



Estudio de encepados de tres y cuatro pilotes solicitados por cargas centradas y excéntricas: análisis experimental y de las formulaciones de diseño

TESIS DOCTORAL

Para optar al título de Doctor por la Universitat Politècnica de València

POR

LUCÍA MIGUEL TÓRTOLA

Directores

Dr. Pedro F. Miguel Sosa
Dr. Luis Pallarés Rubio

Valencia, diciembre 2018

Agradecimientos

En primer lugar, quisiera agradecer la financiación pública recibida a través del Ministerio de Economía y Competitividad, mediante las Ayudas para contratos predoctorales para la formación de doctores (BES-2013-063409), que me ha permitido una dedicación completa durante cuatro años a esta investigación. Tanto dicha ayuda como la financiación de los ensayos experimentales realizados forman parte del proyecto *Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: encepados y cálices* (BIA2012-323000).

Mis directores Pedro Miguel y Luis Pallarés me han ofrecido toda su experiencia y confianza durante el desarrollo de la tesis. De ellos he aprendido el rigor y la dedicación que se requieren en una carrera investigadora.

Los ensayos experimentales se han realizado en el Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH) de la Universidad Politècnica de València. Para su desarrollo fue imprescindible el apoyo técnico de mi compañero Moisés Gutiérrez, con quien trabajé codo con codo en la fabricación y montaje de cada ensayo, y nos reímos, mucho. Gracias también a Daniel Tasquer, quien puso en marcha todo el dispositivo de control del sistema de actuadores y estuvo con nosotros en cada ensayo. Agradezco además la colaboración de los técnicos del laboratorio del Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ing Civil: Pascual Hernández, Javier Bardisa, Juan Franqueza y Juan Monzó. No me olvido a Lino y a Paco, por los consejos y los buenos ratos que pasamos en el laboratorio.

Deseo resaltar la maravillosa experiencia que tuve durante mi estancia de investigación en la University of Surrey con el Dr. Juan Sagasetta, gracias por compartir su tiempo, sus conocimientos y por su amabilidad. Los meses en Guildford no hubieran sido lo mismo sin la amistad de Manolo, y nunca olvidaré la exquisita amabilidad y cariño de mi casera, Anna. Esta estancia de tres meses

fue subvencionada por las Ayudas a la movilidad predoctoral del Ministerio de Economía y Competitividad (EEBB-I-17-12364).

Reservo unas líneas para aquellas personas a las que querría estar dando las gracias todo el tiempo, toda la vida. Mi padre, principal culpable de mi vocación y referente indiscutible en lo profesional y personal. He disfrutado muchísimo de cada minuto aprendiendo de ti, heredando tus conocimientos. Mi madre, ejemplo de fortaleza y superación, mi apoyo y mi alegría. Mi hermana, esa cómplice de vida que me ha enseñado que hay que luchar por conseguir lo que quieres. A Dani, tú me guías y me haces ver el mundo desde puntos de vista que no imaginaba, sé que me apoyarás siempre.

Abstract

Pile caps are used as deep foundations of buildings and bridges to transfer column loads to the piles into the ground. Deep pile caps are commonly used in practice. These elements are usually considered as an entire D-region because complex stress fields develop inside them.

Although these loads usually consist of a combination of an axial force and bending moments in one or two directions, all the experimental studies carried out to date that analysed pile cap behaviour have only considered centred loads.

There is a lack of agreement regarding the proper reinforcement arrangement in pile caps: the proportion between bunched and distributed reinforcement at the pile cap base, and the convenience of a vertical secondary reinforcement in stirrups. There are also no experimental tests on pile caps designed to study the effectiveness of vertical secondary reinforcement.

With the aim of assessing the influence of non-centred loads, the reinforcement arrangement, the number of piles and the slenderness, an experimental campaign on 30 real scale pile caps has been conducted. The tests are carried out under centred and eccentric loads. The shear-span ratio ranges from 0.56 to 1.10 for the four-pile caps and from 0.84 to 1.68 for the three-pile caps. Moreover, three reinforcement layouts are compared: bunched reinforcement, bunched in addition with distributed reinforcement and finally, bunched in addition with distributed and vertical secondary reinforcement in stirrups.

Two different approaches for the analysis of these results are considered. On the one hand, a unified STM formulation is presented, valid for eccentric loads, which considers the contribution of the horizontal and vertical secondary rein-

forcement to the pile cap strength. This model links the strut inclination with the stress verification in struts and nodal zones.

On the other hand, punching and shear formulations of Eurocode 2 and ACI 318-14 are studied to assess their ability to predict the strength and failure mode of pile caps, in both centred and eccentric load conditions and with different reinforcement configurations. This study ends with the application of the Critical Shear Crack Theory to pile caps. The Model Code 2010 punching formulation is based on the CSCT and has already been successfully applied to squat footings.

Resumen

Los encepados sobre pilotes son empleados en las cimentaciones profundas de edificios y puentes para transmitir las solicitaciones del pilar a los pilotes embebidos en el terreno. En el caso más habitual de los encepados rígidos, se generan campos tensionales complejos, por lo que se consideran regiones D en su totalidad.

Las solicitaciones que transmite el pilar a la cimentación incluyen generalmente combinaciones de esfuerzos axil, flector y cortante. A pesar de tratarse del estado de carga más común, no existen hasta la fecha ensayos de encepados de más de dos pilotes con carga vertical no centrada.

Existe además cierta falta de consenso sobre la disposición de armado en encepados: la proporción entre el armado concentrado en bandas frente al distribuido en la base, y la necesidad de disponer un armado vertical en cercos atando las bandas. Tampoco existen ensayos experimentales diseñados para estudiar la eficacia de la armadura secundaria vertical.

Con objeto de estudiar la influencia del tipo de carga, la configuración de armado, el número de pilotes y la esbeltez, se lleva a cabo una campaña experimental de 30 ensayos de encepados de tres y cuatro pilotes a escala real. Los ensayos se realizan bajo carga centrada y excéntrica, sobre especímenes con distintas relaciones vuelo-canto ($w/d = [0.56-1.68]$). Se comparan además tres configuraciones de armado: armado en bandas, armado en banda y distribuido horizontal y armado en bandas, distribuido horizontal y con armadura vertical.

Se presenta un modelo de bielas y tirantes tridimensional, válido para cargas excéntricas, que explica la contribución resistente de las armaduras secundarias horizontales y verticales. El modelo forma parte de una propuesta unificada,

que relaciona el ángulo de inclinación de las bielas con la comprobación de la capacidad resistente del hormigón en bielas y zonas nodales.

Por otra parte, se realiza un estudio del tratamiento normativo (Eurocódigo 2, ACI 318-14) del punzonamiento y cortante en encepados, para evaluar su capacidad para predecir la resistencia y modo de fallo en condiciones de carga tanto centrada como excéntrica y con diferentes configuraciones de armado. Este estudio culmina con la aplicación a encepados de la Teoría de la Fisura Crítica, en la que se basa la formulación de punzonamiento del Código Modelo 2010, que ya ha sido extendida con éxito al caso de zapatas.

Resum

Els encepats sobre pilòs són emprats en els fonaments profunds d'edificis i ponts per a transmetre les sol·licitacions del pilar als pilòs embeguts en el terreny. En el cas més habitual dels encepats rígids, es generen camps tensionals complexos, per la qual cosa es consideren regions D íntegrament.

Les sol·licitacions que transmet un pilar als fonaments a través de l'encepat inclouen generalment combinacions d'esforços axial, flector i tallant. Malgrat tractar-se de l'estat de càrrega més comuna, no existeixen fins hui assajos de encepats de més de dos pilotes amb càrrega vertical no centrada.

Existeix a més certa falta de consens sobre la disposició d'armat en encepats: la proporció entre l'armat concentrat en bandes enfront del distribuït en la base, i la necessitat de disposar un armat vertical (estreps) lligant les bandes. Tampoc existeixen assajos experimentals dissenyats per a estudiar l'eficàcia de l'armadura secundària vertical.

A fi d'estudiar la influència del tipus de càrrega, la configuració d'armat, el número de pilotes i l'esveltesa, es duu a terme una campanya experimental de 30 assajos de encepats de tres i quatre pilotes a escala real. Els assajos es realitzen sota càrrega centrada i excèntrica, sobre espècimens amb diferents relacions d'esveltesa ($w/d = [0.56-1.68]$). Es comparen a més tres configuracions d'armat: armat en bandes, armat en banda i distribuït horitzontal i armat en bandes, distribuït horitzontal i amb armadura vertical.

Es presenta un model de bieles i tirants tridimensional, vàlid per a càrregues excèntriques, que explica la contribució resistent de les armadures secundàries horitzontals i verticals. El model forma part d'una proposta unificada, que relaciona l'angle d'inclinació de les bieles amb la comprovació de la capacitat resistent del formigó en bieles i zones nodals.

D'altra banda, es realitza un estudi del tractament normatiu (Eurocódigo 2, ACI 318-14) del punxonament i tallant en encepats, per a avaluar la seua capacitat per a predir la resistència i manera de fallada en condicions de càrrega tant centrada com excèntrica i amb diferents configuracions d'armat. Aquest estudi culmina amb l'aplicació a encepats de la Teoria de la Fissura Crítica, en la qual es basa la formulació de punxonament del Codi Model 2010, que ja ha sigut estesa amb èxit al cas de sabates.

Índice general

| | |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| Agradecimientos | 1 |
| Abstract..... | 3 |
| Resumen | 5 |
| Resum..... | 7 |
| Índice general..... | 9 |
| Índice de tablas | 11 |
| Índice de figuras | 15 |
| Notación | 21 |
| Capítulo 1. Introducción..... | 27 |
| 1.1. Antecedentes y motivación del estudio | 28 |
| 1.2. Objetivos | 32 |
| 1.3. Contenido del documento | 33 |
| Capítulo 2. Estado actual del conocimiento | 35 |
| 2.1. Ensayos experimentales de encepados con más de dos pilotes..... | 36 |
| 2.2. Modelos de bielas y tirantes para encepados con más de dos pilotes..... | 44 |
| 2.3. Análisis del tratamiento normativo de diseño de encepados rígidos..... | 50 |
| Capítulo 3. Programa experimental | 61 |
| 3.1. Diseño de especímenes | 62 |
| 3.2. Propiedades de los materiales | 77 |
| 3.3. Fabricación de las piezas..... | 80 |
| 3.4. Descripción de los ensayos..... | 85 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.5. Instrumentación | 93 |
| Capítulo 4. Resultados experimentales | 97 |
| 4.1. Fichas de ensayo | 98 |
| 4.2. Resumen de resultados experimentales | 100 |
| 4.3. Descripción detallada de resultados experimentales | 102 |
| Capítulo 5. Análisis de resultados mediante modelos de bielas y tirantes..... | 119 |
| 5.1. Propuesta de modelos de bielas y tirantes para el diseño de encepados.... | 120 |
| 5.2. Verificación de encepados mediante combinación de MBTs directos y de descarga distribuida a las bandas | 137 |
| 5.3. Validación del modelo con los resultados experimentales..... | 141 |
| Capítulo 6. Verificación de los métodos seccionales normativos | 153 |
| 6.1. Determinación de la carga y modo de rotura previstos por los métodos seccionales..... | 154 |
| 6.2. Análisis del punzonamiento de encepados según el Código Modelo 2010187 | |
| 6.3. Análisis de los resultados | 205 |
| Chapter 7. Summary, conclusions and future work | 215 |
| 7.1. Summary | 216 |
| 7.2. Conclusions | 217 |
| 7.3. Future work | 222 |
| Referencias bibliográficas | 225 |
| Anejo A. Ensayos de control del hormigón | 231 |
| Anejo B. Ensayos de caracterización de las barras de acero corrugado..... | 239 |
| Anejo C. Protocolo de ensayo | 243 |
| Anejo D. Fichas de ensayo | 247 |
| Anejo E. Sistema de carga con actuadores sincronizados | 489 |

Índice de tablas

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 2.1 Ensayos experimentales existentes en encepados de tres y cuatro pilotes ... | 43 |
| Tabla 2.2 Parámetros que definen el diagrama rectangular de distribución de tensiones | 53 |
| Tabla 2.3 Principales parámetros de las formulaciones de cortante y punzonamiento del EC-2 | 57 |
| Tabla 2.4 Principales parámetros de las formulaciones de cortante y punzonamiento del ACI 318-14, para elementos sin armadura de cortante..... | 59 |
| Tabla 2.5 Principales parámetros de las formulaciones de cortante y punzonamiento del ACI 318-14, para elementos con armadura de cortante | 60 |
| | |
| Tabla 3.1 Parámetros seleccionados para la campaña experimental y sus niveles de estudio | 62 |
| Tabla 3.2 Distribuciones de armado recomendadas para encepados | 65 |
| Tabla 3.3 Combinaciones de los parámetros seleccionados que definen las series | 69 |
| Tabla 3.4 Principales parámetros y detalle de armado de la serie 1..... | 73 |
| Tabla 3.5 Principales parámetros y detalle de armado de la serie 2..... | 74 |
| Tabla 3.6 Principales parámetros y detalle de armado de la serie 3..... | 75 |
| Tabla 3.7 Principales parámetros y detalle de armado de la serie 4..... | 76 |
| Tabla 3.8 Propiedades mecánicas del hormigón de los especímenes..... | 79 |
| Tabla 3.9 Propiedades mecánicas del acero en armaduras pasivas..... | 80 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabla 4.1 Principales resultados experimentales de la serie 1 | 100 |
| Tabla 4.2 Principales resultados experimentales de las series 2, 3 y 4 | 101 |
| Tabla 4.3 Carga máxima aplicada en el actuador y reacciones de pilotes. Serie 1..... | 103 |
| Tabla 4.4 Carga máxima total y en el actuador que primero falla. Series 2, 3 y 4..... | 104 |
| | |
| Tabla 5.1 Principales parámetros de la serie experimental de Miguel et al. [37] (tres pilotes)..... | 141 |
| Tabla 5.2 Principales parámetros de la serie experimental de Clarke [2] (cuatro pilotes) | 142 |
| Tabla 5.3 Comparación de la carga máxima experimental frente a la resistencia predicha por el modelo MBT propuesto. Encepados de cuatro pilotes ensayados por Clarke [2] | 144 |
| Tabla 5.4 Comparación de la carga máxima experimental frente a la resistencia predicha por el modelo MBT propuesto. Encepados de cuatro pilotes de la campaña experimental propia | 145 |
| Tabla 5.5 Comparación de la carga máxima experimental frente a la resistencia predicha por el modelo MBT propuesto. Encepados de tres pilotes | 146 |
| | |
| Tabla 6.1 Resistencia a flexión de los encepados de tres pilotes - EC-2..... | 157 |
| Tabla 6.2 Resistencia a flexión de los encepados de cuatro pilotes - EC-2..... | 158 |
| Tabla 6.5 Resistencia a cortante en secciones (2, 2*) de los encepados de tres pilotes - EC2..... | 161 |
| Tabla 6.3 Resistencia a cortante en secciones (1, 1*) de los encepados de cuatro pilotes - EC-2..... | 162 |
| Tabla 6.4 Resistencia a cortante en secciones (2,2*) de los encepados de cuatro pilotes - EC-2..... | 163 |
| Tabla 6.7 Resistencia a punzonamiento en sec. (3, 3*) de los encepados de tres pilotes - EC-2..... | 165 |
| Tabla 6.6 Resistencia a punzonamiento en sec. (3, 3*) de los encepados de cuatro pilotes - EC-2..... | 166 |
| Tabla 6.8 Resistencia a punzonamiento en sec. (4,4*) de los encepados de cuatro pilotes - EC-2..... | 167 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabla 6.9 Resistencia a punzonamiento en sec. (4,4*) de los encepados de tres pilotes - EC-2..... | 168 |
| Tabla 6.10 Comparación de la carga máxima experimental frente a la resistencia predicha por los métodos seccionales del EC-2, en los encepados de cuatro pilotes | 169 |
| Tabla 6.11 Comparación de la carga máxima experimental frente a la resistencia predicha por los métodos seccionales del EC-2, en los encepados de tres pilotes | 170 |
| Tabla 6.12 Comparación de la carga máxima experimental frente a la resistencia predicha por los métodos seccionales del EC-2 considerando el coeficiente de mejora del hormigón (Ω) actuando sobre el ancho eficaz (w_{eff}), en los encepados de cuatro pilotes..... | 171 |
| Tabla 6.13 Comparación de la carga máxima experimental frente a la resistencia predicha por los métodos seccionales del EC-2 considerando el coeficiente de mejora del hormigón (Ω) actuando sobre el ancho eficaz (w_{eff}), en los encepados de tres pilotes..... | 172 |
| Tabla 6.14 Resistencia a flexión de los encepados de tres pilotes – ACI 318-14..... | 175 |
| Tabla 6.15 Resistencia a flexión de los encepados de cuatro pilotes – ACI 318-14... | 176 |
| Tabla 6.16 Resistencia a cortante de las sec. (1,1*) de los encepados de cuatro pilotes - ACI 318-14..... | 178 |
| Tabla 6.17 Resistencia a cortante de las sec. (1, 1*) de los encepados de tres pilotes - ACI 318-14..... | 179 |
| Tabla 6.18 Resistencia a punzonamiento de la sec. (3) de los encepados de tres pilotes - ACI 318-14 | 180 |
| Tabla 6.19 Resistencia a punzonamiento de la sec. (3) de los encepados de cuatro pilotes - ACI 318-14..... | 181 |
| Tabla 6.20 Resistencia a punzonamiento de la sec. (4) de los encepados de cuatro pilotes - ACI 318-14..... | 182 |
| Tabla 6.21 Resistencia a punzonamiento de la sec. (4) de los encepados de tres pilotes - ACI 318-14 | 183 |
| Tabla 6.22 Comparación de la carga máxima experimental frente a la resistencia predicha por los métodos seccionales del ACI 318-14, en los encepados de cuatro pilotes | 184 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabla 6.23 Comparación de la carga máxima experimental frente a la resistencia predicha por los métodos seccionales del ACI 318-14, en los encepados de cuatro pilotes..... | 185 |
| Tabla 6.24 Comparación de la carga máxima experimental frente a la resistencia predicha por la formulación de punzonamiento del CM-2010, en los encepados de cuatro pilotes..... | 203 |
| Tabla 6.25 Comparación de la carga máxima experimental frente a la resistencia predicha por la formulación de punzonamiento del CM-2010, en los encepados de tres pilotes | 204 |
| | |
| Tabla A.1 Serie H1 -Resultados de los ensayos de compresión y tracción indirecta . | 234 |
| Tabla A.2 Serie H2 -Resultados de los ensayos de compresión y tracción indirecta . | 234 |
| Tabla A.3 Serie H3 -Resultados de los ensayos de compresión y tracción indirecta . | 235 |
| Tabla A.4 Serie H4 -Resultados de los ensayos de compresión y tracción indirecta . | 235 |
| Tabla A.5 Serie H5 -Resultados de los ensayos de compresión y tracción indirecta . | 236 |
| Tabla A.6 Serie H6 -Resultados de los ensayos de compresión y tracción indirecta . | 236 |
| Tabla A.7 Serie H7 -Resultados de los ensayos de compresión y tracción indirecta . | 237 |
| Tabla A.8 Serie H8 -Resultados de los ensayos de compresión y tracción indirecta . | 237 |
| Tabla A.9 Serie H9 -Resultados de los ensayos de compresión y tracción indirecta . | 238 |
| Tabla A.10 Serie H10 -Resultados de los ensayos de compresión y tracción indirecta | 238 |
| | |
| Tabla B.1 Resultados del ensayo de tracción de las barras corrugadas | 241 |
| Tabla B.2 Resultados del ensayo de tracción de las barras corrugadas | 242 |
| Tabla B.3 Resultados del ensayo de tracción de las barras corrugadas | 242 |
| | |
| Tabla E.1 Parámetros de proporcionalidad de la carga de los actuadores..... | 493 |

Índice de figuras

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1.1 Boceto del puente de Los Santos sobre la Ría de Ribadeo..... | 29 |
| Figura 1.2 a) Modelo de bielas y tirantes propuesto por la EHE-08; b) Disposición de armado completa para un encepado de cuatro pilotes según las recomendaciones de la EHE-08 | 30 |
| Figura 2.1 “Modelo de bielas” propuesto por Blévoet y Frémy para encepados de cuatro pilotes | 37 |
| Figura 2.2 Rotura por punzonamiento observado por Clarke..... | 38 |
| Figura 2.3 Modo de rotura por punzonamiento en encepados observado por Adebar | 39 |
| Figura 2.4 Propuesta de encepado semi-prefabricado de Chan y Poh | 41 |
| Figura 2.5 a) Configuraciones de armado ensayadas por Miguel et al. | 41 |
| Figura 2.6 Distribución del número de ensayos en función de la ratio vuelo-canto | 42 |
| Figura 2.7 Modelos de bielas y tirantes equivalentes para un encepado de tres pilotes solicitado por carga centrada | 46 |
| Figura 2.8 a) Biela en botella tridimensional; b) Fuerzas de tracción debidas a la difusión de las compresiones..... | 49 |
| Figura 2.9 Resistencia a flexión de encepados según los métodos seccionales | 53 |
| Figura 2.10 Superficies de control asociadas a los distintos modos de fallo de cortante o punzonamiento según EC-2..... | 55 |
| Figura 2.11 Superficies de control asociadas a los distintos modos de fallo de cortante o punzonamiento según ACI 318-14 | 58 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 3.1 Geometría y dimensiones de los encepados de tres y cuatro pilotes..... | 64 |
| Figura 3.2 Fisura horizontal de suspensión debida al empuje vertical en la banda..... | 66 |
| Figura 3.3 Configuraciones de armado estudiadas para encepados de tres y cuatro pilotes..... | 66 |
| Figura 3.4 MBT-1 de descarga directa..... | 70 |
| Figura 3.5 MBT-2 descarga distribuida a las bandas..... | 70 |
| Figura 3.6 Definición de los materiales que componen los especímenes de ensayo.... | 77 |
| Figura 3.7 Probetas de acompañamiento de los especímenes de la serie 4P-N..... | 78 |
| Figura 3.8 Ferralla instrumentada preparada para introducir en los encofrados..... | 81 |
| Figura 3.9 Detalles de la instrumentación del armado..... | 81 |
| Figura 3.10 Plano e imagen real del encofrado para encepados de tres pilotes..... | 82 |
| Figura 3.11 Plano e imagen real del encofrado para encepados de cuatro pilotes..... | 82 |
| Figura 3.12 Perfiles tubulares que sujetan la placa de carga embebida a la que se atornilla el pilar metálico..... | 83 |
| Figura 3.13 Vertido del hormigón en los encofrados..... | 84 |
| Figura 3.14 Encepados de cuatro pilotes recién hormigonados junto con las 18 probetas de control y piezas acopiadas..... | 84 |
| Figura 3.15 Sistema de apoyo de pilotes: a) Rótula semiesférica; b) Bandeja de rodamientos..... | 85 |
| Figura 3.16 Vista general del ensayo de encepados de tres pilotes..... | 86 |
| Figura 3.17 Plano de la configuración del ensayo para encepados de tres pilotes..... | 87 |
| Figura 3.18 Plano de la configuración del ensayo para encepados de cuatro pilotes... | 89 |
| Figura 3.19 Vista general del ensayo de encepados de cuatro pilotes..... | 90 |
| Figura 3.20 Colocación del encepado de cuatro pilotes..... | 92 |
| Figura 3.21 Imagen general de la instrumentación durante el ensayo..... | 93 |
| Figura 3.22 Disposición de transductores de desplazamiento en el encepado 4P-N-A3..... | 94 |
| Figura 3.23 Nomenclatura de galgas..... | 95 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 4.1 Vista en miniatura de las dos primeras hojas de la ficha de ensayo correspondiente al ensayo 4P-N-A2..... | 98 |
| Figura 4.2 Vista en miniatura de dos hojas de resultados de la ficha de ensayo correspondiente al ensayo 4P-N-A2..... | 99 |
| Figura 4.3 Comparación de la medida de deformación de las galgas y de los captadores de desplazamiento para la carga de inicio de la plastificación en las bandas | 105 |
| Figura 4.4 Relación entre la carga máxima y de plastificación del armado principal para cada espécimen, frente a la relación vuelo-canto | 107 |
| Figura 4.5 Relación entre la carga máxima y de plastificación del armado secundario vertical para cada espécimen, frente a la relación vuelo-canto..... | 107 |
| Figura 4.6 Configuración del ensayo y puntos de medida del desplazamiento para la determinación de las curvas carga-deformación..... | 108 |
| Figura 4.7 Curvas carga desplazamiento con indicación de los puntos de inicio de la plastificación de la armadura principal ($R_{y,B}$) y los cercos ($R_{y,V}$) | 110 |
| Figura 4.8 Trazado de líneas de fisura sobre las imágenes de la cara 3 del espécimen 4P-N-C1 | 111 |
| Figura 4.9 Patrón de fisuración en encepados solicitados por carga centrada, con distintas configuraciones de armado y relación vuelo canto | 113 |
| Figura 4.10 Patrón de fisuración en encepados solicitados por carga excéntrica | 114 |
| Figura 4.11 Comparación de número y aberturas de fisura en encepados tipo A y C tras la rotura..... | 115 |
| Figura 4.12 Influencia de la armadura secundaria | 115 |
| Figura 4.13 Clasificación de los modos de fallo según la ductilidad y secuencia de plastificación de las armaduras | 116 |
| Figura 4.14 Superficie de punzonamiento observada tras la rotura | 117 |
| Figura 5.1 Encepado solicitado por una carga excéntrica ($P \cdot e_u$) | 122 |
| Figura 5.2 MBT-1 de descarga directa para encepados de cuatro pilotes bajo flexión compuesta..... | 123 |
| Figura 5.3 a) Distribución de la compresión C_2 hacia las bandas mediante cuatro campos de tensiones de forma triangular; b) MBT-2 para encepados solicitados por carga excéntrica..... | 127 |
| Figura 5.4 Curvas que representan las ecuaciones límite de cada modo de fallo..... | 130 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 5.5 Descripción de las principales variables del MBT propuesto por Meléndez, C. [17]..... | 132 |
| Figura 5.6 Detalle de la geometría del estrechamiento de la biela en la zona superior, para encepados de tres pilotes..... | 135 |
| Figura 5.7 Detalle de la geometría del estrechamiento de la biela en la zona superior, para encepados de cuatro pilotes solicitados por carga excéntrica | 135 |
| Figura 5.8 Proceso de cálculo de la carga total resistida considerando la contribución de las armaduras secundarias horizontales y verticales | 138 |
| Figura 5.9 Especímenes con armadura vertical entre pilotes pertenecientes a la campaña experimental de Clarke [2], Miguel M.G [64] y la presente investigación..... | 143 |
| Figura 5.10 Comparación de la carga máxima experimental ($V_{u,e}$) con la resistencia estimada por la propuesta de MBT | 147 |
| Figura 5.11 Influencia de la armadura secundaria vertical entre especímenes análogos de las campañas experimentales de Clarke [2], Miguel et al. [37] y los ensayos propios de esta investigación..... | 148 |
| Figura 5.12 Comparación de la intersección entre las curvas de rotura en encepados con y sin armadura secundaria vertical | 150 |
| Figura 5.13 Influencia de la excentricidad comparada entre especímenes análogos de los ensayos propios de esta investigación..... | 151 |
| Figura 6.1 Descripción gráfica de las principales variables que definen el equilibrio de flectores y torsores en la sección de comprobación..... | 155 |
| Figura 6.2 Secciones de control para la determinación de la resistencia a flexión - EC-2 | 157 |
| Figura 6.3 Secciones de control para la determinación de la resistencia a cortante - EC-2..... | 159 |
| Figura 6.4 Secciones de control para la determinación de la resistencia a punzonamiento - EC-2..... | 164 |
| Figura 6.5 Comparación de la carga máxima experimental ($V_{u,e}$) con la mínima resistencia estimada por los métodos seccionales del EC-2..... | 173 |
| Figura 6.6 Comparación de la carga máxima experimental ($V_{u,e}$) con la resistencia predicha por los métodos de flexión y punzonamiento del EC-2 considerando el coeficiente de mejora del hormigón actuando sobre el ancho eficaz..... | 174 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 6.7 Secciones de control para la determinación de la resistencia a flexión – ACI 318-14..... | 175 |
| Figura 6.8 Secciones de control para la determinación de la resistencia a cortante – ACI 318-14..... | 177 |
| Figura 6.9 Sec. de control para la determinación de la resistencia a punzonamiento - ACI 318-14..... | 180 |
| Figura 6.10 Comparación de la carga máxima experimental ($V_{u,e}$) con la mínima resistencia estimada por los métodos seccionales del ACI 318-14..... | 185 |
| Figura 6.11 Comparación de la carga máxima experimental ($V_{u,e}$) con la resistencia predicha por los métodos de flexión y punzonamiento del ACI 318-14 .. | 186 |
| Figura 6.12 Punzonamiento de encepados según la CSCT | 188 |
| Figura 6.13 Análisis del campo de cortantes para la determinación de $v_{perp,d,max}$ | 190 |
| Figura 6.14 Resultados del análisis elástico mediante elementos finitos para los encepados de la serie 4P-NMM. | 193 |
| Figura 6.15 Resultados del análisis elástico mediante elementos finitos para los encepados de la serie 3P-N..... | 194 |
| Figura 6.16 a) Campo de tensiones en una zapata sometida a carga centrada, despreciando la resistencia a tracción del hormigón; b) Equilibrio de fuerzas planteado para tener en cuenta la interacción flexión-cortante en zapatas | 195 |
| Figura 6.17 Curvas carga-rotación e intersección con el criterio de rotura (en valores medios), para encepados de tres pilotes solicitados por carga centrada | 196 |
| Figura 6.18 Curvas carga-rotación e intersección con el criterio de rotura (en valores medios), para encepados de cuatro pilotes solicitados por carga centrada | 196 |
| Figura 6.19 Curvas carga-rotación e intersección con el criterio de rotura (en valores medios), para encepados de cuatro pilotes solicitados por carga excéntrica | 197 |
| Figura 6.20 Comparación de las curvas carga-rotación, de encepados de tres pilotes bajo carga centrada, al añadir sin armado de punzonamiento..... | 199 |
| Figura 6.21 Comparación de las curvas carga-rotación, de encepados de cuatro pilotes bajo carga centrada, al añadir sin armado de punzonamiento..... | 200 |
| Figura 6.22 Comparación de las curvas carga-rotación, de encepados de cuatro pilotes solicitados por carga excéntrica, al añadir armado de punzonamiento..... | 201 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 6.23 Comparación de la carga máxima experimental ($V_{u,e}$) con la resistencia predicha por la formulación de punzonamiento del CM-2010: a) LoA-II; b) LoA-III | 202 |
| Figura 6.24 Comparación de la carga máxima experimental ($V_{u,e}$) con la resistencia predicha por los métodos de flexión y punzonamiento del EC-2 considerando el coeficiente de mejora del hormigón..... | 206 |
| Figura 6.25 Comparación de la carga máxima experimental ($V_{u,e}$) con la resistencia predicha por los métodos de flexión y punzonamiento del ACI 318-14.. | 207 |
| Figura 6.26 Comparación de la carga máxima experimental ($V_{u,e}$) con la resistencia predicha por la formulación de punzonamiento del CM-2010..... | 208 |
| Figura A.1 Ensayo de compresión simple del hormigón: a) Vista general del ensayo; b) Probeta tras la rotura | 232 |
| Figura A.2 Detalles del ensayo de una probeta por tracción indirecta..... | 233 |
| Figura B.1 Ensayo de tracción de las barras de acero corrugado: a) Vista general del ensayo;..... | 240 |
| Figura B.2 Proceso de determinación del límite elástico | 241 |
| Figura E.1 Sistemas de carga empleados por Clarke (izq) y Suzuki (der) | 490 |
| Figura E.2 Esquema del proceso de control PID de los actuadores..... | 491 |
| Figura E.3 Proceso de sincronización de los actuadores..... | 492 |
| Figura E.4 Gráficas carga-tiempo para los ensayos 4P-N-C2, 4P-NMM-C2 y 4P-NM-C2..... | 493 |

Notación

Mayúsculas latinas

| | |
|------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $A_{cs,1}$ | área crítica de la sección de biela en la comprobación de aplastamiento |
| $A_{cs,2}$ | área crítica de la zona nodal inferior en la comprobación de splitting |
| A_s | área de armadura total a considerar en cada tirante del MBT |
| A_{sB} | área de armadura concentrada sobre las bandas |
| A_{sH} | área de armadura secundaria horizontal (por dirección) |
| A_{sV} | área de armadura secundaria vertical |
| A_{sw} | área de armadura de cortante o punzonamiento |
| C | fuerza de compresión |
| E_c | módulo de deformación longitudinal del hormigón |
| E_s | módulo de deformación longitudinal del acero |
| J_c | propiedad del perímetro crítico análoga al momento polar de inercia |
| L | longitud del lado del encepado |
| M_{Rd} | resistencia a flexión de la sección analizada |
| M_x, m_x | flector de eje-y, el cual genera tracciones en dirección x (mayúscula total; minúscula por unidad de longitud) |
| M_{xy}, m_{xy} | momento torsor (mayúscula total; minúscula por unidad de longitud) |
| M_y, m_y | flector de eje-x, el cual genera tracciones en dirección y (mayúscula total; minúscula por unidad de longitud) |
| N_{ij} | tracción en el tirante secundario horizontal asociado al pilote i en la dirección j (MBT-2) |
| P | carga vertical aplicada en el pilar |
| Q_{ij} | tracción en el tirante secundario vertical asociado al pilote i en la dirección j (MBT-2) |
| R_i | reacción en el pilote i |
| $R_{i,W}$ | reacción en el pilote i, incluyendo la parte proporcional de peso propio del encepado |
| R_u | reacción máxima del pilote que primero falla |
| T | fuerza de tracción |

| | |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $T_{ij,2}$ | tracción en el tirante principal que parte del pilote i en la dirección j |
| V_{Ed} | valor de cálculo del esfuerzo cortante en la sección analizada que proviene de la carga externa |
| V_{flex} | carga en el pilar que lleva al agotamiento por flexión de la sección analizada |
| $V_{Rd,c}$ | resistencia a cortante o punzonamiento de la sección analizada |
| $V_{Rd,cs}$ | resistencia a cortante o punzonamiento de la sección, incluyendo la contribución del armado de cortante |
| $V_{Rd,s}$ | contribución resistente de la armadura de cortante o punzonamiento |
| $V_{u,e}$ | carga máxima experimental, igual a ΣR_{max} |
| W_1 | propiedad del perímetro crítico análoga al módulo plástico |

Minúsculas latinas

| | |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| a_v | vano libre de cortante |
| b | ancho de la sección |
| b_0 | perímetro de control de cortante |
| b_1 | perímetro de control básico |
| c | diámetro o lado del pilar |
| d | canto útil |
| d_g | tamaño máximo del árido |
| e | distancia entre ejes de pilotes. En los capítulos 5 y 6 se sustituye por l_x , l_y ya que se ha considerado la posibilidad de que el encepado sea de planta rectangular |
| e_c | distancia del eje del pilar a la resultante del bloque de compresiones |
| e_T | distancia del eje del pilar al centro de gravedad de las armaduras |
| e_u | excentricidad total de la carga aplicada en el pilar |
| e_x , e_y | excentricidad de la carga aplicada en el pilar, medida en dirección x o y |
| f_b | tensión de adherencia de la armadura |
| f_c | resistencia del hormigón a compresión |

| | |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| f_{ce} | resistencia efectiva del hormigón |
| f_{ck} | resistencia característica a compresión del hormigón |
| f_{cp} | resistencia plástica del hormigón |
| f_{ct} | resistencia del hormigón a tracción |
| f_{max} | resistencia máxima a tracción del acero |
| f_y | límite elástico del acero |
| f_{yd} | valor de cálculo del límite elástico del acero |
| f_{ywd} | valor de cálculo de la resistencia de la armadura de cortante |
| $f_{ywd,ef}$ | valor de cálculo de la resistencia eficaz de la armadura de punzonamiento |
| h | canto total |
| k_{cc} | factor de mejora de la resistencia por compresión triaxial del hormigón |
| l_x, l_y | distancia entre ejes de pilotes en las direcciones x e y |
| m_R | valor medio de la resistencia a flexión de la sección |
| m_s | valor medio del momento flector solicitante |
| n | número de pilotes |
| r_{geo} | recubrimiento geométrico de las armaduras |
| r_s | distancia entre el eje del pilar y el punto de momento flector nulo |
| u_0 | perímetro del pilar o pilote |
| u_1 | perímetro crítico de punzonamiento |
| u_{cx}, u_{cy} | posición del punto de apoyo de la biela del MBT-2 |
| u_z | desplazamiento vertical, medido en el punto de aplicación de la carga |
| $u_{z,Ru}$ | desplazamiento vertical, medido en el punto de aplicación de la carga, en el instante en que se alcanza la reacción máxima |
| $u_{z,\Sigma R}$ | desplazamiento vertical, medido en el punto de aplicación de la carga, en el instante en que se alcanza la carga total máxima |
| w | distancia del eje del pilote al borde del pilar |
| w_{eff} | ancho eficaz del factor de mejora de la resistencia de cortante (Ω) |
| z | brazo mecánico |

Mayúsculas griegas

| | |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\Delta T_{ij,2}$ | incremento de tracción en el tirante principal que parte del pilote i en la dirección j (MBT-2) |
| ΣR_{max} | carga máxima aplicada, obtenida como suma de las reacciones en los pilotes |
| $\Sigma R_{max,w}$ | carga máxima, incluyendo el peso propio del encepado |
| ΣR_y | carga vertical para la que se detecta el inicio de la plastificación de cada grupo de armado |
| Ω | factor de mejora de la resistencia a cortante del hormigón |

Minúsculas griegas

| | |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| α_T | ángulo entre la proyección horizontal de la biela y el tirante |
| β | coeficiente de excentricidad |
| γ_c | coeficiente parcial de seguridad del hormigón |
| γ_s | coeficiente parcial de seguridad del acero |
| γ_v | factor que determina la fracción de momento flector que se transfiere a la losa por la excentricidad de cortante en las conexiones viga-columna |
| ε_s | deformación media por compresión de la biela directa |
| ε_{tj} | deformación de tracción en la armadura en la dirección j |
| ε_z | deformación de compresión en dirección vertical |
| η | coeficiente que define la resistencia efectiva del bloque de compresiones |
| θ_b | ángulo de inclinación de la biela respecto al plano horizontal |
| λ_1 | coeficiente que define la altura de la zona comprimida a lo largo de la sección crítica considerada |
| $V_{perp,d,max}$ | máximo esfuerzo cortante por unidad de longitud perpendicular al perímetro de control básico |
| $V_{Rd,c}$ | valor de cálculo de la resistencia a punzonamiento de una losa sin armadura de punzonamiento |
| $V_{Rd,cs}$ | valor de cálculo de la resistencia a punzonamiento de una losa con armadura de punzonamiento |

| | |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $V_{Rd,max}$ | valor de cálculo de la resistencia a punzonamiento máxima a lo largo de la sección crítica considerada |
| ξ | factor que determina la concentración de compresiones en el pilar |
| ρ | cuantía de armadura adherente de tracción |
| σ_{swd} | tensión que se activa en la armadura de punzonamiento |
| φ | diámetro de las barras de armado pasivo |
| ϕ | diámetro del pilote |
| χ | factor de ajuste de las fórmulas dadas por los MBT para determinar la tracción en los tirantes. Multiplicado por el canto útil resulta equivalente a la posición del nudo superior del modelo |
| ψ | rotación de la losa |

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes y motivación del estudio

Los encepados sobre pilotes son empleados de forma habitual como cimentación tanto en los edificios como en las pilas de los puentes, y constituyen un elemento esencial en la seguridad y buen comportamiento del conjunto de la estructura, además de tener un peso importante en su coste.

Estos elementos estructurales deben transmitir las solicitaciones del pilar a los pilotes embebidos en el terreno. En el caso más habitual de los encepados rígidos, aquellos en los que la distancia desde el borde de la pila al eje del pilote (w) es menor que dos veces el canto (h) (Figura 1.1), se generan campos tensionales complejos, por lo que se consideran regiones D en su totalidad.

Los trabajos de Blévot y Frémy [1], Clarke [2], Sabnis y Gogate [3] y Adebar et al. [4] sentaron las bases para el diseño de encepados mediante el método de bielas y tirantes (en adelante MBT). Tal y como señala el *fib* Bulletin 45 (2008) [5], el MBT proporciona una herramienta de diseño más consistente y racional que los métodos empíricos desarrollados tradicionalmente para las regiones D. Como consecuencia de ello, numerosas normas para proyecto de estructuras de hormigón, tales como ACI 318-14 [6], CSA A23-3-14 [7], NBR 6118:2014 [8], Eurocódigo 2 EN 1992-1-1 [9], Código Modelo 2010 [10] y la española EHE-08 [11] entre otras normas nacionales europeas, han ido incorporando este método para el diseño de los elementos estructurales que constituyen regiones D. La aplicación de este método a regiones D bidimensionales está bastante extendida y existen numerosos ejemplos que pueden consultarse en la literatura especializada. Sin embargo, la aplicación a regiones D cuyo comportamiento en rotura es marcadamente tridimensional no es sencilla. Ejemplos recientes de la utilización de modelos tridimensionales de bielas y tirantes (MBT-3D) pueden encontrarse en el *fib* Bulletin 61 [12] o en la publicación especial de ACI SP-273 [13].

Las solicitaciones que transmite un pilar a la cimentación profunda a través del encepado incluyen generalmente combinaciones de esfuerzos axil, flector y cortante. A pesar de tratarse del estado de carga más común, no se han encontrado en la literatura técnica ensayos de encepados de más de dos pilotes con carga vertical no centrada o que simulen la actuación de un soporte en flexión compuesta.

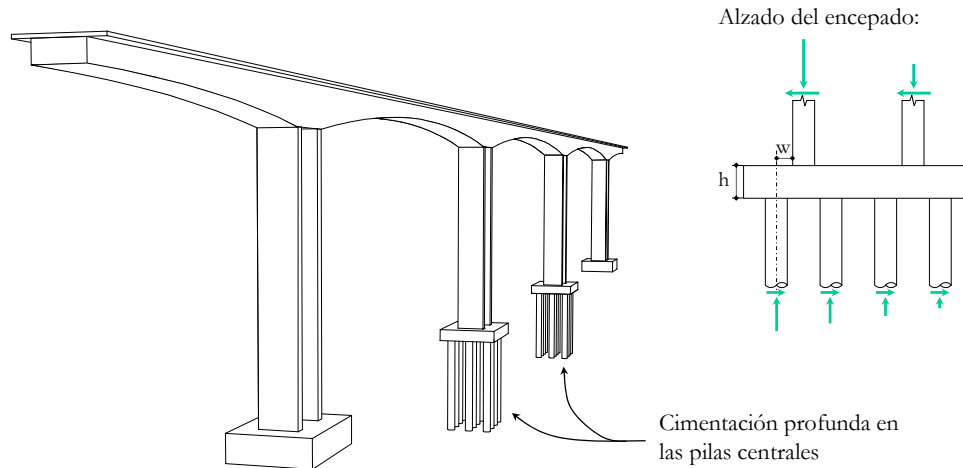


Figura 1.1 Boceto del puente de Los Santos sobre la Ría de Ribadeo

En los ensayos experimentales de encepados sobre pilotes publicados hasta la fecha se describen tanto roturas dúctiles como fallos frágiles. Estos últimos son identificados como fallos por cortante o punzonamiento cuando se consideran los encepados como elementos placa de gran espesor, o identificados como fallos por *splitting* de las bielas comprimidas, desde un enfoque basado en un mecanismo resistente de bielas y tirantes. A partir de estos ensayos, se han desarrollado modelos de bielas y tirantes útiles para el diseño de encepados, pero que requieren comprobaciones tensionales para el hormigón en zonas nodales de difícil geometría. Este problema ha sido abordado por diversos autores como Adebar y Zhou [14] y más recientemente Guo [15] proponiendo limitaciones de forma indirecta de las tensiones máximas en las áreas de apoyo: secciones de pilar y pilotes. Sin embargo, estas propuestas solamente han podido ser contrastadas con ensayos experimentales limitados a carga centrada en el pilar. Estos modelos permiten el diseño seguro de encepados, pero están lejos de predecir de forma ajustada la carga de rotura y, en muchos casos, el modo de rotura.

Ante la falta de verificación experimental con carga no centrada y la inexactitud de los modelos de bielas y tirantes para predecir tanto la carga de rotura como el modo de rotura de los encepados, la práctica habitual no abandona las comprobaciones de los posibles fallos siguiendo formulaciones específicamente desarrolladas para losas. De hecho, algunas de las normativas internacionales de diseño de estructuras de hormigón (ACI 318-14 [6], CSA A23-3-14 [7], Eu-

rocódigo 2 EN 1992-1-1 [9]) dejan a elección del proyectista el diseño de los encepados según MBT o formulaciones de flexión y cortante o punzonamiento. En cualquier caso, resulta necesario contrastar la adecuación del empleo de estos procedimientos para los encepados mediante ensayos experimentales con cargas no centradas.

Existe además cierta falta de consenso entre las normas internacionales que incluyen recomendaciones sobre la disposición de armado en encepados (Eurocódigo 2 EN 1992-1-1, EHE-08 [11], BS 5400-4:1990 [16] y NBR 6118:2014 [8]). Éstas difieren en la proporción entre el armado concentrado en bandas y el distribuido en la base y tampoco coinciden en la necesidad de disponer un armado vertical en cercos atando las bandas. En concreto, la EHE-08 recomienda disponer armadura secundaria horizontal y vertical para controlar la fisuración en la cara inferior del encepado o un posible *splitting* de las bielas respectivamente (Figura 1.2b).

