUDINAL				
f_y (MPa)		530.1		
f_{max} (MPa)		637.4		
E_s (MPa)		206029		

DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
348	220	1065	666	-	-	-

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 1.18 metros desde el extremo inferior del soporte;
- El soporte rompió poco después de alcanzar la carga máxima y se observó un salto de recubrimiento debido al pandeo local de la armadura de compresión en la sección de rotura;
- En acero en compresión a 1.20 m del extremo inferior plastificó en rotura;
- En carga máxima y en la sección central el hormigón presentaba deformaciones de cerca de 2.0‰.

FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN ARMADO SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVAIAJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S01	Serie	A3	Hormigonado	17/09/2009
Identificación	A3_α0_β2_εh1_λ30_fc90_ρ2	Tipo de flexión	Recta	Rotura	15/10/2009

	CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO			
	f_c (MPa)	86.5	e₁ (m)	0
ρ (%)	3.39	e₂ (m)	0.010	
α₁ (°)	0	β (e₁/e₂)	0	
α₂ (°)	0	Esbeltez (λ_g)	30	
h (m)	0.10	r_{mec} (cm)	1.9	
b (m)	0.20	Arm. Longitudinal	6φ12	
e₂/h	0.1	Arm. Transversal	φ4c/15cm	
CARGA APLICADA				
N_{max} (kN)		542.6		
N_{ti} (kN)		256.3		
ACERO - ARM. LONGITUDINAL				
f_v (MPa)		538.1		
f_{max} (MPa)		640.3		
E_s (MPa)		209377		

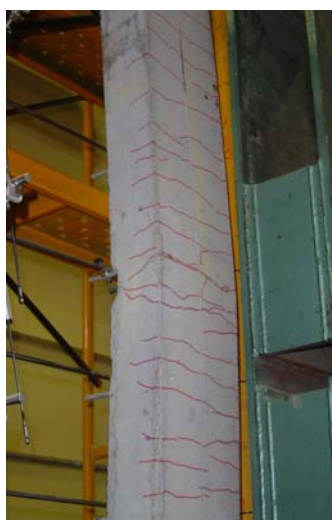
DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
570	180	705	890	50	5.8	11.8

OBSERVACIONES

- En carga máxima todas las bandas extensométricas presentaban comportamiento de compresión y a partir de ahí se cambió la tendencia deformacional de las armaduras de tracción (ver gráficas en el anejo B);
- Se observó un comportamiento pos-pico con una importante rama de descenso;
- Pequeño salto de recubrimiento en rotura;
- Grandes desplazamiento (8.7 cm de flecha en la sección de centro luz) y deformaciones de hasta 4‰ en las armaduras de tracción y en el hormigón comprimido en rotura.

FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN ARMADO SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVIAJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S02	Serie	A3	Hormigonado	29/04/2008
Identificación	A3_α0_β2_εh2_λ30_fc90_p2	Tipo de flexión	Recta	Rotura	27/05/2008

	CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO			
	f_c (MPa)	92.3	e₁ (m)	0
ρ (%)	3.39	e₂ (m)	0.020	
α₁ (°)	0	β (e₁/e₂)	0	
α₂ (°)	0	Esbeltez (λ_g)	30	
h (m)	0.10	r_{mec} (cm)	1.9	
b (m)	0.20	Arm. Longitudinal	6Φ12	
e₂/h	0.2	Arm. Transversal	Φ4c/15cm	
CARGA APLICADA				
N_{max} (kN)		370.3		
N_u (kN)		214.1		
ACERO - ARM. LONGITUDINAL				
f_y (MPa)		538.1		
f_{max} (MPa)		640.3		
E_s (MPa)		209377		

DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
570	180	705	890	50	5.8	11.8

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 1.50 metros desde el extremo inferior del soporte (centro luz);
- Se observó un comportamiento pos-pico con una importante rama de descenso;
- Salto de recubrimiento en la sección de rotura en la cara de compresión;
- Grandes desplazamiento (8.7 cm de flecha en la sección de centro luz) y deformaciones de hasta 5% en las armaduras de tracción y en el hormigón comprimido en rotura.

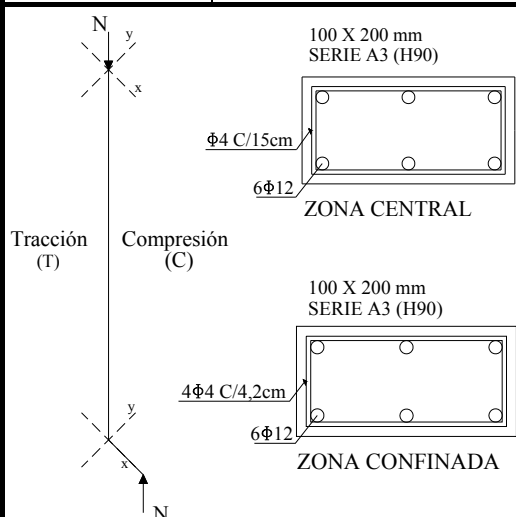
FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVAIJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S03	Serie	A3	Hormigonado	11/04/2008
Identificación	A3_α0_β2_εh3_λ30_fc90_ρ2	Tipo de flexión	Recta	Rotura	09/05/2008



CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO

f_c (MPa)	93.1	e₁ (m)	0
ρ (%)	3.39	e₂ (m)	0.040
α₁ (°)	0	β (e₁/e₂)	0
α₂ (°)	0	Esbeltez (λ_g)	30
h (m)	0.10	r_{mec} (cm)	1.9
b (m)	0.20	Arm. Longitudinal	6Φ12
e₂/h	0.4	Arm. Transversal	Φ4c/15cm

CARGA APLICADA

N_{max} (kN)	258.2
N_u (kN)	184.5

ACERO - ARM. LONGITUDINAL

f_y (MPa)	538.1
f_{max} (MPa)	640.3
E_s (MPa)	209377

DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
570	180	705	890	50	5.8	11.8

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 1.32 metros desde el extremo inferior del soporte;
- Se observó un patamar horizontal cuando el soporte alcanzó la carga máxima, terminando con una pequeña rama de descenso hasta la rotura (ver gráficas en el eje B);
- Salto de recubrimiento en la sección de rotura en la cara de compresión;
- Grandes desplazamiento (8.6 cm de flecha en la sección de centro luz) y deformaciones de hasta 7‰ en las armaduras de tracción y 4.5‰ en el hormigón comprimido en rotura.

FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVAIJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S04	Serie	A3	Hormigonado	22/04/2008
Identificación	A3_α0_β3_εh1_λ30_fc90_p2	Tipo de flexión	Recta	Rotura	20/05/2008

	CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO			
	f_c (MPa)	93.3	e₁ (m)	-0.005
ρ (%)	3.39	e₂ (m)	0.010	
α₁ (°)	0	β (e₁/e₂)	-0.5	
α₂ (°)	0	Esbeltez (λ_g)	30	
h (m)	0.10	r_{mec} (cm)	1.9	
b (m)	0.20	Arm. Longitudinal	6Φ12	
e₂/h	0.1	Arm. Transversal	Φ4c/15cm	
CARGA APLICADA				
N_{max} (kN)		657.3		
N_u (kN)		644.2		
ACERO - ARM. LONGITUDINAL				
f_v (MPa)		538.1		
f_{max} (MPa)		640.3		
E_s (MPa)		209377		

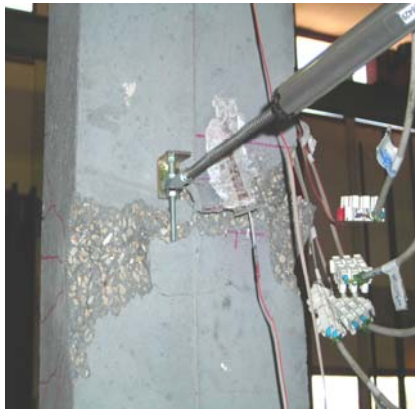
DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
570	180	705	890	50	5.8	11.8

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 1.46 metros desde el extremo inferior del soporte;
- En carga máxima toda la pieza estaba en compresión;
- Salto de recubrimiento en la sección de rotura en la cara de compresión;
- El soporte rompió poco después de alcanzar la carga máxima no presentando rama de descenso en el comportamiento pos-pico.
- El hormigón presentaba deformaciones de cerca de 2‰ en la sección central en rotura.

FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVAIJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S05	Serie	A3	Hormigonado	23/04/2008
Identificación	A3_α0_β3_εh2_λ30_fc90_ρ2	Tipo de flexión	Recta	Rotura	21/05/2008

<p style="text-align: center;">Tracción (T) Compresión (C)</p>	CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO			
	f_c (MPa)	92.5	e₁ (m)	-0.010
	ρ (%)	3.39	e₂ (m)	0.020
	α₁ (°)	0	β (e₁/e₂)	-0.5
	α₂ (°)	0	Esbeltez (λ_g)	30
	h (m)	0.10	r_{mec} (cm)	1.9
	b (m)	0.20	Arm. Longitudinal	6φ12
	e₂/h	0.2	Arm. Transversal	φ4c/15cm
	CARGA APLICADA			
	N_{max} (kN)	453.0		
N_u (kN)	233.5			
ACERO - ARM. LONGITUDINAL				
f_y (MPa)	538.1			
f_{max} (MPa)	640.3			
E_s (MPa)	209377			

DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
570	180	705	890	50	5.8	11.8

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 1.35 metros desde el extremo inferior del soporte;
- Comportamiento pos-pico presentó una importante rama de descenso;
- Salto de recubrimiento en la sección de rotura en la cara de compresión;
- Grandes desplazamiento (8.7 cm de flecha en la sección de centro luz) y deformaciones de hasta 5‰ en las armaduras de tracción y en el hormigón comprimido en rotura.

FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVAIJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

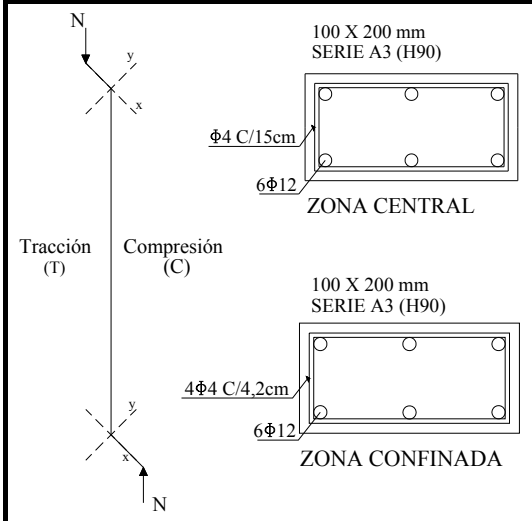
FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S06	Serie	A3	Hormigonado	28/04/2008
Identificación	A3_α0_β3_εh3_λ30_fc90_p2	Tipo de flexión	Recta	Rotura	26/05/2008

CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO			
f_c (MPa)	93.2	e₁ (m)	-0.020
ρ (%)	3.39	e₂ (m)	0.040
α₁ (°)	0	β (e₁/e₂)	-0.5
α₂ (°)	0	Esbeltez (λ_g)	30
h (m)	0.10	r_{mec} (cm)	1.9
b (m)	0.20	Arm. Longitudinal	6φ12
e₂/h	0.4	Arm. Transversal	φ4c/15cm

CARGA APLICADA	
N_{max} (kN)	334.3
N_u (kN)	216.9

ACERO - ARM. LONGITUDINAL	
f_y (MPa)	538.1
f_{max} (MPa)	640.3
E_s (MPa)	209377



DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
570	180	705	890	50	5.8	11.8

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 1.35 metros desde el extremo inferior del soporte;
- Se observó un patamar horizontal cuando el soporte alcanzó la carga máxima, terminando con una pequeña rama de descenso hasta la rotura (ver gráficas en el anexo B);
- Salto de recubrimiento en la sección de rotura en la cara de compresión;
- Deformaciones de hasta 5‰ en las armaduras de tracción y 4.5‰ en el hormigón comprimido en rotura.

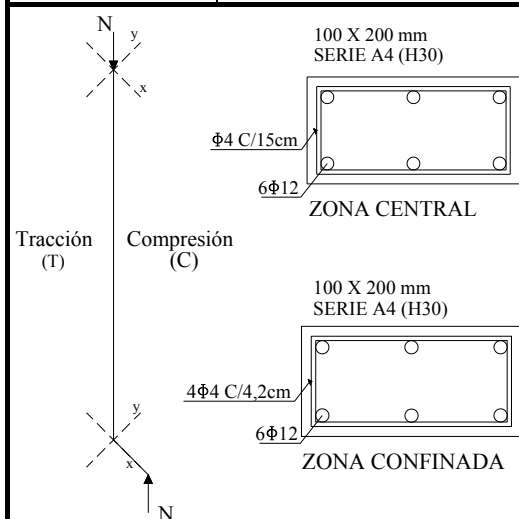
FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVAIJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S01	Serie	A4	Hormigonado	13/05/2008
Identificación	A4_α0_β2_εh1_λ30_fc30_ρ2	Tipo de flexión	Recta	Rotura	10/06/2008



CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO

f_c (MPa)	34.3	e₁ (m)	0
ρ (%)	3.39	e₂ (m)	0.010
α₁ (°)	0	β (e₁/e₂)	0
α₂ (°)	0	Esbeltez (λ_g)	30
h (m)	0.10	r_{mec} (cm)	1.9
b (m)	0.20	Arm. Longitudinal	6φ12
e₂/h	0.1	Arm. Transversal	φ4c/15cm

CARGA APLICADA

N_{max} (kN)	382.6
N_u (kN)	145.9

ACERO - ARM. LONGITUDINAL

f_y (MPa)	538.1
f_{max} (MPa)	640.3
E_s (MPa)	209377

DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
348	220	1065	666	-	-	-

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 1.18 metros desde el extremo inferior del soporte;
- En el comportamiento pos-pico se observó una importante rama de descenso con una gran caída de carga;
- Grandes desplazamiento (9.1 cm de flecha en la sección de centro luz) y deformaciones de hasta 5% en las armaduras de tracción y en el hormigón comprimido en rotura.

FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVAIAJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S02	Serie	A4	Hormigonado	15/05/2008
Identificación	A4_α0_β2_εh2_λ30_fc30_p2	Tipo de flexión	Recta	Rotura	12/06/2008

	CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO			
	f_c (MPa)	31.3	e₁ (m)	0
ρ (%)	3.39	e₂ (m)	0.020	
α₁ (°)	0	β (e₁/e₂)	0	
α₂ (°)	0	Esbeltez (λ_g)	30	
h (m)	0.10	r_{mec} (cm)	1.9	
b (m)	0.20	Arm. Longitudinal	6φ12	
e₂/h	0.2	Arm. Transversal	φ4c/15cm	
CARGA APLICADA				
N_{max} (kN)		318.2		
N_u (kN)		141.3		
ACERO - ARM. LONGITUDINAL				
f_y (MPa)		538.1		
f_{max} (MPa)		640.3		
E_s (MPa)		209377		

DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
348	220	1065	666	-	-	-

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 1.44 metros desde el extremo inferior del soporte;
- En el comportamiento pos-pico se observó una importante rama de descenso con una gran caída de carga;
- Grandes desplazamiento (9.4 cm de flecha en la sección de centro luz) y deformaciones de hasta 6‰ en las armaduras de tracción y en el hormigón comprimido en rotura.

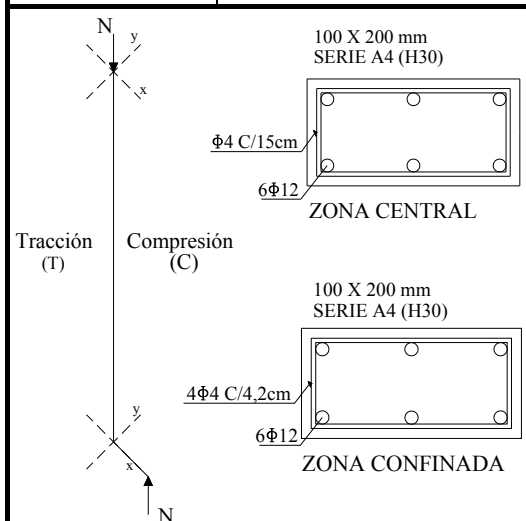
FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVAIJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S03	Serie	A4	Hormigonado	16/05/2008
Identificación	A4_α0_β2_εh3_λ30_fc30_ρ2	Tipo de flexión	Recta	Rotura	13/06/2008



CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO

f_c (MPa)	30.7	e₁ (m)	0
ρ (%)	3.39	e₂ (m)	0.040
α₁ (°)	0	β (e₁/e₂)	0
α₂ (°)	0	Esbeltez (λ_g)	30
h (m)	0.10	r_{mec} (cm)	1.9
b (m)	0.20	Arm. Longitudinal	6φ12
e₂/h	0.4	Arm. Transversal	φ4c/15cm

CARGA APLICADA

N_{max} (kN)	192.6
N_u (kN)	120.9

ACERO - ARM. LONGITUDINAL

f_y (MPa)	538.1
f_{max} (MPa)	640.3
E_s (MPa)	209377

DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
348	220	1065	666	-	-	-

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 1.30 metros desde el extremo inferior del soporte;
- Se observó un patamar horizontal cuando el soporte alcanzó la carga máxima, terminando con una pequeña rama de descenso hasta la rotura (ver gráficas en el ejejo B);
- Grandes desplazamiento (10.6 cm de flecha en la sección de centro luz) y deformaciones de hasta 5.5‰ en las armaduras de tracción y en el hormigón comprimido en rotura.

FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVAIJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S04	Serie	A4	Hormigonado	23/05/2008
Identificación	A4_α0_β3_εh1_λ30_fc30_p2	Tipo de flexión	Recta	Rotura	20/06/2008

	CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO			
	f_c (MPa)	30.0	e₁ (m)	-0.005
ρ (%)	3.39	e₂ (m)	0.010	
α₁ (°)	0	β (e₁/e₂)	-0.5	
α₂ (°)	0	Esbeltez (λ_g)	30	
h (m)	0.10	r_{mec} (cm)	1.9	
b (m)	0.20	Arm. Longitudinal	6φ12	
e₂/h	0.1	Arm. Transversal	φ4c/15cm	
CARGA APLICADA				
N_{max} (kN)		464.6		
N_u (kN)		210.5		
ACERO - ARM. LONGITUDINAL				
f_y (MPa)		538.1		
f_{max} (MPa)		640.3		
E_s (MPa)		209377		

DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
348	220	1065	666	-	-	-

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 1.50 metros desde el extremo inferior del soporte (centro luz);
- Al alcanzar la carga máxima todas las bandas extensométricas registraban comportamiento de compresión;
- La carga bajó rápidamente hasta la rotura en la rama pos-pico;
- Grandes desplazamiento (8.4 cm de flecha en la sección de centro luz) y deformaciones de hasta 5% en las armaduras de tracción y en el hormigón comprimido en rotura.

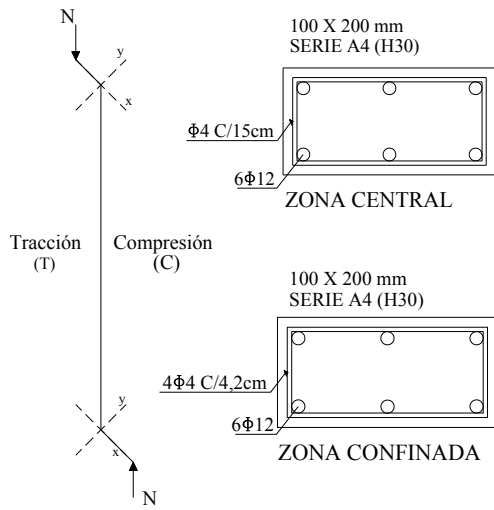
FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVAIJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S05	Serie	A4	Hormigonado	29/05/2008
Identificación	A4_α0_β3_εh2_λ30_fc30_ρ2	Tipo de flexión	Recta	Rotura	26/06/2008



CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO

f_c (MPa)	28.2	e₁ (m)	-0.010
ρ (%)	3.39	e₂ (m)	0.020
α₁ (°)	0	β (e₁/e₂)	-0.5
α₂ (°)	0	Esbeltez (λ_g)	30
h (m)	0.10	r_{mec} (cm)	1.9
b (m)	0.20	Arm. Longitudinal	6φ12
e₂/h	0.2	Arm. Transversal	φ4c/15cm

CARGA APLICADA

N_{max} (kN)	352.7
N_u (kN)	180.1

ACERO - ARM. LONGITUDINAL

f_y (MPa)	538.1
f_{max} (MPa)	640.3
E_s (MPa)	209377

DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
348	220	1065	666	-	-	-

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 1.20 metros desde el extremo inferior del soporte;
- En el comportamiento pos-pico se observó una importante rama de descenso con una gran caída de carga;
- Grandes desplazamiento (8.4 cm de flecha en la sección de centro luz) y deformaciones de hasta 5% en las armaduras de tracción y en el hormigón comprimido en la sección de rotura.

FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVAIAJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S06	Serie	A4	Hormigonado	30/05/2008
Identificación	A4_α0_β3_εh3_λ30_fc30_p2	Tipo de flexión	Recta	Rotura	27/06/2008

<p style="font-size: small;">100 X 200 mm SERIE A4 (H30)</p> <p style="font-size: small;">φ4 C/15cm</p> <p style="font-size: small;">6φ12</p> <p style="text-align: center;">ZONA CENTRAL</p> <p style="font-size: small;">100 X 200 mm SERIE A4 (H30)</p> <p style="font-size: small;">4φ4 C/4,2cm</p> <p style="font-size: small;">6φ12</p> <p style="text-align: center;">ZONA CONFINADA</p> <p style="font-size: x-small;">Tracción (T) Compresión (C)</p>	CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO			
	f_c (MPa)	29.5	e₁ (m)	-0.020
ρ (%)	3.39	e₂ (m)	0.040	
α₁ (°)	0	β (e₁/e₂)	-0.5	
α₂ (°)	0	Esbeltez (λ_g)	30	
h (m)	0.10	r_{mec} (cm)	1.9	
b (m)	0.20	Arm. Longitudinal	6φ12	
e₂/h	0.4	Arm. Transversal	φ4c/15cm	
CARGA APLICADA				
N_{max} (kN)		258.2		
N_u (kN)		150.3		
ACERO - ARM. LONGITUDINAL				
f_y (MPa)		538.1		
f_{max} (MPa)		640.3		
E_s (MPa)		209377		

DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
348	220	1065	666	-	-	-

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 1.10 metros desde el extremo inferior del soporte;
- En el comportamiento pos-pico se observó una rama de descenso con una gran caída de carga hasta la rotura;
- Grandes desplazamiento (8.1 cm de flecha en la sección de rotura) y deformaciones de hasta 6‰ en las armaduras de tracción y de 5‰ en el hormigón comprimido en la sección de rotura.

FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVAIJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S01	Serie	B1	Hormigonado	13/11/2008
Identificación	B1_α1_β2_εh1_λ24_fc90_ρ1	Tipo de flexión	Esviada	Rotura	11/12/2008

	CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO			
	f_c (MPa)	85.3	e₁ (m)	0
	ρ (%)	2.26	e₂ (m)	0.0125
	α₁ (°)	22.5	β (e₁/e₂)	0
	α₂ (°)	22.5	Esbeltez (λ_g)	24
	h (m)	0.125	r_{mec} (cm)	2.4
	b (m)	0.125	Arm. Longitudinal	4Φ10
	e₂/h	0.1	Arm. Transversal	Φ5c/15cm
	CARGA APLICADA			
	N_{max} (kN)		514.9	
N_u (kN)		458.7		
ACERO - ARM. LONGITUDINAL				
f_v (MPa)		501		
f_{max} (MPa)		635		
E_s (MPa)		209013		

DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
570	180	705	890	50	5.8	11.8

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 1.37 metros desde el extremo inferior del soporte;
- Se observó salto del recubrimiento en rotura en la esquina más comprimida del soporte (rotura frágil);
- Comportamiento pos-pico casi sin rama de descenso. Rompió poco después de alcanzar la carga máxima;
- Pequeña flecha en la dirección "y" (ver gráficas en el anejo B);

FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVAIJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S02	Serie	B1	Hormigonado	20/11/2008
Identificación	B1_α1_β2_εh2_λ24_fc90_ρ1	Tipo de flexión	Esviada	Rotura	18/12/2008

	CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO		
	f_c (MPa)	83.0	e₁ (m)
ρ (%)	2.26	e₂ (m)	0.025
α₁ (°)	22.5	β (e₁/e₂)	0
α₂ (°)	22.5	Esbeltez (λ_g)	24
h (m)	0.125	r_{mec} (cm)	2.4
b (m)	0.125	Arm. Longitudinal	4φ10
e₂/h	0.2	Arm. Transversal	φ5c/15cm
CARGA APLICADA			
N_{max} (kN)		387.1	
N_u (kN)		268.3	
ACERO - ARM. LONGITUDINAL			
f_v (MPa)		501	
f_{max} (MPa)		635	
E_s (MPa)		209013	

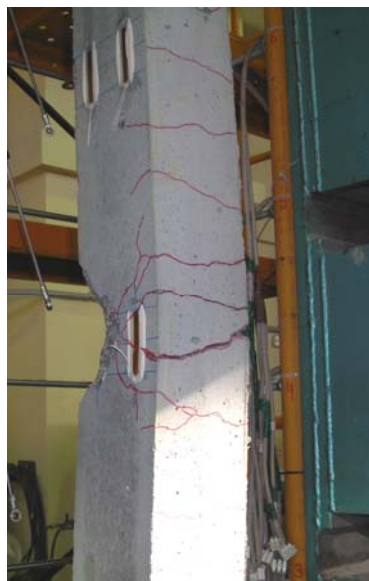
DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
570	180	705	890	50	5.8	11.8

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 1.20 metros desde el extremo inferior del soporte;
- Se observó un pequeño salto del recubrimiento en rotura en la esquina más comprimida del soporte;
- Comportamiento pos-pico presentando rama de descenso con bajada de carga hasta la rotura ;
- Deformaciones de más de 6‰ registradas en las bandas extensométricas de las barras de acero en tracción de hasta 5‰ en la banda de hormigón más comprimida;

FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVAIJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S03	Serie	B1	Hormigonado	18/12/2008
Identificación	B1_α1_β2_εh3_λ24_fc90_ρ1	Tipo de flexión	Esviada	Rotura	15/01/2009

	CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO			
	f_c (MPa)	85.9	e₁ (m)	0
	ρ (%)	2.26	e₂ (m)	0.050
	α₁ (°)	22.5	β (e₁/e₂)	0
	α₂ (°)	22.5	Esbeltez (λ_g)	24
	h (m)	0.125	r_{mec} (cm)	2.4
	b (m)	0.125	Arm. Longitudinal	4Φ10
	e₂/h	0.4	Arm. Transversal	Φ5c/15cm
	CARGA APLICADA			
	N_{max} (kN)		198.8	
N_u (kN)		166.5		
ACERO - ARM. LONGITUDINAL				
f_v (MPa)		501		
f_{max} (MPa)		635		
E_s (MPa)		209013		

DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
570	180	705	890	50	5.8	11.8

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 1.20 metros desde el extremo inferior del soporte;
- Se observó salto del recubrimiento en rotura en la esquina más comprimida del soporte;
- Comportamiento pos-pico presentando rama de descenso con pequeña bajada de carga hasta la rotura ;
- Deformaciones de más de 5‰ registradas en las bandas extensométricas de las barras de acero en tracción y en la banda de hormigón más comprimida;

FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVAIJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S04	Serie	B1	Hormigonado	02/02/2009
Identificación	B1_α1_β1_εh2_λ24_fc90_ρ1	Tipo de flexión	Esviada	Rotura	02/03/2009

	CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO			
	f_c (MPa)	87.4	e₁ (m)	0.0125
	ρ (%)	2.26	e₂ (m)	0.025
	α₁ (°)	22.5	β (e₁/e₂)	0.5
	α₂ (°)	22.5	Esbeltez (λ_g)	24
	h (m)	0.125	r_{mec} (cm)	2.4
	b (m)	0.125	Arm. Longitudinal	4φ10
	e₂/h	0.2	Arm. Transversal	φ5c/15cm
	CARGA APLICADA			
	N_{max} (kN)		279.4	
N_u (kN)		207.4		
ACERO - ARM. LONGITUDINAL				
f_v (MPa)		501		
f_{max} (MPa)		635		
E_s (MPa)		209013		

DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
570	180	705	890	50	5.8	11.8

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 1.45 metros desde el extremo inferior del soporte;
- Se observó salto del recubrimiento en rotura en la esquina más comprimida del soporte;
- Comportamiento pos-pico presentando un pequeña rama de descenso con una pequeña pendiente hasta rotura;
- Deformaciones de más de 5% registradas en las bandas extensométricas de las barras de acero más traccionadas y de cerca de 5.5% en la banda de hormigón más comprimida;

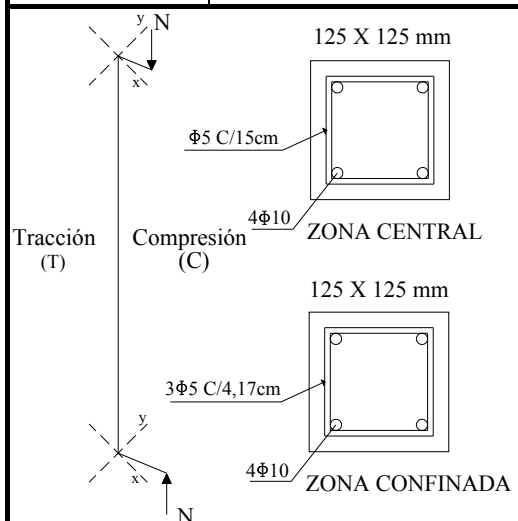
FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVAIJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S05	Serie	B1	Hormigonado	06/02/2009
Identificación	B1_α1_β1_εh3_λ24_fc90_ρ1	Tipo de flexión	Esviada	Rotura	06/03/2009



CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO

f_c (MPa)	90.3	e₁ (m)	0.025
ρ (%)	2.26	e₂ (m)	0.050
α₁ (°)	22.5	β (e₁/e₂)	0.5
α₂ (°)	22.5	Esbeltez (λ_g)	24
h (m)	0.125	r_{mec} (cm)	2.4
b (m)	0.125	Arm. Longitudinal	4φ10
e₂/h	0.4	Arm. Transversal	φ5c/15cm

CARGA APLICADA

N_{max} (kN)	175.6
N_u (kN)	118.4

ACERO - ARM. LONGITUDINAL

f_v (MPa)	501
f_{max} (MPa)	635
E_s (MPa)	209013

DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
570	180	705	890	50	5.8	11.8

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 1.20 metros desde el extremo inferior del soporte;
- Se observó salto del recubrimiento en rotura más pronunciado en la cara frontal del soporte (ver fotos);
- La flecha en la dirección "x" fue mucho más pronunciada que en la dirección "y" (ver gráficas en el anejo B);
- Deformaciones de más de 5‰ registradas en las bandas extensométricas de las barras de acero más traccionadas y de cerca de 4.5‰ en la banda de hormigón más comprimida;

FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVAIJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S06	Serie	B1	Hormigonado	10/02/2009
Identificación	B1_α1_β3_εh1_λ24_fc90_ρ1	Tipo de flexión	Esviada	Rotura	10/03/2009

	CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO			
	f_c (MPa)	89.2	e₁ (m)	-0.00625
	ρ (%)	2.26	e₂ (m)	0.0125
	α₁ (°)	22.5	β (e₁/e₂)	-0.5
	α₂ (°)	22.5	Esbeltez (λ_g)	24
	h (m)	0.125	r_{mec} (cm)	2.4
	b (m)	0.125	Arm. Longitudinal	4φ10
	e₂/h	0.1	Arm. Transversal	φ5c/15cm
	CARGA APLICADA			
	N_{max} (kN)		610.8	
N_u (kN)		567.6		
ACERO - ARM. LONGITUDINAL				
f_v (MPa)		501		
f_{max} (MPa)		635		
E_s (MPa)		209013		

DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
570	180	705	890	50	5.8	11.8

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 1.35 metros desde el extremo inferior del soporte;
- El soporte rompió poco después de alcanzar la carga máxima;
- En carga máxima todas las bandas extensométricas estaban en compresión;
- Rotura explosiva con gran salto de recubrimiento y pandeo local de las armaduras más comprimidas.

FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVAIJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S07	Serie	B1	Hormigonado	12/02/2009
Identificación	B1_α1_β3_eh2_λ24_fc90_ρ1	Tipo de flexión	Esviada	Rotura	12/03/2009

	CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO			
	f_c (MPa)	84.9	e₁ (m)	-0.0125
	ρ (%)	2.26	e₂ (m)	0.025
	α₁ (°)	22.5	β (e₁/e₂)	-0.5
	α₂ (°)	22.5	Esbeltez (λ_g)	24
	h (m)	0.125	r_{mec} (cm)	2.4
	b (m)	0.125	Arm. Longitudinal	4φ10
	e₂/h	0.2	Arm. Transversal	φ5c/15cm
	CARGA APLICADA			
	N_{max} (kN)		492.1	
N_u (kN)		466.1		
ACERO - ARM. LONGITUDINAL				
f_v (MPa)		501		
f_{max} (MPa)		635		
E_s (MPa)		209013		

DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
570	180	705	890	50	5.8	11.8

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 0.90 metros desde el extremo inferior del soporte;
- Tras alcanzar la carga máxima se observó un patatar horizontal en el diagrama carga-flecha hasta la rotura;
- Rotura explosiva con gran salto de recubrimiento y pandeo local de la armadura en la esquina más comprimida en la sección de rotura (0.90 m).

FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVAIJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S08	Serie	B1	Hormigonado	01/10/2009
Identificación	B1_α1_β1_εh1_λ24_fc90_ρ1	Tipo de flexión	Esviada	Rotura	29/10/2009

	CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO			
	f_c (MPa)	86.4	e₁ (m)	0.00625
	ρ (%)	2.26	e₂ (m)	0.0125
	α₁ (°)	22.5	β (e₁/e₂)	0.5
	α₂ (°)	22.5	Esbeltez (λ_g)	24
	h (m)	0.125	r_{mec} (cm)	2.4
	b (m)	0.125	Arm. Longitudinal	4φ10
	e₂/h	0.1	Arm. Transversal	φ5c/15cm
	CARGA APLICADA			
	N_{max} (kN)	505.4		
N_u (kN)	466.1			
ACERO - ARM. LONGITUDINAL				
f_v (MPa)	501			
f_{max} (MPa)	635			
E_s (MPa)	209013			

DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
570	180	705	890	50	5.8	11.8

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 1.50 metros desde el extremo inferior del soporte (centro luz);
- Rotura frágil con salto de recubrimiento en la esquina más comprimida de la sección de rotura;
- Pandeo local de la armadura de compresión en la esquina más comprimida de la sección de rotura;
- Tras alcanzar la carga máxima la carga bajó rápidamente hasta la rotura en una pequeña rama de descenso;

FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVAIJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S02	Serie	B2	Hormigonado	26/02/2009
Identificación	B2_α1_β2_eh2_λ24_fc30_ρ1	Tipo de flexión	Esviada	Rotura	26/03/2009

	CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO			
	f_c (MPa)	37.4	e_1 (m)	0
	ρ (%)	2.26	e_2 (m)	0.025
	α_1 (°)	22.5	β (e_1/e_2)	0
	α_2 (°)	22.5	Esbeltez (λ_g)	24
	h (m)	0.125	r_{mec} (cm)	2.4
	b (m)	0.125	Arm. Longitudinal	4φ10
	e_2/h	0.2	Arm. Transversal	φ5c/15cm
	CARGA APLICADA			
	N_{max} (kN)	274.6		
N_u (kN)	190.8			
ACERO - ARM. LONGITUDINAL				
f_v (MPa)	501			
f_{max} (MPa)	635			
E_s (MPa)	209013			

DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m^3)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
348	220	1065	666	-	-	-

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 1.40 metros desde el extremo inferior del soporte;
- No hubo pandeo local de la armadura de compresión;
- Comportamiento pos-pico presentando rama de descenso con bajada de carga hasta la rotura ;
- Deformaciones de más de 4.5‰ registradas en las bandas extensométricas de las barras de acero en tracción y de hasta 5‰ en la banda de hormigón más comprimida;

FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVAIJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S03	Serie	B2	Hormigonado	04/03/2009
Identificación	B2_α1_β2_εh3_λ24_fc30_ρ1	Tipo de flexión	Esviada	Rotura	31/03/2009

	CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO			
	f_c (MPa)	35.1	e₁ (m)	0
	ρ (%)	2.26	e₂ (m)	0.050
	α₁ (°)	22.5	β (e₁/e₂)	0
	α₂ (°)	22.5	Esbeltez (λ_g)	24
	h (m)	0.125	r_{mec} (cm)	2.4
	b (m)	0.125	Arm. Longitudinal	4φ10
	e₂/h	0.4	Arm. Transversal	φ5c/15cm
	CARGA APLICADA			
	N_{max} (kN)		175.0	
N_u (kN)		155.2		
ACERO - ARM. LONGITUDINAL				
f_v (MPa)		501		
f_{max} (MPa)		635		
E_s (MPa)		209013		

DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
348	220	1065	666	-	-	-

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 0.90 metros desde el extremo inferior del soporte;
- Se observó un pequeño pandeo local de la armadura de compresión en la esquina más comprimida;
- No se observó salto de recubrimiento ;
- Tras alcanzar la carga máxima en el diagrama carga-flecha se observó un patatar horizontal hasta la rotura de la pieza;

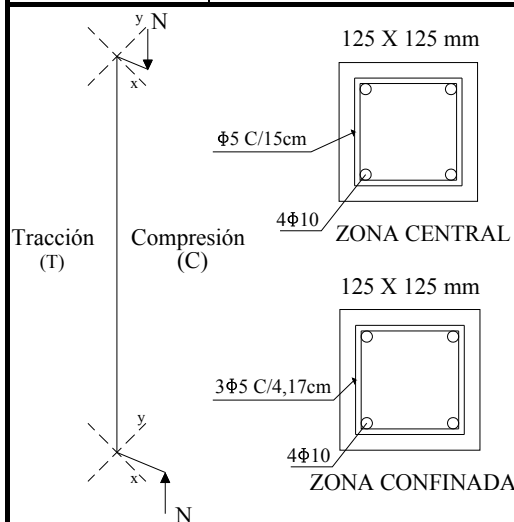
FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVAIJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S04	Serie	B2	Hormigonado	06/03/2009
Identificación	B2_α1_β1_εh3_λ24_fc30_ρ1	Tipo de flexión	Esviada	Rotura	02/04/2009



CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO

f_c (MPa)	28.2	e₁ (m)	0.025
ρ (%)	2.26	e₂ (m)	0.050
α₁ (°)	22.5	β (e₁/e₂)	0.5
α₂ (°)	22.5	Esbeltez (λ_g)	24
h (m)	0.125	r_{mec} (cm)	2.4
b (m)	0.125	Arm. Longitudinal	4φ10
e₂/h	0.4	Arm. Transversal	φ5c/15cm

CARGA APLICADA

N_{max} (kN)	134.6
N_u (kN)	81.1

ACERO - ARM. LONGITUDINAL

f_v (MPa)	501
f_{max} (MPa)	635
E_s (MPa)	209013

DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
348	220	1065	666	-	-	-

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 1.50 metros desde el extremo inferior del soporte (centro luz);
- Comportamiento pos-pico con una importante rama de descenso hasta la rotura;
- En la sección de rotura no se observó salto de recubrimiento y la armadura más comprimida presentó un pequeño pandeo local;
- Rotura muy dúctil con gran fisuración distribuida en las caras más traccionadas a lo largo de la longitud de la pieza.

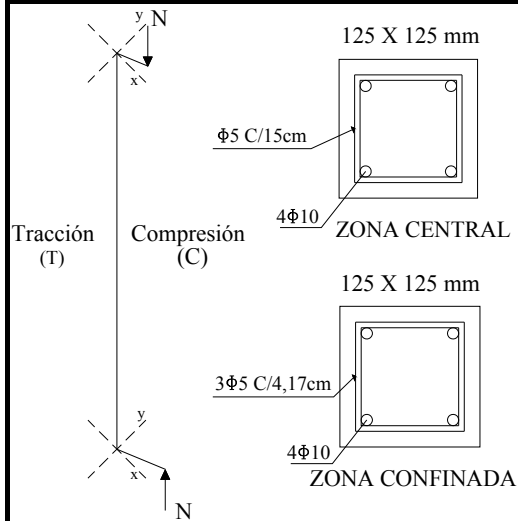
FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVAIJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S05	Serie	B2	Hormigonado	11/11/2009
Identificación	B2_α1_β1_εh2_λ24_fc30_ρ1	Tipo de flexión	Esviada	Rotura	09/12/2009



CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO			
f_c (MPa)	31.7	e₁ (m)	0.0125
ρ (%)	2.26	e₂ (m)	0.025
α₁ (°)	22.5	β (e₁/e₂)	0.5
α₂ (°)	22.5	Esbeltez (λ_g)	24
h (m)	0.125	r_{mec} (cm)	2.4
b (m)	0.125	Arm. Longitudinal	4φ10
e₂/h	0.2	Arm. Transversal	φ5c/15cm

CARGA APLICADA	
N_{max} (kN)	234.5
N_u (kN)	173.3
ACERO - ARM. LONGITUDINAL	
f_v (MPa)	501
f_{max} (MPa)	635
E_s (MPa)	209013

DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
348	220	1065	666	-	-	-

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 1.50 metros desde el extremo inferior del soporte (centro luz);
- Comportamiento pos-pico con una importante rama de descenso hasta la rotura;
- En la sección de rotura no se observó salto de recubrimiento;
- Rotura muy dúctil con gran fisuración distribuida en las caras más traccionadas a lo largo de la longitud de la pieza.

FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVAIJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S01	Serie	C1	Hormigonado	27/03/2009
Identificación	C1_α2_β1_εh2_λ24_fc90_ρ1	Tipo de flexión	Esviada	Rotura	24/04/2009

	CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO			
	f_c (MPa)	89.5	e₁ (m)	0.0125
	ρ (%)	2.26	e₂ (m)	0.025
	α₁ (°)	0	β (e₁/e₂)	0.5
	α₂ (°)	22.5	Esbeltez (λ_g)	24
	h (m)	0.125	r_{mec} (cm)	2.4
	b (m)	0.125	Arm. Longitudinal	4φ10
	e₂/h	0.2	Arm. Transversal	φ5c/15cm
	CARGA APLICADA			
	N_{max} (kN)		306.9	
N_u (kN)		234.1		
ACERO - ARM. LONGITUDINAL				
f_v (MPa)		501		
f_{max} (MPa)		635		
E_s (MPa)		209013		

DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
570	180	705	890	50	5.8	11.8

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 1.50 metros desde el extremo inferior del soporte (centro luz);
- Se observó salto de recubrimiento en la esquina más comprimida de la sección de rotura;
- En rotura las armaduras que presentaban comportamiento de tracción presentaron deformaciones de más de 6% y la banda de hormigón más comprimida presentó una deformación de cerca de 4‰;

FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVAIJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S02	Serie	C1	Hormigonado	07/04/2009
Identificación	C1_α2_β1_εh3_λ24_fc90_ρ1	Tipo de flexión	Esviada	Rotura	05/05/2009

	CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO		
	f_c (MPa)	93.6	e₁ (m)
ρ (%)	2.26	e₂ (m)	0.050
α₁ (°)	0	β (e₁/e₂)	0.5
α₂ (°)	22.5	Esbeltez (λ_g)	24
h (m)	0.125	r_{mec} (cm)	2.4
b (m)	0.125	Arm. Longitudinal	4φ10
e₂/h	0.4	Arm. Transversal	φ5c/15cm
CARGA APLICADA			
N_{max} (kN)		178.9	
N_u (kN)		110.6	
ACERO - ARM. LONGITUDINAL			
f_v (MPa)		501	
f_{max} (MPa)		635	
E_s (MPa)		209013	

DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
570	180	705	890	50	5.8	11.8

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 1.50 metros desde el extremo inferior del soporte (centro luz);
- Se observó un pequeño salto de recubrimiento en la esquina más comprimida de la sección de rotura;
- Gran deformada en rotura con flechas de hasta 8.1 en la sección de centro luz en la dirección "x";
- Deformaciones registradas en tracción de más del 6‰.

FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVAIJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S03	Serie	C1	Hormigonado	23/04/2009
Identificación	C1_α2_β3_εh1_λ24_fc90_ρ1	Tipo de flexión	Esviada	Rotura	21/05/2009

	CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO			
	f_c (MPa)	95.3	e₁ (m)	-0.00625
	ρ (%)	2.26	e₂ (m)	0.0125
	α₁ (°)	0	β (e₁/e₂)	-0.5
	α₂ (°)	22.5	Esbeltez (λ_g)	24
	h (m)	0.125	r_{mec} (cm)	2.4
	b (m)	0.125	Arm. Longitudinal	4Φ10
	e₂/h	0.1	Arm. Transversal	Φ5c/15cm
	CARGA APLICADA			
	N_{max} (kN)		648.1	
N_u (kN)		625.4		
ACERO - ARM. LONGITUDINAL				
f_v (MPa)		501		
f_{max} (MPa)		635		
E_s (MPa)		209013		

DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
570	180	705	890	50	5.8	11.8

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 1.20 metros desde el extremo inferior del soporte;
- Rotura muy frágil con gran salto de recubrimiento en la sección de rotura;
- Pandeo local de las armaduras más comprimidas mas acentuado en la esquina más comprimida;
- En carga máxima todas las secciones instrumentadas se encontraban en compresión y poco después la pieza rompió, no observándose grande fisuración distribuida.

FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVAIJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S04	Serie	C1	Hormigonado	28/04/2009
Identificación	C1_α2_β3_εh2_λ24_fc90_ρ1	Tipo de flexión	Esviada	Rotura	26/05/2009

	CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO		
	f_c (MPa)	92.3	e₁ (m)
ρ (%)	2.26	e₂ (m)	0.025
α₁ (°)	0	β (e₁/e₂)	-0.5
α₂ (°)	22.5	Esbeltez (λ_g)	24
h (m)	0.125	r_{mec} (cm)	2.4
b (m)	0.125	Arm. Longitudinal	4Φ10
e₂/h	0.2	Arm. Transversal	Φ5c/15cm
CARGA APLICADA			
N_{max} (kN)		502.0	
N_u (kN)		473.1	
ACERO - ARM. LONGITUDINAL			
f_v (MPa)		501	
f_{max} (MPa)		635	
E_s (MPa)		209013	

DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
570	180	705	890	50	5.8	11.8

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 1.20 metros desde el extremo inferior del soporte;
- Rotura muy frágil con gran salto de recubrimiento en la sección de rotura;
- Pandeo local de la armadura en la esquina más comprimida de la sección de rotura.

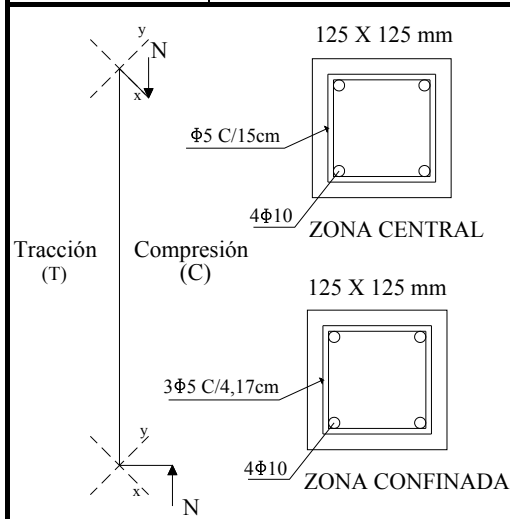
FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVAIJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S02	Serie	C2	Hormigonado	05/05/2009
Identificación	C2_α3_β1_εh3_λ24_fc90_ρ1	Tipo de flexión	Esviada	Rotura	02/06/2009



CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO

f_c (MPa)	91.5	e₁ (m)	0.025
ρ (%)	2.26	e₂ (m)	0.050
α₁ (°)	0	β (e₁/e₂)	0.5
α₂ (°)	45	Esbeltez (λ_g)	24
h (m)	0.125	r_{mec} (cm)	2.4
b (m)	0.125	Arm. Longitudinal	4φ10
e₂/h	0.4	Arm. Transversal	φ5c/15cm

CARGA APLICADA

N_{max} (kN)	183.0
N_u (kN)	154.2

ACERO - ARM. LONGITUDINAL

f_v (MPa)	501
f_{max} (MPa)	635
E_s (MPa)	209013

DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
570	180	705	890	50	5.8	11.8

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 1.20 metros desde el extremo inferior del soporte;
- Salto de recubrimiento en la esquina más comprimida de la sección de rotura;
- La armadura localizada en la esquina más traccionada del soporte plastificó en todas las secciones instrumentadas con bandas extensiométricas y el hormigón alcanzó deformaciones de hasta 5‰ en rotura.

FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVAIJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

SopORTE	S03	Serie	C2	Hormigonado	07/05/2009
Identificación	C2_α3_β2_εh1_λ24_fc90_ρ1	Tipo de flexión	Esviada	Rotura	04/06/2009

<p style="font-size: small;"> Tracción (T) Compresión (C) 125 X 125 mm 125 X 125 mm φ5 C/15cm 4φ10 ZONA CENTRAL 3φ5 C/4,17cm 4φ10 ZONA CONFINADA </p>	CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO			
	f_c (MPa)	91.4	e₁ (m)	0
	ρ (%)	2.26	e₂ (m)	0.0125
	α₁ (°)	0	β (e₁/e₂)	0
	α₂ (°)	45	Esbeltez (λ_g)	24
	h (m)	0.125	r_{mec} (cm)	2.4
	b (m)	0.125	Arm. Longitudinal	4φ10
	e₂/h	0.1	Arm. Transversal	φ5c/15cm
	CARGA APLICADA			
	N_{max} (kN)		587.1	
N_u (kN)		572.5		
ACERO - ARM. LONGITUDINAL				
f_v (MPa)		501		
f_{max} (MPa)		635		
E_s (MPa)		209013		

DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
570	180	705	890	50	5.8	11.8

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 0.90 metros desde el extremo inferior del soporte;
- Rotura explosiva con salto de recubrimiento en las dos caras más comprimidas de la sección de rotura y pandeo de las armaduras más comprimidas;
- En carga máxima todas las secciones instrumentadas estaban en compresión y la rotura se produjo poco después no presentando rama de descenso en el comportamiento pos-pico;
- Poca fisuración distribuida en las caras más traccionadas.

FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVAIJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S04	Serie	C2	Hormigonado	12/05/2009
Identificación	C2_α3_β2_εh2_λ24_fc90_ρ1	Tipo de flexión	Esviada	Rotura	09/06/2009

<p style="font-size: small;"> Tracción (T) Compresión (C) Zona Central: 125 X 125 mm, 4Φ10, Φ5 C/15cm Zona Confinada: 125 X 125 mm, 4Φ10, 3Φ5 C/4,17cm </p>	CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO			
	f_c (MPa)	99.1	e₁ (m)	0
ρ (%)	2.26	e₂ (m)	0.025	
α₁ (°)	0	β (e₁/e₂)	0	
α₂ (°)	45	Esbeltez (λ_g)	24	
h (m)	0.125	r_{mec} (cm)	2.4	
b (m)	0.125	Arm. Longitudinal	4Φ10	
e₂/h	0.2	Arm. Transversal	Φ5c/15cm	
CARGA APLICADA				
N_{max} (kN)		409.0		
N_u (kN)		373.8		
ACERO - ARM. LONGITUDINAL				
f_v (MPa)		501		
f_{max} (MPa)		635		
E_s (MPa)		209013		

DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
570	180	705	890	50	5.8	11.8

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 1.20 metros desde el extremo inferior del soporte;
- Rotura frágil con salto de recubrimiento y pandeo local de la armadura de compresión en la esquina más comprimida de la sección de rotura;
- El desplazamiento del centro de gravedad fue simétrico presentando prácticamente la misma deformada respecto a los dos ejes coordenados (x,y).

FOTOS REGISTRADAS

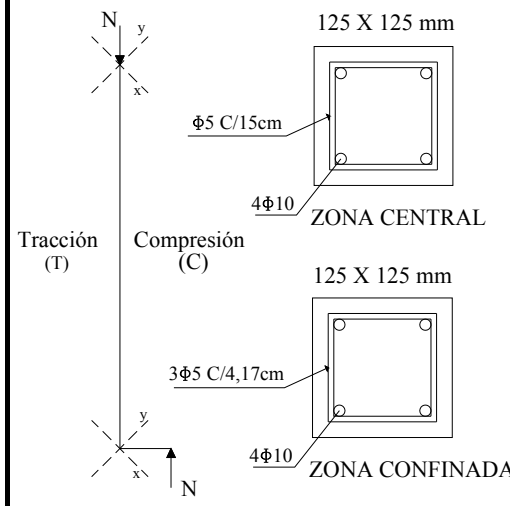


ESTUDIO TEÓRICO EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVAIJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S05	Serie	C2	Hormigonado	14/05/2009
Identificación	C2_α3_β2_εh3_λ24_fc90_ρ1	Tipo de flexión	Esviada	Rotura	11/06/2009

CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO			
f_c (MPa)	95.3	e₁ (m)	0
ρ (%)	2.26	e₂ (m)	0.05
α₁ (°)	0	β (e₁/e₂)	0
α₂ (°)	45	Esbeltez (λ_g)	24
h (m)	0.125	r_{mec} (cm)	2.4
b (m)	0.125	Arm. Longitudinal	4φ10
e₂/h	0.4	Arm. Transversal	φ5c/15cm
CARGA APLICADA			
N_{max} (kN)	245.1		
N_u (kN)	231.3		
ACERO - ARM. LONGITUDINAL			
f_v (MPa)	501		
f_{max} (MPa)	635		
E_s (MPa)	209013		



DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
570	180	705	890	50	5.8	11.8

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 0.90 metros desde el extremo inferior del soporte;
- Pequeño salto de recubrimiento y leve pandeo de la armadura de compresión en la esquina más comprimida;
- El desplazamiento del centro de gravedad fue simétrico presentando prácticamente la misma deformada respecto a los dos ejes coordenados (x,y).

FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVAIJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

SopORTE	S06	Serie	C2	Hormigonado	19/05/2009
Identificación	C2_α3_β3_εh1_λ24_fc90_ρ1	Tipo de flexión	Esviada	Rotura	15/06/2009

		CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO			
		f_c (MPa)	98.3	e₁ (m)	-0.00625
ρ (%)	2.26	e₂ (m)	0.0125		
α₁ (°)	0	β (e₁/e₂)	-0.5		
α₂ (°)	45	Esbeltez (λ_g)	24		
h (m)	0.125	r_{mec} (cm)	2.4		
b (m)	0.125	Arm. Longitudinal	4Φ10		
e₂/h	0.1	Arm. Transversal	Φ5c/15cm		
CARGA APLICADA					
N_{max} (kN)		640.8			
N_u (kN)		620.9			
ACERO - ARM. LONGITUDINAL					
f_v (MPa)		501			
f_{max} (MPa)		635			
E_s (MPa)		209013			

DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
570	180	705	890	50	5.8	11.8

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 1.50 metros desde el extremo inferior del soporte (sección central);
- Rotura frágil muy explosiva con gran salto de recubrimiento en la región de rotura con pandeo local de las armaduras más comprimidas;
- En carga máxima todas las secciones instrumentadas presentaban comportamiento de compresión.

FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVAIJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S07	Serie	C2	Hormigonado	05/10/2009
Identificación	C2_α3_β1_εh1_λ24_fc90_ρ1	Tipo de flexión	Esviada	Rotura	02/11/2009

	CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO		
	f_c (MPa)	89.5	e₁ (m)
ρ (%)	2.26	e₂ (m)	0.0125
α₁ (°)	0	β (e₁/e₂)	0.5
α₂ (°)	45	Esbeltez (λ_g)	24
h (m)	0.125	r_{mec} (cm)	2.4
b (m)	0.125	Arm. Longitudinal	4Φ10
e₂/h	0.1	Arm. Transversal	Φ5c/15cm
CARGA APLICADA			
N_{max} (kN)		527.4	
N_u (kN)		494.5	
ACERO - ARM. LONGITUDINAL			
f_v (MPa)		501	
f_{max} (MPa)		635	
E_s (MPa)		209013	

DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
570	180	705	890	50	5.8	11.8

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 1.50 metros desde el extremo inferior del soporte (sección central);
- Rotura frágil con gran salto de recubrimiento y pandeo local de la armadura de compresión en la esquina más comprimida del soporte;
- En carga máxima todas las secciones instrumentadas presentaban comportamiento de compresión.

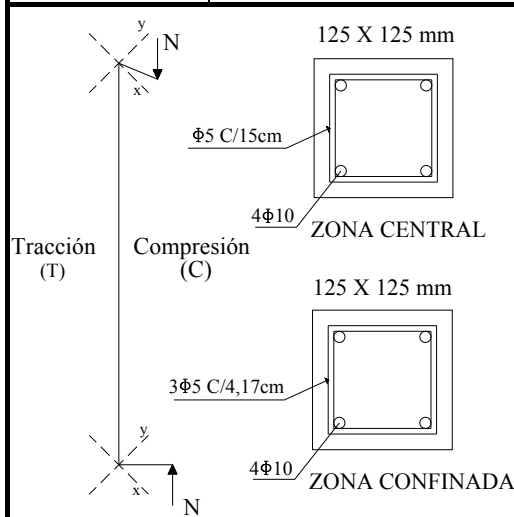
FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVAIJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

SopORTE	S01	Serie	C3	Hormigonado	21/052009
Identificación	C3_α4_β1_εh2_λ24_fc90_ρ1	Tipo de flexión	Esviada	Rotura	18/06/2009



CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO

f_c (MPa)	88.1	e₁ (m)	0.0125
ρ (%)	2.26	e₂ (m)	0.025
α₁ (°)	22.5	β (e₁/e₂)	0.5
α₂ (°)	45	Esbeltez (λ_g)	24
h (m)	0.125	r_{mec} (cm)	2.4
b (m)	0.125	Arm. Longitudinal	4Φ10
e₂/h	0.2	Arm. Transversal	Φ5c/15cm

CARGA APLICADA

N_{max} (kN)	340.1
N_u (kN)	304.5

ACERO - ARM. LONGITUDINAL

f_v (MPa)	501
f_{max} (MPa)	635
E_s (MPa)	209013

DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
570	180	705	890	50	5.8	11.8

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 1.50 metros desde el extremo inferior del soporte (sección central);
- Rotura frágil con gran salto de recubrimiento y pandeo local de la armadura de compresión en la esquina más comprimida del soporte;
- Casi no se apreció rama de descenso en el comportamiento pos-pico.

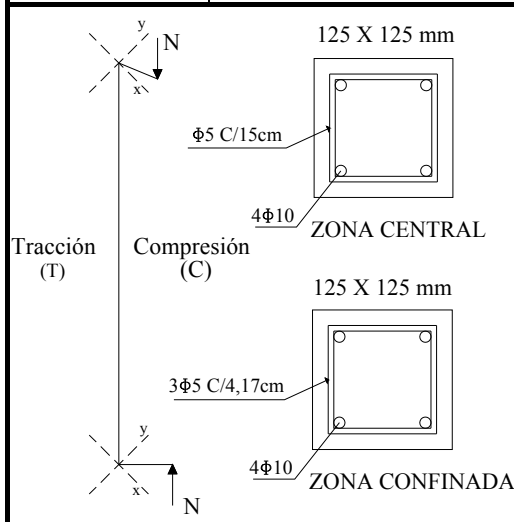
FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVAIJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S02	Serie	C3	Hormigonado	26/05/2009
Identificación	C3_α4_β1_εh3_λ24_fc90_ρ1	Tipo de flexión	Esviada	Rotura	23/06/2009



CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO

f_c (MPa)	88.0	e₁ (m)	0.025
ρ (%)	2.26	e₂ (m)	0.05
α₁ (°)	22.5	β (e₁/e₂)	0.5
α₂ (°)	45	Esbeltez (λ_g)	24
h (m)	0.125	r_{mec} (cm)	2.4
b (m)	0.125	Arm. Longitudinal	4φ10
e₂/h	0.4	Arm. Transversal	φ5c/15cm

CARGA APLICADA

N_{max} (kN)	200.6
N_u (kN)	174.4

ACERO - ARM. LONGITUDINAL

f_v (MPa)	501
f_{max} (MPa)	635
E_s (MPa)	209013

DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
570	180	705	890	50	5.8	11.8

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 1.50 metros desde el extremo inferior del soporte (sección central);
- Rotura menos frágil con salto de recubrimiento y pequeño pandeo local de la armadura de compresión en la esquina más comprimida de la sección de rotura;
- Fisuración distribuida a lo largo de la longitud del soporte.

FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVAIJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S03	Serie	C3	Hormigonado	29/05/2009
Identificación	C3_α4_β3_εh1_λ24_fc90_ρ1	Tipo de flexión	Esviada	Rotura	26/06/2009

	CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO			
	f_c (MPa)	86.5	e₁ (m)	-0.00625
	ρ (%)	2.26	e₂ (m)	0.0125
	α₁ (°)	22.5	β (e₁/e₂)	-0.5
	α₂ (°)	45	Esbeltez (λ_g)	24
	h (m)	0.125	r_{mec} (cm)	2.4
	b (m)	0.125	Arm. Longitudinal	4Φ10
	e₂/h	0.1	Arm. Transversal	Φ5c/15cm
	CARGA APLICADA			
	N_{max} (kN)		694.9	
N_u (kN)		684.8		
ACERO - ARM. LONGITUDINAL				
f_v (MPa)		501		
f_{max} (MPa)		635		
E_s (MPa)		209013		

DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
570	180	705	890	50	5.8	11.8

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 1.50 metros desde el extremo inferior del soporte (sección central);
- Rotura muy frágil y explosiva con gran salto de recubrimiento y pandeo local de las tres armaduras de compresión en la sección de rotura;
- En carga máxima todas las secciones instrumentadas presentaban comportamiento de compresión.

FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVAIJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S04	Serie	C3	Hormigonado	07/10/2009
Identificación	C3_α4_β1_εh1_λ24_fc90_ρ1	Tipo de flexión	Esviada	Rotura	04/11/2009

	CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO		
	f_c (MPa)	86.3	e₁ (m)
ρ (%)	2.26	e₂ (m)	0.0125
α₁ (°)	22.5	β (e₁/e₂)	0.5
α₂ (°)	45	Esbeltez (λ_g)	24
h (m)	0.125	r_{mec} (cm)	2.4
b (m)	0.125	Arm. Longitudinal	4Φ10
e₂/h	0.1	Arm. Transversal	Φ5c/15cm
CARGA APLICADA			
N_{max} (kN)		512.1	
N_u (kN)		487.6	
ACERO - ARM. LONGITUDINAL			
f_v (MPa)		501	
f_{max} (MPa)		635	
E_s (MPa)		209013	

DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
570	180	705	890	50	5.8	11.8

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 1,35 metros desde el extremo inferior del soporte;
- Rotura frágil con salto de recubrimiento y pandeo local de la armadura de compresión en la esquina más comprimida en la región de rotura;
- En el comportamiento pos-pico casi no se observó rama de descenso antes de la rotura.

FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVAIJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S01	Serie	C4	Hormigonado	22/09/2009
Identificación	C4_α2_β1_εh1_λ24_fc30_ρ1	Tipo de flexión	Esviada	Rotura	20/10/2009

	CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO			
	f_c (MPa)	27.1	e₁ (m)	0.00625
ρ (%)	2.26	e₂ (m)	0.0125	
α₁ (°)	0	β (e₁/e₂)	0.5	
α₂ (°)	22.5	Esbeltez (λ_g)	24	
h (m)	0.125	r_{mec} (cm)	2.4	
b (m)	0.125	Arm. Longitudinal	4φ10	
e₂/h	0.1	Arm. Transversal	φ5c/15cm	
CARGA APLICADA				
N_{max} (kN)		291.9		
N_u (kN)		225.7		
ACERO - ARM. LONGITUDINAL				
f_v (MPa)		501		
f_{max} (MPa)		635		
E_s (MPa)		209013		

DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
348	220	1065	666	-	-	-

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 1.50 metros desde el extremo inferior del soporte (sección central);
- Se observó salto de recubrimiento en la esquina más comprimida de la sección de rotura;
- Se notó el pandeo local de la armadura de compresión ubicada en la esquina más comprimida de la sección central del soporte;

FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVAIJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S02	Serie	C4	Hormigonado	24/09/2009
Identificación	C4_a2_β1_eh2_λ24_fc30_ρ1	Tipo de flexión	Esviada	Rotura	22/10/2009

	CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO		
	f_c (MPa)	29.9	e₁ (m)
ρ (%)	2.26	e₂ (m)	25
α₁ (°)	0	β (e₁/e₂)	0.5
α₂ (°)	22.5	Esbeltez (λ_g)	24
h (m)	0.125	r_{mec} (cm)	2.4
b (m)	0.125	Arm. Longitudinal	4Φ10
e₂/h	0.2	Arm. Transversal	Φ5c/15cm
CARGA APLICADA			
N_{max} (kN)		232.9	
N_u (kN)		179.5	
ACERO - ARM. LONGITUDINAL			
f_v (MPa)		501	
f_{max} (MPa)		635	
E_s (MPa)		209013	

DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
348	220	1065	666	-	-	-

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 1.50 metros desde el extremo inferior del soporte (sección central);
- Comportamiento pos-pico con rama de descenso y plastificación del acero en tracción y compresión en la sección de rotura;
- Deformación de cerca de 5‰ registrada por la banda extensométrica de hormigón más comprimida en rotura;

FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVAIJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S01	Serie	C5	Hormigonado	03/06/2009
Identificación	C5_α3_β2_εh1_λ24_fc30_ρ1	Tipo de flexión	Esviada	Rotura	01/07/2009

	CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO			
	f_c (MPa)	27.6	e₁ (m)	0
	ρ (%)	2.26	e₂ (m)	0.0125
	α₁ (°)	0	β (e₁/e₂)	0
	α₂ (°)	45	Esbeltez (λ_g)	24
	h (m)	0.125	r_{mec} (cm)	2.4
	b (m)	0.125	Arm. Longitudinal	4Φ10
	e₂/h	0.1	Arm. Transversal	Φ5c/15cm
	CARGA APLICADA			
	N_{max} (kN)		348.8	
N_u (kN)		327.4		
ACERO - ARM. LONGITUDINAL				
f_v (MPa)		501		
f_{max} (MPa)		635		
E_s (MPa)		209013		

DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
348	220	1065	666	-	-	-

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 1.20 metros desde el extremo inferior del soporte;
- Se observó salto de recubrimiento y pandeo local de la armadura de compresión en la esquina más comprimida de la sección de rotura del soporte;
- En carga máxima todas las secciones instrumentadas estaban en compresión y la rotura se produjo poco después no presentando rama de descenso en el comportamiento pos-pico;

FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVAIJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

SopORTE	S02	Serie	C5	Hormigonado	05/06/2009
Identificación	C5_α3_β2_εh2_λ24_fc30_ρ1	Tipo de flexión	Esviada	Rotura	03/07/2009

		CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO			
		f_c (MPa)	29.1	e₁ (m)	0
ρ (%)	2.26	e₂ (m)	0.025		
α₁ (°)	0	β (e₁/e₂)	0		
α₂ (°)	45	Esbeltez (λ_g)	24		
h (m)	0.125	r_{mec} (cm)	2.4		
b (m)	0.125	Arm. Longitudinal	4φ10		
e₂/h	0.2	Arm. Transversal	φ5c/15cm		
CARGA APLICADA					
N_{max} (kN)		244.5			
N_u (kN)		188.2			
ACERO - ARM. LONGITUDINAL					
f_v (MPa)		501			
f_{max} (MPa)		635			
E_s (MPa)		209013			

DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
348	220	1065	666	-	-	-

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 1.20 metros desde el extremo inferior del soporte;
- Comportamiento pos-pico con importante rama de descenso hasta la rotura;
- Deformada respecto a los ejes (x,y) simétrica con flechas muy parecidas para cada nivel de carga;
- Plastificación de las armaduras en las esquina de tracción y de compresión en la sección de rotura.

FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVAIJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S03	Serie	C5	Hormigonado	11/06/2009
Identificación	C5_α3_β2_εh3_λ24_fc30_ρ1	Tipo de flexión	Esviada	Rotura	09/07/2009

	CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO			
	f_c (MPa)	29.1	e₁ (m)	0
	ρ (%)	2.26	e₂ (m)	0.05
	α₁ (°)	0	β (e₁/e₂)	0
	α₂ (°)	45	Esbeltez (λ_g)	24
	h (m)	0.125	r_{mec} (cm)	2.4
	b (m)	0.125	Arm. Longitudinal	4Φ10
	e₂/h	0.4	Arm. Transversal	Φ5c/15cm
	CARGA APLICADA			
	N_{max} (kN)		172.9	
N_u (kN)		65.8		
ACERO - ARM. LONGITUDINAL				
f_v (MPa)		501		
f_{max} (MPa)		635		
E_s (MPa)		209013		

DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
348	220	1065	666	-	-	-

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 1.20 metros desde el extremo inferior del soporte;
- Comportamiento pos-pico con importante rama de descenso hasta la rotura;
- Deformada respecto a los ejes (x,y) simétrica con flechas muy parecidas para cada nivel de carga;
- Plastificación de las armaduras en las esquina de tracción y de compresión en la sección de rotura;
- Todas las armaduras con excepción de la ubicada en la esquina más comprimida presentaban deformaciones de tracción en rotura.

FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVAIJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

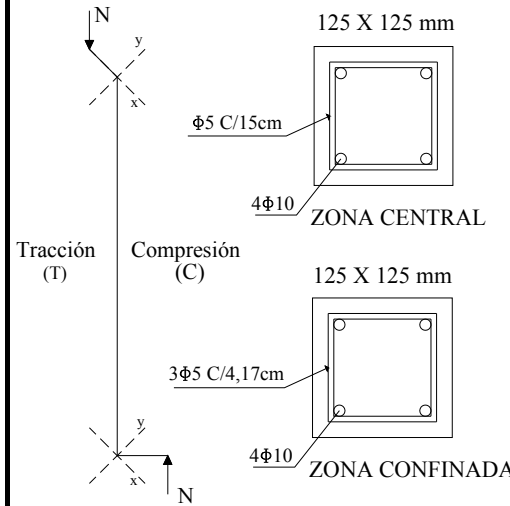
FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S04	Serie	C5	Hormigonado	16/06/2009
Identificación	C5_α3_β3_εh1_λ24_fc30_ρ1	Tipo de flexión	Esviada	Rotura	14/07/2009

CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO			
f_c (MPa)	31.3	e₁ (m)	-0.00625
ρ (%)	2.26	e₂ (m)	0.0125
α₁ (°)	0	β (e₁/e₂)	-0.5
α₂ (°)	45	Esbeltez (λ_o)	24
h (m)	0.125	r_{mec} (cm)	2.4
b (m)	0.125	Arm. Longitudinal	4φ10
e₂/h	0.1	Arm. Transversal	φ5c/15cm

CARGA APLICADA	
N_{max} (kN)	389.8
N_u (kN)	355.9

ACERO - ARM. LONGITUDINAL	
f_v (MPa)	501
f_{max} (MPa)	635
E_s (MPa)	209013



DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
348	220	1065	666	-	-	-

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 1.50 metros desde el extremo inferior del soporte (sección central);
- Rotura frágil con salto de recubrimiento en la región de rotura con pandeo local de la armadura más comprimida (esquina más comprimida);
- En carga máxima todas las secciones instrumentadas presentaban comportamiento de compresión.

FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVAIJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S05	Serie	C5	Hormigonado	16/10/2009
Identificación	C5_α3_β1_εh1_λ24_fc30_ρ1	Tipo de flexión	Esviada	Rotura	13/11/2009

	CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO			
	f_c (MPa)	25.9	e₁ (m)	0.00625
	ρ (%)	2.26	e₂ (m)	0.0125
	α₁ (°)	0	β (e₁/e₂)	0.5
	α₂ (°)	45	Esbeltez (λ_g)	24
	h (m)	0.125	r_{mec} (cm)	2.4
	b (m)	0,125	Arm. Longitudinal	4Φ10
	e₂/h	0.1	Arm. Transversal	Φ5c/15cm
	CARGA APLICADA			
	N_{max} (kN)		318.3	
N_u (kN)		232.6		
ACERO - ARM. LONGITUDINAL				
f_v (MPa)		501		
f_{max} (MPa)		635		
E_s (MPa)		209013		

DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
348	220	1065	666	-	-	-

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 1.50 metros desde el extremo inferior del soporte (sección central);
- En el comportamiento pos-pico se pudo observar la rama de descenso hasta llegar a rotura;
- Leve pandeo local de la armadura más comprimida en la sección de rotura;
- Pocas fisuras distribuidas en las caras de tracción.

FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVAIJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S01	Serie	C6	Hormigonado	21/10/2009
Identificación	C6_α4_β1_eh1_λ24_fc30_ρ1	Tipo de flexión	Esviada	Rotura	18/11/2009

	CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO			
	f_c (MPa)	33.3	e₁ (m)	0.00625
	ρ (%)	2.26	e₂ (m)	0.0125
	α₁ (°)	22.5	β (e₁/e₂)	0.5
	α₂ (°)	45	Esbeltez (λ_g)	24
	h (m)	0.125	r_{mec} (cm)	2.4
	b (m)	0.125	Arm. Longitudinal	4φ10
	e₂/h	0.1	Arm. Transversal	φ5c/15cm
	CARGA APLICADA			
	N_{max} (kN)		313.7	
N_u (kN)		207.8		
ACERO - ARM. LONGITUDINAL				
f_v (MPa)		501		
f_{max} (MPa)		635		
E_s (MPa)		209013		

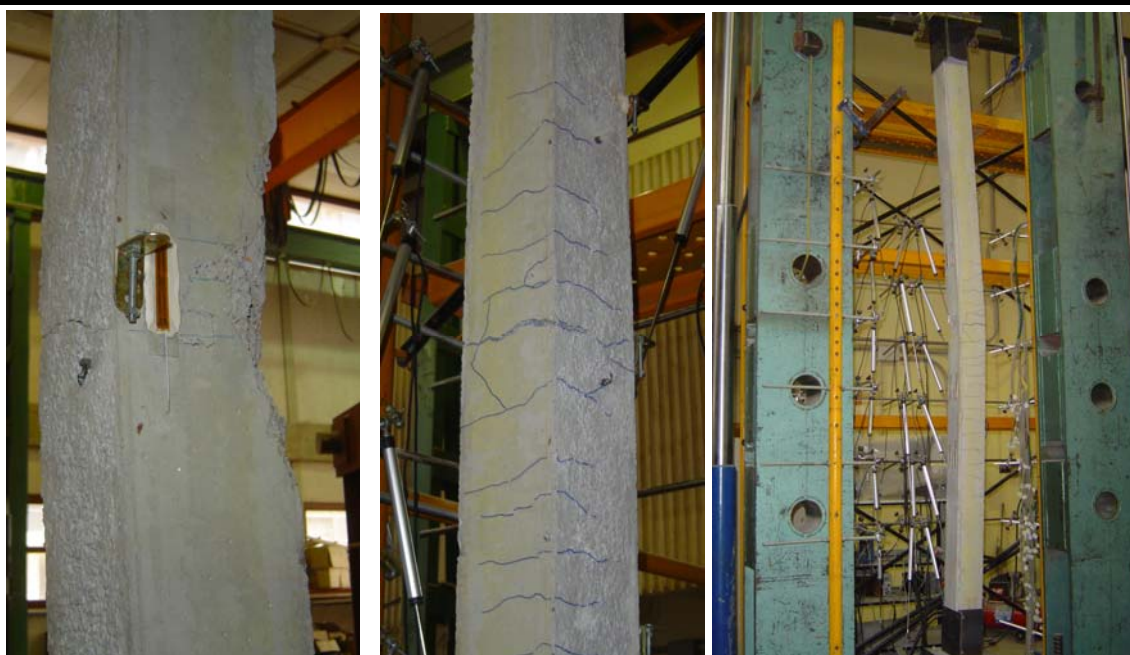
DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
348	220	1065	666	-	-	-

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 1.50 metros desde el extremo inferior del soporte (sección central);
- En el comportamiento pos-pico se observó una rama de descenso antes que se produjera la rotura de la pieza;
- Se observó un leve pandeo local de la armadura en la esquina más comprimidas de la pieza en la sección de rotura.

FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVAIJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S02	Serie	C6	Hormigonado	29/10/2009
Identificación	C6_α4_β1_εh2_λ24_fc30_ρ1	Tipo de flexión	Esviada	Rotura	26/11/2009

<p>Tracción (T) Compresión (C)</p> <p>125 X 125 mm 4Φ10 ZONA CENTRAL</p> <p>125 X 125 mm 3Φ5 C/4,17cm 4Φ10 ZONA CONFINADA</p>	CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO			
	f_c (MPa)	28.3	e₁ (m)	0.0125
ρ (%)	2.26	e₂ (m)	0.025	
α₁ (°)	22.5	β (e₁/e₂)	0.5	
α₂ (°)	45	Esbeltez (λ_g)	24	
h (m)	0.125	r_{mec} (cm)	2.4	
b (m)	0.125	Arm. Longitudinal	4Φ10	
e₂/h	0.2	Arm. Transversal	Φ5c/15cm	
CARGA APLICADA				
N_{max} (kN)		226.7		
N_u (kN)		188.4		
ACERO - ARM. LONGITUDINAL				
f_v (MPa)		501		
f_{max} (MPa)		635		
E_s (MPa)		209013		

DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
348	220	1065	666	-	-	-

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 1.50 metros desde el extremo inferior del soporte (sección central);
- En el comportamiento pos-pico se observó una pequeña rama de descenso antes que se produjera la rotura de la pieza;
- Se observó un leve pandeo local de la armadura en la esquina más comprimidas de la pieza en la sección de rotura.

FOTOS REGISTRADAS



ESTUDIO TEÓRICO EXPERIMENTAL DE SOPORTES ESBELTOS DE HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA SOMETIDOS A COMPRESIÓN CON EXCENTRICIDADES Y ÁNGULOS DE ESVAIJE DESIGUALES EN SUS EXTREMOS

FICHA TÉCNICA DE LOS ENSAYOS

Soporte	S03	Serie	C6	Hormigonado	25/06/2009
Identificación	C6_α4_β3_εh2_λ24_fc30_ρ1	Tipo de flexión	Esviada	Rotura	23/07/2009

	CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO			
	f_c (MPa)	27.0	e₁ (m)	-0.0125
ρ (%)	2.26	e₂ (m)	0.025	
α₁ (°)	22.5	β (e₁/e₂)	-0.5	
α₂ (°)	45	Esbeltez (λ_g)	24	
h (m)	0.125	r_{mec} (cm)	2.4	
b (m)	0.125	Arm. Longitudinal	4φ10	
e₂/h	0.2	Arm. Transversal	φ5c/15cm	
CARGA APLICADA				
N_{max} (kN)		299.2		
N_u (kN)		229.3		
ACERO - ARM. LONGITUDINAL				
f_v (MPa)		501		
f_{max} (MPa)		635		
E_s (MPa)		209013		

DOSIFICACIÓN - HORMIGÓN (kg/m³)

Cemento	Agua	Arena 0/4	Grava 4/7	Humo de sílice	Plastificante Pozzolith 651N	Superplastificante Glenium C355
348	220	1065	666	-	-	-

OBSERVACIONES

- La rotura se produjo a 1.50 metros desde el extremo inferior del soporte (sección central);
- En el comportamiento pos-pico se observó una rama de descenso antes que se produjera la rotura de la pieza;
- Se observó un leve pandeo local de la armadura en la esquina más comprimidas de la pieza en la sección de rotura.

FOTOS REGISTRADAS



Anejo B.

Medidas directas de los ensayos

En este anejo se exponen los resultados directos obtenidos para todos los soportes del programa experimental, con la representación de las gráficas obtenidas a partir de la salida de datos del programa de adquisición de datos utilizado durante los ensayos. En primer lugar se presentan los resultados de los soportes sometidos a esfuerzos de flexo-compresión recta y a continuación los resultados de los soportes sometidos a esfuerzos de flexo-compresión esviada.

Para los ensayos a flexo-compresión recta se presentan:

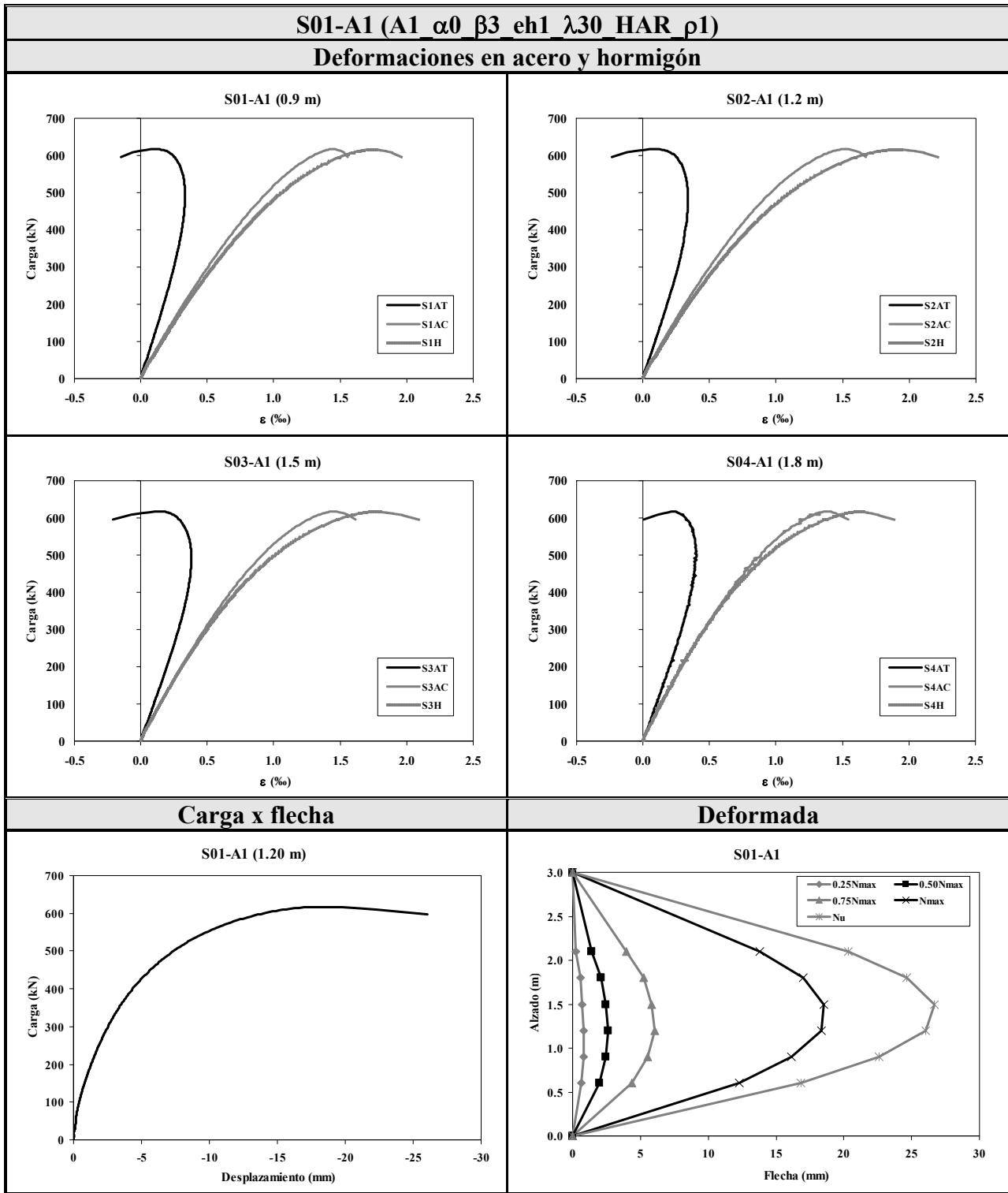
- los registros de las deformaciones en las barras de acero y en la cara comprimida del hormigón en las 4 secciones instrumentadas con bandas extensométricas, situadas desde el borde inferior a 0.90, 1.20, 1.50 y 1.80 metros. En el caso de

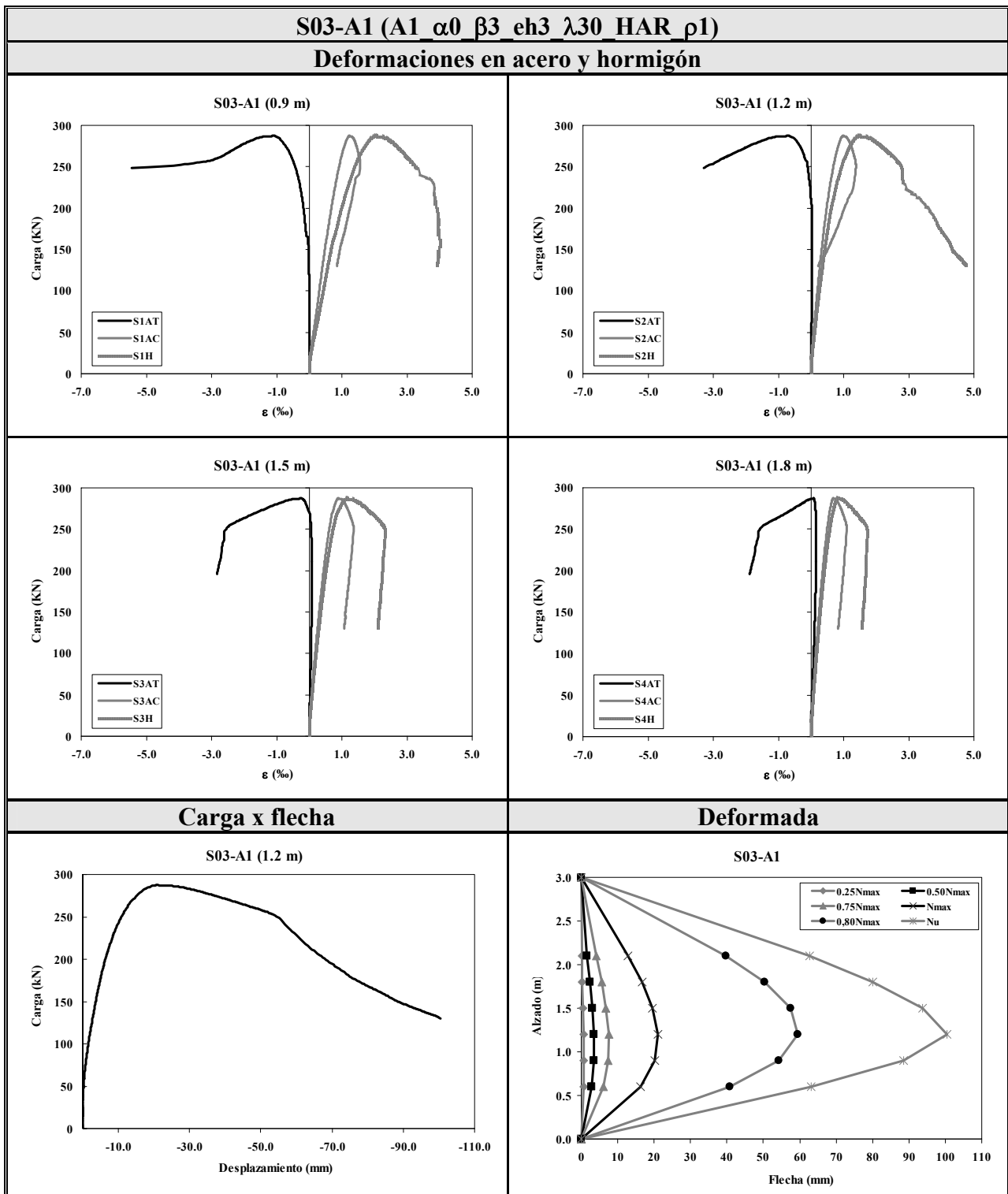
- las flechas registradas por los captadores de desplazamiento en la sección instrumentada de mayor flecha en carga última;
- y las deformadas de los soportes a distintos niveles de carga registrada por los captadores de desplazamiento ubicados a 0.60, 0.90, 1.20, 1.50, 1.80, 2.10, metros medidos desde el extremo inferior del soporte.

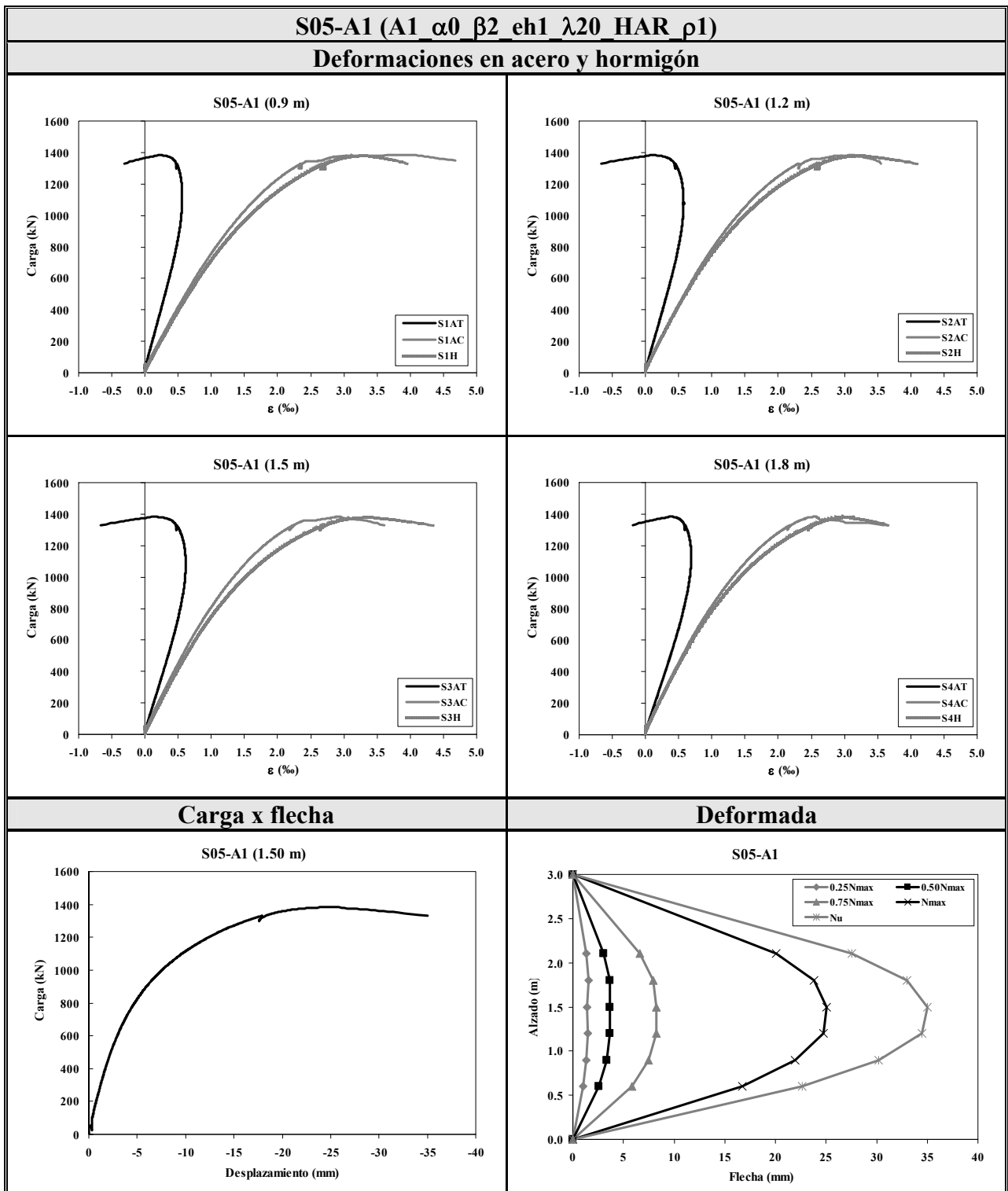
Para los ensayos a flexo-compresión esviada se presentan:

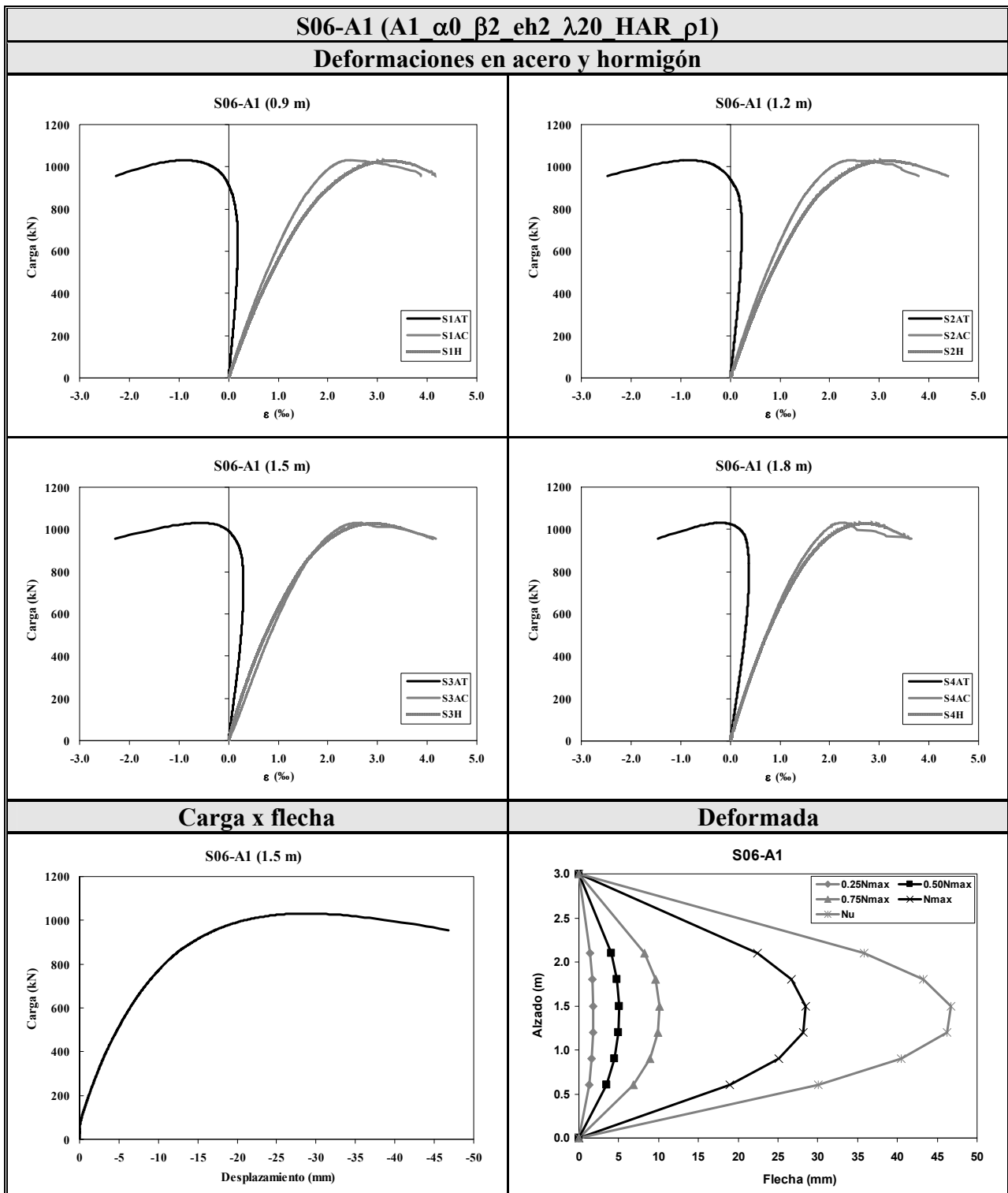
- la media de las deformaciones registradas por las dos bandas extensométricas ubicadas en cada una de las 4 barras de la armadura longitudinal en la sección más desfavorable frente a deformaciones, y las deformaciones en el hormigón registradas por las 4 bandas ubicadas en las dos caras más comprimidas de la pieza en la misma sección;
- el desplazamiento del centro de gravedad de la pieza respecto a los ejes coordenados (x, y) obtenidos a partir de la triangulación de las medidas iniciales y finales registradas por los captadores de desplazamiento en la sección de máximo desplazamiento bajo carga última;
- las deformadas del centro de gravedad de los soportes a distintos niveles de carga respecto a los ejes coordenados (x, y);
- el desplazamiento en planta de la sección transversal para la sección de máximo desplazamiento bajo carga última;
- los valores obtenidos del ajuste por mínimos cuadrados de los valores registrados por las 8 bandas extensométricas ubicadas en la sección crítica (máximo momento total) para la situación de carga máxima (N_{max}):
 - curvaturas respecto a los dos ejes coordenados (c_x, c_y);
 - deformación en el centro de gravedad de la sección (ϵ_0);
 - deformación máxima del hormigón en compresión ($\epsilon_{C,max}$);
 - ángulo de inclinación de la fibra neutra (α_{FN}).

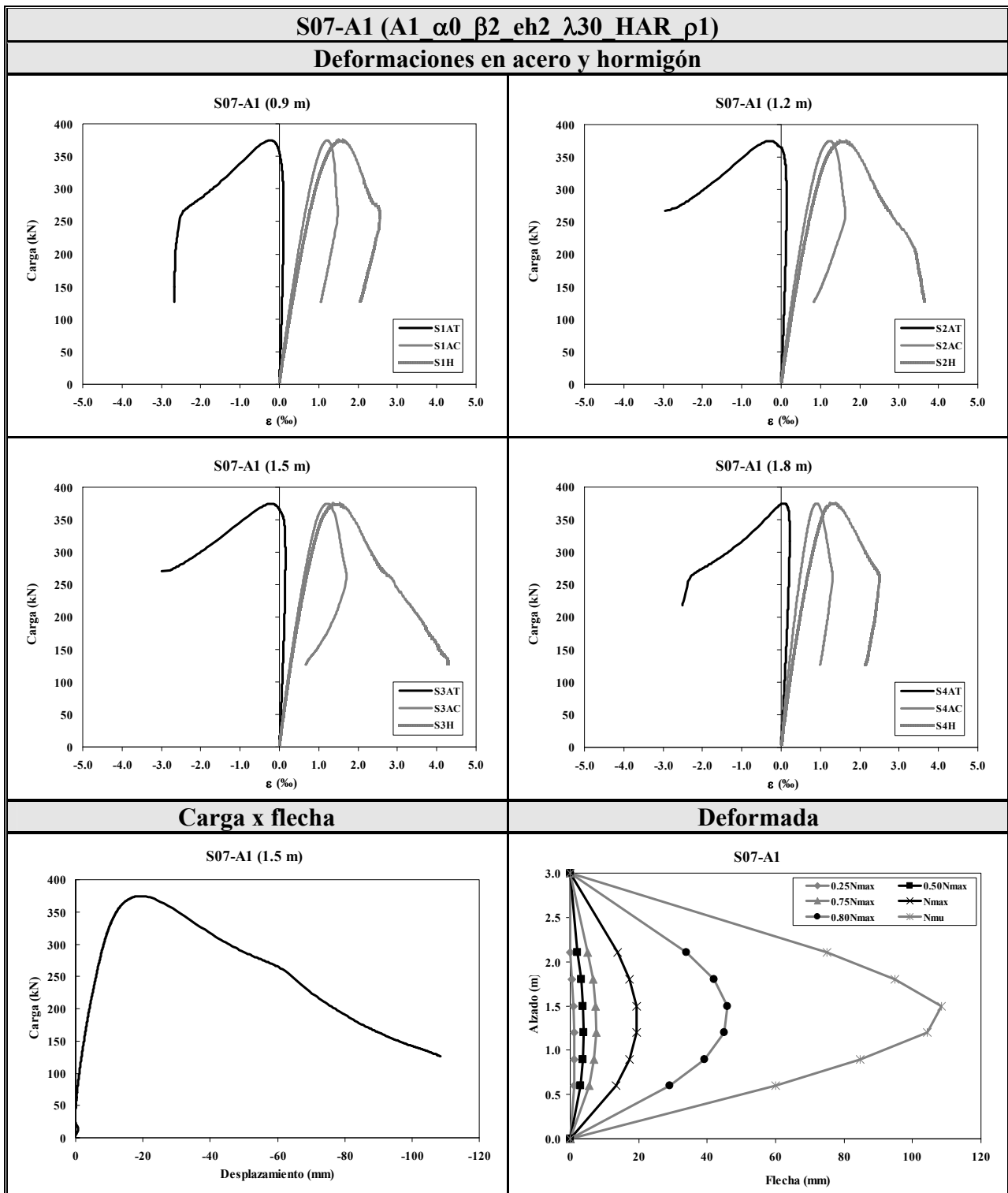
B.1. Flexo-compresión recta:

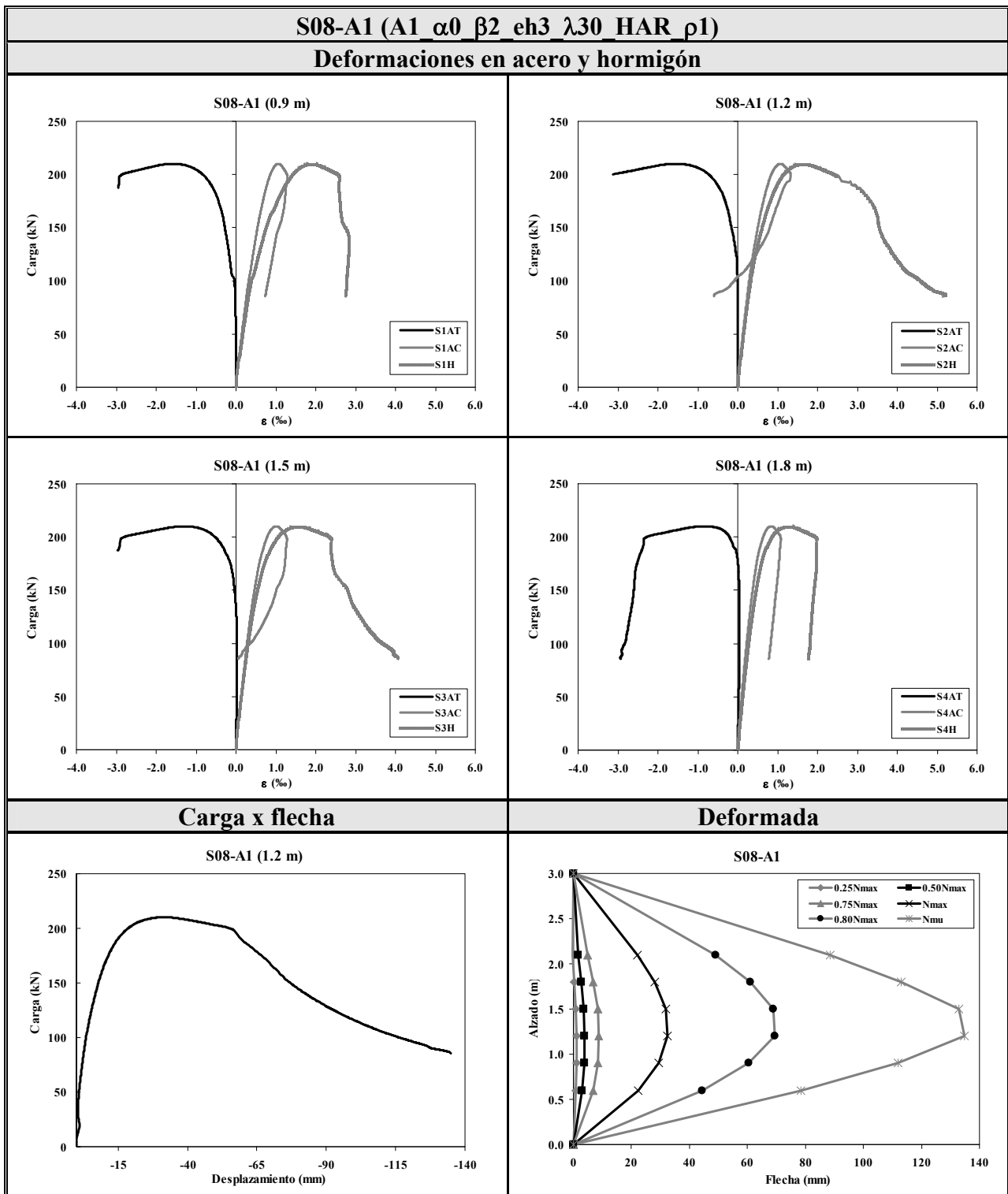


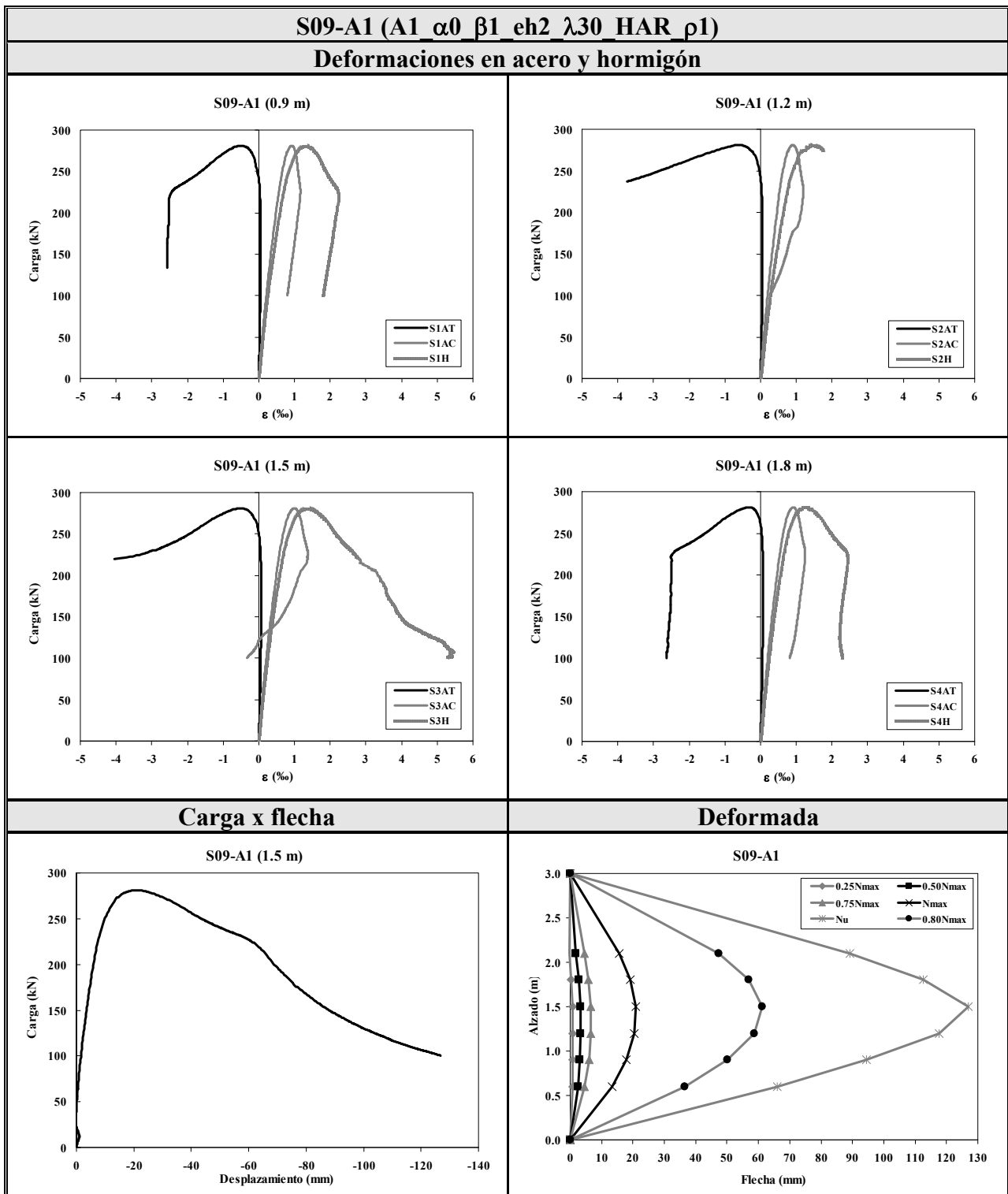


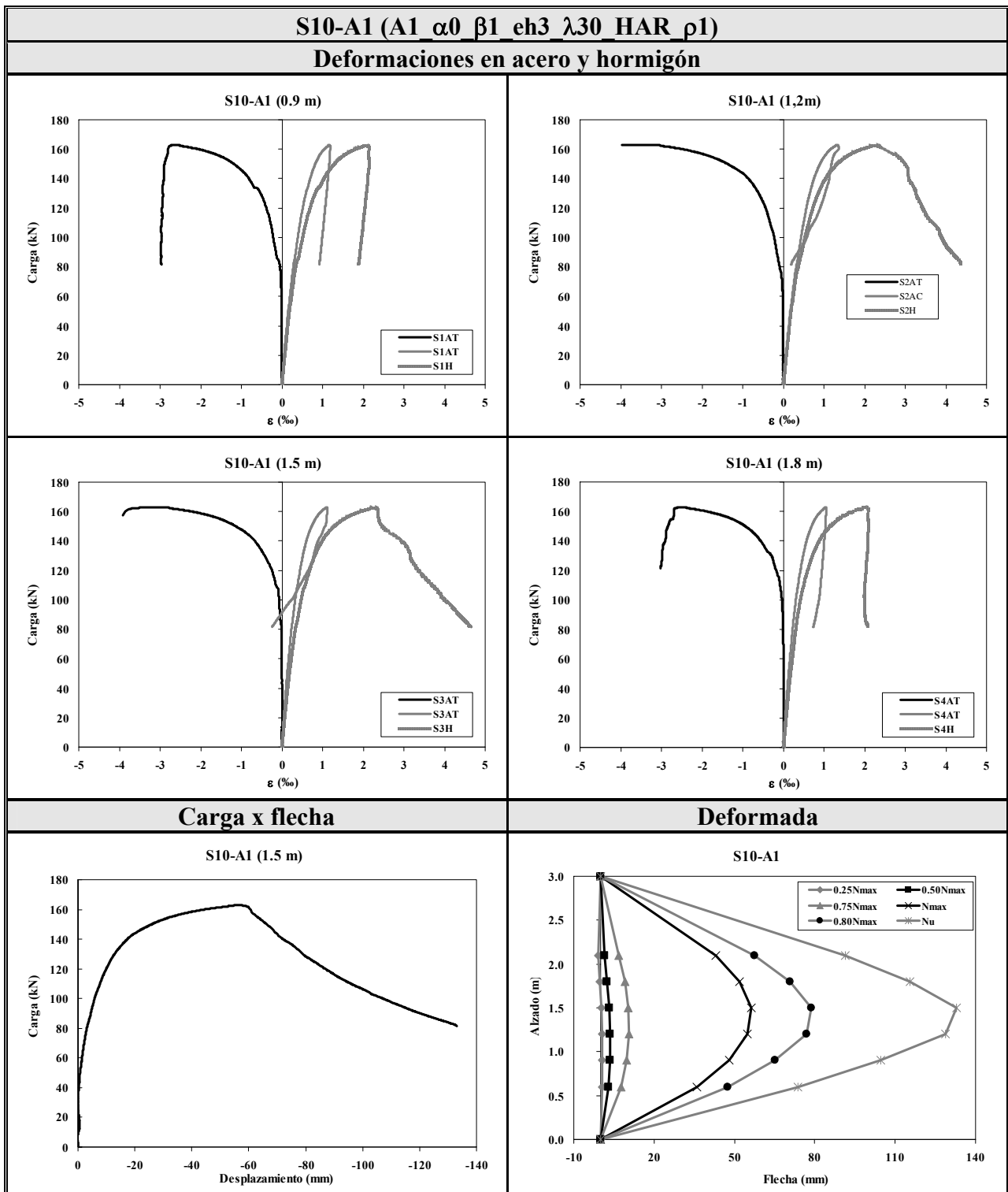


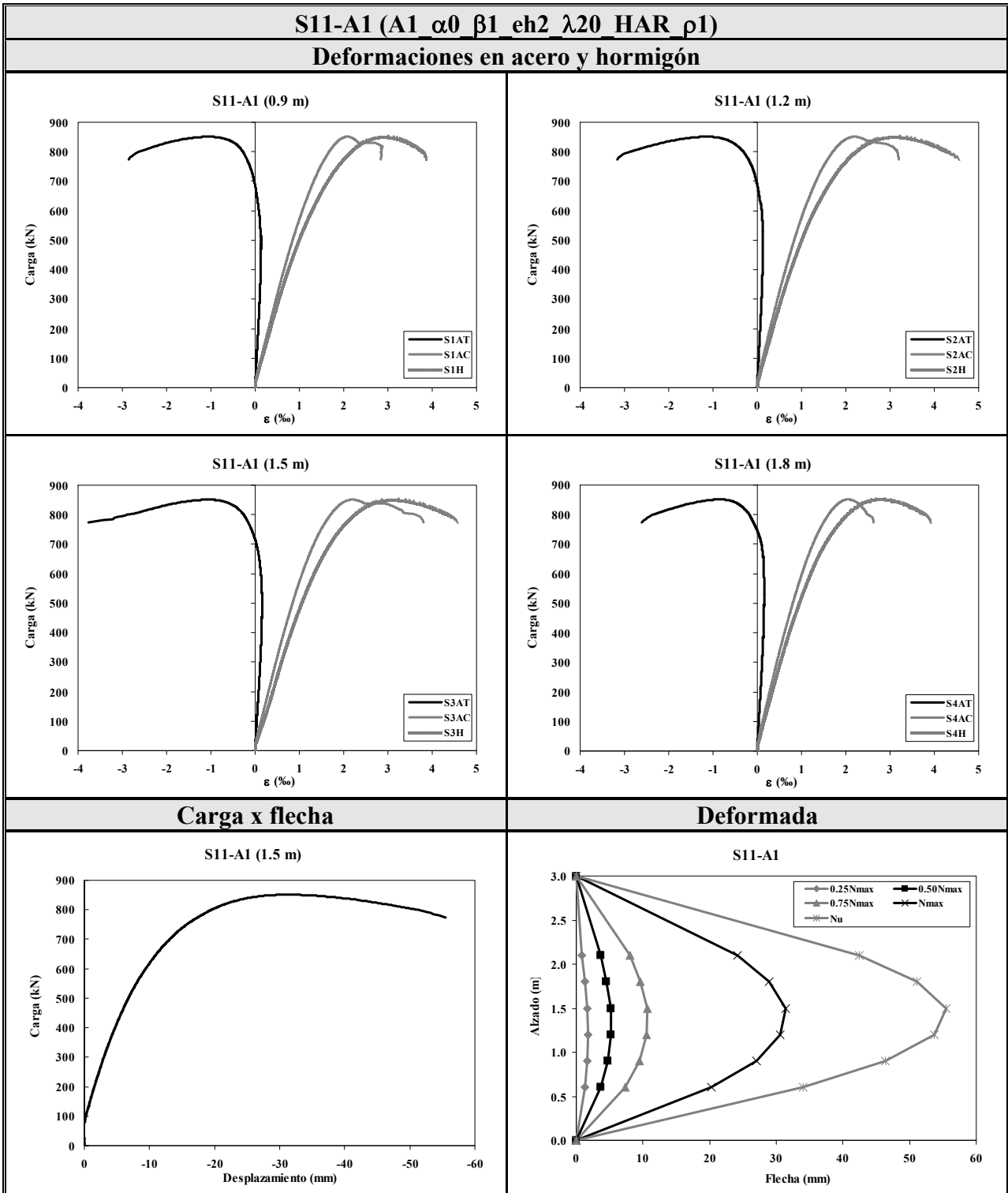


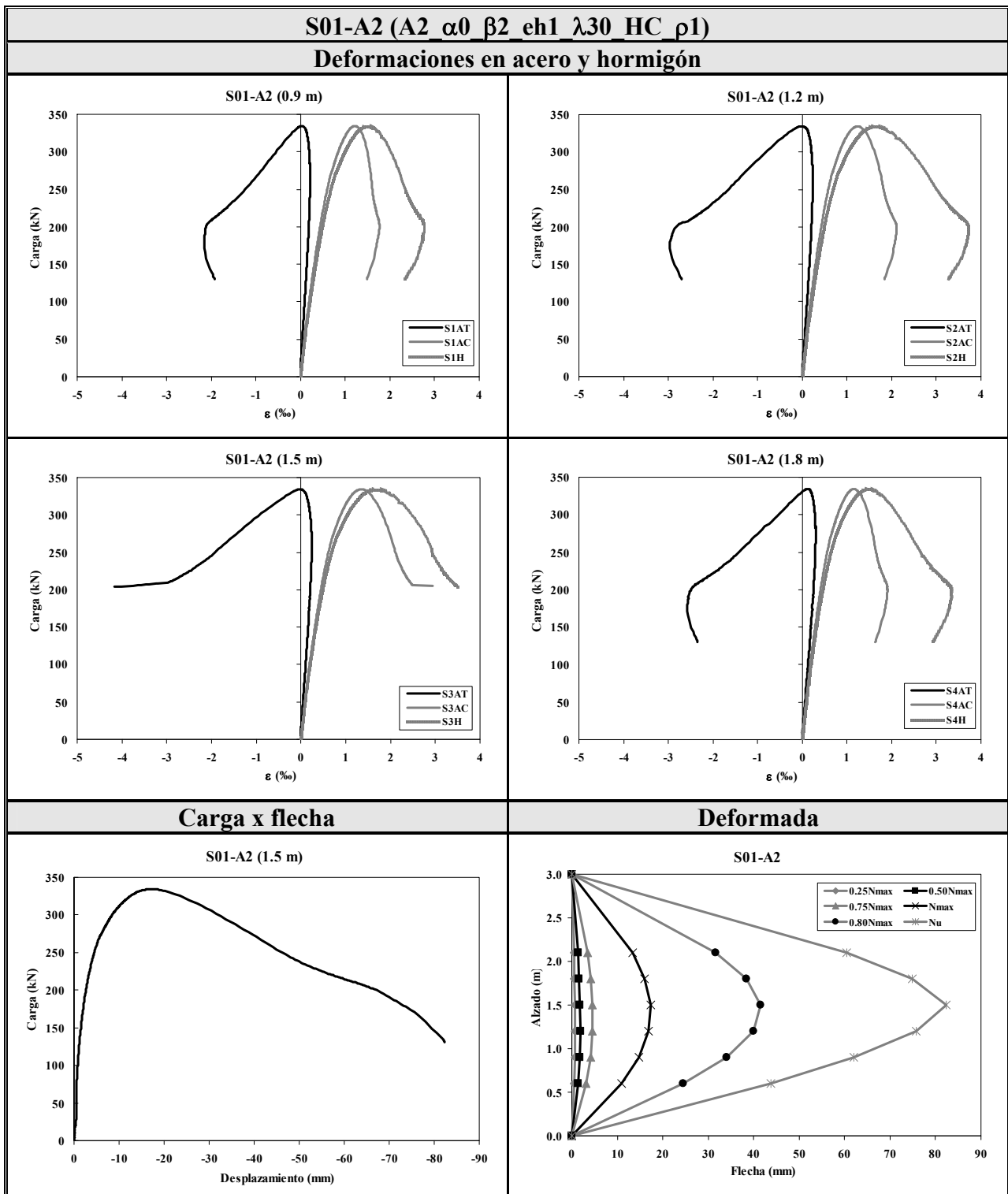


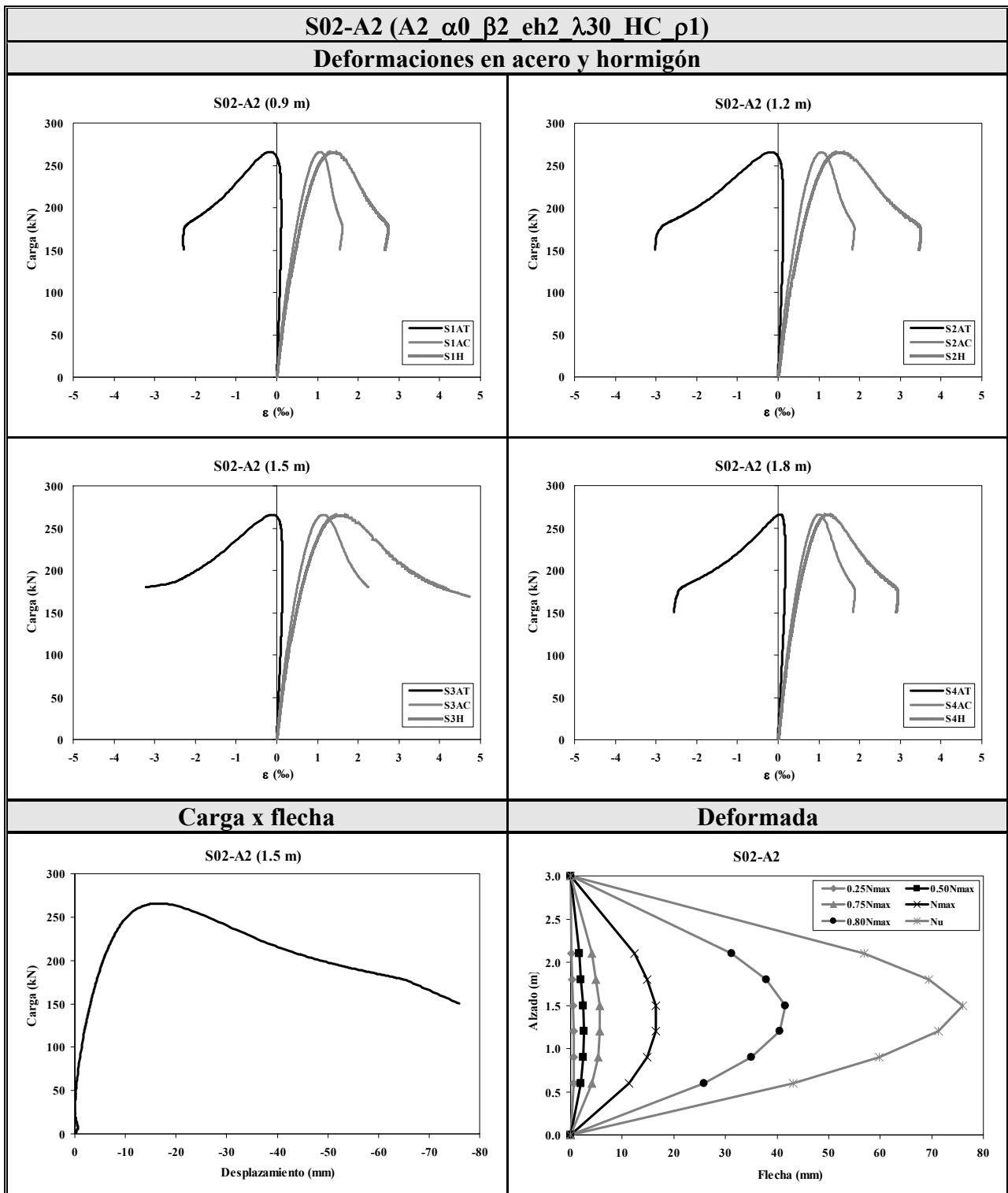


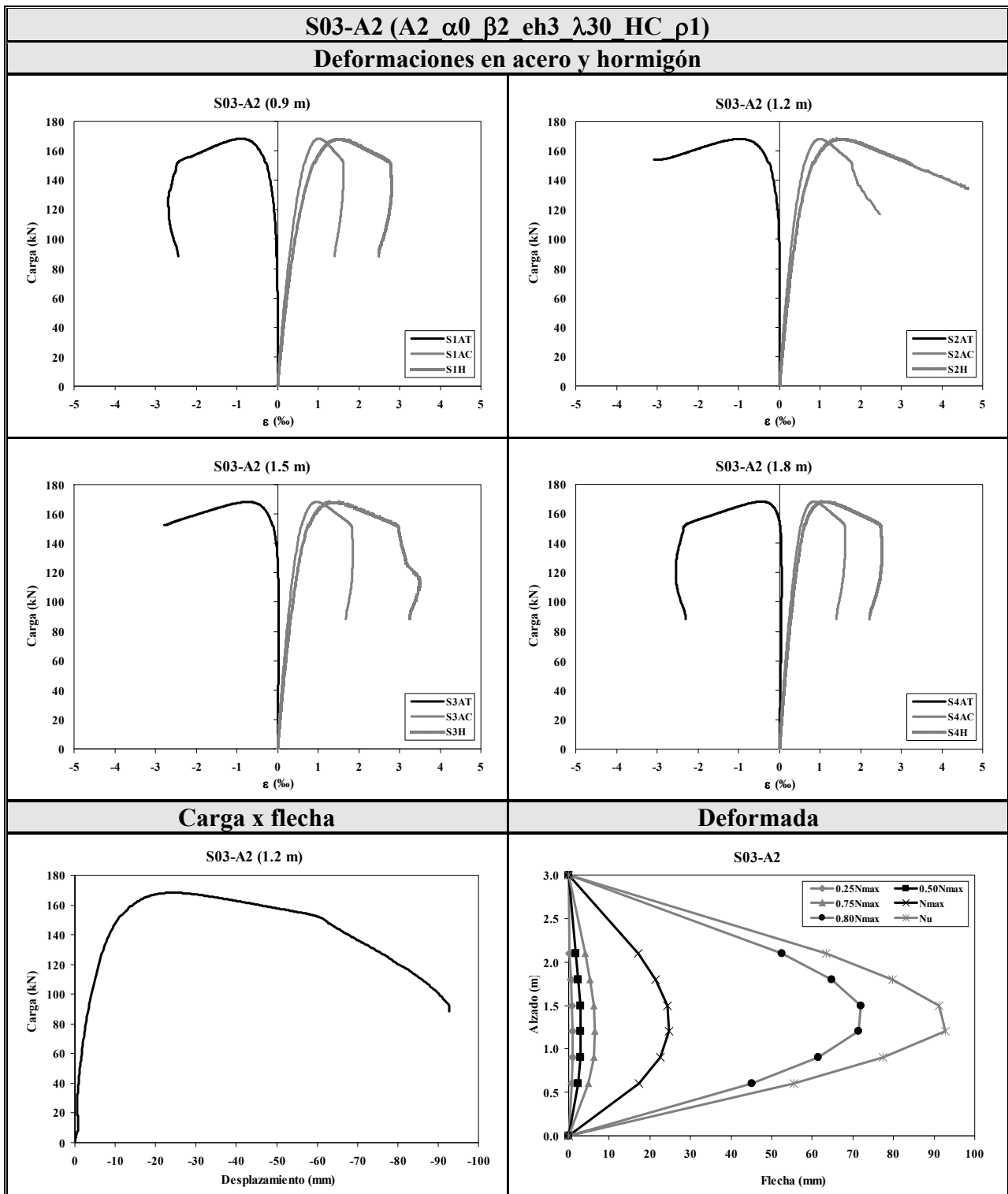


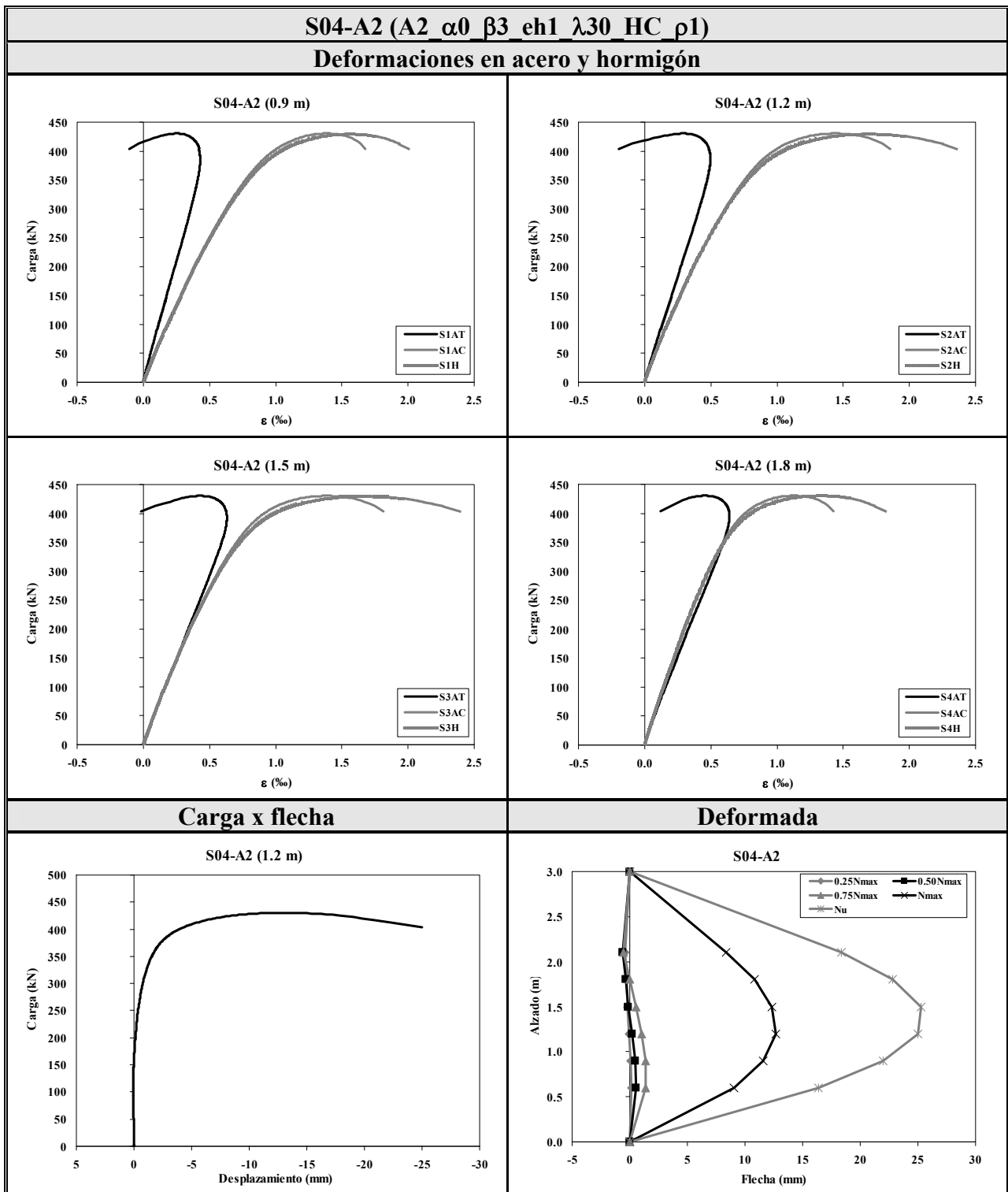


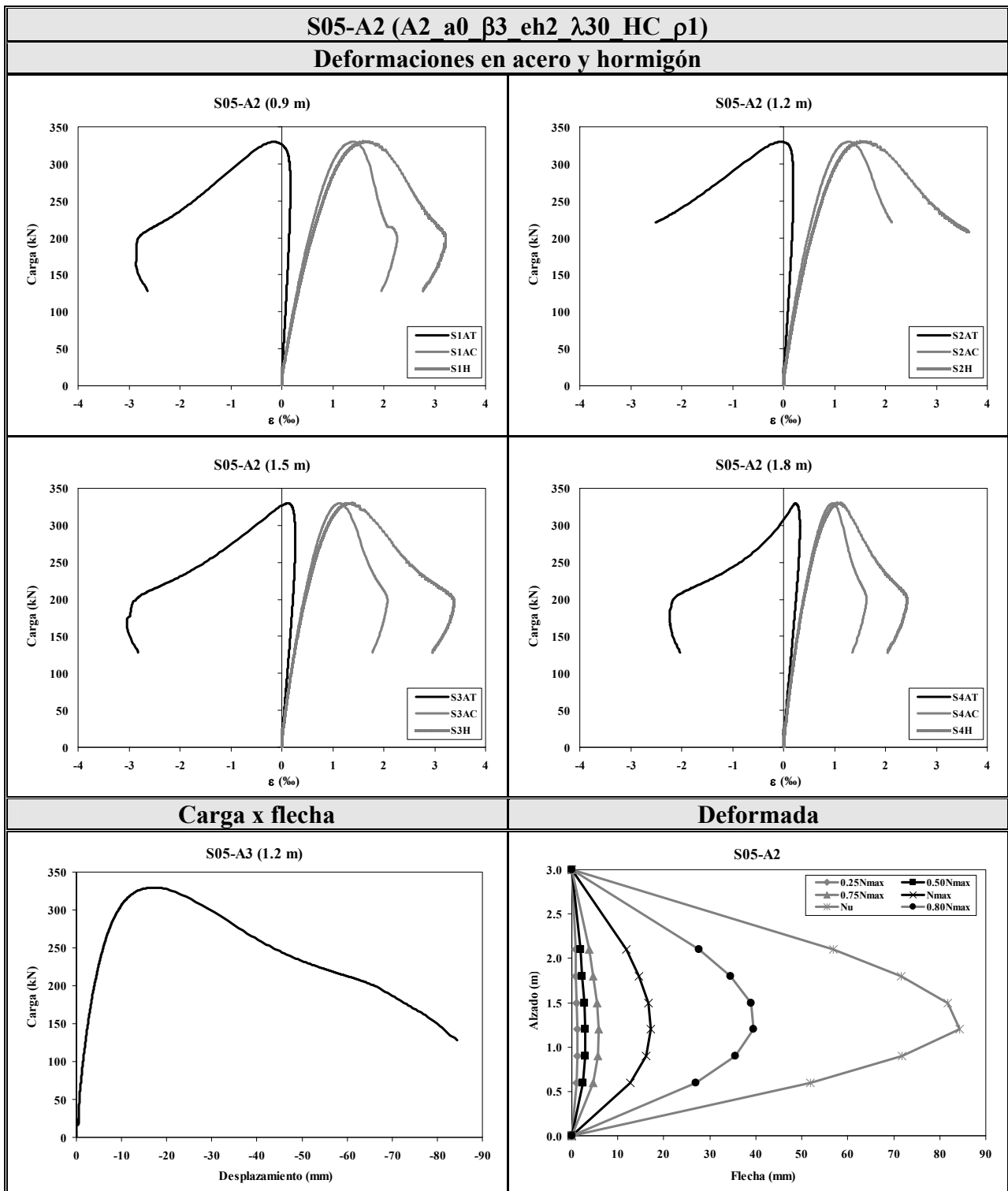


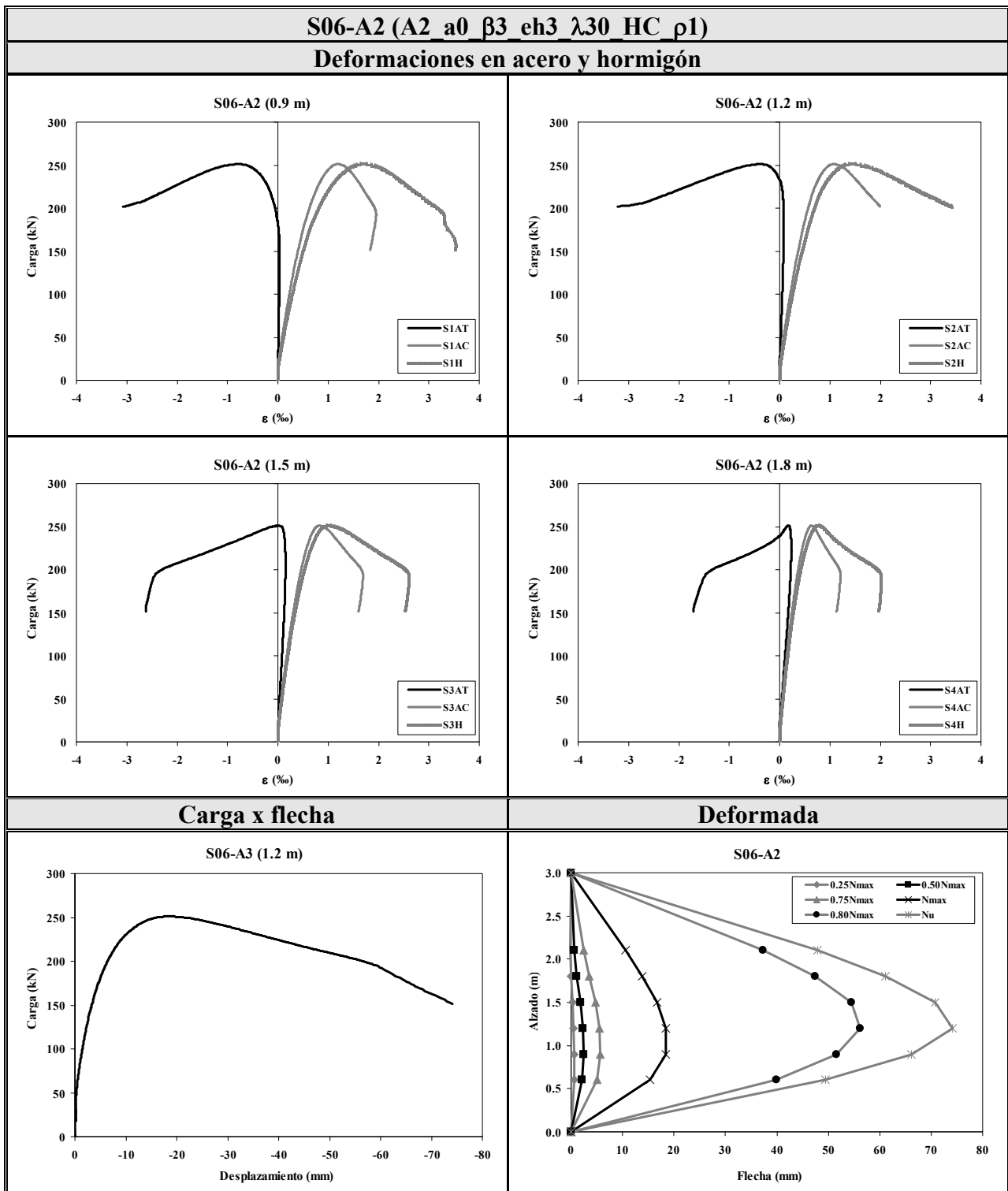


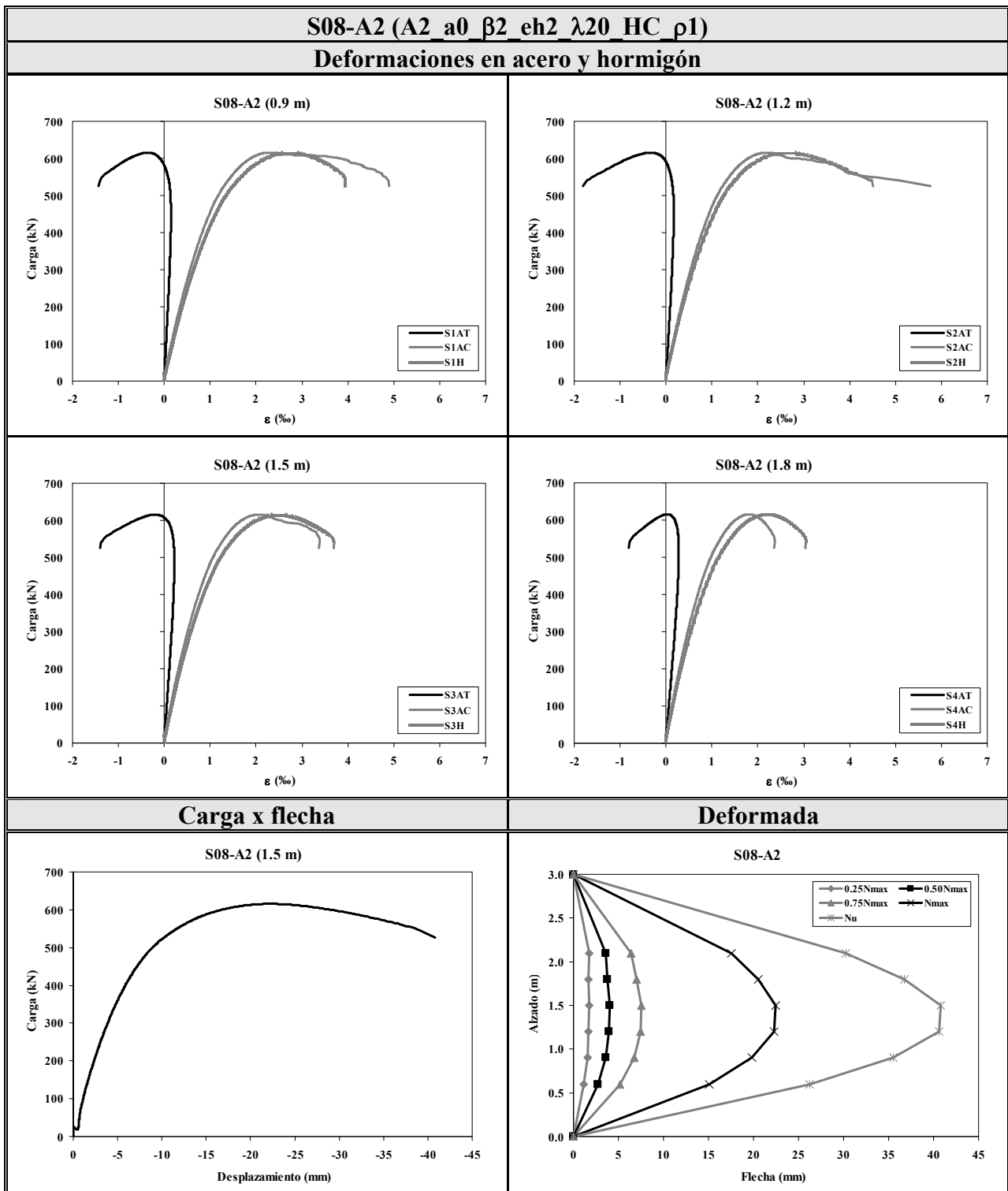


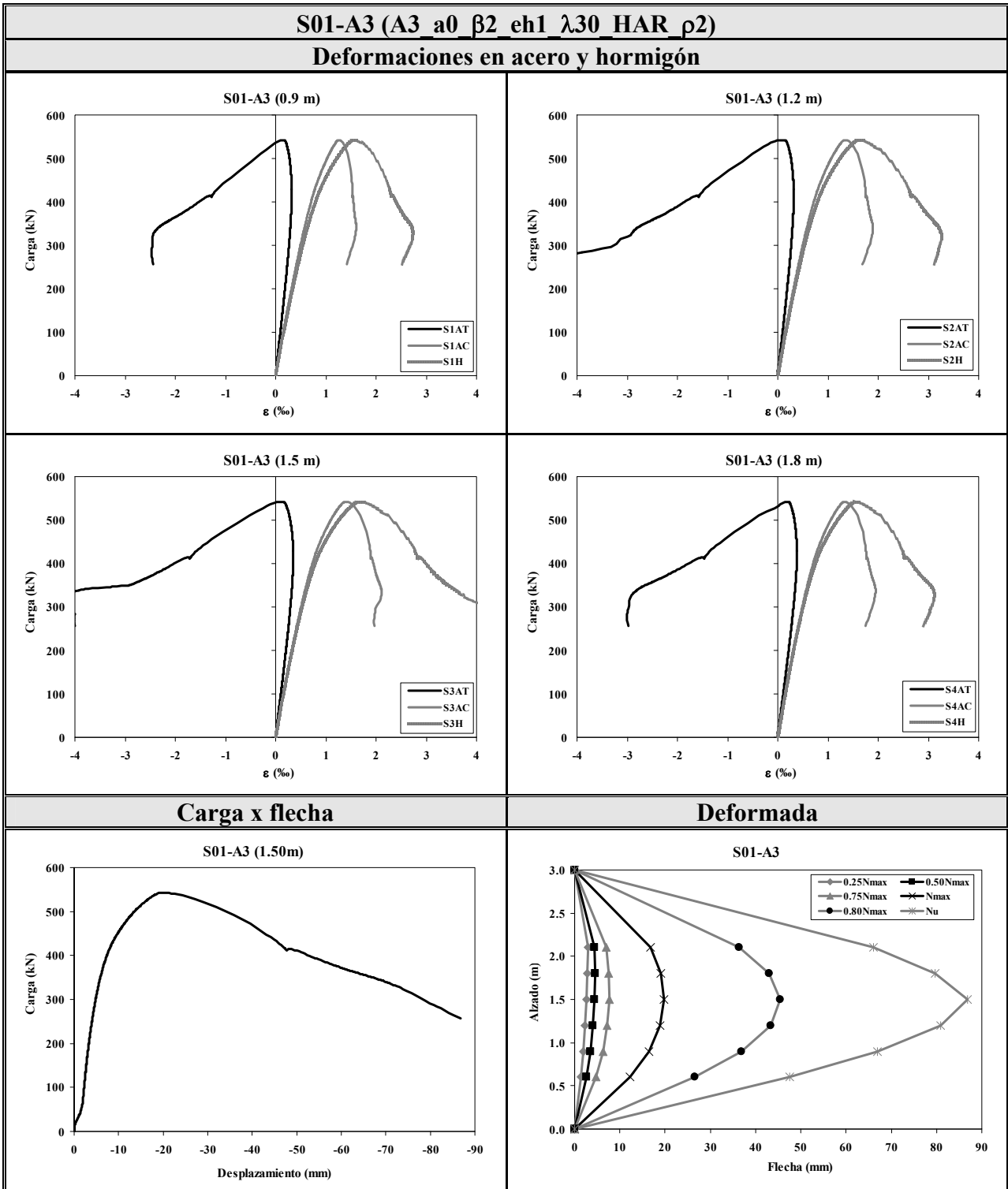


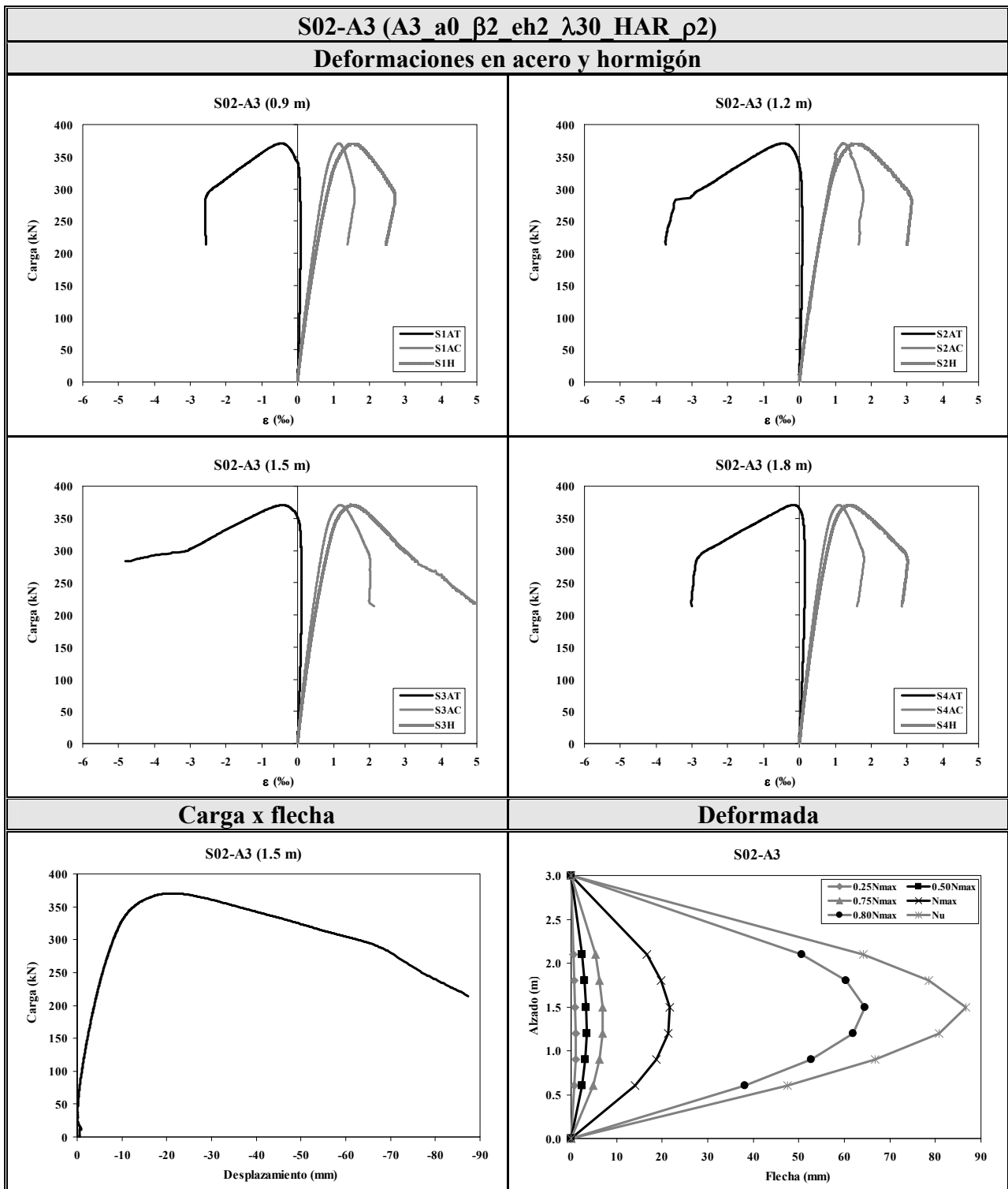


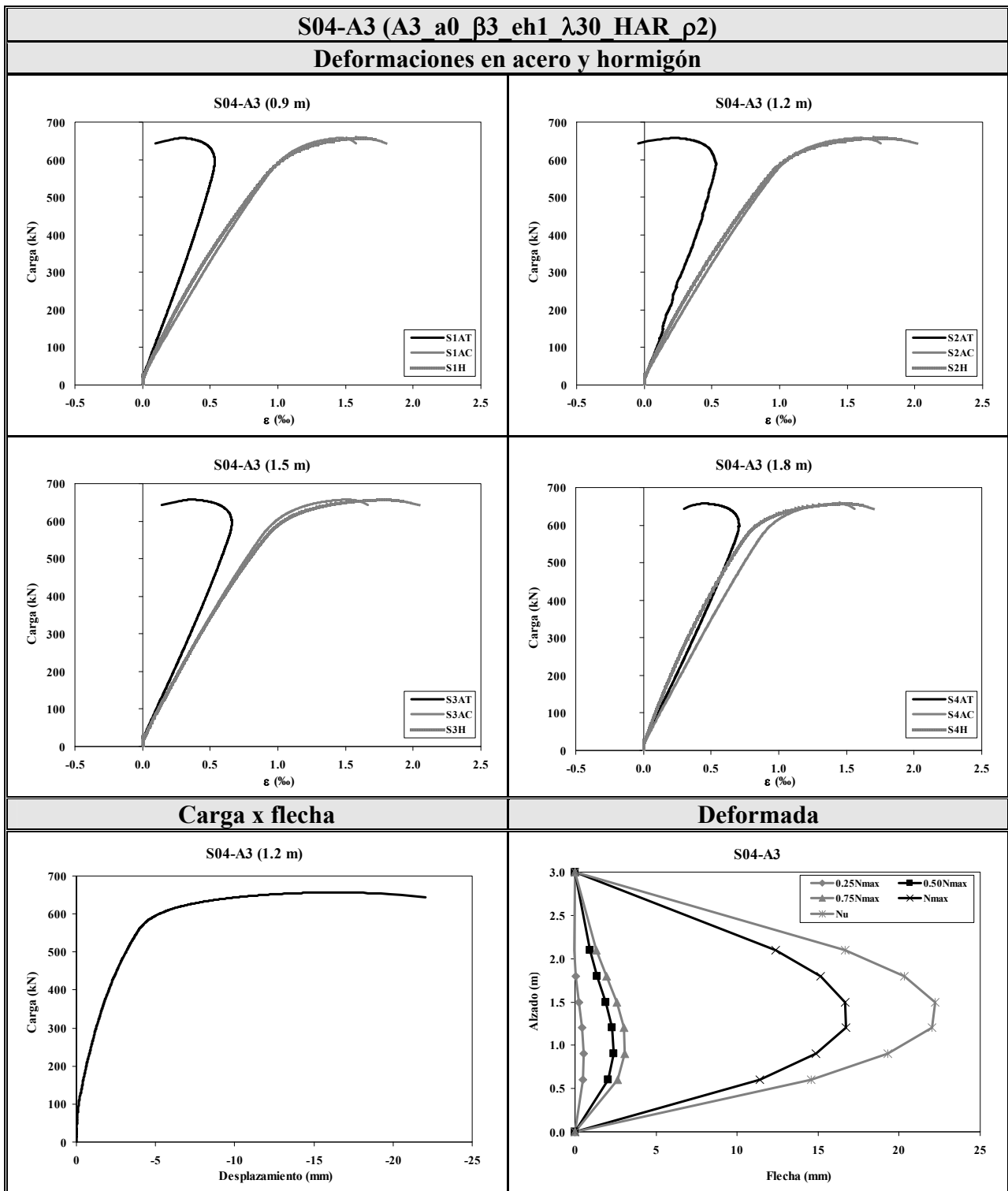


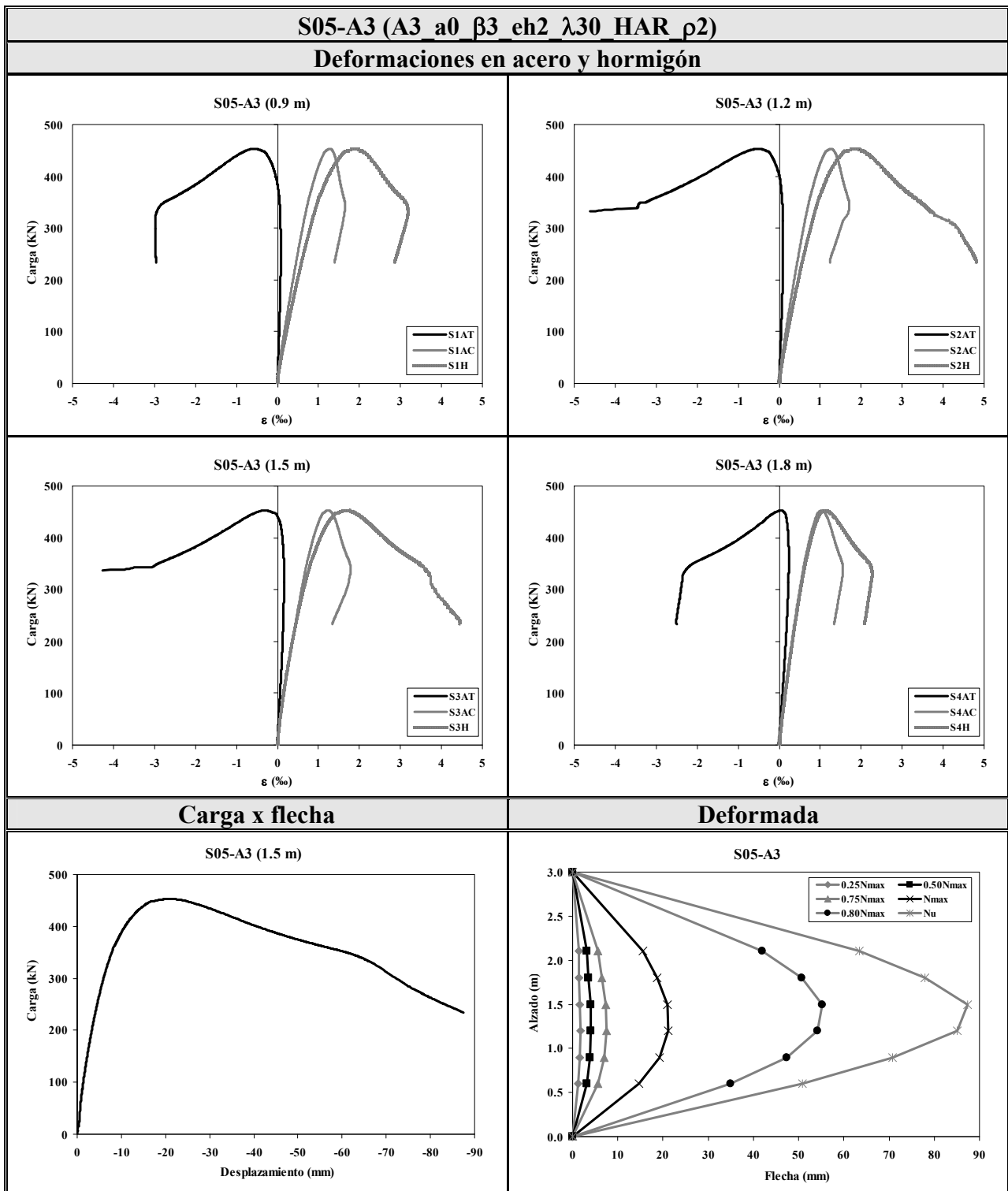


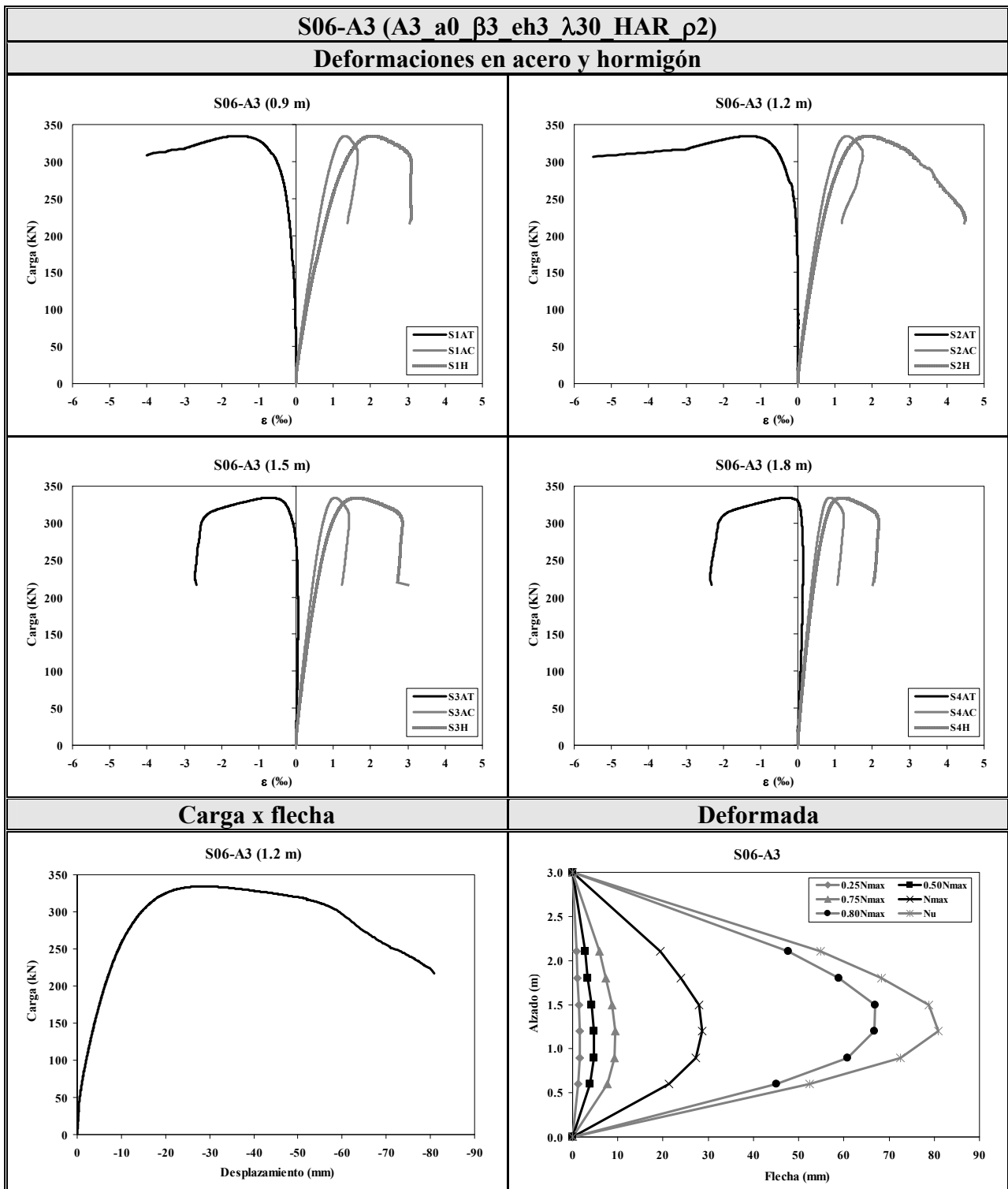


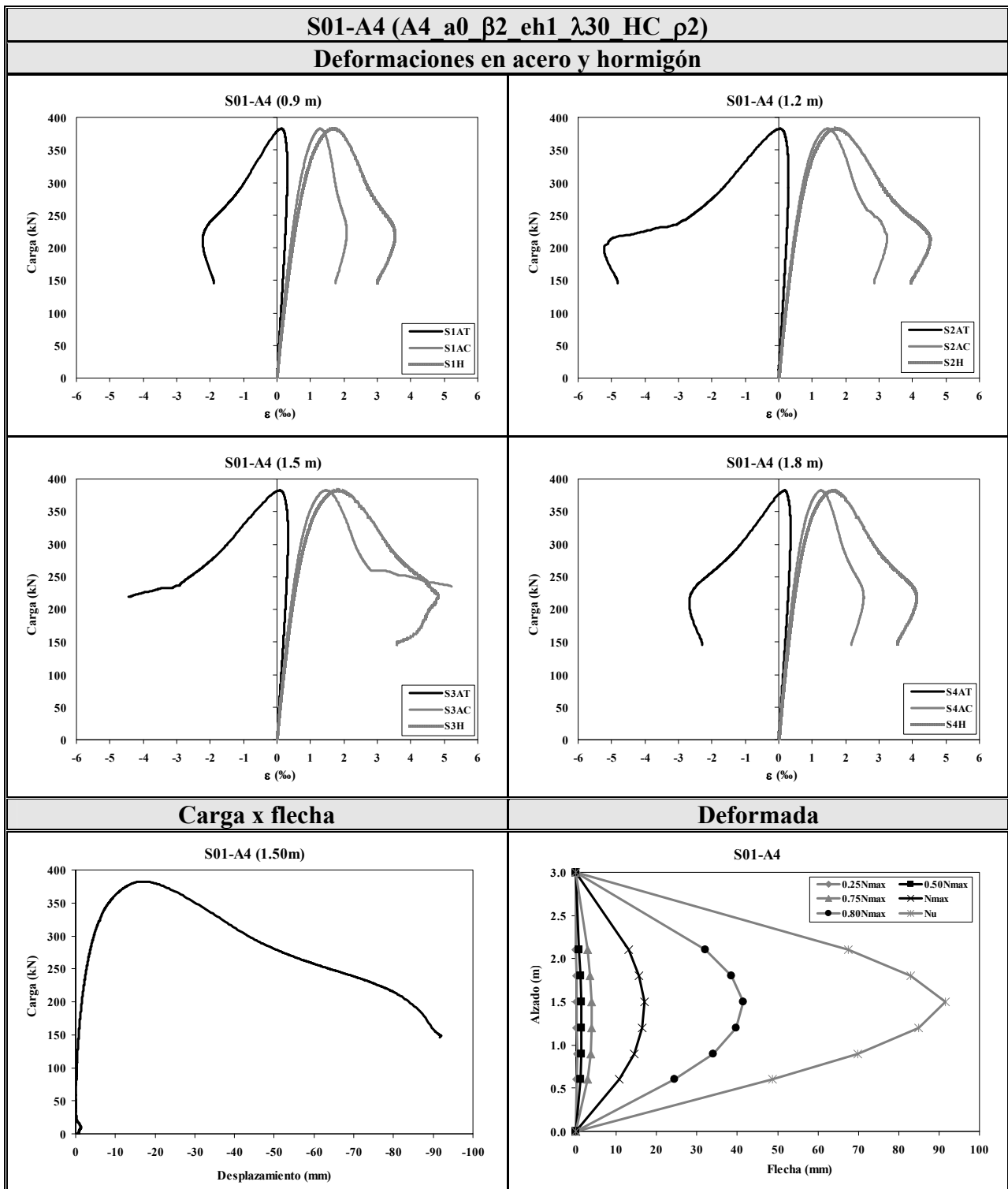


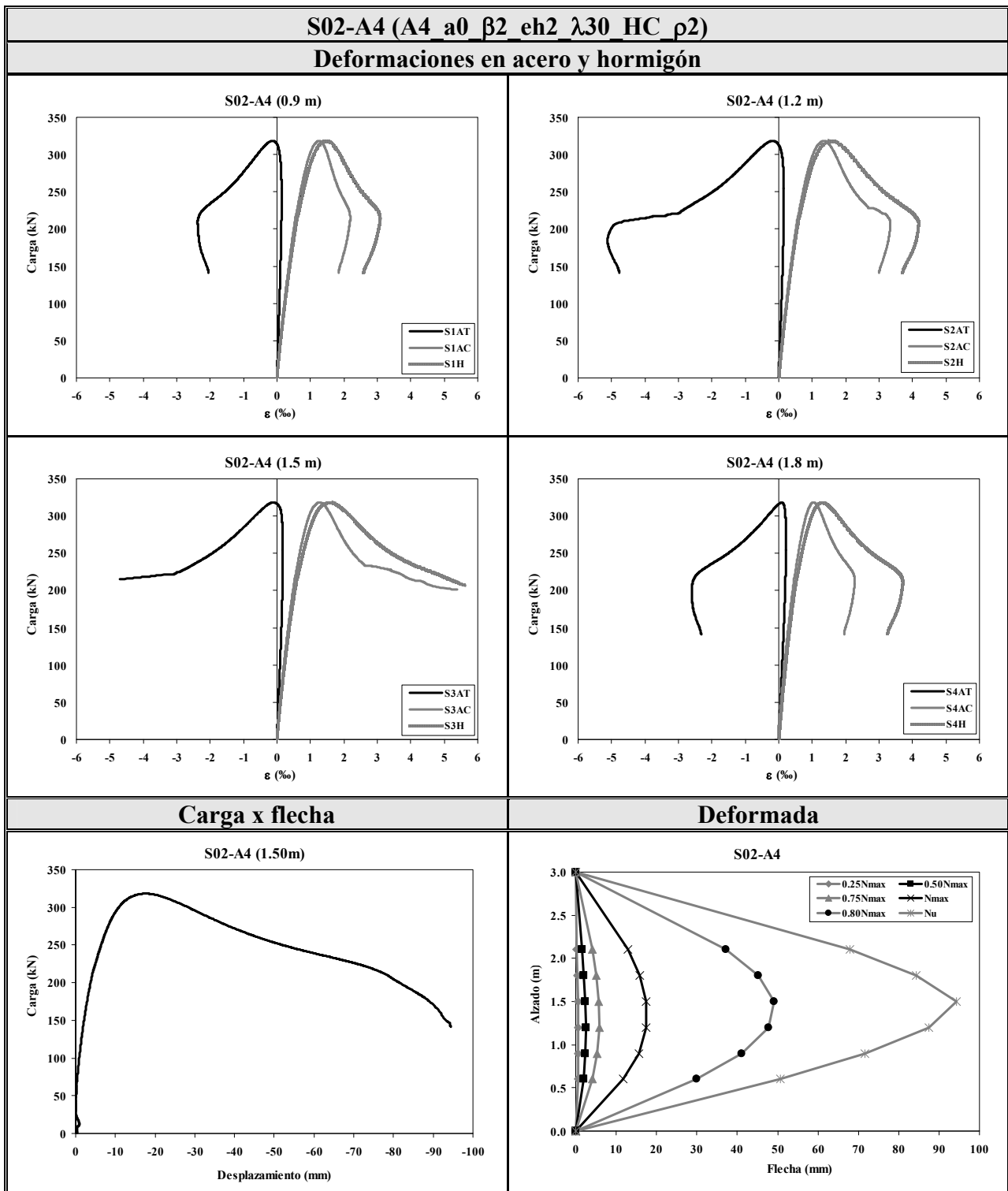


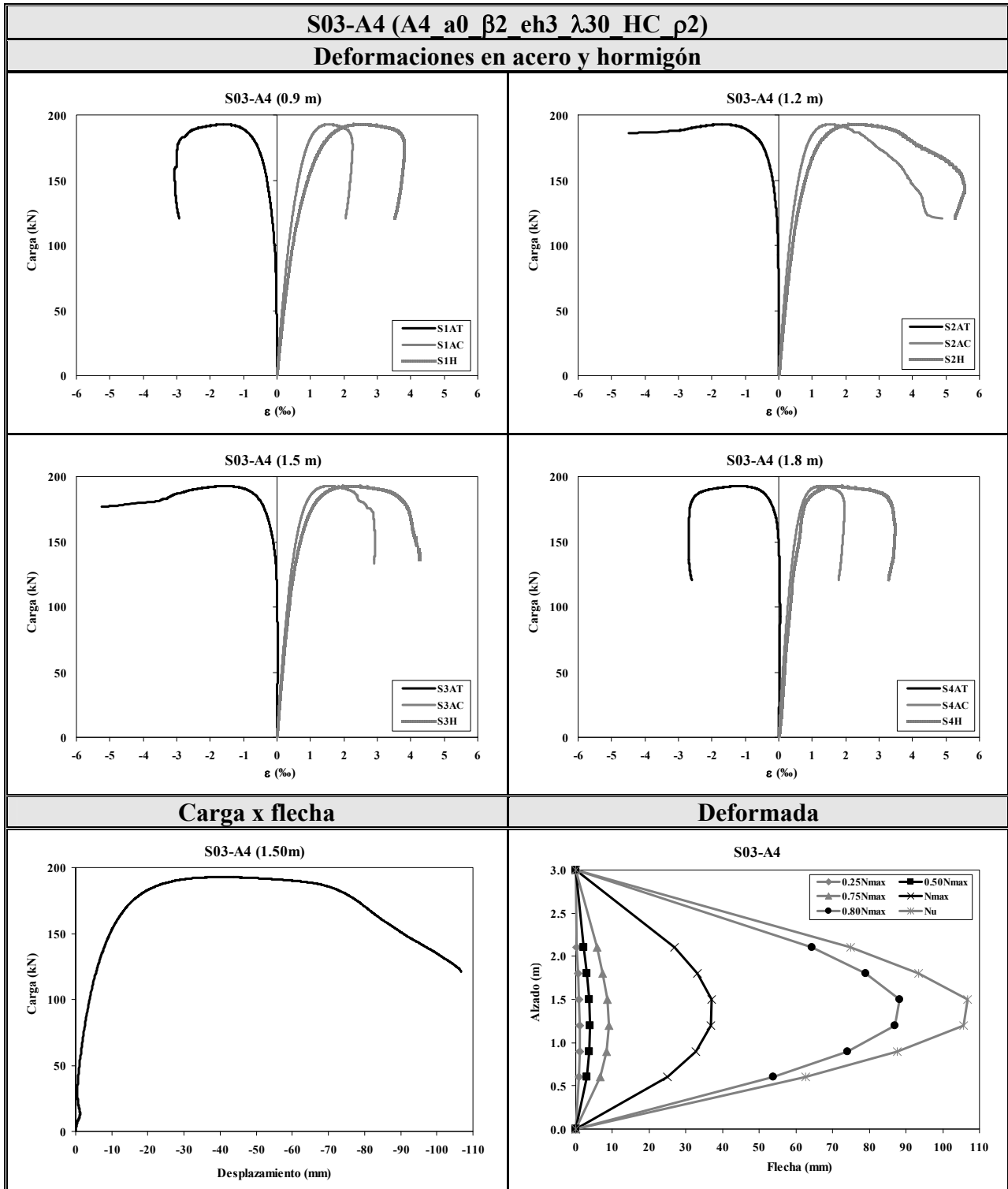


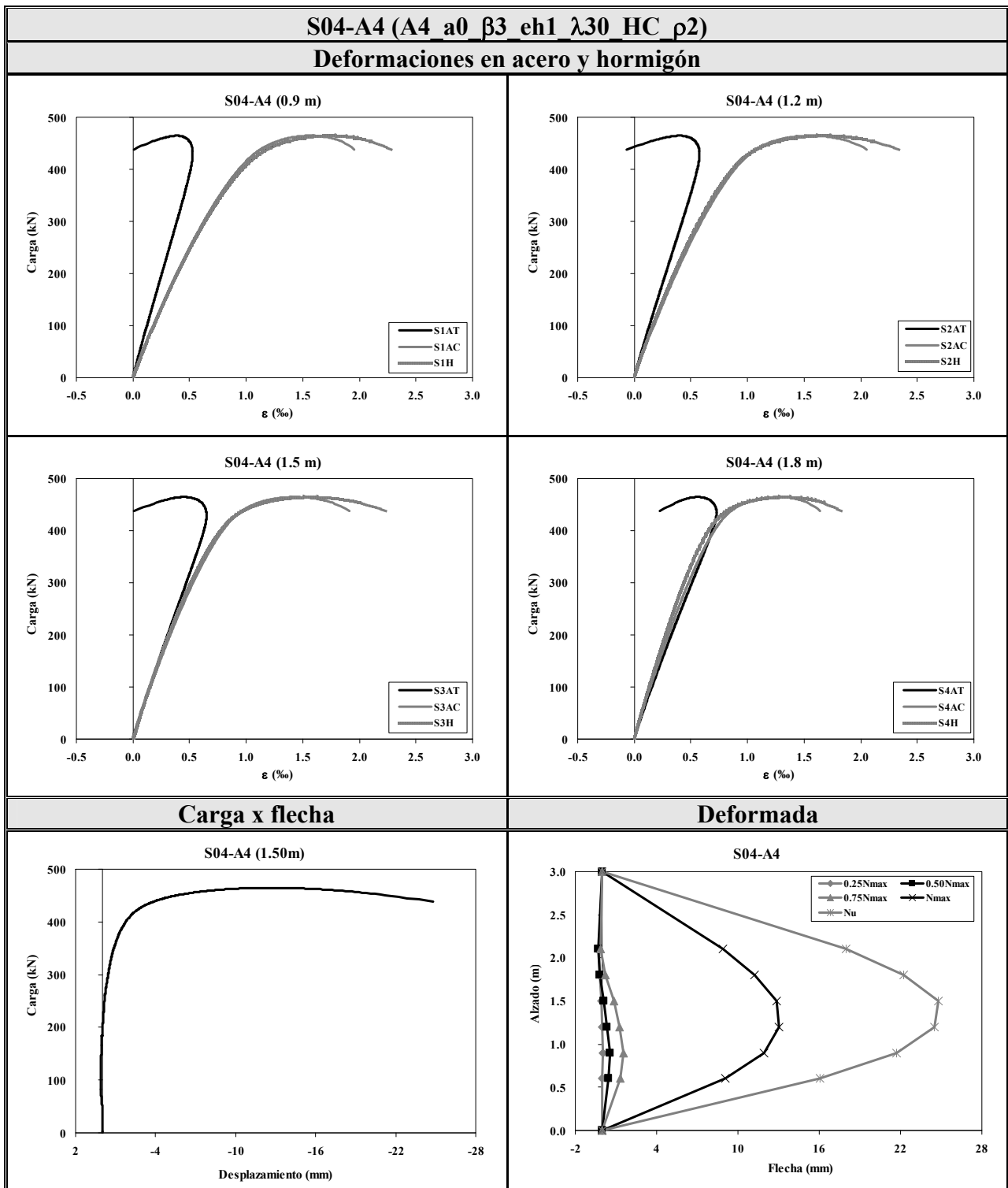


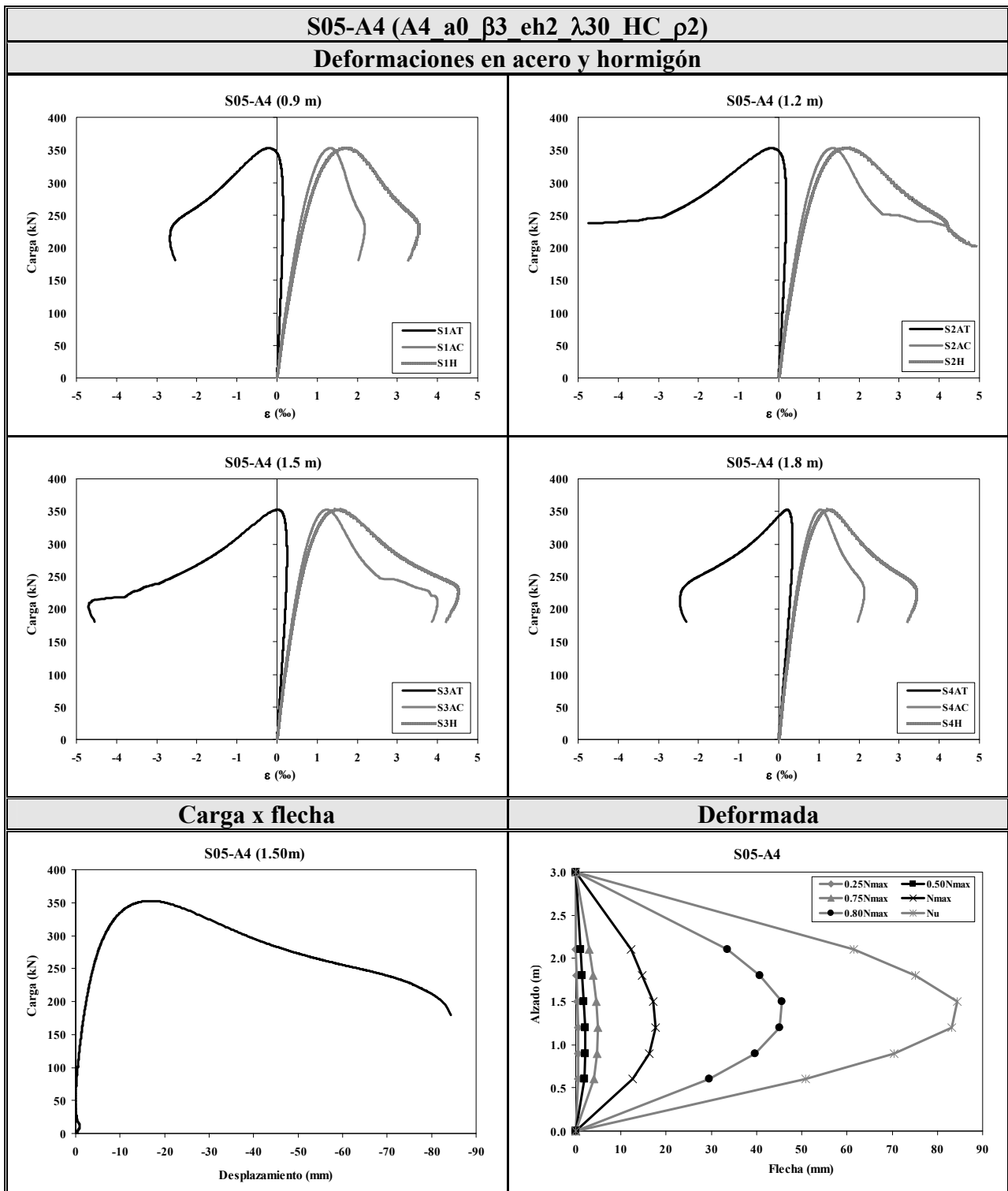


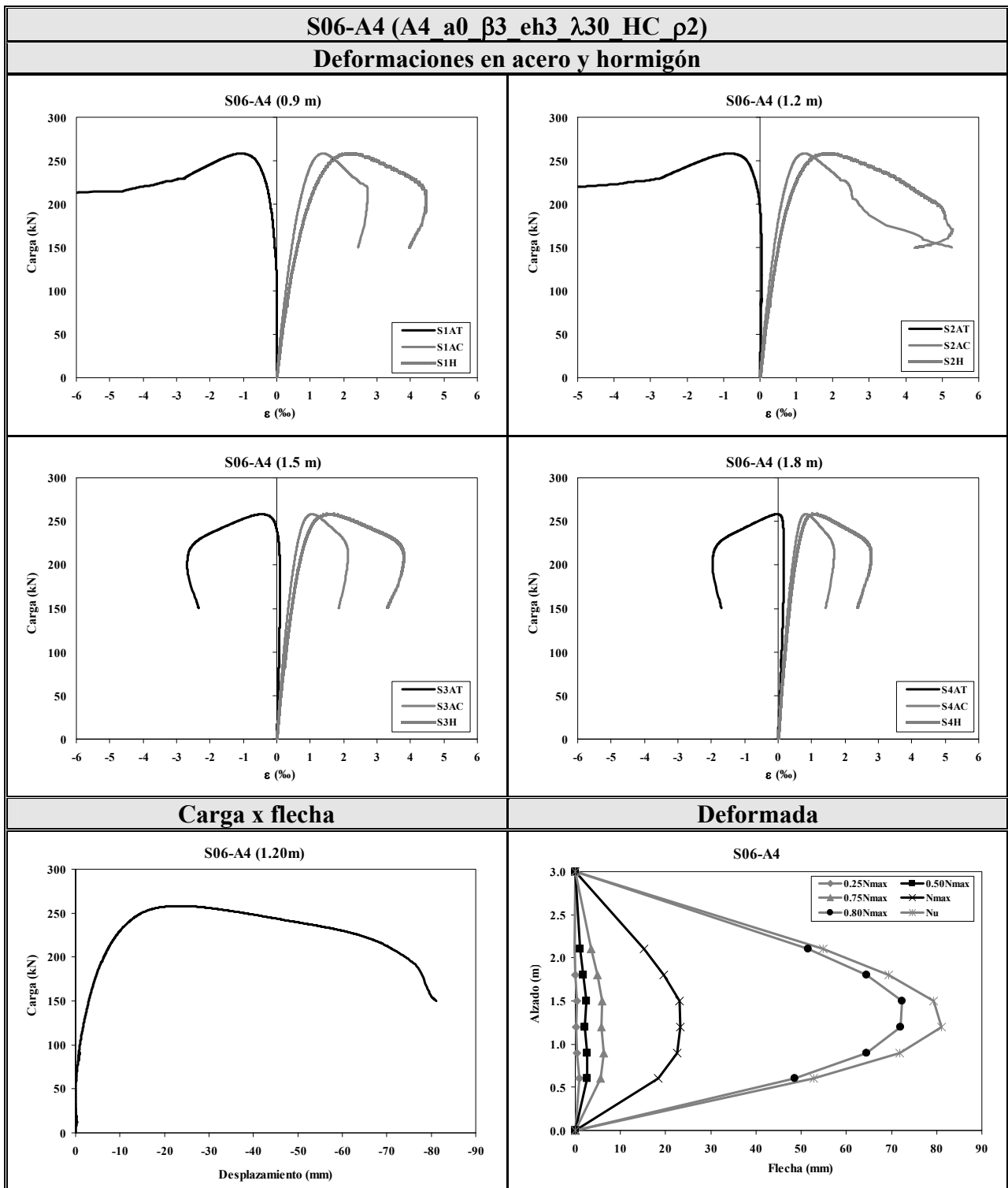




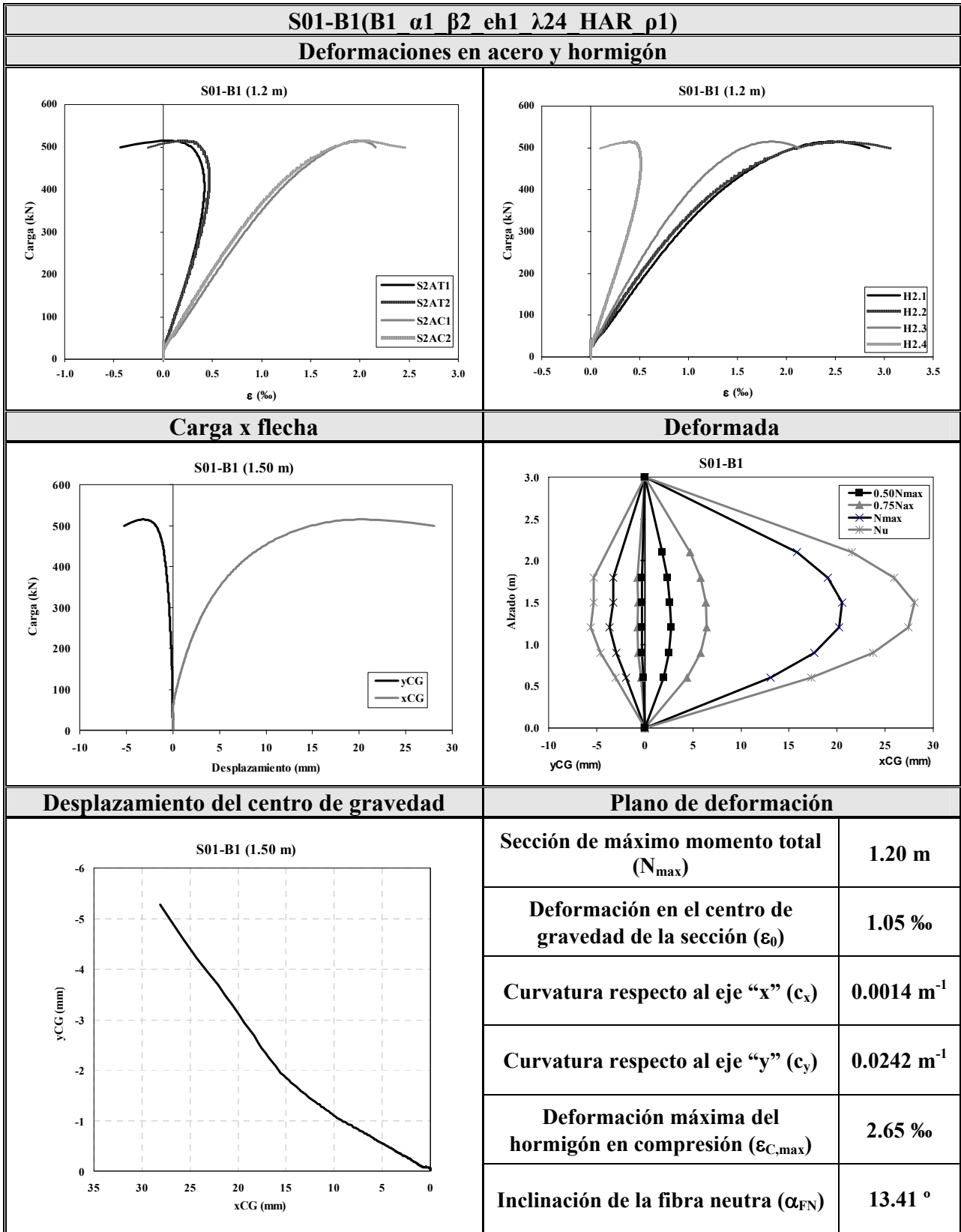


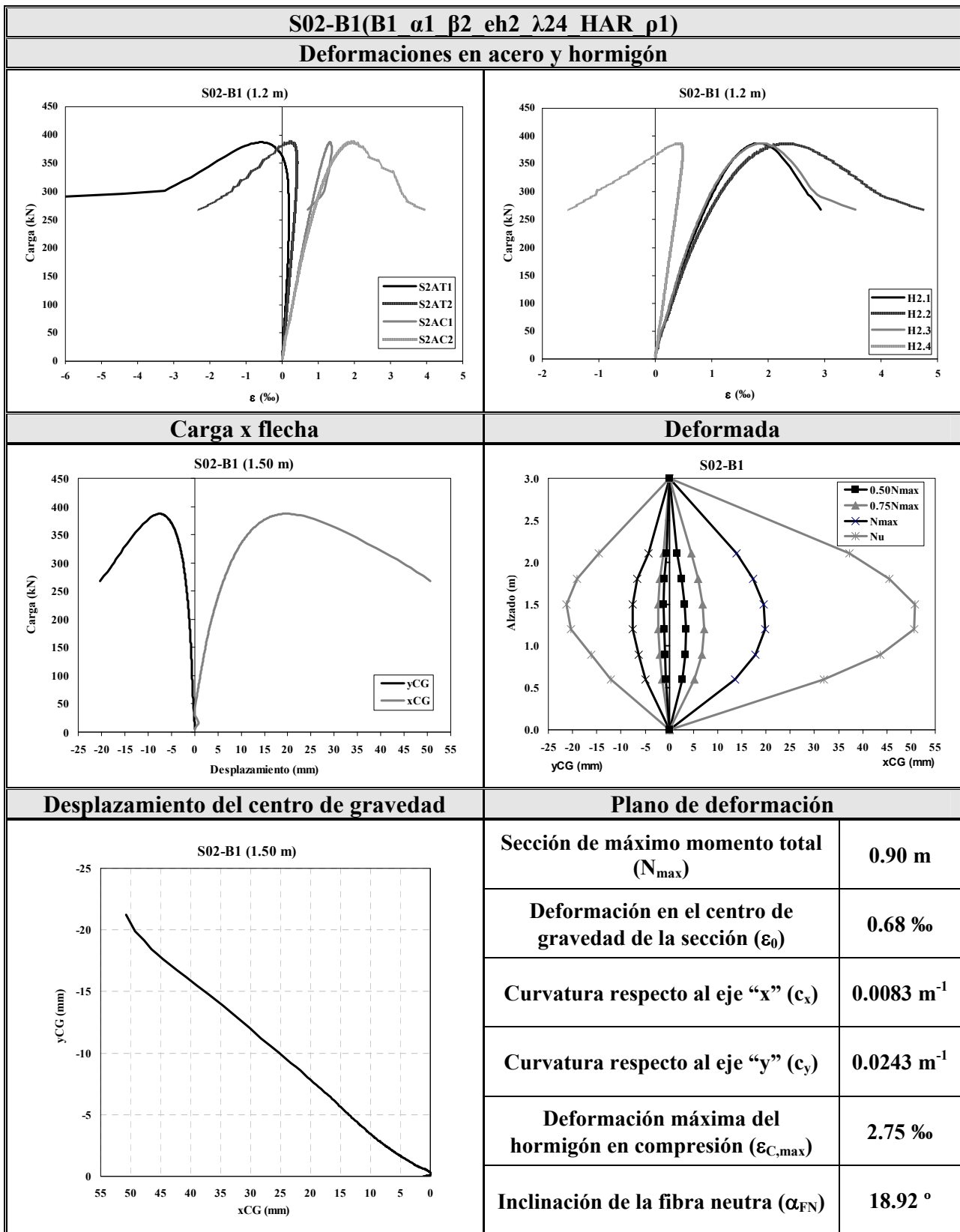


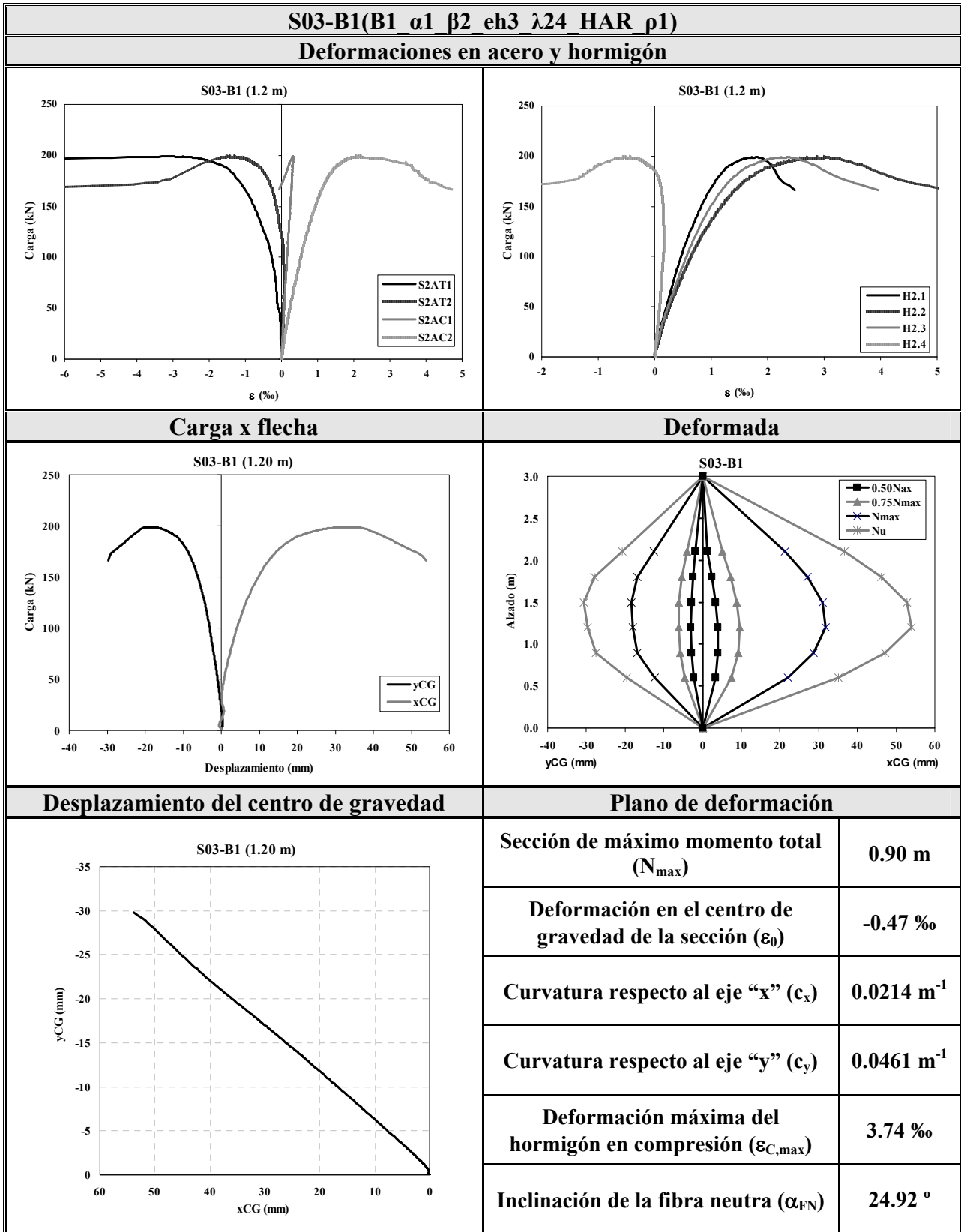


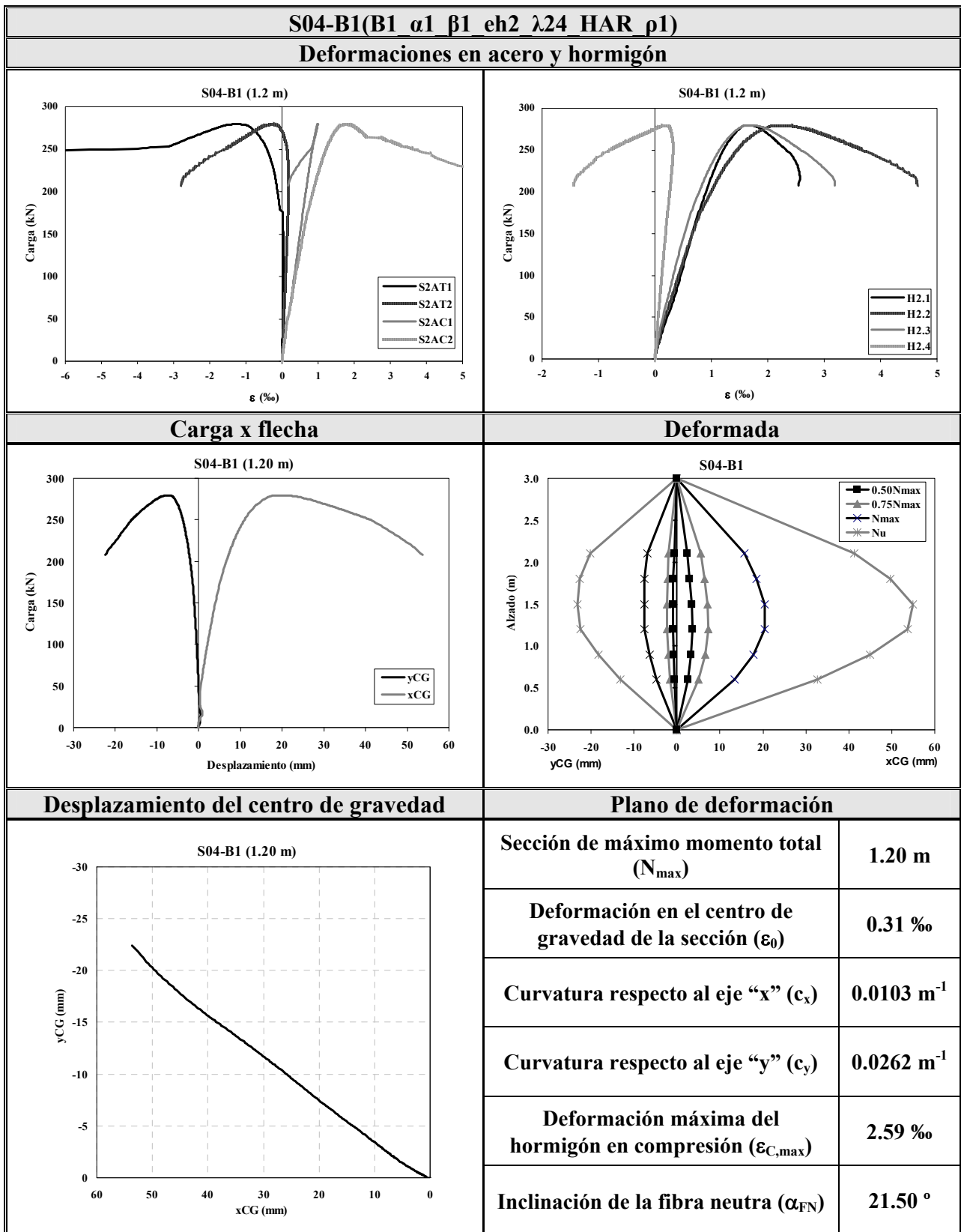


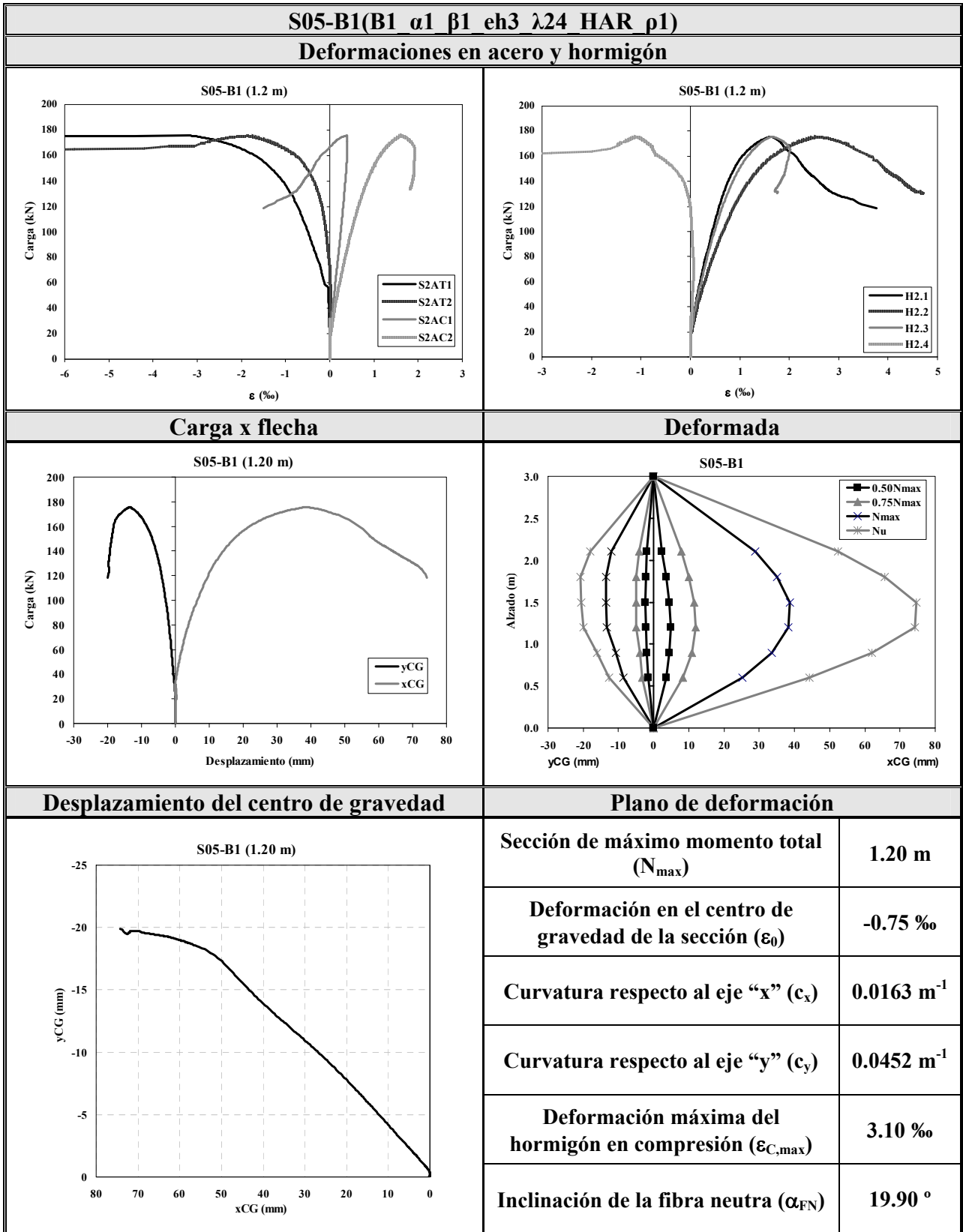
B.2.Flexo-compresión esviada:

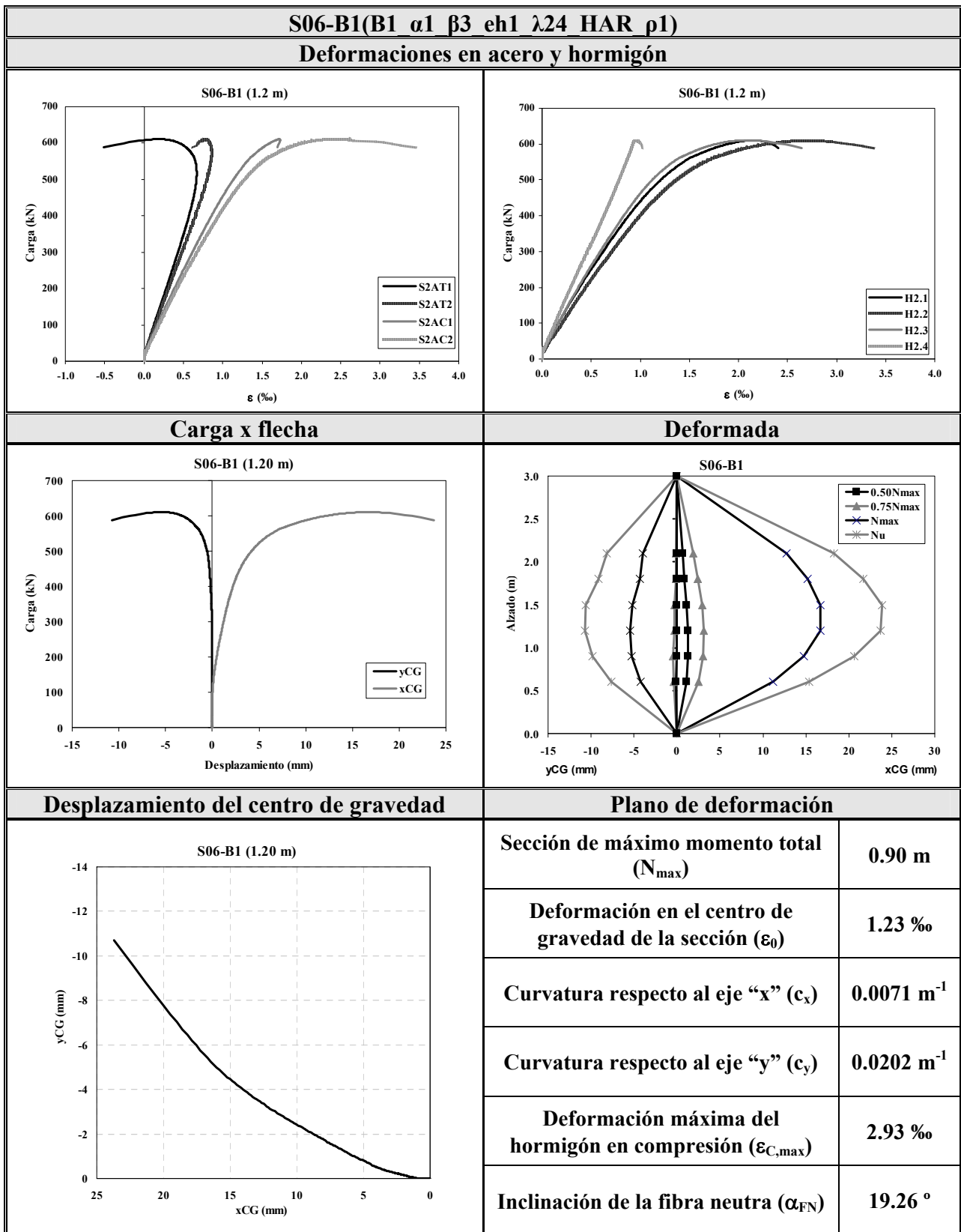


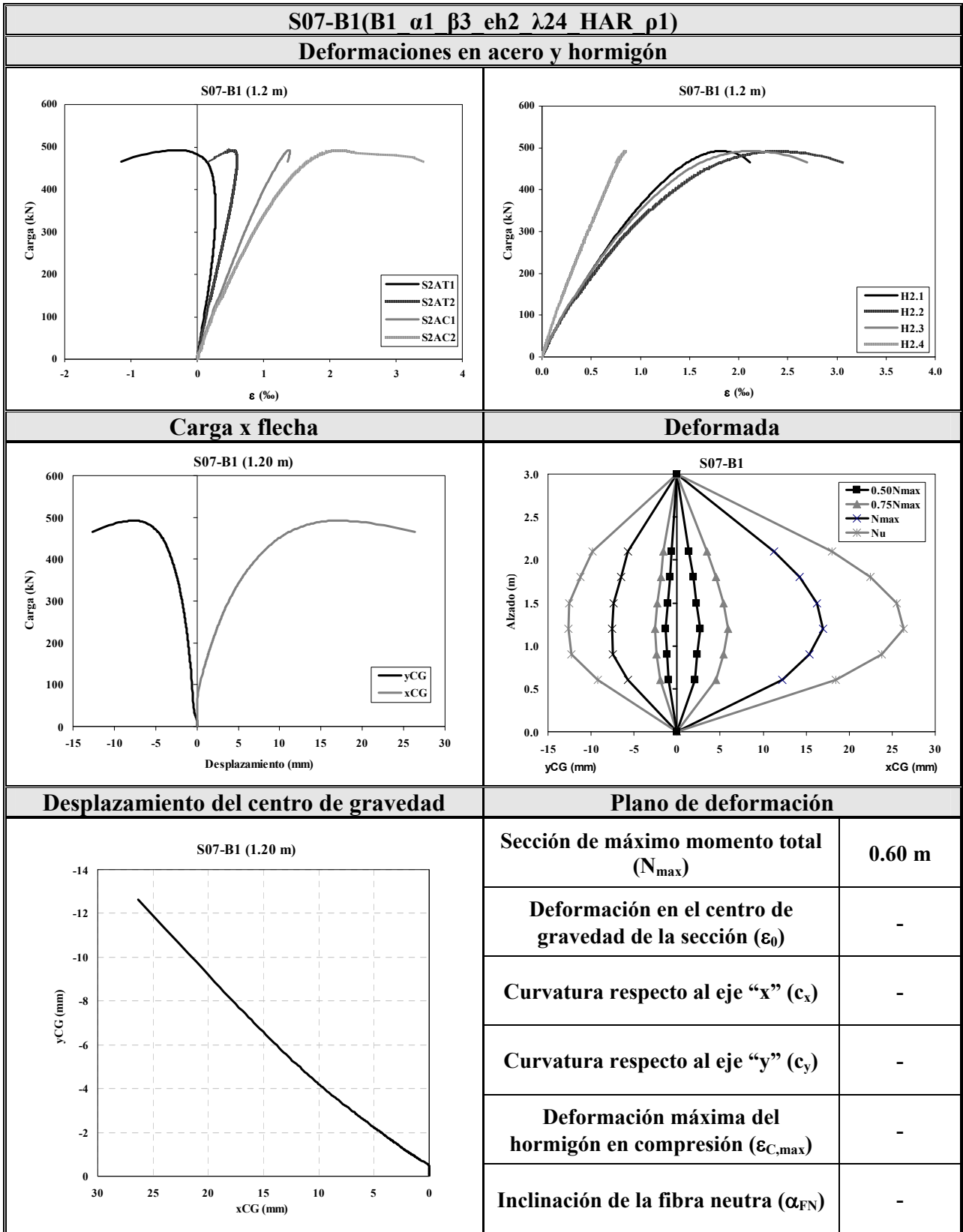


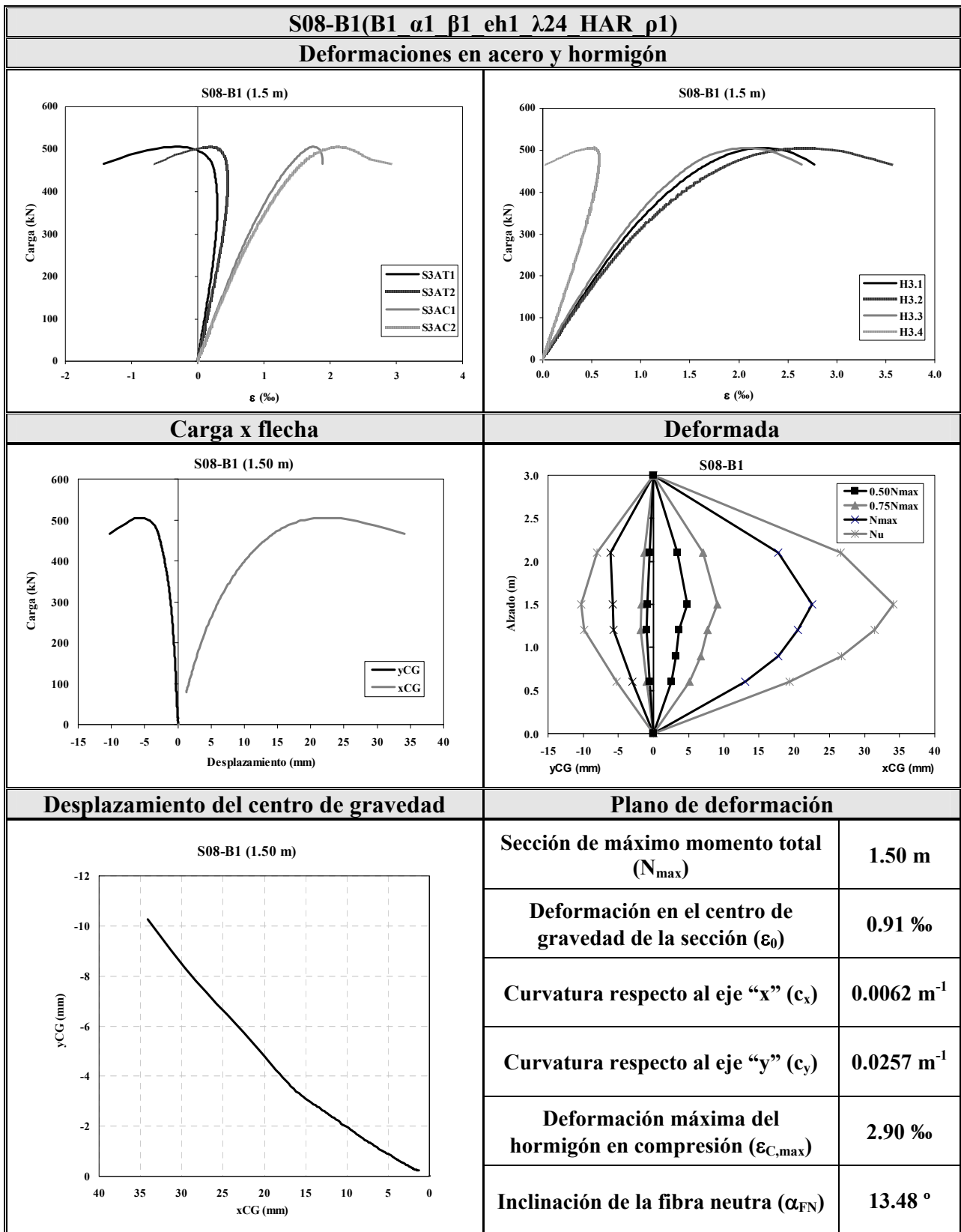


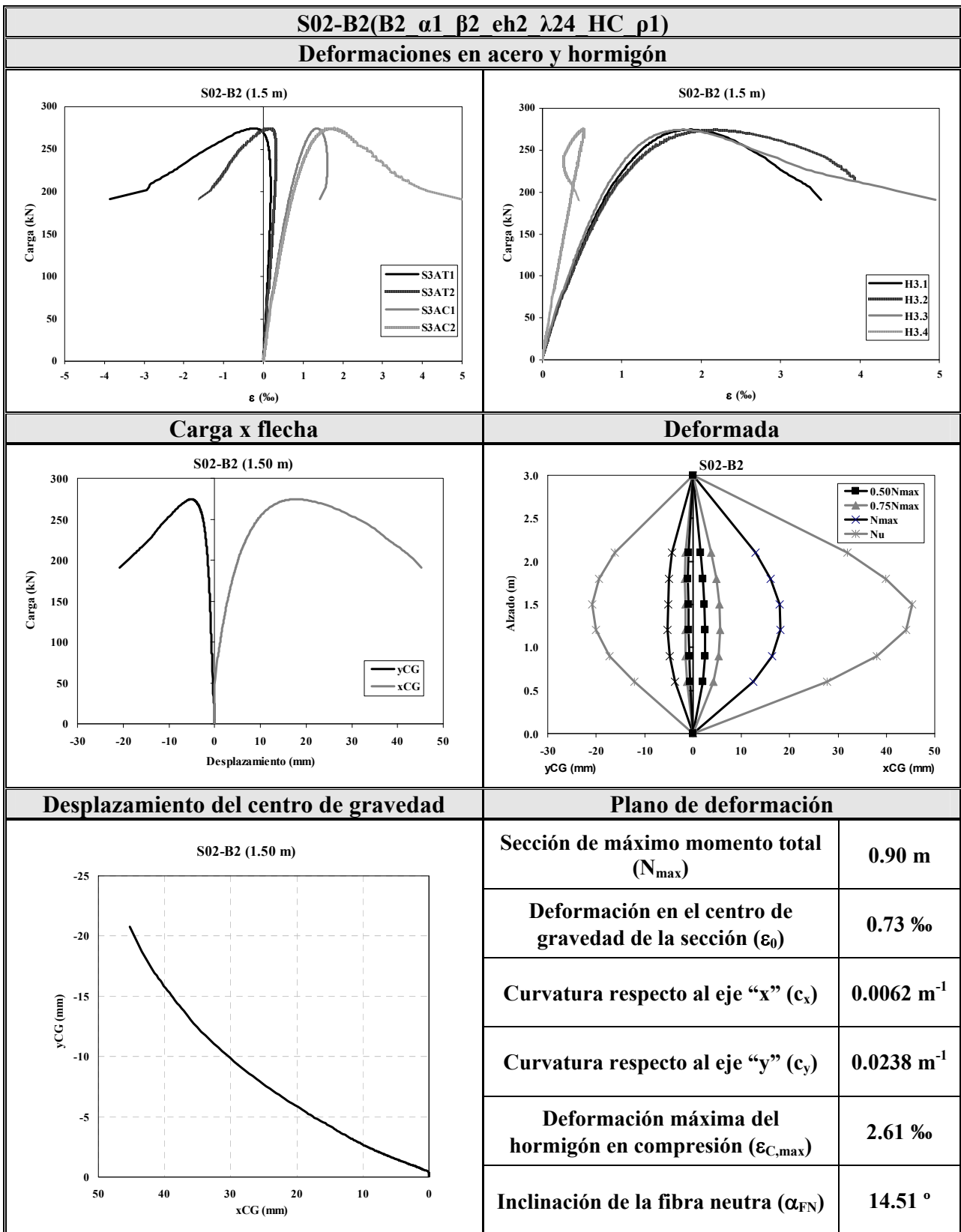


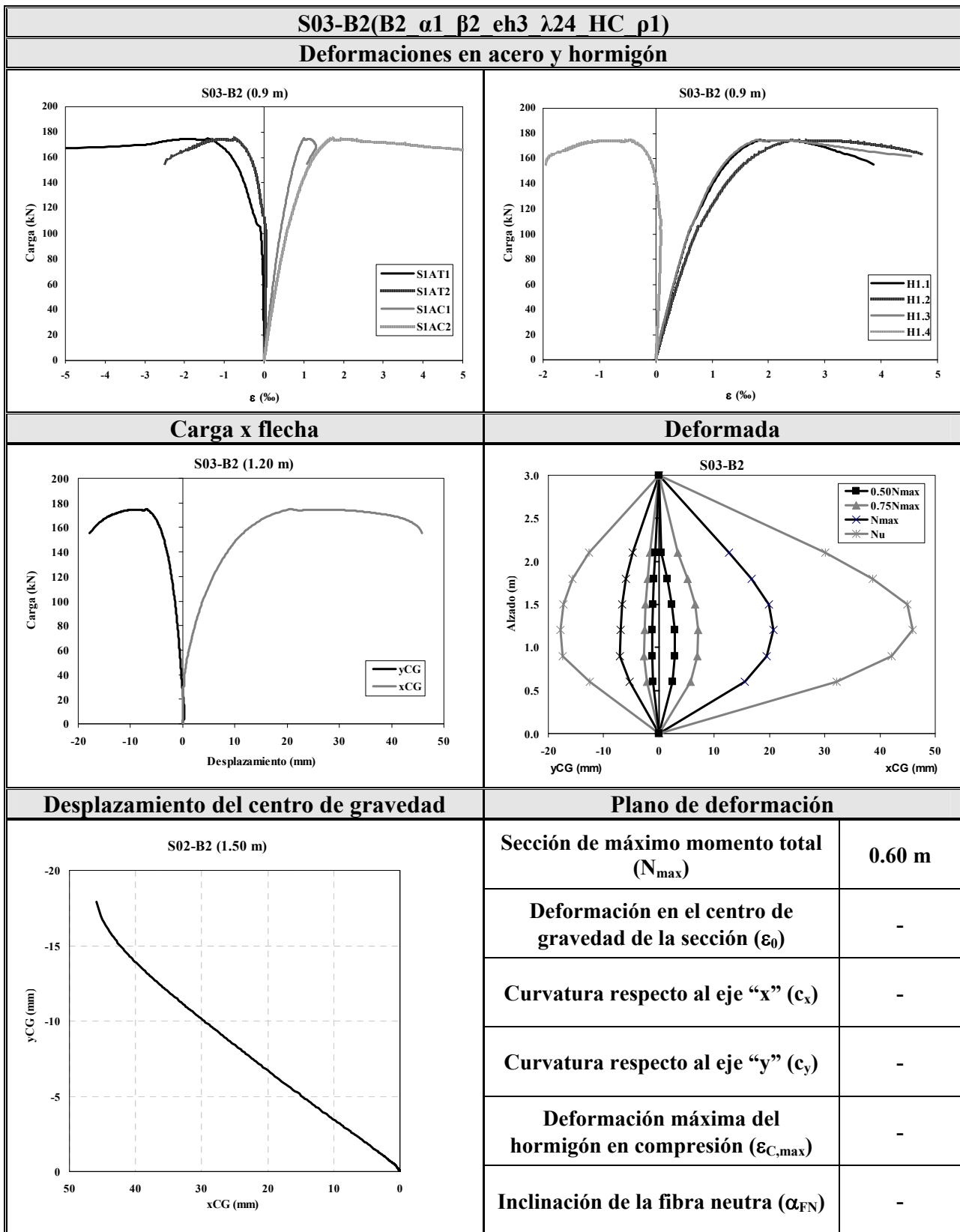


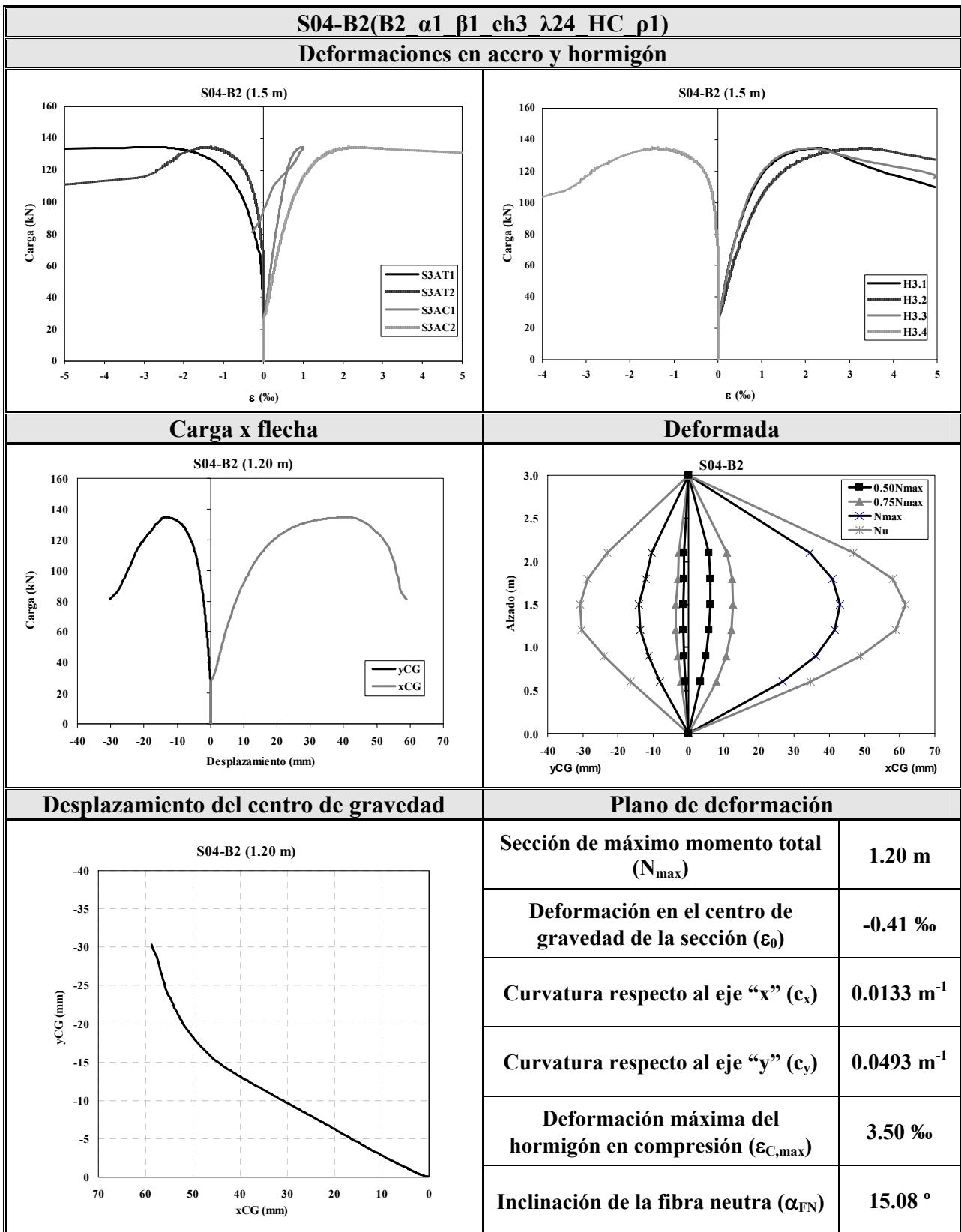


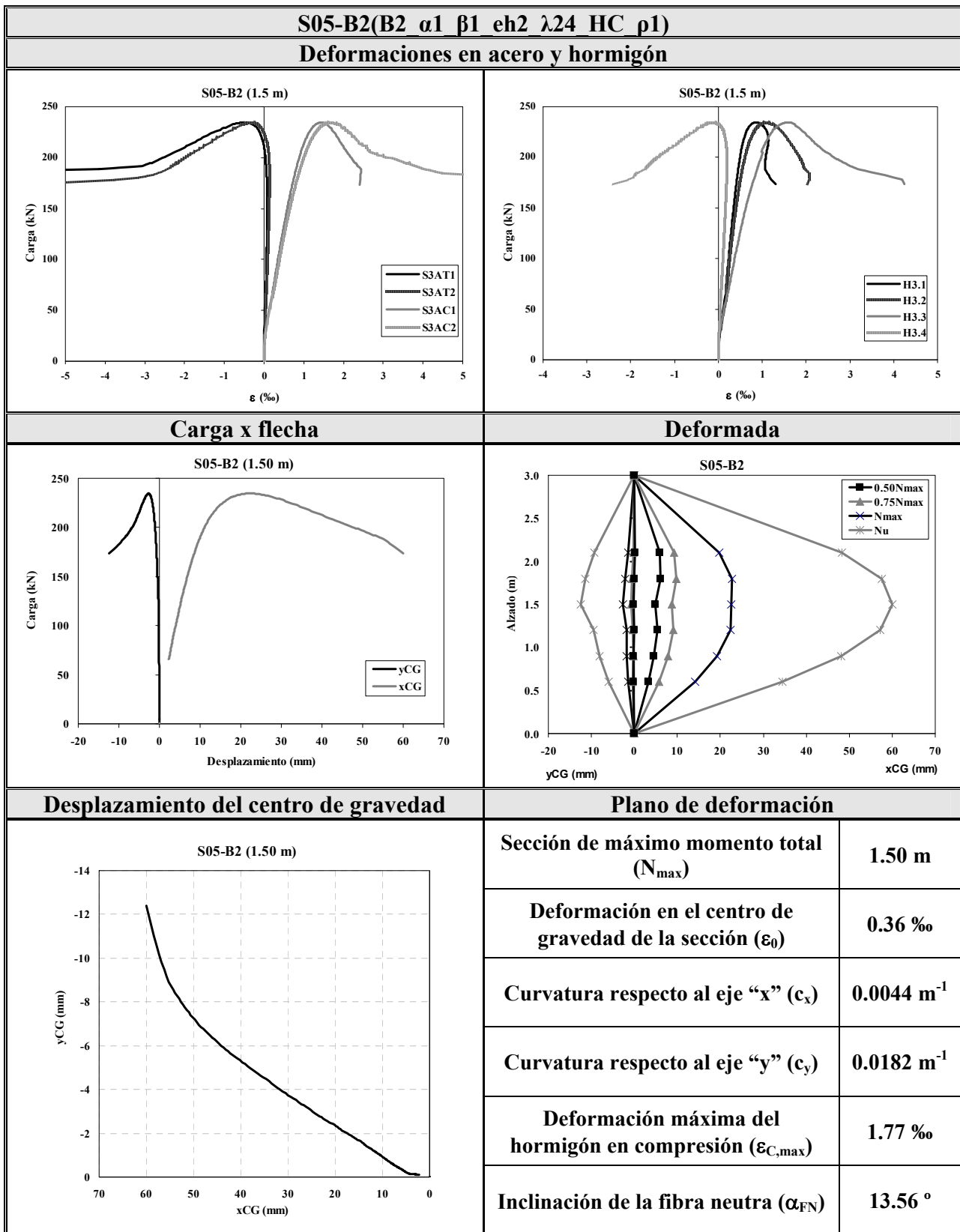


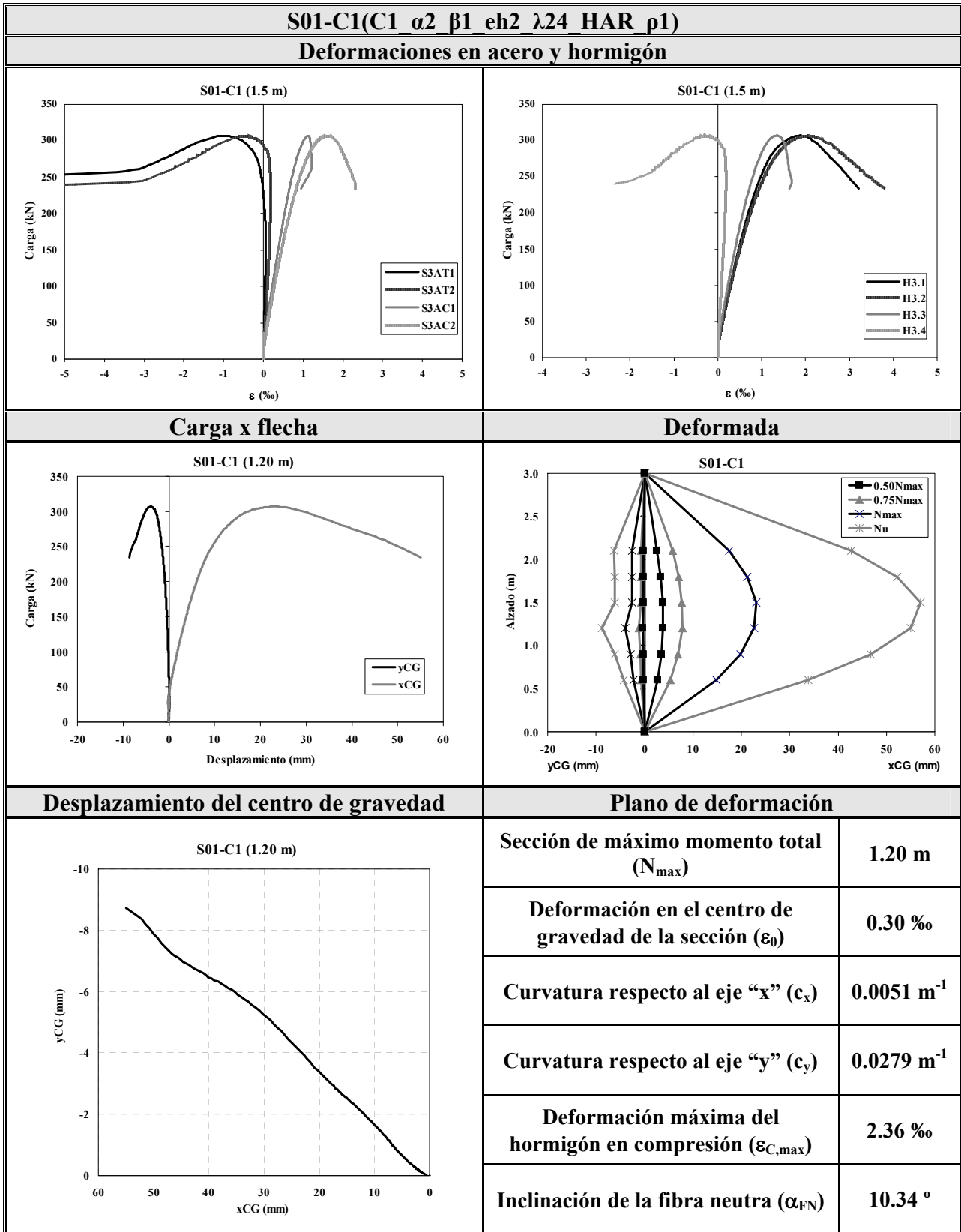


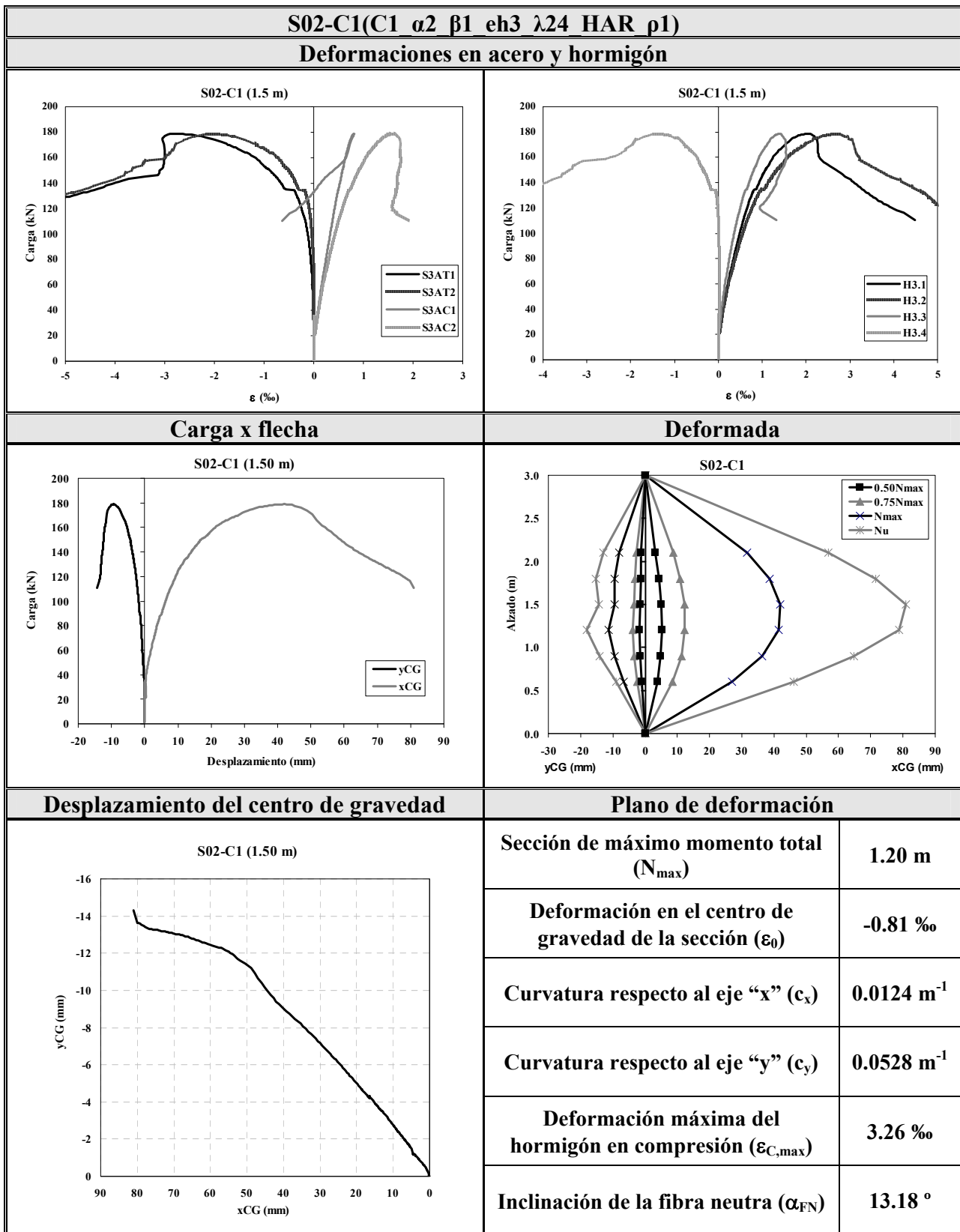


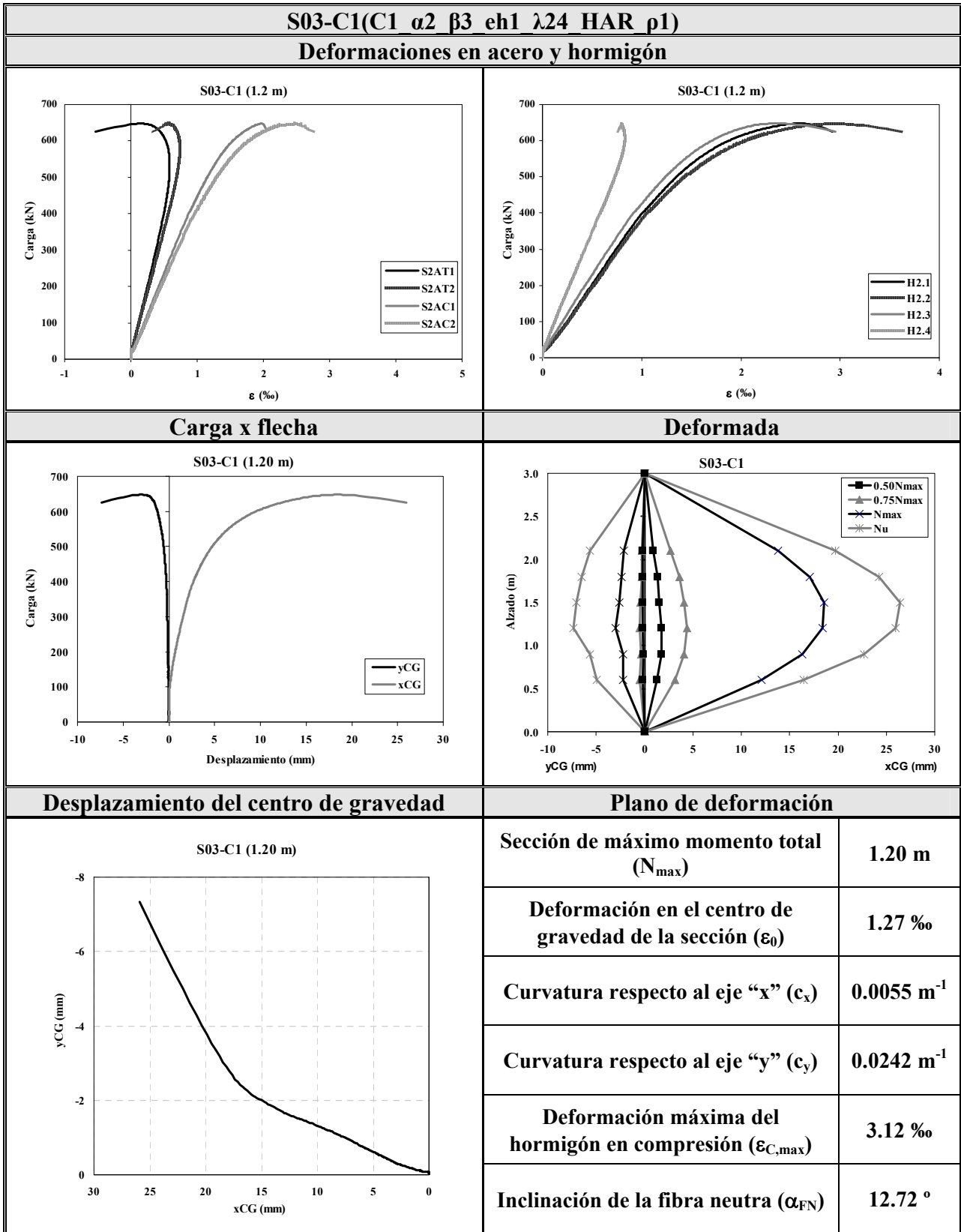


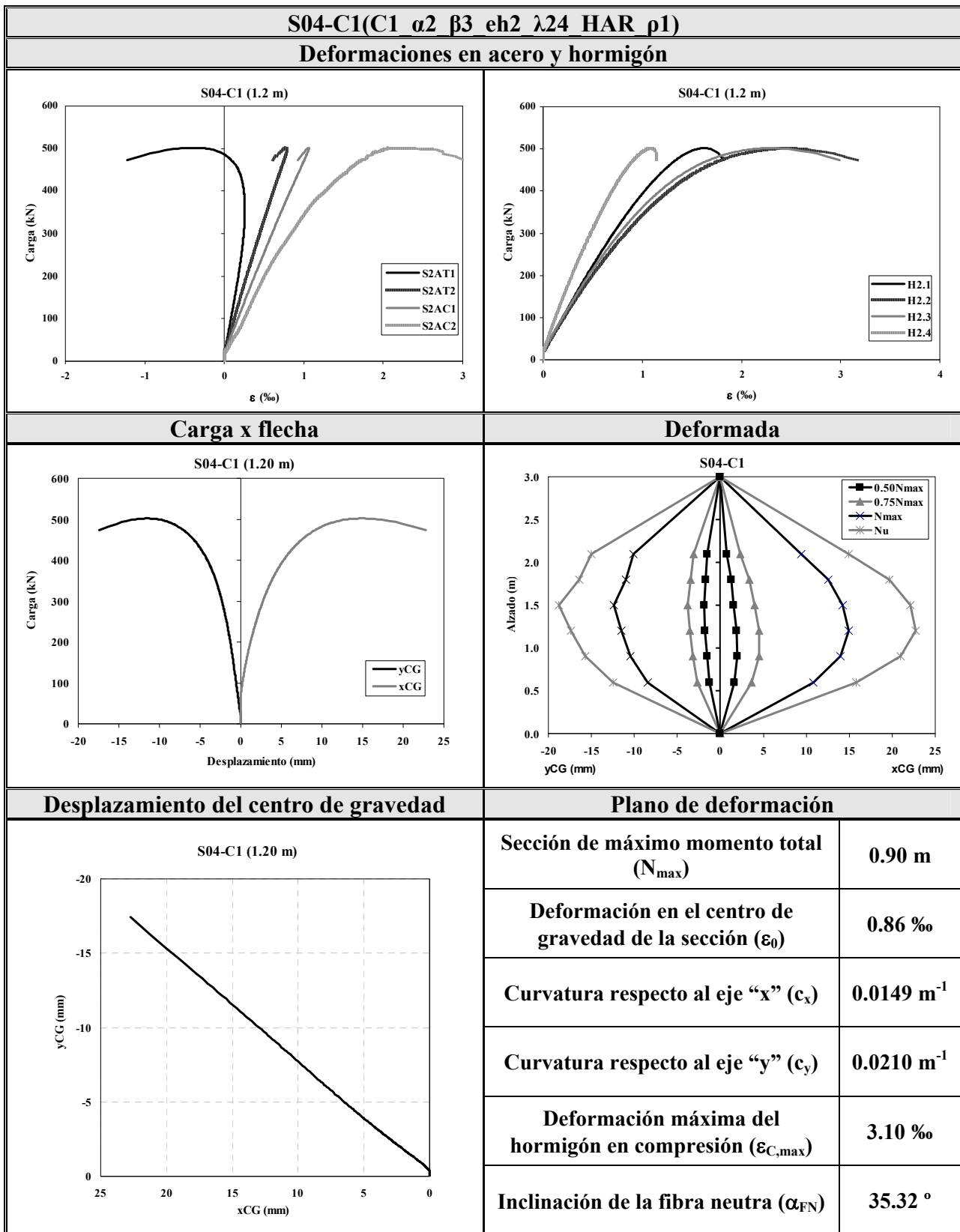


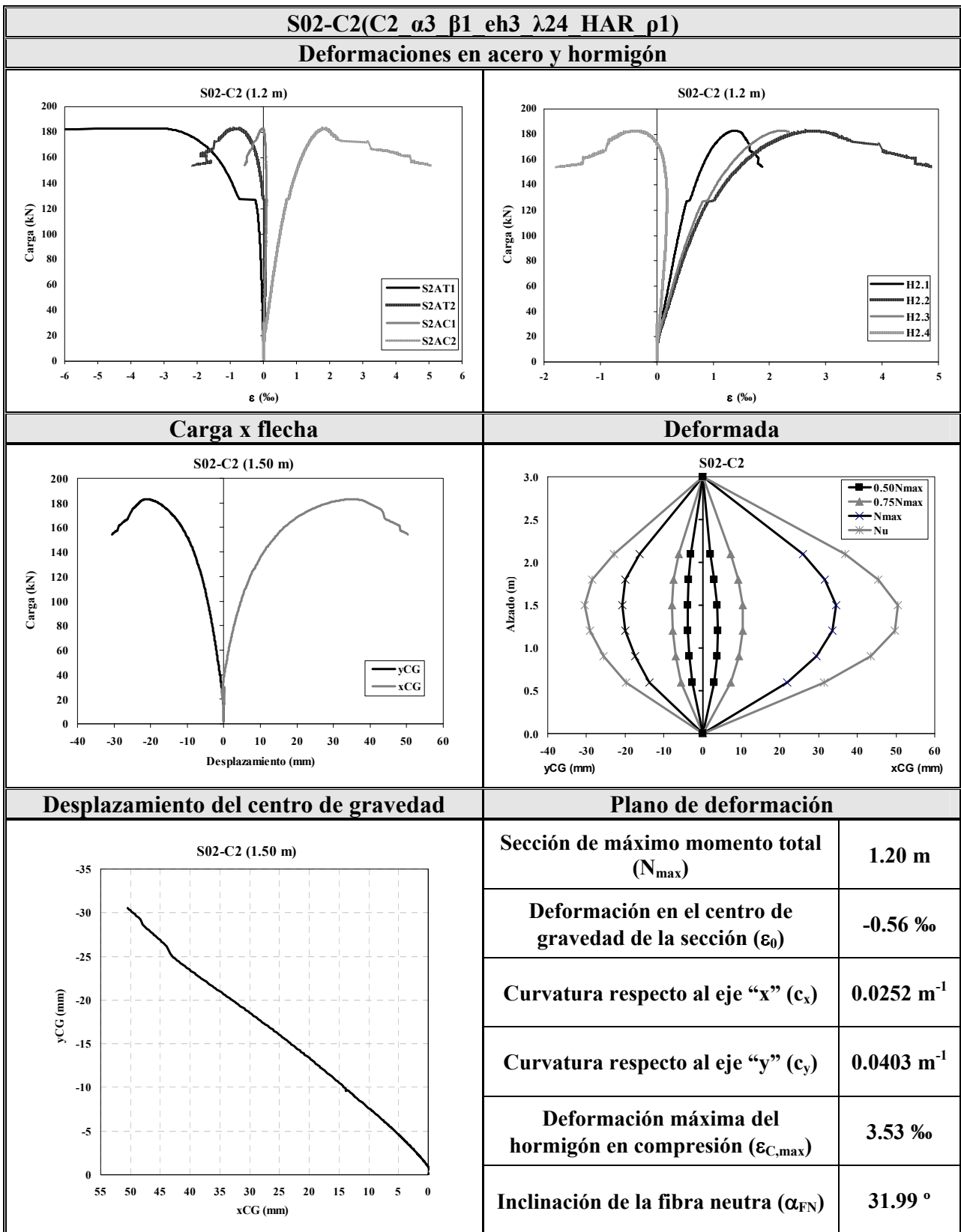


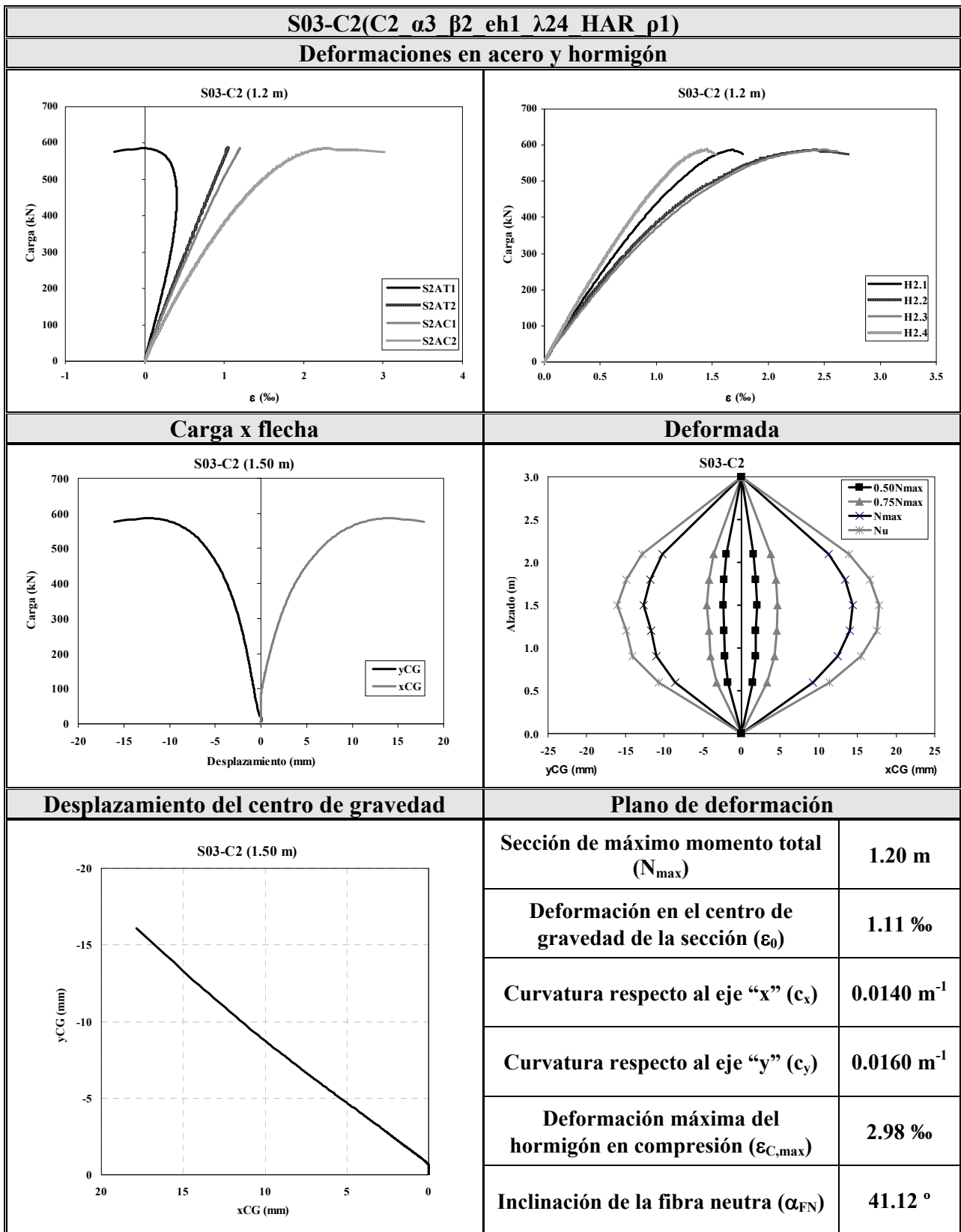


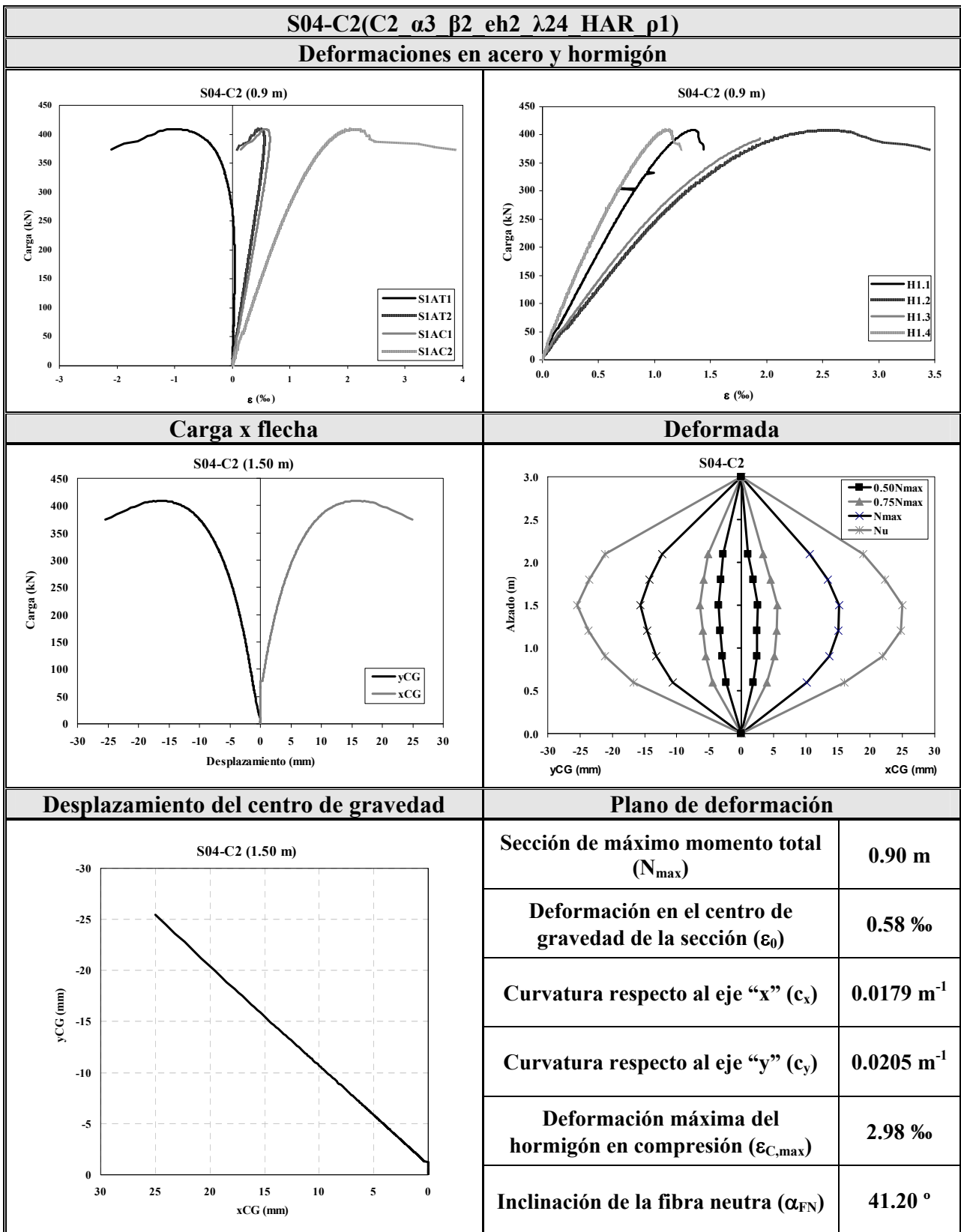


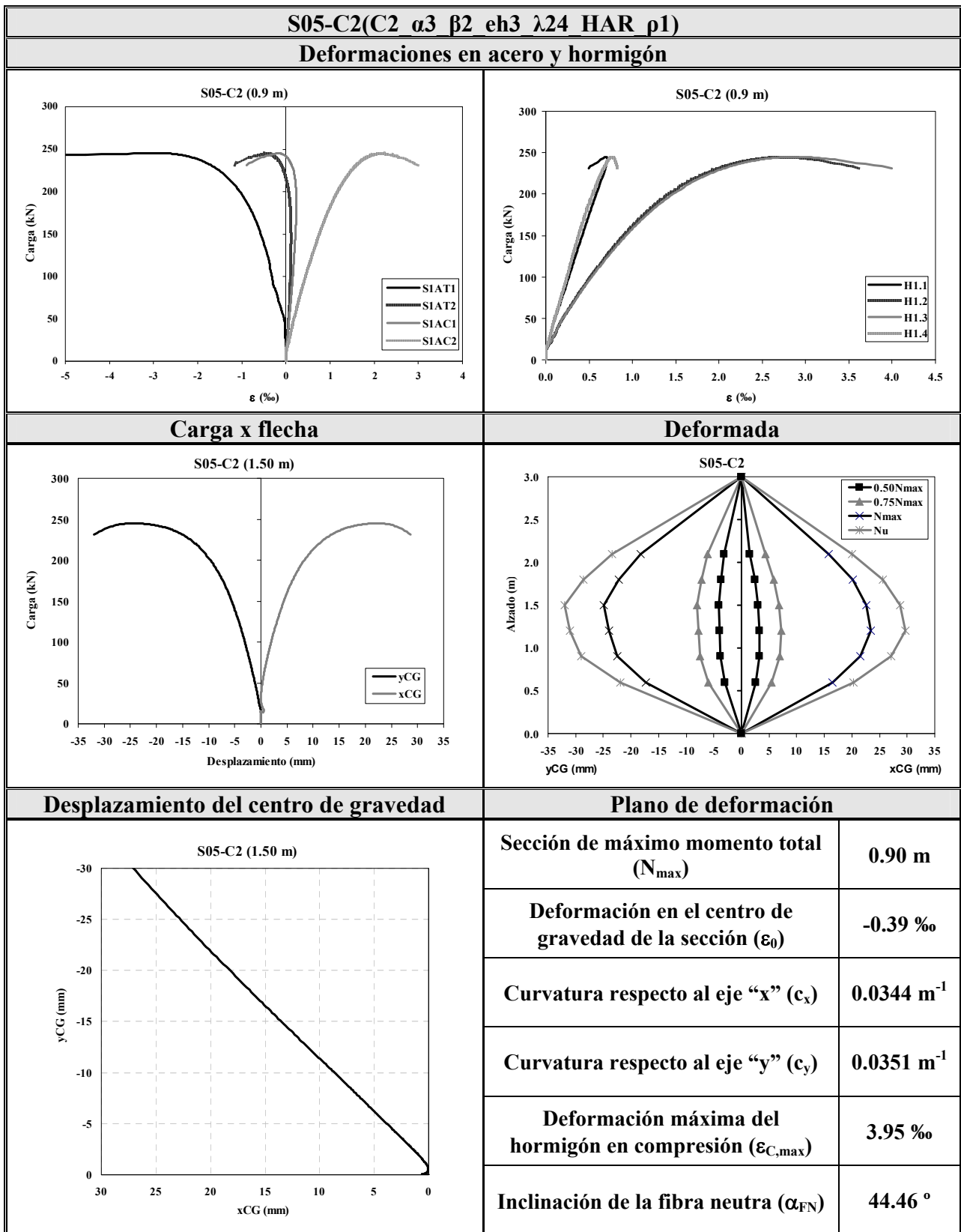


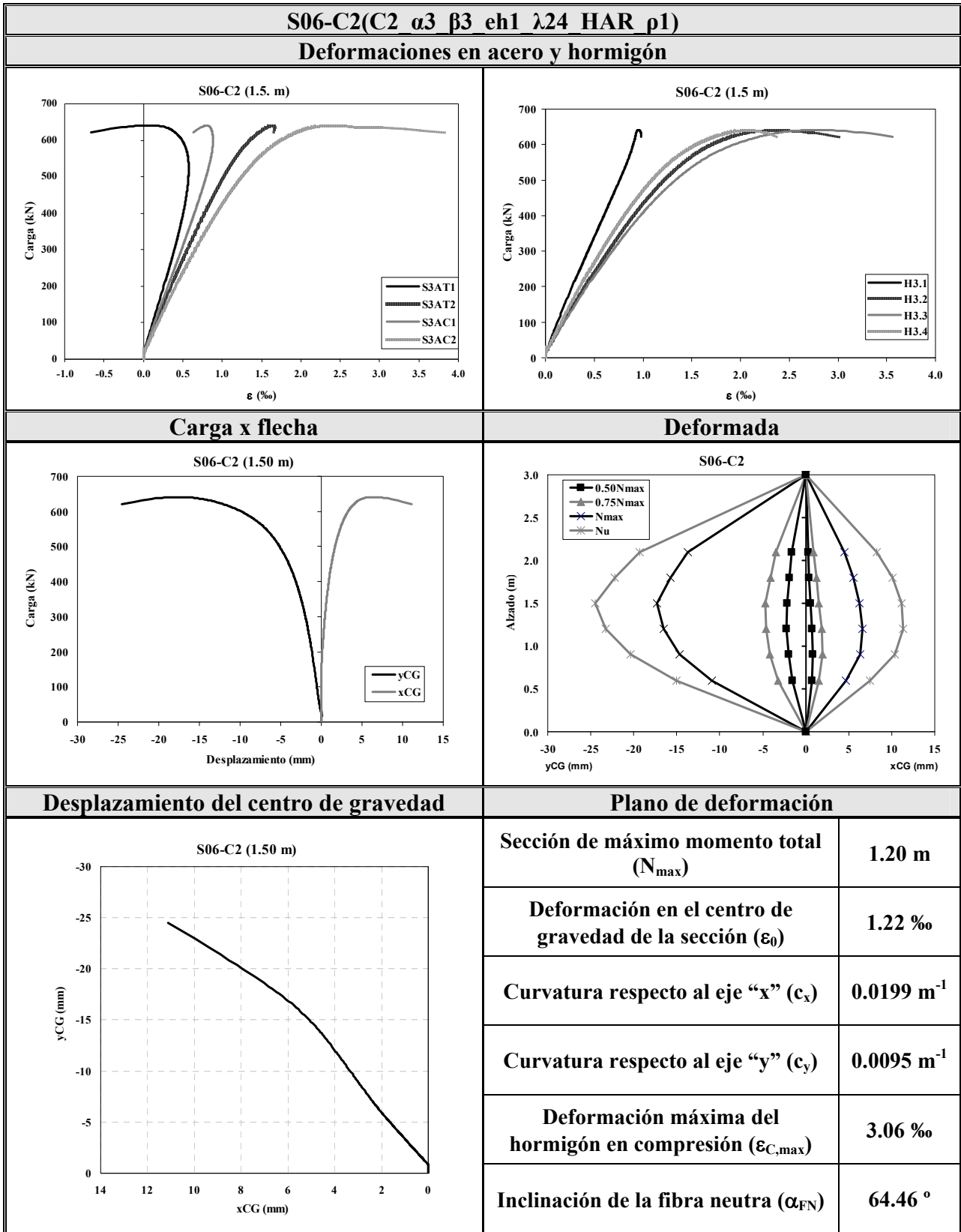


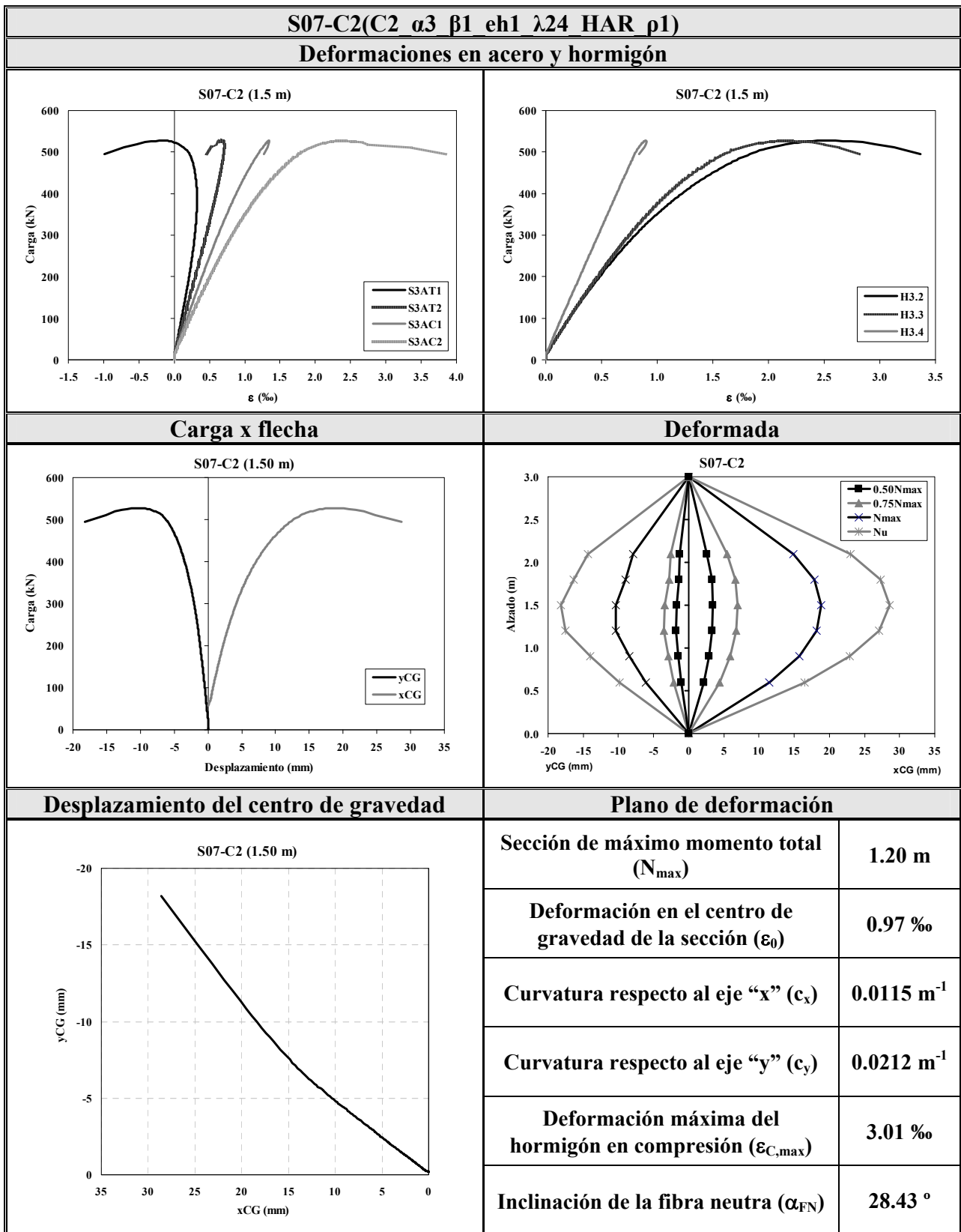


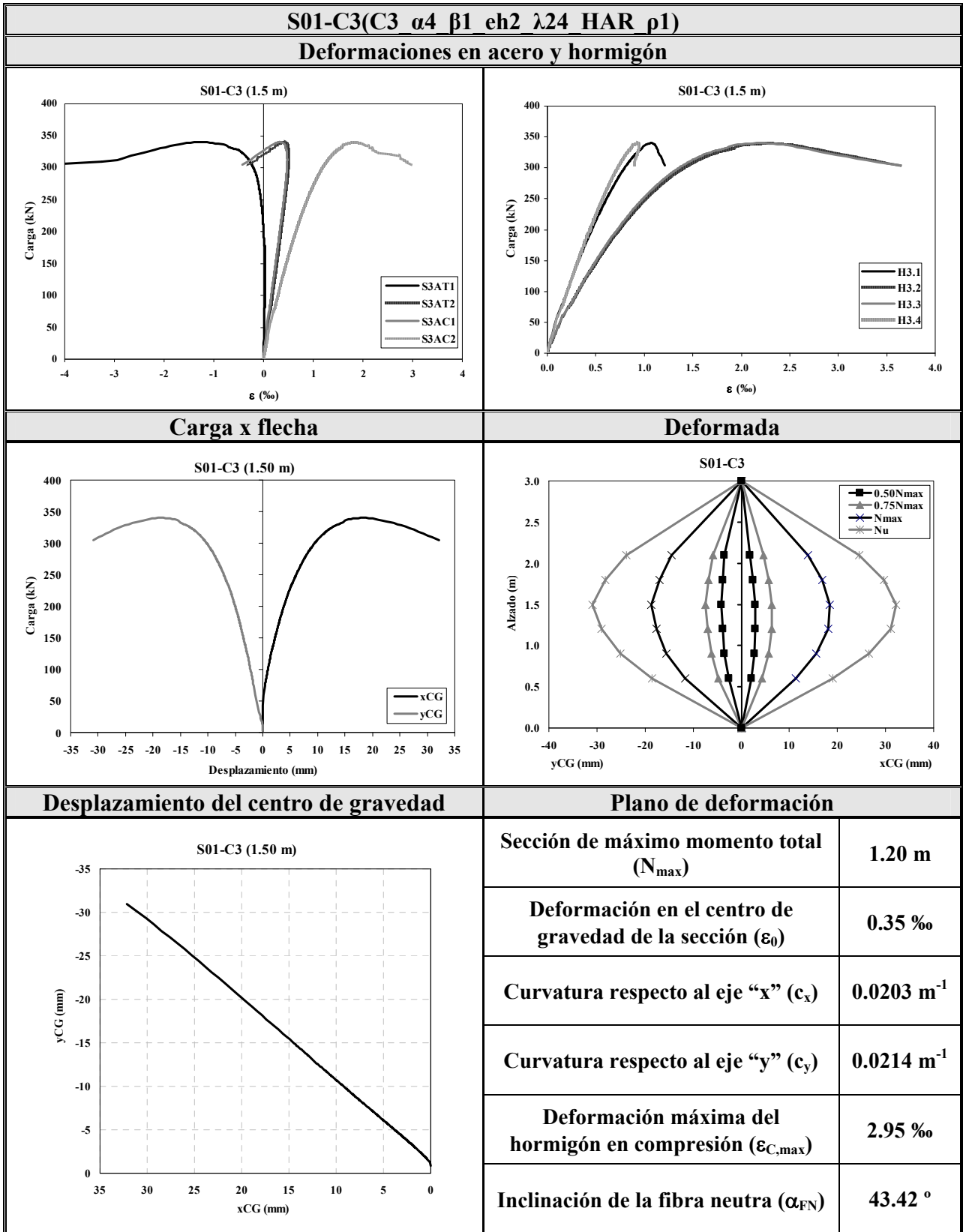


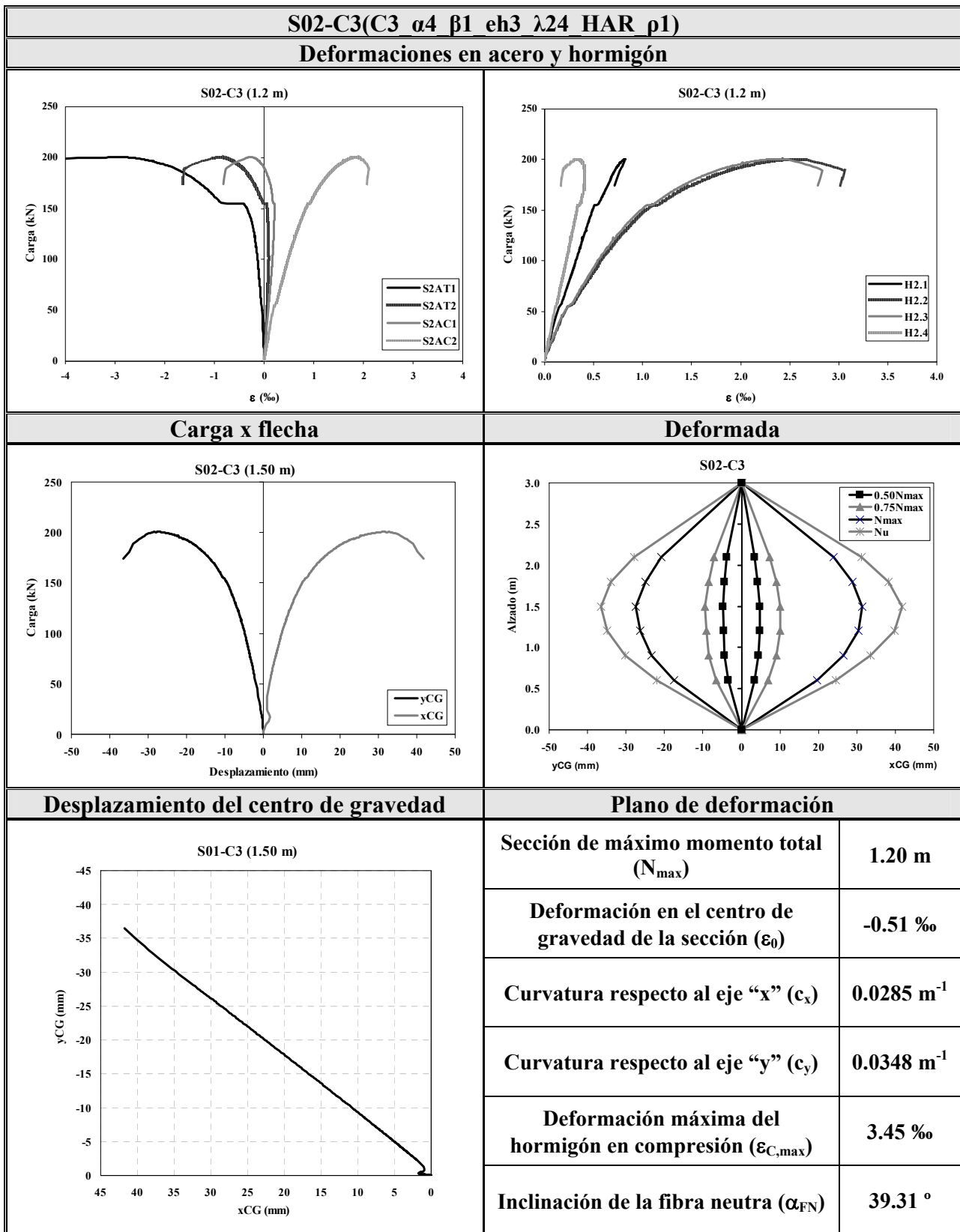


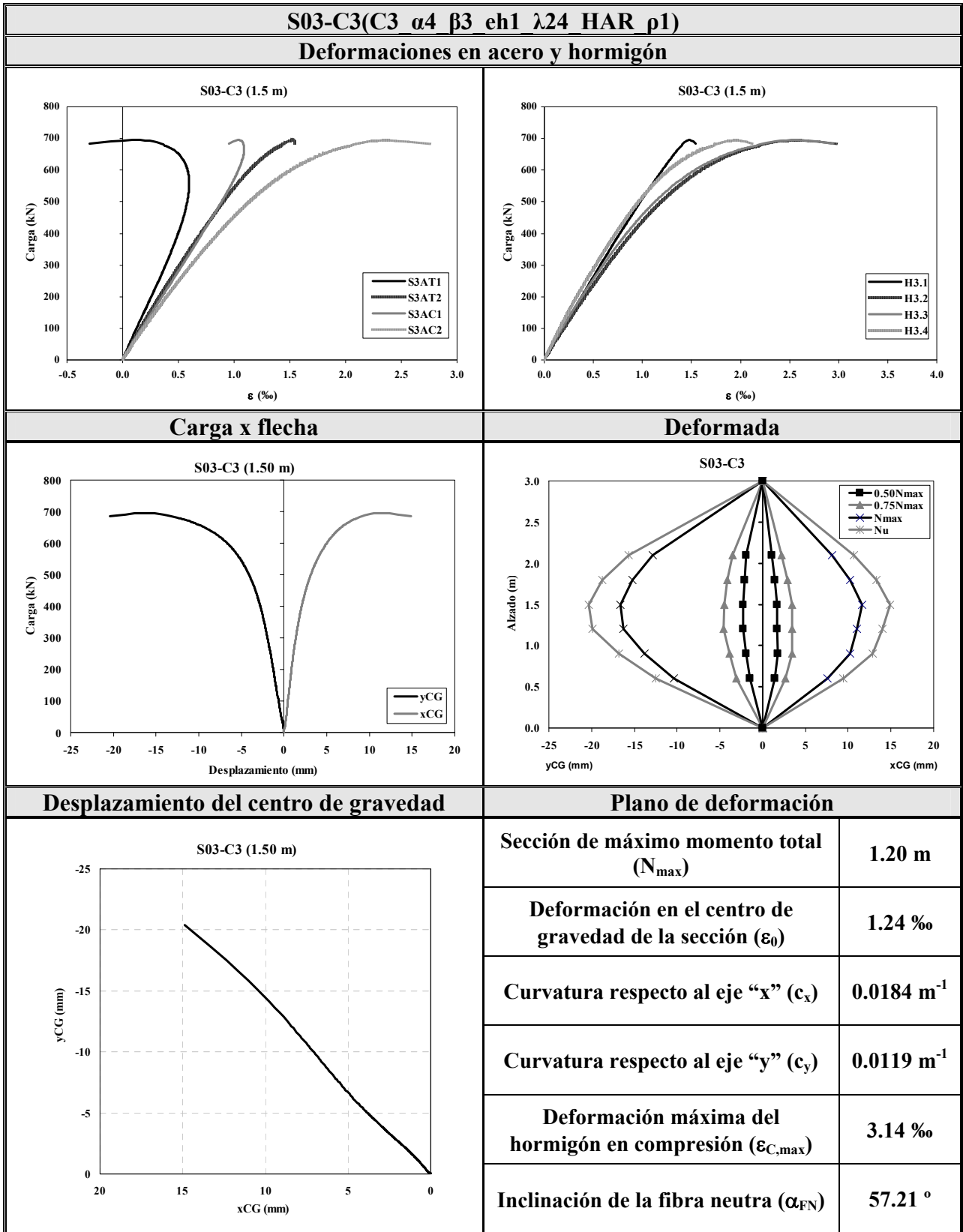


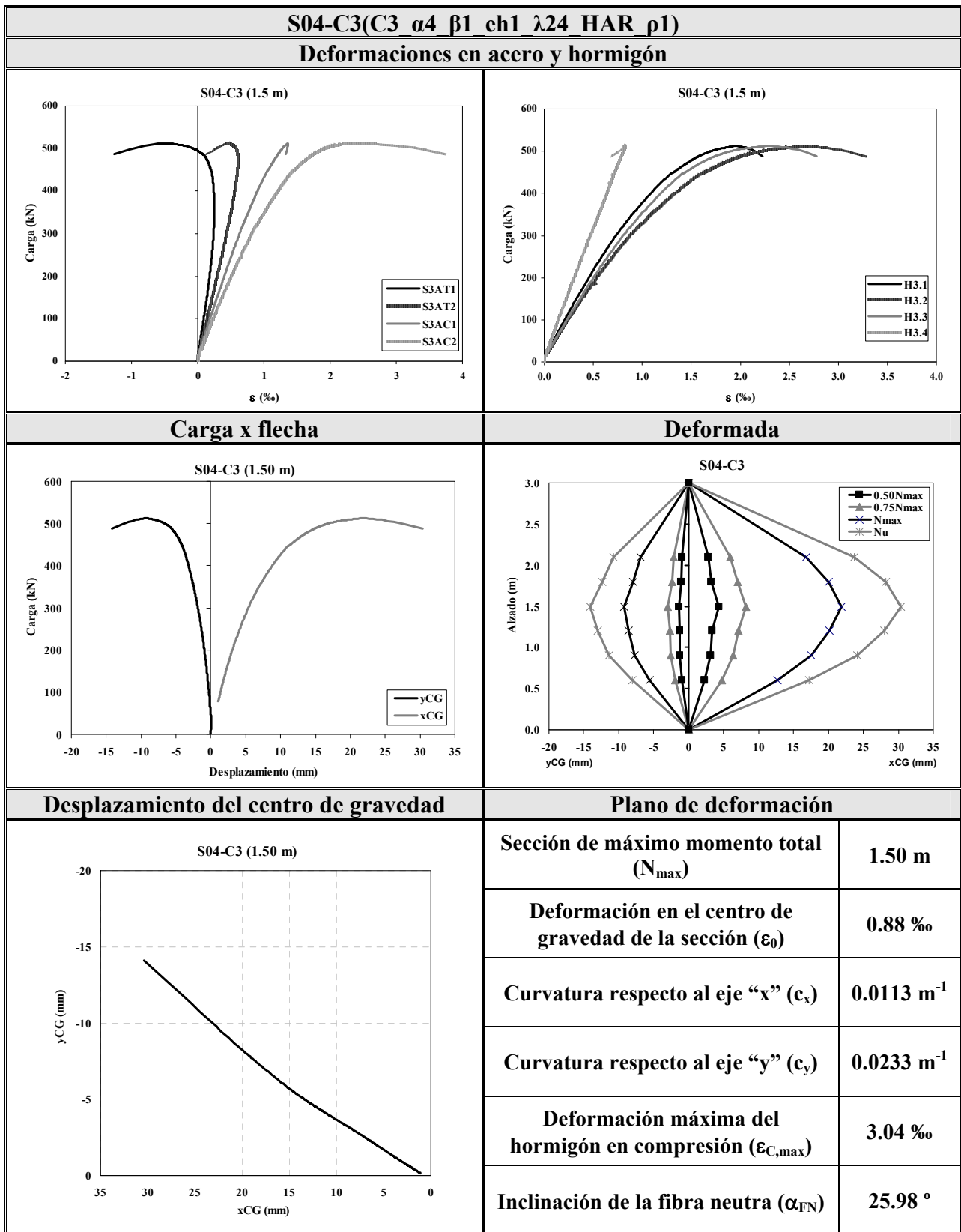


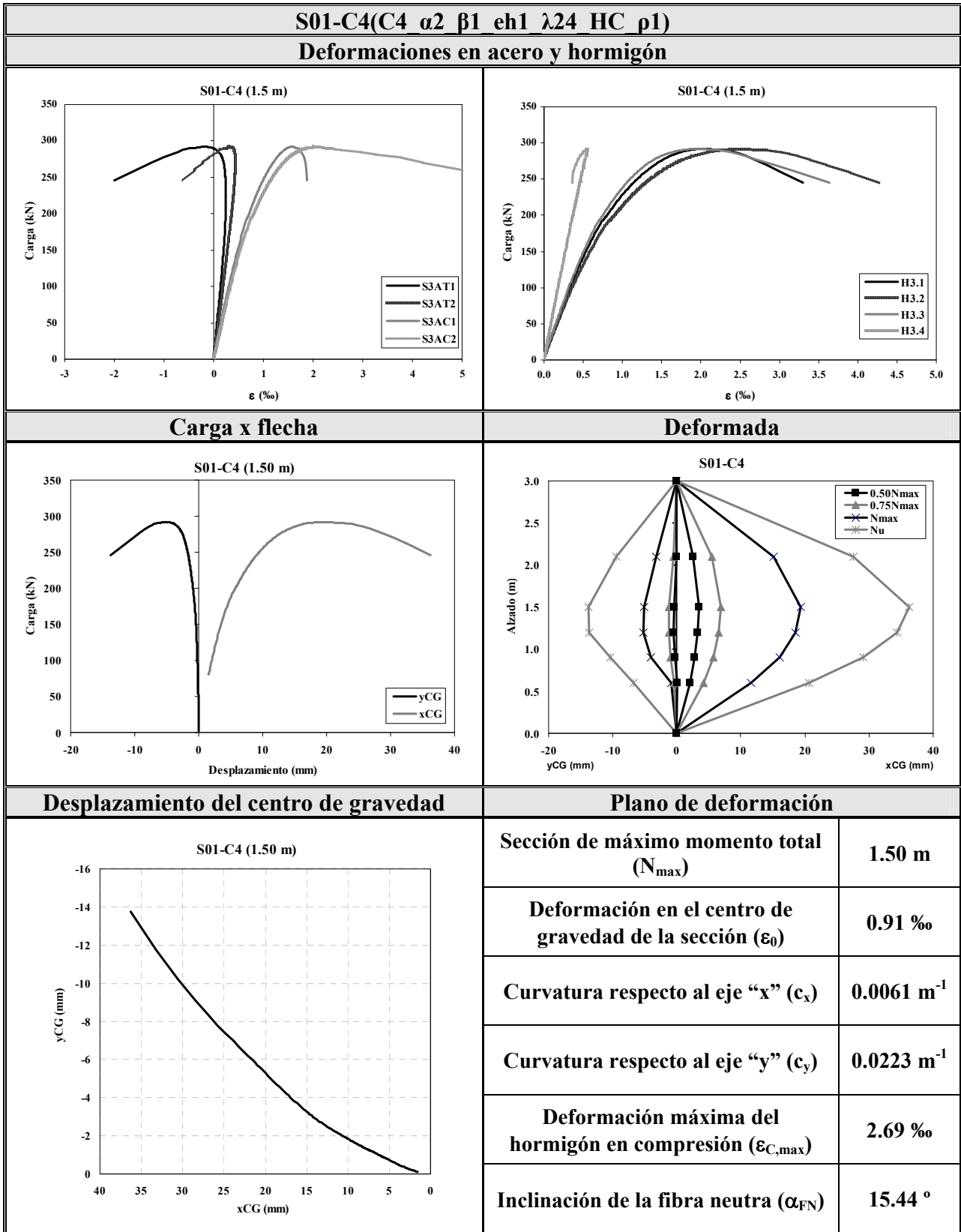


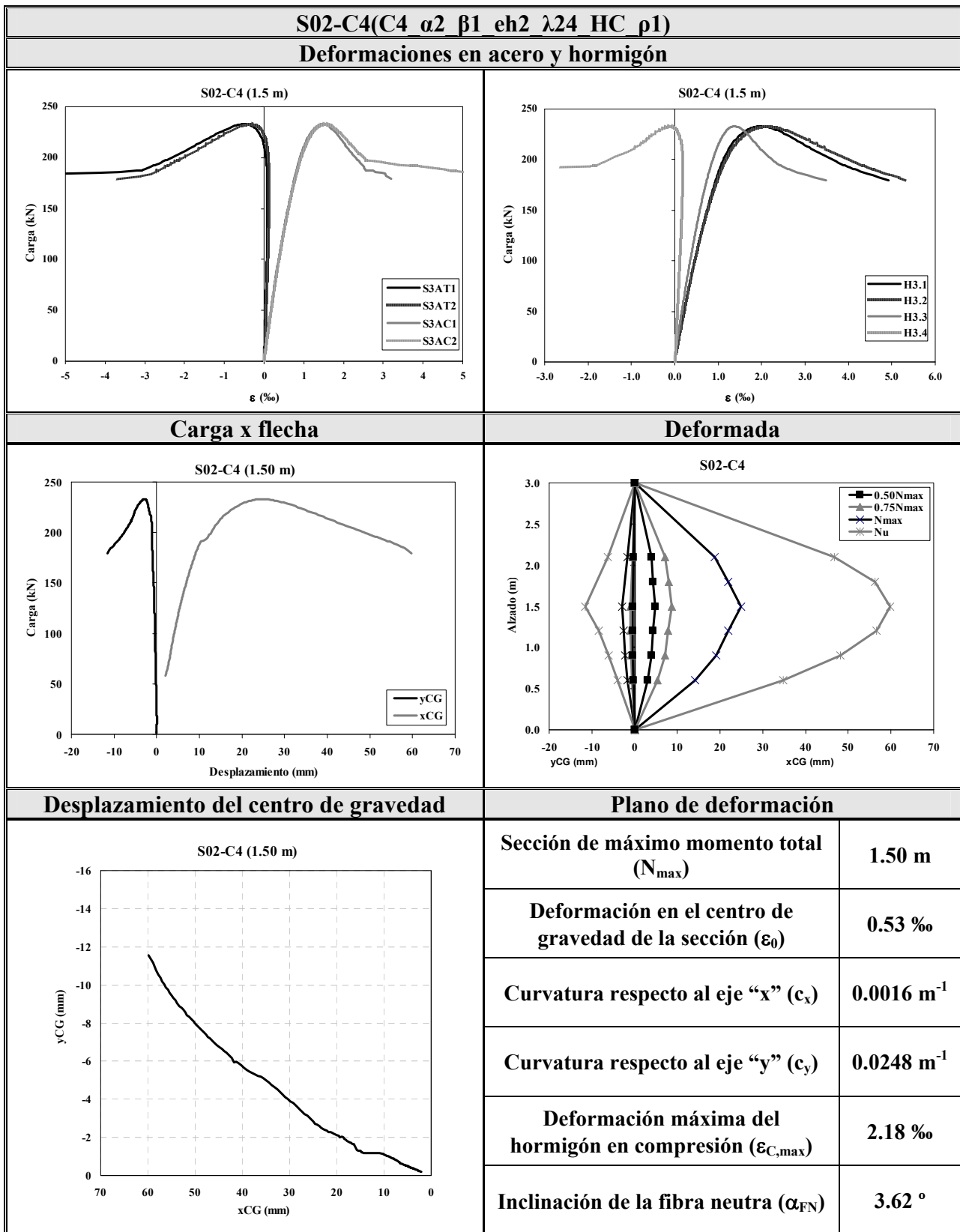


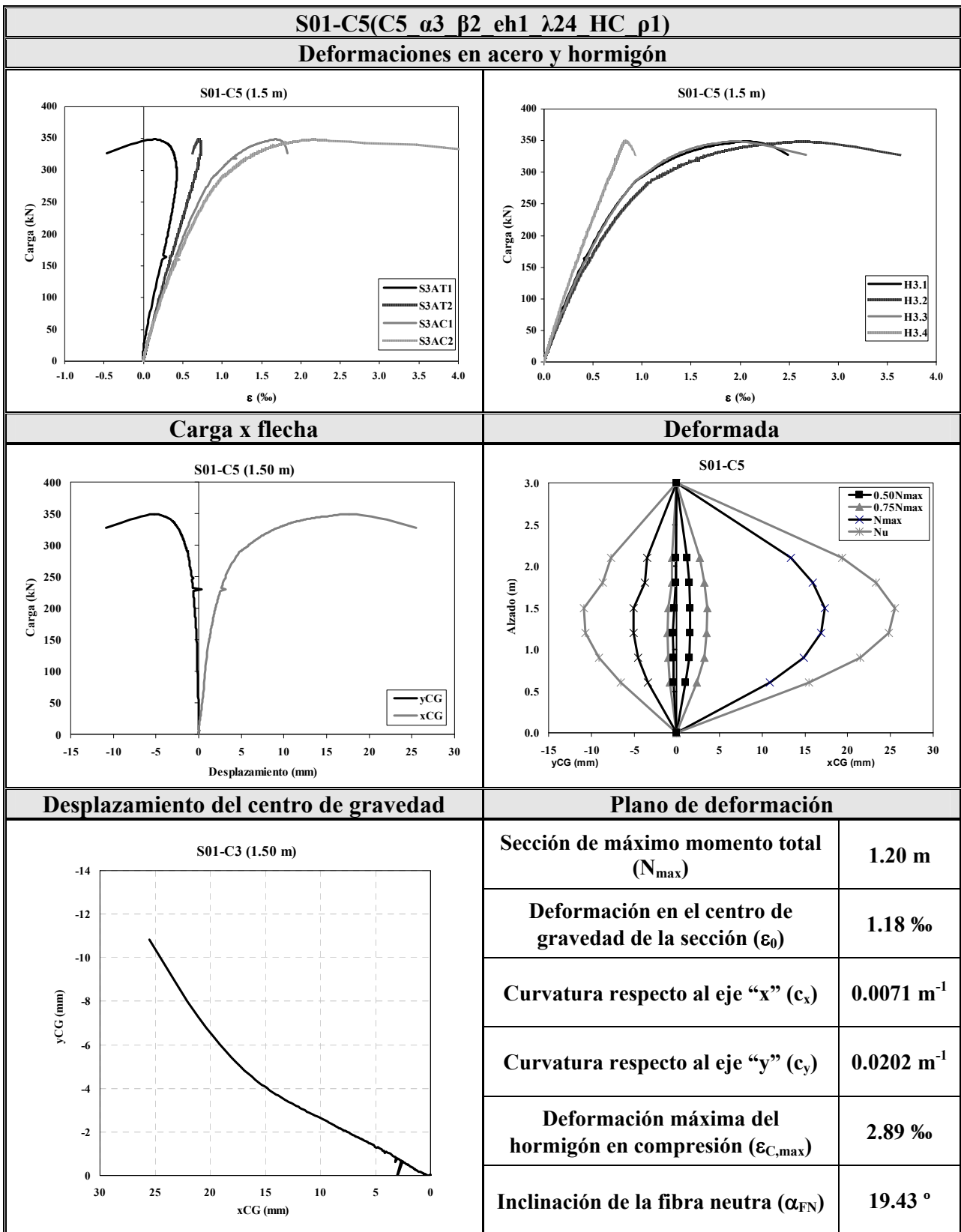


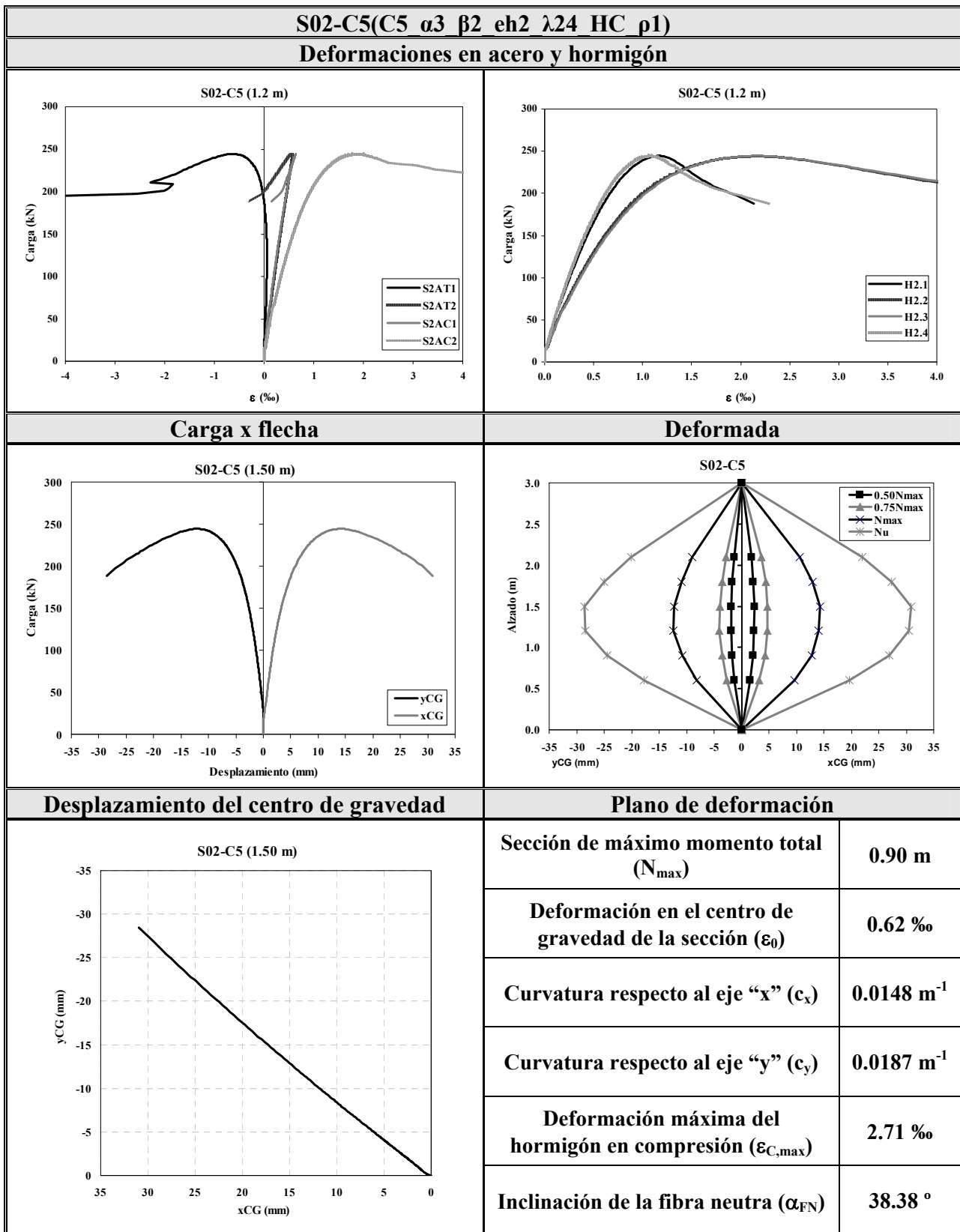


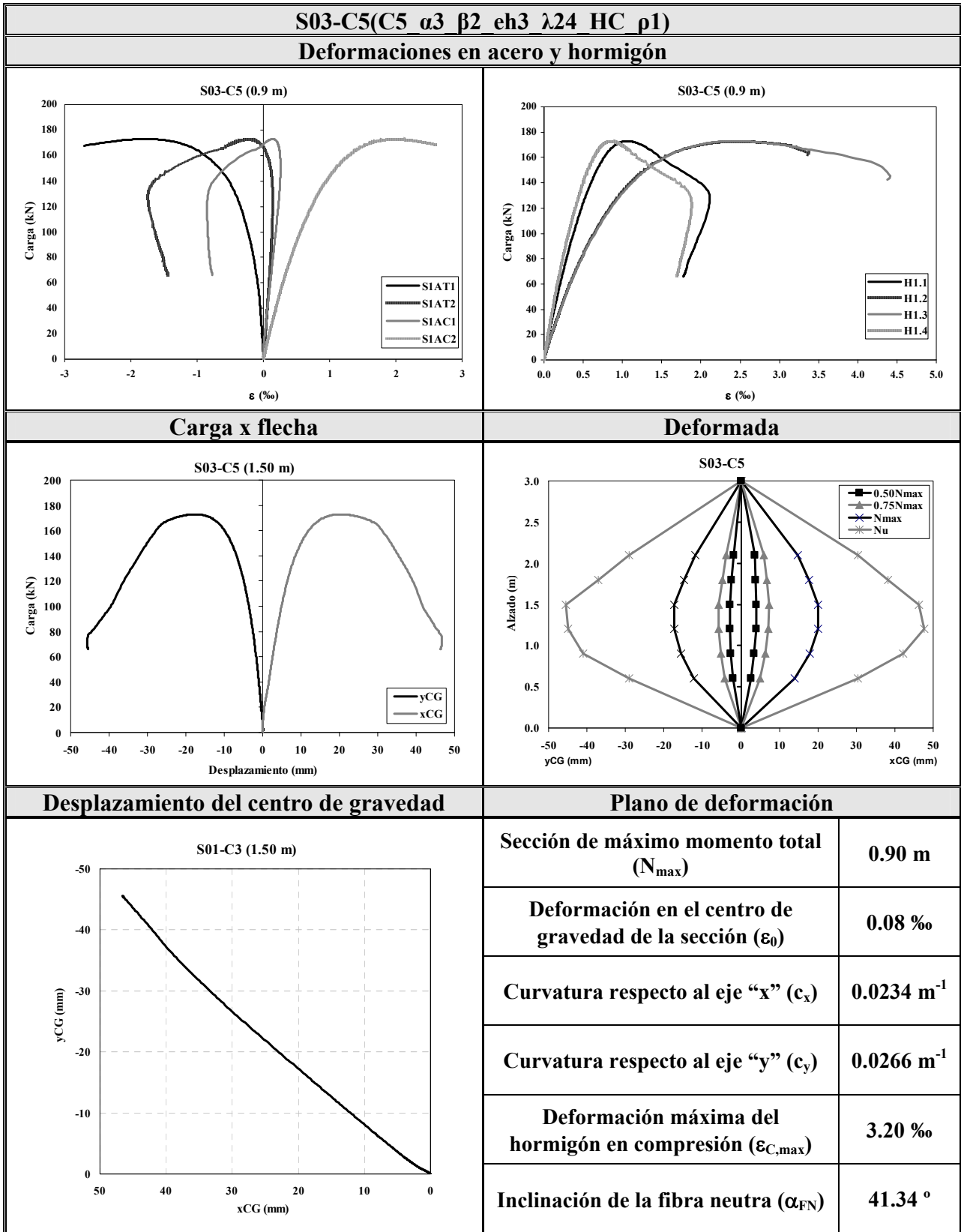


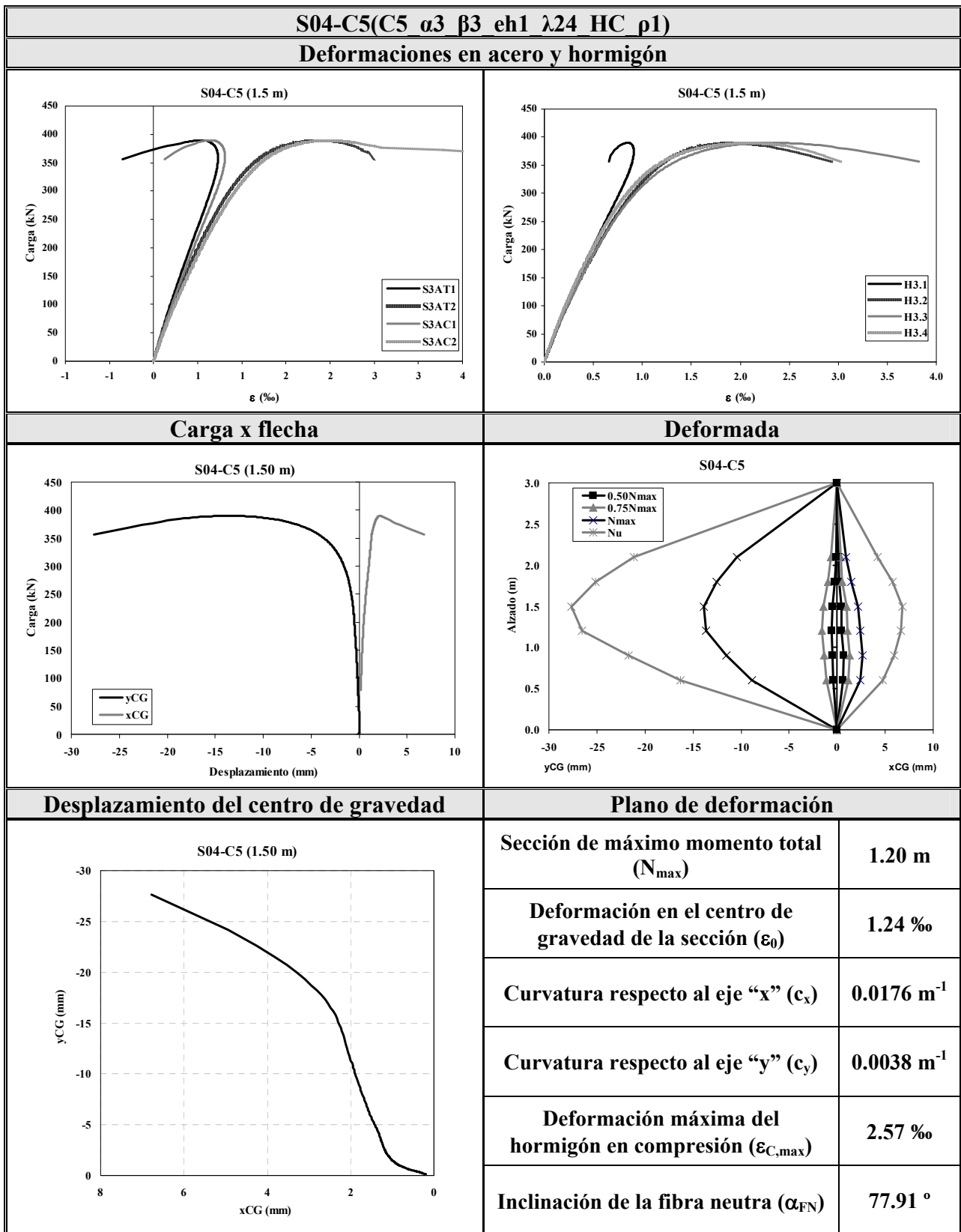


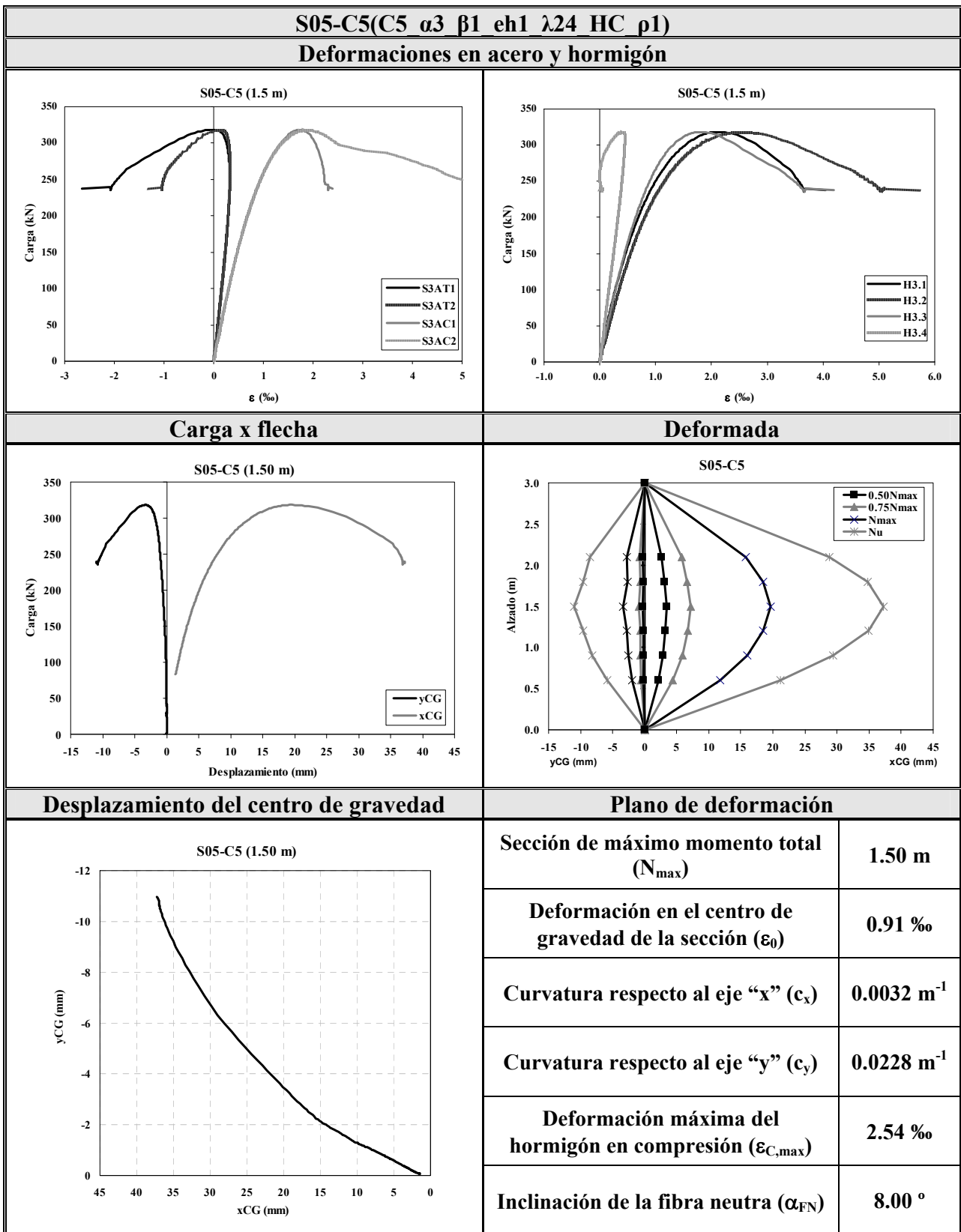


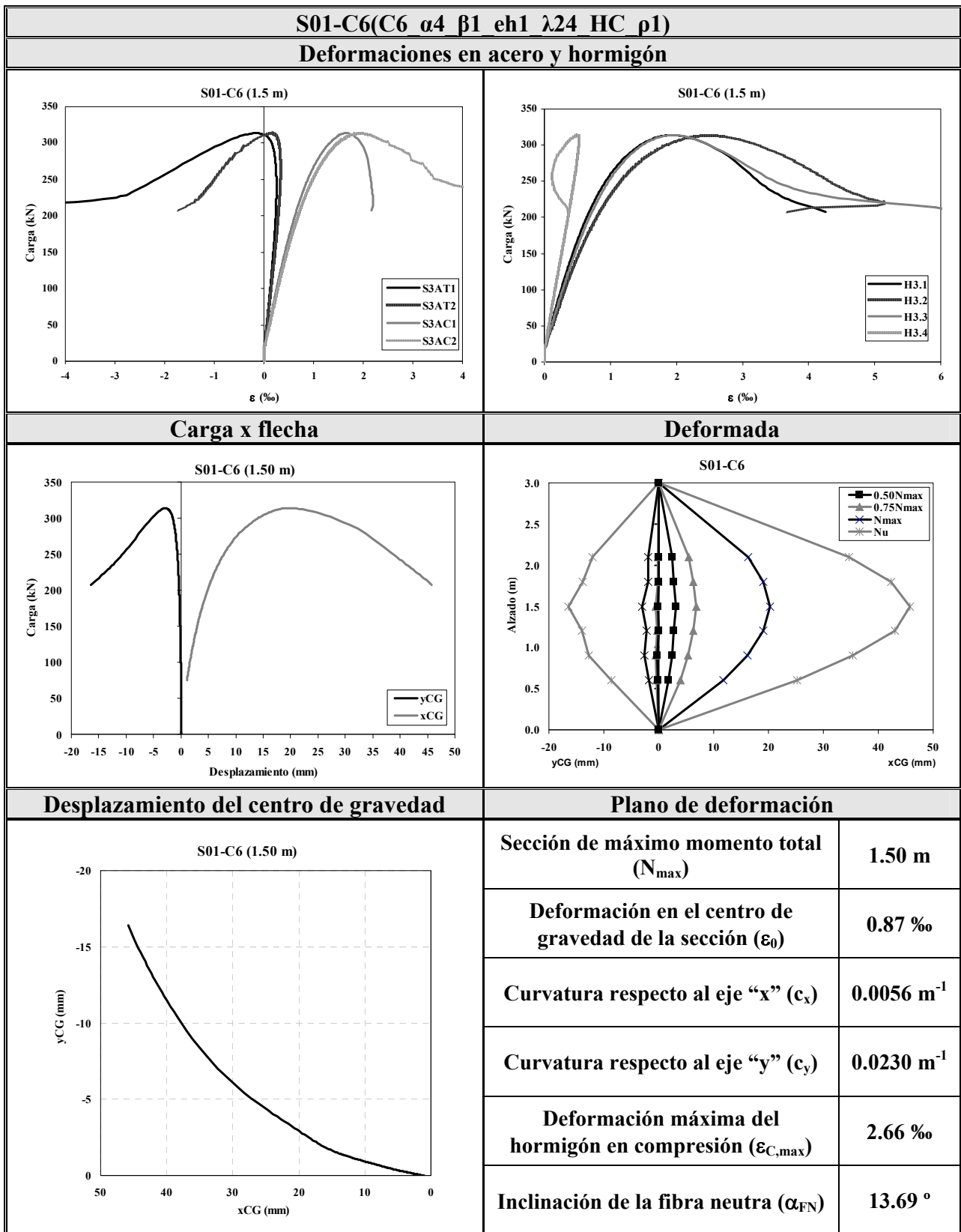


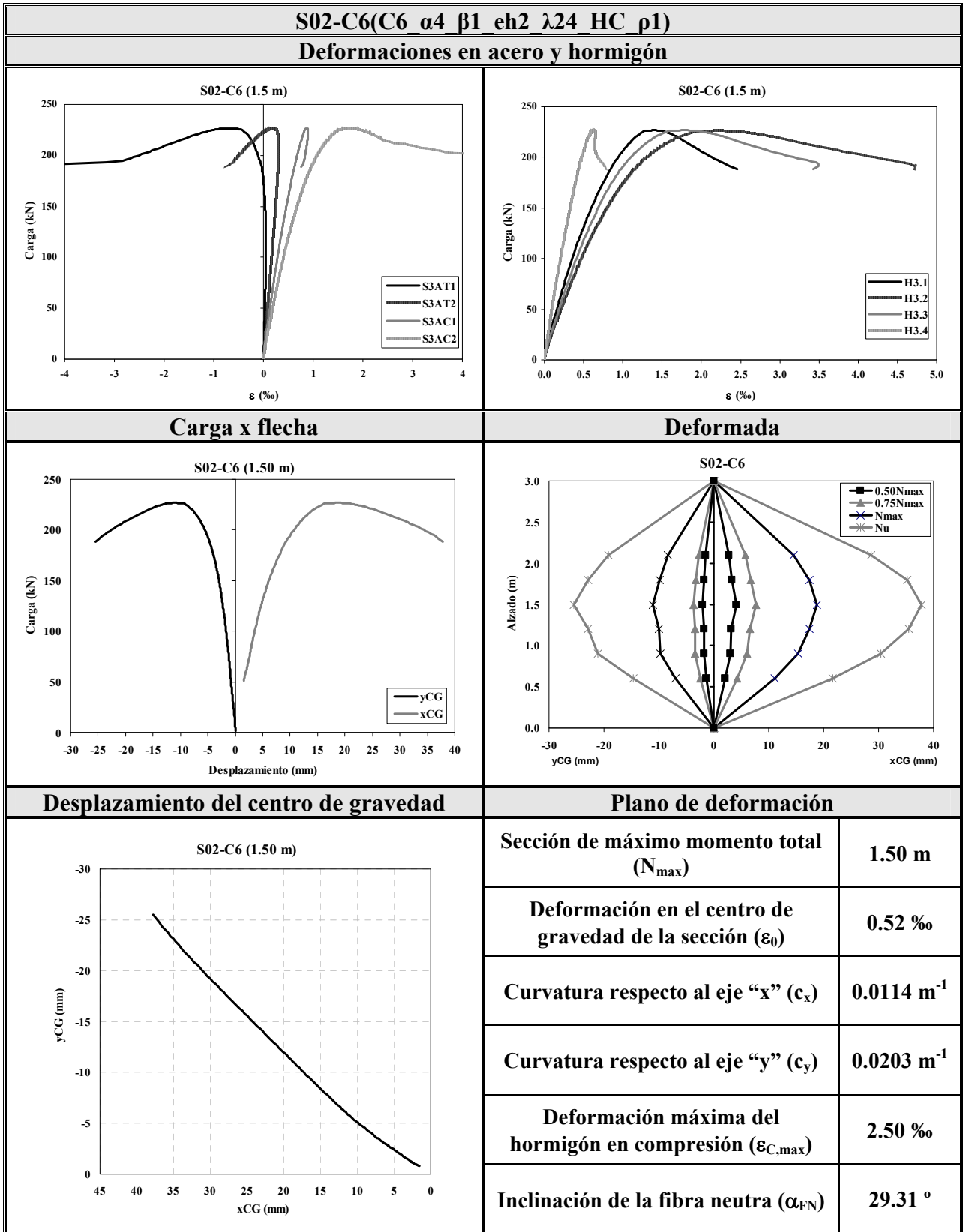


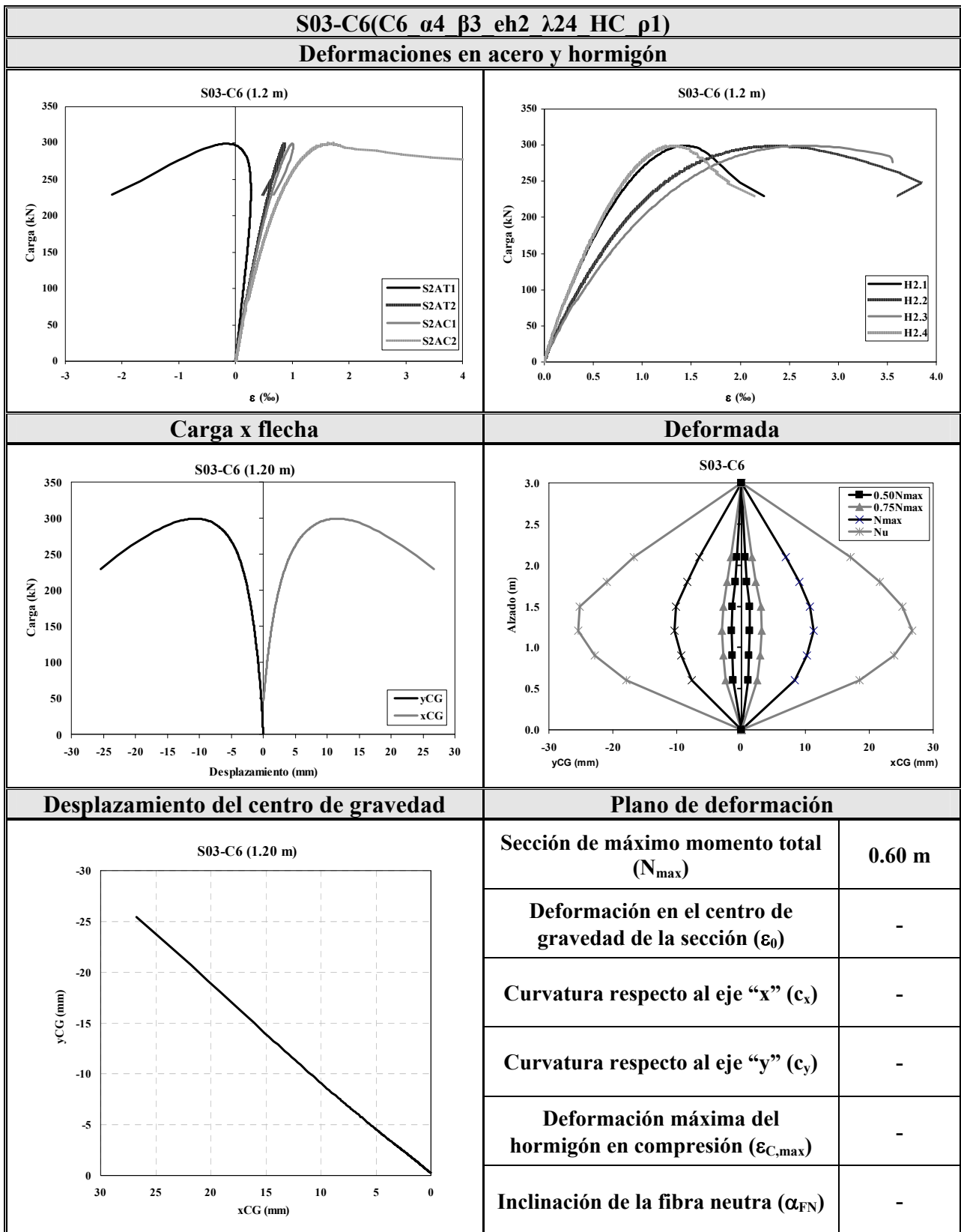












Anejo C.

Determinación del módulo de elasticidad en compresión del hormigón utilizado en los ensayos experimentales

En este anejo se presentan los resultados de los ensayos realizados para los dos tipos de hormigón utilizados en el programa experimental para obtención del módulo de elasticidad estático en compresión sobre probeta cilíndrica de los mismos según la normativa UNE 83316 [65].

El módulo de elasticidad en compresión, E_c , es conocido como el módulo secante, que, en Newton por milímetro cuadrado, se calcula mediante la expresión C.1:

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad \text{C.1}$$

donde $\Delta\sigma$ y $\Delta\varepsilon$ son, respectivamente, los incrementos de tensión y de deformación producidos entre las tensiones de 0.5 N/mm^2 y la correspondiente a $1/3$ de la tensión de rotura del hormigón.

Para realización del ensayo se utiliza la prensa del laboratorio del Departamento de Ingeniería de Proyectos de Ingeniería Civil (figura C.1.a) que es capaz de aplicar la carga de ensayo a la velocidad especificada por la normativa y de mantenerla en el escalón de carga correspondiente.

Como instrumentos de medidas de los cambios de longitud en las probetas ensayadas se emplean 3 captadores de desplazamientos (figura C.1.b), teniendo una base de medida no menor de dos tercios del diámetro de la probeta de ensayo y que permite su colocación de tal forma que los puntos de medida sean equidistantes de las bases de la probeta y a una distancia no menor de un cuarto de la altura de la misma, como especifica la normativa.



(a)



(b)

Figura C.1.a. Prensa hidráulica utilizada para los ensayos de determinación del módulo de elasticidad del hormigón; b. Detalle de los captadores de desplazamiento ubicados en la probeta.

Las probetas utilizadas en el ensayo son de forma cilíndrica de diámetro 150mm y altura 300 mm como se muestra en la figura C.2.



Figura C.2. Probetas de control utilizada en los ensayos (HC y HAR).

A continuación se describe el procedimiento de ensayo especificado por la normativa mencionada:

1. Determinación de la resistencia a compresión:

- Se determina la resistencia a compresión sobre 3 probetas, iguales en forma y tamaño a aquellas utilizadas para la determinación del módulo de elasticidad, fabricadas y curadas en condiciones iguales.
- El valor medio de la resistencia a compresión, f_c , determinará el esfuerzo a aplicar en la determinación del módulo de elasticidad.

2. Determinación del módulo de elasticidad estático:

- Se centra la probeta en la máquina de ensayo, con el instrumento de medida (captadores de desplazamiento) colocado en posición axial. Aplicar la tensión inicial, σ_b , es decir 0.5 N/mm^2 y registrar la deformación leída en cada captador de desplazamiento;
- Se incrementa uniformemente la tensión a una velocidad de $0,5 \pm 0.2 \text{ N/mm}^2$ por segundo hasta que la tensión alcance el valor de un tercio de la resistencia a compresión del hormigón ($\sigma_a = f_c/3$). Se mantiene la carga durante 60 segundos y se registra la deformación medida, tomando lecturas de cada captador de desplazamiento con intervalos de 30 segundos. Se las lecturas no difieren más del 20% del valor medido significa que la probeta está bien centrada en la máquina de ensayo;
- Una vez comprobado que la probeta está bien centrada se reduce la carga, a la misma velocidad que durante el proceso de carga, hasta el nivel de la tensión inicial (0.5 N/mm^2). A continuación se realiza al menos dos ciclos adicionales de carga-descarga, utilizando las mismas velocidades, y manteniendo las tensiones (σ_a y σ_b) constantes durante un período de 60

segundos. Una vez terminado el último ciclo y de esperar un período de 60 segundos manteniendo la tensión $\sigma_b = 0.5 \text{ N/mm}^2$, se registra las lecturas de las deformaciones, ε_b , tomadas al cabo de 30 segundos. Después se vuelve a cargar la probeta hasta la tensión σ_a , a la velocidad especificada, y se registra las lecturas de las deformaciones relativas, ε_a , tomadas a los 30 segundos;

- Una vez tomadas todas las medidas, se incrementa la carga en la probeta, a la velocidad especificada, hasta que se produzca la rotura.

El módulo de elasticidad estático en compresión, E_c , en Newton por milímetro cuadrado, está dado por la expresión C.2:

$$\frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\varepsilon_a - \varepsilon_b} \quad \text{C.2}$$

donde: σ_a es la tensión en el escalón correspondiente a $\sigma_a = f_c/3$;
 σ_b es la tensión inicial (0.5 N/mm^2);
 ε_a es la deformación media, bajo el nivel de carga máxima;
 ε_b es la deformación media, bajo el nivel de esfuerzo base de carga.

Por último, la normativa informa que se debe redondear los resultados a 500 N/mm^2 para valores superiores a 10000 N/mm^2 y a 100 N/mm^2 para valores por debajo de 10000 N/mm^2 .

En la figura C.3 se muestra el ciclo de carga seguido durante el ensayo de una de las probetas fabricadas con hormigón de 90 MPa de resistencia a compresión

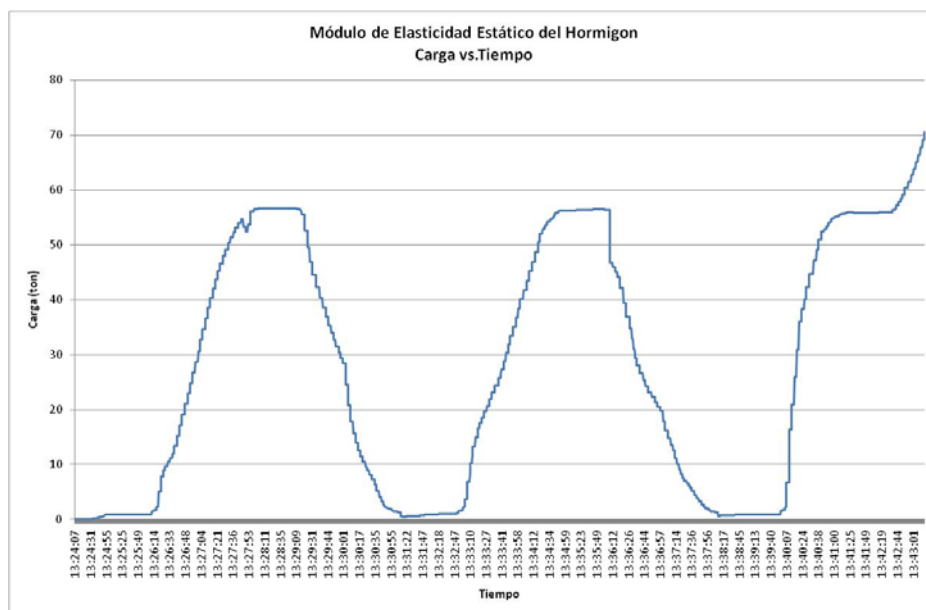


Figura C.3. Ciclo carga-descarga en el ensayo para obtención del módulo de elasticidad estático en compresión del hormigón.

Para las probetas fabricadas con hormigón de 30 MPa (HC) de resistencia a compresión se obtuvo un módulo de elasticidad de 28000 N/mm², y para las probetas fabricadas con hormigón de 90 MPa (HAR) de resistencia se obtuvo un valor de 39000 N/mm² como módulo de elasticidad estático del hormigón en compresión.

Se puede comparar el resultado obtenido con los valores que proponen las normativas para el módulo de elasticidad en función de la resistencia del hormigón, obteniéndose las siguientes expresiones:

- EHE-08. Instrucción de Hormigón Estructural [23]:

$$90\text{MPa} : E_{\text{cm}} = 8500 \cdot \sqrt[3]{f_{\text{cm}}} = 8500 \cdot \sqrt[3]{93.2} = 38500 \text{ N/mm}^2$$

$$30\text{MPa} : E_{\text{cm}} = 8500 \cdot \sqrt[3]{32.4} = 27098 \text{ N/mm}^2$$

- Eurocódigo 2 (2004) [29]:

$$90\text{MPa} : E_{\text{cm}} = 22 \cdot \left[\frac{f_{\text{cm}}}{10} \right]^{0.3} \cdot 10^3 = 42978 \text{ N/mm}^2$$

$$30\text{MPa} : E_{\text{cm}} = 22 \cdot \left[\frac{32,4}{10} \right]^{0.3} \cdot 10^3 = 31303 \text{ N/mm}^2$$

- American Concrete Institute. ACI-318 (2008) [1]:

$$90\text{MPa} : E_{\text{cm}} = 4700 \cdot \sqrt{f_{\text{cm}}} = 45370 \text{ N/mm}^2$$

$$30\text{MPa} : E_{\text{cm}} = 4700 \cdot \sqrt{32,4} = 26750 \text{ N/mm}^2$$

Anejo D.

Ensayos experimentales existentes en la literatura

En este anejo se presenta un listado de los ensayos experimentales de soportes de hormigón armado sometidos a esfuerzos de flexo-compresión con excentricidades desiguales en extremos existentes en la literatura técnica analizada. A continuación, en la tabla D.1, se puede observar las características de cada ensayo realizados por los distintos autores con las respectivas variables analizadas.

Estudio teórico-experimental de soportes esbeltos de hormigón armado sometidos a compresión con excentricidades y ángulos de esviaje desiguales en sus extremos

Autores	Soporte	h (m)	b (m)	e₁/e₂	e₂/h	l/h	ρ (%)	w (%)	f_y (MPa)	f_c (MPa)	r_{mec}/h	h/b	L (m)