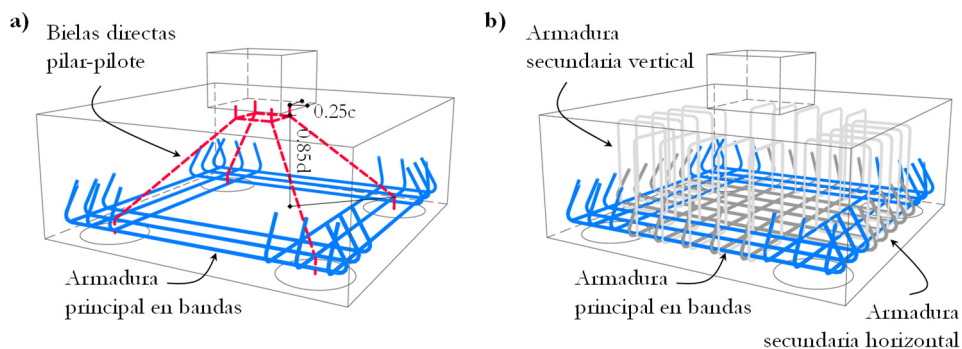


Figura 1.2 a) Modelo de bielas y tirantes propuesto por la EHE-08; b) Disposición de armado completa para un encepado de cuatro pilotes según las recomendaciones de la EHE-08

La contribución de la armadura vertical a la resistencia última del encepado puede ser considerada como la que corresponde a una armadura de punzonamiento en el caso de que la rotura se produjera de este modo, pero su efectividad no ha sido verificada experimentalmente. Sin embargo, la contribución de esta armadura no puede explicarse mediante los modelos de bielas y tirantes habitualmente utilizados para su diseño (Figura 1.2a). Sería necesario plantear modelos de bielas y tirantes más complejos.

La contribución de la armadura secundaria horizontal distribuida en la base del encepado a su resistencia ha sido descrita en numerosos ensayos experimenta-

les. Sin embargo, no existe una teoría universalmente aceptada que explique esta contribución. En el caso de rotura por punzonamiento, la contribución de esta armadura estaría asociada al efecto de reducción de la abertura de la fisura crítica, pero este efecto tampoco ha sido verificado experimentalmente en los encepados. Sin embargo, la contribución de esta armadura no puede explicarse mediante los modelos de bielas y tirantes habitualmente utilizados para su diseño (Figura 1.2a). Sería necesario plantear modelos de bielas y tirantes más complejos.

El proyecto de investigación “Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: encepados y cálices” (ref. BIA2012-32300) en el que se enmarca esta tesis, profundiza en el análisis experimental y numérico de los encepados y cálices como regiones D tridimensionales.

El análisis experimental sobre encepados realizado en este proyecto de investigación constituye el trabajo desarrollado en esta tesis doctoral. Este trabajo se ha desarrollado en los laboratorios del Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH) de la Universitat Politècnica de València y ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad.

En relación con el análisis numérico, recientemente ha sido presentada la tesis doctoral de Carlos Meléndez [17] en la que se ha desarrollado una herramienta informática de cálculo no lineal basada en el método de los elementos finitos enfocada al análisis y dimensionamiento de estas regiones D tridimensionales (FESCA-3D). Dicho trabajo continúa la línea del modelo bidimensional de diseño y verificación propuesto por Miguel (Miguel et al. 2002 [18], Sola et al (2008 [19] y 2011 [20])), permitiendo que se introduzca exclusivamente como dato la configuración de armado que desea disponer en la estructura, sin tener que definir la geometría completa del modelo de bielas y tirantes, obteniendo como resultado las áreas de armadura de cada tirante en el caso del diseño y la carga de agotamiento en el caso de la verificación.

En resumen, en relación con el estudio de los encepados quedan abiertas las siguientes cuestiones:

- Toda la experimentación sobre encepados publicada hasta la fecha ha sido realizada aplicando carga centrada. Sin embargo, estos elementos están sometidos habitualmente a carga excéntrica. Resulta necesario verificar la adecuación de las formulaciones actuales cuando se aplican este tipo de cargas.

- Existe una falta de consenso sobre las recomendaciones de armado de los encepados. Algunas normas como la EHE-08 incluyen en sus prescripciones la necesidad de disponer armadura en forma de estribos de atado en las bandas.
- No se dispone de ensayos experimentales que permitan conocer la contribución de las armaduras secundarias horizontales y verticales a la resistencia de los encepados.
- A pesar de que los encepados constituyen una región D, existe una dualidad en las posibles formulaciones que permiten usar los códigos para su diseño: MBT y aproximaciones seccionales derivadas de las formulaciones de las losas.
- No se dispone de un modelo específico para encepados contrastado experimentalmente que permita explicar con claridad la contribución de las armaduras distribuidas horizontales y de las armaduras verticales a la resistencia de los encepados.

1.2. Objetivos

El objetivo principal del trabajo de investigación es desarrollar un programa experimental de ensayos que permita analizar el comportamiento hasta rotura de los encepados sobre pilotes solicitados tanto por carga centrada como excéntrica y con diferentes configuraciones de armado. Este programa experimental tiene los siguientes objetivos específicos:

- Análisis de la respuesta estructural (carga-desplazamiento, carga máxima, patrón de fisuración, modo de rotura, etc.) de los encepados según las variables objeto de estudio, como son: número de pilotes, configuración de armado, esbeltez y tipo de carga.
- Estudio del tratamiento normativo del punzonamiento y cortante en encepados, en el que se valore su capacidad para predecir la resistencia en condiciones de carga tanto centrada como excéntrica y con diferentes configuraciones de armado, captando la influencia de las variables estudiadas.
- Aplicación a encepados de la Teoría de la Fisura Crítica [21] en la que se basa la formulación de punzonamiento del Código Modelo 2010, que ya ha sido extendida con éxito al caso de zapatas.

- Propuesta de un modelo de bielas y tirantes tridimensional que permita explicar la contribución de las armaduras secundarias horizontales y verticales a la resistencia de los encepados. Evaluación crítica de la eficacia del armado secundario.

1.3. Contenido del documento

El documento se estructura en siete capítulos, el apartado de referencias bibliográficas y cuatro anejos.

El presente *Capítulo 1* expone los antecedentes y motivación de la investigación, así como los principales objetivos que se plantean.

El *Capítulo 2* recoge el estado actual del conocimiento en lo referente al diseño de encepados de más de dos pilotes. Se describen los métodos de cálculo basados en modelos de bielas y tirantes que han sido desarrollados a partir de numerosas campañas experimentales llevadas a cabo desde mediados del siglo XX. El capítulo concluye con una comparación del tratamiento normativo del diseño de encepados siguiendo las principales normativas internacionales.

El *Capítulo 3* describe la campaña experimental llevada a cabo sobre 30 encepados de tres y cuatro pilotes, considerando por primera vez la aplicación de cargas excéntricas en el pilar en 12 de ellos. En este capítulo se describen los parámetros de estudio considerados, las propiedades de los materiales empleados, la configuración del ensayo y su completa instrumentación.

A continuación, en el *Capítulo 4* se presentan y analizan los resultados de la campaña experimental. Para caracterizar la respuesta de los encepados se incluyen: las curvas carga-desplazamiento, la carga correspondiente al inicio de la plastificación y la carga máxima alcanzada. Se muestra también la evolución del patrón de fisuración con la carga aplicada y la situación final tras la rotura. Todos estos datos permiten finalmente determinar el modo de rotura.

En el *Capítulo 5* se propone un modelo de bielas y tirantes que permite tener en cuenta la contribución de las armaduras secundarias verticales y horizontales dispuestas. Los resultados de la aplicación de este modelo se comparan con los resultados experimentales obtenidos en la campaña experimental llevada a cabo en este trabajo y con otros ensayos publicados por otros autores

El *Capítulo 6* se centra en el análisis de la adecuación del empleo de los métodos seccionales incluidos en las principales normas internacionales:

Eurocódigo 2 EN 1992-1-1, ACI 318-14 y Código Modelo 2010. Las predicciones de resistencia y de forma de rotura de estos códigos se contrastan con los datos experimentales obtenidos en la campaña experimental llevada a cabo en este trabajo, es decir, bajo cargas centrada y excéntricas, y con diferentes configuraciones tanto de armado como de relaciones vuelo-canto.

Finalmente, en el *Capítulo 7* se sintetizan los puntos clave de la investigación, se presentan las conclusiones y se plantean posibles futuras líneas de investigación.

Capítulo 2

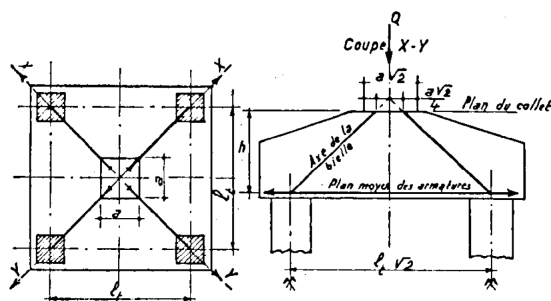
Estado actual del conocimiento

2.1. Ensayos experimentales de encepados con más de dos pilotes

Los primeros ensayos experimentales sobre encepados de tres y cuatro pilotes fueron realizados entre 1955 y 1958 por Blévoit y Frémy [1] con el objetivo de verificar experimentalmente la adecuación del “método de las bielas” (Figura 2.1) para el diseño de encepados, tal y como había comprobado Lebellet [22] para el caso de zapatas entre los años 1934-35. El método de bielas y tirantes no había sido aún formulado explícitamente para el diseño de regiones de discontinuidad en estructuras de hormigón (Schlacich et al. [23,24]) pero sí era conocida la analogía de la celosía desarrollada por Ritter y Mörsch [25,26].

La primera campaña experimental llevada a cabo por Blévoit y Frémy consistió en 94 encepados a escala 1:2 (51 de cuatro pilotes, 37 de tres pilotes y 6 de dos pilotes), con diferentes esquemas de armado y variaciones de canto. Para validar los resultados obtenidos en estos primeros ensayos a escala reducida, entre 1958 y 1961 se realizaron 22 ensayos a escala real (8 en encepados de cuatro pilotes, 8 en encepados de tres pilotes y 6 en encepados de dos pilotes).

Estos ensayos mostraron que, al disponer el armado concentrado en bandas en vez de uniformemente distribuido, se incrementa la capacidad resistente de los encepados. En cambio, para el control de la fisuración de la base del encepado sí recomiendan disponer un armado distribuido complementario. Además, se determina un ángulo óptimo de inclinación de las bielas entorno a 45°. Para ángulos menores de 35° los coeficientes de seguridad relativos a la predicción por el “método de las bielas” resultan menores y los modos de fallo observados fueron más complejos y difíciles de analizar. Para ángulos mayores de 55°, el armado dispuesto no alcanzó su límite elástico, conduciendo a roturas frágiles de los encepados.



FUENTE: Blévet y Frémy [1]

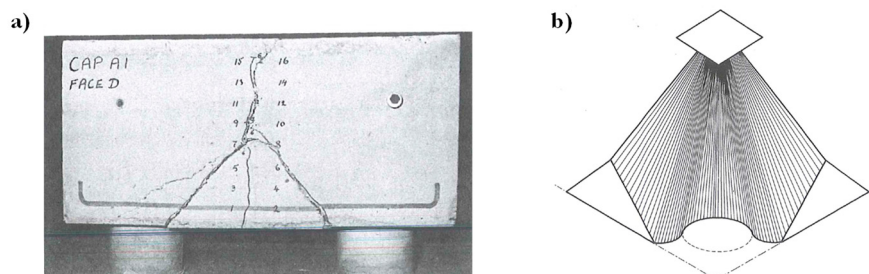
Figura 2.1 “Modelo de bielas” propuesto por Blévet y Frémy para encepados de cuatro pilotes

En 1973 Clarke [2] continúa la experimentación en encepados de cuatro pilotes a escala real para estudiar el efecto de la relación vuelo-canto (w/d), la configuración de armado y el tipo de anclaje en 15 especímenes.

En los 3 especímenes más rígidos ($w/d=0.25$, $\theta_b=55^\circ$) se detectaron fisuras muy verticales en el centro de las caras y modos de rotura similares al cortante, mientras que en los 12 especímenes menos rígidos ($w/d=0.50$, $\theta_b=45^\circ$) aparecieron fisuras inclinadas en las caras que revelaron una compleja superficie de punzonamiento (Figura 2.2).

En cuanto a la disposición de armado, Clarke constató la eficacia del armado en bandas perimetrales frente al armado distribuido (se incrementó un 14% la carga de rotura) y a las bandas diagonales (sólo un 2% respecto a la disposición distribuida).

De los tipos de anclaje estudiados, el anclaje en patilla supuso un incremento en la carga de rotura resistida respecto al anclaje en prolongación recta de un 5%. En cambio, en el caso de anclaje completo (doblado 90° hasta la cara superior) esta mejora ascendió al 30%. En la investigación se apunta a que realmente este tipo de anclaje podría estar actuando como un armado de cortante en las caras, mejorando así la resistencia del elemento.



FUENTE: Resultados experimentales de Clarke [2]

Figura 2.2 Rotura por punzonamiento observado por Clarke

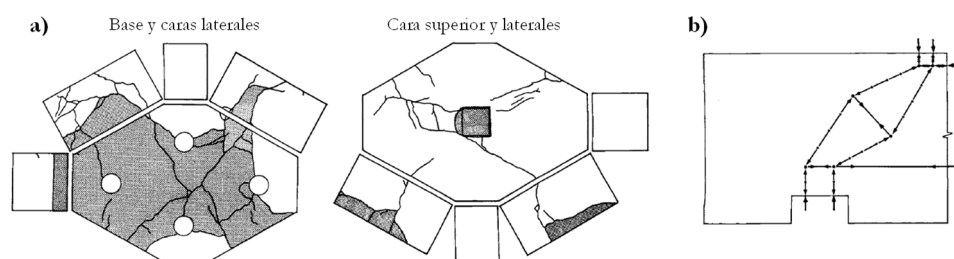
a) Imagen del patrón de fisuración del encepado A1 tras la rotura; b) Superficie de punzonamiento propuesta

En 1984, Sabnis y Gogate [3] ensayaron 9 encepados de cuatro pilotes a escala 1:5, para analizar el efecto de la cuantía de armado distribuido en la resistencia de encepados de iguales dimensiones. Se observaron roturas por punzonamiento en todos los casos y un efecto insignificante del incremento de la cuantía de armado (0.25%) en la resistencia del encepado. Las predicciones de carga obtenidas con la formulación del código ACI 318-77 [27] para punzonamiento de losas resultaron muy conservadoras para estos elementos rígidos. Se obtuvieron predicciones más ajustadas con la propuesta del CRSI Design Handbook [28] para especímenes con una relación vuelo-canto (w/d) menor de 0.5, en la que se consideró una variación hiperbólica de la resistencia a punzonamiento del hormigón, que aumenta al reducirse la esbeltez del encepado.

Los resultados obtenidos por las precedentes campañas experimentales sentaron las bases para el diseño de encepados mediante la analogía de la celosía, demostrando la mayor eficacia de los esquemas de armado concentrados en banda respecto a los distribuidos. En 1984 Schaich y Schäfer [23] presentaron una formulación racional para el diseño de regiones de discontinuidad (en adelante región D) en estructuras de hormigón; el método de bielas y tirantes. A partir de entonces las investigaciones sobre la resistencia de encepados sometidos a cargas centradas centraron su interés en la aplicación de este método a encepados.

En 1990, Adebar et al. [29] ensayaron 6 especímenes con diferentes configuraciones y cuantía de armado: 4 encepados de cuatro pilotes de planta romboidal, un encepado de cuatro pilotes de planta cruciforme y otro de seis pilotes y planta rectangular. Con el objetivo de verificar experimentalmente que los encepados son regiones de discontinuidad, emplearon galgas extensométricas a lo

largo de las armaduras y otras embebidas en el hormigón para registrar sus deformaciones. Con estas medidas experimentales evidenciaron que en los encepados rígidos las deformaciones en el hormigón de la sección bajo la columna no siguen una ley lineal y por tanto no se cumplen las hipótesis de la teoría de vigas. Además, la máxima deformación en las armaduras de las bandas se registra en el centro, pero mantiene hasta un 75% de la tensión máxima sobre los pilotes, confirmando la semejanza con la analogía del tirante que mantiene su tracción constante entre los pilotes que une.



FUENTE: Adebar et al. [29]

Figura 2.3 Modo de rotura por punzonamiento en encepados observado por Adebar
a) Patrón de fisuración tras la carga máxima en el encepado A; b) MBT refinado que incluye un tirante de hormigón que resiste la tracción transversal de la biela en botella.

En todas las configuraciones ensayadas por Adebar et al., dos de los pilotes se disponen más próximos al pilar que el resto, para analizar la capacidad de redistribución de carga de los encepados rígidos. Antes de producirse la fisuración, las distribuciones de reacciones fueron proporcionales a la separación pilote-columna, es decir, la respuesta de los encepados es perfectamente rígida. Tras la fisuración, se registró un 13% de redistribución entre la dirección corta y la larga en los encepados cuya armadura llegó a plastificar. Mientras que en aquellos con una cuantía de armado más elevada que no alcanzan la plastificación, se redistribuyó únicamente un 5%.

Se describen roturas por punzonamiento en los casos de planta romboidal (Figura 2.3a) y en el encepado de seis pilotes rectangular, mientras que en el encepado de planta cruciforme la rotura fue por cortante. Los autores relacionan estos fallos con el *splitting* de las bielas de hormigón (Figura 2.3b).

Entre 1998 y 2002, Suzuki et al. [30–33] llevaron a cabo 94 ensayos sobre encepados de cuatro pilotes, separados en diferentes series para estudiar la influencia de: la configuración de armado (28 especímenes), el canto variable del

encepado (18 especímenes), la distancia desde el borde del pilote a la cara exterior del encepado (30 especímenes) y el tipo de anclaje (18 especímenes).

Las cargas de plastificación y rotura obtenidas experimentalmente se comparan con la formulación de MBT propuesta en 1996 por Otsuki y Suzuki [34]. Los autores proponen modificar el ángulo de inclinación de las bielas en su descarga al pilote mediante un coeficiente α , que capta la concentración de tensiones en la columna según la relación separación entre ejes de pilotes-canto útil (e/d).

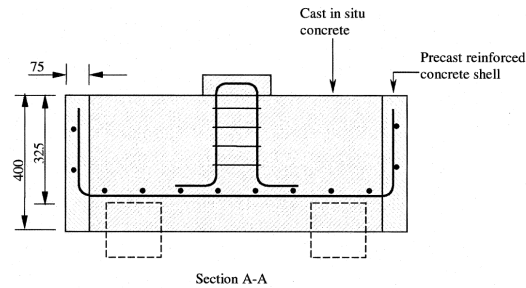
Del estudio de la configuración de armado concluyeron que, incluso para los encepados que rompieron por cortante o punzonamiento, el armado dispuesto en bandas resultó más eficaz que el distribuido, teniendo la misma cuantía de armado.

En los especímenes con canto variable, se sobreestima su capacidad a flexión si ésta se calcula en la sección de mayor canto (bajo la columna). En cambio, es posible emplear la misma formulación de MBT propuesta por los autores para encepados de canto constante, obteniendo predicciones seguras y ajustadas.

La distancia libre desde el borde del pilote a la cara exterior del encepado influye directamente en la carga de fisuración, de plastificación y de rotura. Al reducirse esta longitud también decrecieron dichas cargas, en especímenes con una misma separación de pilotes y cuantía de armado constante. Para obtener predicciones seguras con el MBT propuesto, esta distancia debería ser al menos igual al diámetro del pilote.

Por último, la comparación del tipo de anclaje revela que un anclaje completo (barras dobladas 90° hasta la cara superior del encepado) permitió alcanzar la carga de plastificación del armado previa al fallo por cortante, mientras que para los especímenes con anclaje en gancho (180°) se produjo el fallo frágil sin plastificación del armado.

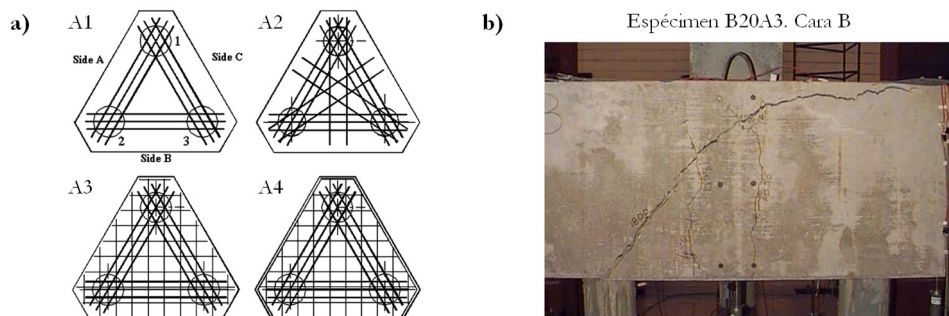
En el 2000 Chan y Poh [35] estudiaron la respuesta de 2 encepados de cuatro pilotes semi-prefabricados, en comparación con otro espécimen idéntico fabricado totalmente *in situ*. La parte prefabricada consiste en una pared delgada de hormigón a modo de encofrado perdido, que además lleva embebida la armadura horizontal distribuida (Figura 2.4). Los resultados experimentales mostraron que los encepados prefabricados se comportan de forma similar al hormigonado *in situ*, superando en todos los casos la carga de rotura predicha por las formulaciones de flexión y cortante de la BS 8110-1:1997 [36].



FUENTE: Chan y Poh [35]

Figura 2.4 Propuesta de encepado semi-prefabricado de Chan y Poh

En 2008 Miguel et al. [37] llevaron a cabo una campaña experimental sobre 9 encepados de tres pilotes, para analizar la influencia del diámetro del pilote y del armado secundario horizontal y vertical (Figura 2.5a) que prescribe la normativa brasileña de hormigón NBR 6118:2003.



FUENTE: Miguel et al. [37]

Figura 2.5 a) Configuraciones de armado ensayadas por Miguel et al. A) tipos A1, A2, A3, A4; b) Fisuras tras la carga máxima en el espécimen B20A3.

Los especímenes se diseñaron con la misma armadura en bandas, y se añadió armadura secundaria horizontal perpendicular a las caras (tipo A2), distribuida en la base (tipo A3) e incluyendo cercos verticales (tipo A4). Los encepados tipo A4 y A2 resistieron mayor carga, seguidos de los de tipo A3 y por último los de tipo A1. La reducción de diámetro del pilote (de 30 a 20cm) supuso una reducción en la carga de rotura observada del 22% para los encepados tipo A1, y de tan solo el 4% para los de tipo A4.

En 2009 Cao [38] realizó 17 ensayos sobre encepados de cuatro pilotes bajo la carga lineal de un muro para estudiar la resistencia a cortante de estos elementos frente a las predicciones realizadas por el MBT y las formulaciones de cor-

tante de las normativas británicas BS 8110-1:1997 [36] y BS 5400-4:1990 [16]. Ambas formulaciones de cortante resultaron excesivamente conservadoras, y se obtuvo una mejor correspondencia con el MBT propuesto por los autores. Este MBT considera la contribución del 90% del armado horizontal distribuido en la capacidad de los tirantes, y localiza el nudo superior multi-comprimido en la cara superior del encepado a $c/4$ del eje del muro, siendo c el ancho del muro en cuestión.

También en 2009 Gu et al. [39] presentaron su campaña experimental sobre 4 encepados de cuatro pilotes en la que se analiza la influencia de la configuración de armado: distribuido en la base, en bandas paralelas a los lados, en bandas diagonales y una combinación de las dos últimas. Todos los especímenes se diseñaron con la misma cuantía de armado para poder comparar directamente la influencia de las configuraciones planteadas. El armado en bandas diagonales resultó ser el más resistente, aunque el de bandas paralelas a los lados presentó mayor ductilidad con una capacidad de carga similar.

Los ensayos experimentales más recientes sobre encepados de más de dos pilotes incluyen la adición de fibras de acero y el empleo de hormigón de alta resistencia. Esta campaña experimental de 2011 se divide en dos partes, Gao et al. [40] realizaron 4 ensayos sobre encepados de cuatro pilotes y Lei et al. [41] ensayaron 10 encepados de tres pilotes. Los resultados demuestran las posibilidades en la adición de fibras de acero para reducir la fisuración y aumentar la ductilidad del encepado.

Como resumen de este apartado, en la Tabla 2.1 se sintetizan las principales características de las campañas experimentales realizadas en encepados de más de dos pilotes hasta la fecha.

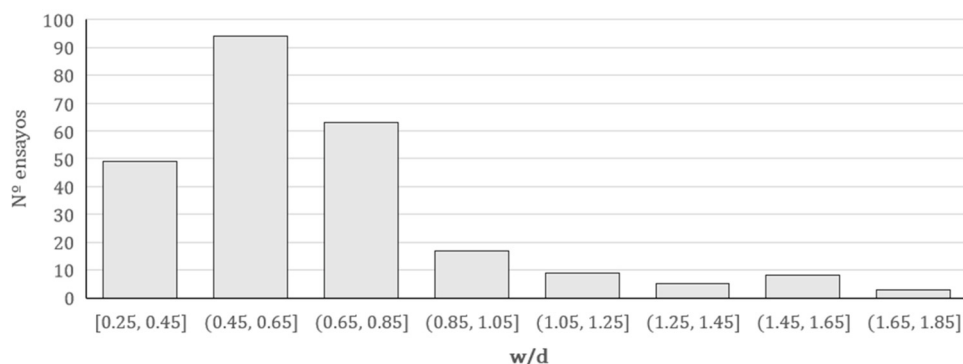


Figura 2.6 Distribución del número de ensayos en función de la ratio vuelo-canto

Tabla 2.1 Ensayos experimentales existentes en encepados de tres y cuatro pilotes

| Autores | Años | N | w/d | Objetivo de la investigación |
|---------------------|-----------|-----------------|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Blévot y Frémy [1] | 1955-1958 | 88 ^a | [0.29-1.60] | Influencia de la configuración de armado y del ángulo de inclinación de las bielas. Escala reducida (1:2). |
| | 1958-1961 | 16 ^a | [0.38-1.08] | Influencia de la configuración de armado y del ángulo de inclinación de las bielas. Escala real. |
| Clarke [2] | 1973 | 15 | [0.25-0.50] | Influencia de la separación entre pilotes, la distribución de armado y el tipo de anclaje. |
| Sabnis y Gogate [3] | 1984 | 9 | 0.60 | Influencia de la cuantía de armado. |
| Adebar et al. [29] | 1990 | 6 | [0.75-1.60] | Capacidad de redistribución de cargas del encepado entre ejes de pilotes de distinta longitud. Influencia de la cuantía y distribución de armado. |
| Suzuki et al. [30] | 1998 | 28 | [0.40-0.80] | Influencia de la configuración de armado. |
| Suzuki et al. [31] | 1999 | 18 | [0.33-0.58] | Respuesta de encepados de canto variable. |
| Suzuki et al. [32] | 2000 | 30 | [0.29-0.67] | Influencia de la distancia desde la armadura a la cara exterior del encepado. |
| Suzuki et al. [33] | 2002 | 18 | [0.34-0.52] | Influencia del tipo de anclaje. |
| Chan y Poh [35] | 2000 | 3 | [0.67-1.00] | Encepados semi-prefabricados. |
| Miguel et al. [37] | 2008 | 9 | [0.76] | Influencia de la armadura secundaria horizontal y vertical y del diámetro del pilote. |
| Cao [38,42] | 2009 | 17 | [0.75-1.76] | Resistencia a cortante de encepados bajo carga lineal. |
| Gu et al. [39] | 2009 | 4 | [0.50] | Influencia de la configuración de armado. |
| Gao et al. [40] | 2011 | 4 | [0.35-1.13] | Respuesta de encepados de cuatro pilotes con hormigón de alta resistencia con fibras de acero. |
| Lei et al. [41] | 2011 | 10 | [0.46-1.03] | Respuesta de encepados de tres pilotes con hormigón de alta resistencia con fibras de acero. |

N número de ensayos que conforman la campaña experimental;

w: vuelo del encepado; d: canto útil del encepado

^aNúmero de ensayos de encepados de más de dos pilotes

2.2. Modelos de bielas y tirantes para encepados con más de dos pilotes

2.2.1. Bases del método de bielas y tirantes

El método de bielas y tirantes tiene su origen en la analogía de la celosía empleada por Ritter [25] en 1899 para explicar el funcionamiento a cortante de una viga simplemente apoyada. Mediante esta comparación se intuye la existencia de fuerzas internas de compresión y tracción a lo largo de la viga como si se tratara de una celosía metálica.

Años más tarde, en 1908 Mörsch [26] introdujo el concepto de campo de tensiones, al sustituir las diagonales comprimidas de la celosía por campos difusos de compresiones, que eran equilibrados por las tracciones que proporcionaban los cercos verticales.

Estas dos investigaciones fueron la base fundamental de la que partieron Schlaich y Schäfer [23,24] para el desarrollo de una propuesta completa y consistente orientada al diseño de las regiones de discontinuidad en estructuras de hormigón, el método de bielas y tirantes.

El MBT se basa en el Teorema del límite inferior de la plasticidad, ya que se busca un conjunto de fuerzas internas en equilibrio que satisfaga las condiciones de contorno y que no superen las tensiones de plastificación de los materiales. Si se satisfacen estas condiciones, se obtiene una cota inferior de la carga de rotura de la estructura o región.

El diseño mediante MBT requiere, en primer lugar, definir la geometría del modelo mediante barras biarticuladas comprimidas (bielas) y traccionadas (tirantes), orientadas según las trayectorias de tensiones suponiendo un comportamiento elástico condicionado a una disposición de armado constructiva. Una vez definida la estructura se calculan los esfuerzos en las barras por equilibrio. De esta forma, es posible determinar el armado necesario en los tirantes, que deberá satisfacer también las limitaciones por fisuración oportunas, no consideradas por el MBT. Por último, se deben evaluar las tensiones en el hormigón de las bielas y zonas nodales. Las normativas que permiten el diseño mediante MBT recogen las diferentes limitaciones en función del estado de tensiones o deformaciones del hormigón, siempre sobre elementos bidimensionales.

2.2.2. MBT para encepados solicitados por carga centrada

El desarrollo de propuestas de MBT para encepados es paralelo a algunas de las principales campañas experimentales revisadas en el apartado anterior.

El MBT descrito hasta la fecha para encepados de tres y cuatro pilotes es simple, los tirantes se disponen en la base conectando los ejes de los pilotes por sus centros. En alzado, estos tirantes deben localizarse en el centro de gravedad de las armaduras. Las bielas transmiten la carga aplicada en el pilar hacia los vértices de los tirantes (ejes de los pilotes). Al tratarse de un elemento muy masivo y de marcado comportamiento tridimensional, resulta complejo definir la posición la zona nodal superior multi-comprimida cuya comprobación tensional podría resultar limitante. Por esta razón, las propuestas de MBT que se desarrollan a continuación, difieren en la localización del nudo superior.

La reacción máxima del pilote según MBT (R_{MBT}), limitada por la capacidad a tracción de los tirantes ($A_s \cdot f_y$), se expresa en la Ec. (2.1) de forma genérica en función de un factor χ que modifica la posición del nudo superior (como múltiplo del canto útil d) y puede incluir el efecto del endurecimiento del acero tras la plastificación.

$$R_{MBT} = \chi \frac{d \cdot 4 \cos^2 \alpha_T \cdot A_s \cdot f_y}{e} \quad (2.1)$$

$$\text{siendo } \alpha_T = \begin{cases} 30^\circ, & 3 \text{ pilotes} \\ 45^\circ, & 4 \text{ pilotes} \end{cases}$$

Blévoit y Frémy [1] definieron un MBT en el que la carga aplicada en el pilar se divide en tres o cuatro cargas iguales, dependiendo del número de pilotes, localizadas a $0.3c$ o $0.25c$ desde el eje del pilar respectivamente. Los nudos superiores en los que se aplican las cargas se encuentran en la cara superior del encepado, es decir a un canto útil (d) del eje de las armaduras. El valor del factor χ asociado a la propuesta de Blévoit y Frémy ($\chi_{B\&F}$) se define en la Ec. (2.2), para encepados de tres y cuatro pilotes.

$$\chi_{B\&F} = \frac{e/[2 \cos \alpha_T]}{e/[2 \cos \alpha_T] - \xi \cdot c} \quad (2.2)$$

$$\text{siendo } \xi = \begin{cases} 0.30, & 3 \text{ pilotes} \\ 0.25, & 4 \text{ pilotes} \end{cases}$$

Las sucesivas campañas experimentales evidenciaron que este MBT resultaba excesivamente conservador y que no permitía identificar el modo de fallo (descrito experimentalmente como de flexión, cortante o punzonamiento). Las dos propuestas que se desarrollan a continuación trataron de plantear MBT's más ajustados al comportamiento real de los encepados.

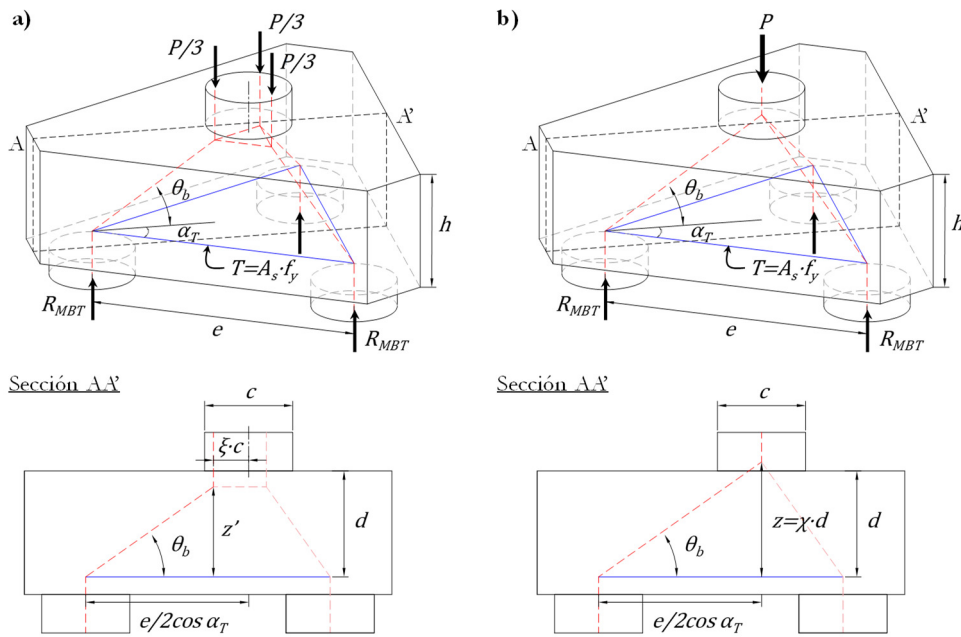


Figura 2.7 Modelos de bielas y tirantes equivalentes para un encepado de tres pilotes solicitado por carga centrada

a) MBT que considera el axil de la columna dividido en tres cargas iguales separadas $\xi \cdot c$ del eje de la columna; b) MBT con brazo mecánico variable en función de χ

En 1996, Otsuki y Suzuki [34] analizaron la distribución de tensiones bajo el pilar mediante modelos de elementos finitos (en adelante MEF), detectando que ésta no es uniforme, sino que se concentra en las esquinas. Además, el grado de concentración de tensiones aumenta con la relación entre la separación entre ejes de pilotes y el canto útil (e/d). La concentración de tensiones se relaciona directamente con la posición de la resultante de compresiones del pilar ($\xi/2 \cdot c$) en el MBT. El valor del factor χ asociado a la propuesta de Otsuki y Suzuki (χ_{Otsuki}) se define en la Ec. (2.3).

$$\chi_{Otsuki} = \frac{e/[2 \cos \alpha_T]}{e/[2 \cos \alpha_T] - \xi \cdot c/2} \quad (2.3)$$

$$\text{siendo } \xi = \begin{cases} 0.75 & e/d \leq 1.5 \\ 0.75 + 0.25 \cdot (e/d - 1.5) & 1.5 < e/d \leq 2.5 \\ 1 & e/d > 2.5 \end{cases}$$

En 2009, Souza et al. [43] propusieron un modelo unificado para el diseño de encepados que combinaba la formulación de MBT con la verificación del fallo frágil por *splitting* de las bielas propuesta por Siao [44]. Definieron tres valores distintos del factor χ a emplear en la Ec. (2.1), para aproximar la carga de fisuración, de plastificación y de rotura por flexión: $\chi_{Souza,cr}=0.10$, $\chi_{Souza,y}=1.88$, $\chi_{Souza,r}=1.88$. Estos coeficientes de calibración se obtuvieron a partir de los datos experimentales disponibles minimizando el coeficiente de variación. Se consideraron un total de 129 ensayos sobre encepados de cuatro pilotes para realizar este ajuste, logrando un coeficiente de variación de 0.23 en la predicción de la carga de rotura.

2.2.3. MBT para encepados solicitados por carga excéntrica del pilar

La definición de MBT para encepados solicitados por cargas excéntricas parte de la incertidumbre expresada en el apartado anterior, relativa a la localización de la zona nodal superior, y además se agrega la falta de ensayos experimentales con excentricidad con los que contrastar cualquier propuesta realizada.

La investigación realizada al respecto es escasa, sólo se conoce la propuesta de Souza et al. [45] en 2007, desarrollada para valores de excentricidad pequeños, ya que no contempla la posible transmisión de tracciones desde el pilar. Los autores sitúan el nudo multi-comprimido en la cara superior del encepado (1.0*d*), desplazado del centro por la excentricidad de la carga aplicada. Además, para evitar el fallo por *splitting* de las bielas limitan la tensión máxima del hormigón en la sección del pilar a $1.0f_c$.

Ante la necesidad práctica de definir MBT's para estos elementos, la literatura técnica especializada plantea algunas propuestas. A continuación se describen aquellas consideradas de mayor relevancia.

La *monografía M6* de ACHE [46] incluye un ejemplo de MBT para un encepado de seis pilotes solicitado por una combinación de esfuerzos axiales y flectores a través del pilar. El vértice del MBT se sitúa en la cara superior del encepado (1.0*d*). Se indica en este caso que no es necesario comprobar dicho nudo multi-comprimido, ya que su capacidad será siempre superior a la de la sección del pilar que transmite la carga. Se comprueban en este caso las regiones nodales inferiores suponiendo que las bielas que llegan al pilote son de sección elíptica

y limitando su tensión a $0.70f_c$, ya que en este nudo es preciso anclar los tirantes inferiores.

El *fib Bulletin 61* [12] incluye dos MBTs para zapatas solicitadas por axil y flexión recta y biaxial, que podrían ser aplicados al caso de encepados. La posición de los esfuerzos de compresión y tracción del pilar se obtiene a partir de un cálculo seccional en rotura. La definición de la cota del nudo superior se fija en torno a $0.85-0.90d$, como estimación del brazo mecánico de la sección de la zapata. La comprobación de tensiones en la región nodal correspondiente a este nudo se simplifica, en el caso de flexión recta, proyectando los esfuerzos de las bielas sobre el plano de simetría y realizando la comprobación habitual de un nudo CCC bidimensional. Para el caso de flexión biaxial no resulta válida esta analogía. La comprobación queda reducida a verificar que se dispone de suficiente área en la intersección de la biela más comprimida con la sección del pilar. En el caso particular de encepados, a diferencia de las zapatas, se generan zonas nodales inferiores sobre los pilotes, donde se concentran los esfuerzos de las bielas y se anclan los tirantes, que deberían comprobarse, pero esta publicación no ofrece recomendaciones al respecto.

La *Special Publication 273* del ACI [13] resuelve un encepado de cuatro pilotes solicitado por una carga con mayor excentricidad que los ejemplos anteriores, llegando incluso a transmitir tracción a dos de los pilotes. El MBT propuesto incluye tirantes verticales que deben transmitir su tracción a las barras de anclaje del pilar. Como en los ejemplos anteriores, el vértice superior se fija según criterio del proyectista, en este caso entre $0.85-0.90d$. La comprobación de las zonas nodales consiste en limitar las tensiones en las áreas de carga y apoyos a $0.85f_c$. Si se satisface esta comprobación tensional, se admite que también lo harán las secciones de biela ya que se dispone de mayor área de hormigón bien confinada en el interior del encepado.

Todas estas propuestas realizan hipótesis conservadoras sobre la localización del nudo superior y ofrecen criterios simplificados para la verificación de las tensiones del hormigón.

2.2.4. Limitación del fallo frágil en encepados

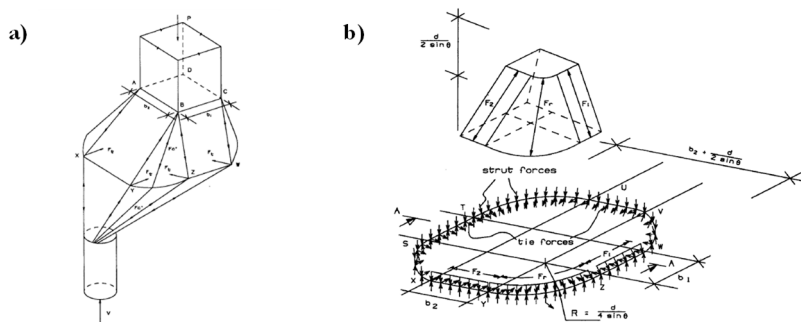
El diseño completo de un encepado mediante MBT requiere también de la verificación de las tensiones en el hormigón de las bielas y zonas nodales. La experimentación sobre encepados no ha revelado fallos por aplastamiento del hormigón en compresión, pero sí se han descrito roturas frágiles por cortante o

punzonamiento. Adebar et al. [29] relacionaron estos tipos de fallo con el *splitting* de las bielas en botella.

Para limitar este fallo plantearon en su primera investigación limitar la tensión en las áreas de apoyo (f_b) a $1.0f_c$ [29]. En una investigación posterior, en 1993 Adebar y Zhou [14] ajustaron esta formulación (Ec. (2.4)) para incluir el efecto del confinamiento (α) y de la geometría de la propia biela (β).

$$f_b \leq 0.6f_c(1 + 2\alpha\beta) \quad (2.4)$$

$$\text{siendo } \alpha = 0.33(\sqrt{A_2/A_1} - 1) \leq 1.0; \quad \beta = 0.33(h/b - 1) \leq 1.0$$



FUENTE: Siao [44]

Figura 2.8 a) Biela en botella tridimensional; b) Fuerzas de tracción debidas a la difusión de las compresiones

Paralelamente, en 1993 Siao [44] propuso una comprobación de las tracciones transversales que se generan en las bielas de vigas de gran canto y encepados que fallan por *splitting* diagonal (Figura 2.8). Asumiendo un ángulo de difusión de la biela en botella de 1:2, obtiene una relación (Ec. (2.5)) entre la reacción del pilote (R) y la resistencia a tracción del hormigón (f_{ct}).

$$R = 2f_{ct} \left(c_1 + c_2 + \frac{\pi d}{4 \sin \theta} \right) d \quad (2.5)$$

Para simplificar esta ecuación, Siao [44] planteó considerar la resistencia del encepado igual a la intersección de dos vigas de gran canto de un ancho igual a la diagonal del pilar. Aceptando de nuevo un ángulo de difusión de las bielas de

1:2 y un brazo mecánico $z=0.9d$, resulta la fórmula simplificada (Ec. (2.6)) que relaciona la reacción del pilote (R) y la resistencia a tracción del hormigón (f_{ct}).

$$R = 2f_{ct}(c_1 + c_2)d \quad (2.6)$$

Más recientemente, en 2015 Guo [15] planteó que la resistencia a compresión de las bielas es una función de la relación vuelo-canto (w/d) y de la resistencia a compresión del hormigón del encepado (f_c). Esta función la obtiene a partir del ajuste por mínimos cuadrados de las variables que intervienen en la evaluación de la carga de punzonamiento en encepados mediante MEF no lineales. Los resultados obtenidos sólo resultan aplicables a encepados de cuatro pilotes con armado uniforme distribuido en la base.

2.3. Análisis del tratamiento normativo de diseño de encepados rígidos

Los trabajos de investigación sobre encepados de pilotes que se han descrito en los apartados previos han permitido avanzar en la aplicación del MBT al diseño de encepados. No obstante, ha quedado patente la incertidumbre que todavía existe acerca de la localización del nudo superior, la comprobación de bielas y zonas nodales tridimensionales y la consideración de la excentricidad de la carga aplicada. Además, los modos de rotura descritos como cortante o punzonamiento predominan en los ensayos experimentales sobre encepados recogidos en el apartado 2.1, y su relación con el *splitting* de las bielas (apartado 2.2.4) no ha derivado en formulaciones fácilmente generalizables a todo tipo de encepados. Por estas razones, los principales códigos internacionales de proyecto de estructuras de hormigón permiten el diseño de encepados mediante MBT o formulaciones seccionales de flexión, cortante o punzonamiento.

En esta sección se analiza el tratamiento normativo del diseño de encepados rígidos ($w/d \leq 2$) de más de dos pilotes, según la norma europea EN 1992-1-1 (Eurocódigo 2, EC-2) [9] y la americana ACI 318-14 [6]. Como complemento a la propuesta del EC-2 y por su relevancia en el contexto español se revisan también los artículos relativos al diseño de encepados según la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08) [11].

En el *Capítulo 6* se realizará un contraste experimental de los métodos seccionales aquí descritos y además se profundizará en la propuesta de punzonamiento

del Código Modelo 2010 [10], puesto que se trata de un documento de referencia para el análisis de estructuras de hormigón, en el cual se basa el EC-2 para sus sucesivas actualizaciones.