Baumann (1935) [11]	19 E	0.13	0.25	0	0.167	24.7	0.97	0.69	299	24.3	0.155	0.52	3.21
Baumann (1935) [11]	26 F	0.25	0.25	0	0.167	12.6	0.98	0.75	287	30.3	0.125	1.00	3.15
Baumann (1935) [11]	32 I	0.25	0.25	0	0.167	12.6	2.01	0.70	280	28.0	0.125	1.00	3.15
Martin y Olivieri (1966) [44]	412-1	0.09	0.127	-0.5	0.211	40	2.48	0.60	281	34.3	0.200	0.71	3.6
Martin y Olivieri (1966) [44]	412-2	0.09	0.127	-0.5	0.211	40	2.48	0.60	281	25.5	0.200	0.71	3.6
Martin y Olivieri (1966) [44]	422-1	0.09	0.127	-0.5	0.388	40	2.48	0.60	281	35.6	0.200	0.71	3.6
Martin y Olivieri (1966) [44]	422-2	0.09	0.127	-0.5	0.388	40	2.48	0.60	281	26.2	0.200	0.71	3.6
Martin y Olivieri (1966) [44]	432-1	0.09	0.127	-0.5	0.282	40	2.48	0.60	281	38.0	0.200	0.71	3.6
Martin y Olivieri (1966) [44]	432-2	0.09	0.127	-0.5	0.282	40	2.48	0.60	281	27.0	0.200	0.71	3.6
MacGregor y Barter (1966) [40]	A-1	0.064	0.112	-1	0.2	27.3	4	0.65	315	34.3	0.175	0.57	1.73
MacGregor y Barter (1966) [40]	A-2	0.064	0.112	-1	0.2	27.3	4	0.65	315	33.3	0.175	0.57	1.73
MacGregor y Barter (1966) [40]	B-1	0.064	0.112	-1	1.5	27.3	4	0.65	315	29.6	0.175	0.57	1.73
MacGregor y Barter (1966) [40]	B-2	0.064	0.112	-1	1.5	27.3	4	0.65	315	33.3	0.175	0.57	1.73
Van Stekelenburg (1966) [54]	001	0.15	0.150	-1	0.2	25.7	0.5	0.76	469.0	29.0	0.120	1	3.86
Van Stekelenburg (1966) [54]	002	0.15	0.150	-1	0.2	25.7	0.89	0.75	438.5	28.5	0.125	1	3.86
Van Stekelenburg (1966) [54]	003	0.15	0.150	-1	0.2	25.7	2.46	0.72	430	34.0	0.140	1	3.86
Van Stekelenburg (1966) [54]	004	0.15	0.150	-1	0.2	25.7	3.18	0.71	430	33.5	0.145	1	3.86
Van Stekelenburg (1966) [54]	006	0.15	0.150	-1	0.2	25.7	0.50	0.76	469	29.0	0.120	1	3.86
Van Stekelenburg (1966) [54]	007	0.15	0.150	-1	0.2	25.7	0.89	0.75	438.5	28.5	0.125	1	3.86
Van Stekelenburg (1966) [54]	008	0.15	0.150	-1	0.2	25.7	2.46	0.72	430	34.0	0.140	1	3.86

Autores	Soporte	h (m)	b (m)	e ₁ /e ₂	e ₂ /h	l/h	ρ (%)	w (%)	f _y (MPa)	f _c (MPa)	r _{mec} /h	h/b	L (m)
Van Stekelenburg (1966) [54]	009	0.15	0.150	-1	0.2	25.7	3.18	0.71	430	33.5	0.145	1	3.86
Van Stekelenburg (1966) [54]	211	0.15	0.150	-1	0.2	25.7	1.59	0.75	438.5	31.0	0.125	1	3.86
Van Stekelenburg (1966) [54]	005	0.15	0.150	-1	0.2	15.7	1.59	0.75	438.5	35.5	0.125	1	2.36
Van Stekelenburg (1966) [54]	010	0.15	0.150	-1	0.2	15.7	1.59	0.75	438.5	35.5	0.125	1	2.36
Van Stekelenburg (1966) [54]	411	0.15	0.150	-1	0.2	15.7	1.59	0.75	438.5	27.0	0.125	1	2.36
Mehmel et al. (1969) [45]	6.1	0.159	0.254	0	0.170	14.50	1.12	0.69	505	35.9	0.155	0.63	2.31
Mehmel et al. (1969) [45]	6.2	0.157	0.253	0	0.503	21.70	1.12	0.69	505	37.4	0.155	0.62	3.41
Robinson et al (1975) [54]	DB 4	0.15	0.3	-1	0.1	30	2.05	0.73	415	32.1	0.135	0.5	4.5
Robinson et al (1975) [54]	DB 5	0.15	0.3	-1	0.2	30	2.05	0.73	428	28.2	0.135	0.5	4.5
Robinson et al (1975) [54]	DB 9	0.15	0.3	-1	0.2	30	2.05	0.73	423	33.1	0.135	0.5	4.5
Robinson et al (1975) [54]	DB 10	0.15	0.3	-1	0.5	30	2.05	0.73	430	41.0	0.135	0.5	4.5
Robinson et al (1975) [54]	DB 6	0.15	0.3	-0.5	0.1	30	2.05	0.73	407	25.8	0.135	0.5	4.5
Robinson et al (1975) [54]	DB 11	0.15	0.3	-0.5	0.2	30	2.05	0.73	433	38.7	0.135	0.5	4.5
Robinson et al (1975) [54]	DB 12	0.15	0.3	-0.5	0.5	30	2.05	0.73	431	40.1	0.135	0.5	4.5
Robinson et al (1975) [54]	DB 7	0.15	0.3	0	0.1	30	2.05	0.73	421	27.0	0.135	0.5	4.5
Robinson et al (1975) [54]	DB 13	0.15	0.3	0	0.2	30	2.05	0.73	427	39.8	0.135	0.5	4.5
Robinson et al (1975) [54]	DB 14	0.15	0.3	0	0.5	30	2.05	0.73	423	41.7	0.135	0.5	4.5
Robinson et al (1975) [54]	DB 8	0.15	0.3	0.5	0.1	30	2.05	0.73	427	36.4	0.135	0.5	4.5
Robinson et al (1975) [54]	DB 15	0.15	0.3	0.5	0.2	30	2.05	0.73	425	39.4	0.135	0.5	4.5

Estudio teórico-experimental de soportes esbeltos de hormigón armado sometidos a compresión con excentricidades y ángulos de esviaje desiguales en sus extremos

Autores	Soporte	h (m)	b (m)	e₁/e₂	e₂/h	l/h	ρ (%)	w (%)	f_y (MPa)	f_c (MPa)	r_{me}/h	h/b	L (m)
Robinson et al (1975) [54]	DB 16	0.15	0.3	0.5	0.5	30	2.05	0.73	433	37.3	0.135	0.5	4.5
Fouré et al. (1975) [55]	III. 4	0.15	0.2	-0.5	0.1	30	1.51	0.73	475.0	35.8	0.135	0.75	4.5
Fouré et al. (1975) [55]	IV 4 bis	0.15	0.2	-0.5	0.2	30	1.51	0.73	436.0	34.5	0.135	0.75	4.5
Fouré et al. (1975) [55]	IV 4	0.15	0.2	0.5	0.3	30	1.51	0.73	426.0	37.2	0.135	0.75	4.5
Rangan (1999) [53]	1	0.1	0.3	0.4	0.25	13.86	3	0.69	450	60	0.125	0.33	1.386
Rangan (1999) [53]	2	0.1	0.3	0.5	0.2	13.86	3	0.69	450	60	0.125	0.33	1.386
Rangan (1999) [53]	3	0.1	0.3	0.5	0.1	13.86	3	0.69	450	60	0.125	0.33	1.386
Rangan (1999) [53]	4	0.1	0.3	0.2	0.25	13.86	3	0.69	450	60	0.125	0.33	1.386
Rangan (1999) [53]	5	0.1	0.3	0.375	0.4	13.86	3	0.69	450	60	0.125	0.33	1.386
Rangan (1999) [53]	6	0.1	0.3	0.625	0.4	13.86	3	0.69	450	60	0.125	0.33	1.386
Rangan (1999) [53]	7	0.1	0.3	-0.66	0.3	13.86	2	0.69	450	60	0.125	0.33	1.386
Rangan (1999) [53]	8	0.1	0.3	-0.25	0.4	13.86	2	0.69	450	60	0.125	0.33	1.386
Rangan (1999) [53]	9	0.1	0.3	-1	0.4	13.86	3	0.69	450	60	0.125	0.33	1.386
Rangan (1999) [53]	10	0.1	0.3	-0.25	0.4	13.86	3	0.69	450	60	0.125	0.33	1.386
Rangan (1999) [53]	11	0.1	0.3	-1	0.1	13.86	3	0.69	450	60	0.125	0.33	1.386
Rangan (1999) [53]	12	0.1	0.3	-1	0.15	13.86	3	0.69	450	60	0.125	0.33	1.386
Sarker (2001) [57]	C2	0.175	0.175	0.43	0.2	8.57	2.95	0.69	454	58	0.154	1	1.5
Sarker (2001) [57]	C3	0.175	0.175	0	0.2	8.57	2.95	0.69	454	58	0.154	1	1.5
Sarker (2001) [57]	C4	0.175	0.175	-0.43	0.2	8.57	2.95	0.69	454	58	0.154	1	1.5
Sarker (2001) [57]	C5	0.175	0.175	-1	0.2	8.57	2.95	0.69	454	58	0.154	1	1.5
Sarker (2001) [57]	C6	0.175	0.175	-1	0.086	8.57	2.95	0.69	454	58	0.154	1	1.5
Sarker (2001) [57]	C8	0.175	0.175	0.54	0.371	8.57	2.95	0.69	454	62	0.154	1	1.5
Sarker (2001) [57]	C9	0.175	0.175	0.23	0.371	8.57	2.95	0.69	454	62	0.154	1	1.5
Sarker (2001) [57]	C10	0.175	0.175	-0.23	0.371	8.57	2.95	0.69	454	62	0.154	1	1.5
Sarker (2001) [57]	C11	0.175	0.175	-0.54	0.371	8.57	2.95	0.69	454	62	0.154	1	1.5
Sarker (2001) [57]	C12	0.175	0.175	-1	0.371	8.57	2.95	0.69	454	62	0.154	1	1.5
Sarker (2001) [57]	C14	0.175	0.175	0.54	0.371	8.57	2.95	0.69	454	101	0.154	1	1.5
Sarker (2001) [57]	C15	0.175	0.175	0.23	0.371	8.57	2.95	0.69	454	101	0.154	1	1.5

Autores	Soporte	h (m)	b (m)	e_1/e_2	e_2/h	l/h	ρ (%)	w (%)	f_y (MPa)	f_c (MPa)	r_{mec}/h	h/b	L (m)
Sarker (2001) [57]	C16	0.175	0.175	-0.23	0.371	8.57	2.95	0.69	454	101	0.154	1	1.5
Sarker (2001) [57]	C17	0.175	0.175	-0.54	0.371	8.57	2.95	0.69	454	101	0.154	1	1.5
Sarker (2001) [57]	C18	0.175	0.175	-1	0.371	8.57	2.95	0.69	454	101	0.154	1	1.5
Bradford (2005) [18]	C1	0.15	0.15	-1	0.333	33.33	2.01	0.80	454	29.3	0.1	1	5
Bradford (2005) [18]	C2	0.15	0.15	-0.5	0.333	33.33	2.01	0.80	454	29.3	0.1	1	5
Bradford (2005) [18]	C3	0.15	0.15	0	0.333	33.33	2.01	0.80	454	29.3	0.1	1	5
Bradford (2005) [18]	C4	0.15	0.15	0.5	0.333	33.33	2.01	0.80	454	29.3	0.1	1	5

Tabla D.1. Características de los ensayos con excentricidades distintas en extremos encontrados en la literatura técnica analizada.

Anejo E.

Contraste de los resultados experimentales con los métodos simplificados propuestos por las normativas

En este anejo se representa gráficamente el contraste de los resultados obtenidos experimentalmente con los obtenidos con la utilización de los métodos simplificados propuestos por las normativas (EHE-08 [23], EC-2 (2004) [29], ACI-318 (2008) [1]) en lo que se refiere a las carga máximas alcanzadas en cada ensayo. Se representa el ratio ($N_{\text{test}}/N_{\text{method}}$) en función de los parámetros analizados en flexo-compresión recta y esviada.

E.1. Contraste: flexo-compresión recta:

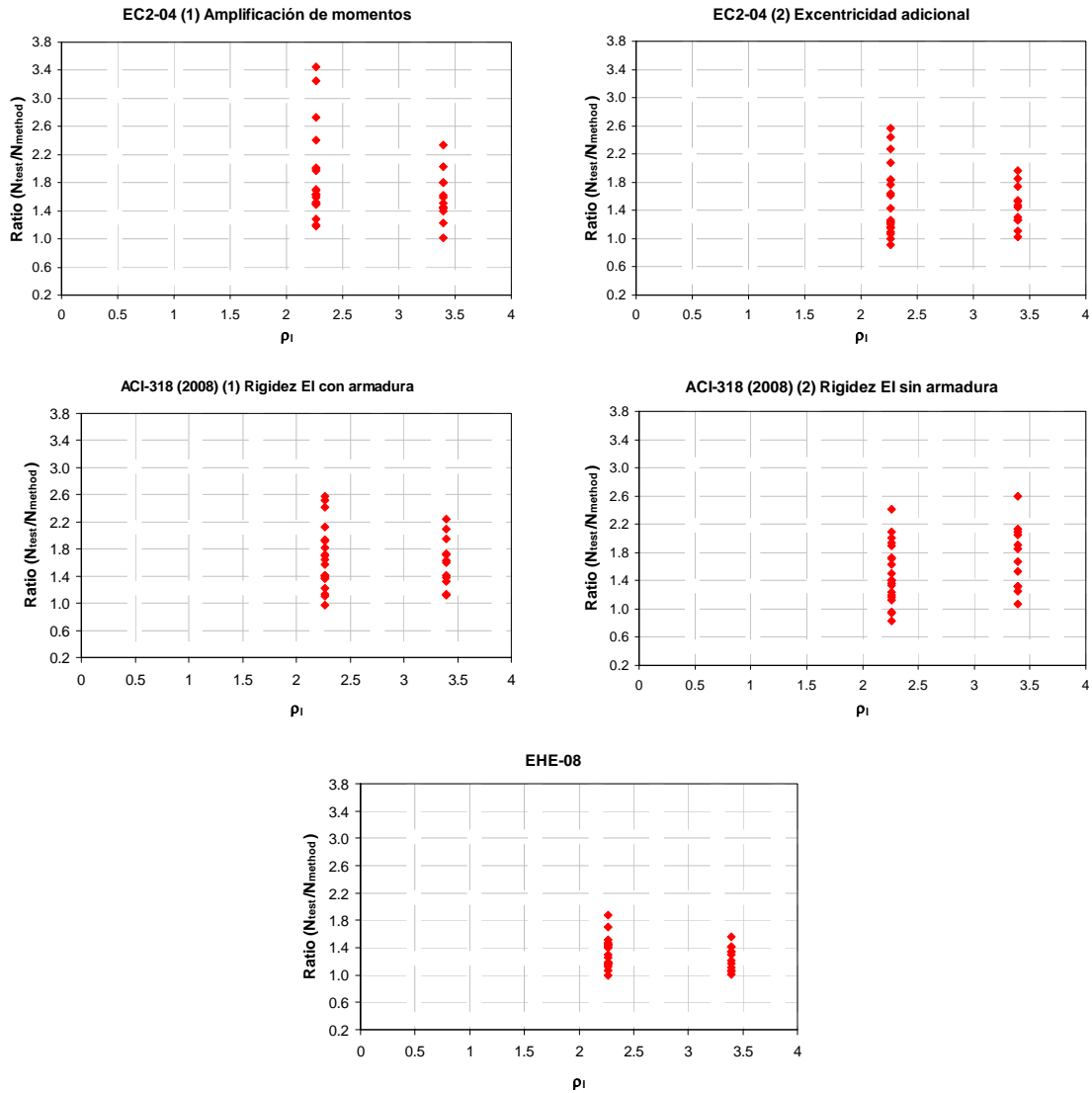


Figura E.1. Verificación de métodos simplificados: cuantía geométrica de armadura longitudinal (ρ_l): flexo-compresión recta.

En la figura E.1 se representa el ratio (N_{test}/N_{method}) en función de la cuantía geométrica de armadura longitudinal. Se puede observar que para una cuantía de 2.26% hay una mayor dispersión de resultados. El método propuesto por la EHE-08 [23] presenta una solución más centrada coeficientes de variación de 0.17 y 0.14 para cuantías geométricas de armadura longitudinal del 2.26% y del 3.39% respectivamente.

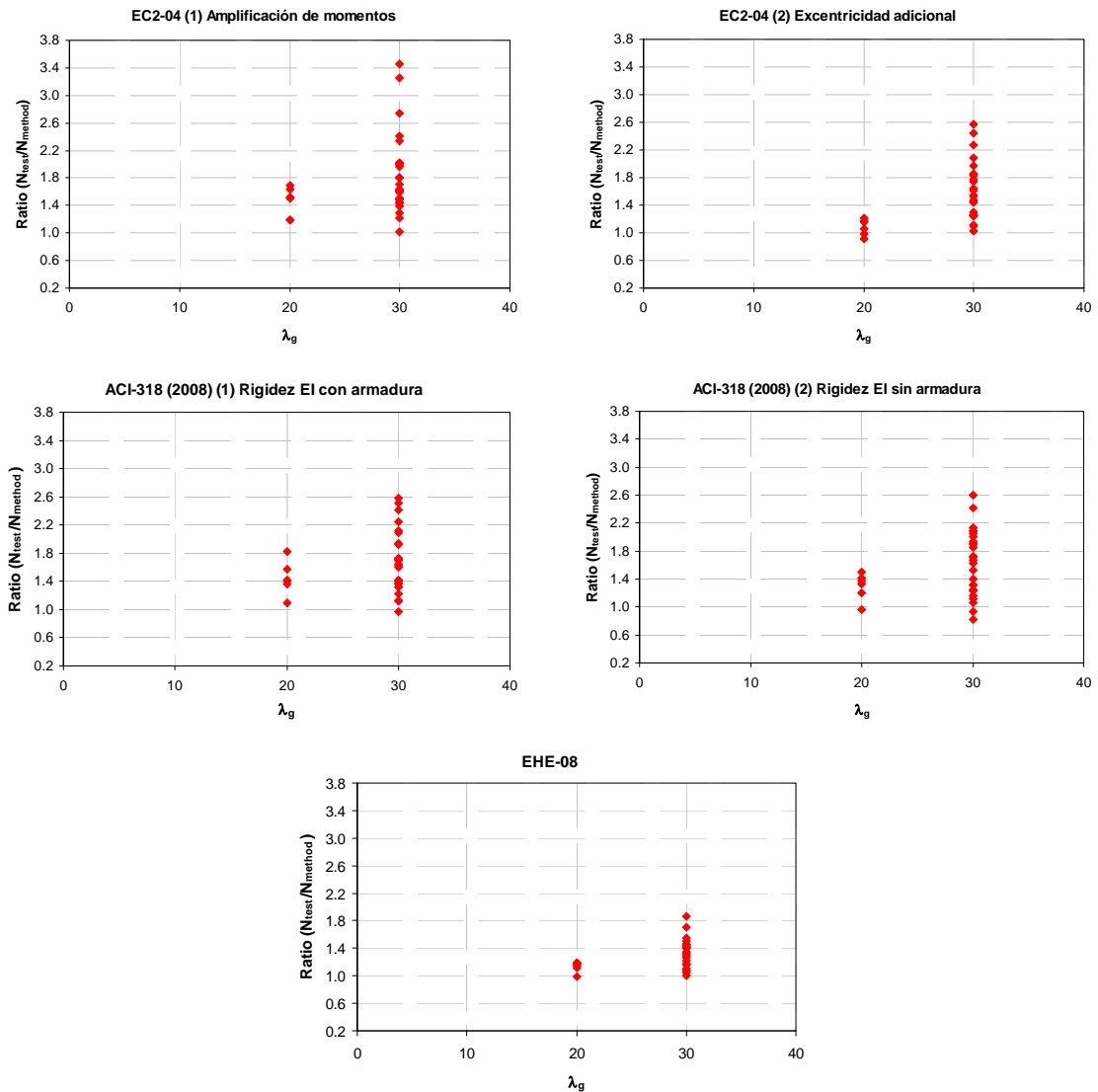


Figura E.2. Verificación de métodos simplificados: esbeltez geométrica (λ_g): flexo-compresión recta.

El grado de precisión de los métodos simplificados propuestos por las normativas en función de la esbeltez geométrica del soporte (λ_g) se representa en la figura E.2. Del análisis de dicha figura se observa que los resultados de los soportes con esbeltez geométrica (λ_g) igual a 30 presentan una mayor dispersión respecto a los soportes con esbeltez 20.