2.3.1. Modelos de bielas y tirantes

El Artículo 58.4.1 de la EHE-08 indica claramente que el diseño de cimentaciones rígidas ($w/d \leq 2$) debe basarse en MBT, ya que no considera aplicable la teoría general de flexión. La Instrucción propone dos MBT para encepados de tres y cuatro pilotes solicitados por carga centrada, basados en el originalmente propuesto por Blévoit y Frémy [1]: la carga aplicada se divide en tres o cuatro cargas iguales situadas a $0.25c$ desde el eje del pilar y se genera una biela horizontal en la cara superior situada a $0.85d$ del plano de los tirantes. El valor del factor χ asociado a la formulación de la EHE-08 (χ_{EHE}) se define en la Ec. (2.7), para encepados de tres y cuatro pilotes:

$$\chi_{EHE} = \frac{0.85 \cdot e / [2 \cos \alpha_T]}{e / [2 \cos \alpha_T] - 0.25 \cdot c} \quad (2.7)$$

$$\text{siendo } \alpha_T = \begin{cases} 30^\circ, & 3 \text{ pilotes} \\ 45^\circ, & 4 \text{ pilotes} \end{cases}$$

A partir de estos MBT puede determinarse el área de armadura a disponer en las bandas. Además, la EHE-08 añade una armadura secundaria horizontal distribuida en la base cuya capacidad no debe ser inferior a la cuarta parte de la capacidad mecánica de las bandas. Para resistir las tracciones transversales de las bielas en botella, la EHE-08 prescribe también un armado secundario vertical con una capacidad mecánica mínima de $P/1.5n$, siendo P la carga aplicada en el pilar y n el número de pilotes. La misma armadura fue previamente recomendada por Leohnardt [47] para recoger un posible empuje vertical hacia las bandas en encepados cuyos pilotes estuviesen separados más de tres diámetros. Este autor lo denominó “armado de suspensión”.

La Instrucción remite al Artículo 40.4 para la comprobación de la resistencia del hormigón en nudos, aunque en esa sección no queda recogido el caso tridimensional, y asume que esta comprobación supone implícitamente la comprobación de las bielas.

El artículo 9.8.1 del EC-2 no ofrece ninguna recomendación particular para definir la geometría de los MBT para encepados. En cambio, sí indica que la armadura de tracción principal debe concentrarse en bandas y que, si su área es

al menos igual a la armadura mínima, no es necesario disponer barras uniformemente distribuidas en la cara inferior. También permite que queden sin armar los lados y la cara superior del encepado, si no hay riesgo de que se produzcan tracciones.

La sección 13.2.6.3 del código ACI 318-14 permite el diseño de cimentaciones mediante MBT, y remite directamente al Capítulo 23 en el que se recogen los principios generales del método. En la sección 13.4.2.4 se especifica que la resistencia efectiva a compresión de las bielas (f_{ce}) del encepado debe limitarse a $0.85\beta_s f_c$, siendo $\beta_s=0.6\lambda$ (propio de las bielas en botella) y $\lambda=1$ en el caso de hormigón de peso normal.

2.3.2. Métodos seccionales: Flexión

Tanto EC-2 como ACI 318-14 permiten emplear métodos seccionales de flexión para la determinación de la armadura necesaria en encepados independientemente de su relación vuelo-canto. En cambio, la EHE-08 no permite el diseño de encepados rígidos mediante métodos seccionales.

La comprobación de flexión en encepados debe realizarse en un plano vertical situado en el borde del pilar y extendido a todo el ancho del encepado (sección (A) en Figura 2.9a). Aun así, para asegurar un dimensionamiento seguro de los encepados, la *Design Guide for pile caps* del CRSI [48] recomienda situar la sección de control para flexión a $c/4$ desde el centro del pilar (sección (B) en Figura 2.9a); mientras que el EC-2 limita el momento de cálculo a un mínimo de 0.65 veces el correspondiente al momento en el eje del apoyo (sección (C) en la Figura 2.9a) en el caso de losa monolítica con el soporte.

Para determinar el momento actuante se consideran todas las reacciones situadas a un lado de dicho plano. Cuando existe excentricidad de la carga aplicada a través del pilar, en este plano se genera un momento torsor además del flector. Se debe tener en cuenta el incremento de tracción en la armadura producido por la torsión. Para obtener la resistencia a flexión (M_{Rd}) se supone una distribución rectangular de tensiones del hormigón, definida por los factores η y λ_I (Figura 2.9b, Tabla 2.2).

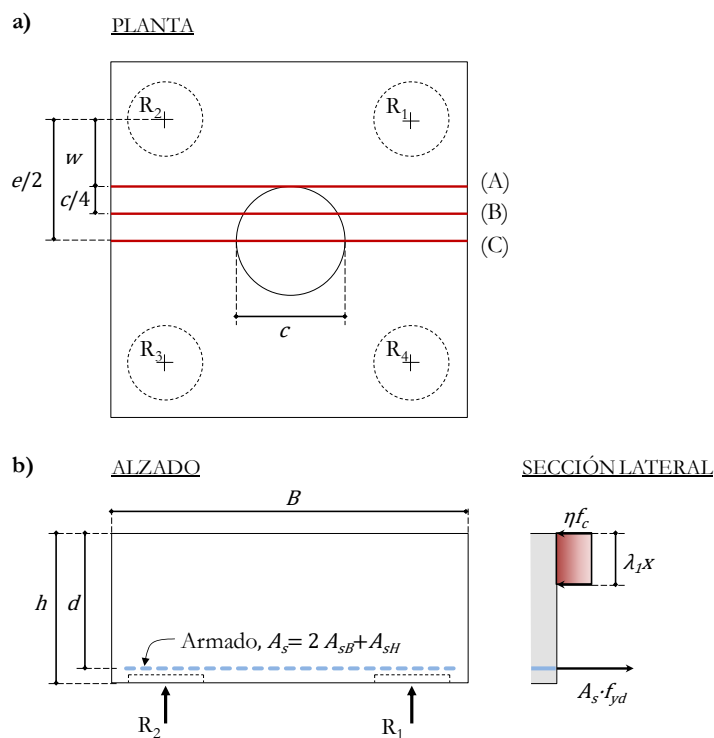


Figura 2.9 Resistencia a flexión de encepados según los métodos seccionales
a) Localización de los planos de comprobación; b) Distribución rectangular de tensiones en la sección transversal

Tabla 2.2 Parámetros que definen el diagrama rectangular de distribución de tensiones

| Normativa | η | λ_t | |
|------------|-------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| EC-2 | 1 | 0.8 | $f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$ |
| | $1 - (f_{ck} - 50)/200$ | $0.8 - (f_{ck} - 50)/400$ | $50 < f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$ |
| ACI 318-14 | 0.85 | 0.85 | $17 < f_{ck} \leq 28 \text{ MPa}$ |
| | | $0.85 - 0.05 \cdot (f_{ck} - 28)/7$ | $28 < f_{ck} \leq 55 \text{ MPa}$ |
| | | 0.65 | $f_{ck} \geq 55 \text{ MPa}$ |

λ_t : coeficiente que define la altura de la zona comprimida; η : coeficiente que define la resistencia efectiva; f_{ck} : resistencia característica a compresión del hormigón en MPa

2.3.3. Métodos seccionales: Punzonamiento y cortante

La comprobación de la resistencia a cortante y punzonamiento de encepados rígidos, empleando métodos seccionales, generalmente requiere realizar hipótesis para poder aplicar estas formulaciones que fueron especialmente desarrolladas para vigas y losas. Tanto EC-2 como ACI 318-14 disponen de guías de diseño [48–50] que abordan este caso particular combinando distintos modos de fallo y considerando la mejora de resistencia en algunas secciones debida a la proximidad entre carga y apoyos. A continuación se repasan los principales parámetros para la comprobación de la resistencia a cortante y punzonamiento de encepados con carga excéntrica según las propuestas de EC-2 y ACI 318-14.

2.3.3.1 Eurocódigo 2

Las secciones de comprobación de punzonamiento y cortante que define el EC-2 se sitúan a $2d$ y d respectivamente desde el borde de la carga puntual o apoyo. La cercanía habitual entre carga y apoyos en el caso de encepados rígidos requiere adaptar estas secciones de comprobación, tal y como proponen las guías de diseño de referencia [49,50]. Siguiendo estas indicaciones se definen en la Figura 2.10 hasta cinco secciones de comprobación de las tensiones tangenciales asociadas a los distintos modos de fallo en encepados de cuatro pilotes: los planos de corte (1) y (2), una superficie de control situada a $2d$ del pilote (4) y las superficies de control del pilar (3*) o pilote (4*) en perímetros interiores a $2d$. Además debe verificarse que no se supera el valor de $v_{Rd,max}$, descrito en la Ec.(2.8), en los perímetros de pilar y pilote.

En las **comprobaciones de cortante**, la cláusula 6.2.2 (6) del EC-2 tiene en cuenta el efecto positivo de la proximidad de la carga al apoyo mediante un coeficiente de reducción de la carga aplicada ($1/\Omega$), ver la Ec.(2.9). Este punto es discutido en la *Designers' Guide to EN 1992-2* [49], ya que los resultados experimentales en vigas evidencian un aumento en la resistencia a cortante en las secciones próximas al apoyo debido a dos razones: parte de la carga descarga mediante una biela directa sobre el apoyo y a su vez el ángulo del plano de fallo aumenta. Por esta razón, la guía se apoya en la práctica habitual en UK basada en las BS 8110 [36] y BS 5400 [16] y propone emplear un factor de mejora de la resistencia del hormigón (Ω) sobre las zonas en las que el armado se encuentre perfectamente anclado sobre las cabezas de los pilotes (w_{eff}). La comprobación de resistencia a cortante en este caso queda resumida por la Ec.(2.10).

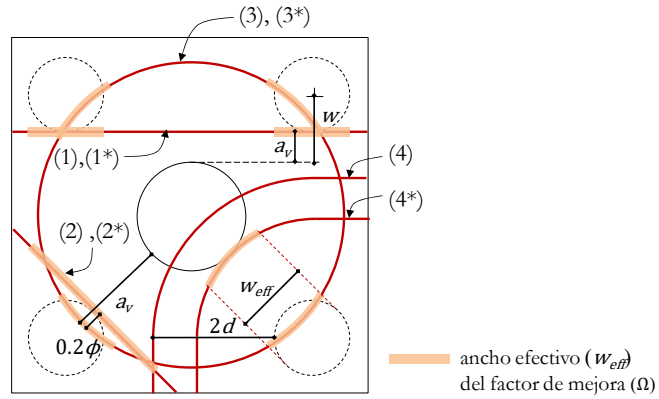


Figura 2.10 Superficies de control asociadas a los distintos modos de fallo de cortante o punzonamiento según EC-2

$$v_{Rd,max} = \frac{0.5v f_{ck}}{\gamma_c}, \text{ donde } v = 0.6 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \quad (2.8)$$

$$\left(\frac{1}{\Omega}\right) V_{Ed} \leq v_{Rd,c} b d = V_{Rd,c} \quad (2.9)$$

$$V_{Ed} \leq v_{Rd,c} [b + (\Omega - 1) w_{eff}] d = V_{Rd,c} \quad (2.10)$$

En caso de que exista armadura de cortante, el EC-2 suma su contribución ($V_{Rd,s}$) a la resistencia a cortante de toda la sección de hormigón ($V_{Rd,c}$). Cuando se aplica el factor de mejora a la resistencia del hormigón, en vez de minorar la carga (V_{Ed}), la *Designers' Guide to EN 1992-2* [49] propone añadir a $V_{Rd,s}$ únicamente la resistencia mejorada de la sección ($V_{Rd,c}^* = v_{Rd,c} \Omega w_{eff} d$). En la Tabla 2.3 se incluyen las formulaciones de ambos enfoques, para los planos de corte descritos en la Figura 2.10.

En cuanto a las **comprobaciones de punzonamiento**, el EC-2 admite emplear el factor de mejora de la resistencia del hormigón (Ω) en el caso de comprobar perímetros interiores en bases de pilares (zapatas), pero por la cláusula 6.4.3 (7) no es de aplicación en el caso de cargas concentradas próximas al pilar (reacciones de los pilotes). De nuevo la *Designers' Guide to EN 1992-2* [49] cuestiona este punto, ya que considera que de forma similar al cortante, en el caso de la resistencia a punzonamiento también existirá parte de descarga directa al

apoyo y una mayor inclinación de la superficie de fallo. No considerar ningún efecto de mejora en la resistencia puede resultar muy conservador, mientras que considerarlo efectivo en todo el perímetro de punzonamiento sería inseguro. En este sentido, la propuesta de Clarke [2] para comprobar el punzonamiento en encepados siguiendo la derogada CP 110 [51] (previa a la BS 8110) fue aumentar la resistencia únicamente sobre el ancho de los pilotes (w_{eff}) donde el armado se encuentra completamente anclado. En la Tabla 2.3 se recogen estas dos consideraciones para los perímetros de punzonamiento descritos en la Figura 2.10.

En caso de existir excentricidad de la carga puntual (pilar o pilote) parte del flector ($\gamma_v M$) es resistido por variación de tensiones tangenciales en la sección de control de punzonamiento [52]. Para tener en cuenta este efecto, el EC-2 propone una distribución plástica de las tensiones en el perímetro crítico (u_t). La máxima tensión de punzonamiento resulta de multiplicar la tensión media (v_{Ed}) por el coeficiente de excentricidad β indicado en la Tabla 2.3. En la Ec.(2.11) se recoge la propuesta de comprobación a punzonamiento completa:

$$\beta V_{Ed} \leq v_{Rd,c} [b + (\Omega - 1)w_{eff}]d = V_{Rd,c} \quad (2.11)$$

Si además se dispone armadura de punzonamiento, el EC-2 suma su contribución ($V_{Rd,s}$) al 75% de la resistencia del hormigón ($V_{Rd,c}$). Aunque no se hace explícito, se supone que aplica el mismo criterio en el caso de emplear el factor de mejora de resistencia del hormigón.

Tabla 2.3 Principales parámetros de las formulaciones de cortante y punzonamiento del EC-2

| Sección en Figura 2.10 | Factores sobre el cortante aplicado | | Elementos sin armadura de cortante | Elementos con armado de cortante | | |
|---------------------------|----------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------|----------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| | $1/\Omega$ | β | $v_{Rd,c}$ | Ω | w_{eff} | |
| (1), (2) | $\frac{a_v}{2d}$ | x | $\frac{0.18}{\gamma_c} k(100\rho_l f_{ck})^{\frac{1}{3}}$ | x | x | $V_{Rd,c} + A_{sw} f_{ywd}$, A _{sw} dentro de 0.75a _v |
| (1*), (2*) | x | x | $\frac{0.18}{\gamma_c} k(100\rho_l f_{ck})^{\frac{1}{3}}$ | $\frac{2d}{a_v}$ | $n \cdot \phi$ | $V_{Rd,c}^* + A_{sw} f_{ywd}$, A _{sw} dentro de 0.75a _v |
| (3), (4) | x | $1 + \gamma_v e_u \frac{u_1}{W_1}$ | $\frac{0.18}{\gamma_c} k(100\rho_l f_{ck})^{\frac{1}{3}}$ | x | x | $0.75V_{Rd,c} + A_{sw} f_{ywd,ef}$, A _{sw} dentro de 0.75 of 2d |
| (3*), (4*) | x | $1 + \gamma_v e_u \frac{u_1}{W_1}$ | $\frac{0.18}{\gamma_c} k(100\rho_l f_{ck})^{\frac{1}{3}}$ | $\frac{2d}{a_v}$ | $n \cdot \phi$ | $0.75V_{Rd,c} + A_{sw} f_{ywd,ef}$, A _{sw} dentro de 0.75 of 2d |

- (1),(2): planos de fallo por cortante
(3): perímetro crítico de punzonamiento entorno a la columna
(4): perímetro crítico de punzonamiento entorno al pilote

b : ancho efectivo de cortante; u_1 : perímetro crítico de punzonamiento; $1/\Omega$: factor que tiene en cuenta la proximidad carga-apoyo; β : coeficiente de excentricidad; $v_{Rd,c}$: valor de cálculo de la resistencia del hormigón a lo largo de la sección crítica considerada; Ω : factor de mejora de la resistencia del hormigón; w_{eff} : ancho efectivo para la aplicación del factor de mejora Ω ; a_v : vano libre de cortante; d : canto útil; k : factor para la consideración del efecto tamaño, igual a $1 + \sqrt{(d/200)} \leq 2.0$; ρ_l : cuantía de armadura adherente de tracción; f_{ck} : resistencia característica a compresión del hormigón; γ_c : coeficiente parcial de seguridad del hormigón; $V_{Rd,c}$: resistencia a cortante o punzonamiento del hormigón; $V_{Rd,c}^*$: resistencia mejorada a cortante o punzonamiento del hormigón; A_{sw} : área del armado de cortante; f_{ywd} : límite elástico de cálculo del acero de la armadura de cortante; $f_{ywd,ef}$: valor de cálculo de la resistencia eficaz de la armadura de punzonamiento ($250 + 0.25d \leq f_{ywd}$); γ_v : factor empleado para determinar la fracción de momento flector que se transfiere a la losa por la excentricidad del cortante en las conexiones viga-columna; e_u : excentricidad total de la carga aplicada; W_1 : propiedad del perímetro crítico análoga al módulo plástico

2.3.3.2 ACI 318-14

Las secciones de comprobación de punzonamiento y cortante que define el ACI 318-14 se sitúan a $0.5d$ y d respectivamente desde el borde de la carga puntual o apoyo (secciones (1) a (4) de la Figura 2.11). La normativa remite a las *Special Investigations* recogidas en el *CRSI Design Handbook* [53] para aquellas situaciones en las que la carga se localiza cerca del apoyo; $w < d$ en el caso de cortante y $w < 0.5d$ para punzonamiento. La reciente *Design Guide for Pile Caps* [48], publicada también por el CRSI (Concrete Reinforcing Steel Institute), añade las secciones de comprobación indicadas en la Figura 2.11: (1*) y (3*) entorno al pilar, considerando una resistencia a cortante y punzonamiento mejorada.

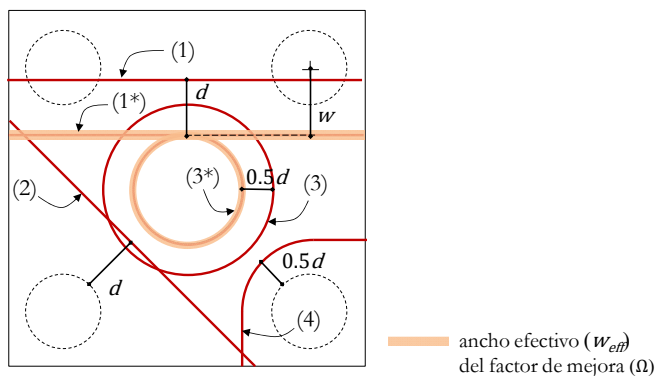


Figura 2.11 Superficies de control asociadas a los distintos modos de fallo de cortante o punzonamiento según ACI 318-14

En la Tabla 2.4 se resumen los valores de la **resistencia a cortante** del hormigón ($v_{Rd,c}$) y el factor de mejora (Ω) a emplear en la Ec.(2.12) para las comprobaciones de cortante. En caso de que se disponga armadura de cortante, su contribución ($V_{Rd,s}$) se añade a la resistencia proporcionada por la sección de hormigón ($V_{Rd,c}$).

$$V_{Ed} \leq \Omega v_{Rd,c} b d = V_{Rd,c} \quad (2.12)$$

Tabla 2.4 Principales parámetros de las formulaciones de cortante y punzonamiento del ACI 318-14, para elementos sin armadura de cortante

Sección en Factores sobre el Elementos sin armadura de cortante
Figura 2.11 cortante aplicado

| b/u_1 | $1/\Omega$ | β | $v_{Rd,c}$ | Ω | w_{eff} |
|---------------------|------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| (1) | x | x | mínimo: $\begin{cases} 0.16\lambda\sqrt{f_{ck}} + 17\rho_l \frac{V_1}{M_1} d \\ 0.16\lambda\sqrt{f_{ck}} + 17\rho_l \\ 0.29\lambda\sqrt{f_{ck}} \end{cases}$ | x | x |
| (1*) $w/d < 1$ | x | x | $0.16\lambda\sqrt{f_{ck}} + 17\rho_l \frac{V_{1*}}{M_{1*}} d$ | $\frac{d}{w} \left[3.5 - 2.5 \left(\frac{M_{1*}}{V_{1*} d} \right) \right]$ | b |
| (2) | x | x | $0.17\lambda\sqrt{f_{ck}}$ | x | x |
| (3), (4) | x | $1 + \frac{\gamma_v e_u c_{AB} u_1 d}{J_c}$ | mínimo: $\begin{cases} 0.33\lambda\sqrt{f_{ck}} \\ 0.17 \left(1 + \frac{2}{c_1/c_2} \right) \lambda\sqrt{f_{ck}} \\ 0.083 \left(2 + \frac{\alpha_s d}{u_1} \right) \lambda\sqrt{f_{ck}} \end{cases}$ | x | x |
| (3*) $w/d < 0.5$ | x | $1 + \frac{\gamma_v e_u c_{AB} u_0 d}{J_c}$ | $0.17\lambda\sqrt{f_{ck}}$ | $\frac{d}{w} \left(1 + \frac{d}{c} \right)$ | u_0 |

(1),(2): planos de fallo por cortante

(3): perímetro crítico de punzonamiento entorno a la columna

(4): perímetro crítico de punzonamiento entorno al pilote

b : ancho efectivo de cortante; u_1 : perímetro crítico de punzonamiento; $1/\Omega$: factor que tiene en cuenta la proximidad carga-apoyo; β : coeficiente de excentricidad; $v_{Rd,c}$: valor de cálculo de la resistencia del hormigón a lo largo de la sección crítica considerada; Ω : factor de mejora de la resistencia del hormigón; w_{eff} : ancho efectivo para la aplicación del factor de mejora Ω ; a_v : vano libre de cortante; d : canto útil; ρ_l : cuantía de armadura adherente de tracción; λ : factor que permite considerar las propiedades del hormigón ligero; f_{ck} : resistencia característica a compresión del hormigón; V_1, V_{1*} : esfuerzo cortante en las secciones (1), (1*); M_1, M_{1*} : momento flector en las secciones (1), (1*); w : vuelo; $V_{Rd,c}$: resistencia a cortante o punzonamiento del hormigón; A_{sw} : área del armado de cortante; f_{yw} : límite elástico de cálculo del acero de la armadura de cortante; γ_v : factor empleado para determinar la fracción de momento flector que se transfiere a la losa por la excentricidad del cortante en las conexiones viga-columna; e_u : excentricidad total de la carga aplicada; c_{AB} : lado del rectángulo equivalente a la sección de control, paralelo al eje de flexión; u_0 : perímetro del pilar o pilote; J_c : propiedad del perímetro crítico análoga al momento polar de inercia; c_1 : lado largo del pilar; c_2 : lado corto del pilar; α_s : 40 pilar interior, 30 pilar de borde, 20 pilar de esquina; c : lado o diámetro del pilar

Tabla 2.5 Principales parámetros de las formulaciones de cortante y punzonamiento del ACI 318-14, para elementos con armadura de cortante

| Sección en Figura 2.11 b, u_l | Elementos con armado de cortante |
|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (1), (1*) y (2) | $V_{Rd,c} + A_{sw}f_{ywd}$, A_{sw} dentro de d |
| (3), (4) | $0.17\lambda\sqrt{f_{ck}} + A_{sw}f_{ywd} \leq \phi 0.5\sqrt{f_{ck}}$ A_{sw} dentro de d |
| (3*) para $w/d < 0.5$ | No considerado por la <i>Special Investigation</i> del CRSI |

(1),(2): planos de fallo por cortante
 (3): perímetro crítico de punzonamiento entorno a la columna
 (4): perímetro crítico de punzonamiento entorno al pilote

b : ancho efectivo de cortante; u_l : perímetro crítico de punzonamiento; λ : factor que permite considerar las propiedades del hormigón ligero; f_{ck} : resistencia característica a compresión del hormigón; V_l, V_l : esfuerzo cortante en las secciones (1), (1*); M_l, M_l : momento flector en las secciones (1), (1*); w : vuelo; $V_{Rd,c}$: resistencia a cortante o punzonamiento del hormigón; A_{sw} : área del armado de cortante; f_{ywd} : límite elástico de cálculo del acero de la armadura de cortante; ϕ : factor de reducción de resistencia, para cortante se toma 0.75

Por otra parte, la **comprobación de punzonamiento** permite considerar la transferencia de parte del momento flector del pilar a la losa ($\gamma_v M$), aceptando una distribución lineal de tensiones tangenciales entorno al perímetro crítico (u_l). Se define un factor β en la Tabla 2.4, análogo al descrito por el EC-2 para hallar la tensión máxima solicitante en el perímetro. La Ec.(2.13) recoge de forma compacta la formulación de punzonamiento para elementos cuya esbeltez sea $w/d \geq 0.5$. Si se dispone armadura de punzonamiento, su contribución ($V_{Rd,s}$) puede sumarse a la del hormigón limitada a $0.17\lambda\sqrt{f_c}$ (ver Tabla 2.5).

$$\beta V_{Ed} \leq v_{Rd,c} u_l d = V_{Rd,c} \quad (2.13)$$

Para encepados más rígidos ($w/d < 0.5$), la Special Investigation del CRSI [29] propone evaluar la resistencia a punzonamiento mejorada ($\Omega v_{Rd,c}$) en el perímetro del pilar (u_0), según la Ec.(2.14). No existe información sobre la consideración de la armadura de punzonamiento en estos casos. Tampoco sobre el efecto de la excentricidad de carga en el pilar.

$$V_{Ed} \leq \Omega v_{Rd,c} u_0 d = V_{Rd,c} \quad (2.14)$$

Capítulo 3

Programa experimental

En este capítulo se describe el programa experimental que constituye el eje central de la tesis. Los ensayos han sido realizados en los laboratorios del Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH) de la Universitat Politècnica de València (UPV) y financiados por el Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España, dentro del Plan Nacional de I+D+i (proyecto BIA2012-32300).

En primer lugar, se describe el diseño de los especímenes que conforman la campaña experimental. Para ello se presenta la selección de los parámetros que interesa analizar en las distintas series por su influencia en la resistencia de los encepados, incluyendo como novedad el estudio de la excentricidad de la carga aplicada. A continuación, se concretan las combinaciones de estos parámetros que componen las series experimentales planteadas y la carga de diseño esperable en cada ensayo.

Se presenta también el protocolo de ensayo que se ha seguido, desde la fabricación de las piezas, su instrumentación, configuración del ensayo hasta la fase final de carga y rotura.

3.1. Diseño de especímenes

3.1.1. Parámetros de estudio

Para escoger los principales parámetros, cuya influencia debe considerarse en los ensayos de encepados de más de dos pilotes, se realiza un análisis previo de aquellos que han resultado significativos en las campañas experimentales llevadas a cabo por otros autores hasta ahora, y que han sido descritas en el *Capítulo 2*. La selección de estos parámetros está enfocada a completar los resultados de investigaciones previas, para avanzar en el conocimiento sobre la respuesta estructural de los encepados de más de dos pilotes.

Uno de los principales objetivos es analizar por primera vez el efecto de la excentricidad de la carga y su relación con las variables que se han revelado más significativas en investigaciones previas: la relación vuelo-canto y la configuración de armado. Para ello, cada uno de estos parámetros se estudiará a tres niveles. Además, la influencia del número de pilotes se analizará a dos niveles: tres o cuatro pilotes. Los valores concretos de los niveles de cada parámetro se recogen de forma resumida en la *Tabla 3.1* y se desarrollan a continuación.

Tabla 3.1 Parámetros seleccionados para la campaña experimental y sus niveles de estudio

| Parámetro | Niveles | | |
|---------------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|-------------------------------|
| Excentricidad de la carga (e_{xy}) | N ($e_x=e_y=0m$) | NMM ($e_x=e_y=0.15/\sqrt{2}m$) | NM ($e_x=0m; e_y=0.15m$) |
| Relación vuelo-canto ^a (w/h) | A ($h=0.25m$) | B ($h=0.35m$) | C ($h=0.45m$) |
| Configuración de armado (A_{si}) | 1 (A_{sB}) | 2 ($A_{sB}+A_{sH}$) | 3 ($A_{sB}+A_{sH}+A_{sV}$) |
| Número de pilotes (n) | 3 pilotes | 4 pilotes | |

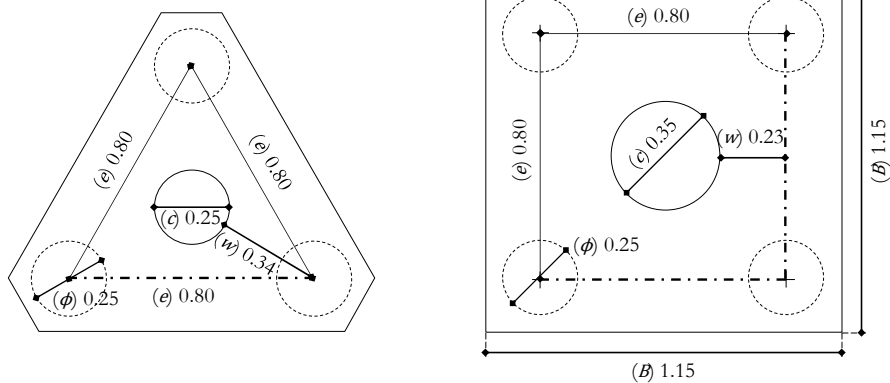
e_{xy} : tipo de excentricidad de la carga aplicada [N: carga centrada, NMM: flexión compuesta biaxial, NM: flexión compuesta uniaxial]; e_x : excentricidad desde el eje-x; e_y : excentricidad desde el eje-y;
 w : distancia del borde de la columna al eje del pilote; h : canto [A: 0.25m, B: 0.35m, C: 0.45m];
 A_{si} : configuración de armado; A_{sB} : armado principal concentrado en bandas; A_{sH} : armado secundario horizontal distribuido; A_{sV} : armado secundario vertical en cercos; n : número de pilotes

^a la variación en la relación vuelo-canto se consigue variando únicamente el canto (h) para un vuelo (w) constante

- **Excentricidad de la carga (e_{xy}):** los esfuerzos que se transmiten al encepado a través del pilar están constituidos generalmente por la combinación de un esfuerzo axial y momentos flectores en una o dos direcciones. Sin embargo, hasta la fecha todos los estudios experimentales llevados a cabo para analizar el comportamiento de los encepados se han realizado bajo carga centrada. Para la presente serie experimental, se fija el valor de la excentricidad de forma que se asegure la transmisión de tracciones a través del pilar, y que a la vez garantice reacciones de compresión en los pilares. Por las dimensiones del encepado y la carga de rotura esperable, una excentricidad total (e_t) de 0.15m cumple ambos criterios. Se estudia además la influencia de la dirección en la que se aplica esta excentricidad, hacia un pilote ($e_x=e_y=0.15/\sqrt{2}$ m) o hacia una banda ($e_x=0$. m; $e_y=0.15$ m). Se incluye también una serie solicitada por carga centrada ($e_x=e_y=0$) para comparar sus resultados con los dos casos anteriores.
- **Relación vuelo-canto (w/d):** las campañas experimentales revisadas describen la influencia determinante de este parámetro en la resistencia y modo de rotura de los encepados ensayados. Para $w/d < 0.5$, se tienen ángulos de inclinación de las bielas de más de 45° y se han descrito modos de rotura frágiles. Mientras que con $w/d > 0.5$, el ángulo de inclinación de las bielas disminuye y se registran cargas de rotura menores a las de diseño (por MBT) y modos de rotura complejos similares al punzonamiento. Los ensayos experimentales hasta la fecha han centrado su interés principalmente en los encepados más rígidos ($w/d > 1$), aunque la EHE-08 y el ACI 318-11 consideran rígidos todos aquellos encepados cuya relación vuelo-canto (w/d) sea menor o igual a 2.

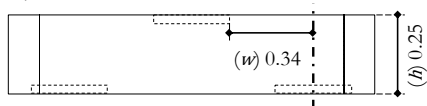
Con el objetivo de ampliar este rango de estudio a encepados de mayor esbeltez, cumpliendo a la vez la condición de rígidos, en la presente campaña experimental se definieron especímenes de tres cantos (h) diferentes (0.25m, 0.35m y 0.45m, ver Figura 3.1c,d) para una distancia entre pilotes (e) constante de 0.80m. Así, los encepados que componen la campaña experimental presentan una relación vuelo-canto (w/d) que varía entre 0.56-1.68, con lo que son esperables modos de fallo por punzonamiento en los que la presencia de armadura secundaria horizontal y vertical puede resultar más eficaz.

a) PLANTA TIPOS A, B Y C

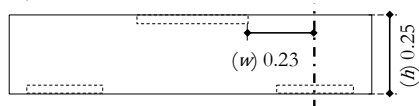


b) ALZADO TIPO A

$w/d = 1.68$

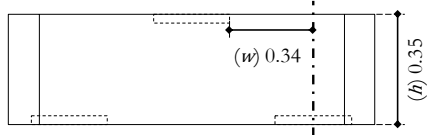


$w/d = 1.10$

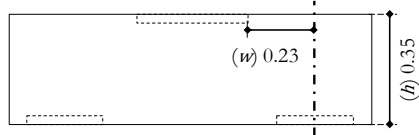


c) ALZADO TIPO B

$w/d = 1.12$

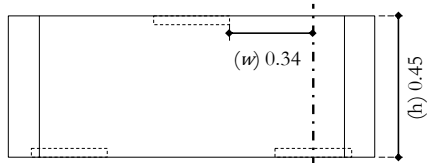


$w/d = 0.74$



d) ALZADO TIPO C

$w/d = 0.84$



$w/d = 0.56$

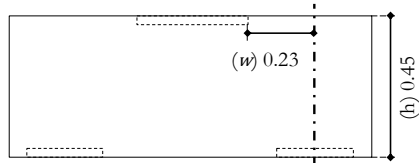


Figura 3.1 Geometría y dimensiones de los encepados de tres y cuatro pilotes

- **Configuración de armado (A_{st}):** Los esquemas de armado en bandas han resultado ser más eficaces que los distribuidos, para la misma cuantía de armadura, en condiciones de carga centrada. El área de esta armadura se determina con modelos de bielas y tirantes de descarga directa pilar-pilote. Pero además del armado en bandas, es habitual disponer una armadura distribuida complementaria para el control de la

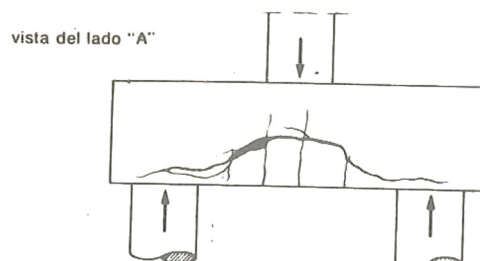
fisuración en la base. Las normativas que recomiendan explícitamente su empleo no coinciden en las proporciones entre ambos grupos de armaduras (A_{sB} y A_{sH} en la Tabla 3.2). El EC-2 indica que el 100% del armado de tracción principal debe concentrarse en bandas conectando las cabezas de los pilotes, y únicamente se requiere armado distribuido en caso de no alcanzar el armado mínimo. La EHE-08 también asigna el 100% de la tracción en los tirantes al armado en bandas, pero además añade un 25% de esta área como armado distribuido horizontal. La BS 5400-4:1990 recomienda concentrar el 80% del armado en bandas y el 20% restante colocarlo distribuido en la base. Mientras que la norma brasileña NBR 6118:2014 [8] asigna al menos un 85% del área necesaria al armado en bandas y un 20% al distribuido.

Tabla 3.2 Distribuciones de armado recomendadas para encepados

| Normativa | A_{sB} (%) | A_{sH} (%) | A_{sV} (%) |
|----------------|--------------|--------------|----------------------------------|
| EC-2 | 100 | Armado min. | - |
| EHE-08 | 100 | 25 | $V_{Ed}/(1.5n)$ |
| BS 5400-4:1990 | 80 | 20 | - |
| NBR 6118:2014 | >85 | 20 | Si $A_{sH} > 25\%$ ó $e > 3\phi$ |

A_{sB} : armado principal concentrado en bandas; A_{sH} : armado secundario horizontal distribuido; A_{sV} : armado secundario vertical en cercos; V_{Ed} : carga vertical de diseño transmitida por el pilar; n : número de pilotes; e : separación entre pilotes; ϕ : diámetro del pilote

Además del armado secundario horizontal, la Instrucción española EHE-08 y la brasileña NBR 6118:2004, añaden una armadura secundaria vertical (A_{sV} en la Tabla 3.2) dispuesta en cercos atando las bandas, cuya misión es evitar el *splitting* de las bielas diagonales y asegurar que se alcanza la carga de diseño proporcionada por los tirantes (armado en bandas, A_{sB}) que configuran el MBT. Esta disposición de cercos verticales había sido propuesta previamente por Leonhardt [47], para coser las fisuras horizontales (llamadas de suspensión) que aparecían en las caras de aquellos encepados cuya distancia entre pilotes era mayor que tres diámetros, debido al posible empuje vertical en las bandas (Figura 3.2).



FUENTE: Leonhardt, F. [47]

Figura 3.2 Fisura horizontal de suspensión debida al empuje vertical en la banda

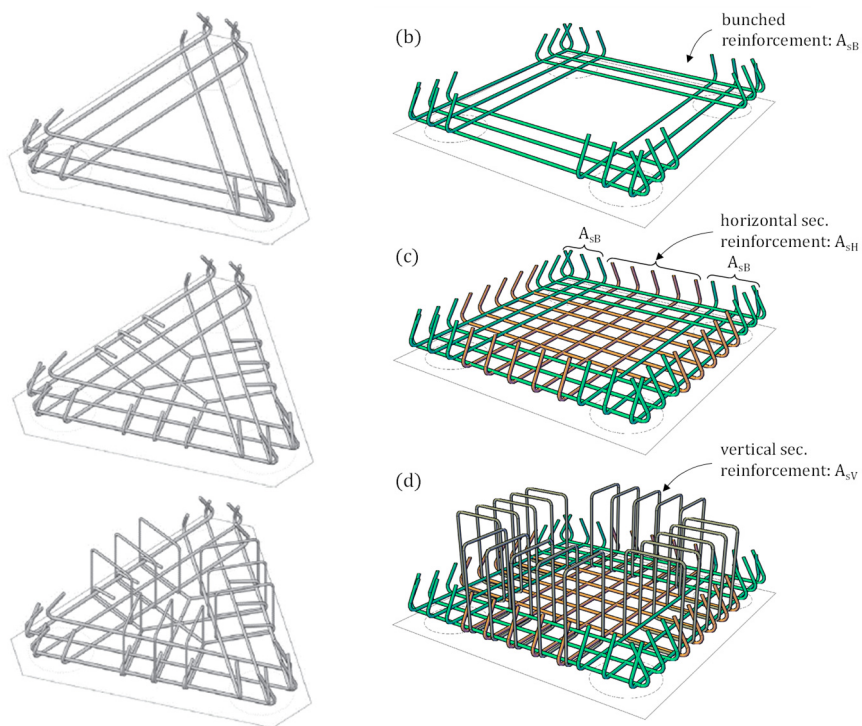


Figura 3.3 Configuraciones de armado estudiadas para encepados de tres y cuatro pilotes
a) Tipo 1: A_{sB} , b) Tipo 2: $A_{sB} + A_{sH}$, c) Tipo 3: $A_{sB} + A_{sH} + A_{sV}$

Para analizar la contribución de las armaduras secundarias, que se disponen habitualmente en encepados pero cuya contribución a la resistencia no es tenida en cuenta por los tradicionales modelos de bielas y tirantes, se definen las tres configuraciones de armado indicadas en la Figura 3.3: especímenes con armado concentrado en bandas (Tipo 1: A_{sB}), especímenes con armado en bandas junto con armadura secundaria horizontal (Tipo 2: $A_{sB}+A_{sH}$) y la configuración anterior añadiéndole armadura secundaria vertical en cercos (Tipo 3: $A_{sB}+A_{sH}+A_{sV}$).

- **Número de pilotes (n):** se van a ensayar encepados de tres pilotes (sistema de apoyo isostático) y de cuatro pilotes (sistema de apoyo redundante). Hasta la fecha no se han reportado diferencias significativas en la respuesta de estos dos tipos de encepados, pero interesa compararlos en caso de que se produzcan roturas por punzonamiento.

Existen otros parámetros que completan la definición de los especímenes y cuyo valor se mantiene constante en toda la campaña experimental:

- **Geometría en planta de los encepados (ϕ , e , r_p , c):** se fijan las principales dimensiones en planta de los encepados (Figura 3.1a,b) de forma que tengan unas proporciones constructivas y escala real, sin que la carga de diseño sobrepase la limitación de la capacidad del pórtico de reacción (2000kN). Son comunes para todos los ensayos el diámetro de los pilotes ($\phi=0.25\text{m}$), la separación entre pilotes ($e=0.80\text{m}$) algo superior a tres veces el diámetro del pilote para evitar el efecto de grupo desde un punto de vista geotécnico, y la distancia desde el perímetro de los pilotes al borde del encepado ($r_p=0.05\text{m}$). Por sencillez constructiva y para evitar el efecto de concentración de tensiones en las esquinas de pilares cuadrados, reportado por Otsuki y Suzuki [34], se diseña un pilar de sección circular con un diámetro (c) de 0.25m para encepados de tres pilotes y de 0.35m para los encepados de cuatro pilotes.
- **Recubrimiento geométrico de las armaduras (r_{geo}):** se fija en 40mm. Aunque la EHE-08 y EC-2 indican recubrimientos mínimos mayores (entorno a 70mm) para piezas hormigonadas contra el terreno, la fabricación de estas piezas se va a realizar en el laboratorio con encofrado metálico y con un control intenso de la ejecución, lo que hace innecesario respetar este mínimo constructivo habitual.

- **Resistencia del hormigón (f_c):** los encepados se fabrican generalmente con hormigones de resistencia normal, puesto que se diseñan como elementos masivos. Las campañas experimentales existentes no han descrito una influencia significativa de esta variable en la resistencia del encepado. Por estas razones, para el ensayo se define una resistencia de diseño de 25MPa para todas las series.

3.1.2. Definición de las series que conforman la campaña experimental

La combinación de todas las posibles variaciones de los parámetros seleccionados, daría lugar a una campaña experimental excesivamente extensa y costosa. Para limitarla a 30 especímenes se combinan únicamente algunos niveles de estos parámetros, según se indica en la Tabla 3.3. Por ejemplo, el efecto de la excentricidad de carga se estudia únicamente en los encepados de cuatro pilotes, en los que se controla la carga aplicada desde los pilotes. Para estos especímenes solicitados por carga excéntrica, tampoco se definen configuraciones de armado sin armadura secundaria. El conjunto de encepados definidos en la Tabla 3.3 se agrupa en cuatro series según el número de pilotes y el tipo de sollicitación que se aplica en el ensayo: **serie 1** (3P-N), **serie 2** (4P-N), **serie 3** (4P-NMM), **serie 4** (4P-NM).

Para identificar los distintos parámetros que definen cada espécimen, se emplea una nomenclatura compuesta por cuatro variables:

nP-a-bc

El primer término “nP” indica el número de pilotes del encepado: pueden ser tres (3P) o cuatro (4P), dependiendo de la serie.

El segundo término “a” se refiere al tipo de sollicitación aplicada: carga centrada (N), flexión compuesta biaxial (NMM) o flexión compuesta uniaxial (NM).

La variable “b” identifica el canto total de la pieza: 0.25m (A), 0.35m (B) o 0.45m (C). Y por último, la variable “c” informa sobre la configuración de armado del encepado: especímenes con armado concentrado en bandas (1), especímenes con armado en bandas junto con armadura secundaria horizontal (2) y la configuración completa que incluye además armadura secundaria vertical en cercos (3).

Tabla 3.3 Combinaciones de los parámetros seleccionados que definen las series

| | | e_{xy} | | | | | | | | |
|-----|-----|--------------------|---------|---------|-------------------------|-----------|-----------|-------------------------------|----------|----------|
| | | N ($e_x=e_y=0$ m) | | | NMM ($e_x=e_y=0.11$ m) | | | NM ($e_x=0$ m; $e_y=0.15$ m) | | |
| n | h | A_{si} | | | A_{si} | | | A_{si} | | |
| | | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| 3 | A | 3P-N-A1 | 3P-N-A2 | 3P-N-A3 | | | | | | |
| | B | 3P-N-B1 | 3P-N-B2 | 3P-N-B3 | | | | | | |
| | C | 3P-N-C1 | 3P-N-C2 | 3P-N-C3 | | | | | | |
| 4 | A | 4P-N-A1 | 4P-N-A2 | 4P-N-A3 | | 4P-NMM-A2 | 4P-NMM-A3 | | 4P-NM-A2 | 4P-NM-A3 |
| | B | 4P-N-B1 | 4P-N-B2 | 4P-N-B3 | | 4P-NMM-B2 | 4P-NMM-B3 | | 4P-NM-B2 | 4P-NM-B3 |
| | C | 4P-N-C1 | 4P-N-C2 | 4P-N-C3 | | 4P-NMM-C2 | 4P-NMM-C3 | | 4P-NM-C2 | 4P-NM-C3 |

Serie 1: 3P-N, serie 2: 4P-N, serie 3: 4P-NMM, serie 4: 4P-NM

e_{xy} : tipo de excentricidad de la carga aplicada [N: carga centrada, NMM: flexión compuesta biaxial, NM: flexión compuesta uniaxial]; e_x : excentricidad desde el eje-x; e_y : excentricidad desde el eje-y;
 A_{si} : configuración de armado [1: A_{sB} , 2: $A_{sB}+A_{sH}$, 3: $A_{sB}+A_{sH}+A_{sV}$]; A_{sB} : armado principal concentrado en bandas; A_{sH} : armado secundario horizontal distribuido; A_{sV} : armado secundario vertical en cercos;
 n : número de pilotes [3, 4]; h : canto del encepado [A: 0.25m, B: 0.35m, C: 0.45m]

3.1.3. Configuración de armado

3.1.3.1 Modelos de bielas y tirantes para encepados de tres y cuatro pilotes

El diseño de la configuración de armado parte de las recomendaciones de la EHE-08, pero fundamentalmente busca activar dos MBT's: el de descarga directa de la carga hacia los pilotes a través de bielas diagonales y tirantes en la base (MBT-1), y un modelo complementario que incluye tirantes en la posición de las armaduras secundarias (MBT-2) y el cual proporciona una visión más precisa de los flujos de tensiones desarrollados en el interior del encepado.