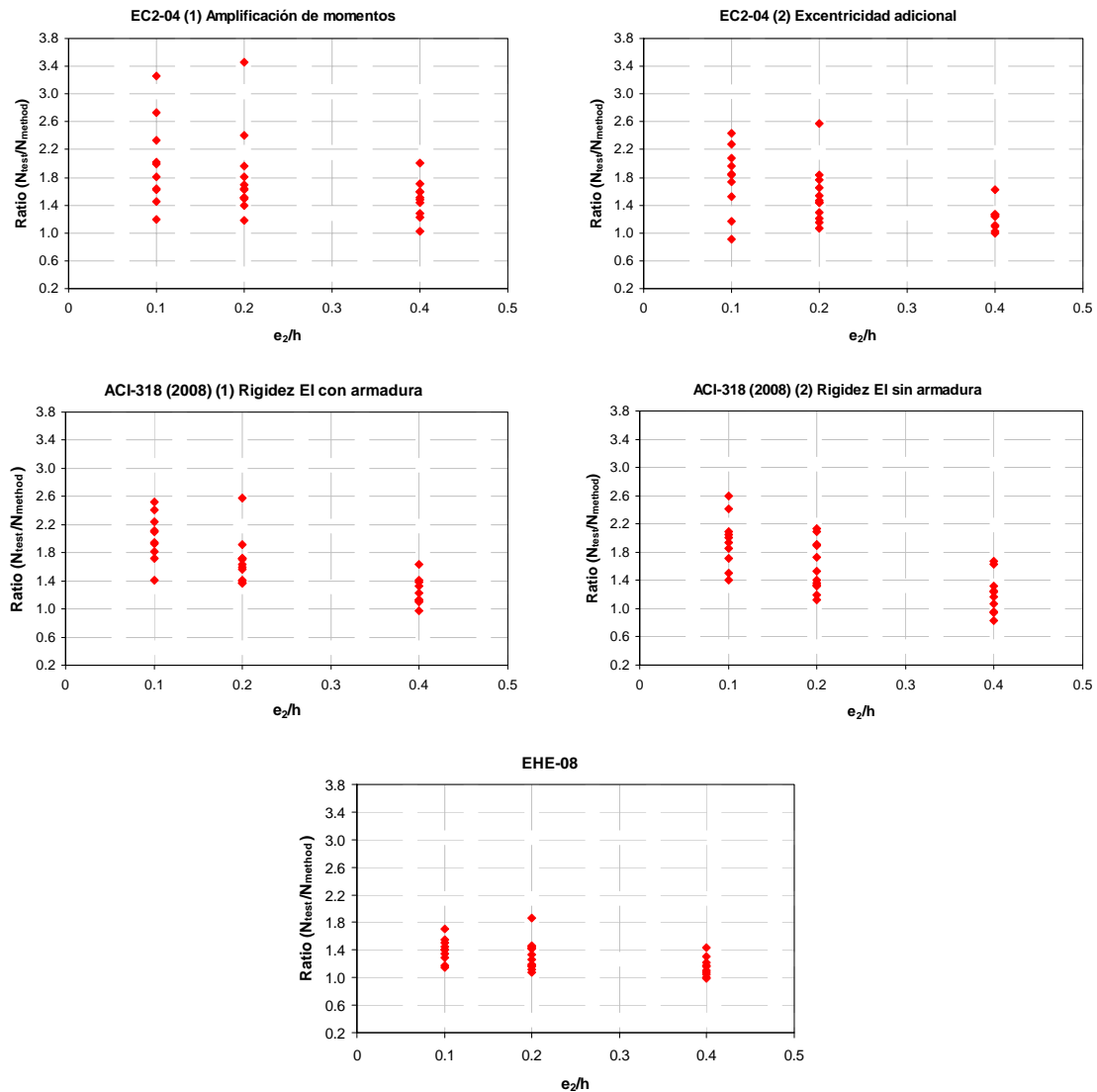


Figura E.3. Verificación de métodos simplificados: excentricidad adimensional (e_2/h): flexo-compresión recta.

Se puede observar, en la figura E.3, un incremento del ratio obtenido y de la dispersión de los resultados mientras disminuye la excentricidad adimensional (e_2/h), con excepción del método propuesto por la EHE-08 [23], que mantiene prácticamente el mismo nivel de precisión para los tres valores de e_2/h considerados: C.V. = 0.12, 0.16 y 0.12 para valores de e_2/h iguales a 0.1, 0.2 y 0.4 respectivamente. Además, cabe resaltar la gran dispersión (C.V. = 0.31 y 0.33) obtenida con la utilización del método de amplificación de momentos (1) propuesto por el EC-2 (2004) [29] para valores de adimensional iguales a 0.1 y 0.2 respectivamente.

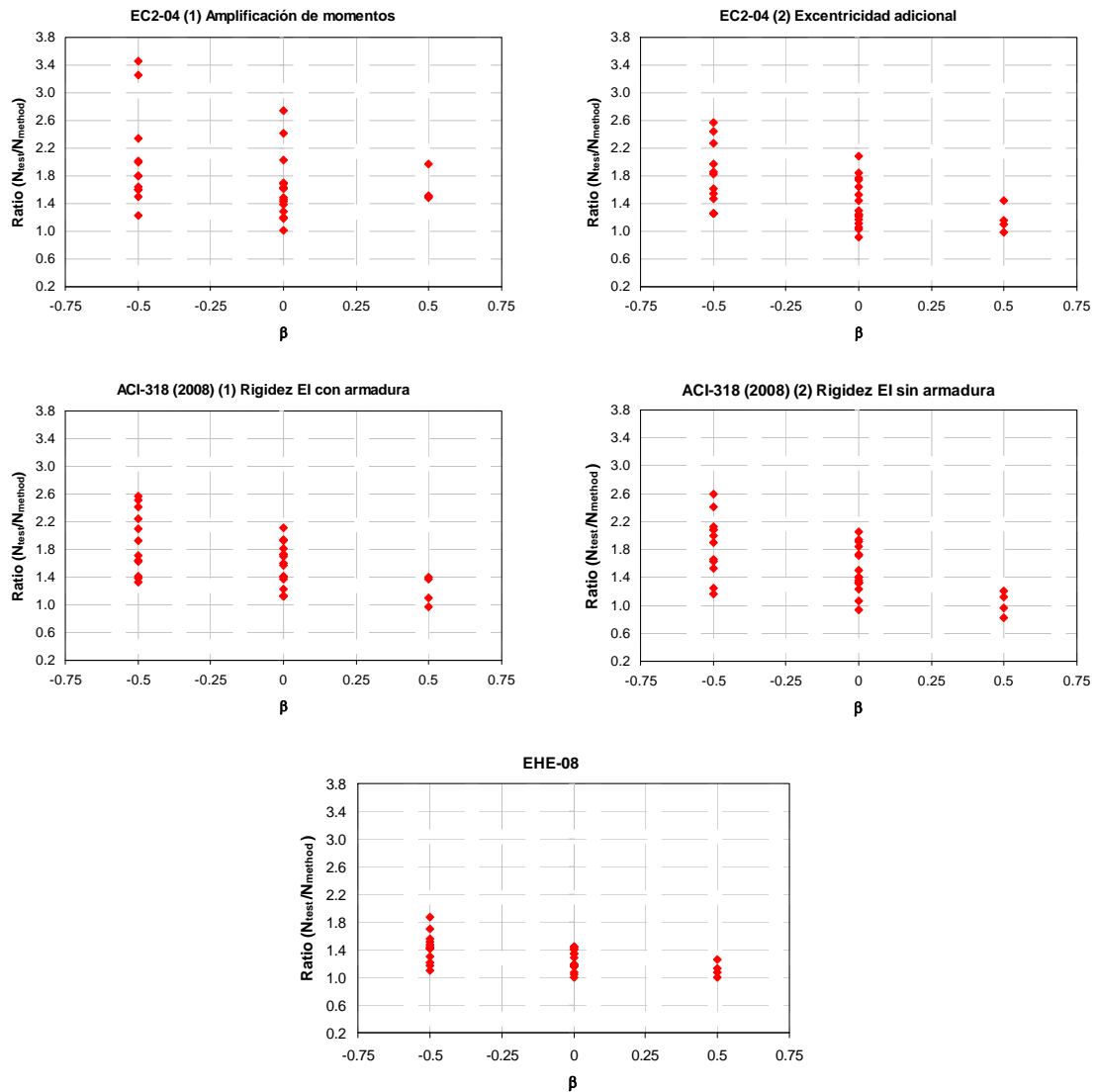


Figura E.4. Verificación de métodos simplificados: relación entre excentricidades en extremos (β): flexo-compresión recta.

En la figura E.4 se puede observar el incremento del ratio medio y de la dispersión de los resultados con la disminución de la relación entre excentricidades en extremos del soporte (β). Además, cabe resaltar la gran dispersión (C.V. = 0.34) obtenida con la utilización del método de amplificación de momentos (1) propuesto por el EC-2 (2004) [29] para valores de relación entre excentricidades $\beta = -0.5$.

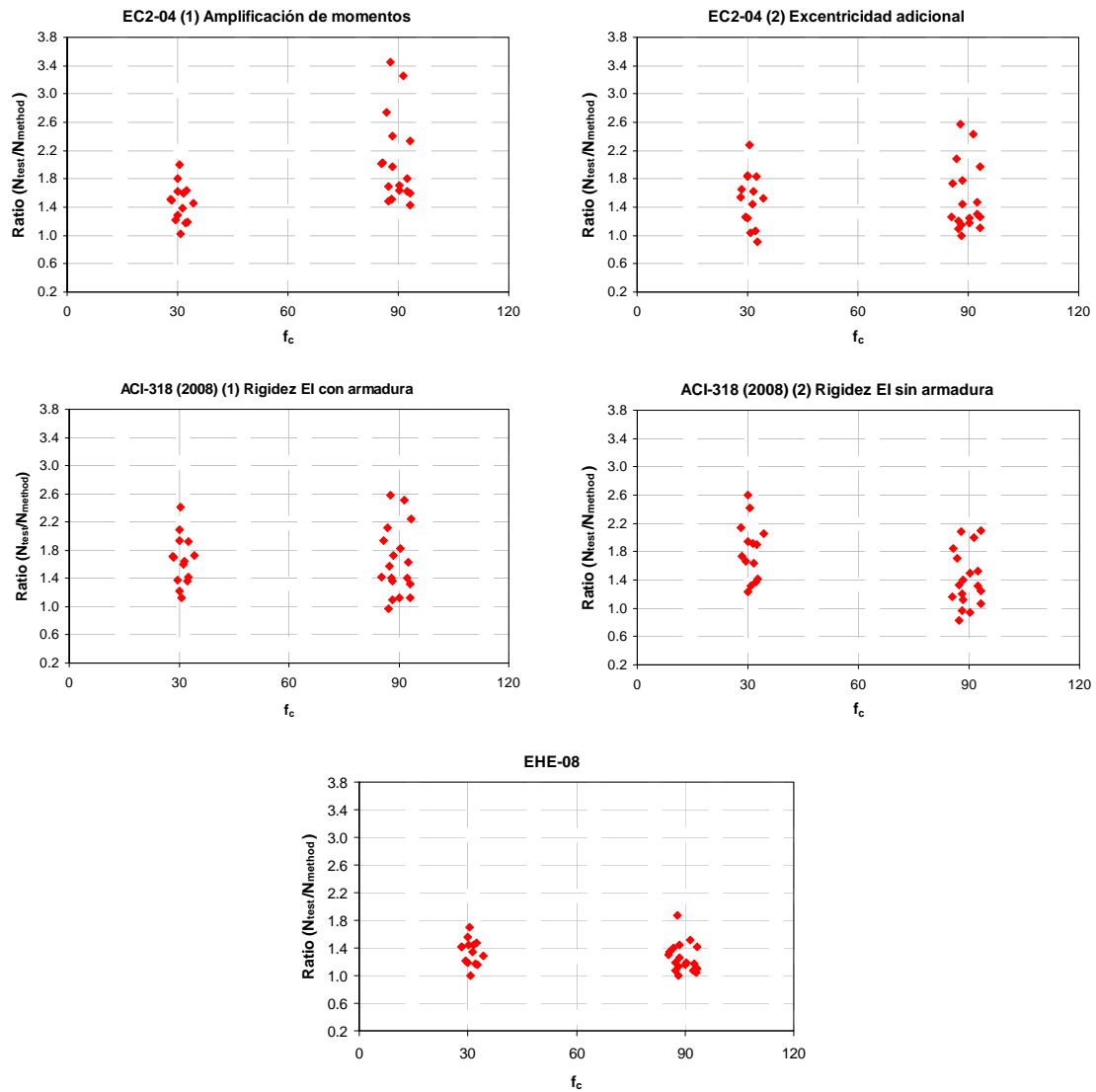


Figura E.5. Verificación de métodos simplificados: resistencia del hormigón (f_c): flexo-compresión recta.

Del análisis de las gráficas de la figura E.5, se nota claramente la mejora en el grado de precisión a utilizar el método propuesto por la EHE-08 [23], tanto para hormigón convencional como para hormigón de alta resistencia y la gran dispersión obtenida al utilizar el método de amplificación de momentos propuesto por el EC-2 (2004) [29] para hormigón de alta resistencia

E.2. Contraste: flexo-compresión esviada:

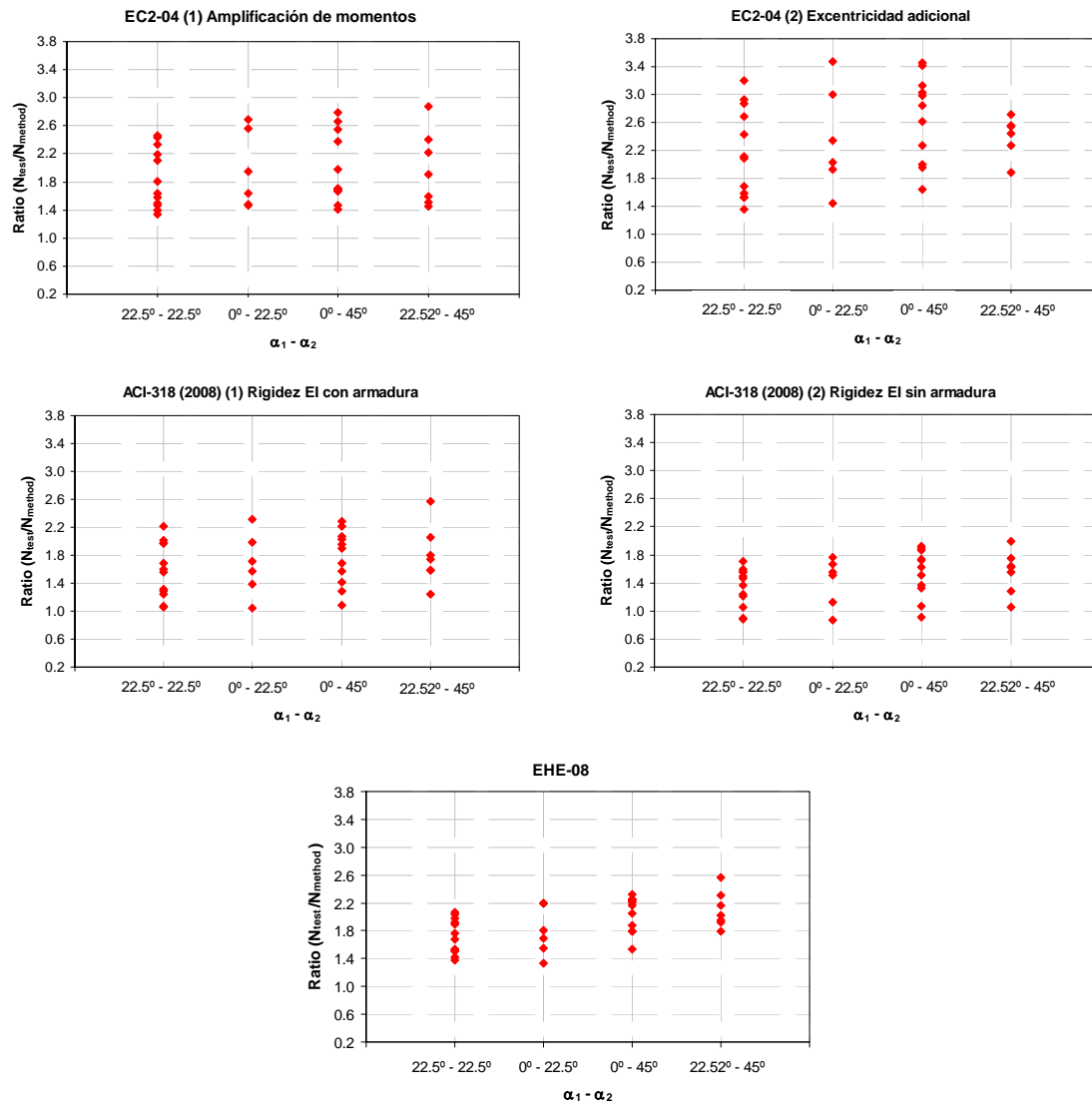


Figura E.6. Verificación de métodos simplificados: relación entre ángulos de esviaje en extremos ($\alpha_1 - \alpha_2$): flexo-compresión esviada

Se puede observar, en la figura E.6, que de manera general, los métodos simplificados analizados están ligeramente mas del lado de la seguridad para las combinaciones de ángulos de esviaje en extremos ($\alpha_1 - \alpha_2$) de 22.5°-45° y 0°-45°.

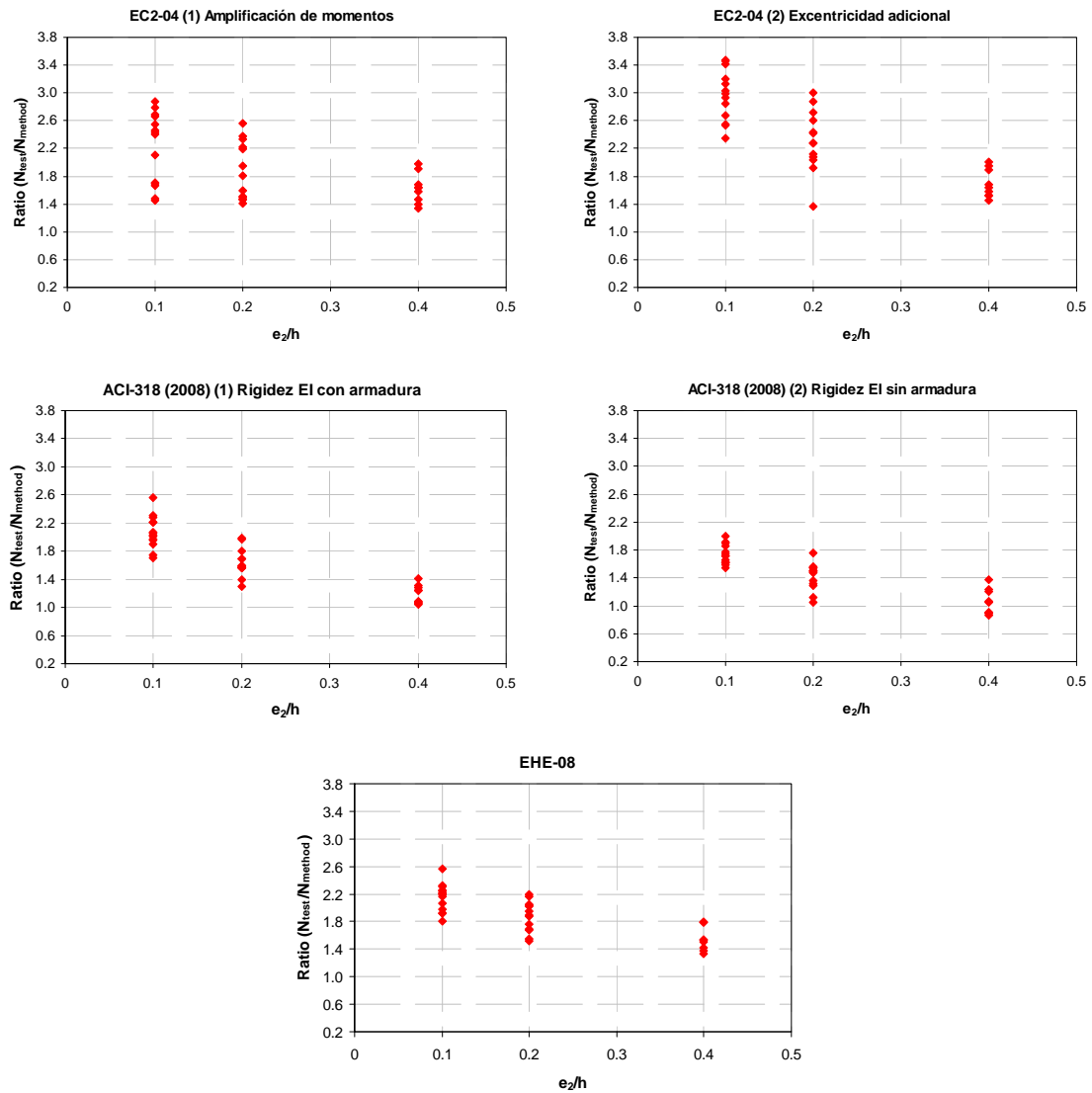


Figura E.7. Verificación de métodos simplificados: excentricidad adimensional (e_2/h): flexo-compresión esviada

Se puede observar, en la figura E.7, un incremento del ratio obtenido y de la dispersión de los resultados mientras disminuye la excentricidad adimensional (e_2/h) para los soportes sometidos a esfuerzos de flexo-compresión esviada con excentricidades y ángulos de esviaje desiguales en extremos.

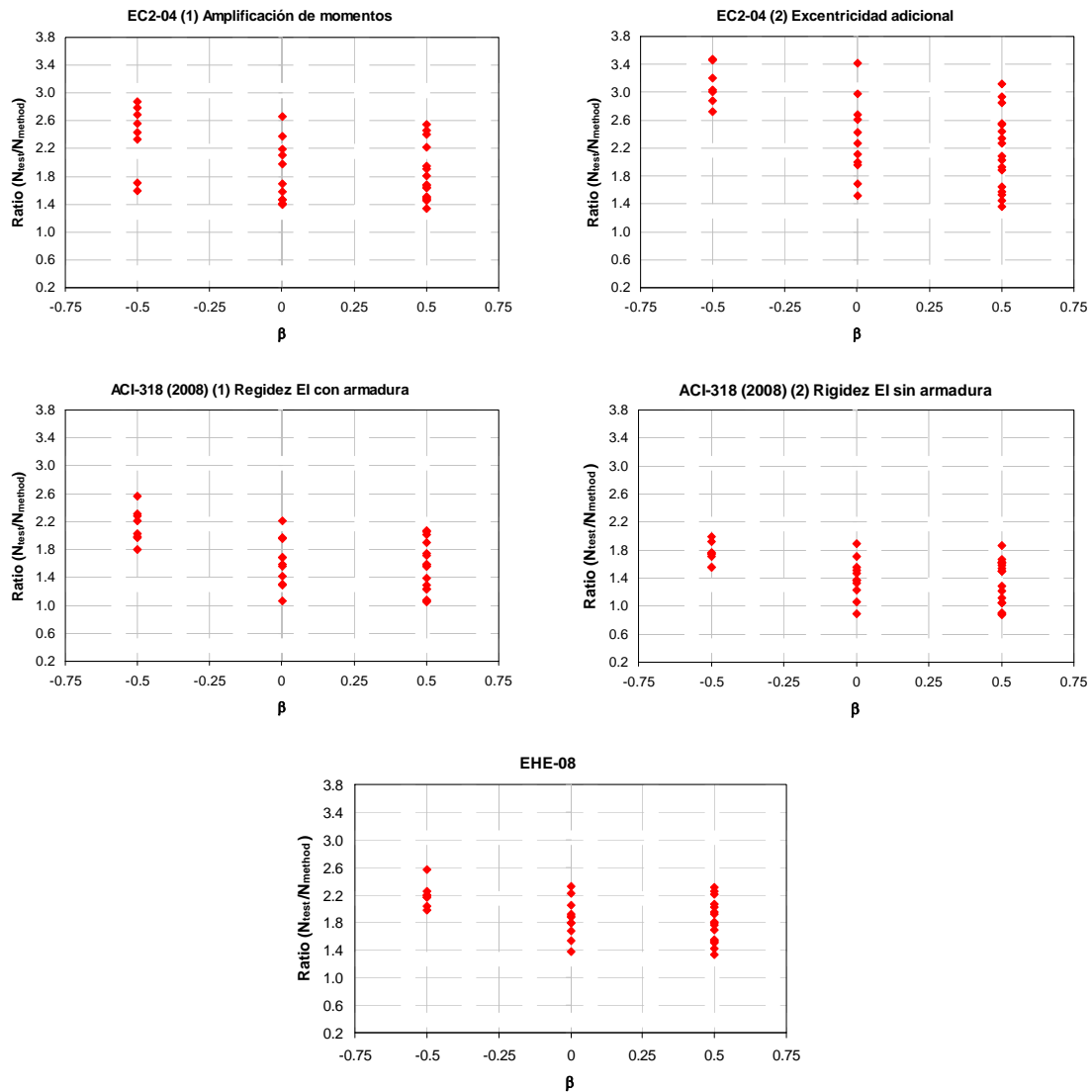


Figura E.8. Verificación de métodos simplificados: relación entre excentricidades en extremos (β): flexo-compresión esviada

En la figura E.8 se puede observar el incremento del ratio medio (N_{test}/N_{method}) con la disminución de la relación entre excentricidades en extremos del soporte (β), principalmente con la utilización del método de la excentricidad adimensional propuesto por el EC-2 (2004) [29].

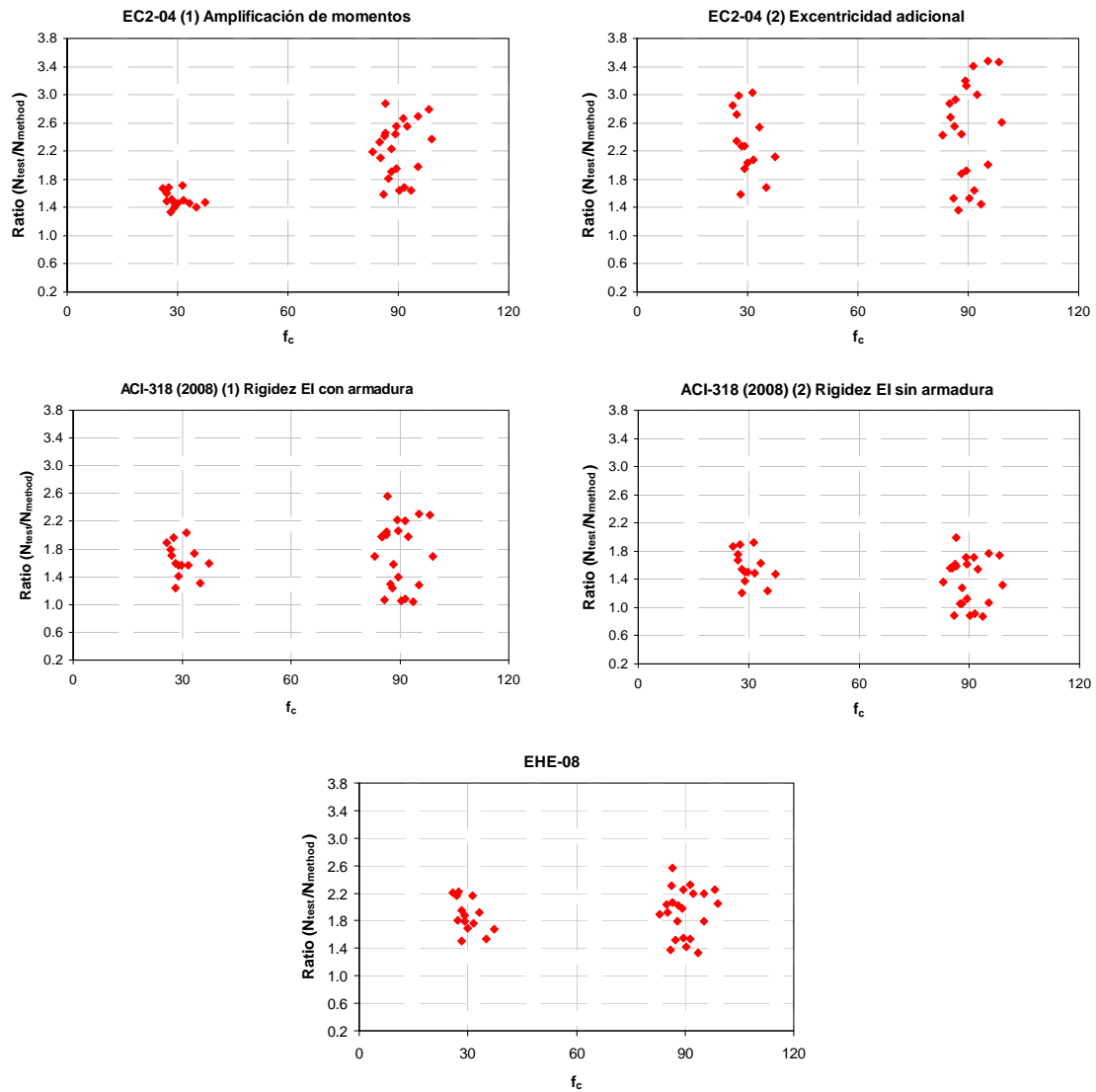


Figura E.9. Verificación de métodos simplificados: resistencia del hormigón (f_c): flexo-compresión esviada

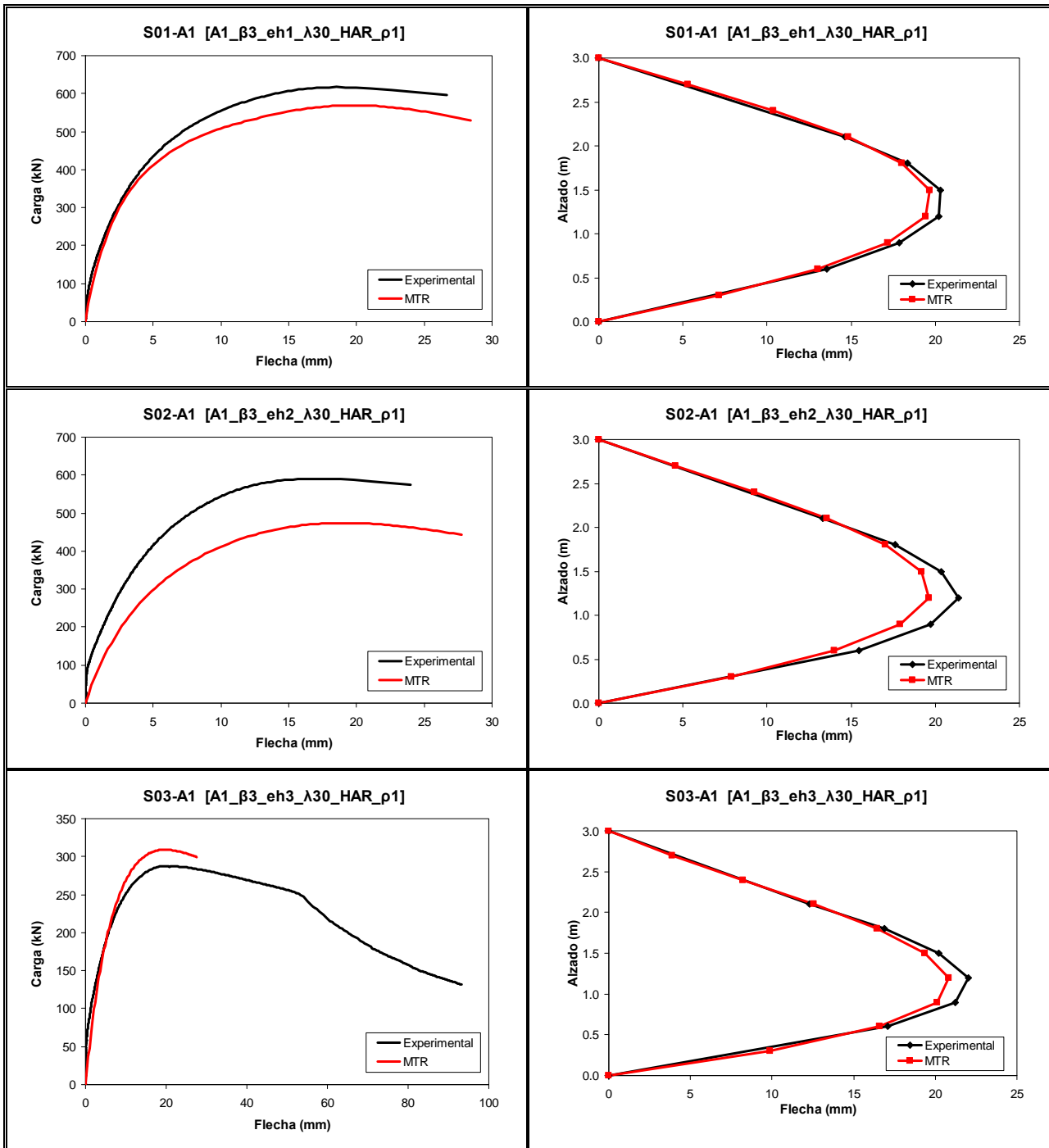
Del análisis de las gráficas de la figura E.9, se nota claramente la mejora en el grado de precisión a utilizar el método propuesto por la EHE-08 [23], tanto para hormigón convencional como para hormigón de alta resistencia y la gran dispersión obtenida al utilizar el método de amplificación de momentos propuesto por el EC-2 (2004) [29] para hormigón de alta resistencia

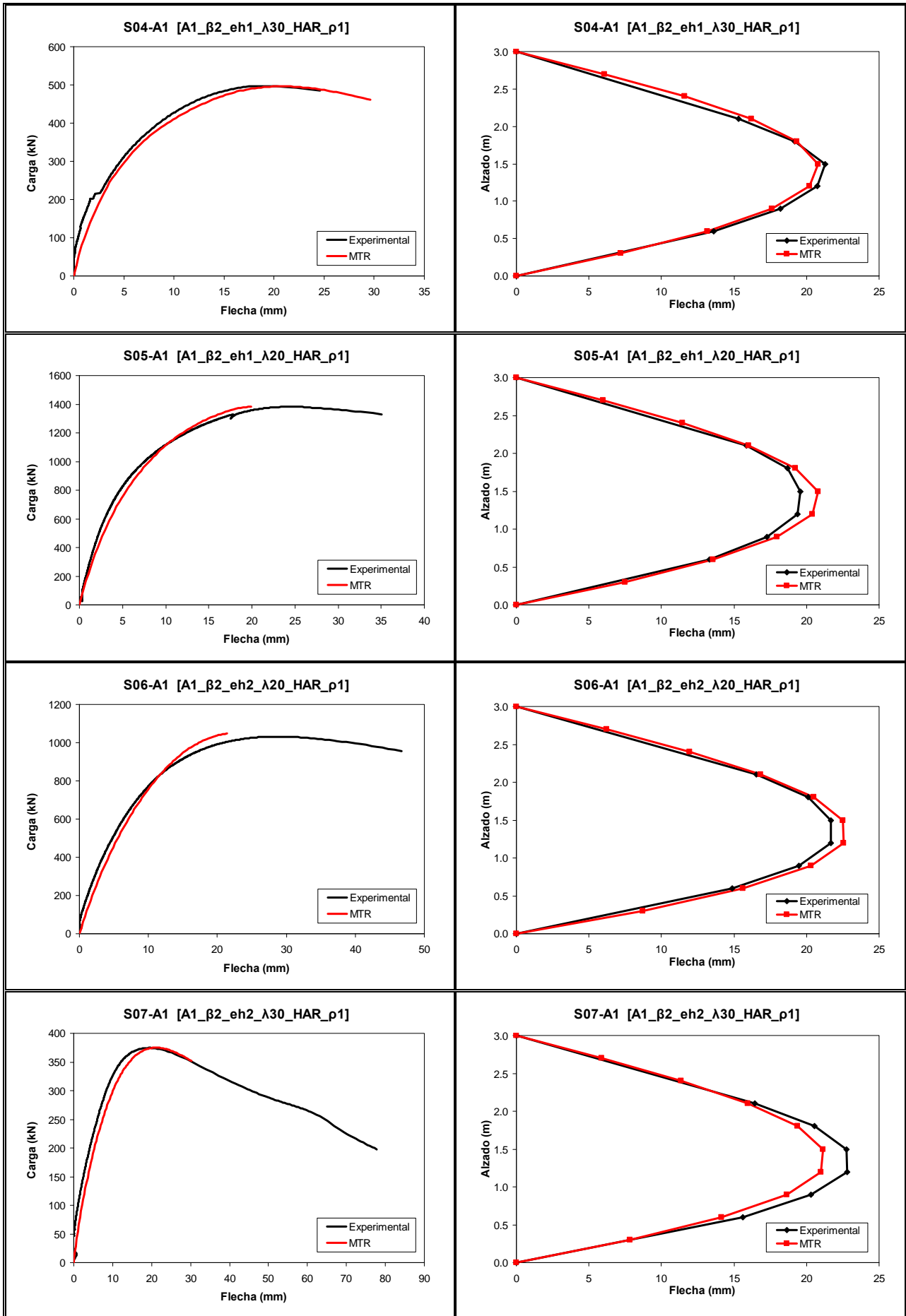
Anejo F.

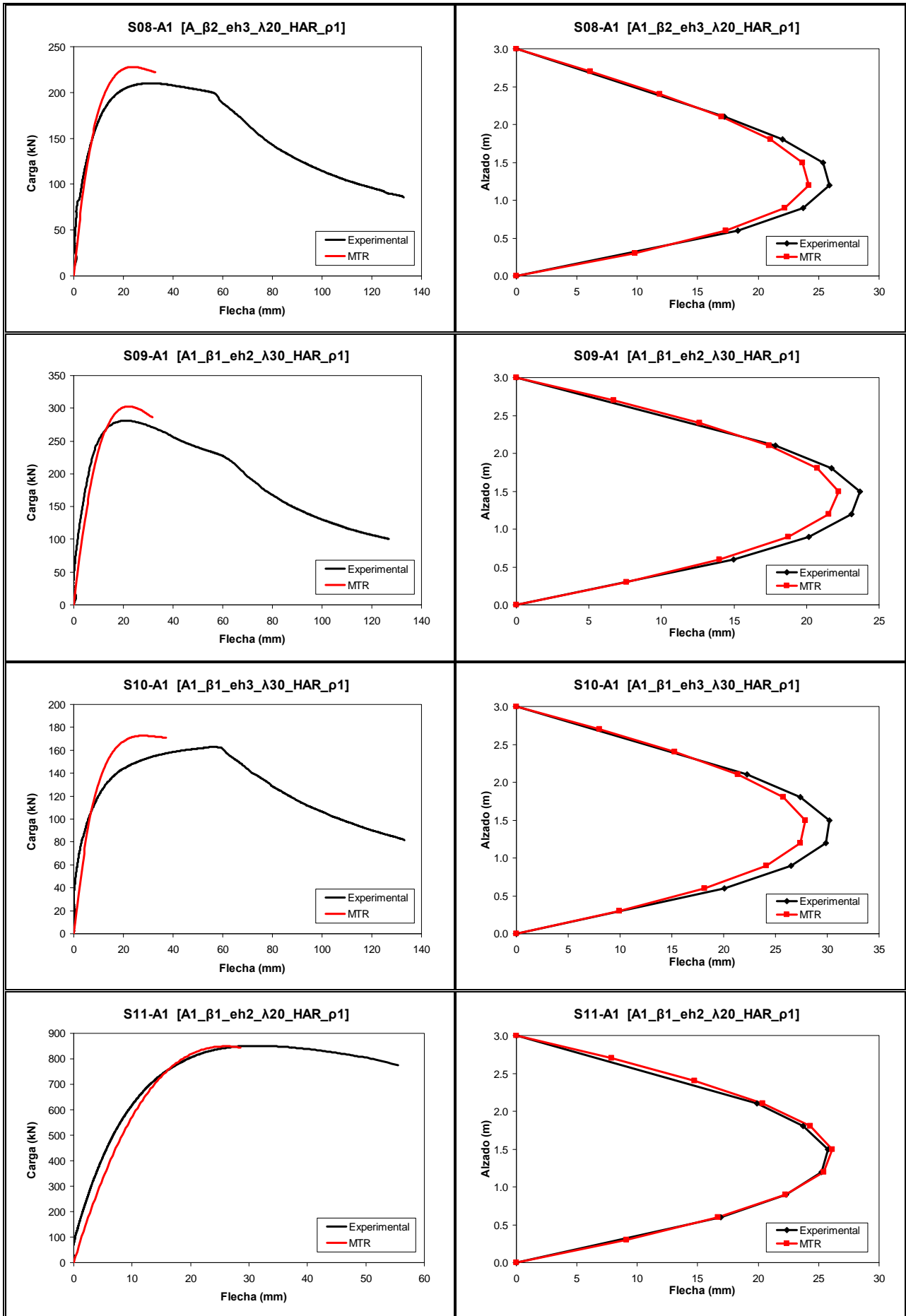
Precisión del MTR en cuanto a las flechas alcanzadas en cada ensayo

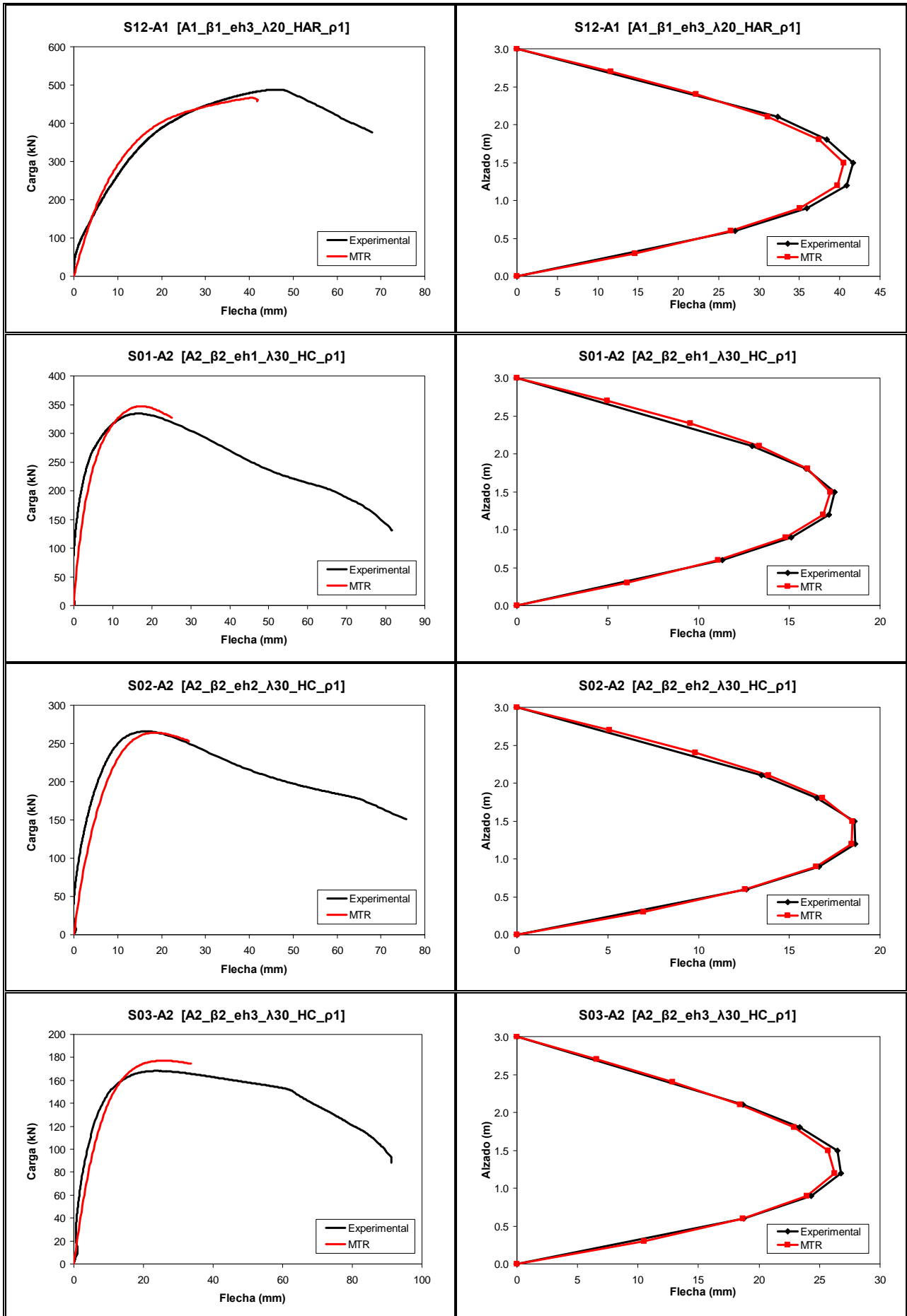
En este anejo se representan las gráficas con la comparación de los resultados obtenidos con el MTR calibrado en el presente trabajo con respecto a los diagramas carga-desplazamiento y las deformadas registradas en situación de carga máxima (N_{max}) para todos los soportes del programa experimental, utilizando para los casos de flexo-compresión esviada la excentricidad impuesta recomendada por Galambos y Surovek [28] ($e_{imp} = L/1000$) debido al problema de tolerancias observadas en estas piezas ocasionados por las imperfecciones geométricas.

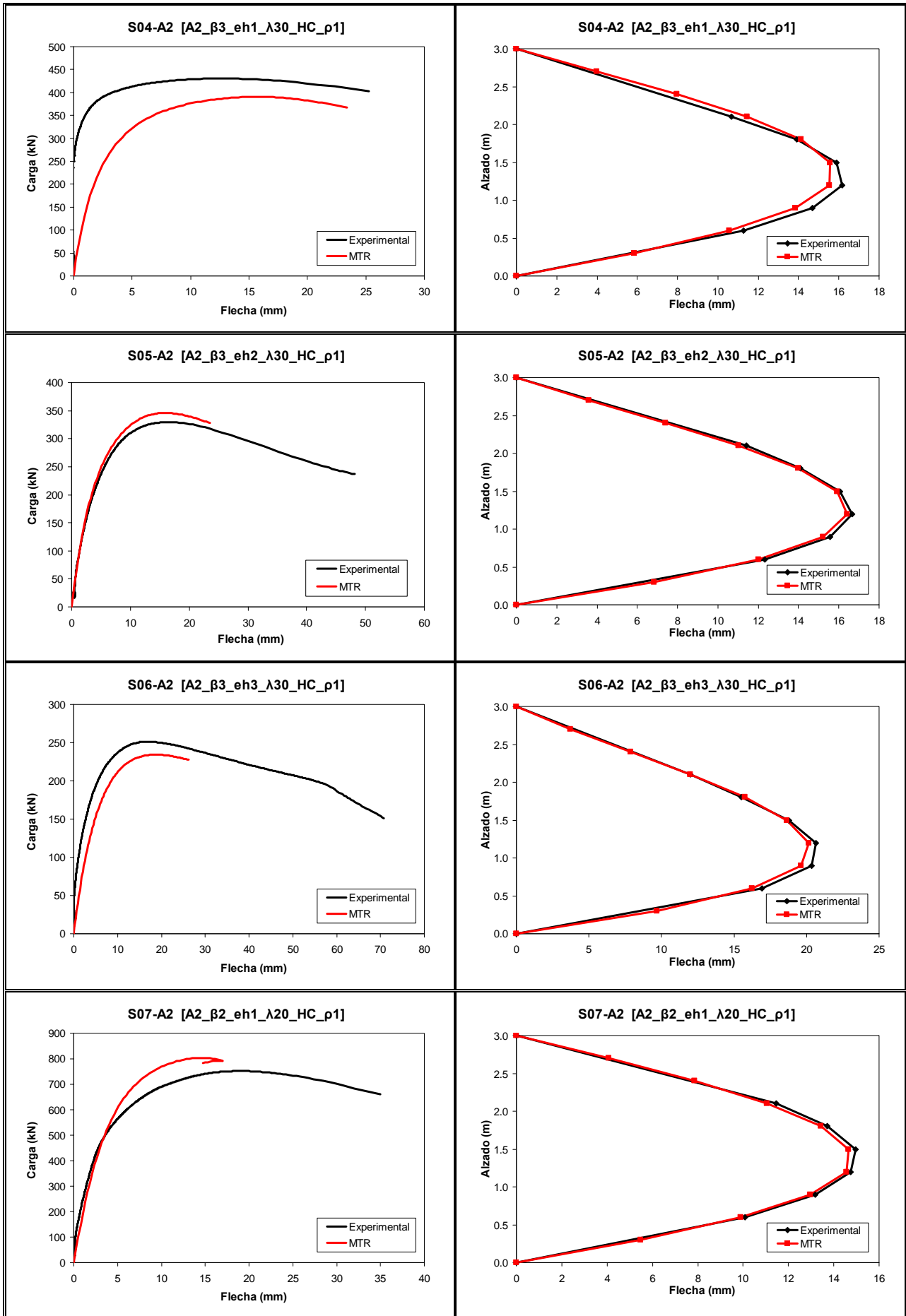
F.1. Flexo-compresión recta:

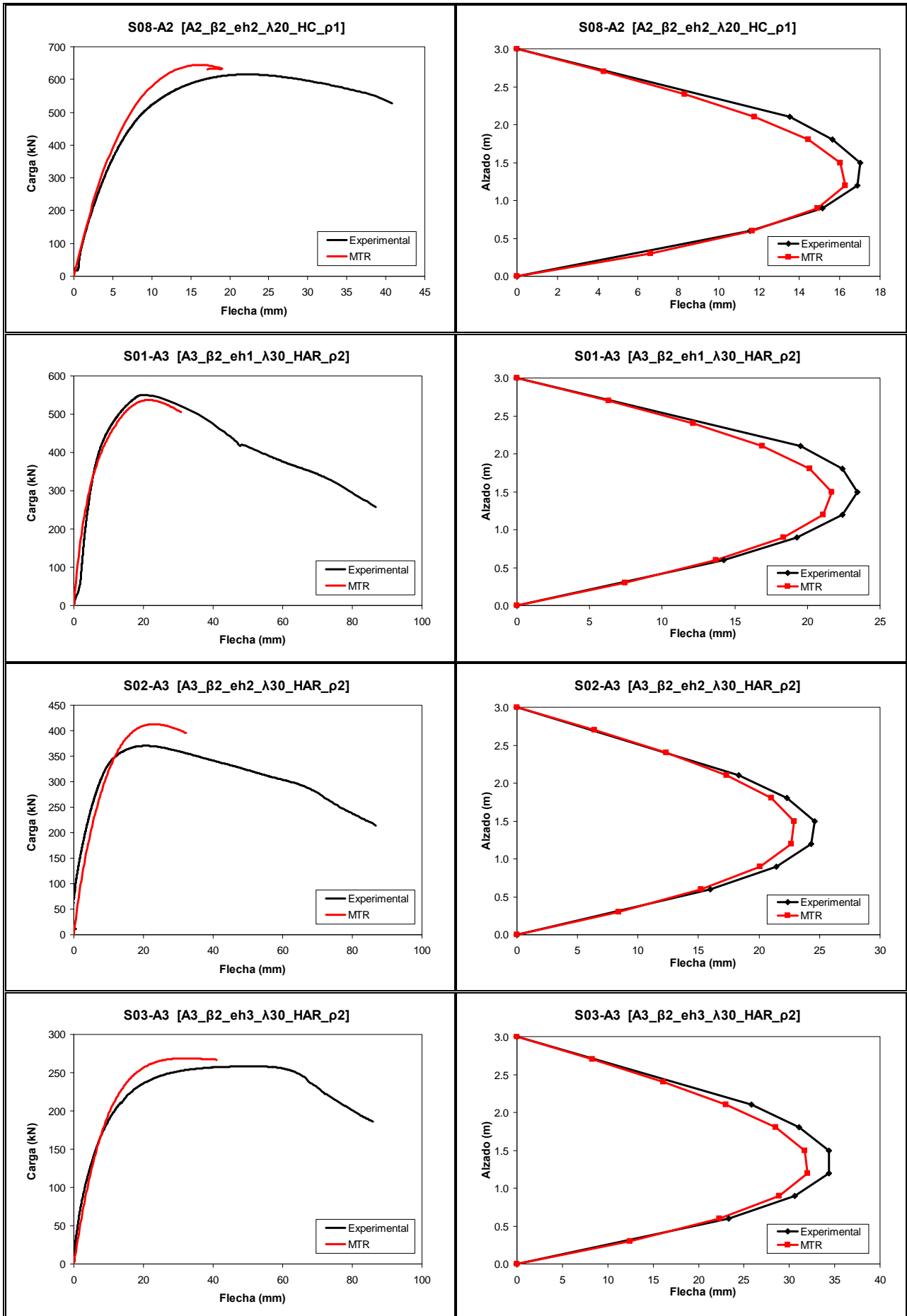


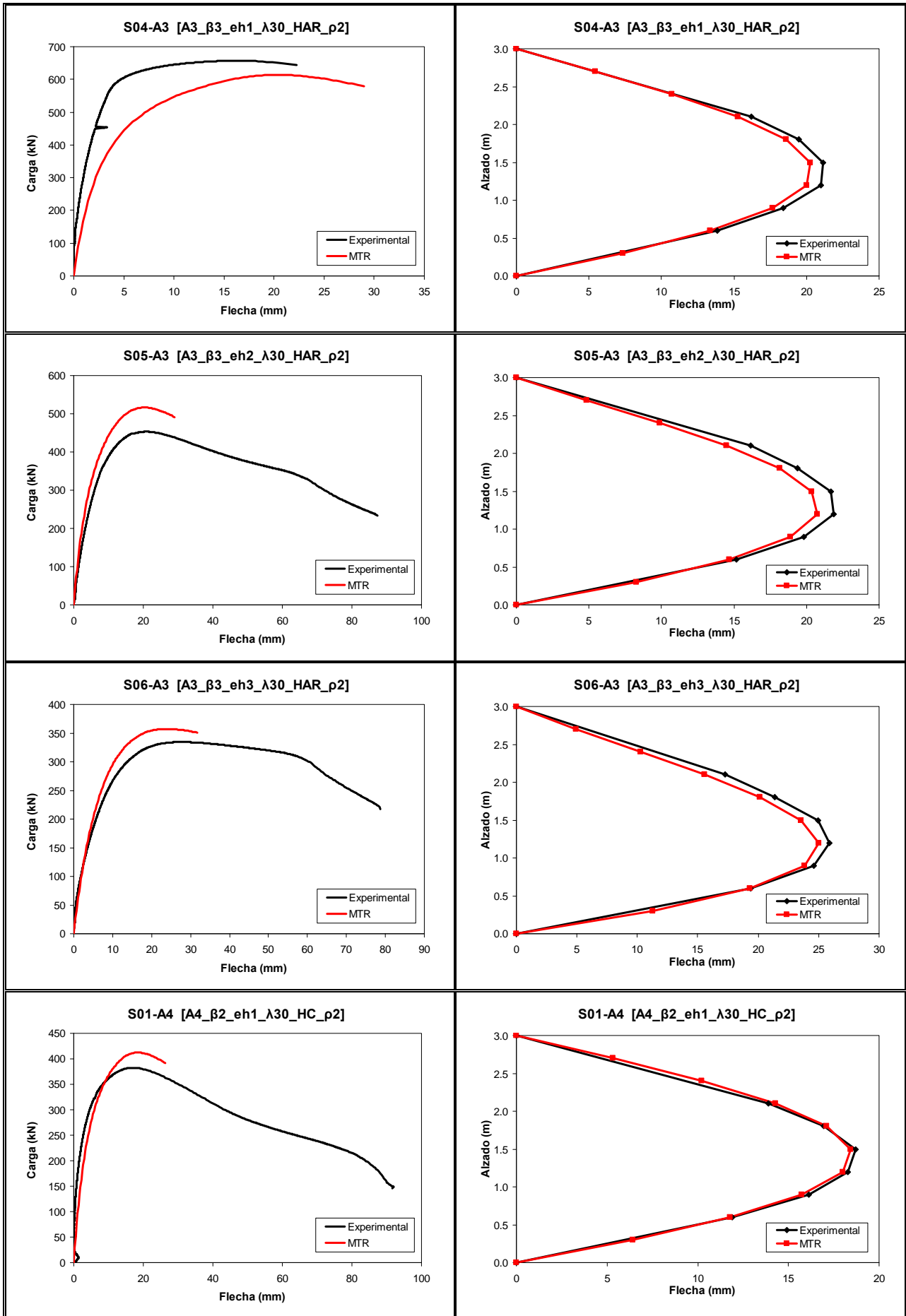


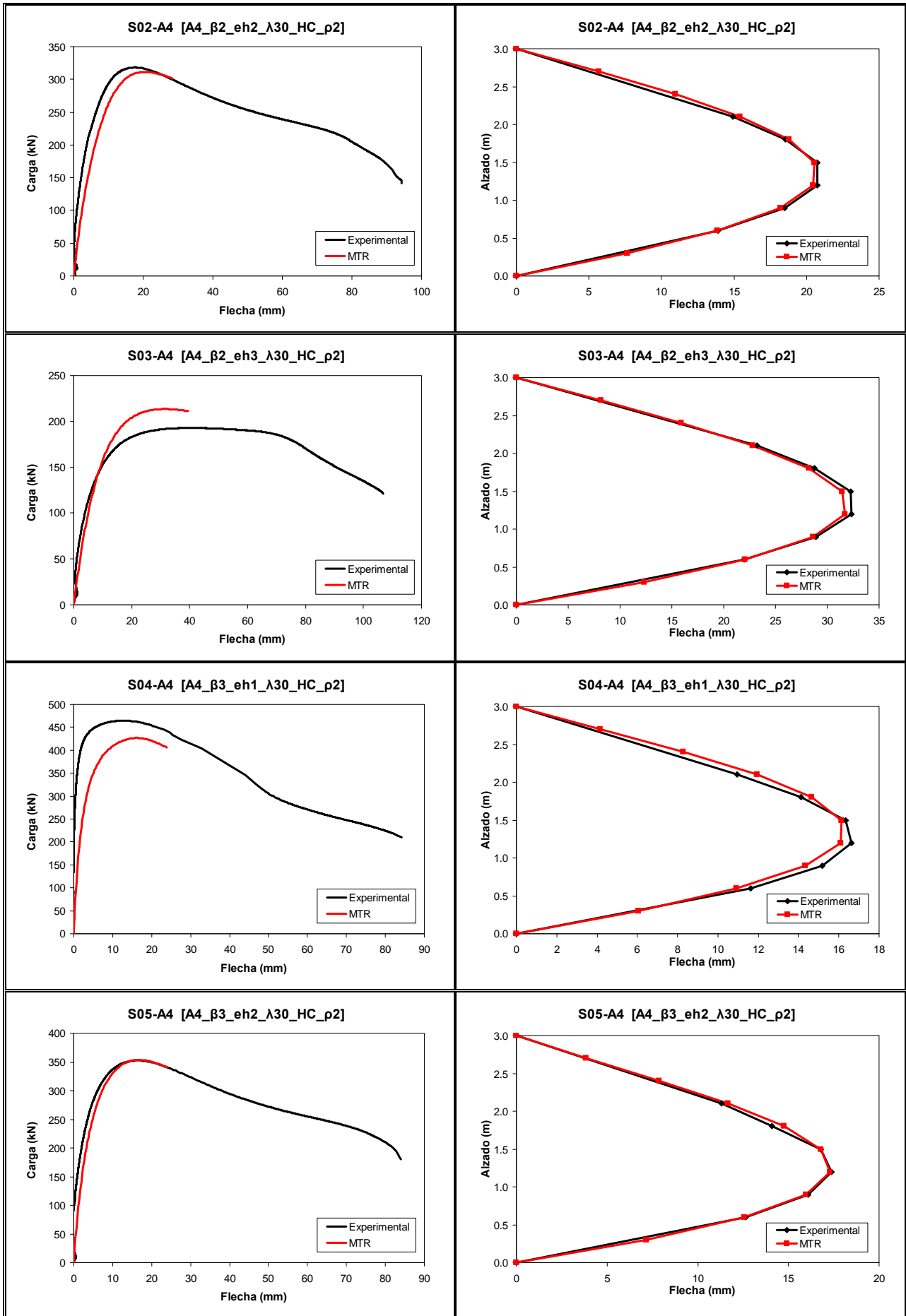


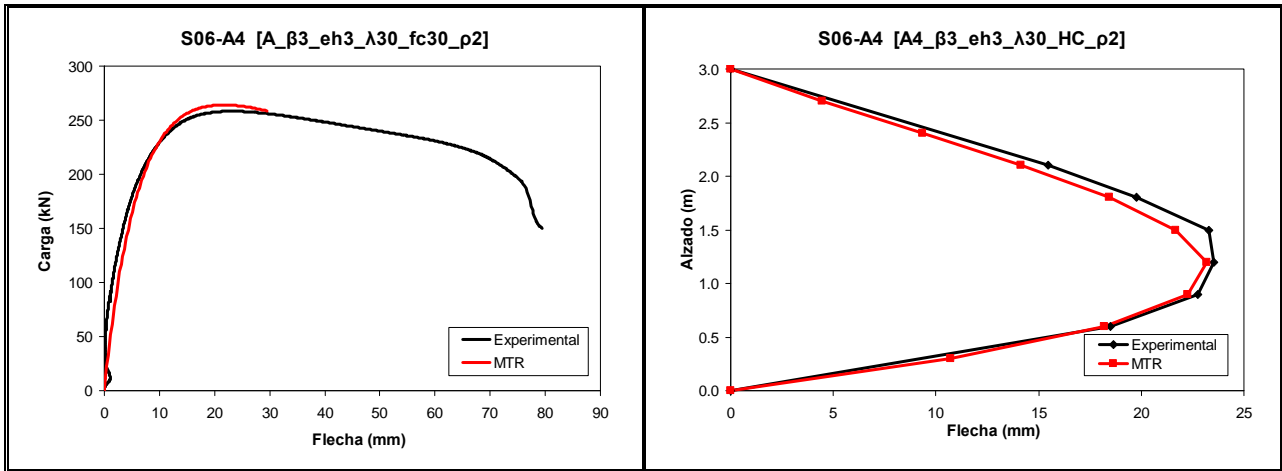




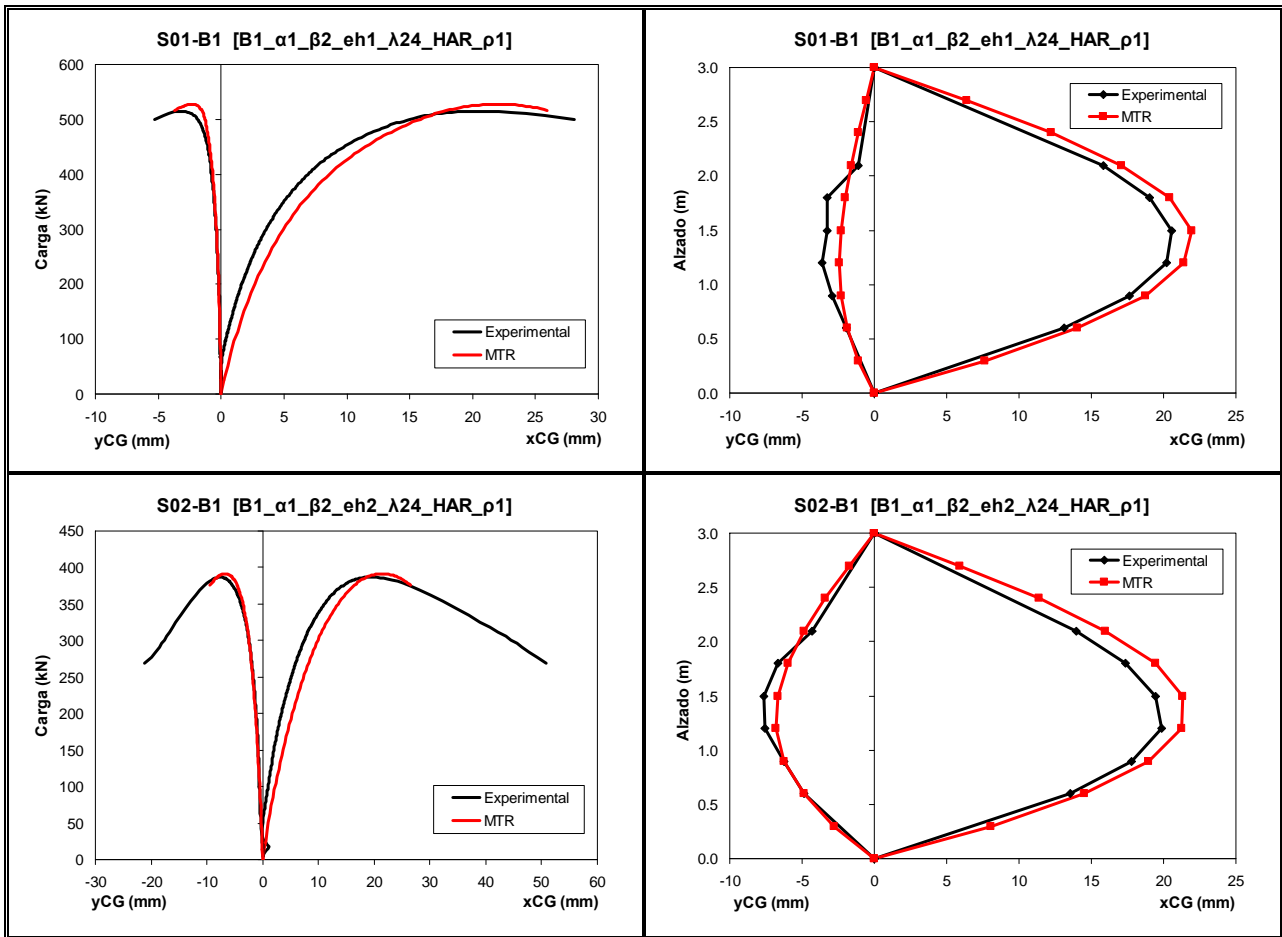


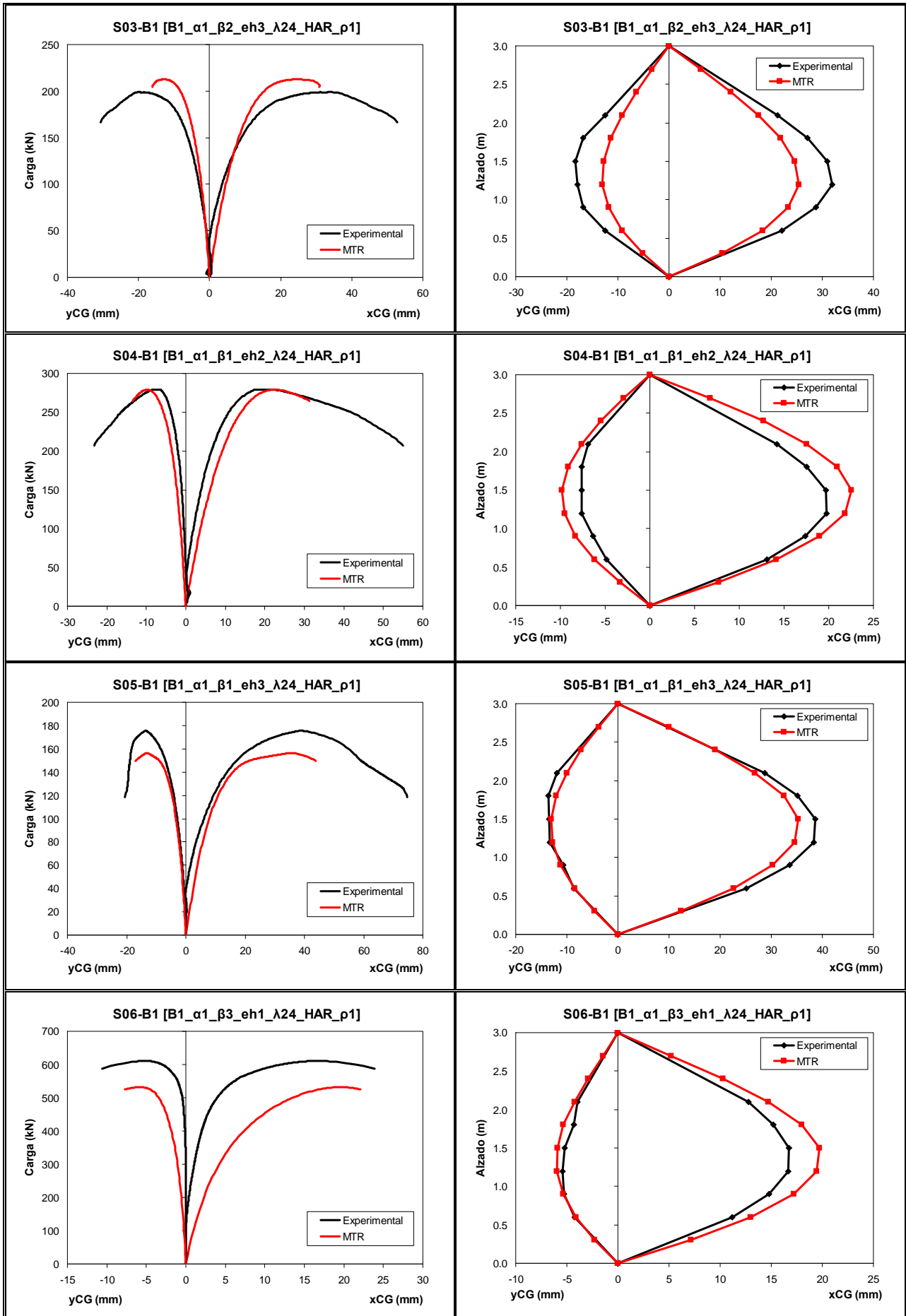


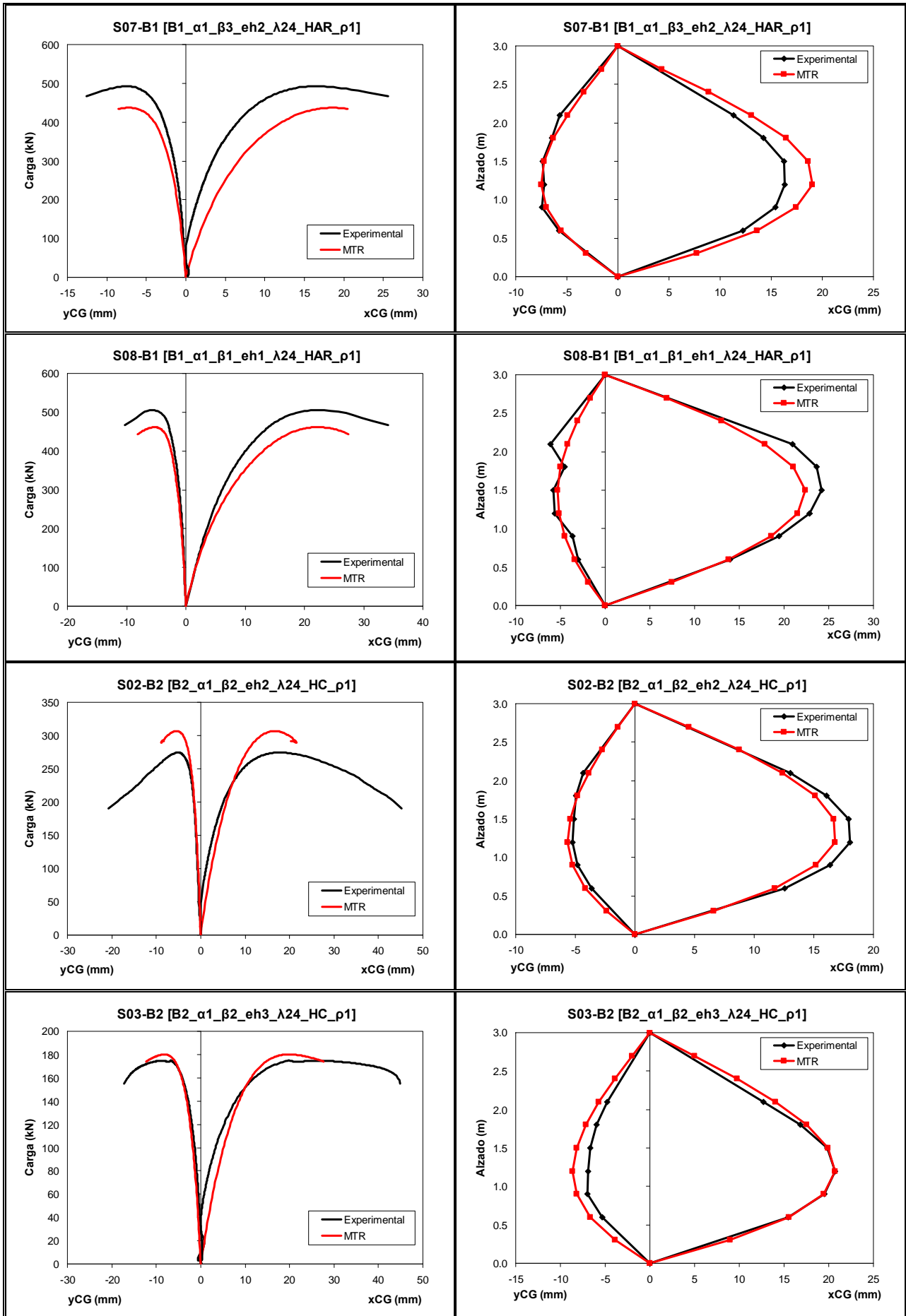


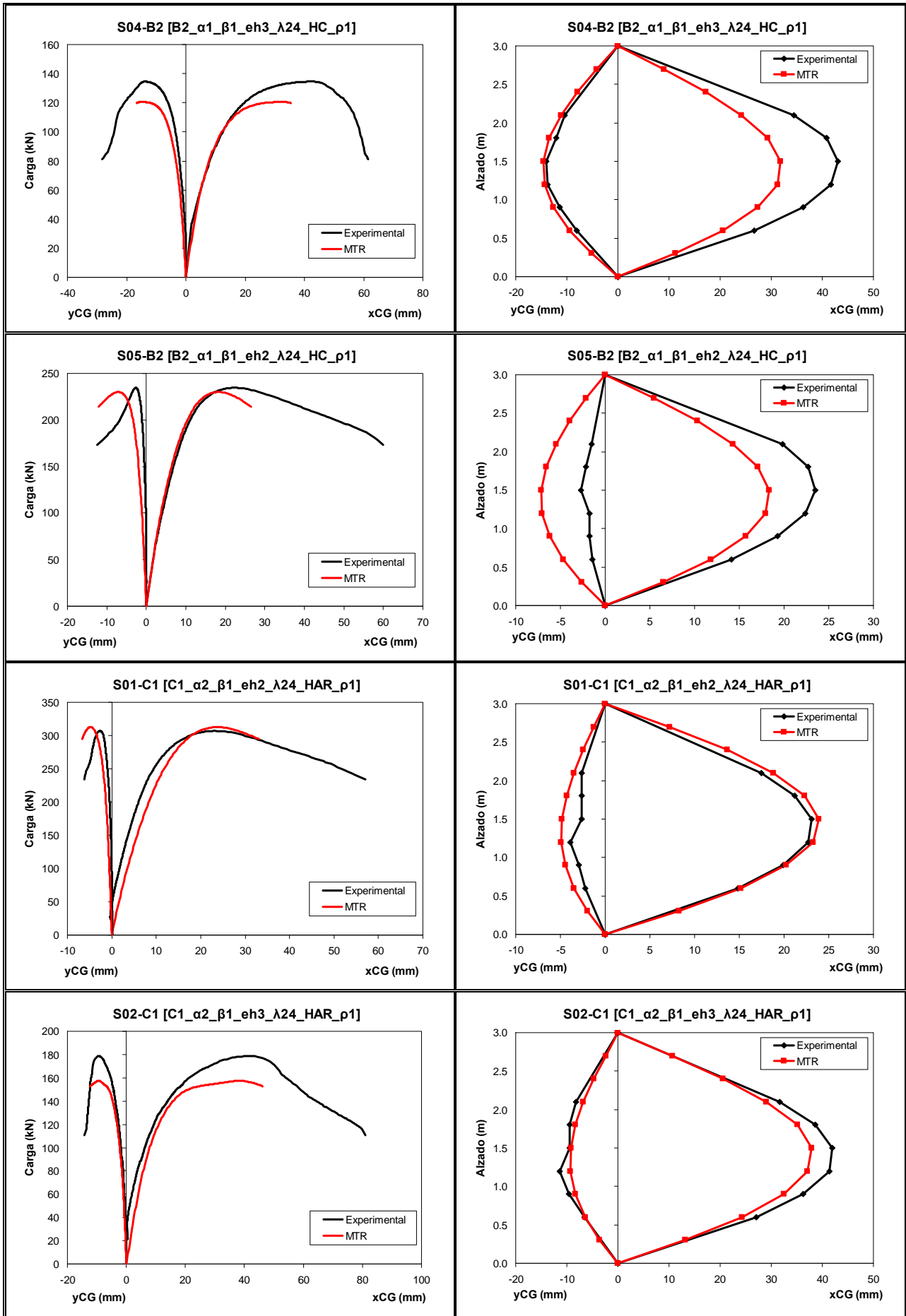


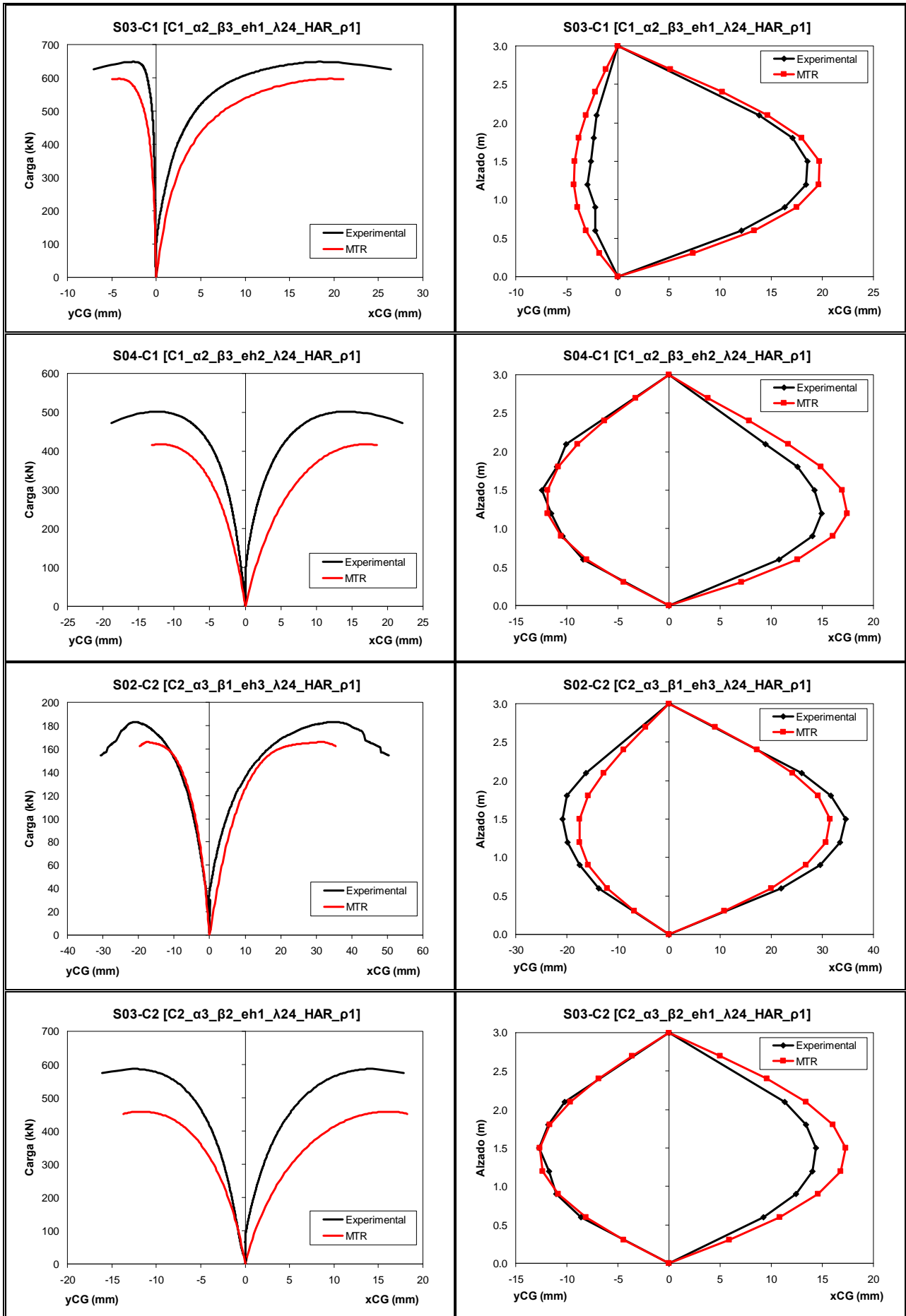
F.2. Flexo-compresión esviada:

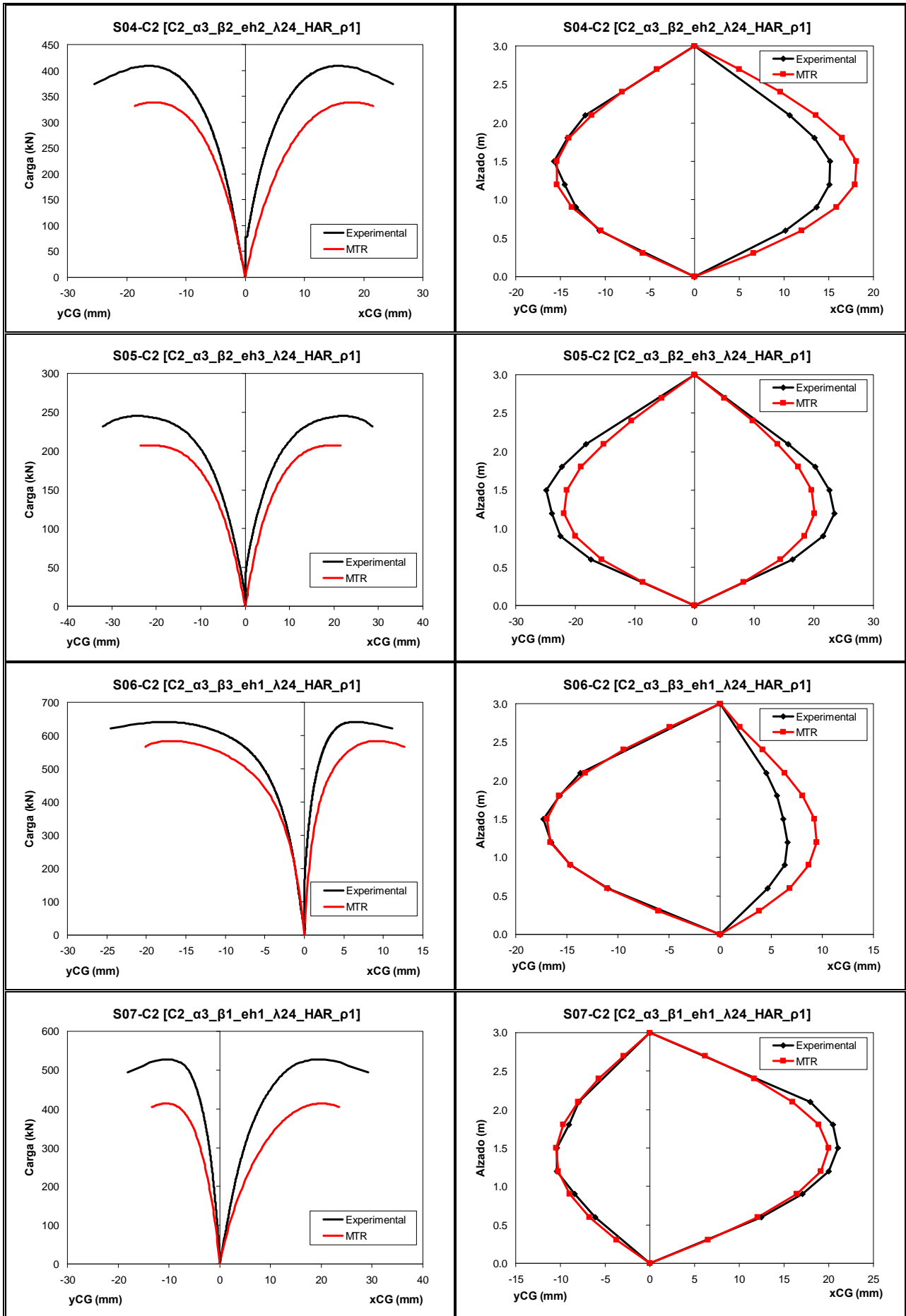


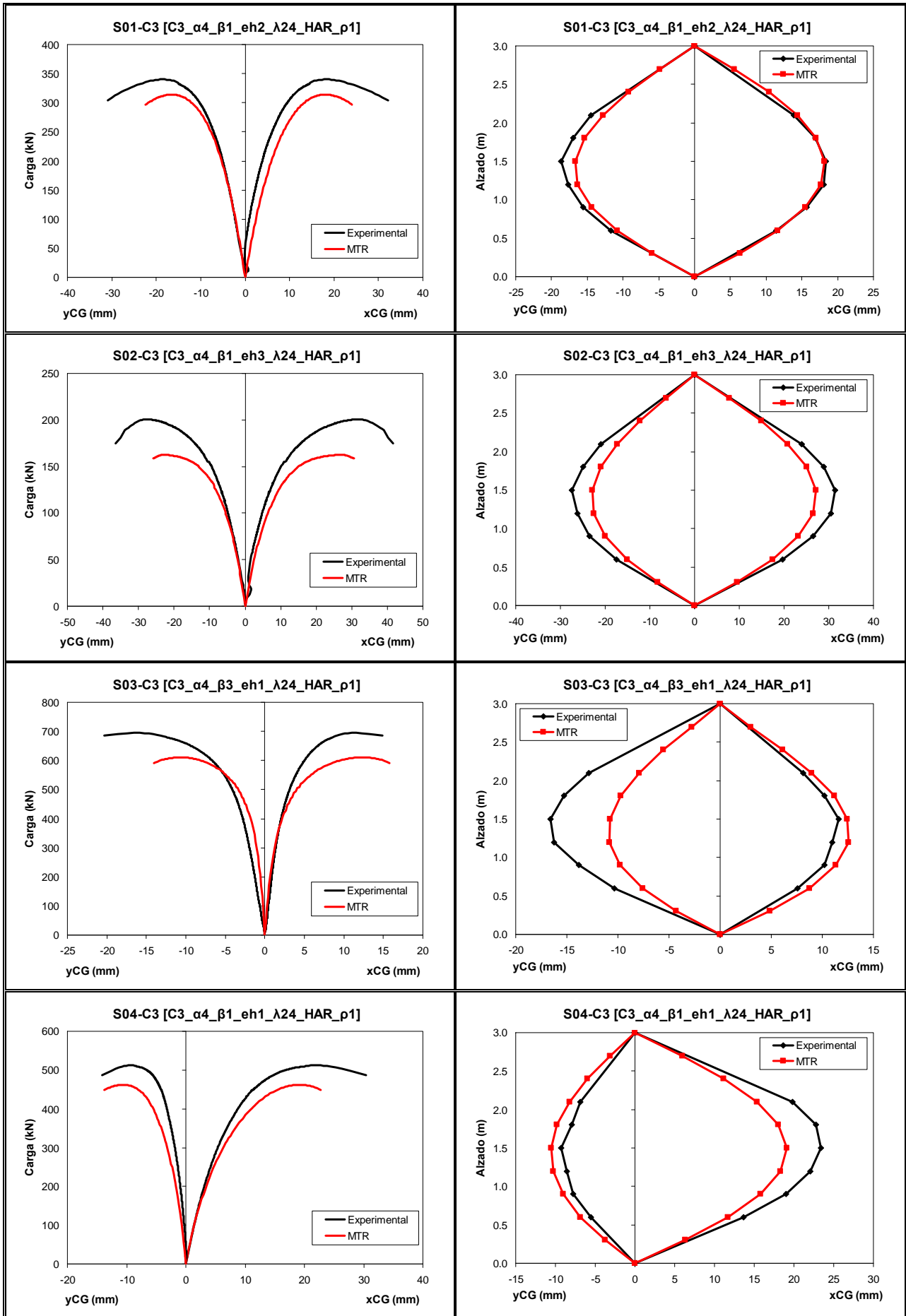


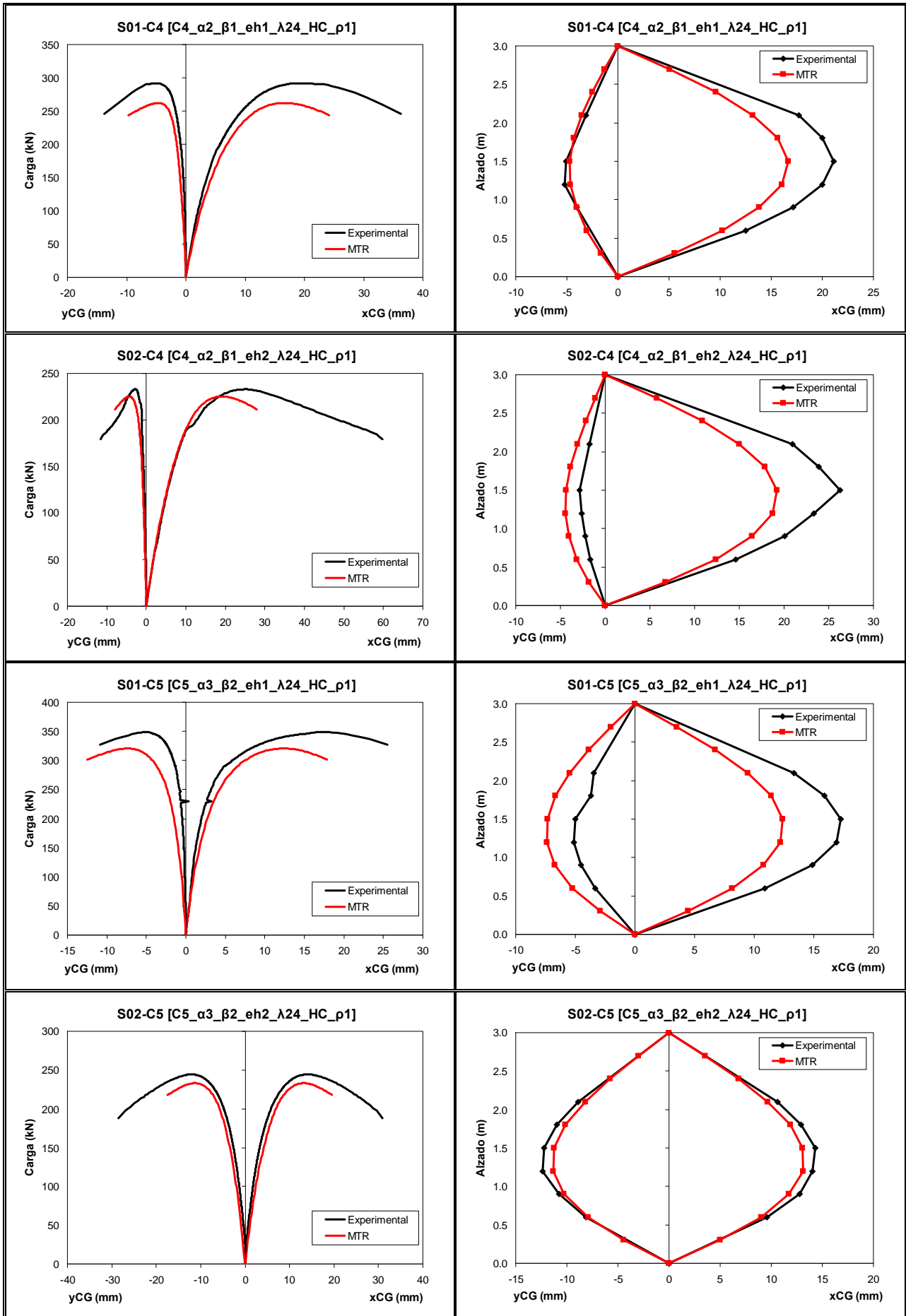


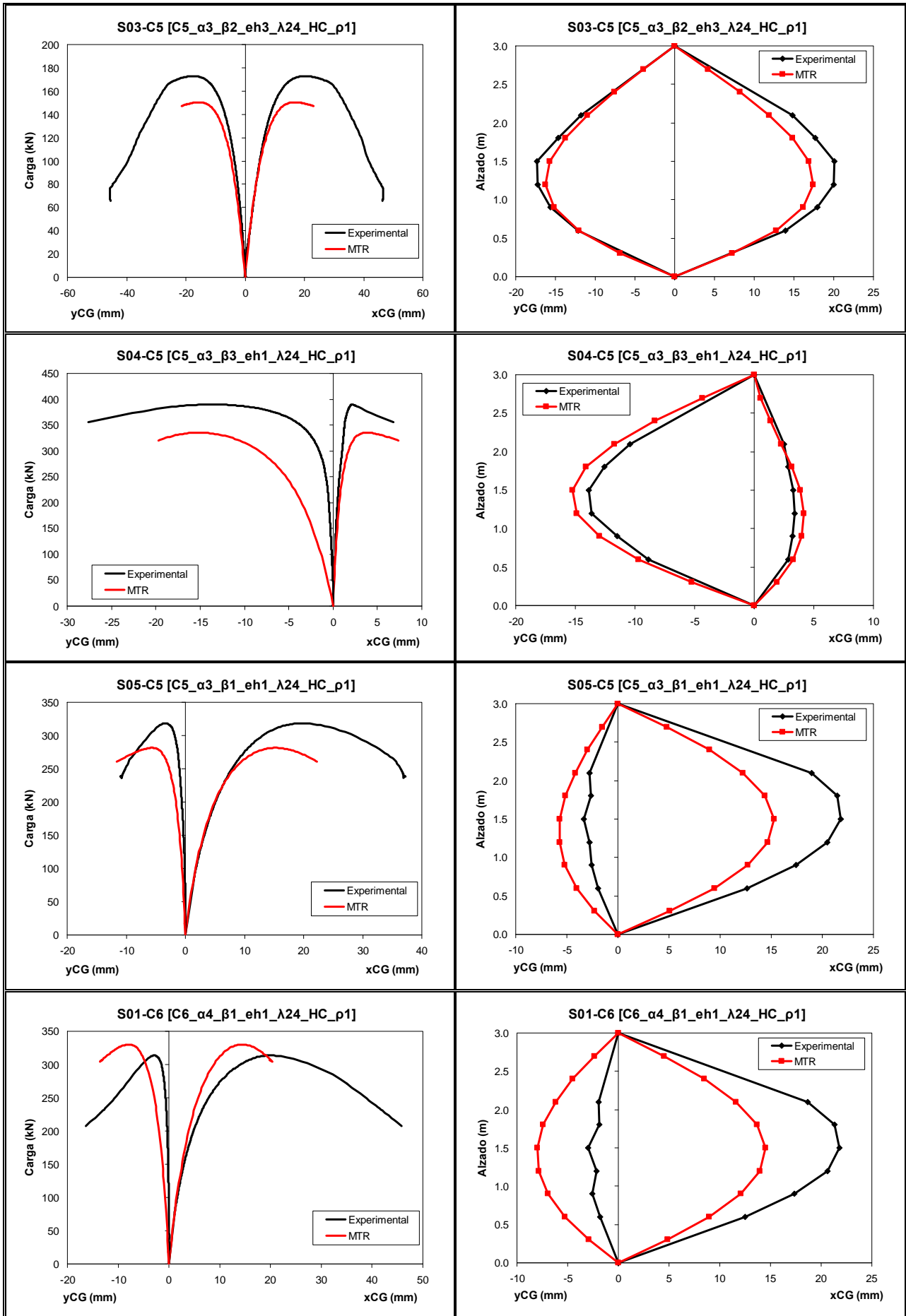


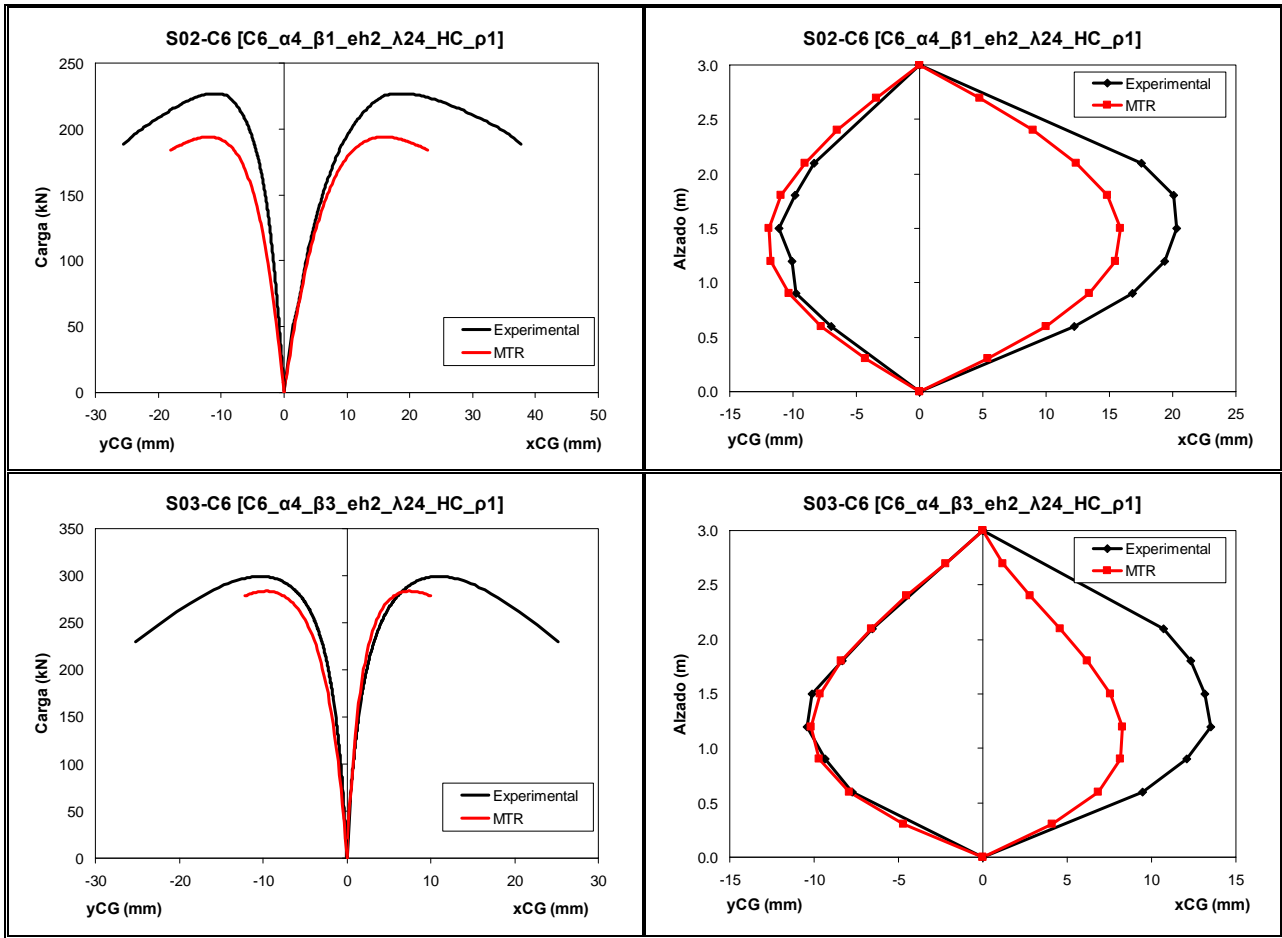












Anejo G.

Gráficas obtenidas con la simulación numérica para las series completas de flexo-compresión esviada

En este anejo se muestran las gráficas obtenidas con la simulación numérica para todas las series completas de flexo-compresión esviada definidas en el Capítulo 6. Se representa el diagrama de interacción de la sección ($\lambda_g = 0$) y del soporte ($\lambda_g \neq 0$) para el ángulo equivalente α_e y relación de excentricidades iguales en extremos ($\beta = 1$), obteniéndose para cada nivel de axil un flector reducido de referencia $\mu_{\beta=1}$. Además se representa la relación entre el momento reducido equivalente (μ_e) y el momento reducido de referencia ($\mu_{\beta=1}$). En general, este ratio se muestra creciente con la relación (v/v_{cr}) siendo: v el nivel de axil reducido considerado, y v_{cr} el axil reducido crítico del soporte.

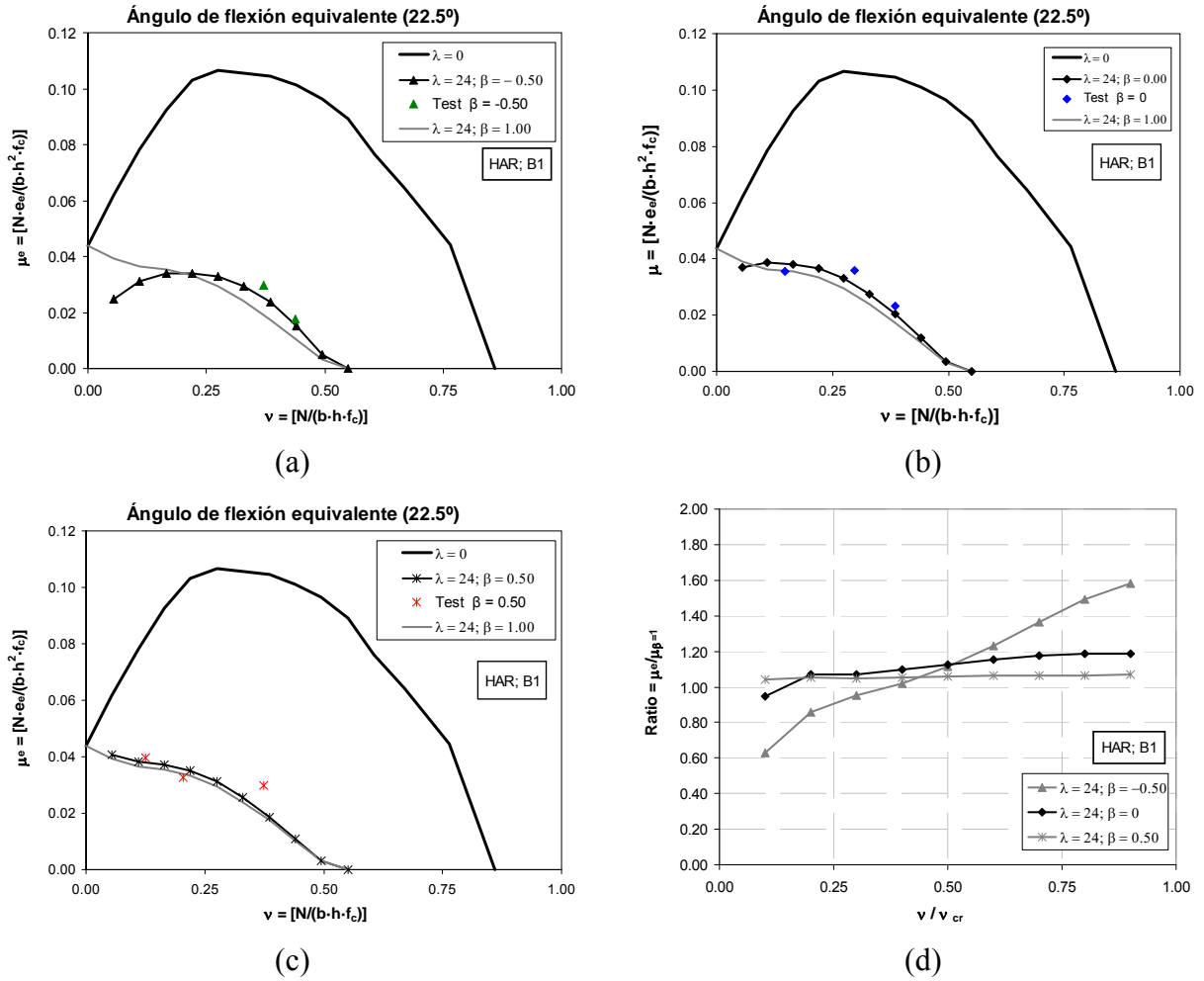


Figura G.1. Simulación numérica - flexo-compresión esviada (serie B1);
Momentos equivalentes: a. $\beta = -0.5$; b. $\beta = 0$; c. $\beta = 0.5$; d. Ratio $\mu_e / \mu_{\beta=1}$.

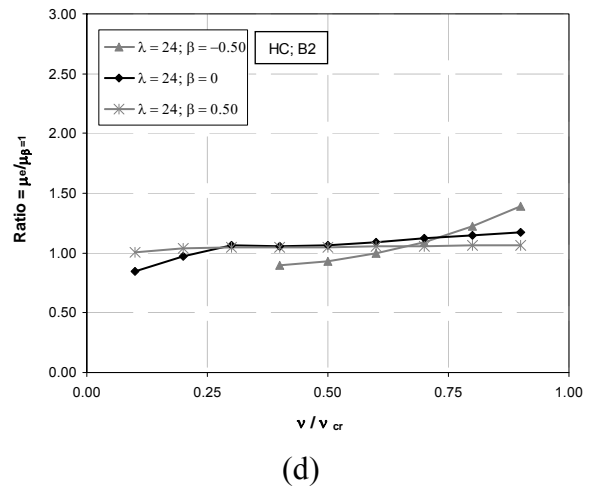
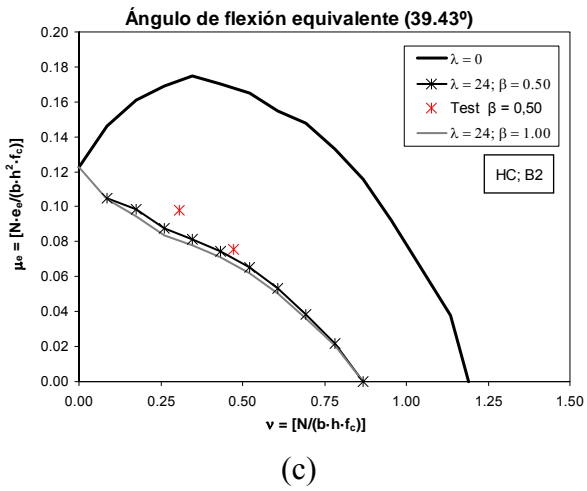
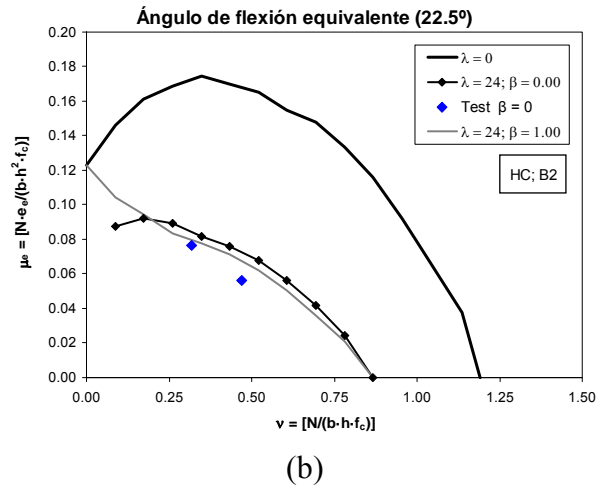
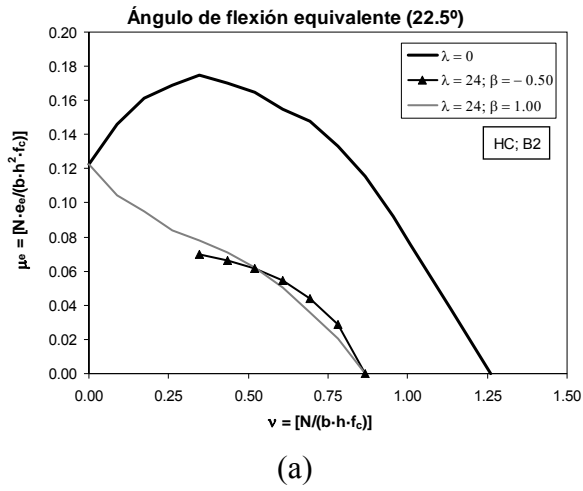


Figura G.2. Simulación numérica - flexo-compresión esviada (serie B2); Momentos equivalentes: a. $\beta = -0.5$; b. $\beta = 0$; c. $\beta = 0.5$; d. Ratio $\mu_e / \mu_{\beta=1}$.

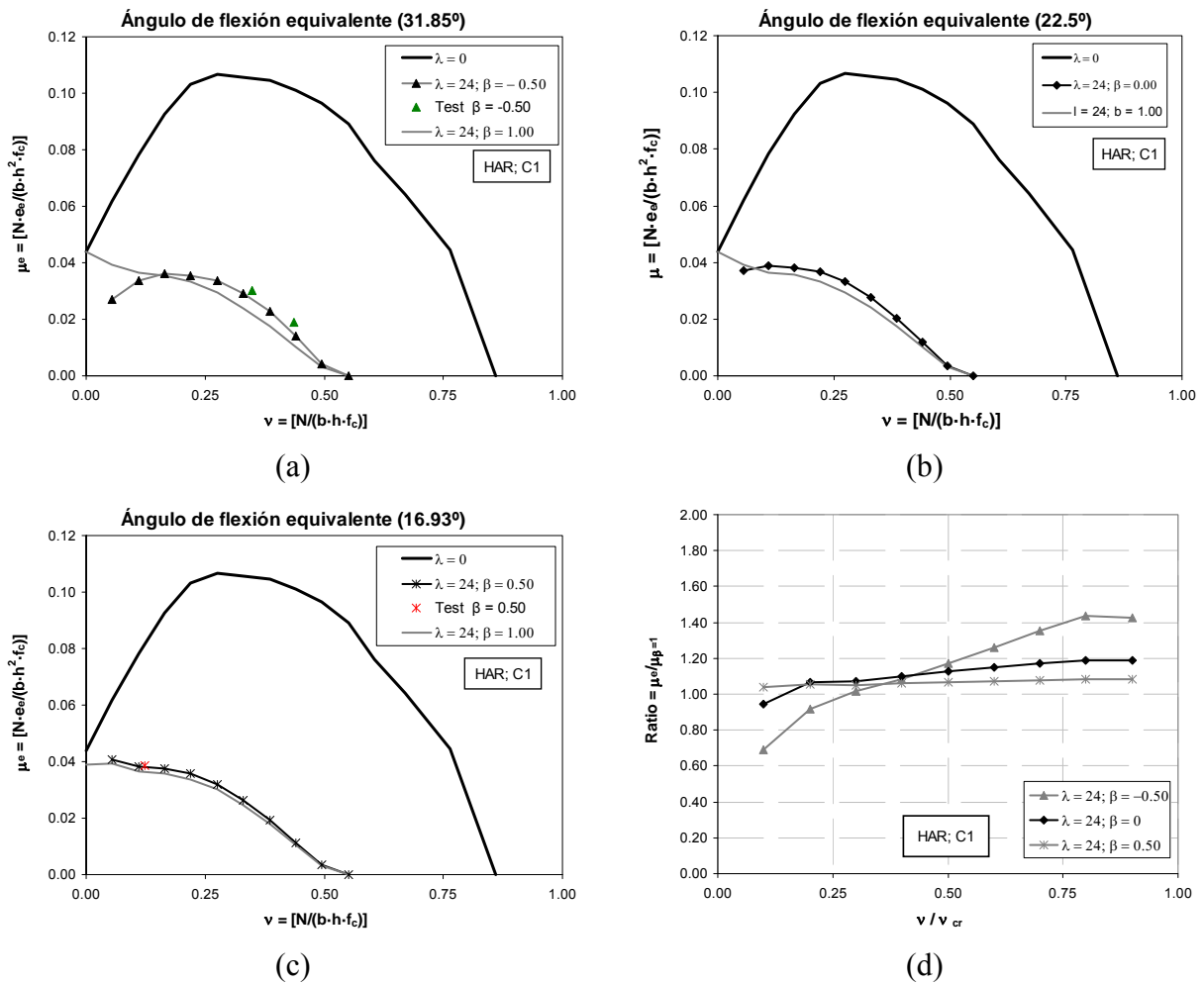


Figura G.3. Simulación numérica - flexo-compresión esviada (serie C1); Momentos equivalentes: a. $\beta = -0.5$; b. $\beta = 0$; c. $\beta = 0.5$; d. Ratio $\mu_e / \mu_{\beta=1}$

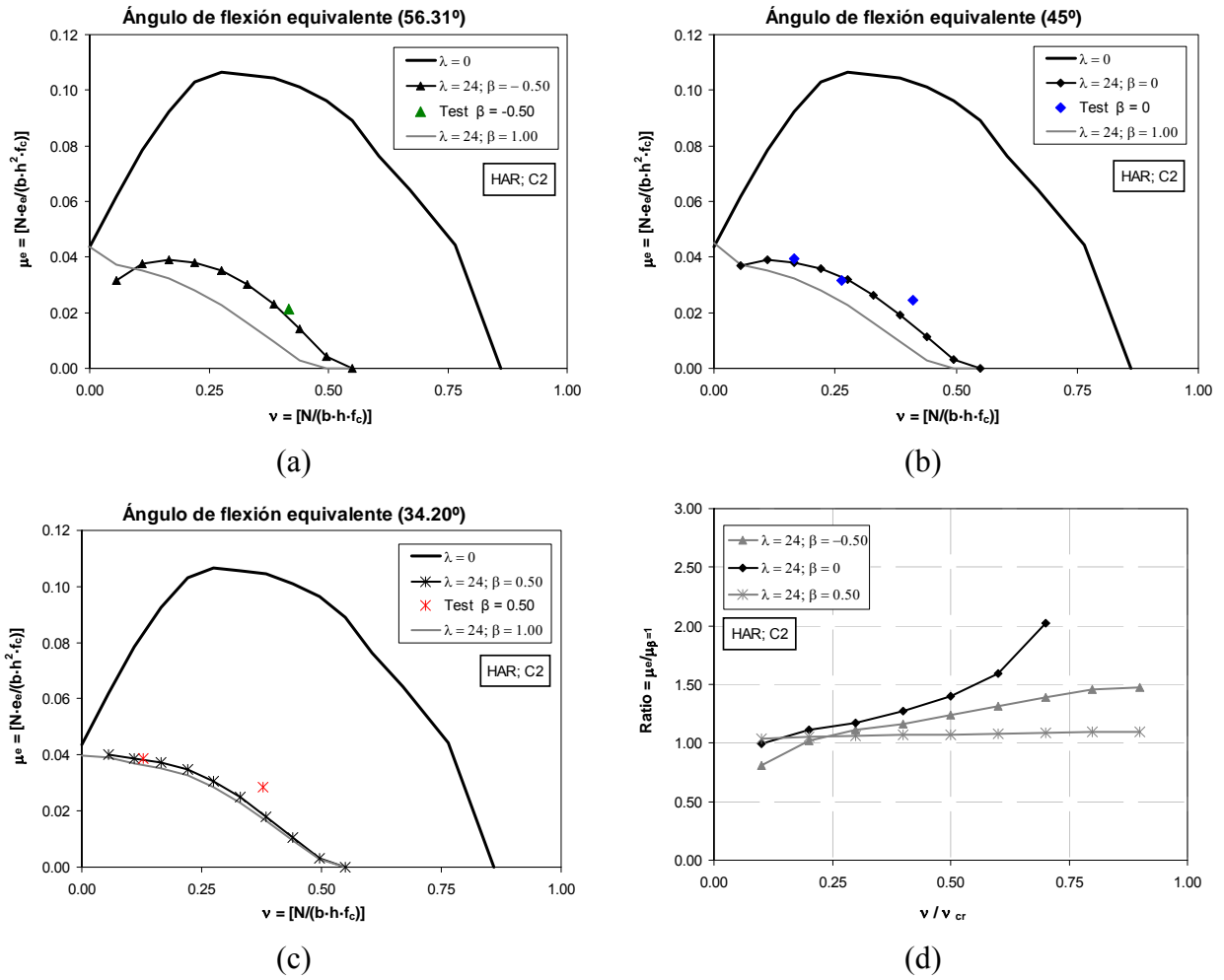


Figura G.4. Simulación numérica - flexo-compresión esviada (serie C2);
 Momentos equivalentes: a. $\beta = -0.5$; b. $\beta = 0$; c. $\beta = 0.5$; d. Ratio $\mu_e / \mu_{\beta=1}$

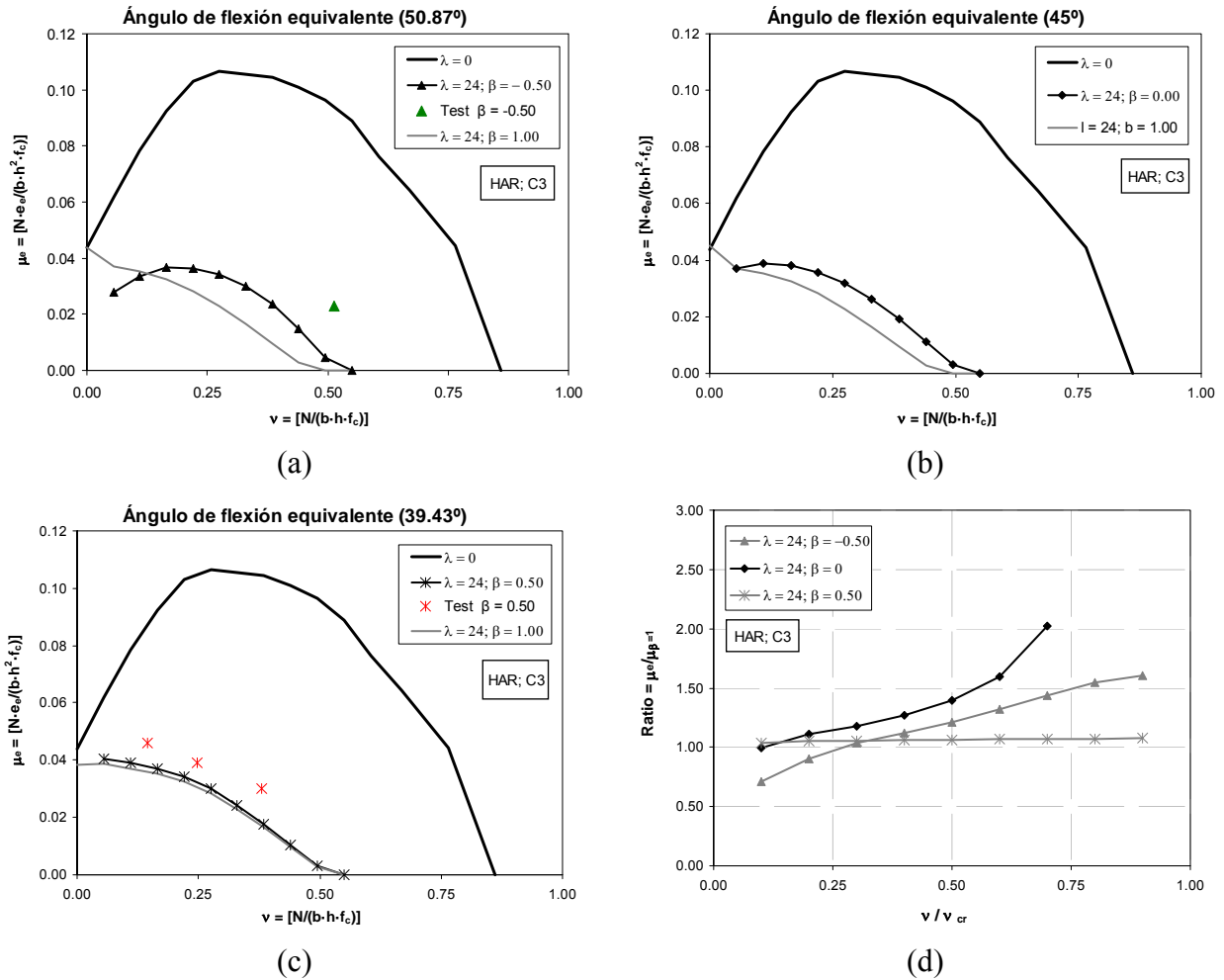


Figura G.5. Simulación numérica - flexo-compresión esviada (serie C3); Momentos equivalentes: a. $\beta = -0.5$; b. $\beta = 0$; c. $\beta = 0.5$; d. Ratio $\mu_e/\mu_{\beta=1}$

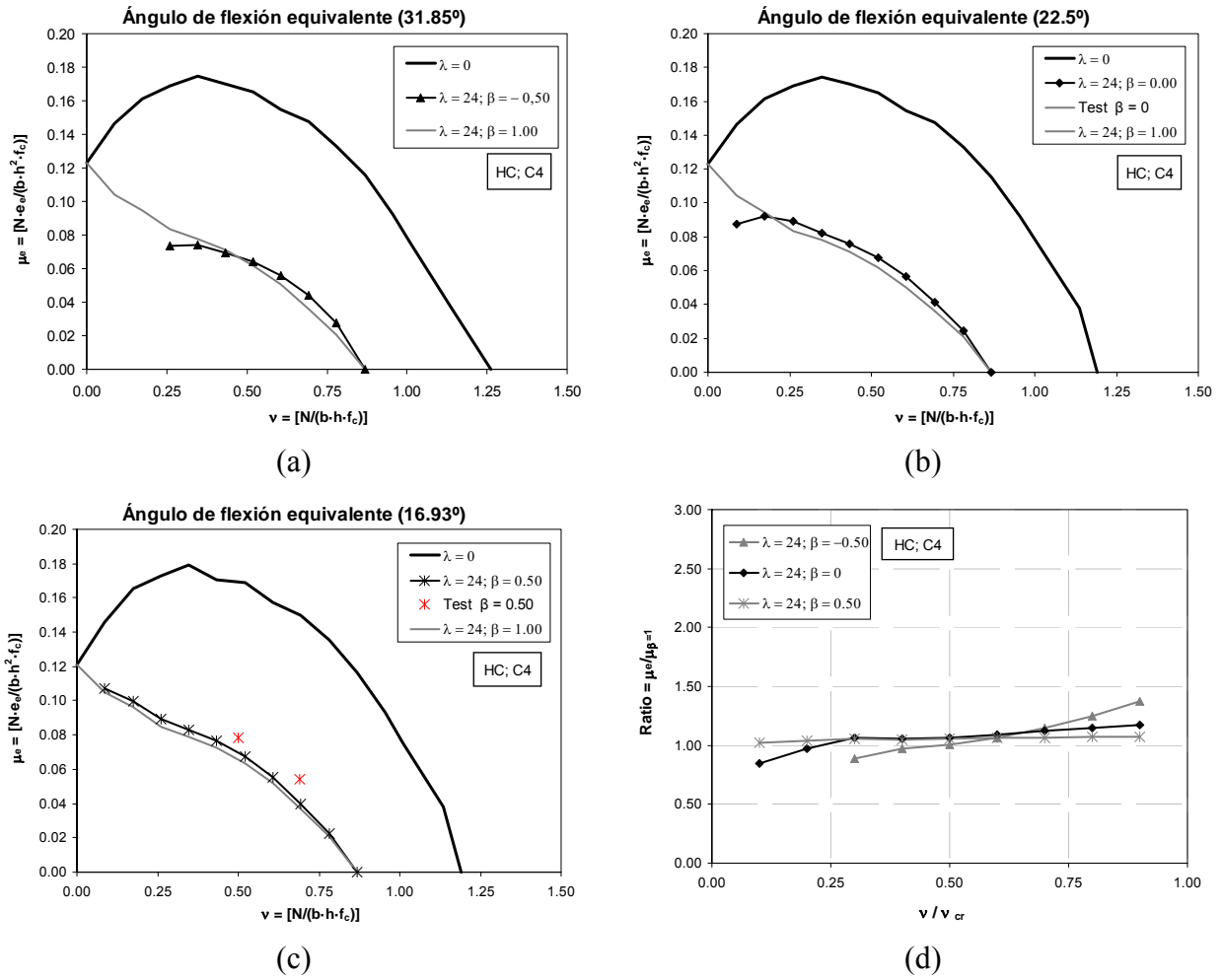


Figura G.6. Simulación numérica - flexo-compresión esviada (serie C4);
 Momentos equivalentes: a. $\beta = -0.5$; b. $\beta = 0$; c. $\beta = 0.5$; d. Ratio $\mu_e / \mu_{\beta=1}$

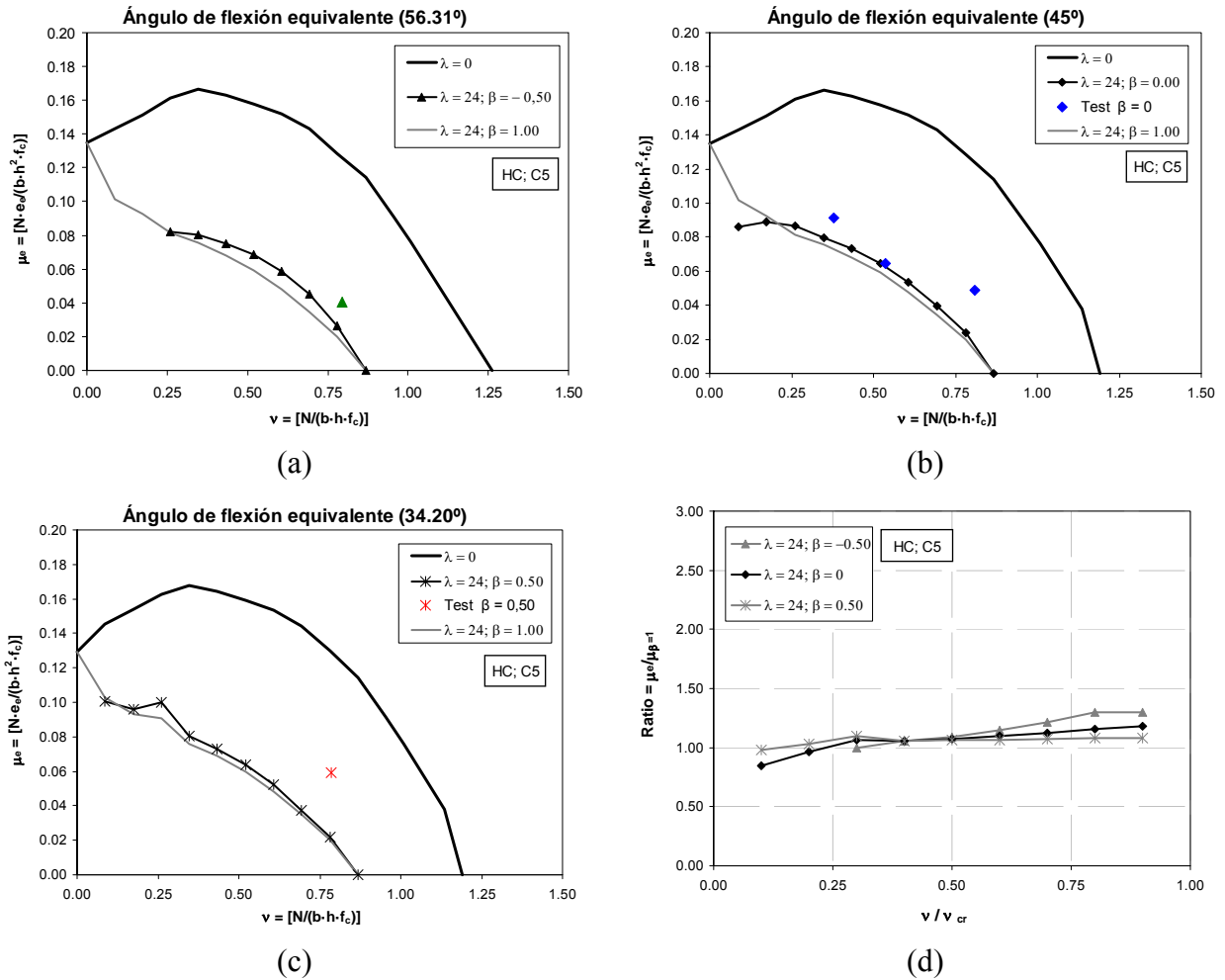
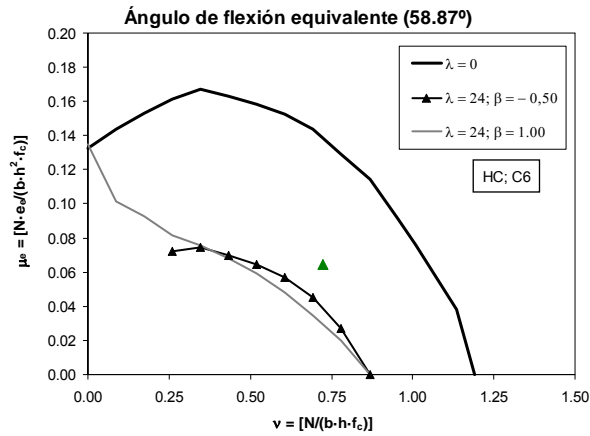
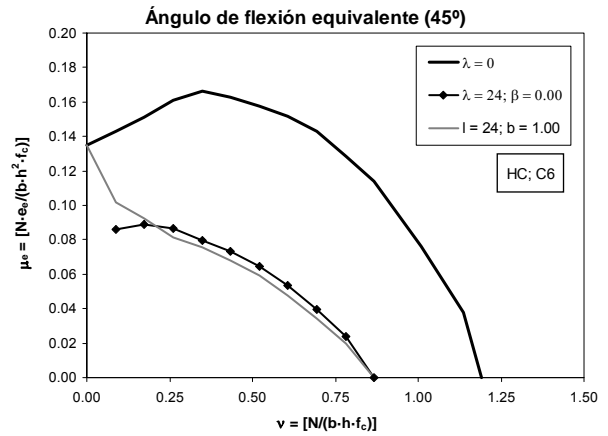


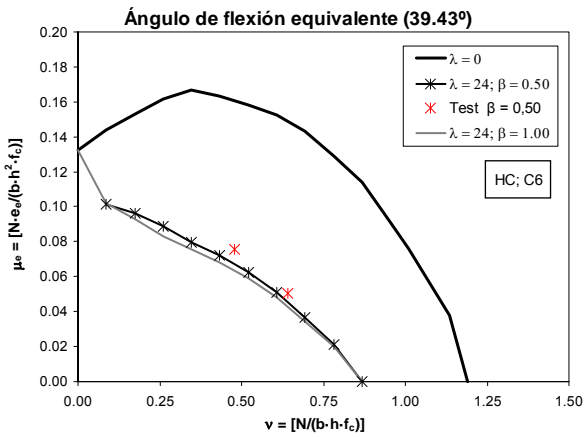
Figura G.7. Simulación numérica - flexo-compresión esviada (serie C5); Momentos equivalentes: a. $\beta = -0.5$; b. $\beta = 0$; c. $\beta = 0.5$; d. Ratio $\mu_e/\mu_{\beta=1}$



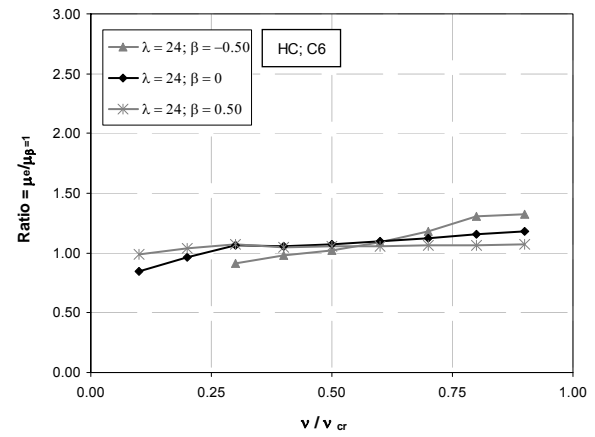
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura G.8. Simulación numérica - flexo-compresión esviada (serie C6);
Momentos equivalentes: a. $\beta = -0.5$; b. $\beta = 0$; c. $\beta = 0.5$; d. Ratio $\mu_e / \mu_{\beta=1}$

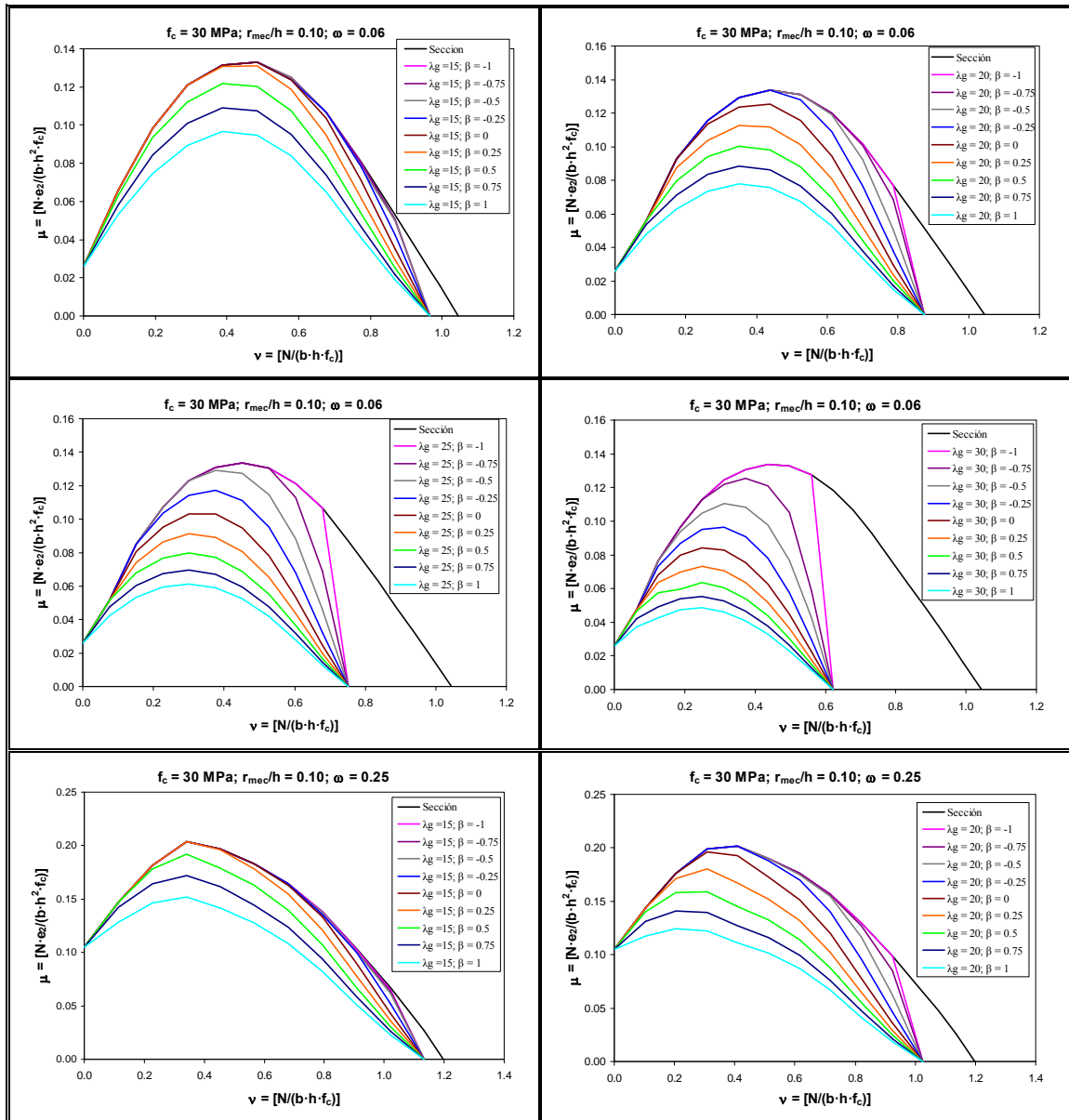
Anejo H.

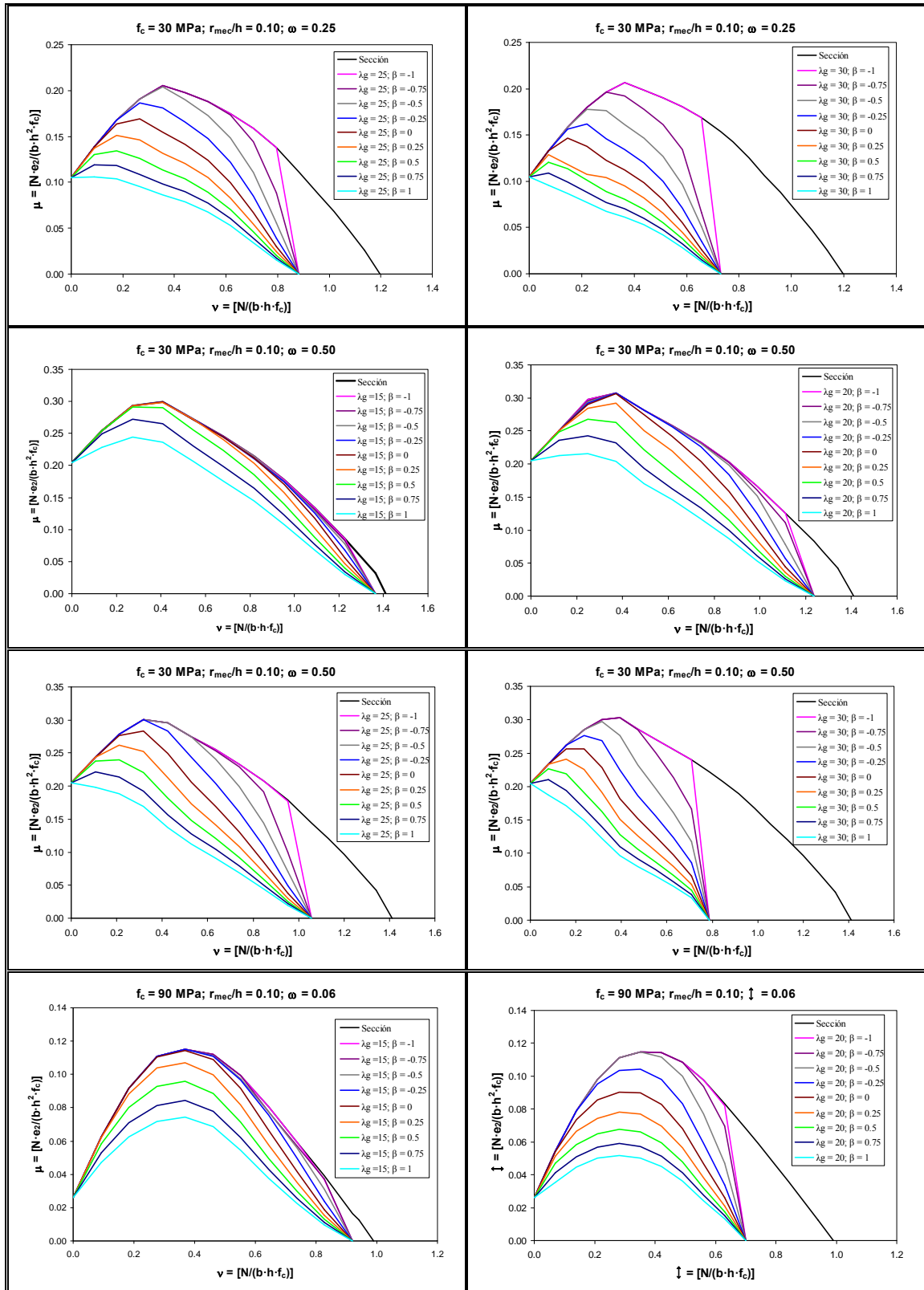
Resultados del análisis paramétrico – diagramas de interacción

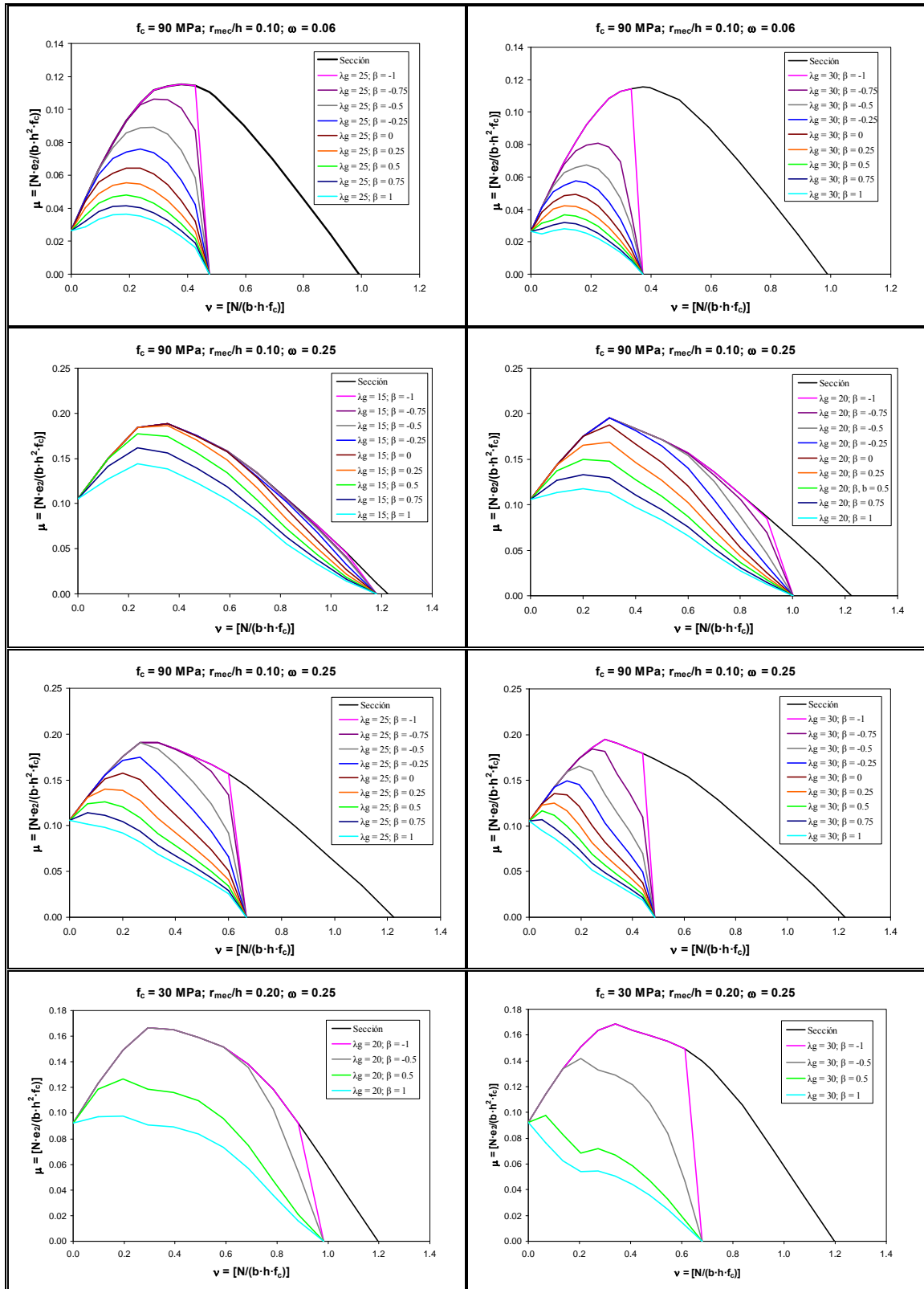
En este anejo se presentan los diagramas de interacción obtenidos con la simulación numérica (Capítulo 7) para la realización del análisis de los parámetros que influyen en la obtención del coeficiente de equivalencia C_m tanto en flexo-compresión recta como esviada.