Los modelos de descarga directa considerados (MBT-1) se presentan en la Figura 3.4 para el caso de carga centrada en encepados de tres y cuatro pilotes.

Pero la disposición de armadura secundaria vertical y horizontal puede favorecer el desarrollo de mecanismos resistentes secundarios que no se están teniendo en cuenta actualmente con el diseño basado en el MBT-1. Una posible distribución de las compresiones y tracciones en el interior del encepado, coherente con la disposición de las armaduras secundarias vendría dada por los MBT-2. En la Figura 3.5 se presenta el ejemplo para los encepados de pilotes solicitados por carga centrada.

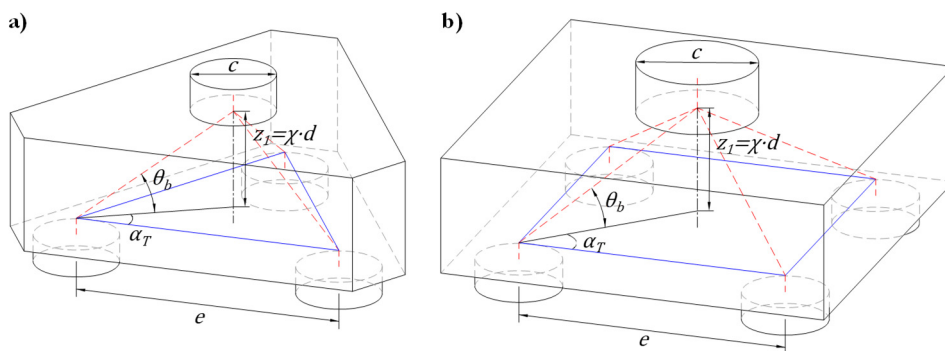


Figura 3.4 MBT-1 de descarga directa

a) Encepado de tres pilotes, carga centrada; b) Encepado de cuatro pilotes, carga centrada

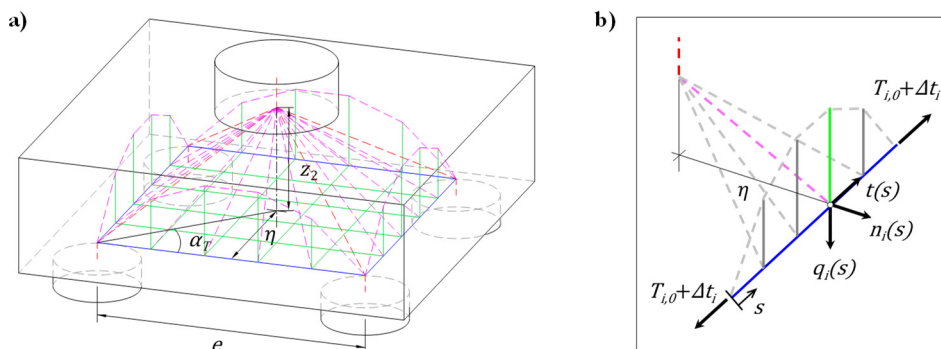


Figura 3.5 MBT-2 descarga distribuida a las bandas

a) Encepado de cuatro pilotes bajo carga centrada; b) Detalle de la transmisión de la tracción en las bandas por el arco atirantado

Según el modelo secundario, la carga vertical se trasfiere a las bandas mediante bielas inclinadas. La componente vertical de estas bielas ($q_i(s)$), en la Figura 3.5 es transmitida mediante tirantes a un arco situado en el plano vertical entre pilotes. Este arco solamente genera reacciones verticales porque está atirantado por la armadura de bandas ($T_{i,0}$). A esta tracción se le añade un incremento de tracción a lo largo del tirante (Δt_i) debido al apoyo de las bielas en la banda ($t(s)$). La componente horizontal de las bielas inclinadas (n_i) genera un esfuerzo de membrana sobre el plano inferior del encepado, que requiere un armado perpendicular a la banda.

En el *Capítulo 5* se concreta una propuesta de verificación basada en este concepto de descarga distribuida a las bandas.

3.1.3.2 Determinación del área de armado

El área de cada grupo de armado se obtiene a partir de los MBTs descritos anteriormente para los casos de carga centrada, y la misma configuración se repite en las series con excentricidad para estudiar la influencia del tipo de sollicitación. La carga de diseño en el pilar (P_d) se fija para los encepados de tres y cuatro pilotes en 500kN, y la tensión de plastificación de las armaduras se estima en 500MPa.

El **armado en bandas (A_{sb})** se obtiene de la Eq.(3.1), deducida a partir del MBT-1 de descarga directa (Figura 3.4). Para definir la posición del nudo superior de este modelo respecto al plano de armado ($\chi \cdot d$), se toman como referencia las propuestas de la EHE-08 para encepados rígidos de tres y cuatro pilotes. La instrucción española divide la carga del pilar en tantas partes como número de pilotes, y sitúa los nudos superiores a $0.25c$ del eje del pilar y $0.85d$ del plano de armado. Dicho planteamiento geométrico resulta equivalente al MBT-1, considerando los factores $\chi_{EHE,3P}=0.98$ y $\chi_{EHE,4P}=1.01$ en la Eq.(3.1) para encepados de tres y cuatro pilotes respectivamente.

$$A_{sb} = \frac{(P_d/n) \cdot e}{\chi_{EHE} \cdot d \cdot 4 \cos^2 \alpha_T \cdot f_y} \quad (3.1)$$

$$\text{donde: } \chi_{EHE} = \frac{0.85 \cdot e / [2 \cos \alpha_T]}{e / [2 \cos \alpha_T] - 0.25 \cdot c}, \quad \alpha_T = \begin{cases} 30^\circ, & n = 3 \text{ pilotes} \\ 45^\circ, & n = 4 \text{ pilotes} \end{cases}$$

En los encepados tipo 3, se dispone un área de **armado secundario vertical (A_{sv})** cuya capacidad resistente sea mayor o igual a la indicada por la EHE-08, según la Eq.(3.2).

$$A_{sv} = \frac{P_d}{1.5n \cdot f_y} \quad (3.2)$$

El área de la **armadura secundaria horizontal (A_{sh})** debe permitir movilizar esta tracción vertical en los tirantes ($P_d / 1.5n$) según el MBT-2 propuesto en la Figura 3.5. Resolviendo el equilibrio de fuerzas planteado en la Figura 3.5b, resulta la Eq.(3.3). El área dispuesta debe cumplir además el mínimo indicado por la EHE-08 (25% de la capacidad mecánica total de las bandas por dirección).

$$A_{sH} = \frac{\eta P_d}{z_2 1.5n \cdot f_y} \quad (3.3)$$

donde: $\eta = \frac{e}{2} \tan \alpha_T$, $\alpha_T = \begin{cases} 30^\circ, & n = 3 \text{ pilotes} \\ 45^\circ, & n = 4 \text{ pilotes} \end{cases}$

El área de armado realmente dispuesto en los especímenes de cada una de las series se describe en las siguientes tablas, junto con los principales parámetros que describen su geometría.

Tabla 3.4 Principales parámetros y detalle de armado de la serie 1

| Espécimen | e (m) | c (m) | ϕ (m) | w (m) | h (m) | d (m) | e_x, e_y (m) | A_{st} |
|-----------|------------|------------|---------------|------------|------------|------------|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 3P-N-A1 | 0.80 | 0.25 | 0.25 | 0.34 | 0.25 | 0.19 | (0,0) | A_{sB} : 3x(4 ϕ 12) A_{sH} : - A_{sV} : - |
| 3P-N-A2 | 0.80 | 0.25 | 0.25 | 0.34 | 0.25 | 0.19 | (0,0) | A_{sB} : 3x(4 ϕ 12) A_{sH} : 3x(3 ϕ 10) A_{sV} : - |
| 3P-N-A3 | 0.80 | 0.25 | 0.25 | 0.34 | 0.25 | 0.19 | (0,0) | A_{sB} : 3x(4 ϕ 12) A_{sH} : 3x(3 ϕ 10) A_{sV} : 3x(3c ϕ 8) |
| 3P-N-B1 | 0.80 | 0.25 | 0.25 | 0.34 | 0.35 | 0.30 | (0,0) | A_{sB} : 3x(2 ϕ 12+1 ϕ 10) A_{sH} : - A_{sV} : - |
| 3P-N-B2 | 0.80 | 0.25 | 0.25 | 0.34 | 0.35 | 0.30 | (0,0) | A_{sB} : 3x(2 ϕ 12+1 ϕ 10) A_{sH} : 3x(3 ϕ 8) A_{sV} : - |
| 3P-N-B3 | 0.80 | 0.25 | 0.25 | 0.34 | 0.35 | 0.30 | (0,0) | A_{sB} : 3x(2 ϕ 12+1 ϕ 10) A_{sH} : 3x(3 ϕ 8) A_{sV} : 3x(3c ϕ 8) |
| 3P-N-C1 | 0.80 | 0.25 | 0.25 | 0.34 | 0.45 | 0.40 | (0,0) | A_{sB} : 3x(3 ϕ 10) A_{sH} : - A_{sV} : - |
| 3P-N-C2 | 0.80 | 0.25 | 0.25 | 0.34 | 0.45 | 0.40 | (0,0) | A_{sB} : 3x(3 ϕ 10) A_{sH} : 3x(3 ϕ 8) A_{sV} : - |
| 3P-N-C3 | 0.80 | 0.25 | 0.25 | 0.34 | 0.45 | 0.40 | (0,0) | A_{sB} : 3x(3 ϕ 10) A_{sH} : 3x(3 ϕ 8) A_{sV} : 3x(3c ϕ 8) |

w : vuelo; h : canto total del encepado; d : canto útil del encepado; e_x : excentricidad desde el eje-x; e_y : excentricidad desde el eje-y; A_{sB} : armado principal concentrado en bandas; A_{sH} : armado secundario horizontal distribuido; A_{sV} : armado secundario vertical en cercos; ϕ : diámetro de la armadura

Tabla 3.5 Principales parámetros y detalle de armado de la serie 2

| Espécimen | e (m) | c (m) | ϕ (m) | w (m) | h (m) | d (m) | e_x, e_y (m) | A_{st} |
|------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 4P-N-A1 | 0.80 | 0.35 | 0.25 | 0.23 | 0.25 | 0.19 | (0,0) | A_{sB} : 4x(2 ϕ 16+1 ϕ 12) A_{sH} : - A_{sV} : - |
| 4P-N-A2 | 0.80 | 0.35 | 0.25 | 0.23 | 0.25 | 0.19 | (0,0) | A_{sB} : 4x(2 ϕ 16+1 ϕ 12) A_{sH} : 2x(5 ϕ 10) A_{sV} : - |
| 4P-N-A3 | 0.80 | 0.35 | 0.25 | 0.23 | 0.25 | 0.19 | (0,0) | A_{sB} : 4x(2 ϕ 16+1 ϕ 12) A_{sH} : 2x(5 ϕ 10) A_{sV} : 4x(5c ϕ 8) |
| 4P-N-B1 | 0.80 | 0.35 | 0.25 | 0.23 | 0.35 | 0.30 | (0,0) | A_{sB} : 4x(3 ϕ 12) A_{sH} : - A_{sV} : - |
| 4P-N-B2 | 0.80 | 0.35 | 0.25 | 0.23 | 0.35 | 0.30 | (0,0) | A_{sB} : 4x(3 ϕ 12) A_{sH} : 2x(5 ϕ 8) A_{sV} : - |
| 4P-N-B3 | 0.80 | 0.35 | 0.25 | 0.23 | 0.35 | 0.30 | (0,0) | A_{sB} : 4x(3 ϕ 12) A_{sH} : 2x(5 ϕ 8) A_{sV} : 4x(5c ϕ 8) |
| 4P-N-C1 | 0.80 | 0.35 | 0.25 | 0.23 | 0.45 | 0.40 | (0,0) | A_{sB} : 4x(2 ϕ 10+1 ϕ 12) A_{sH} : - A_{sV} : - |
| 4P-N-C2 | 0.80 | 0.35 | 0.25 | 0.23 | 0.45 | 0.40 | (0,0) | A_{sB} : 4x(2 ϕ 10+1 ϕ 12) A_{sH} : 2x(5 ϕ 8) A_{sV} : - |
| 4P-N-C3 | 0.80 | 0.35 | 0.25 | 0.23 | 0.45 | 0.40 | (0,0) | A_{sB} : 4x(2 ϕ 10+1 ϕ 12) A_{sH} : 2x(5 ϕ 8) A_{sV} : 4x(5c ϕ 8) |

w: vuelo; *h*: canto total del encepado; *d*: canto útil del encepado; *e_x*: excentricidad desde el eje-x; *e_y*: excentricidad desde el eje-y; *A_{sB}*: armado principal concentrado en bandas; *A_{sH}*: armado secundario horizontal distribuido; *A_{sV}*: armado secundario vertical en cercos; ϕ : diámetro de la armadura

Tabla 3.6 Principales parámetros y detalle de armado de la serie 3

| Espécimen | e (m) | c (m) | ϕ (m) | w (m) | h (m) | d (m) | e_x, e_y (m) | A_{st} |
|-----------|------------|------------|---------------|------------|------------|------------|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 4P-NMM-A2 | 0.80 | 0.35 | 0.25 | 0.23 | 0.25 | 0.19 | (0.11, 0.11) | A_{sB} : 4x(2 ϕ 16+1 ϕ 12) A_{sH} : 2x(5 ϕ 10) A_{sV} : - |
| 4P-NMM-A3 | 0.80 | 0.35 | 0.25 | 0.23 | 0.25 | 0.19 | (0.11, 0.11) | A_{sB} : 4x(2 ϕ 16+1 ϕ 12) A_{sH} : 2x(5 ϕ 10) A_{sV} : 4x(5c ϕ 8) |
| 4P-NMM-B2 | 0.80 | 0.35 | 0.25 | 0.23 | 0.35 | 0.30 | (0.11, 0.11) | A_{sB} : 4x(3 ϕ 12) A_{sH} : 2x(5 ϕ 8) A_{sV} : - |
| 4P-NMM-B3 | 0.80 | 0.35 | 0.25 | 0.23 | 0.35 | 0.30 | (0.11, 0.11) | A_{sB} : 4x(3 ϕ 12) A_{sH} : 2x(5 ϕ 8) A_{sV} : 4x(5c ϕ 8) |
| 4P-NMM-C2 | 0.80 | 0.35 | 0.25 | 0.23 | 0.45 | 0.40 | (0.11, 0.11) | A_{sB} : 4x(2 ϕ 10+1 ϕ 12) A_{sH} : 2x(5 ϕ 8) A_{sV} : - |
| 4P-NMM-C3 | 0.80 | 0.35 | 0.25 | 0.23 | 0.45 | 0.40 | (0.11, 0.11) | A_{sB} : 4x(2 ϕ 10+1 ϕ 12) A_{sH} : 2x(5 ϕ 8) A_{sV} : 4x(5c ϕ 8) |

w : vuelo; h : canto total del encepado; d : canto útil del encepado; e_x : excentricidad desde el eje-x;
 e_y : excentricidad desde el eje-y; A_{sB} : armado principal concentrado en bandas; A_{sH} : armado secundario horizontal distribuido; A_{sV} : armado secundario vertical en cercos; ϕ : diámetro de la armadura

Tabla 3.7 Principales parámetros y detalle de armado de la serie 4

| Espécimen | e (m) | c (m) | ϕ (m) | w (m) | h (m) | d (m) | e_x, e_y (m) | A_{st} |
|------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 4P-NM-A2 | 0.80 | 0.35 | 0.25 | 0.23 | 0.25 | 0.19 | (0, 0.15) | A_{sB} : 4x(2 ϕ 16+1 ϕ 12) A_{sH} : 2x(5 ϕ 10) A_{sV} : - |
| 4P-NM-A3 | 0.80 | 0.35 | 0.25 | 0.23 | 0.25 | 0.19 | (0, 0.15) | A_{sB} : 4x(2 ϕ 16+1 ϕ 12) A_{sH} : 2x(5 ϕ 10) A_{sV} : 4x(5c ϕ 8) |
| 4P-NM-B2 | 0.80 | 0.35 | 0.25 | 0.23 | 0.35 | 0.30 | (0, 0.15) | A_{sB} : 4x(3 ϕ 12) A_{sH} : 2x(5 ϕ 8) A_{sV} : - |
| 4P-NM-B3 | 0.80 | 0.35 | 0.25 | 0.23 | 0.35 | 0.30 | (0, 0.15) | A_{sB} : 4x(3 ϕ 12) A_{sH} : 2x(5 ϕ 8) A_{sV} : 4x(5c ϕ 8) |
| 4P-NM-C2 | 0.80 | 0.35 | 0.25 | 0.23 | 0.45 | 0.40 | (0, 0.15) | A_{sB} : 4x(2 ϕ 10+1 ϕ 12) A_{sH} : 2x(5 ϕ 8) A_{sV} : - |
| 4P-NM-C3 | 0.80 | 0.35 | 0.25 | 0.23 | 0.45 | 0.40 | (0, 0.15) | A_{sB} : 4x(2 ϕ 10+1 ϕ 12) A_{sH} : 2x(5 ϕ 8) A_{sV} : 4x(5c ϕ 8) |

w: vuelo; *h*: canto total del encepado; *d*: canto útil del encepado; *e_x*: excentricidad desde el eje-x; *e_y*: excentricidad desde el eje-y; *A_{sB}*: armado principal concentrado en bandas; *A_{sH}*: armado secundario horizontal distribuido; *A_{sV}*: armado secundario vertical en cercos; ϕ : diámetro de la armadura

3.2. Propiedades de los materiales

En esta sección se describen las características de los materiales empleados en la fabricación de los encepados (Figura 3.6): hormigón, acero de armaduras pasivas, barras de acero roscadas de alto límite elástico y acero estructural.

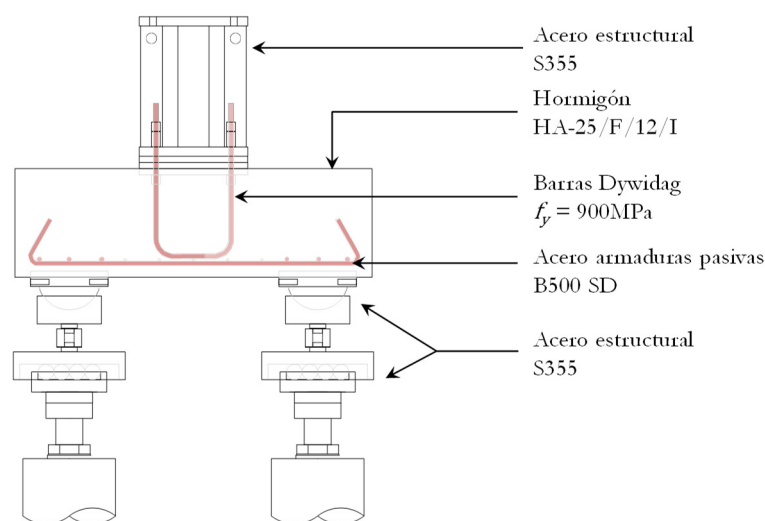


Figura 3.6 Definición de los materiales que componen los especímenes de ensayo

3.2.1. Hormigón

La fabricación de los encepados requiere un gran volumen de hormigón (0.25-0.50m³ por pieza), de una resistencia normal. Por esta razón se decide externalizar su fabricación a una central cercana que lo suministra directamente al laboratorio de ICITECH con camión hormigonera. Se solicita en todos los casos un hormigón de resistencia característica 25MPa, consistencia fluida, tamaño máximo de árido 12mm y clase general de exposición no agresiva (HA-25/F/12/I), según la denominación de la EHE-08.

Debido a la disponibilidad de espacio de acopio y de encofrados, se hormigonan tres piezas cada vez. Esto supone un total de 10 series de hormigonado. En cada una se extraen 18 probetas de control cilíndricas (150mm de diámetro y 300mm de altura):

- 2 probetas para conocer la resistencia a compresión del hormigón (UNE EN-12390-3:2009 [54]) suministrado a los 7 días. En caso de que el hormigón tuviera resistencias mayores a las esperables para esa

edad, podrían adelantarse los ensayos correspondientes para mantener una resistencia del hormigón lo más homogénea posible en todas las series. Estas probetas se curan en el molde durante 24 horas y se conservan hasta su rotura en las mismas condiciones que los especímenes.

- 4 probetas de control para ensayar a los 28 días, las cuales se curan en el molde durante 24 horas y después se conservan en cámara a 20°C y 100% de humedad, para cumplir las indicaciones de la UNE EN-12390-2:2009 [55]. Dos de estas probetas se ensayan a compresión simple (UNE EN-12390-3:2009 [54]) y las otras dos a tracción indirecta UNE EN-12390-6:2010 [56].
- 12 probetas de acompañamiento, 4 por espécimen, para determinar la resistencia del hormigón el mismo día del ensayo. Estas probetas se curan en el molde durante 24 horas y se conservan hasta su rotura en las mismas condiciones que los especímenes. Dos de estas probetas se ensayan a compresión simple (UNE EN-12390-3:2009 [54]) y las otras dos a tracción indirecta UNE EN-12390-6:2010 [56].

La resistencia media a compresión y tracción indirecta de cada espécimen se recoge en la Tabla 3.8. En el Anejo A se muestran con detalle los ensayos de caracterización de las propiedades mecánicas del hormigón, así como los resultados de las probetas de control.



Figura 3.7 Probetas de acompañamiento de los especímenes de la serie 4P-N

Tabla 3.8 Propiedades mecánicas del hormigón de los especímenes

| Serie horm. | Especímen | f_c (MPa) | f_{ct} (MPa) | Serie horm. | Especímen | f_c (MPa) | f_{ct} (MPa) |
|-------------|-----------|-------------|----------------|-------------|-----------|-------------|----------------|
| H1 | 3P-N-A1 | 23.3 | 2.5 | H6 | 4P-N-C1 | 31.9 | 3.6 |
| | 3P-N-A2 | 22.9 | 2.7 | | 4P-N-C2 | 36.3 | 2.8 |
| | 3P-N-A3 | 23.7 | 2.5 | | 4P-N-C3 | 34.0 | 2.7 |
| H2 | 3P-N-B1 | 24.7 | 3.2 | H7 | 4P-NMM-A2 | 36.4 | 3.3 |
| | 3P-N-B2 | 26.3 | 3.1 | | 4P-NMM-A3 | 39.2 | 3.8 |
| | 3P-N-B3 | 26.5 | 2.9 | | 4P-NMM-B2 | 39.0 | 3.3 |
| H3 | 3P-N-C1 | 24.0 | 3.1 | H8 | 4P-NMM-B3 | 29.9 | 2.7 |
| | 3P-N-C2 | 26.4 | 2.8 | | 4P-NMM-C2 | 30.0 | 3.1 |
| | 3P-N-C3 | 28.5 | 3.1 | | 4P-NMM-C3 | 30.5 | 3.2 |
| H4 | 4P-N-A1 | 27.7 | 3.2 | H9 | 4P-NM-A2 | 27.1 | 3.0 |
| | 4P-N-A2 | 29.5 | 3.1 | | 4P-NM-A3 | 30.6 | 3.1 |
| | 4P-N-A3 | 30.0 | 3.1 | | 4P-NM-B2 | 30.2 | 3.0 |
| H5 | 4P-N-B1 | 26.1 | 3.1 | H10 | 4P-NM-B3 | 28.1 | 3.0 |
| | 4P-N-B2 | 25.3 | 2.8 | | 4P-NM-C2 | 27.9 | 2.8 |
| | 4P-N-B3 | 29.9 | 2.2 | | 4P-NM-C3 | 28.8 | 2.7 |

f_c resistencia del hormigón a compresión; f_{ct} resistencia del hormigón a tracción

3.2.2. Acero

Se emplea un acero B500SD como armadura pasiva para los encepados. La armadura se encarga en tres lotes diferentes, el primero para la serie 1 (3P-N), el segundo para la serie 2 (4P-N) y el tercero para las series 2 y 3 (4P-NMM y 4P-NM). De cada lote y diámetro de barra corrugada se ensayan a tracción dos muestras según la UNE-EN ISO 15630-1:2010 [57]), para determinar su límite elástico (f_y) y la resistencia máxima a tracción (f_{max}). Los resultados se muestran en la Tabla 3.9 y la descripción completa de los ensayos puede encontrarse en el Anejo B.

Además del acero en armaduras pasivas, se emplean barras de pretensado ros-cadas tipo Dywidag, con un límite elástico característico de 900MPa, en el an-claje del pilar metálico auxiliar al encepado (Figura 3.6).

El acero empleado en la fabricación de los elementos auxiliares que forman parte del espécimen (placas de anclaje y pilar metálico auxiliar) así como en los elementos de carga y apoyo, es acero estructural S355. El límite elástico del material es 355MPa y su resistencia a tracción 490MPa.

Tabla 3.9 Propiedades mecánicas del acero en armaduras pasivas

| Serie | φ (mm) | f_y (MPa) | f_{max} (MPa) | Serie | φ (mm) | f_y (MPa) | f_{max} (MPa) |
|-------|-------------------|----------------|--------------------|--------|-------------------|----------------|--------------------|
| 3P-N | 8 | 570.0 | 677.0 | 4P-NMM | 8 | 550.8 | 648.3 |
| | 10 | 522.5 | 628.5 | 4P-NM | 10 | 554.8 | 644.4 |
| | 12 | 527.5 | 627.0 | | 12 | 533.7 | 629.9 |
| 4P-N | 8 | 573.3 | 650.9 | | 16 | 550.7 | 650.6 |
| | 10 | 519.3 | 634.7 | | | | |
| | 12 | 553.8 | 641.8 | | | | |
| | 16 | 554.8 | 644.8 | | | | |

φ : diámetro de la armadura; f_y : límite elástico del acero; f_{max} : resistencia máxima a tracción del acero

3.3. Fabricación de las piezas

La fabricación de las piezas se realizó en el laboratorio de elementos estructurales del Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH), de la Universitat Politècnica de València. La primera parte del protocolo de ensayo (Fases A-C) descrito en el Anejo C recoge con detalle las tareas a controlar durante la fase de fabricación.

El proceso comienza por la recepción de la ferralla y revisión de su geometría según los planos de definición de armado. Después se instrumentan las armaduras con galgas extensométricas (Figura 3.8). Cada galga se etiqueta siguiendo la nomenclatura prevista en su esquema de monitorización (Figura 3.23) y se protege mediante un material de recubrimiento específico (ABM75 de HMB, detalle en Figura 3.9a). Finalmente se embolsa la parte de cable que queda fuera del hormigón para evitar que se dañe durante el hormigonado (Figura 3.9c).

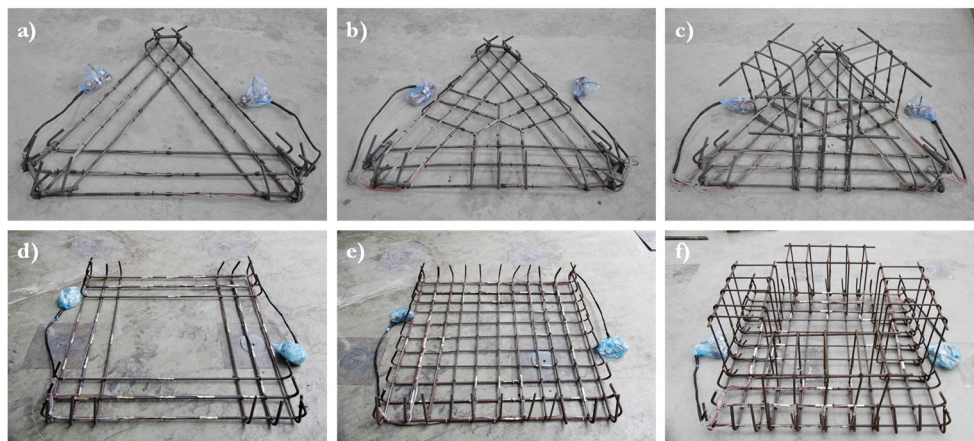


Figura 3.8 Ferralla instrumentada preparada para introducir en los encofrados
a) 3P-N-C1; b) 3P-N-C2; c) 3P-N-C3; d) 4P-N-C1; e) 4P-N-C2; f) 4P-N-C3



Figura 3.9 Detalles de la instrumentación del armado
a) Protección de las galgas con ABM75 de HBM; b) Mazo de cables de galgas con el correspondiente etiquetado; c) Embolsado de cables para su protección durante el hormigonado

Tras la preparación de las armaduras, se procede al montaje de los encofrados metálicos mediante uniones atornilladas entre paredes. El diseño del encofrado permite aprovechar las mismas paredes para la fabricación de los encepados de tres o cuatro pilotes. Unas guías de 3mm de profundidad practicadas en la base de hormigonado facilitan el ensamblaje de los laterales según la configuración. También unos rebajes circulares de 3mm en la base aseguran la posición de las placas de apoyo que quedan embebidas en el hormigón y sobre las que se enroscan las rótulas semiesféricas de los apoyos (véase Figura 3.15).

Estudio de encofrados de tres y cuatro pilotes solicitados por cargas centradas y excéntricas: análisis experimental y de las formulaciones de diseño

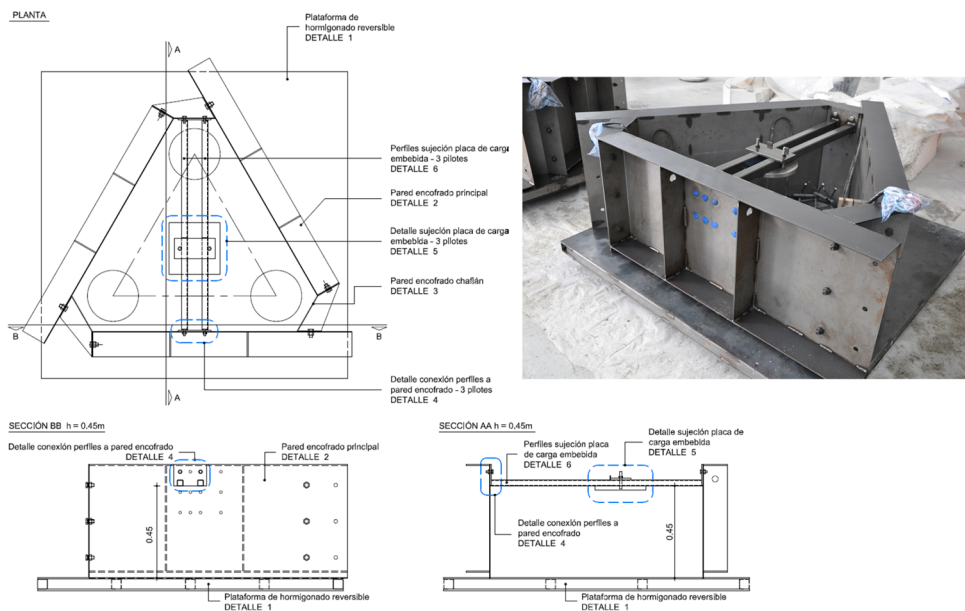


Figura 3.10 Plano e imagen real del encofrado para encofrados de tres pilotes

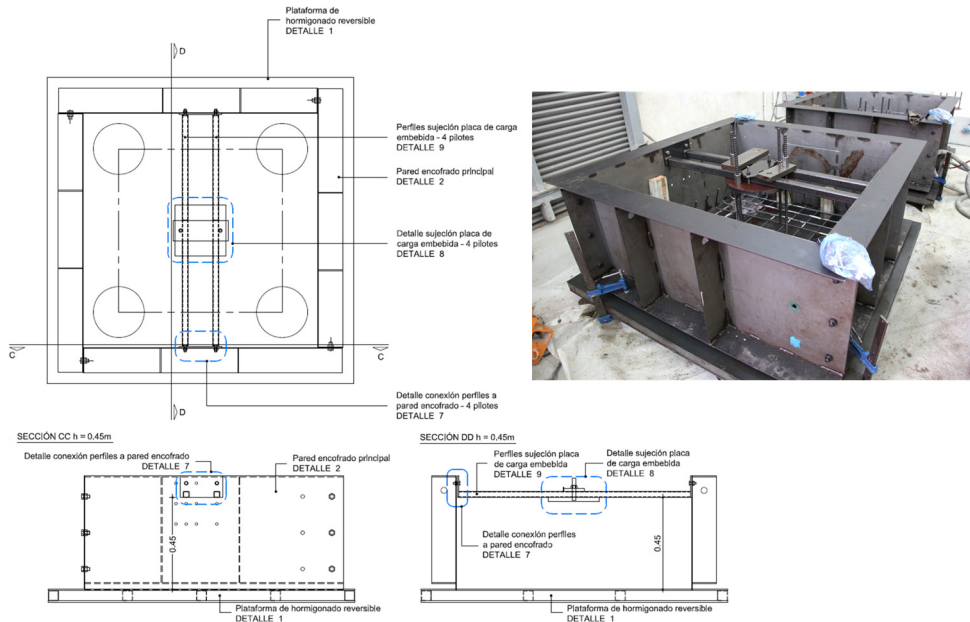


Figura 3.11 Plano e imagen real del encofrado para encofrados de cuatro pilotes

Una vez cerrados los encofrados y dispuestas las placas de apoyo, se posiciona la ferralla monitorizada empleando separadores de 40mm que aseguran el recubrimiento inferior y se colocan los ganchos en U invertida que permiten colgar la pieza para el montaje. Tras esta operación se fijan los perfiles tubulares superiores que cuelgan la placa de carga a la altura correspondiente según el tipo de encepado, para que ésta quede embebida y perfectamente localizada en el centro del encepado, según se ilustra en la Figura 3.12.



Figura 3.12 Perfiles tubulares que sujetan la placa de carga embebida a la que se atornilla el pilar metálico.

La pieza queda ya preparada para la fase final de hormigonado. Antes del vertido del hormigón se marca en la cara interior del encofrado el nivel de la cara superior para su nivelado. El hormigón llega al laboratorio en camión hormigonera y se descarga por fases a un cubilote colgado del puente grúa para proceder al vertido (Figura 3.13). A las 4h se riegan y cubren las piezas con plásticos para el curado. Tras 5-7 días se procede al desencofrado y acopio de las piezas.



Figura 3.13 Vertido del hormigón en los encofrados



Figura 3.14 Encepados de cuatro pilotes recién hormigonados junto con las 18 probetas de control y piezas acopiadas

3.4. Descripción de los ensayos

El estudio de encepados con diferente número de pilotes (tres o cuatro) y tipo de sollicitación (carga centrada o excéntrica) requiere una configuración del ensayo adaptable a estas condiciones. Las condiciones de carga y apoyo cambian en cada caso para garantizar la respuesta deseada.

Además, se establece un completo protocolo de ensayo que recoge los pasos a seguir: desde la instrumentación de la ferralla y la fabricación de especímenes hasta la monitorización de la pieza para el ensayo.

3.4.1. Configuración

El sistema de carga y reacciones se ubica bajo un pórtico metálico que se ancla a la losa de reacción del laboratorio de ICITECH permitiendo cerrar el circuito de cargas. Esta losa dispone de anclajes de 500kN de capacidad situados cada metro, por lo que son necesarios cuatro anclajes para asegurar la transmisión de la máxima capacidad del marco (2000kN).

Para asegurar en todos los casos que la resultante de las reacciones de los pilotes se sitúe en su centro, éstos se reemplazan por placas metálicas a las que se conecta una rótula semiesférica (Figura 3.15a). Además, cada pilote queda apoyado sobre una bandeja de rodamientos que libera la coacción horizontal (Figura 3.15b). Esta configuración no simula el comportamiento real *in situ* del encepado, debido a que el terreno ejerce un cierto grado de empotramiento en los pilotes y de reacciones horizontales. Sin embargo, permite representar fielmente las hipótesis de los modelos de bielas y tirantes que se desean contrastar.

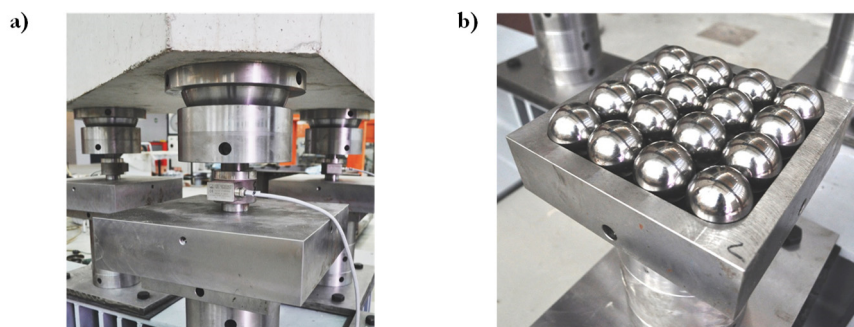


Figura 3.15 Sistema de apoyo de pilotes: a) Rótula semiesférica; b) Bandeja de rodamientos

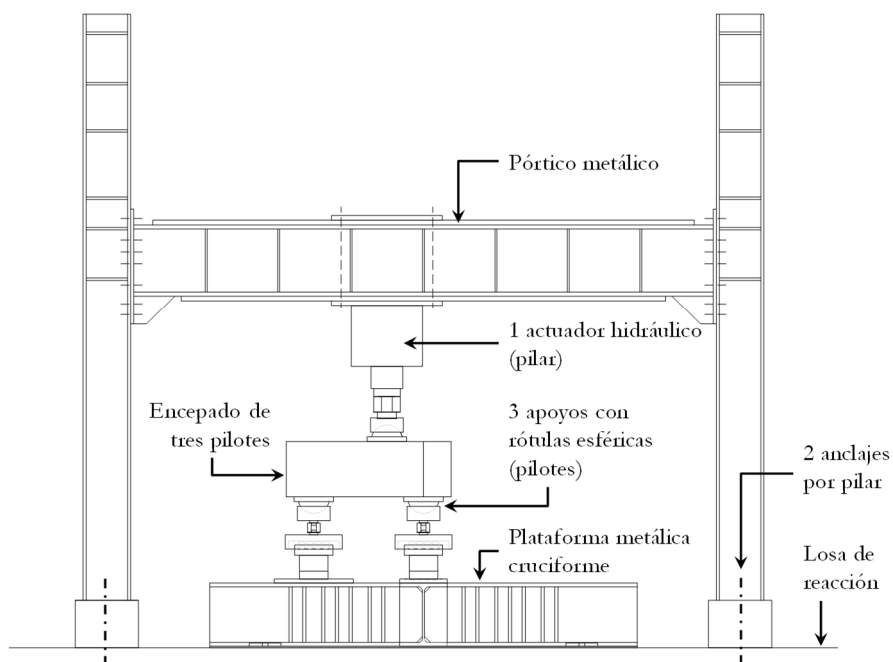
3.4.1.1 Encepados de tres pilotes

La particularidad de los ensayos apoyados sobre tres pilotes con las reacciones horizontales liberadas es que se tiene un sistema isostático en el que, con un único actuador que introduce la carga en el pilar, se aseguran reacciones iguales en los pilotes. En la Figura 3.16 se muestra una vista general del ensayo y en la Figura 3.17 se describe esquemáticamente la disposición del ensayo, donde el gato hidráulico cuelga del pórtico metálico mientras que los tres pilotes quedan apoyados sobre una plataforma metálica cruciforme que permite repartir la carga a la losa y cerrar el circuito de carga.



Figura 3.16 Vista general del ensayo de encepados de tres pilotes

a) Alzado ensayos 3P-N



b) Planta ensayos 3P-N

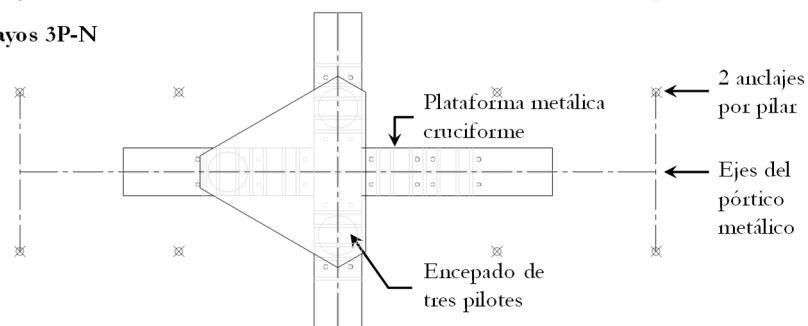


Figura 3.17 Plano de la configuración del ensayo para encepados de tres pilotes

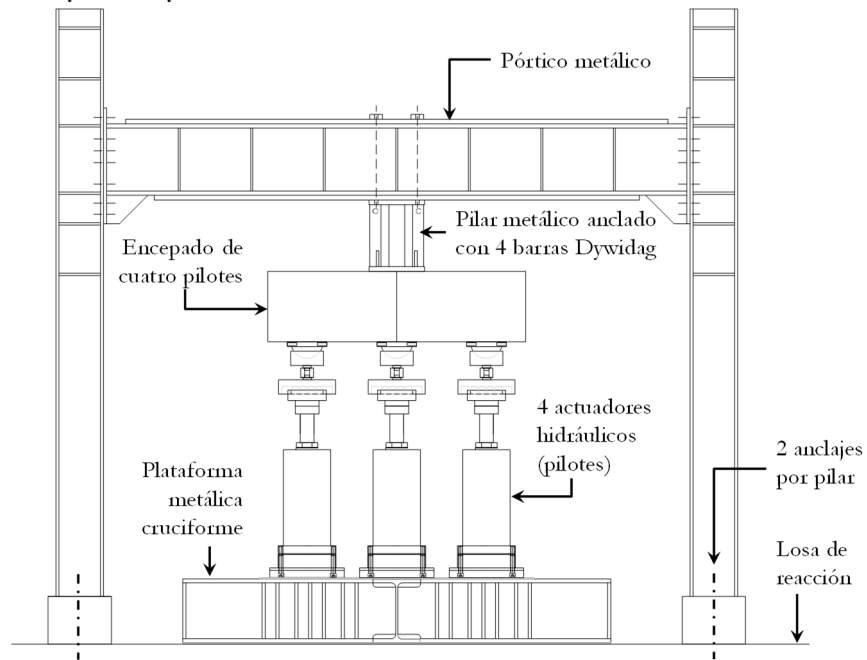
3.4.1.2 Encepados de cuatro pilotes

Cuando el sistema de apoyos es redundante, las posibles irregularidades geométricas pueden condicionar el reparto de las reacciones en los pilotes. Para asegurar el control de las cargas en los pilotes, se disponen cuatro actuadores sincronizados, anclados a la plataforma metálica (Figura 3.18a). Tres de los cuatro actuadores se contralán automáticamente por carga con la consigna de mantener en todo momento una cierta proporción de la carga del actuador principal.

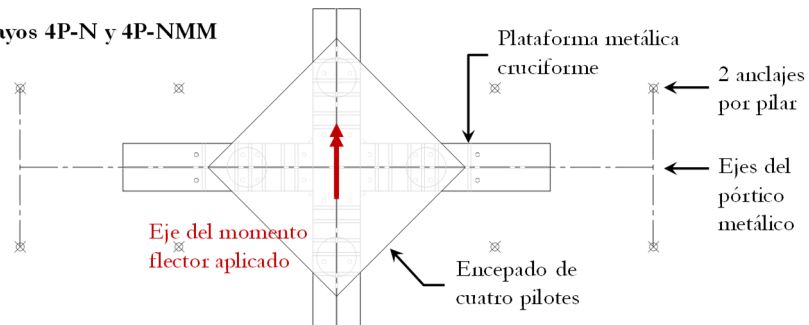
Este actuador principal a su vez se controla por velocidad de desplazamiento ($v_d=0.1\text{mm/s}$), pero sin sobrepasar una determinada velocidad de carga: $v_{ct}=5\text{kgf/s}$ hasta alcanzar los 50kN, después se sube la velocidad de carga a $v_{cz}=10\text{kgf/s}$ hasta el final del ensayo. Asignando unos determinados coeficientes de proporcionalidad entre la carga de los actuadores, se consigue simular una ley plana de reacciones. Un pilar metálico recibe la carga y la transmite al pórtico metálico anclado a la losa. En los ensayos con excentricidad, el eje del momento resultante aplicado debe ser perpendicular al plano del pórtico para evitar la transmisión de esfuerzos de torsión al dintel a través del pilar metálico. Para ello se gira la base del encepado según se indica en las plantas de la Figura 3.18b,c.