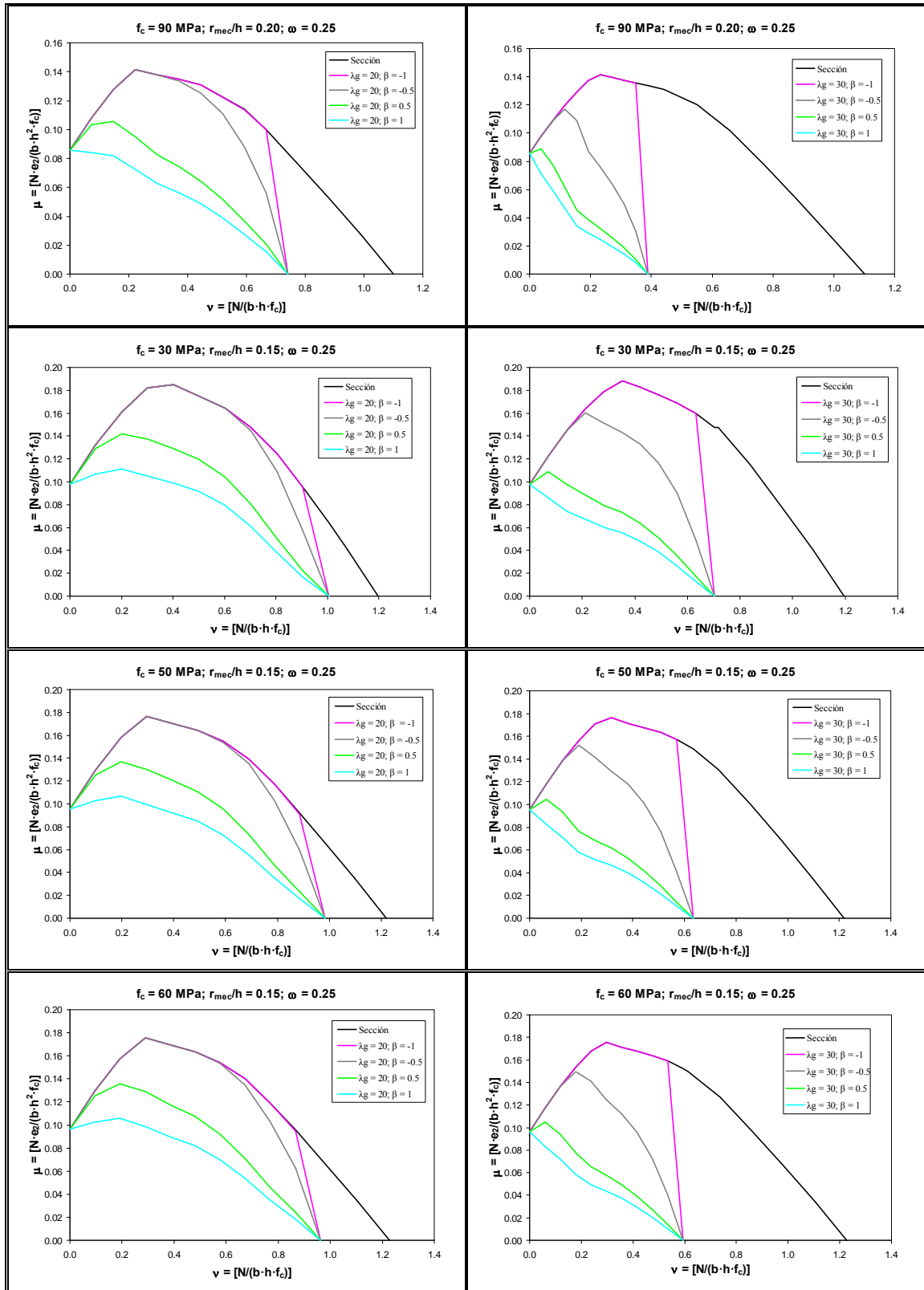
H.1. Flexo-compresión recta:

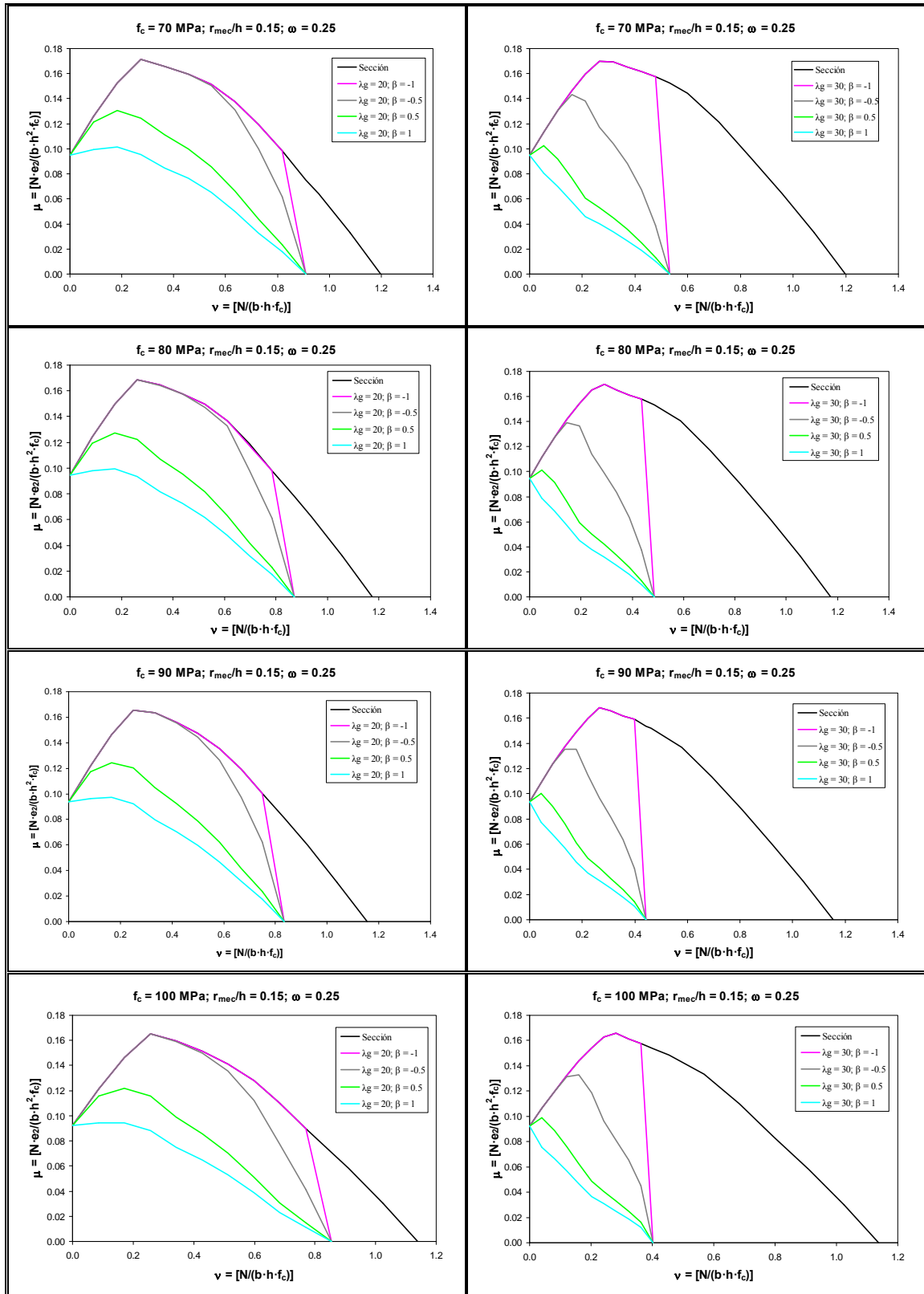
Para los casos de flexo-compresión recta se representan los diagramas momento-axil reducidos (μ - v) de la sección transversal ($\lambda_g = 0$), del soporte para el caso patrón de referencia ($\lambda_g \neq 0$; $\beta = 1$) y para los casos con excentricidades desiguales en extremos ($\lambda_g \neq 0$; $\beta \neq 1$) con la finalidad de analizar la influencia de los distintos parámetros en el coeficiente de equivalencia C_m , tal y como se ha explicado en el Capítulo 7.





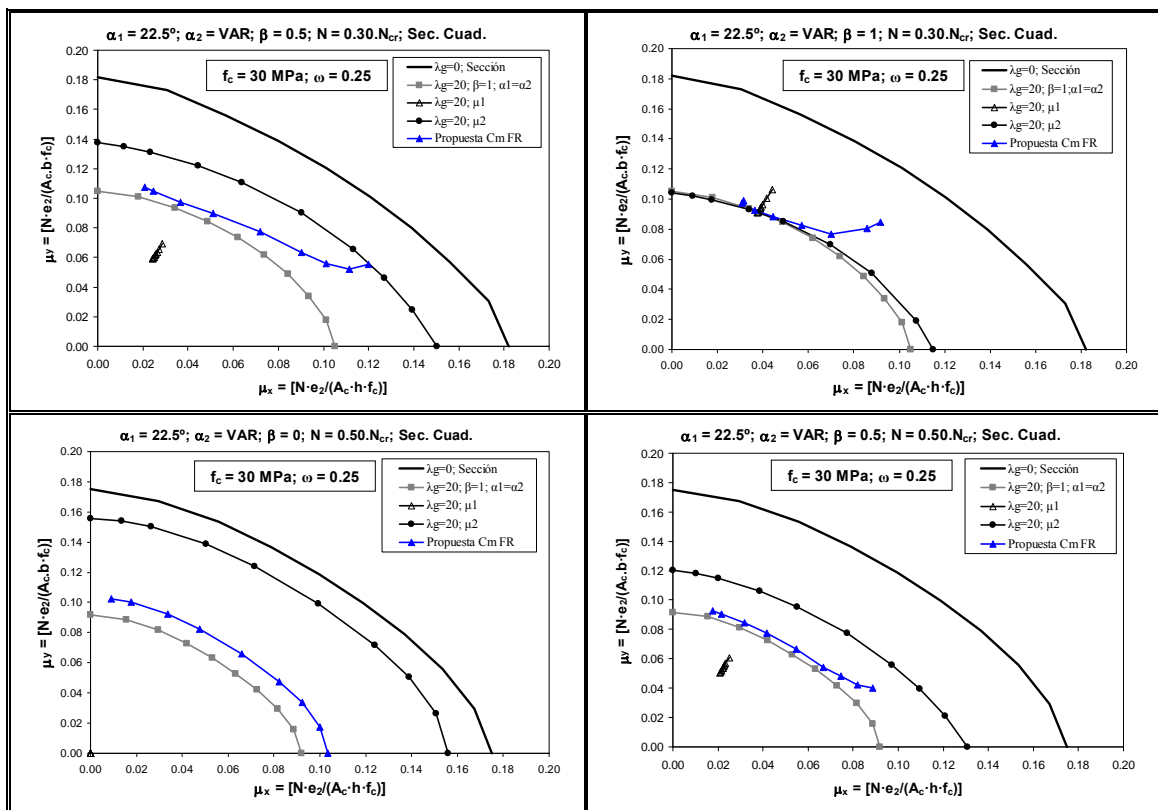


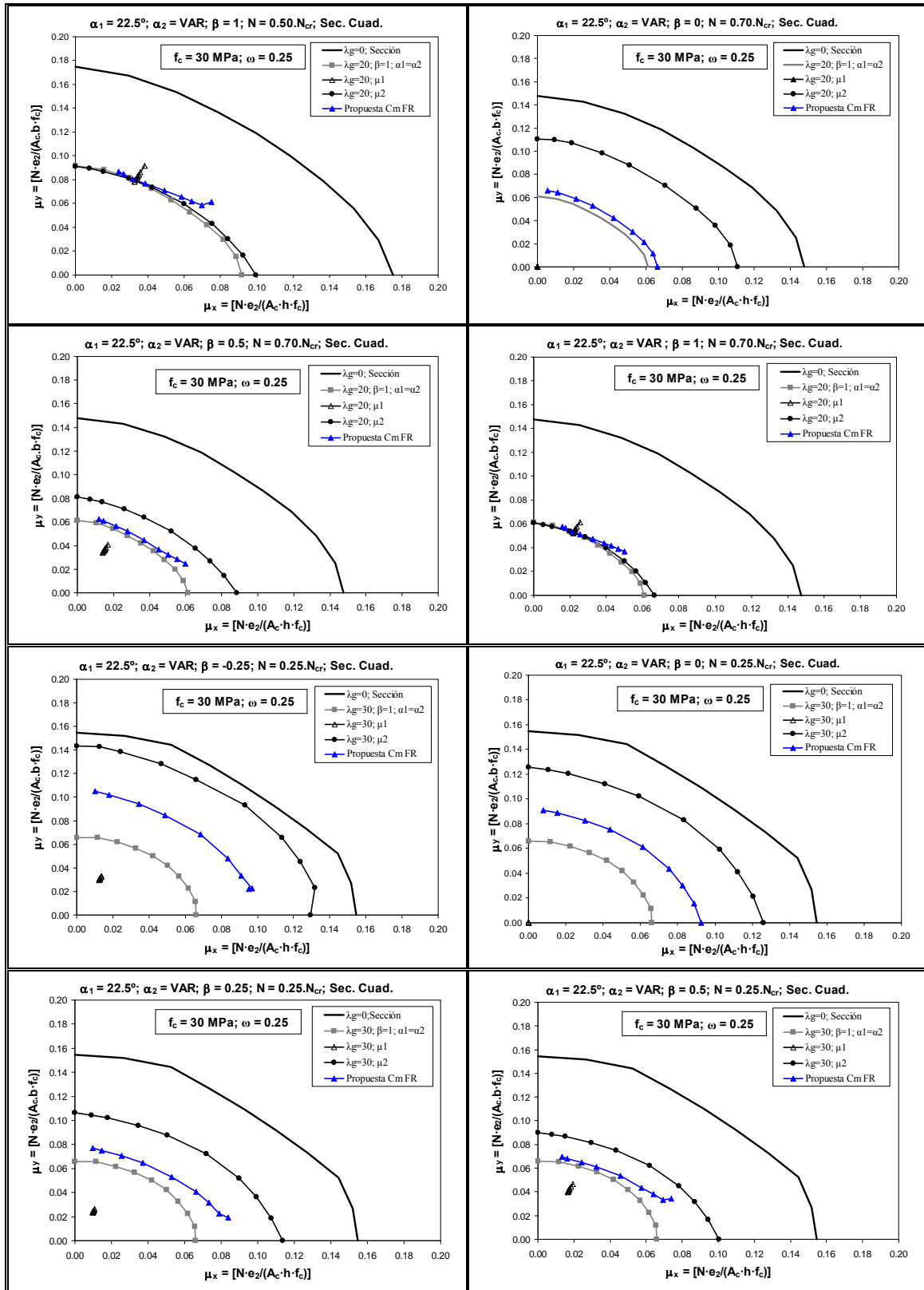


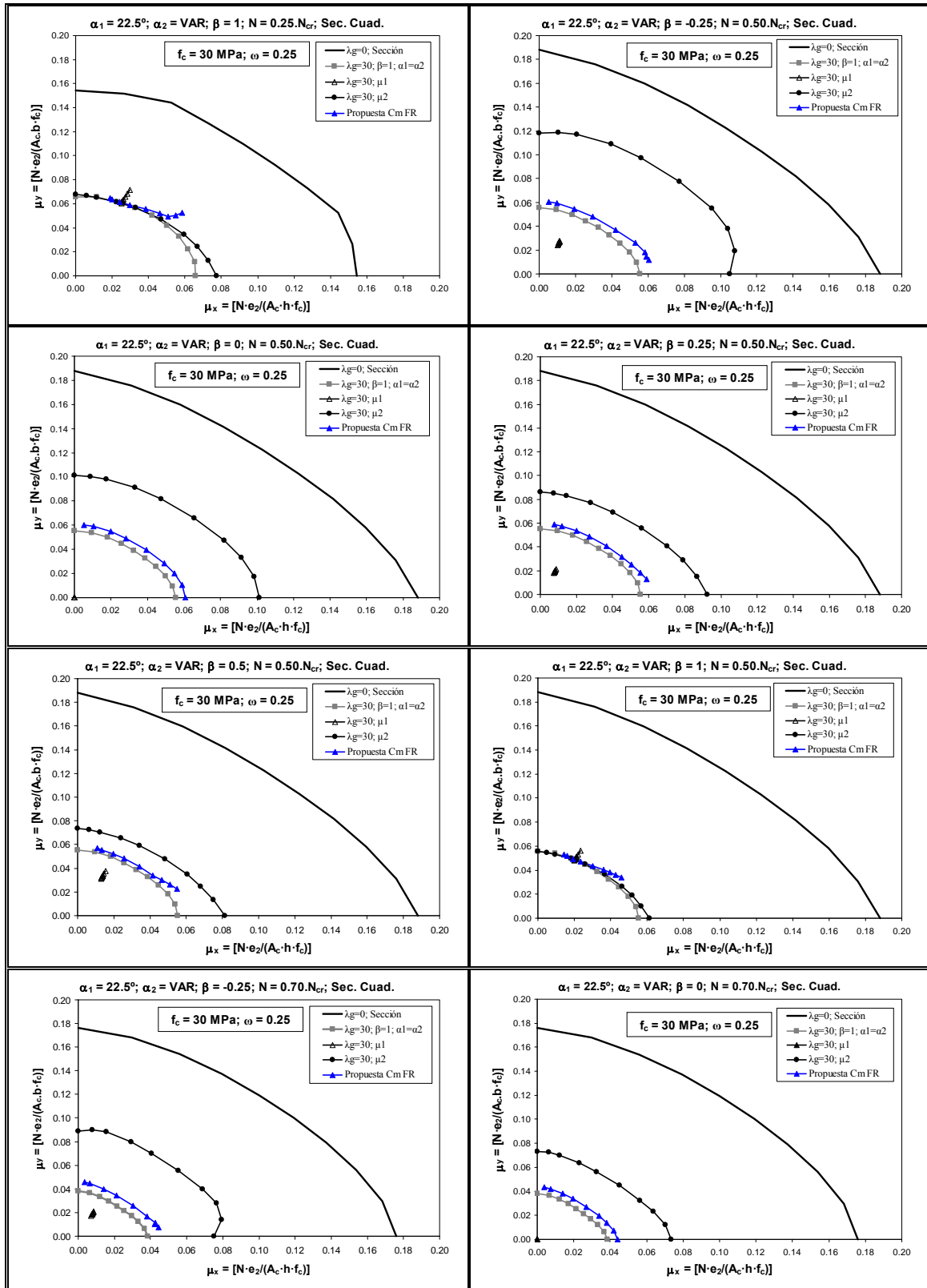


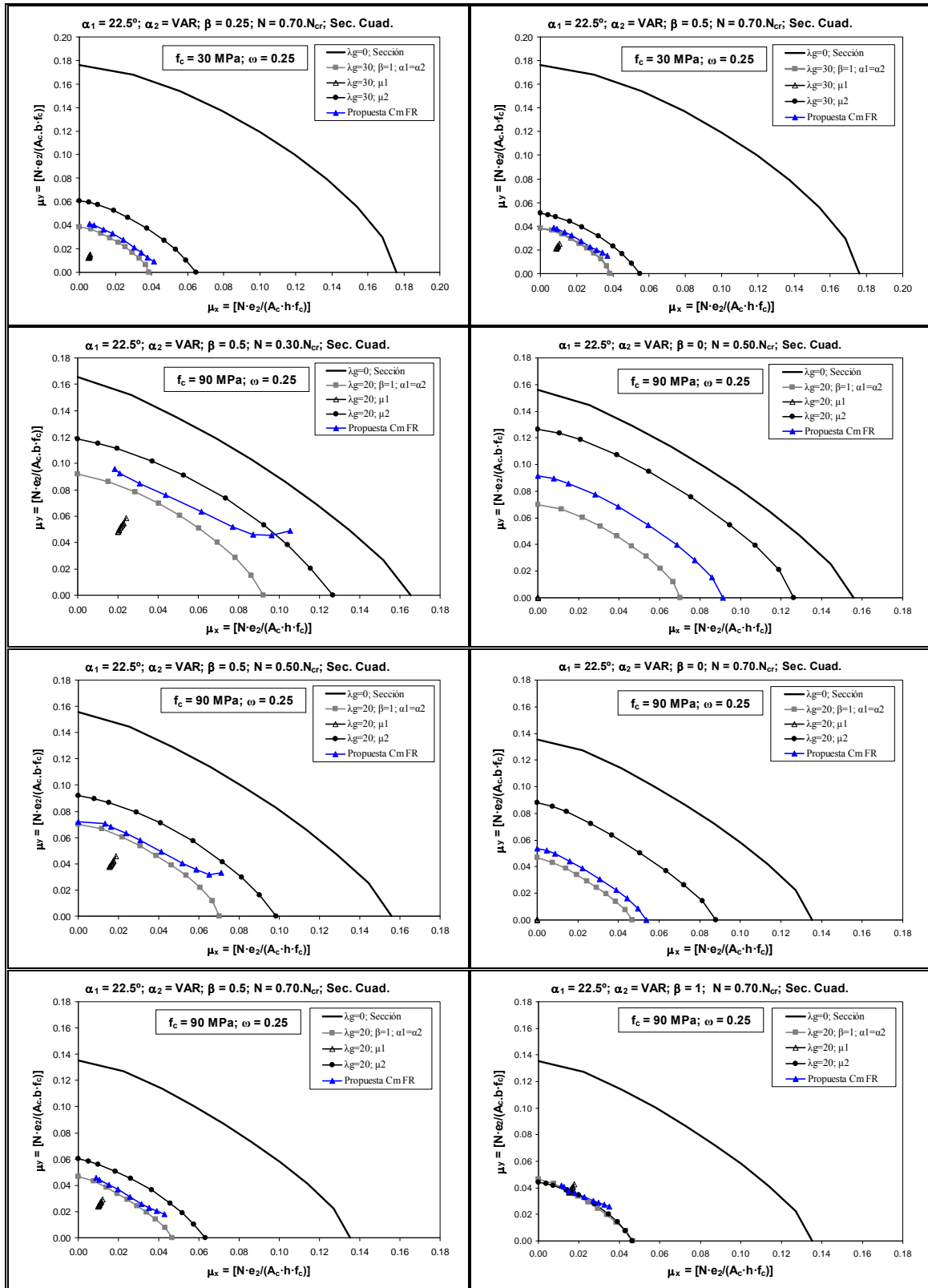
H.2. Flexo-compresión esviada:

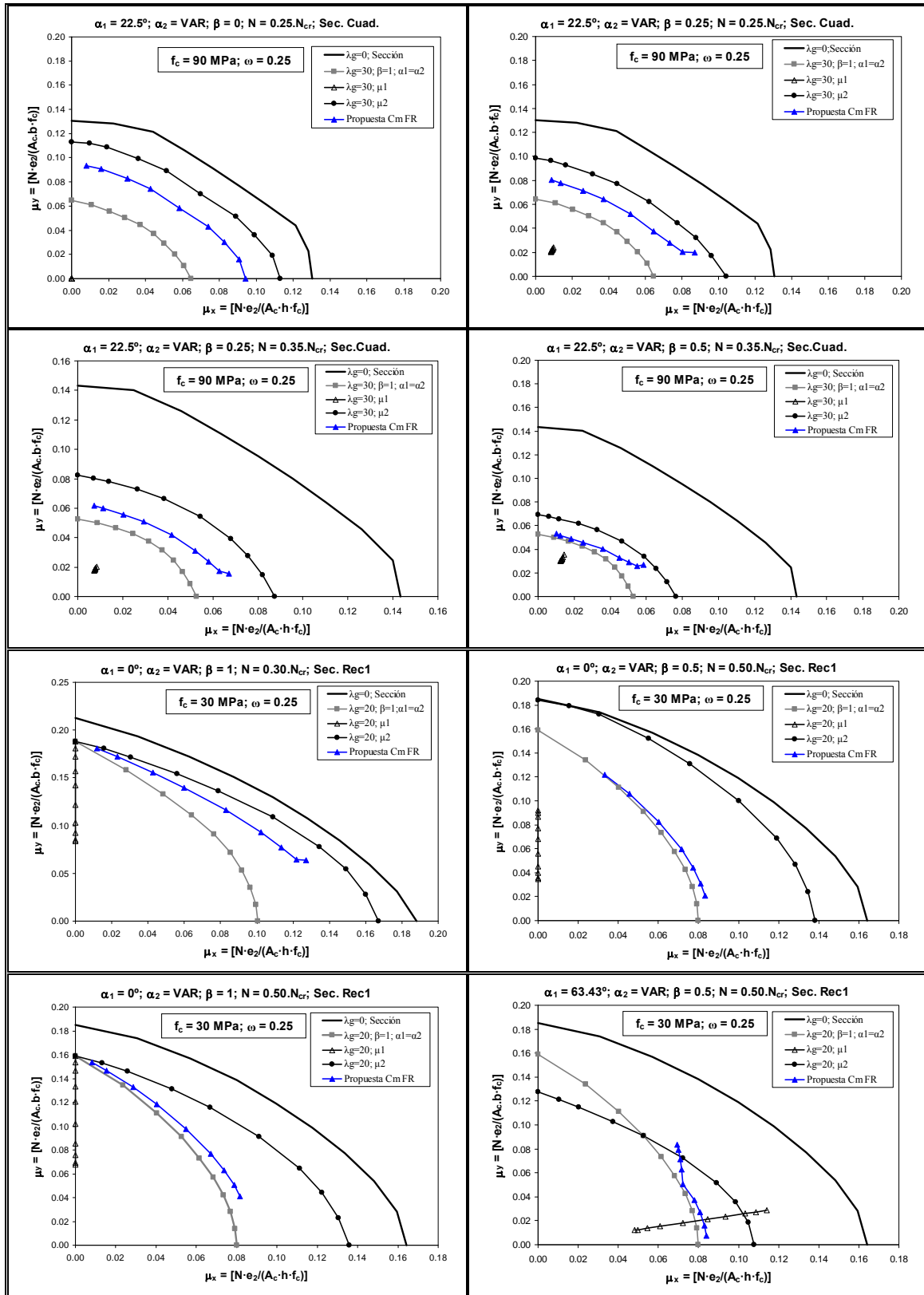
Para los casos de los soportes sometidos a flexo-compresión esviada, tal y como se ha explicado de forma detallada en el apartado 7.2.2.a del Capítulo 7 del presente trabajo, se ha realizado la comprobación a partir de la superficie de interacción de los esfuerzos de primer orden (N ; M_x ; M_y). Se representan los diagramas de interacción adimensionales (μ_x - μ_y) en función de los esfuerzos reducidos para niveles de axil reducido (v) constante para la sección transversal del soporte ($\lambda_g = 0$), para el caso patrón de referencia con excentricidades y ángulos de esviaje iguales en extremos ($\lambda_g = 20$; $\beta = 1$; $\alpha_1 = \alpha_2$), para el extremo con ángulo de esviaje constante del soporte considerado (μ_1 : $\lambda_g = 20$; $\alpha_1 = 26.57^\circ$), para el extremo con ángulo de esviaje variable del soporte considerado (μ_2 : $\lambda_g = 20$; $\alpha_2 = \text{VAR}$) y finalmente, para los momentos equivalentes (μ_{ex} y μ_{ey}) calculados de manera independiente para cada eje coordenado (x , y) con la expresión propuesta en este trabajo para el cálculo del coeficiente C_m .

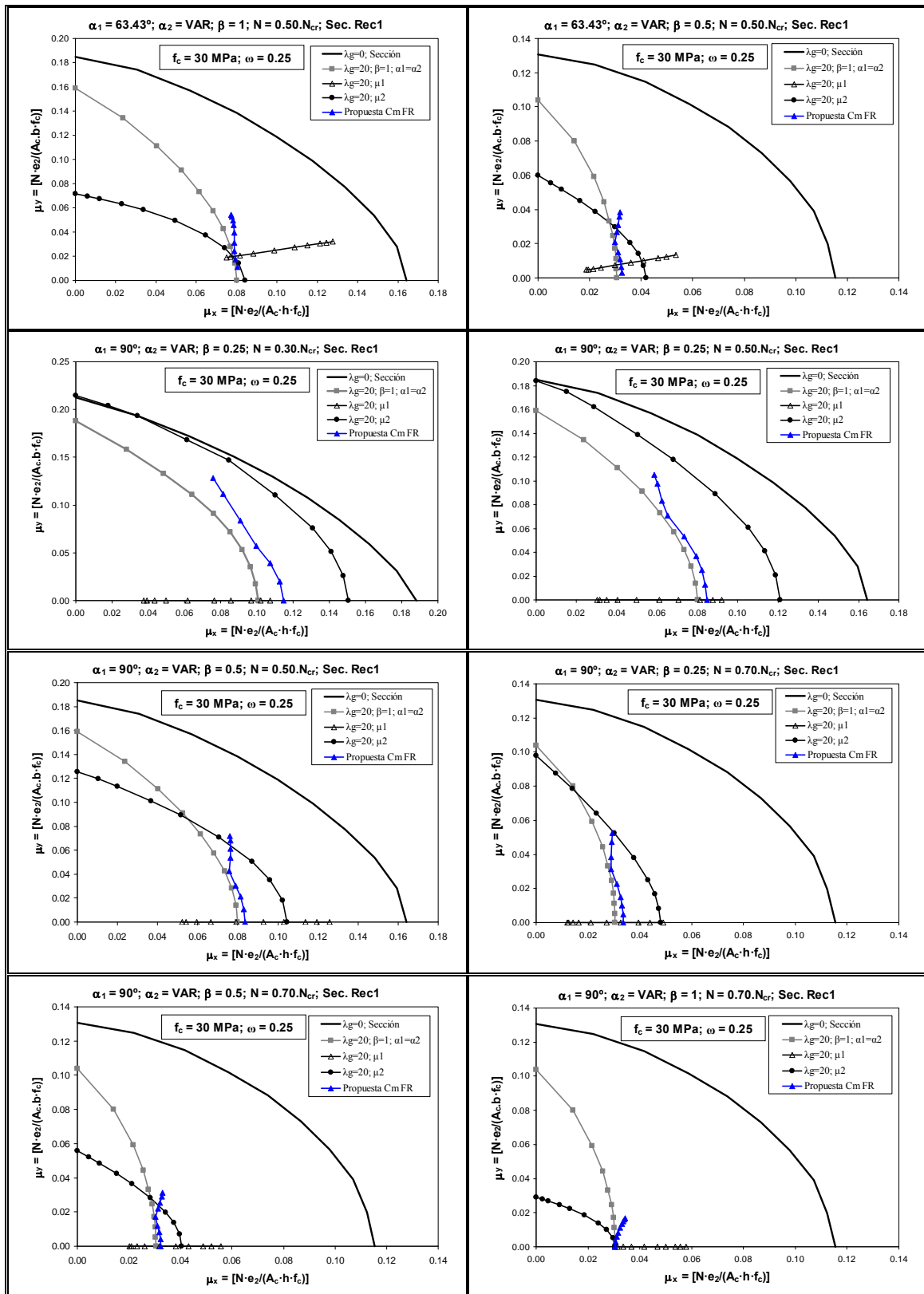


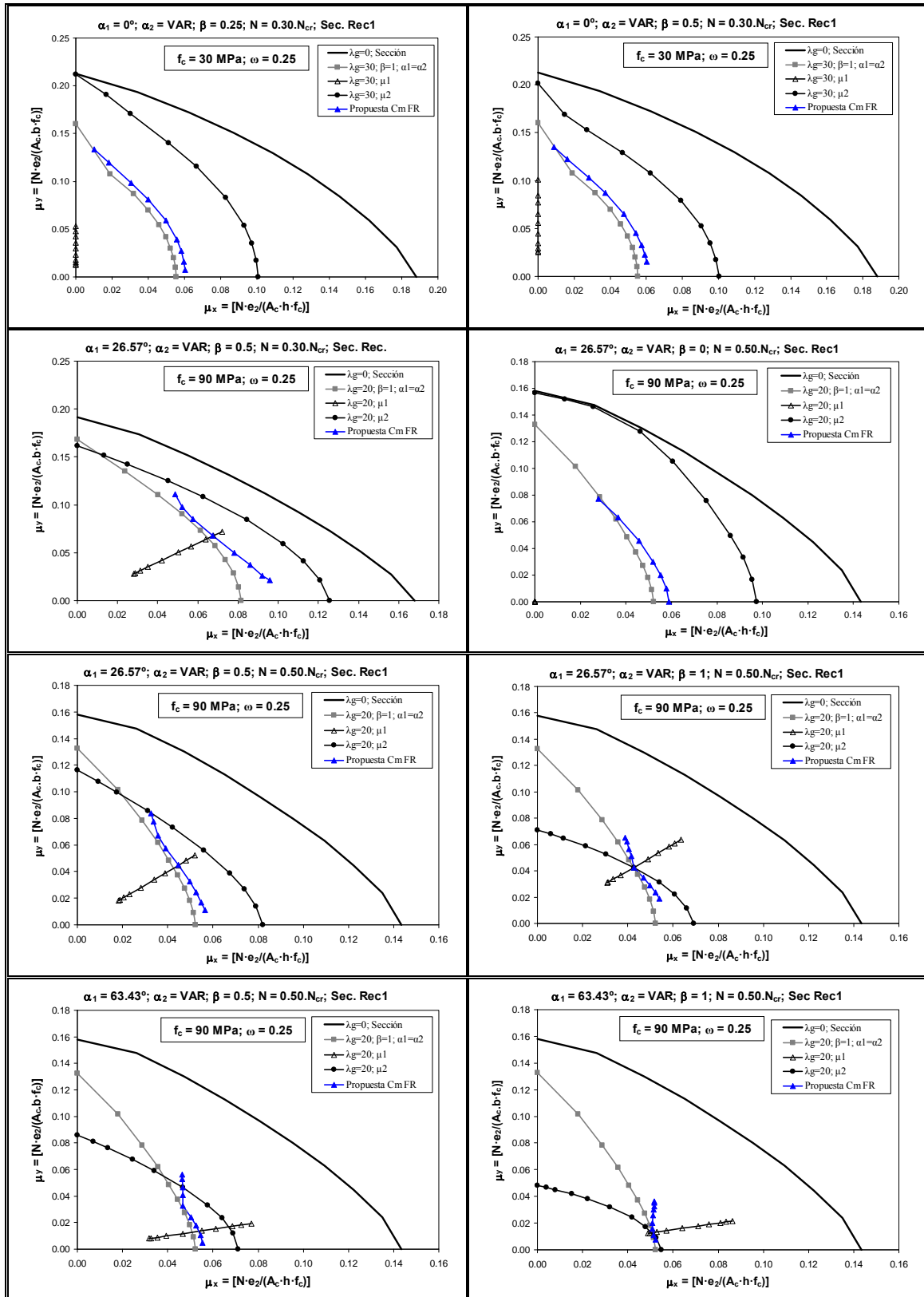


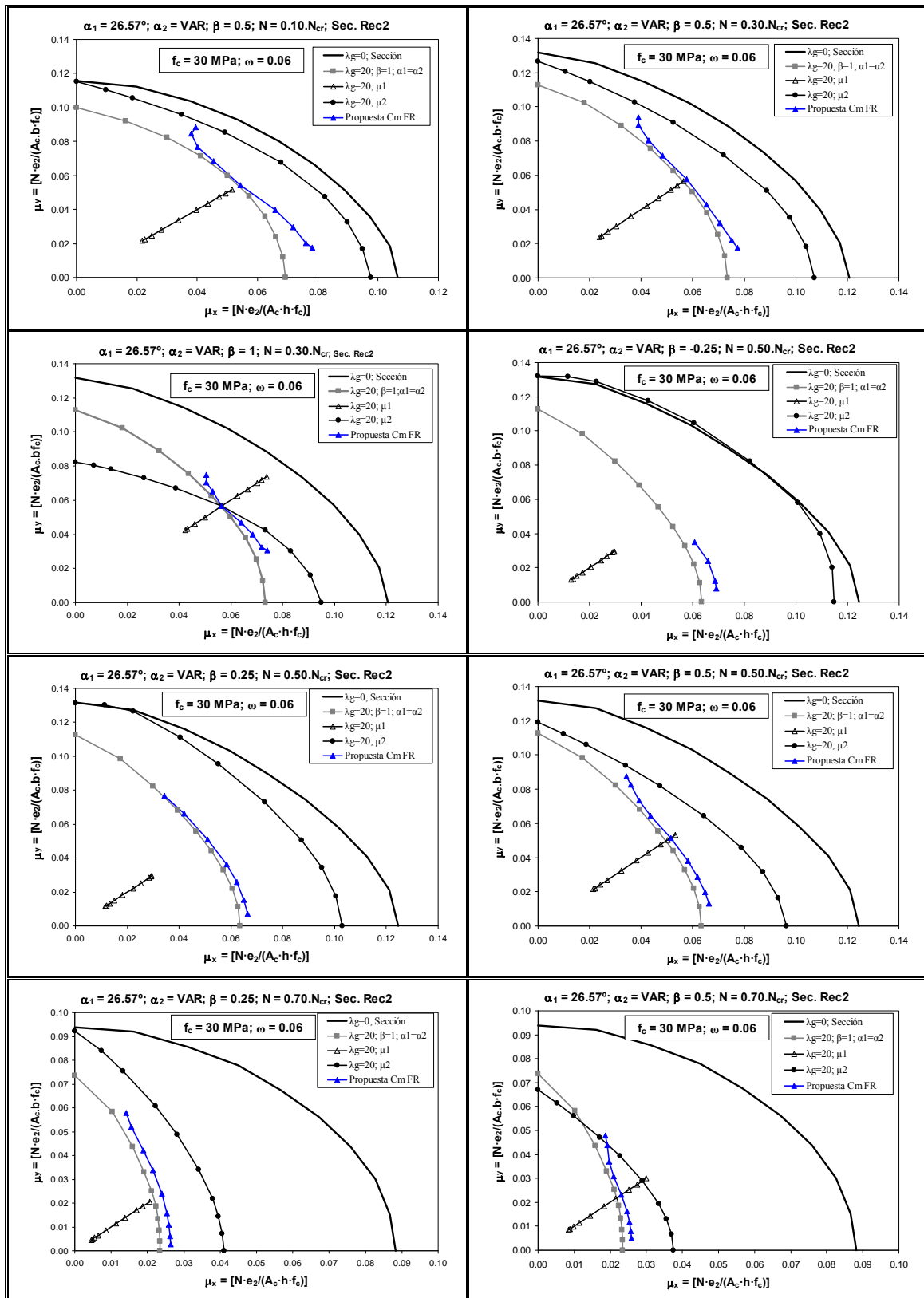


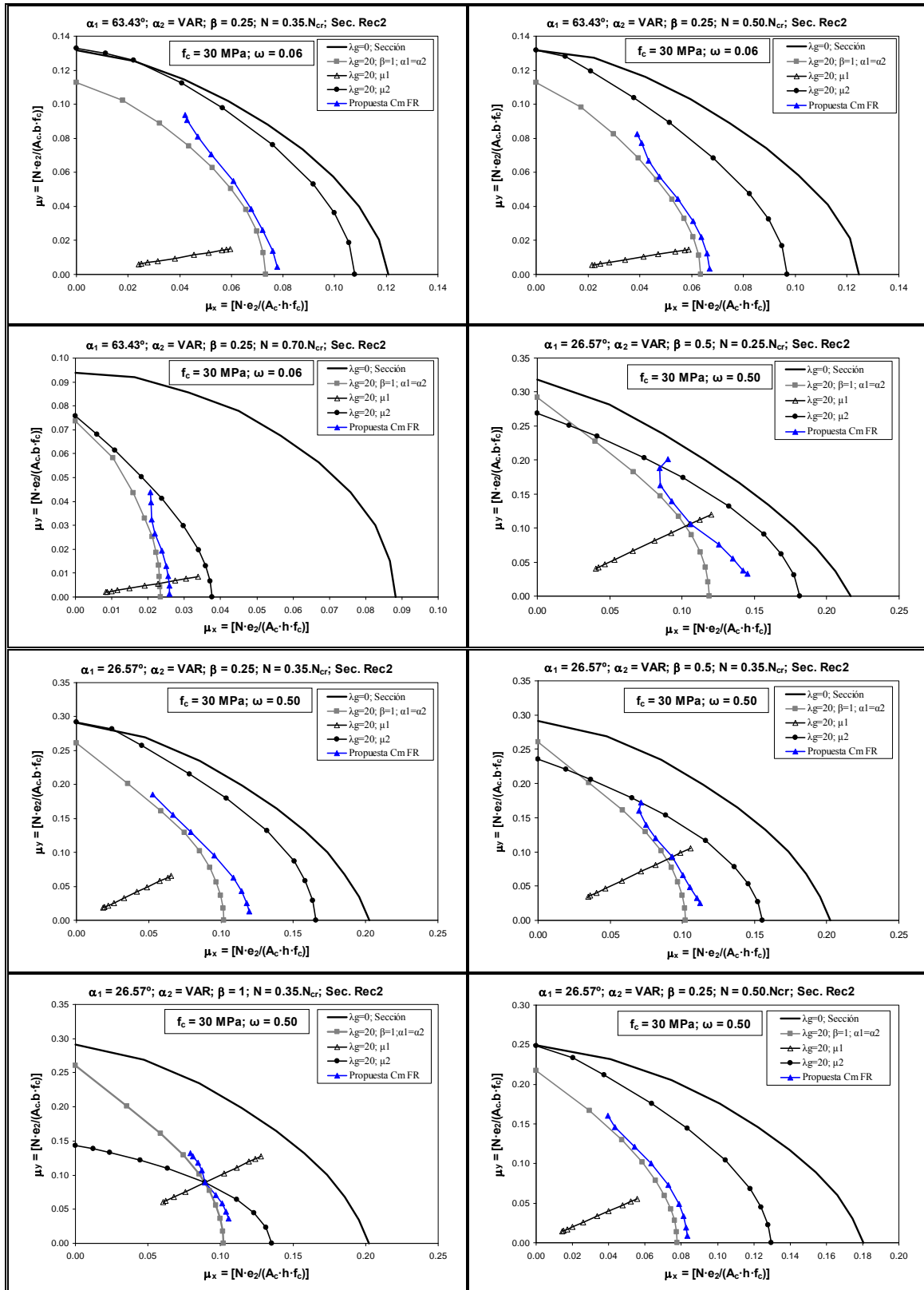


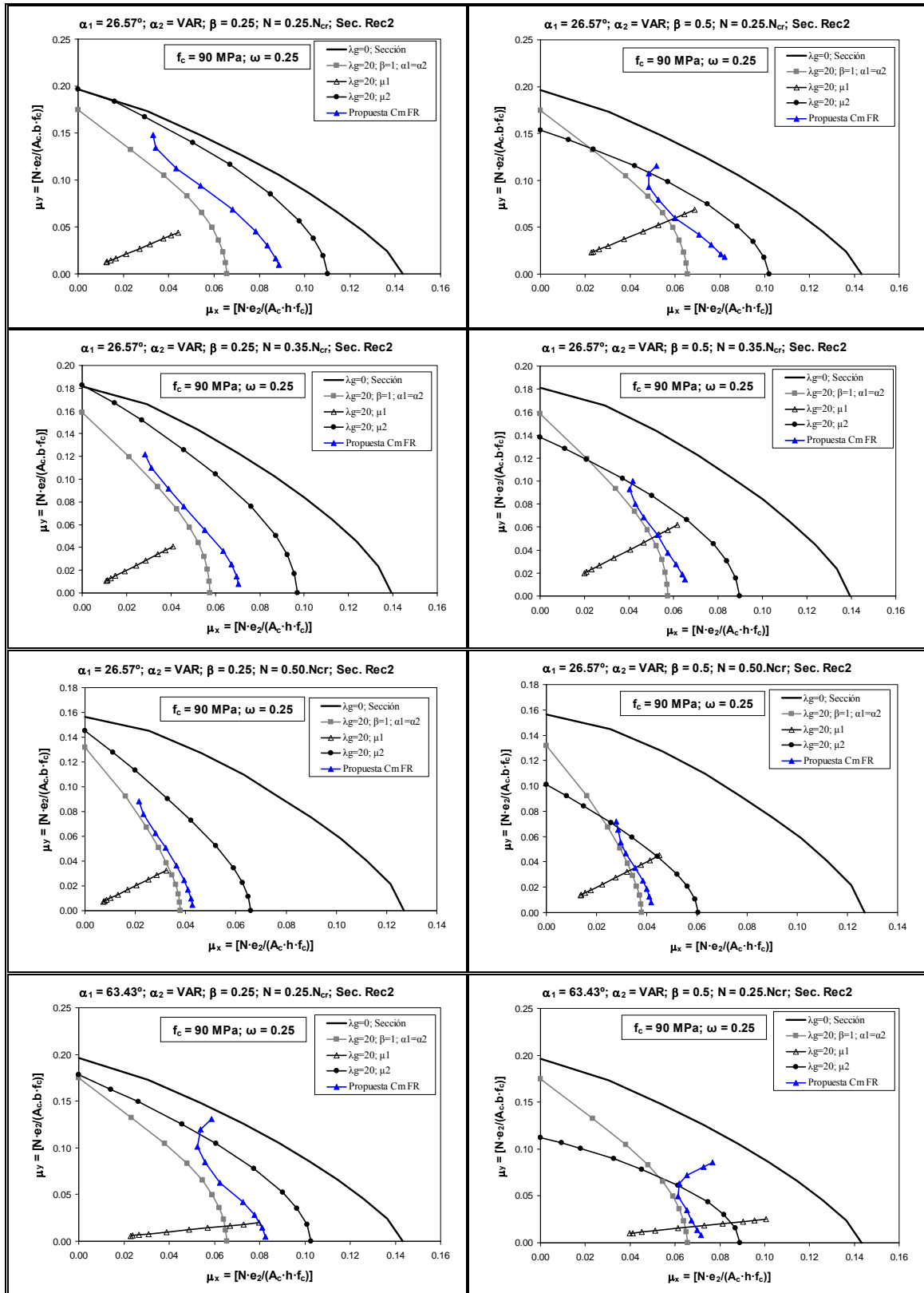


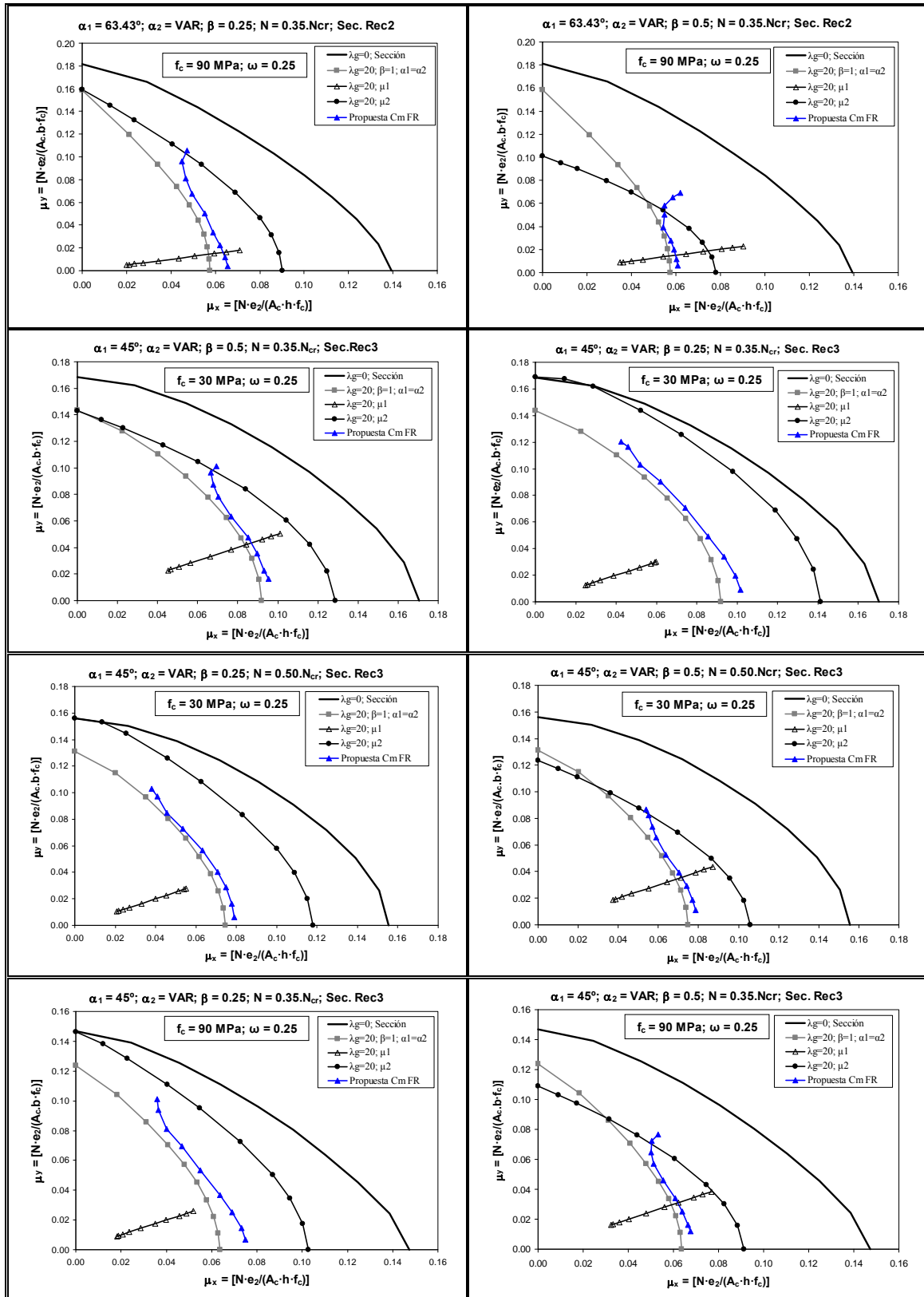


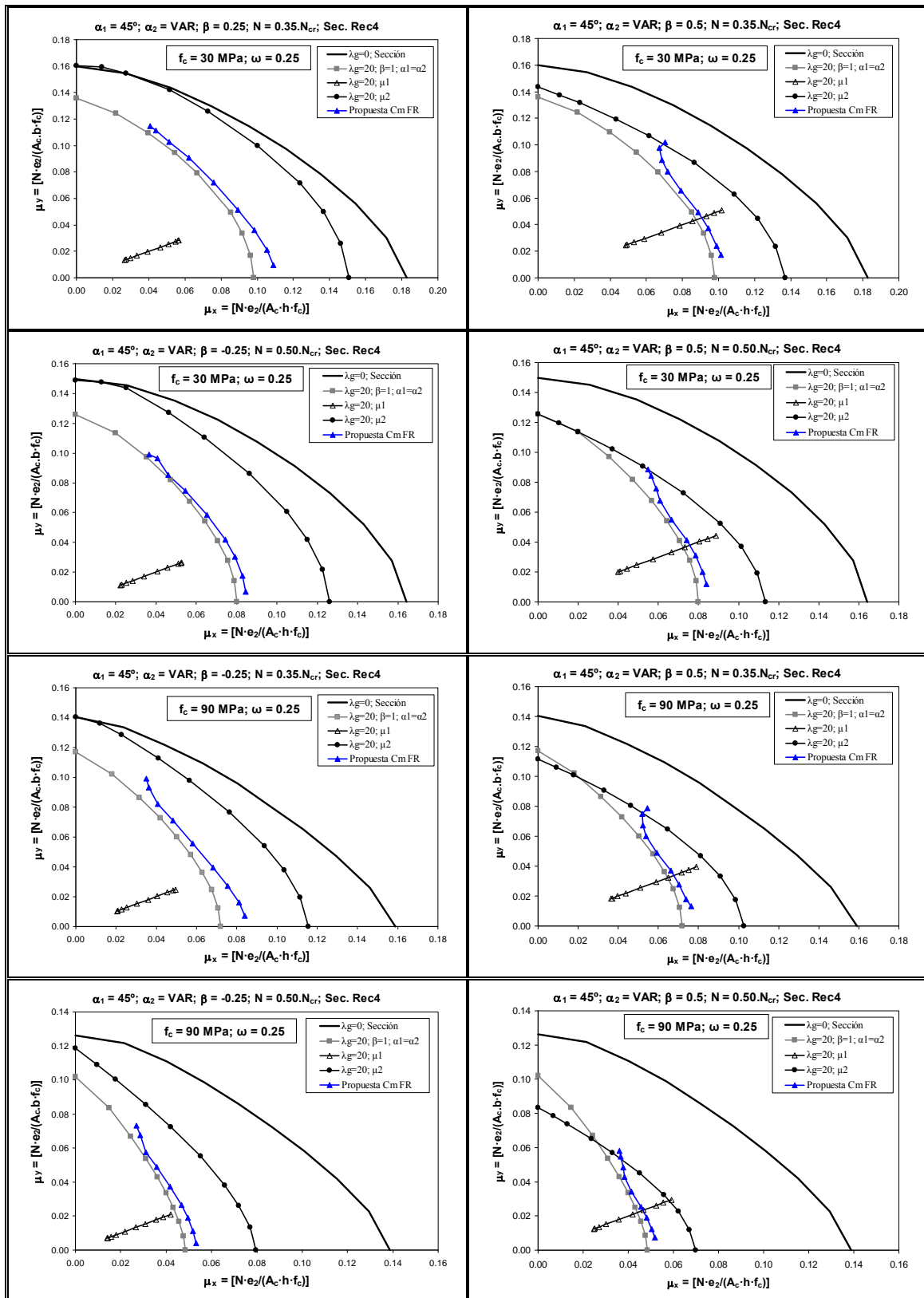












Anejo I.

Aplicación de la nueva expresión propuesta para el cálculo del coeficiente de equivalencia C_m

En este anejo, de la figura I.1 a la figura I.3, se muestran gráficamente los resultados del grado de precisión de la aplicación de los métodos simplificados propuestos por las normativas (EHE-08 [23], EC-2 (2004) [29] y ACI-318 (2008) [1]) respecto a los resultados experimentales, utilizando el coeficiente C_m propuesto por Austin (1961) [7] y el coeficiente C_m propuesto en el presente trabajo, presentados en las tablas 7.8 y 7.9 del Capítulo 7 de la presente tesis doctoral. Se puede observar en las gráficas de las figuras los casos puntuales que se sitúan del lado de la inseguridad ($\xi < 1$) con la aplicación de los métodos simplificados utilizando el coeficiente C_m propuesto por Austin (1961) [7], y la mejoría del nivel de seguridad para estos casos al utilizar en dichos métodos el coeficiente C_m propuesto en el presente trabajo.

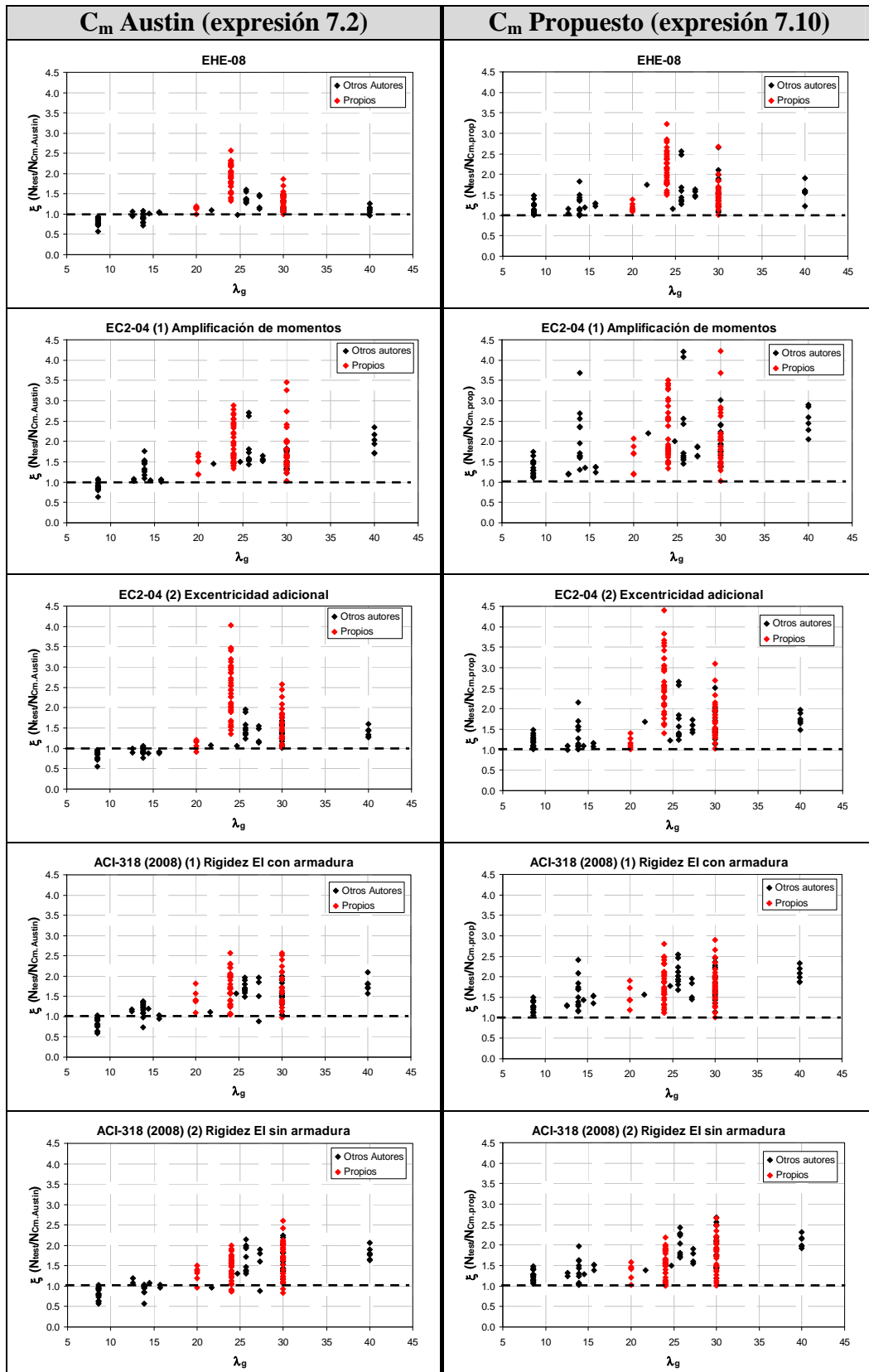


Figura I.1. Grado de precisión de los métodos simplificados propuestos por la normativas en función de la esbeltez geométrica λ_g .

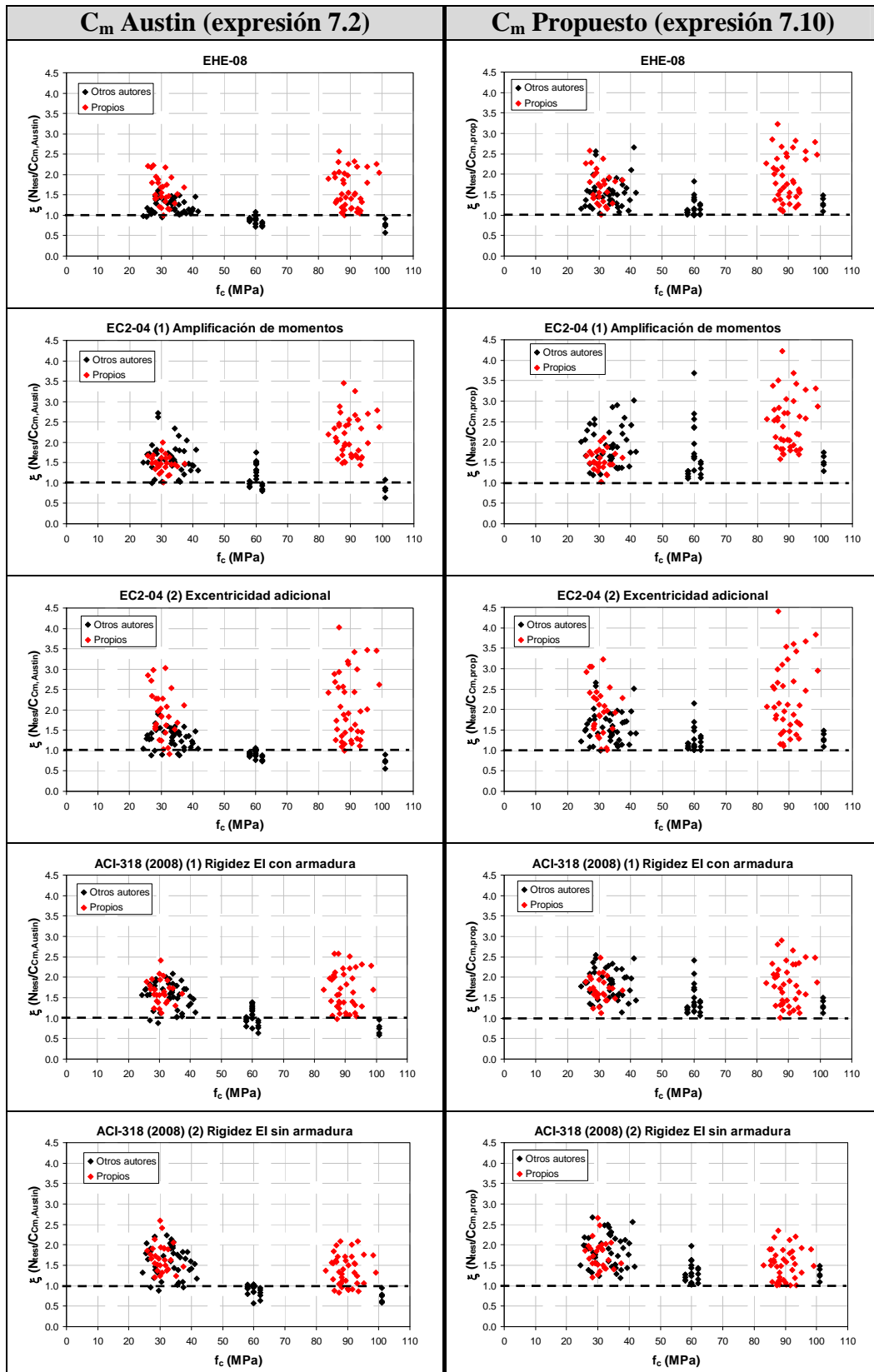


Figura I.2. Grado de precisión de los métodos simplificados propuestos por la normativas en función de la resistencia del hormigón f_c .

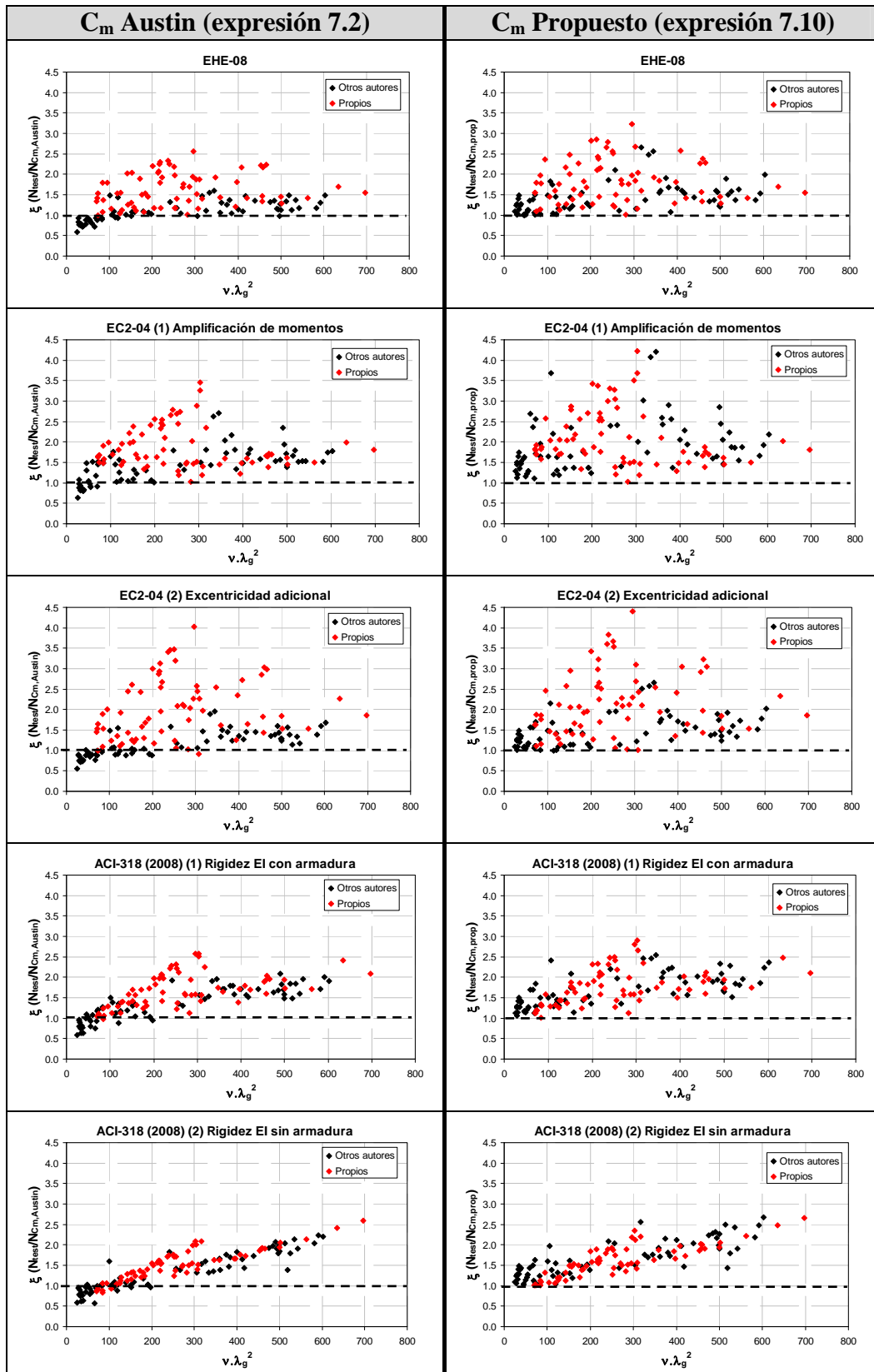


Figura I.3. Grado de precisión de los métodos simplificados propuestos por la normativas en función del producto $v \cdot \lambda_g^2$.