En el *Anejo D Fichas de ensayos* se dan los valores de proporcionalidad entre las cargas de los actuadores dependiendo de la excentricidad aplicada. En el *Anejo E Sistema de carga con actuadores sincronizados*, se explica con mayor detalle el funcionamiento del sistema de carga para encepados de cuatro pilotes.

a) Alzado ensayos 4P-N y 4P-NMM



b) Planta ensayos 4P-N y 4P-NMM



c) Planta ensayos 4P-NM

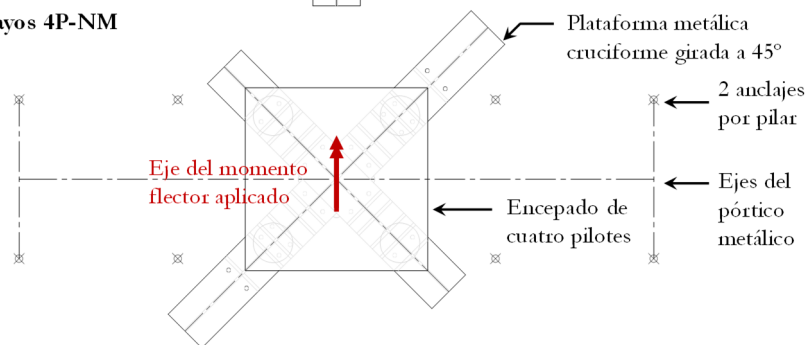


Figura 3.18 Plano de la configuración del ensayo para encepados de cuatro pilotes

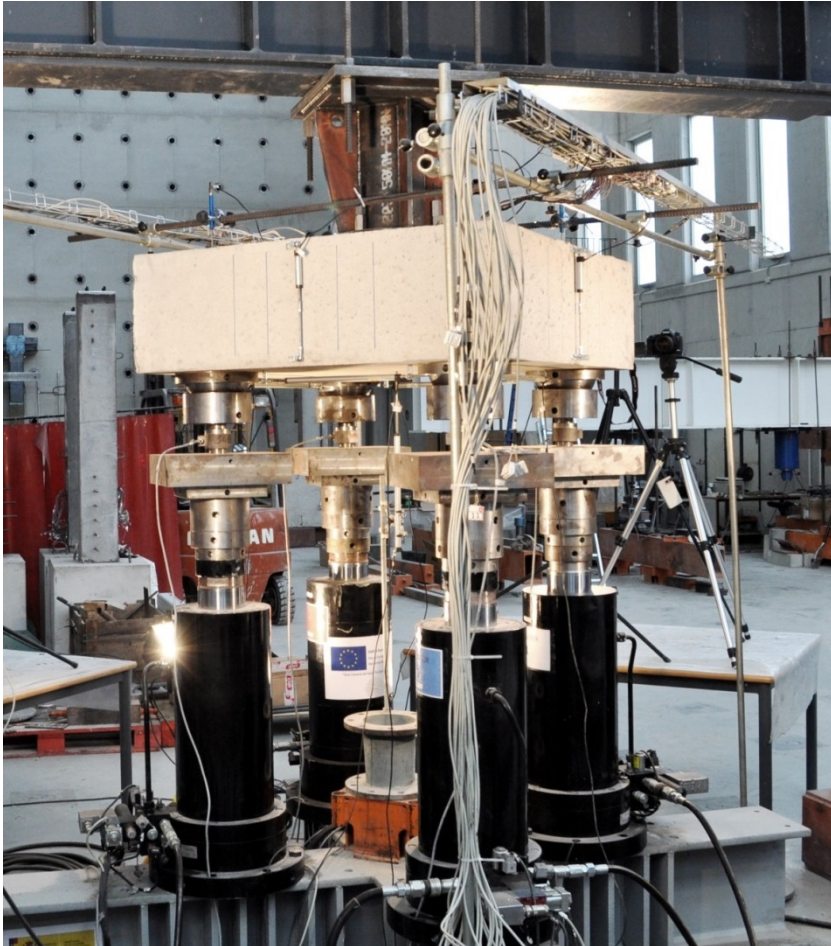


Figura 3.19 Vista general del ensayo de encepados de cuatro pilotes

3.4.2. Protocolo de ensayo

Para la realización de los ensayos, se estableció un listado de tareas cuya realización debe cumplirse y controlarse para llevar a cabo con éxito la campaña experimental prevista. Para ello, se ha tomado como referencia el completo protocolo de ensayo desarrollado por Mata, J. [58] en su tesis doctoral, dentro del mismo grupo de investigación.

Se presenta aquí un resumen con los principales puntos, y en el Anejo C puede consultarse las fichas empleadas para su seguimiento en cada ensayo.

FASE A. PREVIA AL HORMIGONADO

- FERRALLA. Revisión de la ferralla y montaje según planos de armado. Registro recubrimiento real.
- GALGAS. Pegado de galgas. Registrar factor de galga empleado. Etiquetar. Protección cables.
- PROBETAS CONTROL. Preparación de moldes para probetas de control y acompañamiento (18).

FASE B. HORMIGONADO

- CANTO ENCEPADO. Marcar nivel en las caras interiores del encofrado.
- CURADO. A las 4h riego con agua y cubrición con plásticos para el curado.

FASE C. DESENCOFRADO

- PROBETAS CONTROL. A las 24h del hormigonado. Guardar en cámara húmeda y romper en 28 días.
- PROBETAS ACOMPAÑAMIENTO. A las 24h del hormigonado Guardar en mismas condiciones que las piezas a ensayar.
- PIEZAS. A los 7 días del hormigonado.

FASE D. MONTAJE DE UTILLAJES AUXILIARES

- RÓTULAS. Roscado de pieza rótula esférica macho a la chapa embebida en el encepado.
- EJE DE ARMADURAS. Pintado de eje de armaduras sobre caras laterales y base.
- UTILLAJES PÓRTICO. Montaje según planos, dependiendo del canto de la pieza a ensayar.

FASE E. COLOCACIÓN DE LA PIEZA

FASE F. CONTROL DE MATERIALES

- PROBETAS CONTROL. Rotura de probetas de control del hormigón a 28 días

- BARRAS CORRUGADAS. Rotura de barras corrugadas a tracción.



Figura 3.20 Colocación del encepado de cuatro pilotes

FASE G. INSTRUMENTACIÓN

- GALGAS. Pelado de cables y colocación de punteras. Conexión a las regletas del equipo de adquisición.
- CAPTADORES DESPL. Replanteo ubicación según planos. Pegado de placas de sujeción y colocación del captador en posición. Conexión al equipo de adquisición.

- CÉLULAS DE CARGA. Identificación del apoyo. Conexión al equipo de adquisición.
- EQUIPO ADQUISICIÓN. Configuración (canales y nombres de sensores) y revisión del funcionamiento de toda la instrumentación. Preparación de fórmulas y gráficos.

FASE H. FOTOGRAFÍA DURANTE EL ENSAYO

- Configuración de las cámaras. Sincronización horaria con equipo de adquisición. Conexión a equipo de disparo automático.

FASE I. ENSAYO

FASE J. POST-ENSAYO

- DATOS. Grabación de los archivos de datos del ensayo en dispositivo de memoria externa. Copia de seguridad.
- PROBETAS ACOMPAÑAMIENTO. Rotura de probetas de control de acompañamiento.

3.5. Instrumentación

El análisis de la respuesta del encepado requiere un completo registro de datos durante el ensayo: carga aplicada y reacciones, desplazamientos, deformaciones y evolución del patrón de fisuración. En la Figura 3.21 se señalan los principales elementos empleados para el registro de datos durante el ensayo.

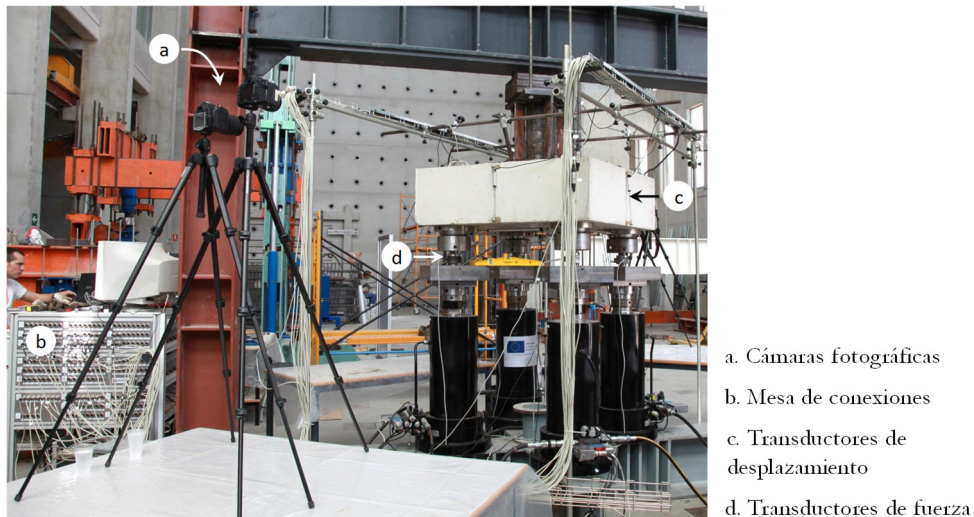


Figura 3.21 Imagen general de la instrumentación durante el ensayo

Para el control de la **carga aplicada** en la configuración de ensayo de encepados de tres pilotes, se dispone un transductor de fuerza tipo C6A de 1MN de HBM, cuya medida se contrasta con la medición de presión en el circuito hidráulico dada por dos transductores de presión. Además, para registrar las **reacciones** en los pilotes se disponen tres células de carga tipo C6A de 0.5MN de HBM.

En el caso de la configuración de ensayo con encepados de cuatro pilotes, la carga se aplica desde los apoyos donde se disponen cuatro transductores de fuerza tipo C6A de 0.5MN de HBM. Esta medida se verifica con los transductores de presión de cada uno de los actuadores.

Para registrar los **desplazamientos** en pilotes y centro del encepado, y también los **alargamientos** horizontales en las bandas y verticales en las caras, se emplean hasta 15 transductores de desplazamiento potenciométricos lineales: TEX-series de Novotechnic y SLS-series de Penny and Giles, con carreras máximas variables entre 300 y 50mm. A modo de ejemplo se muestra la localización de los captadores para el ensayo 4P-N-A3 en la Figura 3.22. La disposición concreta para cada ensayo se puede consultar en el *Anejo D Fichas de ensayos*.

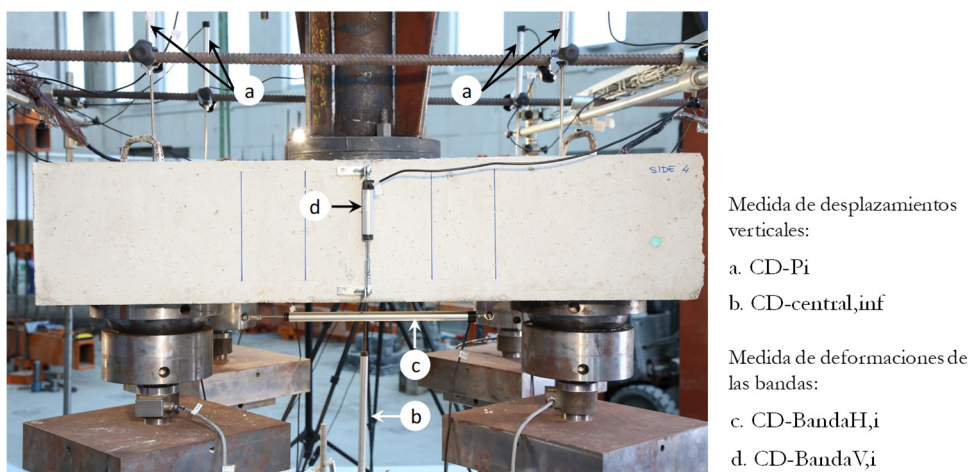


Figura 3.22 Disposición de transductores de desplazamiento en el encepado 4P-N-A3

Las **deformaciones** en los distintos grupos de armado se controlan mediante galgas extensométricas tipo K-LY4 de HBM precableadas, de 3mm de longitud y con 2m de cable. En función de la configuración de armado de cada espécimen se disponen entre 27 y 56 galgas. La nomenclatura asignada a cada galga

permite conocer el canto y tipo de armado del espécimen, el grupo de armado sobre el que se mide y su localización, tal y como se muestra en la Figura 3.23. La disposición concreta para cada ensayo se puede consultar en el *Anejo D Fichas de ensayos*.

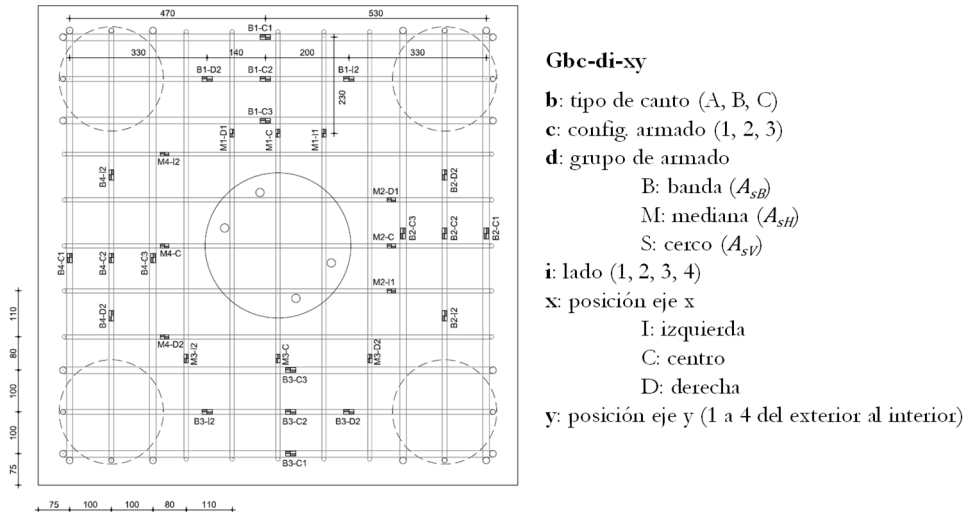


Figura 3.23 Nomenclatura de galgas

Por último, para analizar la **evolución del patrón de fisuración** durante el proceso de carga hasta rotura, se disponen 7 cámaras fotográficas. Se toman fotos de todas las caras laterales completas, que se completan con fotografías en detalle de zonas parciales de las caras en las que se prevén fisuras de punzonamiento o cortante. Además, se dispone una cámara que fotografía la cara inferior del encepado para observar el desarrollo de fisuras en la base.

Todas las cámaras se sincronizan con el equipo de adquisición de datos y se conectan a una caja de disparo automático. El programa que controla los disparos de las cámaras permite ajustar el intervalo entre fotografías, de forma que en la fase inicial del ensayo se toma una foto cada 5s y en la fase final próxima a la rotura se toma una foto por segundo.

Capítulo 4

Resultados experimentales

Los resultados de la campaña experimental constituyen las evidencias que permiten describir la respuesta de los encepados frente a la carga, al variar los parámetros de estudio. En un primer apartado se presentan las fichas de ensayo, en las que se recoge para cada espécimen la localización de la instrumentación y las medidas directas. Estos resultados se sintetizan en unas tablas que muestran los principales resultados experimentales: carga de plastificación, carga máxima, máxima flecha y modo de fallo. En el tercer apartado se describen con detalle dichos resultados y la influencia de las variables analizadas.

4.1. Fichas de ensayo

En la ficha de cada ensayo quedan resumidas las principales características del espécimen, su instrumentación y los resultados experimentales que se describen en este capítulo. Se definen los siguientes apartados en cada una de las fichas, que pueden encontrarse en el *Anejo D Fichas de ensayos*:

- A. DATOS PRINCIPALES DEL ENSAYO: esta sección recoge las fechas de hormigonado y ensayo, las características del hormigón (f_c , f_{ct} y edad), la carga máxima en el pilote más solicitado ($R_{max,W}$) y la total ($\Sigma R_{max,W}$), así como el modo de fallo. La codificación de los modos de fallo se encuentra descrita en el apartado 4.3.5 de este capítulo.
- B. GEOMETRÍA DEL ENCEPADO Y ARMADO: se definen los valores de las principales variables geométricas: lado (L), canto (h), distancia entre ejes de pilotes (e), diámetro de los pilotes (ϕ), diámetro del pilar (c) y recubrimiento geométrico (r_{geo}) de las armaduras. Además, se muestra gráficamente el armado dispuesto y la localización y nomenclatura de las galgas extensométricas.

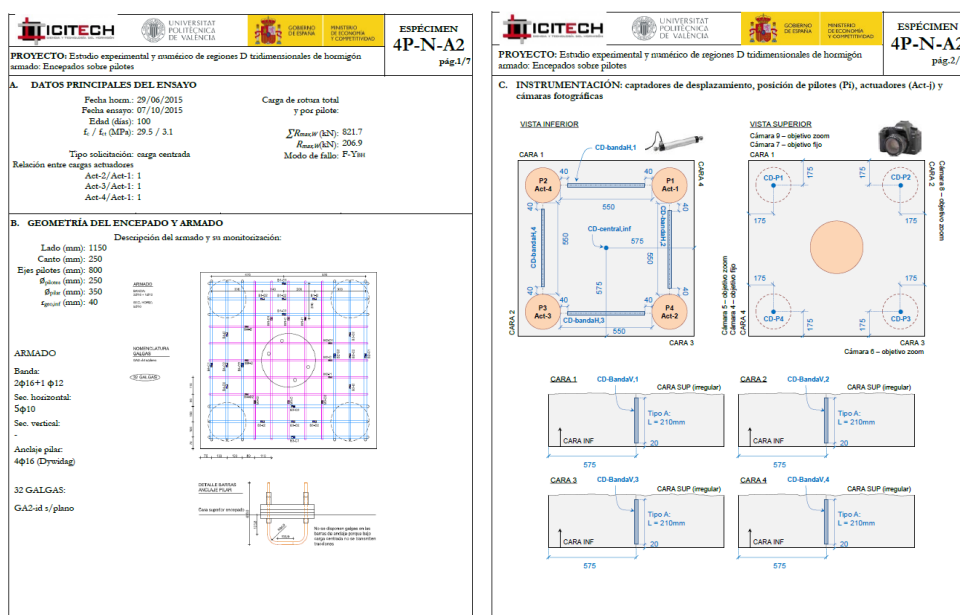


Figura 4.1 Vista en miniatura de las dos primeras hojas de la ficha de ensayo correspondiente al ensayo 4P-N-A2

- C. INSTRUMENTACIÓN: se describe gráficamente la posición de los captadores de desplazamiento, numeración de pilotes y actuadores, así como la localización de las cámaras fotográficas.
- D. RESULTADOS: en las dos primeras hojas de esta sección se muestran las gráficas carga-tiempo, carga-desplazamiento y carga deformación de cada uno de los grupos de armado. En la tercera hoja se incluye el patrón de fisuración, en el cual se distinguen las fisuras correspondientes al instante de carga máxima y post-pico (colapso).
- E. FOTOS DE LOS ENSAYOS: por último, en las dos últimas hojas se muestra una selección de las fotografías de cada cara, tomadas en los instantes de carga máxima y colapso. A partir de estas imágenes se ha extraído el anterior patrón de fisuración.

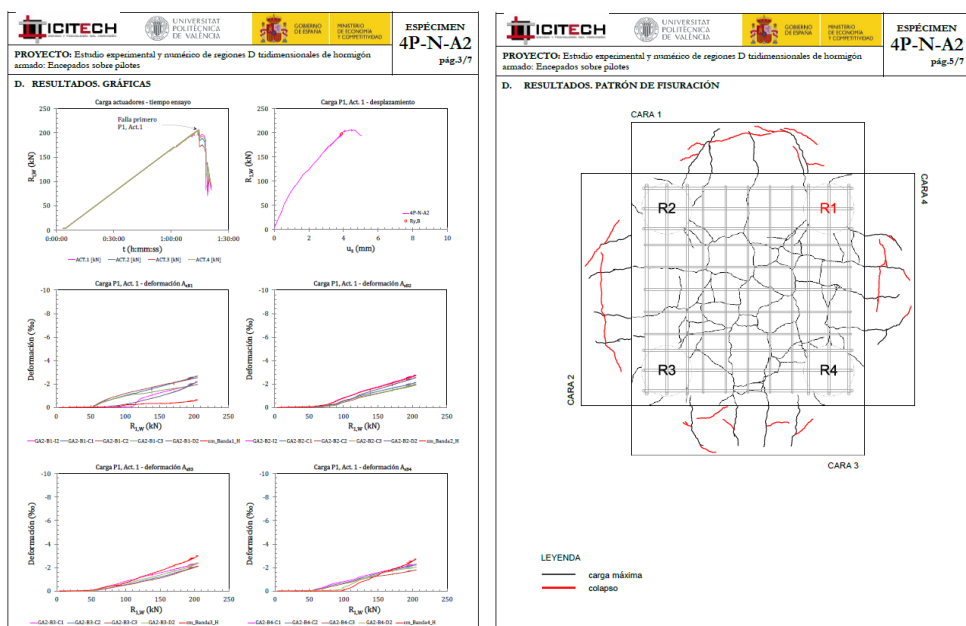


Figura 4.2 Vista en miniatura de dos hojas de resultados de la ficha de ensayo correspondiente al ensayo 4P-N-A2

4.2. Resumen de resultados experimentales

Se resumen en la Tabla 4.1 y Tabla 4.2 los principales resultados y los modos de rotura observados en la campaña experimental. Se incluye en estas tablas el nivel de carga para el que se detecta el inicio de la plastificación del acero en cada uno de los grupos de armado ($\sum R_y$), la carga total máxima ($\sum R_{max}$) y la reacción máxima en el pilote que falla primero (R_u). También se indican los desplazamientos verticales correspondientes a dicha carga total máxima ($u_{z,ER}$) y al instante en que falla el primer pilote ($u_{z,Ri}$).

En los ensayos 3P-N-A1 y 3P-N-A2 se controló el desplazamiento vertical del actuador mediante un *encoder* fijado al pistón, sin disponer un captador de desplazamiento en la cara inferior del encepado. Aunque esto permitió una correcta aplicación de la carga, controlando la velocidad de desplazamiento vertical del actuador, estas medidas de desplazamiento no quedaron registradas por el equipo de adquisición de datos y por ello no aparecen en la tabla.

Tabla 4.1 Principales resultados experimentales de la serie 1

| Espécimen | w/d | $\sum R_y$ (kN) | | | $\sum R_{max}$ (kN) | $u_{z,ER}$ (mm) | R_u (kN) | $u_{z,Ru}$ (mm) | Modo de fallo |
|-----------|-------|-----------------|----------|--------------------|------------------------|--------------------|---------------|--------------------|--------------------|
| | | A_{sB} | A_{sH} | A_{sV} | | | | | |
| 3P-N-A1 | 1.68 | 428.3 | - | - | 480.4 | a | 160.4 | a | F |
| 3P-N-A2 | 1.68 | 456.1 | b | - | 562.0 | a | 185.1 | a | F-Y _B |
| 3P-N-A3 | 1.68 | 467.1 | b | b | 611.8 | 3.1 | 203.0 | 3.1 | F-Y _B |
| 3P-N-B1 | 1.12 | 633.6 | - | - | 710.9 | 2.7 | 234.9 | 2.7 | F-Y _B |
| 3P-N-B2 | 1.12 | 598.6 | 655.3 | - | 761.9 | 3.0 | 253.5 | 3.0 | F-Y _{BH} |
| 3P-N-B3 | 1.12 | 622.4 | 726.6 | b | 777.3 | 2.7 | 262.5 | 2.6 | F-Y _{BH} |
| 3P-N-C1 | 0.84 | 657.5 | - | - | 859.2 | 3.1 | 284.2 | 3.1 | D-Y _B |
| 3P-N-C2 | 0.84 | 644.1 | b | - | 852.0 | 2.3 | 286.9 | 1.7 | F-Y _B |
| 3P-N-C3 | 0.84 | 753.0 | 803.2 | 979.9 ^c | 987.2 | 3.5 | 332.8 | 2.2 | D-Y _{BHV} |

w/d : ratio vuelo-canto; $\sum R_y$: carga vertical en el pilar a la que se detecta el inicio de la plastificación de los distintos grupos de armado (A_{sB} : armado principal concentrado en bandas; A_{sH} : armado secundario horizontal distribuido; A_{sV} : armado secundario vertical en cercos); $\sum R_{max}$: carga total máxima como suma de reacciones en los pilotes; $u_{z,ER}$: desplazamiento vertical para carga total máxima en el punto de aplicación de la carga; R_u : reacción máxima del pilote que primero falla; $u_{z,Ru}$: desplazamiento vertical para reacción del pilote que primero falla, localizado en el punto de aplicación de la carga; F: frágil; D: dúctil; Y_B: plastificación de la armadura principal en bandas; Y_H: plastificación de la armadura secundaria horizontal; Y_V: plastificación de la armadura secundaria vertical en cercos

^a No se dispone de los resultados del captador central inferior

^b No se detecta la plastificación de este grupo de armado previo al colapso

^c El armado plastifica tras la carga máxima

Tabla 4.2 Principales resultados experimentales de las series 2, 3 y 4

| Especímen | w/d | ΣR_y (kN) | | | ΣR_{max} (kN) | $u_{z,ER}$ (mm) | R_u (kN) | $u_{z,Ru}$ (mm) | Modo de fallo |
|-----------|-------|-------------------|--------------------|---------------------|--------------------------|--------------------|---------------|--------------------|-------------------------------------------------|
| | | A_{sB} | A_{sH} | A_{sV} | | | | | |
| 4P-N-A1 | 1.10 | 572.9 | - | - | 605.6 | 4.3 | 145.2 | 4.3 | F-Y _B |
| 4P-N-A2 | 1.10 | 784.7 | 670.1 | - | 813.4 | 4.1 | 198.6 | 4.5 | F-Y _{BH} |
| 4P-N-A3 | 1.10 | 681.4 | 740.9 | 935.7 | 973.2 | 6.6 | 237.4 | 6.6 | D-Y _{BHV} |
| 4P-N-B1 | 0.74 | 564.9 | - | - | 744.6 | 3.3 | 177.5 | 3.3 | F-Y _B |
| 4P-N-B2 | 0.74 | 558.3 | ^b | - | 861.0 | 3.0 | 207.6 | 3.8 | F-Y _B |
| 4P-N-B3 | 0.74 | 773.2 | 1085.6 | 1076.0 | 1116.2 | 7.8 | 269.9 | 7.8 | D-Y _{BHV} |
| 4P-N-C1 | 0.56 | 724.4 | - | - | 942.6 | 9.2 | 218.1 | 9.2 | D-Y _B |
| 4P-N-C2 | 0.56 | 945.5 | ^b | - | 1159.0 | 5.7 | 278.1 | 5.5 | F-Y _B |
| 4P-N-C3 | 0.56 | 999.2 | 1105.9 | 1300.8 | 1302.4 | 9.7 | 310.1 | 9.3 | D-Y _{BHV} |
| 4P-NMM-A2 | 1.10 | 516.8 | 585.1 ^c | - | 586.2 | 3.8 | 215.6 | 3.0 | F-Y _B |
| 4P-NMM-A3 | 1.10 | 519.3 | 577.7 | 744.0 | 761.5 | 9.3 | 277.1 | 8.7 | D-Y _{BHV} |
| 4P-NMM-B2 | 0.74 | 708.5 | 684.7 | - | 751.6 | 3.2 | 280.2 | 2.7 | F-Y _{BH} |
| 4P-NMM-B3 | 0.74 | 618.8 | 620.8 | 801.9 | 814.8 | 10.7 | 293.6 | 10.1 | D-Y _{BHV} |
| 4P-NMM-C2 | 0.56 | 711.2 | 940.2 | - | 955.2 | 5.6 | 351.9 | 5.5 | D-Y _{BH} |
| 4P-NMM-C3 | 0.56 | 810.9 | 991.2 | 1031.4 ^c | 1061.1 | 9.4 | 394.9 | 5.8 | D-Y _{BHV} |
| 4P-NM-A2 | 1.10 | 526.4 | 537.2 | - | 575.4 | 4.3 | 188.0 | 2.4 | F-Y _{BH} |
| 4P-NM-A3 | 1.10 | 544.1 | 481.5 | 709.9 | 779.8 | 13.8 ^d | 262.8 | 13.5 ^d | (^d) ^d -Y _{BHV} |
| 4P-NM-B2 | 0.74 | 676.0 | 677.5 | - | 743.7 | 2.7 | 247.5 | 3.2 | F-Y _{BH} |
| 4P-NM-B3 | 0.74 | 619.9 | 561.5 | 800.3 ^c | 809.5 | 9.4 | 267.7 | 3.7 | D-Y _{BHV} |
| 4P-NM-C2 | 0.56 | 709.1 | 825.9 ^c | - | 900.8 | 2.9 | 299.6 | 2.9 | F-Y _B |
| 4P-NM-C3 | 0.56 | 753.8 | 729.9 | 979.2 | 989.2 | 15.5 | 327.9 | 7.7 | D-Y _{BHV} |

w/d : ratio vuelo-canto; ΣR_y : carga vertical en el pilar a la que se detecta el inicio de la plastificación de los distintos grupos de armado (A_{sB} : armado principal concentrado en bandas; A_{sH} : armado secundario horizontal distribuido; A_{sV} : armado secundario vertical en cercos); ΣR_{max} : carga total máxima como suma de reacciones en los pilotes; $u_{z,ER}$: desplazamiento vertical para carga total máxima, localizado en el punto de aplicación de la carga; R_u : reacción máxima del pilote que primero falla; $u_{z,Ru}$: desplazamiento vertical para reacción del pilote que primero falla, localizado en el punto de aplicación de la carga; F: frágil; D: dúctil; Y_B: plastificación de la armadura principal en bandas; Y_H: plastificación de la armadura secundaria horizontal; Y_V: plastificación de la armadura secundaria vertical en cercos

^b No se detecta la plastificación de este grupo de armado previo al colapso

^c El armado plastifica tras la carga máxima

^d El gran desplazamiento registrado en 4P-NM-A3 se atribuye a un mal funcionamiento del sistema de medida. No es posible clasificar el tipo de rotura F/D

4.3. Descripción detallada de resultados experimentales

A continuación, se presentan los resultados experimentales obtenidos y las conclusiones directas que se desprenden de la comparación entre especímenes. En los Capítulos 5 y 6 se realiza la discusión de estos resultados contrastándolos con los MBT o las formulaciones de punzonamiento, lo que permite analizar la influencia de las variables de diseño: número de pilotes, relación vuelo-canto, armadura secundaria y excentricidad.

4.3.1. Carga máxima

La determinación de la carga máxima resistida por los encepados depende de la configuración ensayada en cada caso. En los **encepados de tres pilotes**, al tratarse de una configuración isostática y aplicarse la carga directamente desde el pilar, la carga máxima viene dada por la célula de carga situada bajo el actuador (P_{max} en la Tabla 4.3) o por la suma de las reacciones de las células de carga situadas entre encepado y apoyos (ΣR_{max} en la Tabla 4.3). Aunque ambas medidas deberían ser similares, difieren entorno a un 5-9%. Esta diferencia se atribuye al efecto combinado de la calibración de los propios transductores de carga, así como a la posible inclinación de la reacción de los pilotes. La pequeña desviación de la resultante en los apoyos podría deberse a la existencia de una reacción horizontal por el rozamiento con la bandeja de rodamientos.

Se muestra también en la Tabla 4.3 el valor de las reacciones (R_i) en el instante en el que falla el primer apoyo (sombreado). En los encepados 3P-N-B3, 3P-N-C1 y 3P-N-C3 la rotura no es perfectamente simultánea en los tres apoyos, aunque el incremento de carga que se registra tras el fallo del primero varía entre un 0.1-1.5%, y sólo en el 3P-N-C3 se registra una diferencia importante en el desplazamiento entre ambos instantes ($u_{z,\Sigma R} - u_{z,Ri} = 1.3\text{mm}$, en la Tabla 4.1).

En el caso de los encepados de cuatro pilotes, la carga se aplica en los pilotes y la máxima reacción en el pilar sólo se puede obtener como la suma de las medidas de las cuatro células de carga dispuestas sobre los actuadores ($\Sigma R_{max,W}$ en la Tabla 4.4). No es posible disponer una célula de carga en el pilar ya que la conexión con el encepado se ha diseñado empotrada, para transmitir axil y flector. Al tratarse de una configuración de apoyos redundante, cuando el primero falla (sombreado en la Tabla 4.4) se produce una redistribución de la carga hacia los demás apoyos, perdiéndose en ese instante la ley de proporcionalidad dada entre actuadores y en consecuencia la excentricidad aplicada. Por esta razón se distingue entre $\Sigma R_{max,W}$ y $\Sigma R_{i,W}$, en la Tabla 4.4. El segundo tér-

mino es la suma de las reacciones en el instante en que falla el primer apoyo. Ambos valores difieren como máximo un 2.4%.

El subíndice “w” que se añade a estas últimas variables indica que en el caso de los ensayos de cuatro pilotes las medidas de las células de carga incluyen la parte de peso propio correspondiente, puesto que se tomaron ceros en vacío. Mientras que en los ensayos de encepados de tres pilotes se tomaron ceros en la medida de las células de carga una vez colocada la pieza, por lo que no se considera el peso propio en la carga registrada. Para comparar los resultados de todas las series, en la Tabla 4.2 se han incluido los valores de las principales cargas descontando el peso propio, pero en la Tabla 4.4 se muestran los resultados de las medidas directas de las células.

Tabla 4.3 Carga máxima aplicada en el actuador y reacciones de pilotes. Serie 1

| Espécimen | P_{max} (kN) | $\sum R_{max}$ (kN) | $\sum R_i$ (kN) | R_1 (kN) | R_2 (kN) | R_3 (kN) |
|-----------|-------------------|------------------------|--------------------|---------------|---------------|---------------|
| 3P-N-A1 | 444.9 | 480.4 | 480.4 | 158.8 | 161.2 | 160.4 |
| 3P-N-A2 | 534.1 | 562.0 | 561.8 | 185.1 | 189.4 | ^a |
| 3P-N-A3 | 573.2 | 611.8 | 611.8 | 203.9 | 203.0 | 204.9 |
| 3P-N-B1 | 660.4 | 710.9 | 710.8 | 239.8 | 234.9 | 236.1 |
| 3P-N-B2 | 709.2 | 761.9 | 761.9 | 252.6 | 253.5 | 255.9 |
| 3P-N-B3 | 713.0 | 777.3 | 776.7 | 263.6 | 250.6 | 262.5 |
| 3P-N-C1 | 799.8 | 859.2 | 846.6 | 274.8 | 287.6 | 284.2 |
| 3P-N-C2 | 795.7 | 852.0 | 852.0 | 278.4 | 286.9 | 286.6 |
| 3P-N-C3 | 910.0 | 987.2 | 982.8 | 313.2 | 336.8 | 332.8 |

P_{max} : carga máxima registrada por el transductor de fuerza del pilar; $\sum R_{max}$: carga máxima obtenida como suma de las reacciones registradas por los transductores de fuerza de los pilotes; $\sum R_i$: suma de las reacciones en los pilotes en el instante en que falla el primer apoyo; R_i : reacciones registradas por los transductores de fuerza de los pilotes en el instante en que falla el primer apoyo (sombreado)

^a Error en la medida de la célula de carga en el apoyo 3. Para la determinación de $\sum R_i$ se considera el promedio de R_1 y R_2

Tabla 4.4 Carga máxima total y en el actuador que primero falla. Series 2, 3 y 4

| Espécimen | $\sum R_{max,W}$ (kN) | $R_{1,W}$ (kN) | $R_{2,W}$ (kN) | $R_{3,W}$ (kN) | $R_{4,W}$ (kN) | $\sum R_{i,W}$ (kN) |
|------------------|--------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------------|
| 4P-N-A1 | 613.9 | 153.4 | 153.5 | 153.5 | 153.5 | 613.9 |
| 4P-N-A2 | 821.7 | 206.9 | 201.8 | 196.3 | 201.8 | 803.0 |
| 4P-N-A3 | 981.5 | 245.3 | 245.8 | 244.4 | 245.7 | 981.2 |
| 4P-N-B1 | 756.2 | 189.1 | a | a | a | 756.2 |
| 4P-N-B2 | 872.6 | 218.4 | 218.3 | 217.7 | 218.1 | 872.6 |
| 4P-N-B3 | 1127.8 | 282.3 | 281.5 | 281.8 | 281.5 | 1127.8 |
| 4P-N-C1 | 957.5 | 231.2 | 233.0 | 247.0 | 246.0 | 957.2 |
| 4P-N-C2 | 1173.9 | 286.8 | 293.0 | 290.0 | 292.7 | 1162.5 |
| 4P-N-C3 | 1317.3 | 330.2 | 330.7 | 330.0 | 325.0 | 1315.9 |
| 4P-NMM-A2 | 594.5 | 68.9 | 146.1 | 223.9 | 146.0 | 584.9 |
| 4P-NMM-A3 | 769.8 | 91.5 | 194.9 | 285.4 | 194.7 | 766.5 |
| 4P-NMM-B2 | 763.2 | 89.9 | 190.7 | 291.8 | 190.5 | 762.9 |
| 4P-NMM-B3 | 826.4 | 99.4 | 209.9 | 305.2 | 209.7 | 824.2 |
| 4P-NMM-C2 | 970.1 | 115.6 | 243.9 | 366.8 | 243.7 | 969.9 |
| 4P-NMM-C3 | 1076.0 | 125.5 | 268.7 | 409.8 | 268.4 | 1072.4 |
| 4P-NM-A2 | 583.7 | 88.6 | 196.3 | 195.4 | 89.6 | 570.0 |
| 4P-NM-A3 | 788.1 | 124.0 | 269.5 | 271.1 | 123.5 | 788.1 |
| 4P-NM-B2 | 755.3 | 117.9 | 259.8 | 259.1 | 118.5 | 755.3 |
| 4P-NM-B3 | 821.1 | 127.4 | 278.8 | 279.3 | 126.9 | 812.3 |
| 4P-NM-C2 | 915.7 | 143.4 | 313.9 | 314.5 | 142.6 | 914.4 |
| 4P-NM-C3 | 1004.1 | 156.0 | 342.8 | 342.3 | 156.0 | 997.1 |

$\sum R_{max,W}$: carga máxima obtenida como suma de las reacciones en los pilotes, incluyendo el peso propio del encepado; $R_{i,W}$: reacciones registradas por los transductores de fuerza de los pilotes en el instante en que falla el primer apoyo (sombreado), incluyendo el peso propio del encepado; $\sum R_{i,W}$: suma de las reacciones en los pilotes en el instante en que falla el primer apoyo

^a No quedaron guardados los datos del programa de control de los actuadores, que registra las cargas y desplazamientos de estos. Sólo se dispone de la información de la célula de carga de un actuador, cuyo registro se realiza por duplicado mediante el programa general de adquisición de datos. Para obtener $\sum R_{i,W}$ se considera la misma reacción en los cuatro pilotes.

4.3.2. Plastificación de los grupos de armado

Los resultados de deformaciones proporcionados por las galgas extensométricas y transductores de desplazamiento permiten identificar la contribución de los diferentes grupos de armado a la resistencia del encepado, así como verificar si se alcanza la plastificación del acero y para qué nivel de carga. En la Tabla 4.1 y Tabla 4.2 se da la carga de inicio de la plastificación (ΣR_y), obtenida para cada grupo de armado como la menor carga para la que se registran deformaciones superiores a las correspondientes a su límite elástico (f_y en la Tabla 3.9).

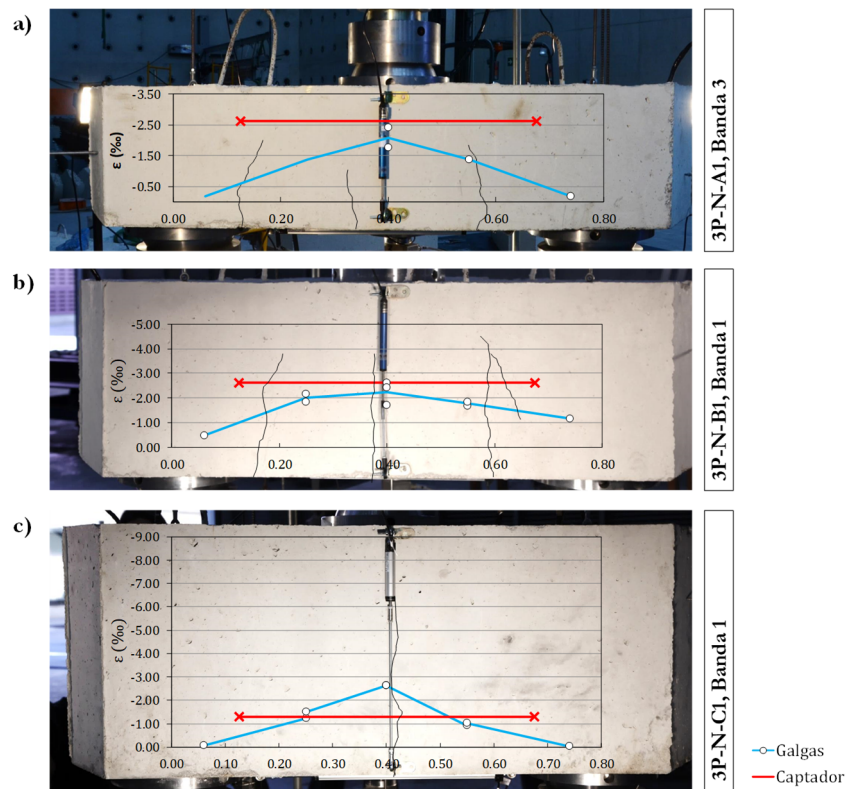


Figura 4.3 Comparación de la medida de deformación de las galgas y de los captadores de desplazamiento para la carga de inicio de la plastificación en las bandas
a) 3P-N-A1; b) 3P-N-B1; c) 3P-N-C1

Los datos de deformaciones para los grupos de armado A_{SH} y A_{SV} se obtienen de las medidas de las galgas extensométricas. Mientras que para el armado principal en bandas (A_{SB}), se toma la máxima deformación entre la registrada por las galgas extensométricas (medida puntual) y la dada por los captadores de des-

plazamiento entre ejes de pilotes (deformación media). En general, esta medida puntual registra una misma o mayor deformación que la de los captadores, en aquellas galgas centrales situadas cerca de una fisura (Figura 4.3b,c). Pero en caso de que la aparición de la fisura no se halle cerca de la galga, ésta puede registrar un valor de deformación en la armadura menor que el valor medio captado por el transductor de desplazamiento (Figura 4.3a).

En lo que se refiere a la secuencia de plastificación de los grupos de armado, tal y como se extrae de la Tabla 4.1 y Tabla 4.2, en la mayoría de los casos las armaduras de las bandas (A_{sB}) alcanzan su límite elástico para un menor nivel de carga las armaduras secundarias (A_{sH} , A_{sV}). Esto es coherente con una distribución de tensiones en el hormigón similar a la prevista por los modelos de bielas y tirantes de descarga directa, en la que sólo participan los tirantes dispuestos en las bandas entre pilotes.

Pero también estas tablas, así como las gráficas carga-deformación de cada espécimen recogidas en el *Anejo D Fichas de ensayos*, evidencian la colaboración del armado secundario (A_{sH} , A_{sV}) al resistir unas tracciones que no se están teniendo en cuenta por los modelos tradicionales de bielas y tirantes y que incrementan la resistencia del encepado. En la mayoría de los especímenes este armado llega incluso a superar el límite elástico del acero antes de alcanzar la carga máxima. En el caso del armado secundario vertical (A_{sV}) su plastificación se produce siempre después de la del armado dispuesto en la base (A_{sB} , A_{sH}). Los cercos alcanzan su límite elástico en todos los especímenes excepto 3P-N-A3 y 3P-N-B3. Aunque en algunos casos como 3P-N-C3, 4P-NMM-C3 y 4P-NM-B3 la plastificación se produce después de alcanzar la carga máxima.

Se observa que los encepados ensayados muestran una cierta capacidad de redistribución interna de tensiones que permite resistir más carga tras la plastificación de la armadura en bandas (tirantes principales). Esta capacidad de redistribución, representada como $\Sigma R_{max} / \Sigma R_{yB}$, en la Figura 4.4, aumenta con la reducción de la ratio vuelo-canto en los encepados sin armadura de punzonamiento, siendo para los encepados más planos (tipo A) entre 1.04-1.23 y para los de mayor canto (tipo C) entre 1.22-1.34. Al disponer armadura de punzonamiento, desaparece esta tendencia con w/d y las ratios se incrementan para los encepados más planos hasta 1.46, mientras que se mantienen en torno a 1.30 para los más rígidos.

La resistencia del encepado tras la plastificación del armado secundario vertical, representada como $\Sigma R_{max} / \Sigma R_{yV}$, en la Figura 4.4, muestra valores cercanos a la

unidad [1.00-1.10] sin una clara dependencia de la relación vuelo-canto. La activación de este grupo de armaduras se produce en todos los casos al aparecer fisuras diagonales que parten de los pilotes, tras la plastificación del armado principal. Al alcanzar el límite elástico de la armadura vertical, la pieza ha agotado todos los mecanismos resistentes y no es capaz de resistir mayores niveles de carga.

La excentricidad aplicada ($e_u=0.15m$) no influye en la capacidad del encepado para resistir carga tras la plastificación de las armaduras principales o secundarias. Se observa en la Figura 4.5 que los resultados para las series 4P-NMM y 4P-NM siguen la misma tendencia que en el caso de carga centrada (4P-N).

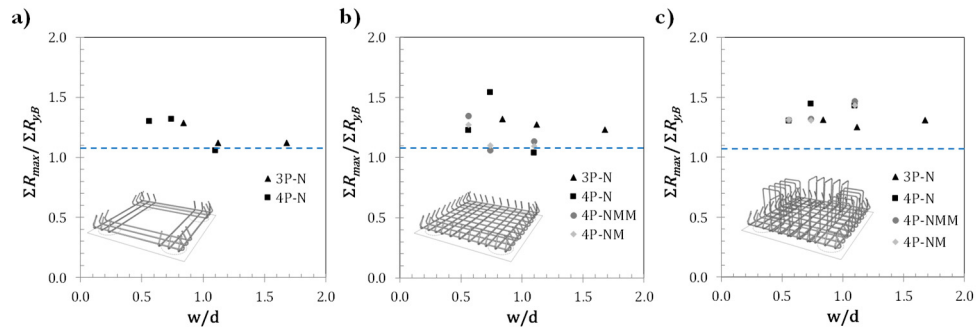


Figura 4.4 Relación entre la carga máxima y de plastificación del armado principal para cada espécimen, frente a la relación vuelo-canto

a) Armado tipo 1; b) Armado tipo 2; c) Armado tipo 3

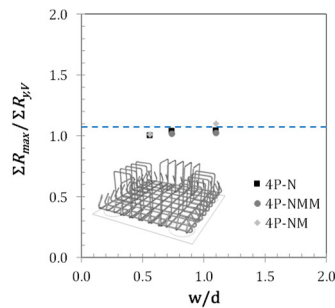


Figura 4.5 Relación entre la carga máxima y de plastificación del armado secundario vertical para cada espécimen, frente a la relación vuelo-canto.

4.3.3. Curvas carga-desplazamiento

En los especímenes de la serie 1 (3P-N) la carga se aplicó a través del pilar con un único actuador y el desplazamiento vertical (u_z) se midió en el centro de la cara inferior de la pieza (Figura 4.6a). Las series 2 a 4 requerían cuatro actuadores sincronizados mediante los cuales se introdujo la carga en los pilotes, por lo que el desplazamiento vertical se controló en los pilotes (Figura 4.6b).

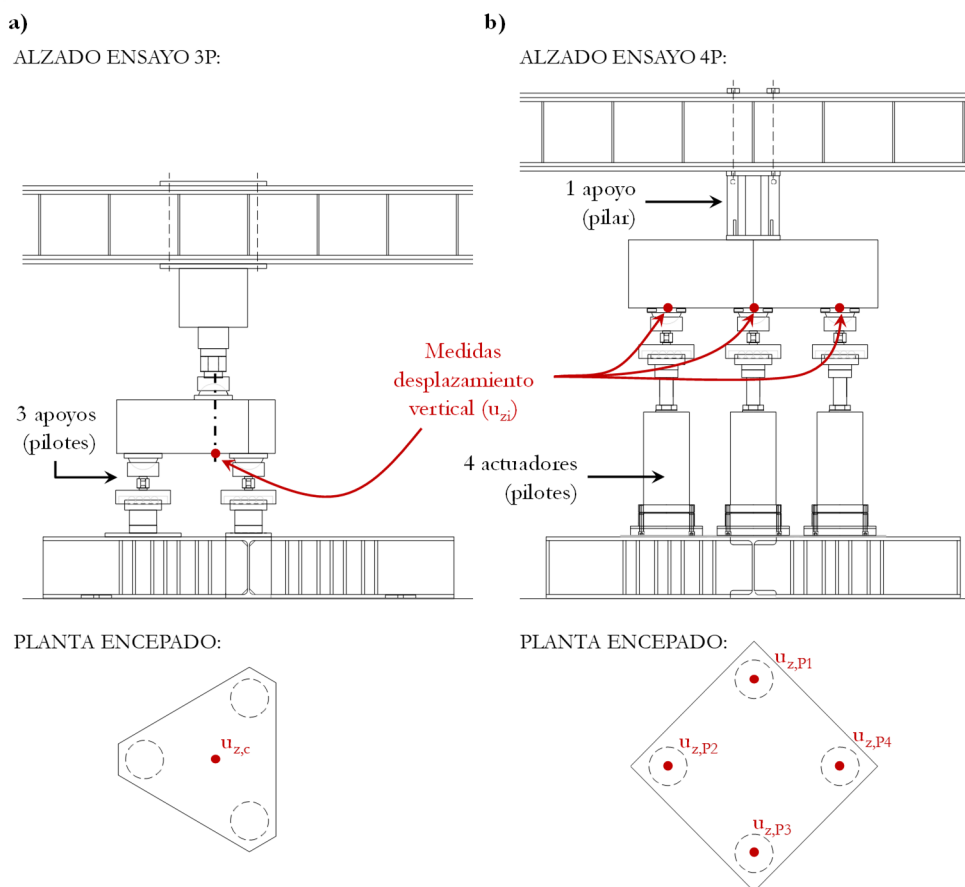


Figura 4.6 Configuración del ensayo y puntos de medida del desplazamiento para la determinación de las curvas carga-deformación.

En las gráficas de la Figura 4.7 se representa en ordenadas la reacción (R) en el pilote que primero falla y en abscisas el desplazamiento vertical ($u_{z,Ri}$) indicado en la Figura 4.6. Estas curvas muestran en general una respuesta frágil de los encepados sin armadura de punzonamiento (tipo 1 y 2), que sucede de forma

repentina y con desplazamientos verticales entre 3-6mm. La rotura ocurre en todos los casos tras la plastificación de la armadura principal (punto $R_{y,B}$ en la Figura 4.7). Sólo en algunos especímenes de mayor canto (3P-N-C1, 4P-N-C1 y 4P-NMM-C2) se detecta un notable cambio de pendiente en la curva carga-desplazamiento antes del fallo.

Se observan roturas dúctiles en la mayoría de encepados al añadir cercos verticales (encepados tipo 3). Este tipo de rotura es deseable desde el punto de vista de la seguridad estructural, ya que se caracteriza por alcanzar desplazamientos muy notables antes del fallo, por lo que puede ser detectado a tiempo. En estos casos el armado secundario vertical en cercos llega incluso a plastificar antes del fallo (punto $R_{y,V}$ en la Figura 4.7), coincidiendo con el bloqueo de la resistencia del encepado.

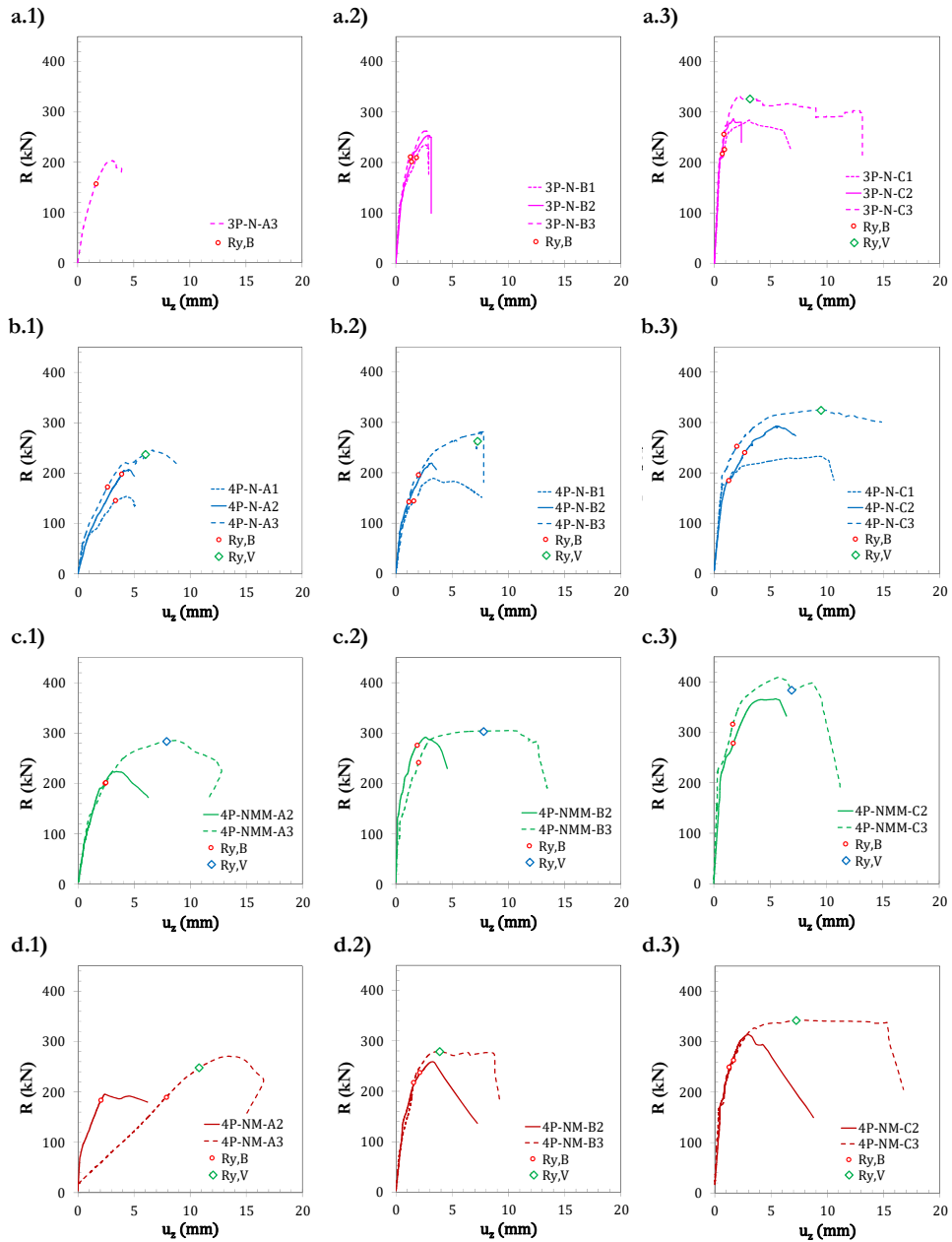


Figura 4.7 Curvas carga desplazamiento con indicación de los puntos de inicio de la plastificación de la armadura principal ($R_{y,B}$) y los cercos ($R_{y,V}$)
a) Serie 1; b) Serie 2; c) Serie 3; d) Serie 4 NOTA: El gran desplazamiento registrado en 4P-NM-A3 se atribuye a un mal funcionamiento del sistema de medida.

4.3.4. Patrón de fisuración

El patrón de fisuración de las cuatro caras laterales y la base se obtiene a partir de las fotografías tomadas de forma sincronizada con el equipo de adquisición de datos. Las fisuras se dibujan sobre las fotografías que corresponden al instante en que se alcanza la carga máxima y post-pico (en rojo) tal y como se muestra en la Figura 4.8. Estas fotografías de todas las caras, así como los patrones de fisuración de todos los ensayos, se incluyen en el *Anejo D Fichas de ensayos*.

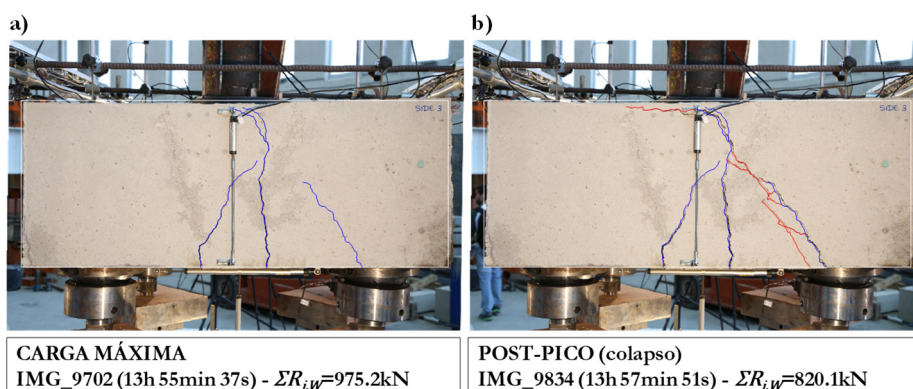


Figura 4.8 Trazado de líneas de fisura sobre las imágenes de la cara 3 del espécimen 4P-N-C1
a) Instante en que se alcanza la carga máxima; b) Instante en que se desarrolla la fisura de colapso (post-pico).

Tomando como ejemplo especímenes con distintas configuraciones de armado y relación vuelo-canto de la serie 2 (4P-N), se describen en la Figura 4.9 los distintos tipos de fisuras observados en los ensayos realizados bajo **carga centrada**.

El desarrollo inicial de las fisuras es similar para todos los especímenes. Primero aparecen fisuras verticales en la zona inferior de las caras laterales, que se propagan por la base hacia el centro (fisuras señaladas como (1) en la Figura 4.9). En los encepados de menor canto aparecen entre 3 y 4 fisuras, mientras que en los de mayor canto se concentran en 1 o 2 de mayor abertura. Con la aparición de estas fisuras empiezan a registrarse deformaciones más significativas en las galgas extensométricas de la armadura en bandas.

Al iniciarse la plastificación de las armaduras principales, las fisuras verticales más próximas a los pilotes comienzan a inclinarse desarrollando fisuras diagonales (fisuras señaladas como (2) en la Figura 4.9). La inclinación observada en

las fisuras podría explicarse por la existencia de tracciones con componente vertical, propias del modelo de celosía de cortante. Si existe armadura en cercos, ésta recibe parte de la tracción vertical, con el consiguiente incremento de la resistencia y ductilidad de los encepados 3P-N-C3, 4P-N-A3, 4P-N-B3 y 4P-N-C3. En los especímenes 3P-N-A2, 3P-N-B2 y 4P-N-B2, sin armadura de punzonamiento, las fisuras inclinadas de las caras progresan hacia el centro completando una forma en arco (fisuras señaladas como (3) en la Figura 4.9), lo que revela la potencial superficie de fallo por punzonamiento (Figura 4.14). En el caso de los encepados de mayor canto se observa la progresión de una única fisura diagonal más allá del centro del encepado (Figura 4.9c).

Se detecta también un tipo de fisura horizontal repentina de suspensión (fisuras señaladas como (4) en la Figura 4.9), que aparece tras sobrepasar la carga máxima en los encepados de menor canto 3P-N-A1, 4P-N-A1 y 4P-N-A2, y en aquellos de canto intermedio sin armadura secundaria 3P-N-B1 y 4P-N-B1. Leonhardt, F. [47] relaciona este tipo de fisuras de suspensión con la existencia de un empuje vertical hacia las bandas, las cuales actuarían como vigas de borde del encepado. En ningún caso se ha observado esta fisura en los encepados de mayor canto (tipo C).

El patrón de fisuración observado en las series 3 y 4, solicitadas por **carga excéntrica**, repite la evolución observada para el caso de carga centrada, aunque acentuado hacia los pilotes más cargados (Figura 4.10). Las primeras fisuras que aparecen son las verticales en las caras, debidas a la concentración de tracción en las bandas. Según la dirección de la excentricidad varía el número y abertura de estas fisuras en las caras, relacionadas con una mayor o menor tracción en los tirantes. Ya no se forman fisuras en arco completas y la fisura diagonal que parte del pilote tiene mayor desarrollo (fisura señalada como (2) en la Figura 4.10). Igual que en los especímenes solicitados por carga centrada, al disponer armadura vertical en cercos aumenta la resistencia y ductilidad de los encepados 4P-NMM-A3, 4P-NMM-B3, 4P-NMM-C3, 4P-NM-A3, 4P-NMM-B3 y 4P-NMM-C3. Se detecta también un tipo de fisura horizontal repentina en algunos encepados solicitados por flexión uniaxial: 4P-NM-A2 y 4P-NM-B2 (Figura 4.10b)

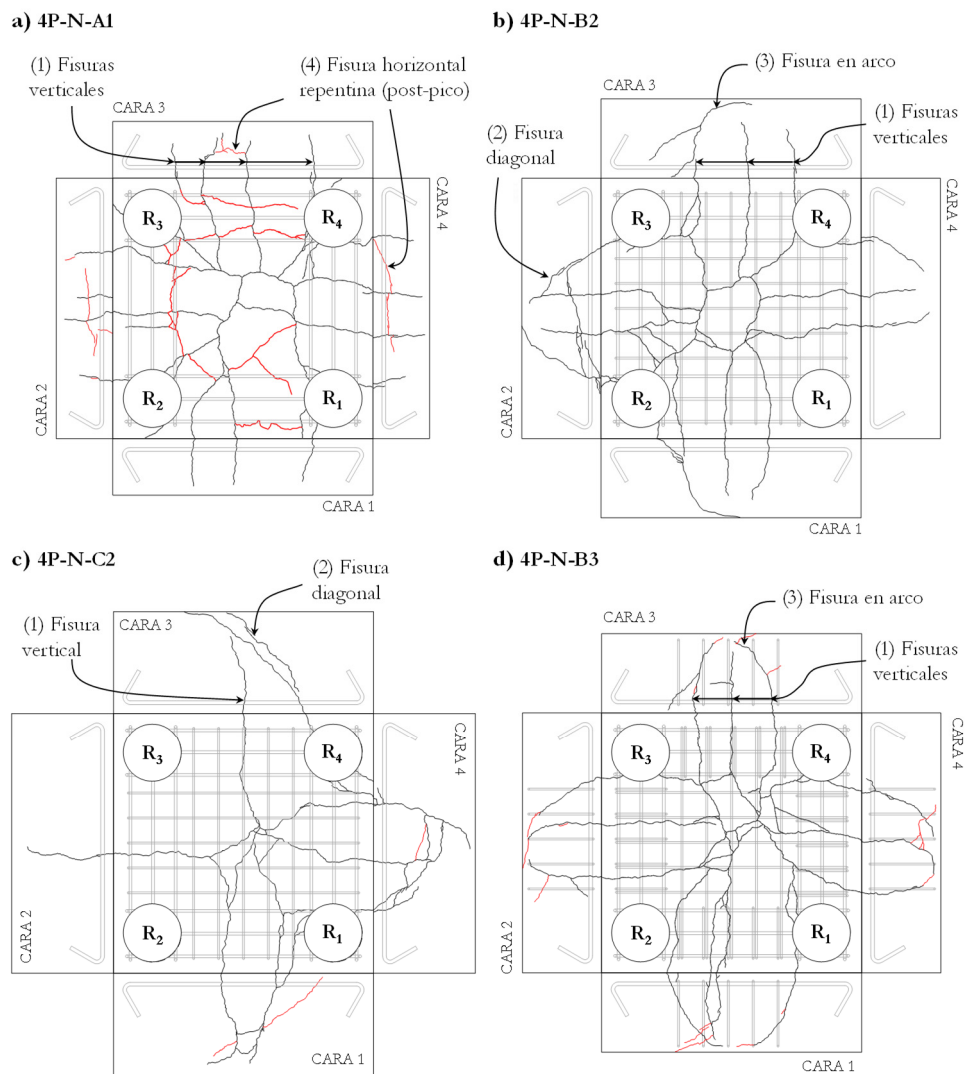


Figura 4.9 Patrón de fisuración en encepados solicitados por carga centrada, con distintas configuraciones de armado y relación vuelo canto
 En negro se representan las fisuras en el instante de carga máxima, en rojo las fisuras post-pico.

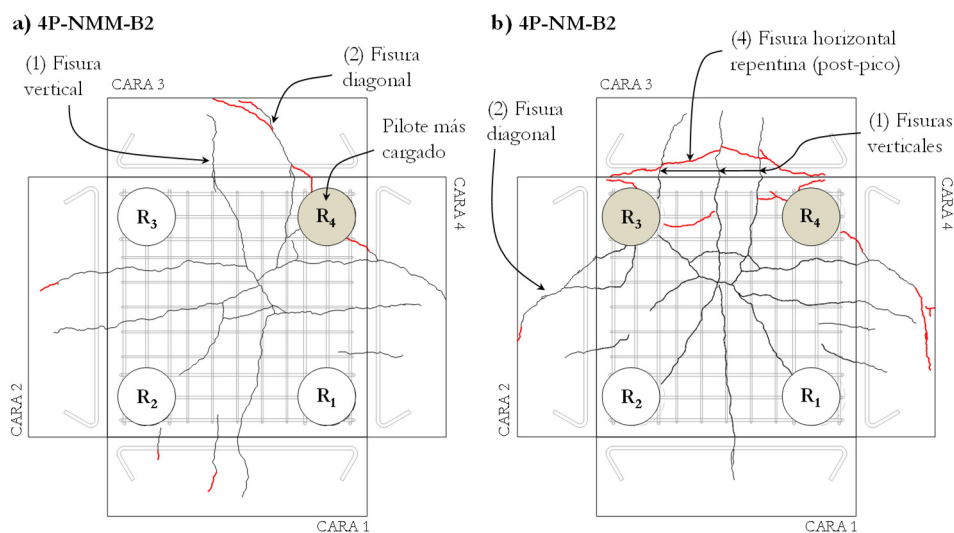


Figura 4.10 Patrón de fisuración en encepados solicitados por carga excéntrica

La variación de la esbeltez (w/d) de los encepados influye en el patrón de fisuración observado, ya que está ligado a la cuantía de armado dispuesta. Para mantener una carga de diseño constante, los encepados de mayor canto se diseñaron con menor área de armado que los de menor canto. Como consecuencia, en los encepados tipo C aparecen pocas fisuras con mayor abertura, mientras que en los encepados tipo A la fisuración está más repartida y es de menor abertura (Figura 4.11).

La disposición de armaduras secundarias también influye en el patrón de fisuración de los especímenes. Por un lado, la disposición de armadura secundaria horizontal resulta eficaz para reducir la abertura de fisura en la base (Figura 4.12a). Por otra parte, la armadura secundaria vertical cose las fisuras diagonales y de suspensión que se generan en las caras (Figura 4.12b), con el consiguiente aumento de resistencia y ductilidad ya mencionado.

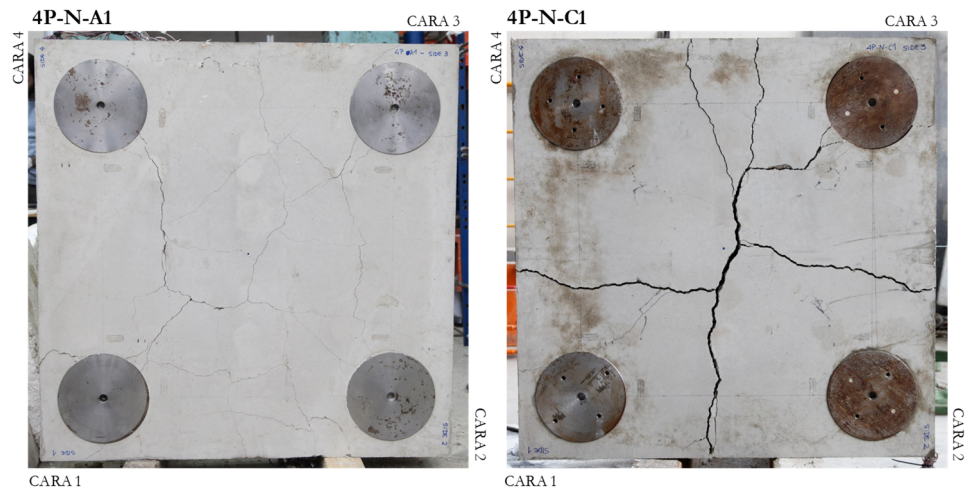


Figura 4.11 Comparación de número y aberturas de fisura en encepados tipo A y C tras la rotura

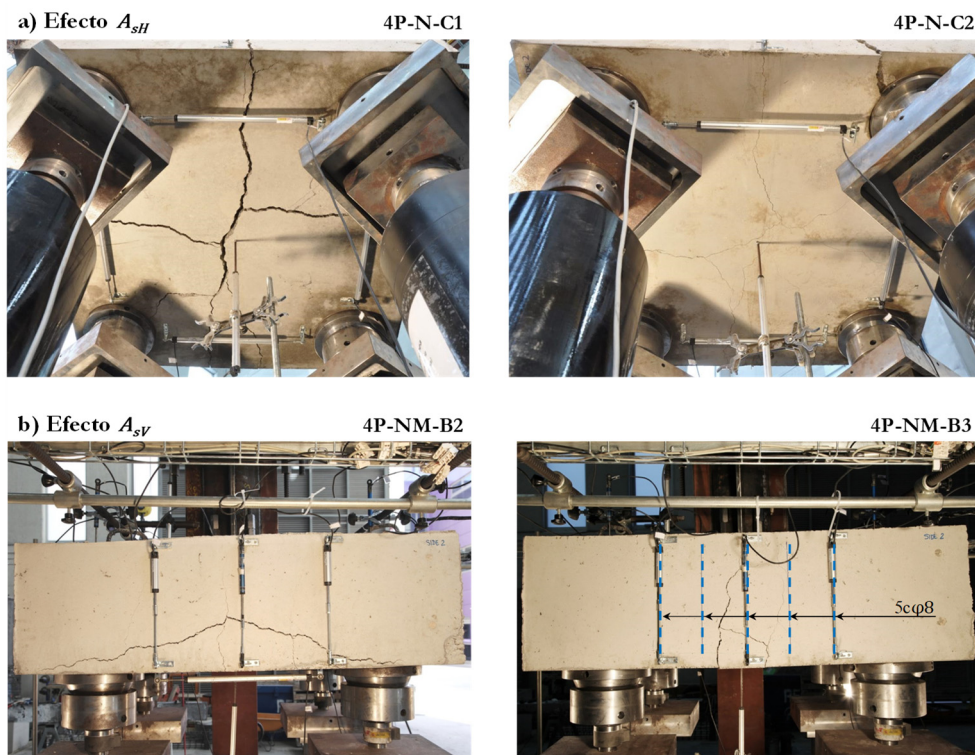


Figura 4.12 Influencia de la armadura secundaria

4.3.5. Modo de fallo

Los tipos de fallo se clasifican en función de dos factores: la respuesta carga-desplazamiento y la plastificación de los distintos grupos de armado. Tal y como se indica en la Figura 4.13, la curva carga-desplazamiento indica la ductilidad (D) o fragilidad (F) de la respuesta observada. A su vez, según se supere la deformación del límite elástico de cada tipo de armado, se definen las siguientes fases: plastificación de la armadura principal en bandas (Y_B), plastificación de la armadura secundaria horizontal (Y_H) y plastificación de la armadura secundaria vertical en cercos (Y_V).

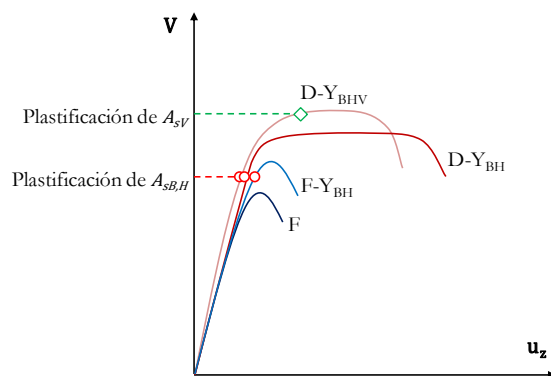


Figura 4.13 Clasificación de los modos de fallo según la ductilidad y secuencia de plastificación de las armaduras

En los encepados de la serie experimental analizada se observan cuatro modos de fallo distintos:

Rotura frágil sin plastificación de armaduras (F)

El encepado 3P-N-A1 presenta una rotura claramente frágil. Aunque se inicia la plastificación de las armaduras antes de alcanzar la carga máxima, no se registran deformaciones superiores a la del límite elástico en todas las bandas antes del fallo. El patrón de fisuración muestra fisuras diagonales desde los pilotes en las caras 1 y 3, y la aparición de una repentina fisura horizontal en la cara 2.

Rotura frágil con armadura horizontal plastificada (F- Y_B o F- Y_{BH})

Aunque al menos el armado en bandas (A_{sB}) superó la deformación correspondiente al límite elástico, se observa una rotura frágil en la mayoría de encepados sin armadura de punzonamiento (todos excepto 3P-N-C1, 4P-N-C1 y 4P-

NMM-C2). La disposición de armadura secundaria vertical tampoco garantiza la ductilidad de la rotura, si estos cercos no llegan a plastificar (3P-N-A3 y 3P-N-B3).

Se observa en estos casos una superficie de rotura compleja, similar a las de punzonamiento descritas por Clarke [2] y Jensen and Hoang [59]. Esta superficie se representa en la Figura 4.14, a partir de las fisuras de las caras y del aspecto final del encepado tras la rotura. Debido a la proximidad entre carga y apoyos, las teóricas superficies cónicas de punzonamiento entorno al pilar y pilote parecen intersectarse para formar una superficie común, por lo que no es evidente identificar entorno a qué carga concentrada (pilar o pilote) se ha producido la rotura.

a) 3P-N-A3



b) 4P-N-B2

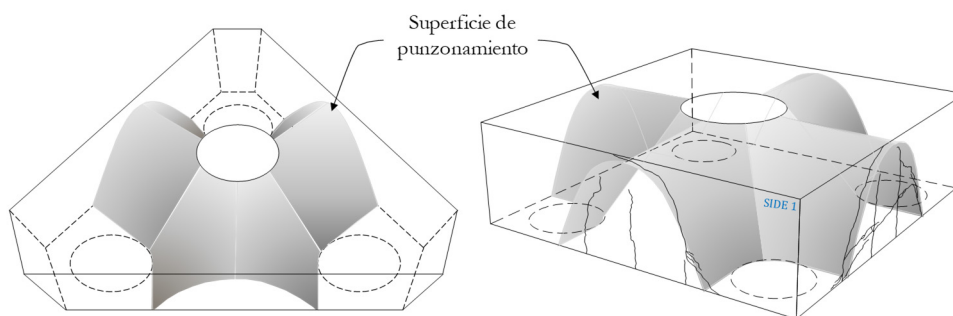


Figura 4.14 Superficie de punzonamiento observada tras la rotura

Rotura dúctil con armadura horizontal plastificada (D-Y_B o D-Y_{BH})

En los especímenes 3P-N-C1, 4P-N-C1 y 4P-NMM-C2, de mayor canto y menor cuantía de armado que los de tipo A y B, se observa la abertura de grandes fisuras en la base tras superar ampliamente el límite elástico de la armadura. Esto se traduce en una deformación importante del encepado, que a pesar de su poca esbeltez tiene un comportamiento dúctil en rotura.

Rotura dúctil con armadura horizontal y vertical plastificada (D-Y_{BHV})

En el caso de los especímenes con armadura secundaria vertical (excepto los mencionados anteriormente 3P-N-A3 y 3P-N-B3), ésta llega a plastificar antes de alcanzar la carga máxima y se observan entonces roturas dúctiles limitadas ya por la capacidad de los cercos verticales.

Capítulo 5

Análisis de resultados mediante modelos de bielas y tirantes

Los modelos de bielas y tirantes (MBT) empleados tradicionalmente para el diseño de encepados de pilotes consideran que la carga aplicada a través del pilar se distribuye directamente a los pilotes por bielas inclinadas. Éstas son recogidas en el plano inferior por tirantes que las unen, formando una estructura interna tridimensional en equilibrio. Pero la disposición de sistemas de armaduras secundarias horizontales y verticales posibilitan el desarrollo de un MBT complementario al de descarga directa y cuya contribución a la resistencia del encepado se está despreciando.

En este capítulo se desarrollan los dos MBTs planteados en el *Capítulo 3* al describir la configuración de armado de los especímenes que conforman la campaña experimental: un MBT de descarga directa hacia los pilotes y otro MBT complementario con campos de tensiones de compresión que distribuyen la carga a las bandas. Ambos modelos pueden emplearse tanto para la verificación como para el dimensionamiento de todo el sistema de armaduras. La definición geométrica de ambos MBT requiere fijar la cota del nudo superior multi-comprimido. Para ello se emplea una formulación desarrollada por el grupo de investigación que considera un ángulo de inclinación de las bielas variable, limitado por la verificación tensional de las zonas nodales. Finalmente, se contrasta la propuesta realizada con los resultados de la campaña experimental y aquellos de la base de datos existente que incluyen armadura secundaria horizontal y vertical.

5.1. Propuesta de modelos de bielas y tirantes para el diseño de encepados

5.1.1. Consideraciones previas

Tal y como señala el *fib* Bulletin 45 [60], el método de las bielas y tirantes proporciona una herramienta de diseño consistente y racional para el diseño de las regiones de discontinuidad (regiones D), en las que la distribución de tensiones no sigue una ley plana y por tanto no se cumple la hipótesis de Bernoulli.

La aplicación del método de las bielas y tirantes está muy extendida, gracias a su incorporación en los principales códigos internacionales de hormigón estructural como son ACI 318-14 [6], CSA A23-3-14 [7], NBR 6118:2014 [8], Eurocódigo 2 EN 1992-1-1[9], Código Modelo 2010 [10] y la española EHE-08 [11] entre otras normas nacionales europeas. Sin embargo, para su empleo en regiones D con marcado comportamiento tridimensional todavía es necesario resolver algunas lagunas.

En este sentido, las principales carencias del método, puestas de manifiesto en su mayor parte en 2008 por el *fib* Bulletin 45 [60] y en 2011 por Reineck en el *fib* Bulletin 61 [12], pueden resumirse en:

- Los MBT que representan el comportamiento 3D de los elementos que lo requieren, como son, por ejemplo, los encepados de pilotes, las losas macizas en las cercanías de un apoyo puntual o los cálices en las zapatas para los pilares prefabricados incluidos en la nueva EHE-08, se encuentran escasamente desarrollados.
- La comprobación de las zonas nodales no se encuentra resuelta en el caso tridimensional. Para geometrías complejas de zonas nodales 3D, los factores de eficacia desarrollados para estados biaxiales de tensiones pueden ser inapropiados.
- En el caso de regiones D en el espacio tridimensional, los ensayos experimentales disponibles encontrados en la bibliografía versan fundamentalmente sobre encepados de pilotes con carga exclusivamente vertical centrada y monótona. La influencia de un esfuerzo aplicado por el soporte de flexión compuesta o de una carga horizontal o la aplicación cíclica de los esfuerzos de flexión y cortante del soporte sobre el encepado no ha sido mostrada experimentalmente.

En el caso del diseño de encepados, estas incertidumbres se concretan en la localización del nudo superior multi-comprimido y en la definición geométrica de las bielas y zonas nodales para su verificación tensional.

Por otra parte, tal y como se apunta en la introducción al presente capítulo, la disposición de armadura secundaria horizontal y vertical, posibilita la formación de campos tensionales que podrían ser más eficientes que el habitual de bielas de descarga directa pilar-pilote. La definición de un MBT más complejo que represente las armaduras secundarias como tirantes dentro de un sistema equilibrado de compresiones, permitiría contabilizar la contribución resistente de dicho armado. Esto se traduciría en diseños de encepados más eficientes y una verificación de la resistencia de estructuras existentes más precisa.

5.1.2. Obtención de las fuerzas equivalentes

El primer paso para el análisis mediante MBT de una región D es determinar las fuerzas puntuales equivalentes a los esfuerzos internos existentes al aislar dicha región. De esta forma quedan fijadas las posiciones de los primeros nudos, sobre los que partirán bielas o tirantes, dependiendo de si se aplican fuerzas de compresión o tracción respectivamente.

En la Figura 5.1 se describe el caso general de un encepado solicitado por una carga vertical (P) no centrada (excentricidad $e_u = \sqrt{e_x^2 + e_y^2}$). Este estado de flexión compuesta puede descomponerse en un par de fuerzas de tracción (T) y compresión (C) dadas por las Ec. (5.1) y (5.2), con un brazo mecánico z_c .

$$T = P \frac{e_u - e_c}{z_c} \quad (5.1)$$

$$C = P \frac{z_c + e_u - e_c}{z_c} \quad (5.2)$$

siendo

$$e_c = z_c - e_T \quad (5.3)$$

que puede descomponerse en

$$e_{cj} = e_c \frac{e_j}{e_u}, \quad \text{para } j = x, y \quad (5.4)$$

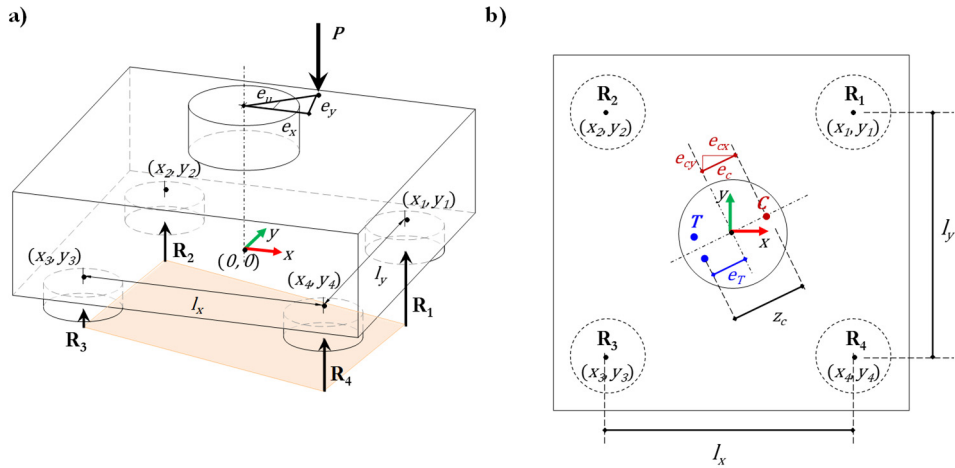


Figura 5.1 Encepado solicitado por una carga excéntrica ($P \cdot e_u$)
a) Ley lineal de reacciones; b) Par de fuerzas C , T equivalentes a la carga excéntrica

Además de las fuerzas actuantes, se requiere determinar las reacciones en los pilotes. En el caso de los encepados de tres pilotes, la estructura se sustenta en tres puntos con reacción vertical y la estructura se halla estáticamente determinada. En cambio, si ésta se apoya en cuatro puntos, estas reacciones no pueden determinarse exclusivamente por medio de las ecuaciones de equilibrio. Es necesario imponer una condición adicional para determinar el valor de las reacciones. La hipótesis más usual para la comprobación resistente del encepado es suponer que los valores de las reacciones siguen una ley lineal (plana), dada por la Ec. (5.5). En esta ecuación, P es la carga aplicada, e_x , e_y las componentes de la excentricidad en cada dirección y x_i , y_i son las coordenadas de los ejes de los pilotes respecto al centro del soporte.

$$R_i = P \left(\frac{1}{4} + \frac{e_x}{\sum x_i^2} x_i + \frac{e_y}{\sum y_i^2} y_i \right) \quad (5.5)$$

5.1.3. Modelo de bielas y tirantes de descarga directa a los pilotes, MBT-1

5.1.3.1 Descripción del MBT-1

El MBT-1 representa la transmisión de la carga del pilar a los pilotes mediante bielas directas diagonales. Su resolución para casos de carga centrada ha sido ampliamente estudiada, tal y como se ha expuesto en el apartado 2.2.2 del *Capítulo 2*, siendo la altura del nudo superior comprimido la principal diferencia entre las propuestas presentadas. En cambio, para casos de carga excéntrica existen pocas referencias. Únicamente la de Souza et al. en 2007 [45] y la resolución de ejemplos prácticos descritos por guías técnicas como la *monografía M6* de ACHE [46], el *fib Bulletin 61* [12] y la *Special Publication 273* del ACI [13]. En todos los casos se realizan hipótesis conservadoras en cuanto a la localización del nudo superior multi-comprimido y la verificación tensional de las zonas nodales. Además, ante la ausencia de ensayos experimentales con excentricidad, estas propuestas no han sido contrastadas.

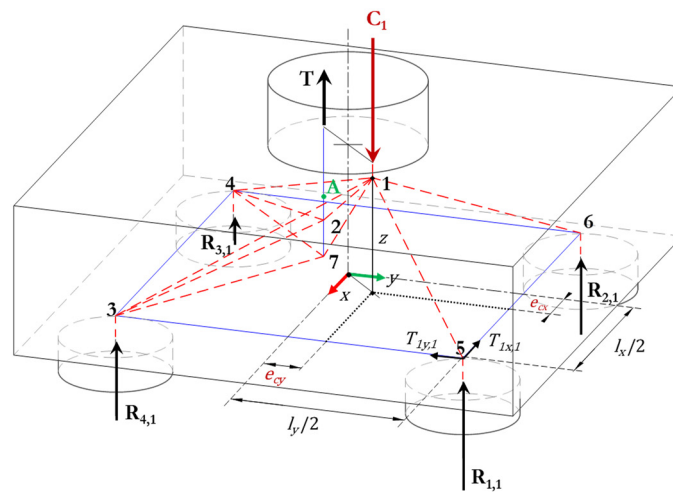


Figura 5.2 MBT-1 de descarga directa para encepados de cuatro pilotes bajo flexión compuesta

El MBT-1 que se presenta en este capítulo (Figura 5.2) considera la actuación de una posible carga vertical hacia arriba, ejercida por la armadura cuando el soporte se encuentra en flexión compuesta. Toda la tracción (T) calculada con la Ec. (5.1) se aplica a este modelo y se equilibra dentro del encepado en el nudo 2 mediante las bielas 1-2, 2-3 y 2-4. Si en el tramo vertical de esta armadura no se produce la pérdida de su tracción (longitud de anclaje

insuficiente), ésta debe equilibrarse en el nudo 7 por doblado de la armadura, formándose la biela 1-7. La compresión C_1 se reparte hacia los pilotes generando las bielas 1-3, 1-4, 1-5 y 1-6.

En caso de que la longitud de la armadura vertical sea suficiente para transmitir por adherencia el total de la tracción al hormigón, el tirante vertical terminaría en el punto 2 y el nudo 7 y sus bielas asociadas no existirían. La longitud de anclaje no debe empezar a contabilizarse desde la cara superior del encepado, ya que la armadura sólo puede empezar a ceder su tracción a partir del punto “A” determinado por el plano que pasa por los puntos 1, 3 y 4. Es desde este punto desde el que debe empezar a contabilizarse la longitud de anclaje en prolongación recta.

La cota del nudo 2 dependerá por tanto del tipo de anclaje de la armadura vertical traccionada. En el primer caso, si es necesario el anclaje por doblado de la armadura, el nudo 2 estará situado en la mitad de la altura entre el punto A y el nudo 7. En caso de que sea posible el anclaje en vertical por prolongación recta, el nudo 2 se sitúa a una distancia igual a la mitad de la longitud de anclaje, medida desde el punto “A” hacia el fondo del encepado.

La cota del nudo 1 (z en la Figura 5.2) vendrá condicionada por el ángulo de inclinación de las bielas (θ_b) que resulte limitante en la verificación tensional del hormigón en esa zona. Según las observaciones experimentales, tras alcanzar la deformación de plastificación en las armaduras principales, los encepados sin armadura de punzonamiento admiten un aumento de la carga aplicada de hasta un 34%. En estos casos, en los que no existe la contribución de una armadura vertical adicional, el incremento de resistencia se justificaría por un aumento del ángulo de inclinación de las bielas, que queda limitado por las tensiones en el hormigón al estrecharse la sección de las bielas en la zona nodal superior. En el apartado 5.1.5 se desarrolla el procedimiento para la determinación del ángulo de inclinación de las bielas y la comprobación simultánea de la zona nodal superior

5.1.3.2 Determinación de la posición del punto A en el MBT-1

El punto “A” es el punto de intersección de la recta vertical definida por la armadura traccionada del soporte (situada en el centro de gravedad del armado dispuesto) y el plano formado por los puntos 1, 3 y 4.

La ecuación del plano que pasa por los puntos 1, 3 y 4 se puede formular a partir de un punto de paso (punto 1) y el vector \vec{n} perpendicular a dicho plano, cuyo su producto escalar nulo:

$$(x - x_1) \cdot n_x + (y - y_1) \cdot n_y + (z - z_1) \cdot n_z = 0 \quad (5.6)$$

siendo

$$\vec{n} = n_x i + n_y j + n_z k = \vec{v}_{14} \wedge \vec{v}_{13}$$

$$\vec{v}_{14} = \begin{pmatrix} x_4 - x_1 \\ y_4 - y_1 \\ z_4 - z_1 \end{pmatrix}; \quad \vec{v}_{13} = \begin{pmatrix} x_3 - x_1 \\ y_3 - y_1 \\ z_3 - z_1 \end{pmatrix}$$

Este producto escalar, que constituye la ecuación del plano, se puede escribir como:

$$\begin{vmatrix} x - x_1 & y - y_1 & z - z_1 \\ x_4 - x_1 & y_4 - y_1 & z_4 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix} = 0 \quad (5.7)$$

La ecuación de la recta vertical que define la armadura es:

$$x = v_{2,x}; \quad y = v_{2,y} \quad (5.8)$$

La cota del punto "A" (z_A) se obtiene directamente sustituyendo estos valores de x e y en la ecuación (5.7):

$$\begin{vmatrix} v_{2,x} - x_1 & v_{2,y} - y_1 & z_A - z_1 \\ x_4 - x_1 & y_4 - y_1 & z_4 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix} = 0 \quad (5.9)$$

Despejando la cota (z_A) queda:

$$z_A = z_1 - \frac{\begin{vmatrix} y_4 - y_1 & z_4 - z_1 \\ y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix} \cdot (v_{2,x} - x_1) - \begin{vmatrix} x_4 - x_1 & z_4 - z_1 \\ x_3 - x_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix} \cdot (v_{2,y} - y_1)}{\begin{vmatrix} x_4 - x_1 & y_4 - y_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 \end{vmatrix}} \quad (5.10)$$

La comparación entre la longitud neta de anclaje de la armadura en prolongación recta ($l_{b,net}$) y la diferencia entre el canto útil del encepado (d) y la distancia d_A , siendo $d_A = z_1 - z_A$, permite diferenciar el tipo de modelo de bielas y tirantes a utilizar:

- Si $l_{b,net} \leq d - d_A$, entonces la longitud de la armadura en vertical es suficiente para anclar por adherencia (Figura 5.2b). El nudo 2 se encuentra a una distancia del punto "A" igual a la mitad de la longitud neta de

anclaje de la armadura ($z_2 = z_A - l_{b,neto} / 2$). El nudo 7 no existe y la tracción T_b que se aplica al nudo 2 es igual a T .

- En cambio, si $l_{b,neto} \leq d - d_A$, entonces el nudo 2 se encuentra en el centro de la longitud $d - d_A$ y la fuerza aplicada es $T_b = T \cdot (d - d_A) / l_{b,neto}$. En el nudo 7 se aplica la tracción restante $T - T_b$.

5.1.3.3 Cálculo de esfuerzos en el MBT-1

Conocidas las cargas aplicadas y las reacciones, la geometría del encepado, así como el tipo de anclaje de la armadura vertical, es posible determinar los esfuerzos en las barras articuladas del modelo (bielas y tirantes).

Se muestran a continuación las ecuaciones explícitas para determinar la tracción máxima en los tirantes horizontales del MBT que parten del pilote en el que se tiene la reacción máxima ($R_{1,i}$). Estos tirantes conectan los nudos 5-6 y 5-3 y su tracción se indica como $T_{1x,1}$ y $T_{1y,1}$ respectivamente, en la Figura 5.2. Su valor depende también de la separación entre pilotes (l_x, l_y) y de las componentes de la excentricidad e_{cx}, e_{cy} (ver Figura 5.2).

$$T_{1x,1} = R_{1,1} \frac{\frac{l_x}{2} - e_{cx}}{z} \quad (5.11)$$

$$T_{1y,1} = R_{1,1} \frac{\frac{l_y}{2} - e_{cy}}{z} \quad (5.12)$$

5.1.4. Modelo de bielas y tirantes de descarga distribuida a las bandas, MBT-2

5.1.4.1 Descripción del MBT-2

Tras los ensayos experimentales sobre encepados de pilotes llevados a cabo por Clarke [2] en 1973 en Stuttgart, Leonhardt [47] apuntó ya en 1974 la posible existencia de empujes verticales sobre las bandas entre pilotes que generaban fisuras de suspensión en las caras y el repentino fallo del encepado.

Partiendo de este concepto, se plantea un sistema de transmisión de fuerzas desde la columna a los pilotes que consiste en la composición de cuatro campos de tensiones de forma triangular que distribuyen la carga a las bandas de armadura entre los pilotes (Figura 5.3).

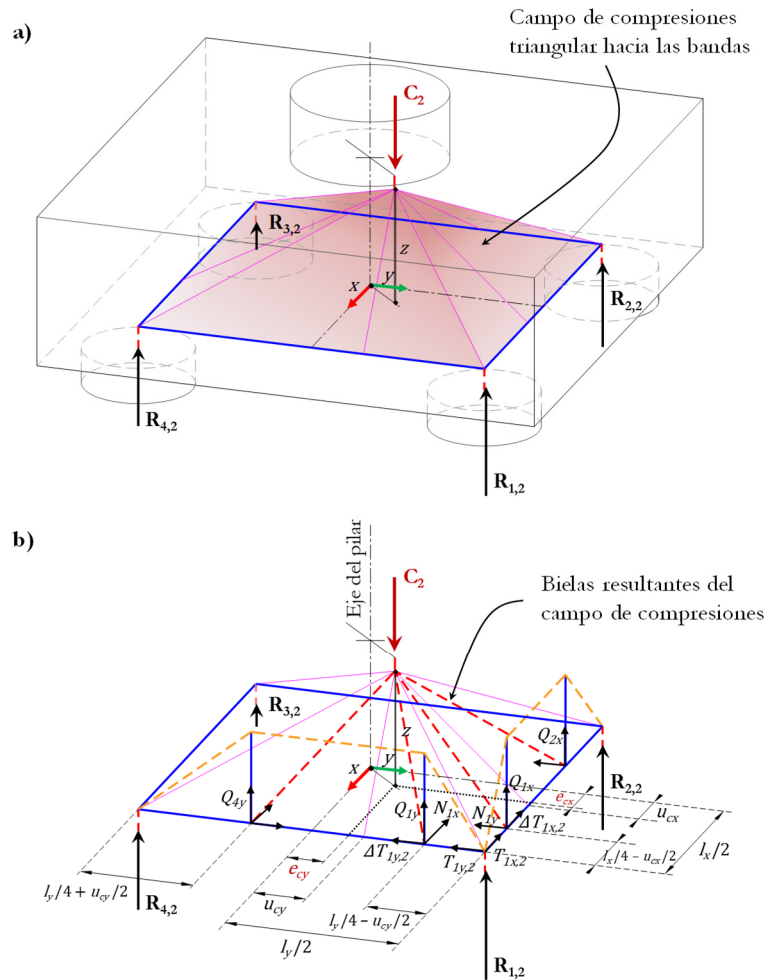


Figura 5.3 a) Distribución de la compresión C_2 hacia las bandas mediante cuatro campos de tensiones de forma triangular; b) MBT-2 para encepados solicitados por carga excéntrica. Por sencillez sólo se muestran las bielas y tirantes de las bandas 1-2 y 4-1

Cada uno de estos campos tensionales se descompone en dos campos triangulares cuya resultante puede representarse mediante bielas diagonales. La división entre estos dos campos tensionales se hace de forma que la suma de las componentes verticales de cada biela (Q_{ix} y Q_{iy} en la Figura 5.3b) sea igual a la reacción más cercana ($R_{i,2}$). De esta forma, la biela que une los dos tirantes verticales es completamente horizontal, ya que no transmite cortante de un pilote hacia el otro. La posición del punto de apoyo de la biela en la banda (u_{cx} , u_{cy} en

la Figura 5.3b) se calcula según las Ecs. (5.17) y (5.18) para que se cumpla el equilibrio de fuerzas (Ecs. (5.15) y (5.16)) en dirección de la banda entre las dos bielas que se apoyan en ella ($\Delta T_{ix,2}$ o $\Delta T_{iy,2}$ en la Figura 5.3b).

La componente horizontal perpendicular a la banda de cada biela (N_{ix} , N_{iy} en la Figura 5.3b), genera un estado de fuerzas auto-equilibradas en el plano inferior de armado del encepado. Se trata de un estado tensional plano que es resistido por el conjunto de armaduras secundarias y el hormigón.

5.1.4.2 Cálculo de esfuerzos en el MBT-2

Para completar la definición del MBT-2 se establecen las siguientes condiciones:

- La distribución de reacciones en los pilotes bajo la carga excéntrica C_2 sigue una ley plana:

$$R_{i,2} = C_2 \left(\frac{1}{4} \pm \frac{e_{cx}}{2l_x} \pm \frac{e_{cy}}{2l_y} \right) \quad (5.13)$$

- De forma aproximada, únicamente para la determinación de u_{cx} y u_{cy} , se supone que la componente vertical de cada biela (Q_{ix} y Q_{iy}) es igual a la mitad de la reacción en el pilote más próximo:

$$Q_{ix} = Q_{iy} = \frac{R_{i,2}}{2} = \kappa_i C_2 \quad (5.14)$$

donde

$$\kappa_1 = \frac{1}{8} + \frac{e_{cx}}{4l_x} + \frac{e_{cy}}{4l_y}; \quad \kappa_2 = \frac{1}{8} - \frac{e_{cx}}{4l_x} + \frac{e_{cy}}{4l_y}$$

$$\kappa_3 = \frac{1}{8} - \frac{e_{cx}}{4l_x} - \frac{e_{cy}}{4l_y}; \quad \kappa_4 = \frac{1}{8} + \frac{e_{cx}}{4l_x} - \frac{e_{cy}}{4l_y}$$

- Existe una tracción constante ($\Delta T_{ix,2}$ o $\Delta T_{iy,2}$) en dirección de la banda entre las dos bielas que se apoyan en ella:

$$\Delta T_{1x,2} = \frac{Q_{1x}}{z} \left(\frac{l_x}{4} - \frac{u_{cx}}{2} + u_{cx} - e_{cx} \right) = \frac{Q_{2x}}{z} \left(\frac{l_x}{4} + \frac{u_{cx}}{2} - u_{cx} + e_{cx} \right) \quad (5.15)$$

$$\Delta T_{1y,2} = \frac{Q_{1y}}{z} \left(\frac{l_y}{4} - \frac{u_{cy}}{2} + u_{cy} - e_{cy} \right) = \frac{Q_{4y}}{z} \left(\frac{l_y}{4} + \frac{u_{cy}}{2} - u_{cy} + e_{cy} \right) \quad (5.16)$$

A partir de las Ecs. (5.15) y (5.16), se despeja el valor de la posición del punto de apoyo de la biela en la banda (u_{cx} , u_{cy}):

$$u_{cx} = 2e_{cx} - \frac{l_x Q_{1x} - Q_{2x}}{2 Q_{1x} + Q_{2x}} = 2e_{cx} - \frac{l_x \kappa_1 - \kappa_2}{2 \kappa_1 + \kappa_2} = 2e_{cx} - \frac{e_{cx}}{1 + 2 \frac{e_{cy}}{l_y}} = e_{cx} \frac{1 + 4 \frac{e_{cy}}{l_y}}{1 + 2 \frac{e_{cy}}{l_y}} \quad (5.17)$$

$$u_{cy} = 2e_{cy} - \frac{l_y Q_{1y} - Q_{4y}}{2 Q_{1y} + Q_{4y}} = 2e_{cy} - \frac{l_y \kappa_1 - \kappa_4}{2 \kappa_1 + \kappa_4} = 2e_{cy} - \frac{e_{cy}}{1 + 2 \frac{e_{cx}}{l_x}} = e_{cy} \frac{1 + 4 \frac{e_{cx}}{l_x}}{1 + 2 \frac{e_{cx}}{l_x}} \quad (5.18)$$

Una vez conocida la posición de estos puntos, las tracciones en los principales tirantes del MBT-2 resultan:

$$T_{1x,2} = R_{1,2} \frac{\frac{l_x}{2} - e_{cx}}{4z_2}; \quad T_{1y,2} = R_{1,2} \frac{\frac{l_y}{2} - e_{cy}}{4z_2} \quad (5.19)$$

$$\Delta T_{1x,2} = R_{1,2} \frac{\frac{l_x}{2} + u_{cx} - 2e_{cx}}{4z}; \quad \Delta T_{1y,2} = R_{1,2} \frac{\frac{l_y}{2} + u_{cy} - 2e_{cy}}{4z} \quad (5.20)$$

$$N_{1y} = Q_{1y} \frac{\frac{l_y}{2} - e_{cy}}{z}; \quad N_{1x} = Q_{1x} \frac{\frac{l_x}{2} - e_{cx}}{z} \quad (5.21)$$

5.1.5. Determinación del ángulo de inclinación de las bielas y limitación de tensiones en el hormigón

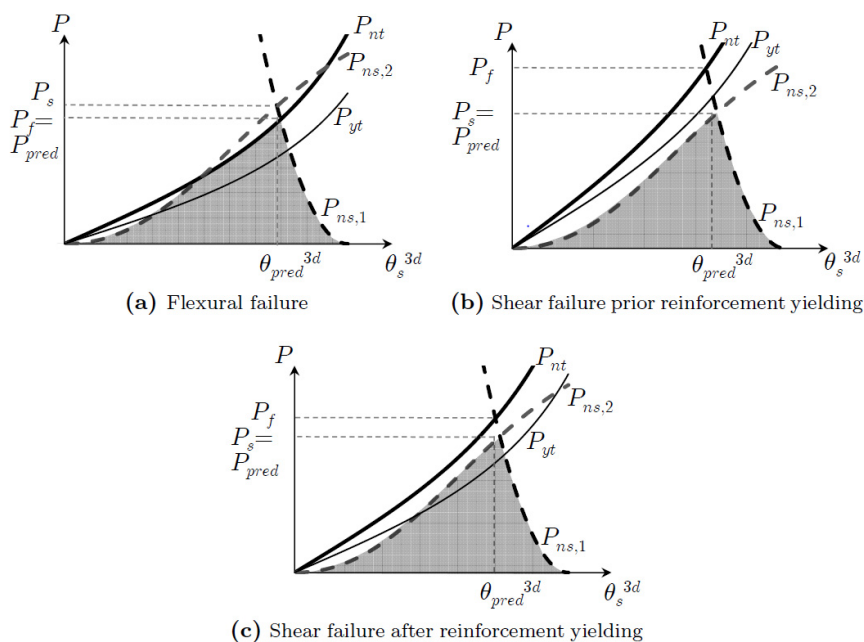
Para completar las verificaciones relativas al método de bielas y tirantes, queda comprobar el estado tensional en bielas y zonas nodales, de forma que no se produzca la rotura debida al hormigón por compresión o tracciones indirectas (*splitting*). Además, la definición geométrica de los anteriores MBT's requiere fijar la cota (z) del nudo superior multi-comprimido, la cual es función del ángulo de inclinación de las bielas (θ_b).

Los resultados de la campaña experimental han revelado que los encepados estudiados resisten entre un 4% y un 54% más de carga, tras detectarse el inicio de la plastificación en la armadura de bandas (ΣR_{yB}). Esto conduce a la idea de que existe una redistribución de tensiones en el interior del encepado que maximiza la resistencia. Desde un enfoque basado en modelos de bielas y tirantes, el aumento de la carga resistida tras la plastificación de la armadura solo puede explicarse por un aumento el ángulo de inclinación de las bielas (θ_b).

A partir de esta observación experimental, y del contraste numérico realizado por Meléndez, C. [17] en su tesis doctoral, realizada como parte del mismo proyecto de investigación, Meléndez, C. [17] realiza una propuesta de MBT cuyo ángulo de inclinación de las bielas se determina a partir de la evaluación de distintos modos de fallo: resistencia de las armaduras (modo i), rotura por aplastamiento del hormigón en el nudo superior (modo ii) y *splitting* de la biela directa debida a la fisuración transversal (modo iii).

Para ello plantean tres curvas límite (Figura 5.4), una por cada modo de fallo, que relacionan la carga total aplicada en el pilar con el ángulo de inclinación de las bielas y la tensión límite del material (acero u hormigón) en cada caso:

- Modo i: $P_{yt} = f(\theta_b, f_{sy})$ o $P_{nt} = f(\theta_b, f_{max})$, según se tome la tensión de plastificación del acero o la máxima respectivamente.
- Modo ii: $P_{ns,1} = f(\theta_b, f_{cp})$
- Modo iii: $P_{ns,2} = f(\theta_b, f_{ce})$

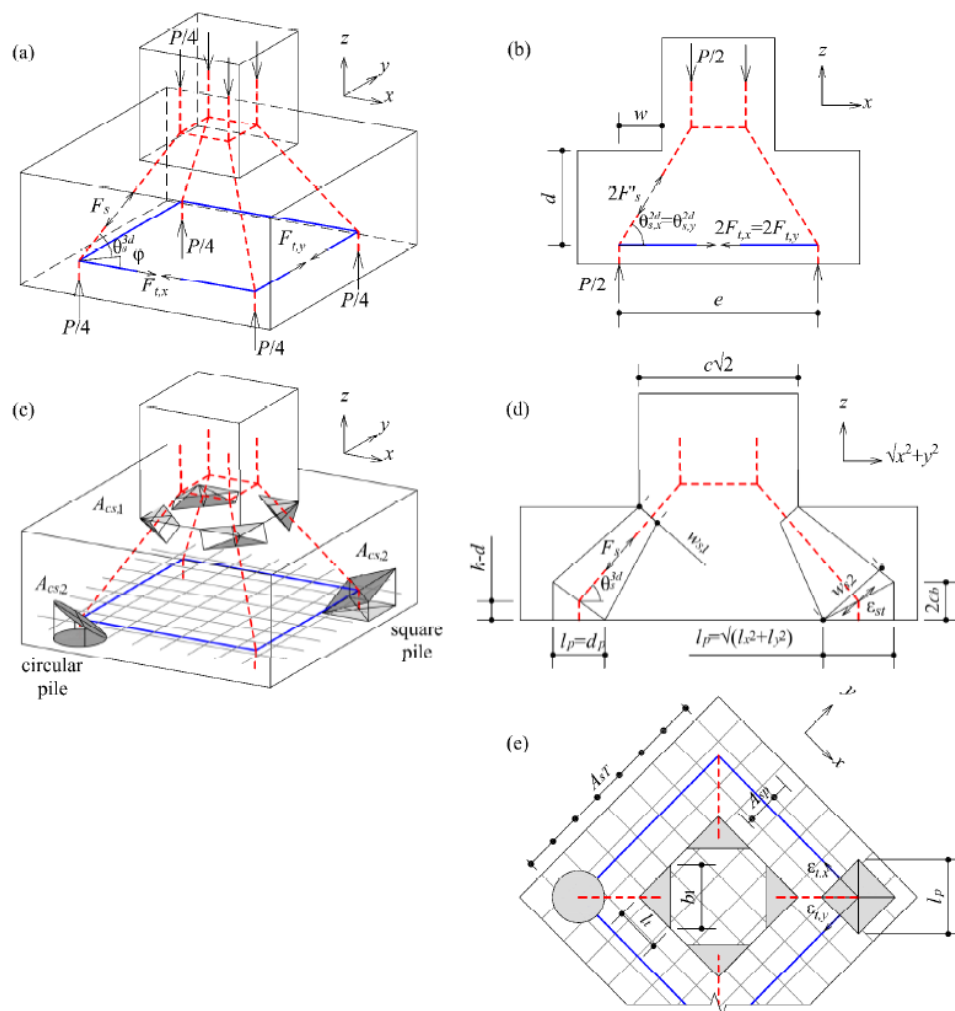


FUENTE: Meléndez, C. [17]

Figura 5.4 Curvas que representan las ecuaciones límite de cada modo de fallo
a) Agotamiento por flexión; b) Rotura por cortante previo a la plastificación del armado; c) Rotura por cortante tras la plastificación del armado

La intersección de estas curvas que maximiza el ángulo da la resistencia predicha y el modo de fallo que ha resultado limitante. Si la intersección se da entre las curvas P_{nt} y $P_{ns,1}$ (Figura 5.4a), se agota la resistencia a tracción de las armaduras y a compresión del hormigón, lo que se asemeja a un fallo por flexión. Si la intersección se da entre las curvas $P_{ns,1}$ y $P_{ns,2}$, sin que se haya producido la intersección de P_{yt} con $P_{ns,1}$ (Figura 5.4b), se espera un fallo por cortante o punzonamiento, previo a la plastificación de las armaduras. En cambio, si la intersección se produce tras superar el corte con P_{yt} , el fallo será por cortante o punzonamiento tras la plastificación de las armaduras.

El modelo se desarrolló para encepados rectangulares de cuatro pilotes, sin armadura secundaria vertical y solicitados por carga centrada, ya que se disponía de una extensa base de datos experimental para poder contrastar su precisión frente a los modelos planteados por Adebar y Zhou [4], Souza et al. [43] y Park et al. [61]. Esta propuesta resultó tener el menor coeficiente de variación (COV: 0.12) de entre los modelos analizados y una media de los valores de la ratio carga experimental-predicha de 1.08.



FUENTE: Meléndez, C. [17]

Figura 5.5 Descripción de las principales variables del MBT propuesto por Meléndez, C. [17]
a) vista 3D del modelo y fuerzas aplicadas; b) vista 2D del modelo; c) vista 3D de las de las zonas nodales a comprobar; d) sección diagonal; e) vista en planta de los detalles de las zonas nodales

A continuación, se describen las principales ecuaciones del modelo, incluyendo las necesarias puntualizaciones para extender su aplicación a encepados de tres y cuatro pilotes, con armadura secundaria vertical y solicitados por cargas centradas y excéntricas.

5.1.5.1 Resistencia de las armaduras (modo i)

La carga máxima limitada por la resistencia de las armaduras (P_{yt} o P_{nt}), se determina a partir de la combinación de los MBT's anteriormente presentados. El procedimiento a seguir para obtener dicha carga, conocida el área de armadura dispuesta, se detalla en el apartado 5.2.

Este proceso incluye como incógnita la cota del nudo superior (z). Ésta se expresa en la Ec. (5.15) en función del ángulo de inclinación de las bielas (θ_b), ya que se trata de la variable a maximizar según la propuesta de comprobación.

$$z = \begin{cases} \tan \theta_b \frac{l_x}{\sqrt{3}}, & \text{serie 3P} \\ \tan \theta_b \sqrt{(l_x/2 - e_{cx})^2 + (l_y/2 - e_{cy})^2}, & \text{series 4P} \end{cases} \quad (5.22)$$

5.1.5.2 Aplastamiento del hormigón bajo el pilar (modo ii)

La sección crítica para evaluar la resistencia por aplastamiento del hormigón se localiza en el tramo superior de la biela directa. En esa zona se genera un estrechamiento de la biela, limitado por la cara superior del encepado y el borde del pilar (Figura 5.5d). De forma simplificada, se describe un área crítica ($A_{cs,l}$), que resulta de la proyección de un triángulo horizontal en la dirección de la biela. Las dimensiones de este triángulo horizontal (l_x, l_y) están condicionadas por la inclinación de la biela directa ($\theta_b \equiv \theta_s^{3d}$ en la Figura 5.5) dado que el centro de gravedad de esta debe coincidir con el del triángulo. Las Ecs. (5.26) y (5.27) son una extensión de la formulación planteada por Meléndez, C. [17], y permiten determinar los lados del triángulo horizontal en casos de encepados de tres pilotes solicitados por carga centrada (Figura 5.6), y de cuatro pilotes solicitados por carga excéntrica (Figura 5.7). Para mantener el sentido práctico y sencillo de la formulación, se adopta la hipótesis de que la sección del pilar es un cuadrado de área equivalente al círculo original.

La máxima tensión admisible en la sección superior de la biela está limitada por la resistencia plástica del hormigón (f_{cp}) [62], asumiendo un comportamiento

uniaxial no fisurado del material en esa zona. Así, la resistencia al aplastamiento de la biela directa ($F_{ns,1}$) se obtiene como:

$$F_{ns,1} = A_{cs,1} f_{cp} \quad (5.23)$$

donde,

$$A_{cs,1} = A_{cs,1h} \sin \theta_b \quad (5.24)$$

$$A_{cs,1h} = \begin{cases} \frac{1}{2} l_t^2, & \text{serie 3P} \\ \frac{1}{2} l_{tx} l_{ty}, & \text{series 4P} \end{cases} \quad (5.25)$$

$$l_t = \frac{3}{\sqrt{2}} \left(\frac{d}{\tan \theta_s^{3d}} - w' \right) \quad (5.26)$$

$$l_{tx} = 3 \left[\frac{d \sin \varphi}{\tan \theta_b} - w_x \right]; \quad l_{ty} = 3 \left[\frac{d \cos \varphi}{\tan \theta_b} - w_y \right] \quad (5.27)$$

siendo,

$$\varphi = \operatorname{atan} \left(\frac{l_x/2 - e_{cx}}{l_y/2 - e_{cy}} \right)$$

$$f_{cp} = \begin{cases} f_c & \text{si } f_c \leq 20 \text{MPa} \\ 2.7 f_c^{2/3} & \text{si } f_c > 20 \text{MPa} \end{cases}$$

La limitación de compresión máxima en la biela ($F_{ns,1}$), únicamente resulta aplicable a las bielas directas del MBT-1. En consecuencia, la Ec. (5.28) proporciona una limitación a la parte de reacción dada por este modelo ($R_{I,1}$). En caso de que exista armadura secundaria vertical, para obtener la reacción total R_I debe añadirse la componente de reacción que resulta del MBT-2 ($R_{I,2}$ en el diagrama de la Figura 5.8).

$$R_{1,1} = A_{cs,1h} \sin^2(\theta_b) f_{cp} \quad (5.28)$$

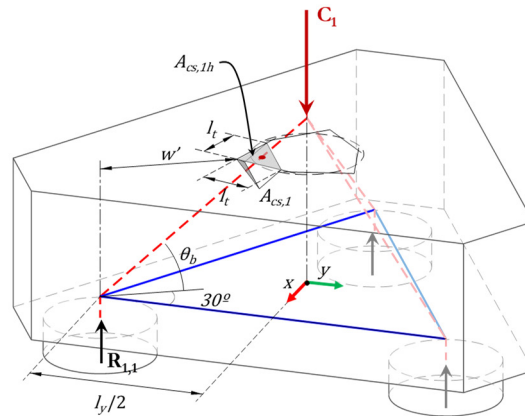


Figura 5.6 Detalle de la geometría del estrechamiento de la biela en la zona superior, para encepados de tres pilotes

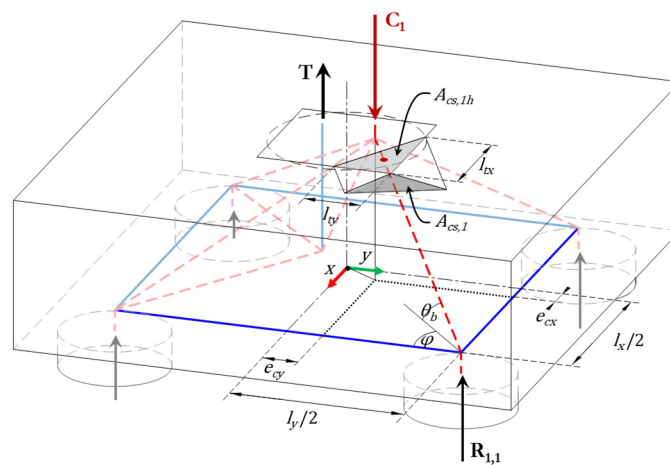


Figura 5.7 Detalle de la geometría del estrechamiento de la biela en la zona superior, para encepados de cuatro pilotes solicitados por carga excéntrica

5.1.5.3 Splitting de la biela directa por fisuración transversal (modo ii)

La sección crítica para la verificación de la resistencia de la biela directa al *splitting*, se localiza en la zona inferior, en la intersección de ésta con el plano de armadura horizontal ($A_{cs,2}$ en la Figura 5.5c). Esta área se obtiene como la proyección de la sección del pilote en un plano perpendicular al eje de la biela directa. La propuesta de Meléndez, C. [17] tiene en cuenta la posibilidad de que el pilote sea de sección circular o cuadrada, y da un factor β_p para determinar el área de la elipse o rombo resultantes, a partir del diámetro o diagonal del pilote (l_p) y la distancia $w_{s,2}$ (ver Figura 5.5d). En el caso de pilotes circulares, $\beta_p = \pi/4$; para pilotes cuadrados $\beta_p = 0.5$.

La resistencia del hormigón en esta sección de comprobación se reduce a la resistencia efectiva f_{ce} , para tener en cuenta la fisuración transversal que causa el posible *splitting* de la biela. Para ello se emplea el coeficiente de debilitamiento del hormigón ξ , propuesto por Vecchio and Collins [63]. Así, la resistencia al *splitting* de la biela directa ($F_{ns,2}$) se obtiene como:

$$F_{ns,2} = A_{cs,2} f_{ce} \quad (5.29)$$

donde,

$$A_{cs,2} = \beta_p w_{s,2} l_p \quad (5.30)$$

$$w_{s,2} = l_p \sin \theta_b + 2c_b \cos \theta_b \quad (5.31)$$

siendo,

$$c_b = h - d$$

$$f_{ce} = \xi f_{cp} = \frac{f_{cp}}{0.8 + 170 \varepsilon_{st}} \quad (5.32)$$

$$\varepsilon_{st} = \varepsilon_{tx} + \varepsilon_{ty} + \varepsilon_z - \varepsilon_s \quad (5.33)$$

La deformación de tracción en el plano x-y (ε_{tx} , ε_{ty}) se obtiene a partir de la tracción total de los tirantes que llegan a un mismo pilote (T_{bx} , T_{by}), dividida por el área de armado (A_{stj}) y el módulo de elasticidad del acero E_s .

$$\varepsilon_{tj} = \frac{T_{bj}}{E_s A_{stj}}, \text{ para } j = x, y \quad (5.34)$$

La determinación de la tracción en los tirantes vendrá dada por el MBT-1 en los encepados que no cuenten con armadura secundaria vertical. En cambio, en

aquellos encepados con armadura secundaria vertical, la tracción total tiene dos componentes: una debida a la acción de la biela directa del MBT-1 ($T_{bx,1}$, $T_{by,1}$) que es función del ángulo θ_b , y otra debida a la descarga distribuida sobre las bandas del MBT-2 ($T_{bx,2}$, $T_{by,2}$) que depende de la cuantía de armadura dispuesta (ρ_v , ρ_b , en el diagrama de la Figura 5.8). En ambos casos, el área de armadura a considerar en el tirante es únicamente la de la banda (A_{sB}).

La deformación media en la dirección vertical ε_z se obtiene a partir de la reacción total en el pilote, el área de apoyo (A_p) y el módulo de deformación del hormigón ($E_{cm}=22(f_{cm}/10)^{0.3}$ GPa). En caso de que exista la colaboración del MBT-2, esta reacción se obtendrá como suma de $R_{1,1}$ y $R_{1,2}$ (ver diagrama Figura 5.8).

$$\varepsilon_z = \frac{-R_1}{E_c A_p} \quad (5.35)$$

En cambio para obtener la deformación media por compresión de la biela ε_s , únicamente se tiene en cuenta la compresión que llega a través de la biela directa del MBT-1.

$$\varepsilon_s = \frac{-F_s}{E_c A_{cs,2}} = \frac{-R_{1,1}}{\sin \theta_b E_c A_{cs,2}} \quad (5.36)$$

5.2. Verificación de encepados mediante combinación de MBTs directos y de descarga distribuida a las bandas

La combinación de los dos MBTs presentados anteriormente sólo tiene sentido en la verificación de encepados que dispongan de un sistema de armaduras secundarias horizontales y verticales que permitan resistir las tracciones Q_{Ix} , Q_{Iy} , N_{Ix} y N_{Iy} descritas en la Figura 5.3.

El procedimiento a seguir para determinar la carga para la que se produce la plastificación del sistema de armaduras dispuesto (P_{MBT}), se resume de forma esquemática en la Figura 5.8. Se parte de la idea principal de que como los tirantes que unen los pilotes son compartidos por el MBT-1 y MBT-2, ambos modelos se reparten la proporción de carga resistida (k) y $(1-k)$. Este reparto se debe realizar en función de la capacidad de cada MBT, limitado por el área de armadura disponible para cada tirante.

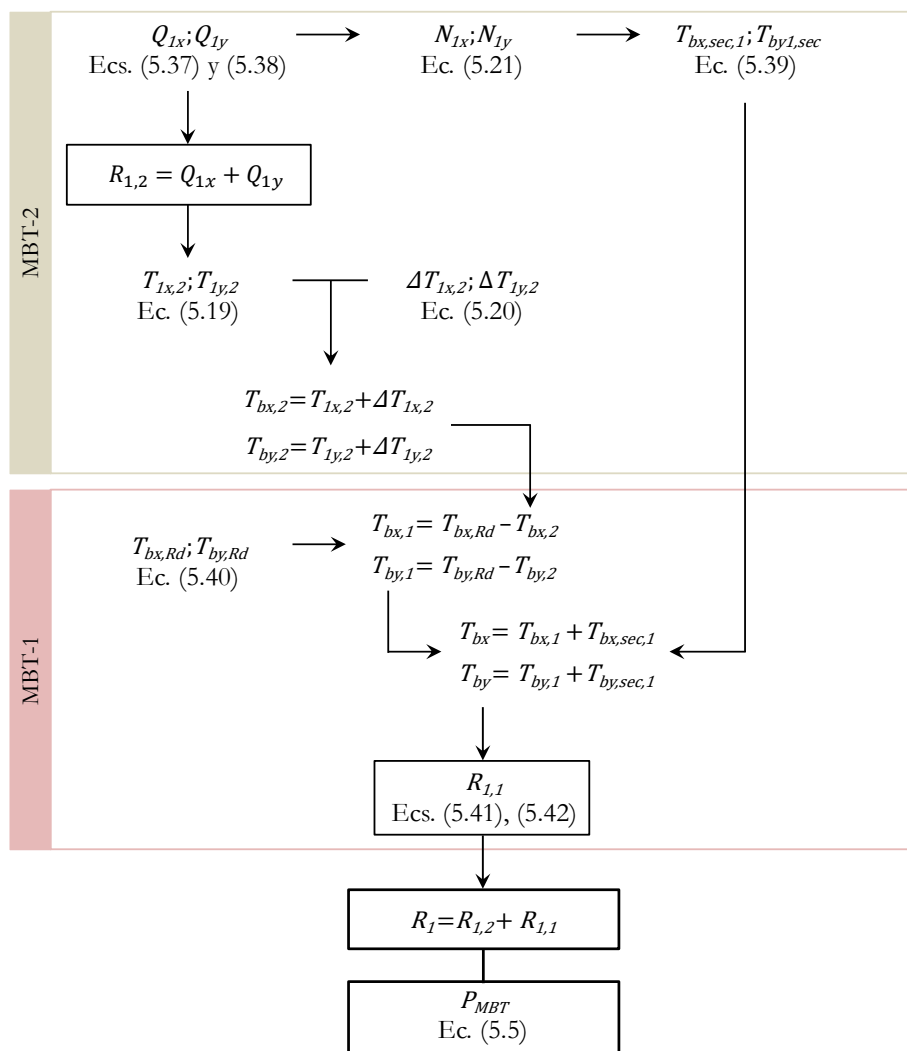


Figura 5.8 Proceso de cálculo de la carga total resistida considerando la contribución de las armaduras secundarias horizontales y verticales

En primer lugar, se determina la máxima tracción en los tirantes Q_{1x} , Q_{1y} limitada por el área de armado secundario por unidad de longitud horizontal (ρ_h) y vertical (ρ_v), según las Ecs. (5.37) y (5.38). La reacción en el pilote dada por el MBT-2 ($R_{1,2}$) es la suma de ambas componentes.

$$Q_{1x} = \min \begin{cases} 2\rho_{vx}f_y \left(\frac{l_y}{2} - u_{cy} \right) \\ 2\rho_{hx}f_y \left(\frac{l_y}{2} - u_{cy} \right) \frac{z}{\frac{l_x}{2} - e_{cx}} \end{cases} \quad (5.37)$$

$$Q_{1y} = \min \begin{cases} 2\rho_{vy}f_y \left(\frac{l_x}{2} - u_{cx} \right) \\ 2\rho_{hy}f_y \left(\frac{l_x}{2} - u_{cx} \right) \frac{z}{\frac{l_y}{2} - e_{cy}} \end{cases} \quad (5.38)$$

Estas ecuaciones limitan la tracción del tirante vertical a la plastificación de una parte del armado dispuesto. Pero es posible que una parte del armado secundario horizontal ($T_{bj,sec1}$) no se agote por este modelo, y pueda ser añadida a la capacidad del tirante principal del MBT-1. Esta consideración es coherente con la suposición empleada habitualmente de que la mitad del armado distribuido puede sumarse al armado en bandas para determinar la máxima capacidad a tracción del tirante.

$$T_{bx,sec1} = \rho_{hx}f_y \left(\frac{l_y}{2} \right) - N_{1x}; \quad T_{by,sec1} = \rho_{hy}f_y \left(\frac{l_x}{2} \right) - N_{1y} \quad (5.39)$$

La tracción necesaria en el tirante principal para equilibrar las fuerzas del MBT-2 ($T_{bj,2}$), es la suma de $T_{1j,2}$ y $\Delta T_{1j,2}$, dadas por las Ecs. (5.19) y (5.20) respectivamente.

Una vez agotada la capacidad de las armaduras secundarias del MBT-2, y conocida la tracción necesaria en el tirante principal para equilibrar las fuerzas del MBT-2 ($T_{bj,2}$), se obtiene la parte de tracción que debe resistirse por el armado en bandas ($T_{bj,1}$) hasta agotar su capacidad ($T_{bj,Rd}$). A esta tracción se le suma la colaboración del armado secundario horizontal ($T_{bj,sec1}$) para obtener la tracción total que participa del MBT-1 (T_{bj}).

$$T_{bj,Rd} = A_{sB,j}f_s, \quad \text{para } j = x, y \quad (5.40)$$

Para finalizar queda calcular la parte de reacción en el pilote debida al MBT-1 ($R_{1,1}$):

Encepados de cuatro pilotes, (5.41)

$$R_{1,1} = \min \begin{cases} T_{bx} \frac{z}{\frac{l_x}{2} - e_{cx}} \\ T_{by} \frac{z}{\frac{l_y}{2} - e_{cy}} \end{cases}$$

Encepados de tres pilotes, (5.42)

$$R_{1,1} = T_{bx,1} \frac{3z}{l_x}$$

La suma de las reacciones $R_{1,1}$ y $R_{1,2}$ será la reacción máxima en el encepado (R_I). A partir de esta reacción se puede calcular la carga máxima (P_{MBT}) asumiendo una distribución lineal de las reacciones, tal y como se ha expuesto en las consideraciones previas (Ec. (5.5)).

5.3. Validación del modelo con los resultados experimentales

5.3.1. Comparación de resultados teóricos y experimentales

La propuesta completa de verificación se contrasta en esta sección con 52 ensayos experimentales: 30 de la campaña experimental propia, 13 de Clarke [2] y 9 de Miguel et al. [37]. El objetivo principal de esta validación es comprobar que el modelo capta la influencia de la armadura secundaria vertical y de la excentricidad de la carga aplicada, para un amplio rango de esbelteces de los encepados (ratio $w/d = [0.25-1.70]$). La validez del modelo para encepados solicitados por cargas centradas y sin armadura vertical ya la verificó Meléndez, C. [17] en su tesis.

Las series analizadas combinan encepados de tres y cuatro pilotes, con configuraciones de armado en bandas, distribuido y con armadura vertical (Figura 5.9). Además, en la campaña experimental llevada a cabo en esta investigación, se ha incluido por primera vez el efecto de la excentricidad de la carga aplicada.

En la Tabla 5.1 y Tabla 5.2 se resumen los principales datos geométricos y de armado de los especímenes de Miguel et al. [37] y Clarke [2]:

Tabla 5.1 Principales parámetros de la serie experimental de Miguel et al. [37] (tres pilotes)

| Especímen | e (m) | c (m) | ϕ (m) | w (m) | h (m) | d (m) | A_{SB} | A_{SH} | A_{SV} |
|-----------|------------|------------|---------------|------------|------------|------------|-------------------|-------------------|------------------|
| B20A1/1 | 0.96 | 0.35 | 0.20 | 0.38 | 0.60 | 0.50 | 3x(3 ϕ 12.5) | - | - |
| B20A1/2 | 0.96 | 0.35 | 0.20 | 0.38 | 0.60 | 0.50 | 3x(3 ϕ 12.5) | - | - |
| B30A1 | 0.96 | 0.35 | 0.30 | 0.38 | 0.60 | 0.50 | 3x(3 ϕ 12.5) | - | - |
| B20A2 | 0.96 | 0.35 | 0.20 | 0.38 | 0.60 | 0.50 | 3x(3 ϕ 12.5) | 3x(2 ϕ 12.5) | - |
| B30A2 | 0.96 | 0.35 | 0.30 | 0.38 | 0.60 | 0.50 | 3x(3 ϕ 12.5) | 3x(2 ϕ 12.5) | - |
| B20A3 | 0.96 | 0.35 | 0.20 | 0.38 | 0.60 | 0.50 | 3x(3 ϕ 12.5) | 2x(8 ϕ 6.3) | - |
| B30A3 | 0.96 | 0.35 | 0.30 | 0.38 | 0.60 | 0.50 | 3x(3 ϕ 12.5) | 2x(8 ϕ 6.3) | - |
| B20A4 | 0.96 | 0.35 | 0.20 | 0.38 | 0.60 | 0.50 | 3x(3 ϕ 12.5) | 2x(8 ϕ 6.3) | 3x(8 ϕ 6.3) |
| B30A4 | 0.96 | 0.35 | 0.30 | 0.38 | 0.60 | 0.50 | 3x(3 ϕ 12.5) | 2x(8 ϕ 6.3) | 3x(8 ϕ 6.3) |

e : distancia entre ejes de pilotes; c : lado del pilar; ϕ : diámetro del pilote; w : vuelo; h : canto total del encepado; d : canto útil del encepado; e_y : excentricidad desde el eje-y; A_{SB} : armado sobre las bandas; A_{SH} : armado secundario horizontal distribuido en cada dirección; A_{SV} : armado secundario vertical

NOTA:

B20A2, B30A2: A_{SH} se dispone perpendicular a cada banda

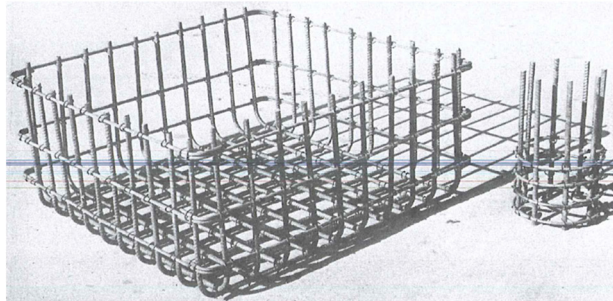
Tabla 5.2 Principales parámetros de la serie experimental de Clarke [2] (cuatro pilotes)

| Espécimen | e (m) | c (m) | ϕ (m) | w (m) | h (m) | d (m) | A_{sB} | A_{sH} | A_{sV} |
|------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| A1 | 0.60 | 0.20 | 0.20 | 0.20 | 0.45 | 0.41 | 4x(3 ϕ 10) | 2x(4 ϕ 10) | - |
| A2 | 0.60 | 0.20 | 0.20 | 0.20 | 0.45 | 0.41 | 4x(5 ϕ 10) | - | - |
| A4 | 0.60 | 0.20 | 0.20 | 0.20 | 0.45 | 0.41 | 4x(3 ϕ 10) | 2x(4 ϕ 10) | - |
| A5 | 0.60 | 0.20 | 0.20 | 0.20 | 0.45 | 0.41 | 4x(5 ϕ 10) | - | - |
| A7 | 0.60 | 0.20 | 0.20 | 0.20 | 0.45 | 0.41 | 4x(3 ϕ 10) | 2x(4 ϕ 10) | 4x(10 ϕ 10) |
| A8 | 0.60 | 0.20 | 0.20 | 0.20 | 0.45 | 0.41 | 4x(5 ϕ 10) | - | - |
| A9 | 0.60 | 0.20 | 0.20 | 0.20 | 0.45 | 0.41 | 4x(3 ϕ 10) | 2x(4 ϕ 10) | - |
| A10 | 0.60 | 0.20 | 0.20 | 0.20 | 0.45 | 0.41 | 4x(3 ϕ 10) | 2x(4 ϕ 10) | 4x(10 ϕ 10) |
| A11 | 0.60 | 0.20 | 0.20 | 0.20 | 0.45 | 0.41 | 4x(3 ϕ 10) | 2x(4 ϕ 10) | 4x(10 ϕ 10) |
| A12 | 0.60 | 0.20 | 0.20 | 0.20 | 0.45 | 0.41 | 4x(3 ϕ 10) | 2x(4 ϕ 10) | 4x(10 ϕ 10) |
| B1 | 0.40 | 0.20 | 0.20 | 0.10 | 0.45 | 0.41 | 4x(3 ϕ 10) | 2x(2 ϕ 10) | 4x(8 ϕ 10) |
| B2 | 0.40 | 0.20 | 0.20 | 0.10 | 0.45 | 0.41 | 4x(3 ϕ 10) | 2x(4 ϕ 10) | 4x(10 ϕ 10) |
| B3 | 0.40 | 0.20 | 0.20 | 0.10 | 0.45 | 0.41 | 4x(2 ϕ 10) | 2x(2 ϕ 10) | 4x(6 ϕ 10) |

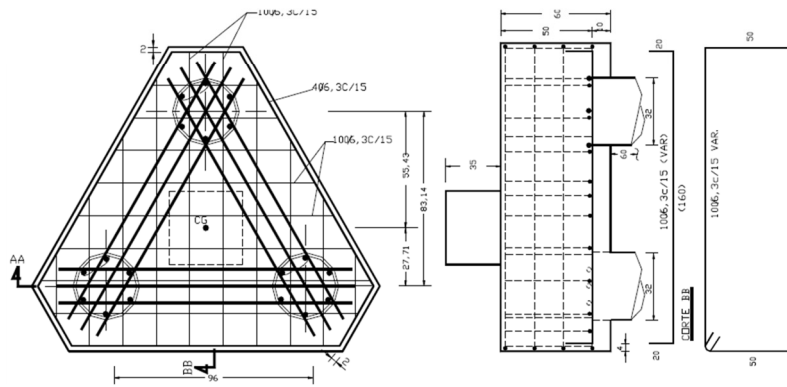
e : distancia entre ejes de pilotes; c : lado del pilar; ϕ : diámetro del pilote; w : vuelo; h : canto total del encepado; d : canto útil del encepado; e_y : excentricidad desde el eje-y; A_{sB} : armado sobre las bandas; A_{sH} : armado secundario horizontal distribuido en cada dirección; A_{sV} : armado secundario vertical

NOTA:

No se incluyen los especímenes A3 y A6 porque su disposición de armado es en dos bandas diagonales y no serían aplicables los MBT objeto de verificación



Armado del encepado B2
FUENTE: Clarke (1973)



Armado del encepado B30A4
FUENTE: Miguel M.G. (2000)



Armado de los encepados 3P-N-A3 y 4P-B3
FUENTE: Elaboración propia

Figura 5.9 Especímenes con armadura vertical entre pilotes pertenecientes a la campaña experimental de Clarke [2], Miguel M.G [64] y la presente investigación

La resistencia predicha por el modelo (P_{MBT}) se obtiene a partir de la intersección de las curvas descritas en la Figura 5.4, como aquella que maximiza el ángulo de inclinación de las bielas. En las tablas de resultados que se muestran a continuación, se incluyen los tres puntos clave de intersección entre las curvas, que permiten identificar el modo de fallo:

- P_y : plastificación de las armaduras: intersección entre $P_{yt} - P_{ns,1}$
- P_{nt} : Agotamiento por flexión: intersección entre $P_{nt} - P_{ns,1}$
- P_s : Punzonamiento o cortante: $P_{ns,1} - P_{ns,2}$. En este caso, si la carga es mayor que P_{yt} se tratará de un fallo por punzonamiento tras superarse la plastificación de las armaduras.

Tabla 5.3 Comparación de la carga máxima experimental frente a la resistencia predicha por el modelo MBT propuesto. Encepados de cuatro pilotes ensayados por Clarke [2]

| Especímen | $V_{u,e}$ (kN) | Fallo observado | P_y (kN) | P_{nt} (kN) | P_s (kN) | P_{MBT} (kN) | Fallo predicho | $\frac{V_{u,e}}{P_{MBT}}$ |
|-----------|-------------------|--------------------|---------------|------------------|---------------|-------------------|-------------------|---------------------------|
| A1 | 1110 | s | 984.4 | 1351.0 | 990.9 | 990.9 | Ps,y | 1.12 |
| A2 | 1420 | s | 1003.1 | 1380.7 | 1312.7 | 1312.7 | Ps,y | 1.08 |
| A4 | 1230 | s | 984.7 | 1351.5 | 992.9 | 992.9 | Ps,y | 1.24 |
| A5 | 1400 | s | 1001.3 | 1377.8 | 1314.8 | 1314.8 | Ps,y | 1.06 |
| A7 | 1640 | s | 1060.1 | 1441.5 | 1638.4 | 1441.5 | Pn | 1.14 |
| A8 | 1510 | s | 1003.1 | 1380.7 | 1312.7 | 1312.7 | Ps,y | 1.15 |
| A9 | 1450 | s | 1001.8 | 1378.4 | 1112.2 | 1112.2 | Ps,y | 1.30 |
| A10 | 1520 | f | 1053.8 | 1421.9 | 1516.6 | 1421.9 | Pn | 1.07 |
| A11 | 1640 | f | 1052.6 | 1418.3 | 1499.8 | 1418.3 | Pn | 1.16 |
| A12 | 1640 | f | 1061.1 | 1444.9 | 1657.4 | 1444.9 | Pn | 1.14 |
| B1 | 2080 | s | 1337.9 | 1807.8 | 1705.7 | 1705.7 | Ps,y | 1.22 |
| B2 | 1870 | s | 1729.7 | 2308.0 | 2448.5 | 2308.0 | Pn | 0.81 |
| B3 | 1770 | f | 1071.6 | 1464.0 | 1622.0 | 1464.0 | Pn | 1.21 |
| MEDIA | | | | | | | | 1.13 |
| COV | | | | | | | | 0.10 |

$V_{u,e}$: carga máxima experimental; Fallo observado: s: cortante o punzonamiento; f: flexión;

P_y : predicción de carga de plastificación de las armaduras horizontales; P_{nt} : predicción de carga de agotamiento por flexión; P_s : predicción de carga de agotamiento por punzonamiento o cortante; P_{MBT} : resistencia predicha por el modelo (min: P_{nt} , P_s)

Tabla 5.4 Comparación de la carga máxima experimental frente a la resistencia predicha por el modelo MBT propuesto. Encepados de cuatro pilotes de la campaña experimental propia

| Espécimen | $V_{u,e}$ (kN) | Fallo observado | P_{yt} (kN) | P_{nt} (kN) | P_s (kN) | P_{MBT} (kN) | Modo de fallo | $\frac{V_{u,e}}{P_{MBT}}$ |
|-----------|-------------------|------------------------------------|------------------|------------------|---------------|-------------------|------------------|---------------------------|
| 4P-N-A1 | 605.6 | F-Y _B | 636.6 | 720.5 | 706.3 | 706.3 | Ps,y | 0.86 |
| 4P-N-A2 | 813.4 | F-Y _{BH} | 824.6 | 940.4 | 728.0 | 728.0 | Ps | 1.12 |
| 4P-N-A3 | 973.2 | D-Y _{BHV} | 894.8 | 1018.3 | 1058.1 | 1018.3 | Pn | 0.96 |
| 4P-N-B1 | 744.6 | F-Y _B | 703.3 | 800.2 | 987.1 | 800.2 | Pn | 0.93 |
| 4P-N-B2 | 861.0 | F-Y _B | 930.2 | 1050.2 | 973.3 | 973.3 | Ps,y | 0.88 |
| 4P-N-B3 | 1116.2 | D-Y _{BHV} | 977.0 | 1106.7 | 1387.8 | 1106.7 | Pn | 1.01 |
| 4P-N-C1 | 942.6 | D-Y _B | 757.9 | 893.2 | 1331.8 | 893.2 | Pn | 1.06 |
| 4P-N-C2 | 1159.0 | F-Y _B | 1102.0 | 1274.8 | 1407.3 | 1274.8 | Pn | 0.91 |
| 4P-N-C3 | 1302.4 | D-Y _{BHV} | 1115.3 | 1295.7 | 1820.5 | 1295.7 | Pn | 1.01 |
| 4P-NMM-A2 | 586.2 | F-Y _B | 555.3 | 633.7 | 525.1 | 525.1 | Ps | 1.12 |
| 4P-NMM-A3 | 761.5 | D-Y _{BHV} | 601.6 | 684.1 | 704.0 | 684.1 | Pn | 1.11 |
| 4P-NMM-B2 | 751.6 | F-Y _{BH} | 610.9 | 704.6 | 770.6 | 704.6 | Pn | 1.07 |
| 4P-NMM-B3 | 814.8 | D-Y _{BHV} | 624.4 | 717.3 | 829.2 | 717.3 | Pn | 1.14 |
| 4P-NMM-C2 | 955.2 | D-Y _{BH} | 712.6 | 817.0 | 831.8 | 817.0 | Pn | 1.17 |
| 4P-NMM-C3 | 1061.1 | D-Y _{BHV} | 745.9 | 853.9 | 1045.8 | 853.9 | Pn | 1.24 |
| 4P-NM-A2 | 575.4 | F-Y _{BH} | 483.0 | 552.4 | 465.7 | 465.7 | Ps | 1.24 |
| 4P-NM-A3 | 779.8 | () ^a -Y _{BHV} | 587.3 | 660.6 | 707.5 | 660.6 | Pn | 1.18 |
| 4P-NM-B2 | 743.7 | F-Y _{BH} | 527.9 | 610.9 | 703.0 | 610.9 | Pn | 1.22 |
| 4P-NM-B3 | 809.5 | D-Y _{BHV} | 606.1 | 691.2 | 882.8 | 691.2 | Pn | 1.17 |
| 4P-NM-C2 | 900.8 | F-Y _B | 625.7 | 720.7 | 846.6 | 720.7 | Pn | 1.25 |
| 4P-NM-C3 | 989.2 | D-Y _{BHV} | 728.7 | 827.2 | 1126.4 | 827.2 | Pn | 1.20 |
| MEDIA | | | | | | | | 1.07 |
| COV | | | | | | | | 0.11 |

$V_{u,e}$: carga máxima experimental igual a ΣR_{max} ; Fallo observado: F: frágil; D: dúctil; Y_B: plastificación de la armadura principal en bandas; Y_H: plastificación de la armadura secundaria horizontal; Y_V: plastificación de la armadura secundaria vertical en cercos

P_y : predicción de carga de plastificación de las armaduras horizontales; P_{nt} : predicción de carga de agotamiento por flexión; P_s : predicción de carga de agotamiento por punzonamiento o cortante; P_{MBT} : resistencia predicha por el modelo (min: P_{nt} , P_s)

^a El gran desplazamiento registrado en 4P-NM-A3 se atribuye a un mal funcionamiento del sistema de medida. No es posible clasificar el tipo de rotura F/D

Tabla 5.5 Comparación de la carga máxima experimental frente a la resistencia predicha por el modelo MBT propuesto. Encepados de tres pilotes

| Espécimen | $V_{u,e}$ (kN) | Fallo observado | P_{yt} (kN) | P_{nt} (kN) | P_s (kN) | P_{MBT} (kN) | Modo de fallo | $\frac{V_{u,e}}{P_{MBT}}$ |
|---------------------------------------------------|-------------------|--------------------|------------------|------------------|---------------|-------------------|------------------|---------------------------|
| Campaña experimental propia | | | | | | | | |
| 3P-N-A1 | 480.4 | F | 538.1 | 618.5 | 557.6 | 557.6 | Ps,y | 0.86 |
| 3P-N-A2 | 562.0 | F-Y _B | 536.7 | 616.8 | 552.2 | 552.2 | Ps,y | 1.02 |
| 3P-N-A3 | 611.8 | F-Y _B | 657.7 | 741.6 | 814.9 | 741.6 | Pn | 0.82 |
| 3P-N-B1 | 710.9 | F-Y _B | 602.6 | 701.6 | 820.7 | 701.6 | Pn | 1.01 |
| 3P-N-B2 | 761.9 | F-Y _{BH} | 606.0 | 705.8 | 844.1 | 705.8 | Pn | 1.08 |
| 3P-N-B3 | 777.3 | F-Y _{BH} | 672.4 | 777.4 | 1109.2 | 777.4 | Pn | 1.00 |
| 3P-N-C1 | 859.2 | D-Y _B | 644.1 | 757.8 | 983.1 | 757.8 | Pn | 1.13 |
| 3P-N-C2 | 852.0 | F-Y _B | 648.9 | 763.9 | 1025.9 | 763.9 | Pn | 1.12 |
| 3P-N-C3 | 987.2 | D-Y _{BHV} | 709.6 | 830.0 | 1413.0 | 830.0 | Pn | 1.19 |
| | | | | | | | MEDIA | 1.03 |
| | | | | | | | COV | 0.11 |
| Encepados ensayados por Miguel et al. [37] | | | | | | | | |
| B20A1/1 | 1512 | s | 1332.0 | 1578.4 | 1328.3 | 1328.3 | Ps | 1.14 |
| B20A1/2 | 1648 | s+f | 1354.1 | 1606.5 | 1442.2 | 1442.2 | Ps,y | 1.14 |
| B30A1 | 1909 | s+f | 1346.7 | 1597.1 | 1992.2 | 1597.1 | Pn | 1.20 |
| B20A2 | 2083 | s+f | 1362.6 | 1617.3 | 1489.2 | 1489.2 | Ps,y | 1.40 |
| B30A2 | 2674 | s+f | 1377.1 | 1635.8 | 2227.5 | 1635.8 | Pn | 1.63 |
| B20A3 | 1945 | s+f | 1370.1 | 1626.9 | 1532.4 | 1532.4 | Ps,y | 1.27 |
| B30A3 | 1938 | s | 1318.4 | 1561.1 | 1800.1 | 1561.1 | Pn | 1.24 |
| B20A4 | 2375 | s+f | 1441.0 | 1705.9 | 1801.2 | 1705.9 | Pn | 1.39 |
| B30A4 | 2283 | s+f | 1408.6 | 1662.0 | 2104.8 | 1662.0 | Pn | 1.37 |
| | | | | | | | MEDIA | 1.31 |
| | | | | | | | COV | 0.11 |

$V_{u,e}$: carga máxima experimental igual a ΣR_{max} ; Fallo observado: F: frágil; D: dúctil; Y_B: plastificación de la armadura principal en bandas; Y_H: plastificación de la armadura secundaria horizontal ; Y_V: plastificación de la armadura secundaria vertical en cercos ; s: cortante o punzonamiento; f: flexión

P_y : predicción de carga de plastificación de las armaduras horizontales; P_{nt} : predicción de carga de agotamiento por flexión; P_s : predicción de carga de agotamiento por punzonamiento o cortante; P_{MBT} : resistencia predicha por el modelo (min: P_{nt} , P_s)

Los resultados obtenidos de este contraste experimental (Figura 5.10) muestran el buen ajuste de las predicciones a la resistencia experimental (media: 1.13, cov: 0.14) independientemente de la esbeltez del encepado (rango $w/d = [0.25-1.70]$). Se han obtenido una media y coeficiente de variación similares los descritos por Meléndez, C. [17] (media: 1.08 cov: 0.12) en su validación, limitada a casos de carga centrados sin armadura secundaria vertical.

Se aprecia una mayor dispersión de resultados con los ensayos de Miguel M.G [37], siendo en todos los casos mayor la resistencia que la predicción de carga dada por el modelo. Esto puede deberse a que la configuración del ensayo [64] se diseñó coaccionando la reacción horizontal en los pilotes, lo que se traduce en una menor tracción de los tirantes en las bandas para una misma carga vertical. Es de esperar por tanto que estos encepados muestren una mayor capacidad que la estimada por los MBTs.

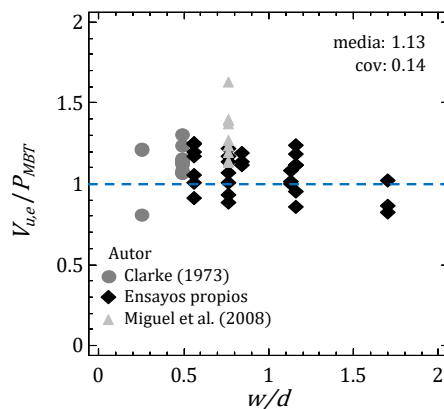


Figura 5.10 Comparación de la carga máxima experimental (V_{ue}) con la resistencia estimada por la propuesta de MBT

En el siguiente apartado se profundiza en el análisis de la consideración de la armadura secundaria y la excentricidad de carga, que son las principales aportaciones al modelo.

5.3.2. Análisis de la influencia de los parámetros estudiados

Para evaluar con mayor detalle las predicciones de carga, se comparan entre sí especímenes análogos (en geometría y armado horizontal) a los que únicamente se añade armadura secundaria vertical o varía la excentricidad de la carga aplicada.

5.3.2.1 Contribución armadura secundaria vertical (MBT-2)

En la Figura 5.11 se comparan las ratios V_{ue}/P_{MBT} entre encepados sin armadura vertical (a) y con ella (b). Se observa que la consideración del MBT-2 en los encepados con armadura secundaria vertical ha permitido cuantificar de forma segura y precisa (media: 1.10, cov: 0.16) el incremento de resistencia observado experimentalmente. Sólo en los especímenes de menor canto (3P-N-A3, $w/d = 1.70$) se detecta que la contribución de esta armadura estaría claramente sobreestimada, lo que se traduce una ratio menor a la obtenida sin armadura vertical.

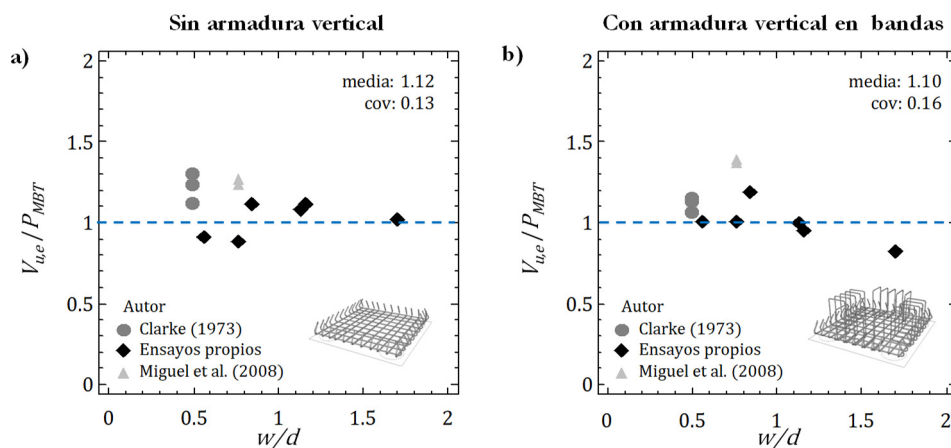


Figura 5.11 Influencia de la armadura secundaria vertical entre especímenes análogos de las campañas experimentales de Clarke [2], Miguel et al. [37] y los ensayos propios de esta investigación

La contribución de los cercos se traduce en un aumento de resistencia, pero también de la ductilidad del elemento. Las curvas carga-desplazamiento de aquellos especímenes sin armadura secundaria vertical muestran una rápida disminución de la carga tras superar el máximo, mientras que al añadir armadura vertical se registra un claro cambio de pendiente en la curva que se traduce en mayores desplazamientos con pequeños incrementos de carga.

El empleo del MBT-2, junto con el análisis de la intersección de las curvas de rotura, permite explicar el efecto de esta armadura en el modo de fallo. En la Figura 5.12 se muestran tres ejemplos de especímenes con y sin armadura vertical, cuya predicción del modo de fallo cambia al añadir esta armadura. En ordenadas se muestra la reacción en el pilote más cargado (R_1), que en el caso de encepados con armadura secundaria vertical se divide en dos componentes: R_1 dada por el MBT-1) y $R_{1,2}$ (dada por el MBT-2). En los encepados sin armadura vertical sólo participa el MBT-1, y por tanto $R_1=R_{1,1}$.

Como sólo el MBT-1 tiene bielas directas concentradas, las curvas de aplastamiento (R_{ns1}) y *splitting* (P_{ns2}) del hormigón deben intersectarse con la curva dada por el agotamiento del acero según el MBT-1 ($R_{l,1nt}$). En los encepados con armadura vertical la intersección entre estas curvas ocurre para un menor nivel de carga ($R_{l,1nt}$) y mayor ángulo θ_b . Para obtener la carga total ($R_{l,nt}$) queda sumar la contribución del MBT-2 ($R_{l,2}$) calculada con esa misma inclinación de bielas.

En los ejemplos de la Figura 5.12a-d, la adición de armadura permite incrementar la carga resistida y pasar de un fallo por punzonamiento (R_{1s} o R_{1sy}) a alcanzar su límite de flexión (R_{1n}). En cambio, en el ejemplo de la Figura 5.12e-f, el encepado sin armadura vertical ya se encontraba en su límite de flexión y la adición de armadura vertical no se traduce en un incremento significativo de resistencia.

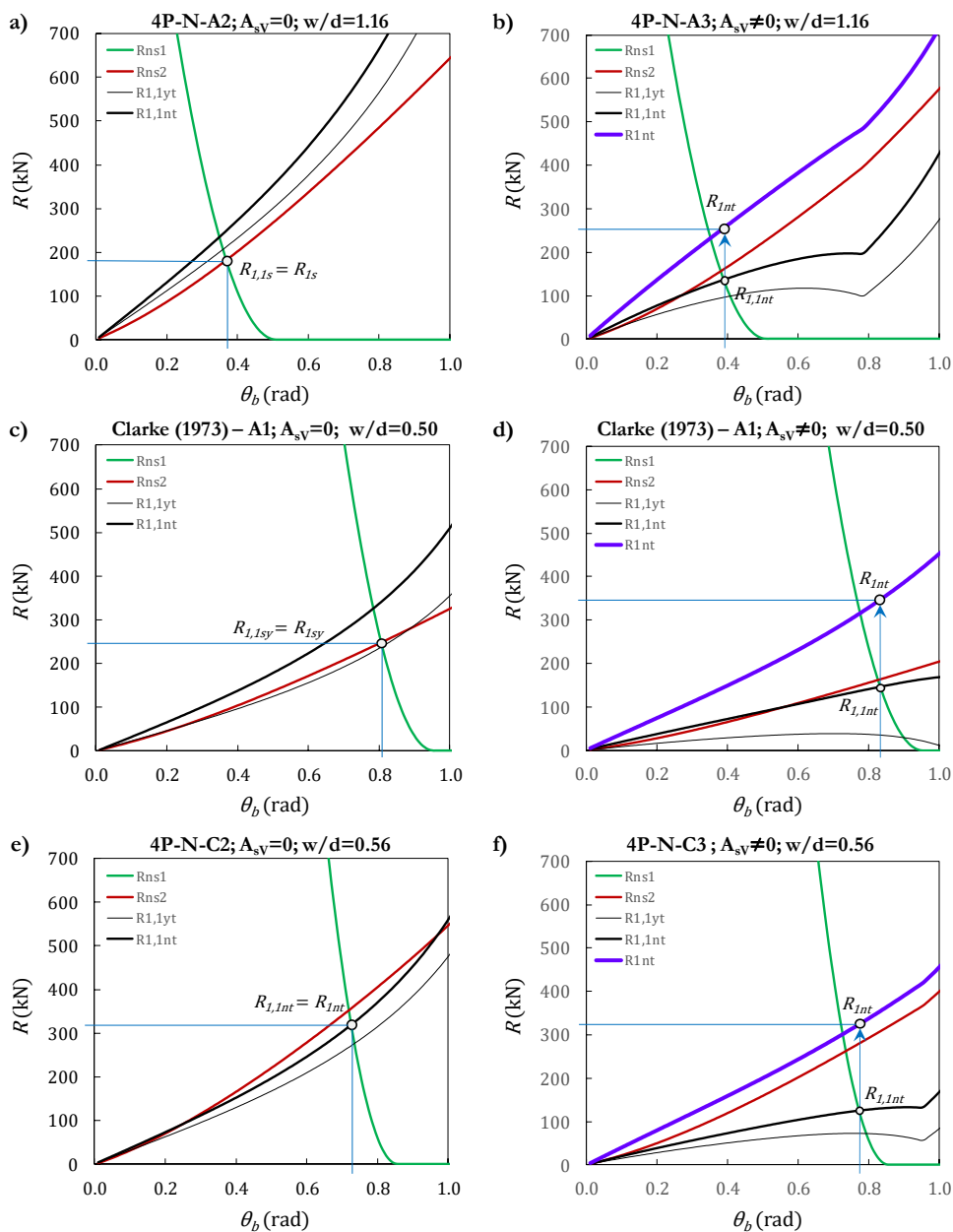


Figura 5.12 Comparación de la intersección entre las curvas de rotura en encepados con y sin armadura secundaria vertical

5.3.2.2 Consideración de la excentricidad

En la Figura 5.13 se comparan los ratios $V_{u,e}/P_{MBT}$ entre encepados solicitados por carga centrada (a) y excéntrica (b), para especímenes con y sin armadura secundaria vertical. Se obtienen en todos los casos predicciones más conservadoras para los casos con excentricidad (media: 1.17, cov: 0.06).

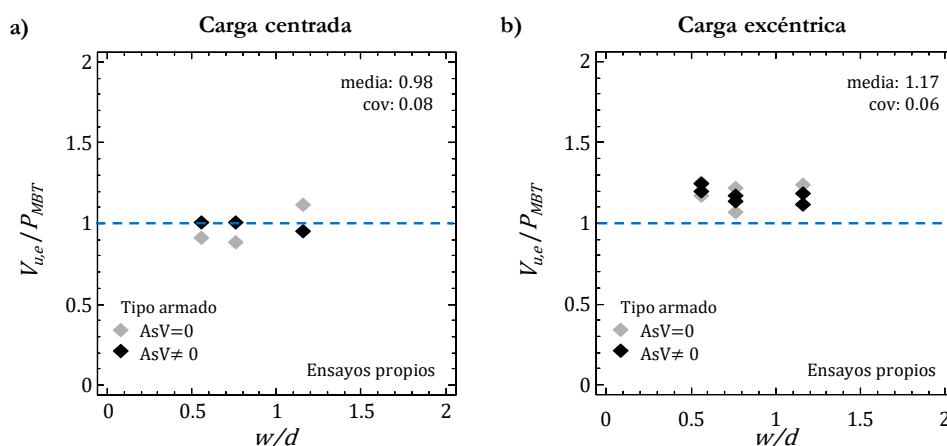


Figura 5.13 Influencia de la excentricidad comparada entre especímenes análogos de los ensayos propios de esta investigación

5.3.3. Valoración del modo de fallo predicho

La formulación unificada de MBT presentada en este capítulo permite determinar el modo de fallo esperable, según la combinación de condiciones que resulte más limitante. De forma simplificada, los tipos de rotura se han clasificado como: punzonamiento pre o post-plastificación y agotamiento por flexión. Con el apoyo de las gráficas de las curvas de rotura (Figura 5.12) es posible interpretar mejor el modo de fallo predicho.

Ensayos propios

Aunque esta ha sido una clasificación tradicionalmente empleada en las campañas experimentales sobre encepados de pilotes, en esta investigación se ha preferido describir los tipos de fallo en función de su respuesta carga-desplazamiento (frágil o dúctil) y de la secuencia de plastificación del sistema de armaduras dispuesto. La formulación presentada ayuda a interpretar de forma coherente las observaciones experimentales:

- Los encepados más esbeltos sin armadura vertical (tipo A) presentan fallos por *splitting* de las bielas.
- La rotura de los encepados de mayor canto sin armadura vertical (tipos B y C) está condicionada por el estrechamiento de la biela en la zona superior. Esto sugiere que están cerca de su límite de flexión, aunque finalmente la rotura observada es frágil y describe una superficie similar a la de punzonamiento.
- La adición de armadura secundaria vertical (armado tipo 3) supone la activación del MBT-2, que canaliza los empujes sobre las bandas a través de tirantes verticales. Aunque el tipo de fallo predicho también es el de flexión (P_{nt}), la colaboración de los cercos explicaría la respuesta dúctil.

Ensayos de Clarke [2] y Miguel et al. [37]

En estos casos los autores sí que diferencian entre fallos por cortante o punzonamiento (s) y flexión (f). Miguel et al. [37] también añaden un tipo de fallo intermedio en el que observan roturas por punzonamiento tras la plastificación de las armaduras (s+f).

La coincidencia entre el modo de fallo observado experimentalmente y el predicho (ver Tabla 5.3 y Tabla 5.5) es de un 73% para los encepados sin armadura de punzonamiento.

En aquellos especímenes con armadura de punzonamiento, el modelo siempre predice fallos por flexión (P_{nt}), y en ambas campañas experimentales son descritos como de flexión (f) o combinación de punzonamiento y flexión (s+f). La predicción resulta por tanto muy satisfactoria en todos los casos.

Capítulo 6

Verificación de los métodos seccionales normativos

Para el diseño de encepados, algunas normativas para el proyecto de estructuras de hormigón, como EC-2 y ACI-318-14, permiten, como alternativa al MBT, el empleo de métodos seccionales para la verificación de los estados límite de agotamiento por flexión, cortante o punzonamiento. En este caso el encepado se considera una losa sometida a cargas concentradas procedentes del pilar y los pilotes. Pese a que estos métodos son comúnmente empleados para el diseño o comprobación de encepados, su validez no había sido verificada experimentalmente para cargas no centradas hasta la fecha.

La campaña experimental llevada a cabo en esta investigación confirma la existencia de modos de fallo frágiles en los que se aprecia la formación de una fisura crítica tras la plastificación de las armaduras en la base. La formulación de punzonamiento basada en la *Teoría de la Fisura Crítica* (y adoptada por el CM-2010) resulta especialmente adecuada para analizar este tipo de roturas y, por ello, también es estudiada en este capítulo con el fin de valorar su aplicabilidad al análisis de este modo de rotura en encepados.

Por último, se analiza si los métodos mencionados captan la influencia de aquellos parámetros que han resultados significativos en la respuesta de los encepados: relación vuelo-canto, contribución de las armaduras secundarias (horizontal y vertical) y excentricidad de la carga aplicada.

6.1. Determinación de la carga y modo de rotura previstos por los métodos seccionales

En el apartado 2.3 del *Capítulo 2* se ha presentado detalladamente la formulación propuesta por las normativas EC-2 [9] y ACI-318-14 [6], para las comprobaciones de resistencia frente a esfuerzos de flexión, cortante y punzonamiento. Según se explica en dicho apartado, su aplicación a encepados requiere adoptar ciertas hipótesis relativas a la localización de las secciones de control y a la mejora de la resistencia del hormigón en algunas zonas debida a la proximidad entre carga y apoyos. En este sentido, se toman como referencia las siguientes guías de diseño: *Designers' Guide to EN 1992-2* [49], *How to Design Concrete Structures using Eurocode 2* [50], *CRSI Design Handbook* [53] y *Design Guide for Pile Caps* (CRSI) [48].

La determinación de la carga y modo de rotura previsto por cada normativa es resultado de seleccionar la mínima resistencia en cada una de las secciones de control. En función del modo de rotura (cortante, punzonamiento o flexión) puede resultar limitante: la reacción en un pilote o de varios pilotes simultáneamente, en su caso; la carga aplicada en el pilar; o el momento flector de una sección. Para poder determinar el modo de fallo limitante resulta necesario establecer un único valor de comparación de resistencia. Se escoge para ello la carga aplicada en el pilar y su excentricidad (e_x , e_y).

A continuación se enuncian las ecuaciones que permiten relacionar la carga aplicada al pilar con la reacción de un pilote y con el momento flector en una sección de control:

- A partir de la resistencia a punzonamiento o cortante entorno a un pilote ($R_{Rd,cs}$), se obtiene la resistencia a cortante en términos de la carga vertical en el pilar ($V_{Rd,cs}$), adoptando una ley plana de reacciones (tal como han sido aplicadas en los ensayos realizados en este trabajo):

$$V_{Rd,cs} = \frac{R_{Rd,cs}}{\left(\frac{1}{n} + \frac{e_x}{\sum x_i^2} x_i + \frac{e_y}{\sum y_i^2} y_i\right)} \quad (6.1)$$

- La comprobación de cortante en la sección paralela a una cara sólo se considera aplicable en casos de carga centrada o flexión recta hacia dicha cara del encepado. En este caso las dos reacciones máximas son iguales y se puede obtener la carga total mediante la anterior Ec. (6.1).

- Para obtener la carga en el pilar (V_{flex}) para la que se alcanza la resistencia a flexión de la sección de control (M_{Rd}), se plantea una relación de proporcionalidad entre ambas variables que se obtiene partir de las ecuaciones de equilibrio en la sección de control (Figura 6.1). Se debe tener en cuenta que cuando existe excentricidad de la carga aplicada a través del pilar, en dicha sección se genera un momento torsor (M_{xy}) además del flector (M_y). Esto produce un incremento de tracción en la armadura que condiciona la resistencia a flexión de la sección completa.

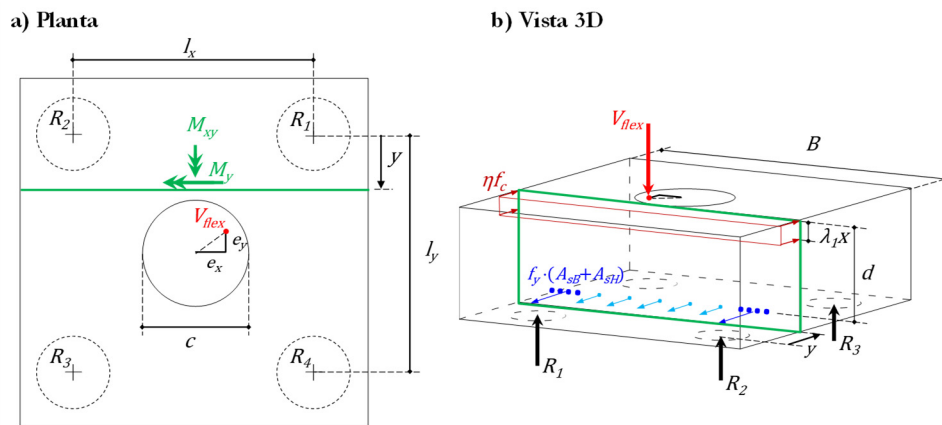


Figura 6.1 Descripción gráfica de las principales variables que definen el equilibrio de flectores y torsores en la sección de comprobación

$$M_y = (R_1 + R_2) \cdot y = \left[V_{flex} \cdot \left(\frac{1}{4} + \frac{e_x}{2l_x} + \frac{e_y}{2l_y} \right) + V_{flex} \cdot \left(\frac{1}{4} - \frac{e_x}{2l_x} + \frac{e_y}{2l_y} \right) \right] \cdot y = \quad (6.2)$$

$$= V_{flex} \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{e_y}{l_y} \right) \cdot y$$

$$M_{xy} = R_1 \cdot \frac{l_x}{2} - R_2 \cdot \frac{l_x}{2} = \quad (6.3)$$

$$= V_{flex} \cdot \left(\frac{1}{4} + \frac{e_x}{2l_x} + \frac{e_y}{2l_y} \right) \cdot \frac{l_x}{2} - V_{flex} \cdot \left(\frac{1}{4} - \frac{e_x}{2l_x} + \frac{e_y}{2l_y} \right) \cdot \frac{l_x}{2} =$$

$$= V_{flex} \cdot \left(\frac{e_x}{l_x} \right) \cdot \frac{l_x}{2} = V_{flex} \cdot \frac{e_x}{2}$$

Sumando el momento flector con el valor absoluto de momento torsor, se obtiene la relación con la carga aplicada V_{flex} a través del factor k_{flex} :

$$M_y + |M_{xy}| = V_{flex} \cdot \left[\left(\frac{1}{2} + \frac{e_y}{l_y} \right) \cdot y + \left| \frac{e_x}{2} \right| \right] = V_{flex} \cdot \frac{1}{k_{flex}} \quad (6.4)$$

$$k_{flex} = 1 / \left[\left(\frac{1}{2} + \frac{e_y}{l_y} \right) \cdot y + \left| \frac{e_x}{2} \right| \right] \quad (6.5)$$

En los siguientes subapartados se presentan los resultados de la evaluación de resistencia en las secciones de control establecidas por cada una de las normativas. Para su comparación con los resultados experimentales, en el caso del EC-2, los coeficientes parciales de seguridad para los materiales (γ_c , γ_s) se toman igual a 1. Al emplear el código ACI 318-14, el factor de reducción de resistencia ϕ también se considera igual a 1.

Aunque ambas normas ofrecen formulaciones de cortante y punzonamiento muy distintas entre sí, se emplea la nomenclatura definida en el *Capítulo 2* para unificarlas. De esta forma es posible comparar el valor de los principales parámetros que influyen en la resistencia de las secciones: el valor de cálculo de la resistencia a punzonamiento o cortante ($v_{Rd,c}$), el factor de mejora de la resistencia del hormigón (Ω) o el coeficiente de excentricidad (β).

6.1.1. Eurocódigo 2

6.1.1.1 Resistencia a flexión del encepado

La resistencia a flexión del encepado viene condicionada por el área de armado dispuesta normal al plano de comprobación (A_s), la resistencia del hormigón (ηf_c), la profundidad del bloque de compresiones (λx) y el ancho de la sección (b_x o b_y).

Según la cláusula 5.3.2.2 (3) del EC-2, si una losa es monolítica con sus soportes, se debería tomar el momento de cálculo crítico en el apoyo como el existente en la cara del apoyo (sección (A) en la Figura 6.2a). Aunque se añade como nota, que el momento en la cara del apoyo no debería ser menor que 0.65 veces el correspondiente al momento de empotramiento ((sección (C) en la Figura 6.2).

En la Tabla 6.1 y Tabla 6.2 se dan los valores de las principales variables consideradas para la determinación de la resistencia a flexión de la sección, así como el valor del coeficiente k_{flex} (Ec. (6.5)) que permite obtener finalmente la carga total aplicada (V_{flex}) que produciría el agotamiento por flexión de la sección.

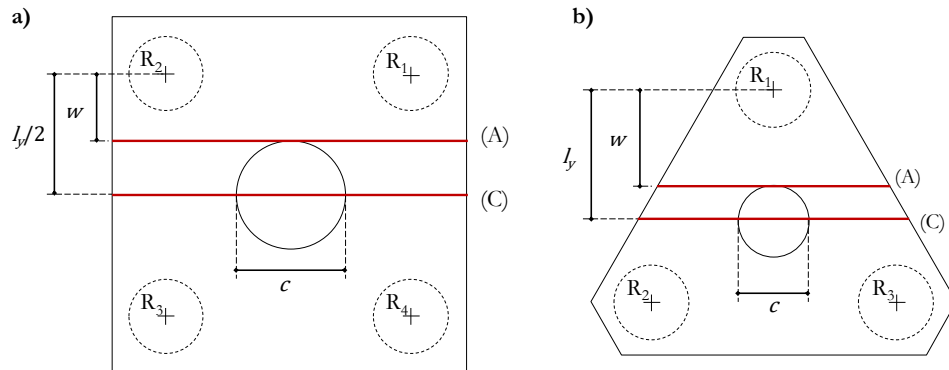


Figura 6.2 Secciones de control para la determinación de la resistencia a flexión - EC-2
a) encepados de cuatro pilotes; b) encepados de tres pilotes

Tabla 6.1 Resistencia a flexión de los encepados de tres pilotes - EC-2

| Espécimen | A_s (cm ²) | ηf_c (Mpa) | $\lambda_l x$ (m) | M_{Rd} (kNm) | $k_{flex,A}$ | $k_{flex,C}$ | $V_{flex,A}$ (kN) | $0.65V_{flex,C}$ (kN) |
|-----------|-----------------------------|---------------------|----------------------|-------------------|--------------|--------------|----------------------|--------------------------|
| 3P-N-A1 | 7.84 | 23.31 | 0.022 | 77.2 | 8.90 | 6.49 | 687.6 | 771.6 |
| 3P-N-A2 | 8.62 | 22.85 | 0.025 | 84.3 | 8.90 | 6.49 | 751.0 | 842.7 |
| 3P-N-A3 | 8.62 | 23.68 | 0.024 | 83.8 | 8.90 | 6.49 | 746.1 | 837.2 |
| 3P-N-B1 | 5.28 | 24.69 | 0.014 | 81.0 | 8.90 | 6.49 | 721.1 | 809.2 |
| 3P-N-B2 | 5.78 | 26.28 | 0.015 | 88.4 | 8.90 | 6.49 | 786.9 | 882.9 |
| 3P-N-B3 | 5.78 | 26.52 | 0.014 | 87.8 | 8.90 | 6.49 | 782.2 | 877.7 |
| 3P-N-C1 | 4.08 | 23.97 | 0.011 | 84.6 | 8.90 | 6.49 | 753.2 | 845.2 |
| 3P-N-C2 | 4.58 | 26.42 | 0.011 | 95.0 | 8.90 | 6.49 | 845.9 | 949.1 |
| 3P-N-C3 | 4.58 | 28.53 | 0.011 | 94.5 | 8.90 | 6.49 | 841.5 | 944.2 |

A_s : área de armadura normal al plano de comprobación; ηf_c : resistencia del bloque rectangular de compresiones; $\lambda_l x$: profundidad del bloque rectangular de compresiones; M_{Rd} : resistencia a flexión de la sección; k_{flex} : constante que relaciona la resistencia a flexión de la sección con la carga aplicada en el pilar; V_{flex} : carga en el pilar para la cual se alcanza la resistencia a flexión de la sección

NOTAS:

- El ancho de la sección considerado en encepados de la serie 3P: $b_{y,A}=0.793m$; $b_{y,C}=0.938m$
- El valor de η es igual a 1 en todos los casos porque $f_c < 50MPa$
- El valor de λ_l es igual a 0.8 en todos los casos porque $f_c < 50MPa$

Tabla 6.2 Resistencia a flexión de los encepados de cuatro pilotes - EC-2

| Espécimen | A_s (cm²) | ηf_c (Mpa) | $\lambda_l x$ (m) | M_{Rd} (kNm) | $k_{flex,A}$ | $k_{flex,C}$ | $V_{flex,A}$ (kN) | $0.65V_{flex,C}$ (kN) |
|------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------|
| 4P-N-A1 | 10.31 | 27.67 | 0.018 | 105.7 | 8.89 | 5.00 | 939.8 | 813.3 |
| 4P-N-A2 | 14.23 | 29.49 | 0.023 | 143.9 | 8.89 | 5.00 | 1279.2 | 1107.0 |
| 4P-N-A3 | 14.23 | 30.00 | 0.023 | 144.1 | 8.89 | 5.00 | 1280.5 | 1108.2 |
| 4P-N-B1 | 6.79 | 26.11 | 0.013 | 109.6 | 8.89 | 5.00 | 974.6 | 843.4 |
| 4P-N-B2 | 9.30 | 25.30 | 0.018 | 148.9 | 8.89 | 5.00 | 1324.0 | 1145.7 |
| 4P-N-B3 | 9.30 | 29.87 | 0.015 | 149.6 | 8.89 | 5.00 | 1330.2 | 1151.1 |
| 4P-N-C1 | 5.40 | 31.89 | 0.008 | 113.6 | 8.89 | 5.00 | 1009.6 | 873.7 |
| 4P-N-C2 | 7.92 | 36.28 | 0.010 | 166.0 | 8.89 | 5.00 | 1475.4 | 1276.8 |
| 4P-N-C3 | 7.92 | 34.03 | 0.011 | 165.8 | 8.89 | 5.00 | 1474.2 | 1275.8 |
| 4P-NMM-A2 | 14.23 | 36.42 | 0.019 | 143.3 | 5.12 | 3.27 | 733.4 | 720.2 |
| 4P-NMM-A3 | 14.23 | 39.22 | 0.017 | 143.8 | 5.12 | 3.27 | 736.0 | 722.8 |
| 4P-NMM-B2 | 9.30 | 39.04 | 0.011 | 145.2 | 5.12 | 3.27 | 743.1 | 729.7 |
| 4P-NMM-B3 | 9.30 | 29.00 | 0.015 | 144.2 | 5.12 | 3.27 | 738.2 | 724.9 |
| 4P-NMM-C2 | 7.92 | 28.70 | 0.013 | 170.6 | 5.12 | 3.27 | 873.4 | 857.6 |
| 4P-NMM-C3 | 7.92 | 29.48 | 0.013 | 170.7 | 5.12 | 3.27 | 873.7 | 858.0 |
| 4P-NM-A2 | 14.23 | 27.13 | 0.025 | 140.8 | 6.46 | 3.64 | 910.4 | 787.8 |
| 4P-NM-A3 | 14.23 | 30.65 | 0.022 | 141.9 | 6.46 | 3.64 | 917.5 | 794.0 |
| 4P-NM-B2 | 9.30 | 30.20 | 0.014 | 144.4 | 6.46 | 3.64 | 933.3 | 807.7 |
| 4P-NM-B3 | 9.30 | 28.15 | 0.015 | 144.1 | 6.46 | 3.64 | 931.6 | 806.2 |
| 4P-NM-C2 | 7.92 | 27.88 | 0.014 | 170.5 | 6.46 | 3.64 | 1102.5 | 954.1 |
| 4P-NM-C3 | 7.92 | 28.78 | 0.013 | 170.6 | 6.46 | 3.64 | 1103.1 | 954.6 |

A_{sg}: área de armadura dispuesta en bandas; *A_{stf}*: área de armadura distribuida entre bandas; ηf_c : resistencia del bloque rectangular de compresiones; $\lambda_l x$: profundidad del bloque rectangular de compresiones; *M_{Rd}*: resistencia a flexión de la sección; *k_{flex}*: constante que relaciona la resistencia a flexión de la sección con la carga aplicada en el pilar; *V_{flex}*: carga en el pilar para la cual se alcanza la resistencia a flexión de la sección

NOTAS:

- El ancho de la sección es idéntico en todos los especímenes de las series 4P, $b_x = b_y = 1.15m$
- El valor de η es igual a 1 en todos los casos porque $f_c < 50MPa$
- El valor de λ_l es igual a 0.8 en todos los casos porque $f_c < 50MPa$

6.1.1.2 Resistencia a cortante del encepado

En este apartado se compara la resistencia a cortante de las secciones de control (1) y (2) de la Figura 6.3, empleando dos enfoques diferentes en la consideración del efecto de la cercanía entre carga y apoyos que se da en encepados rígidos.

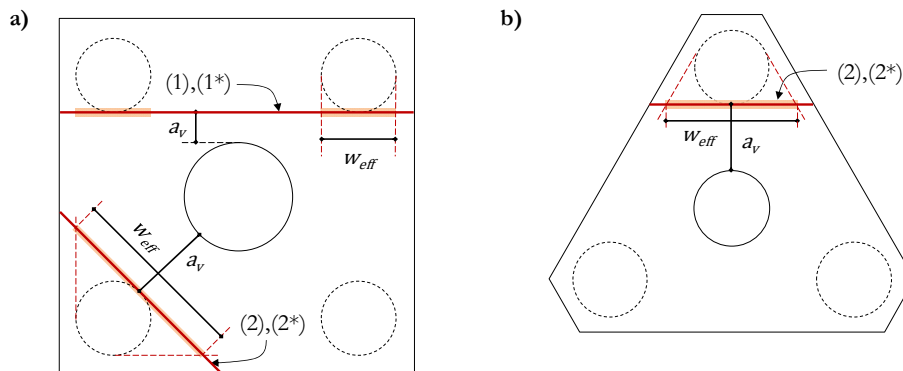


Figura 6.3 Secciones de control para la determinación de la resistencia a cortante - EC-2
a) encepados de cuatro pilotes; b) encepados de tres pilotes

Por un lado, la cláusula 6.2.2 (6) del EC-2 indica la posible reducción de la carga aplicada mediante el coeficiente $(1/\Omega = a_v/2d)$, en elementos cuyas cargas se aplican en la parte superior dentro de la distancia $0.5d \leq a_v \leq 2d$. En estos casos se acepta que parte del cortante descargue mediante bielas directas al apoyo. La resistencia a cortante de estas secciones aparece en la

Tabla 6.4 a Tabla 6.3 como $R_{Rd,cs(1)}$ y $R_{Rd,cs(2)}$. La carga total resistida por el encepado ($V_{Rd,cs(1)}$ y $V_{Rd,cs(2)}$) se incluye en ambas tablas para su comparación con la carga de rotura experimental y con la de los demás métodos seccionales.

Por otra parte, esta cláusula es discutida por la *Designers' Guide to EN 1992-2* [49] para el caso particular de encepados de más de dos pilotes. En estos casos, debido a su carácter tridimensional, la carga y los apoyos no están alineados y las bielas directas se hallarían concentradas únicamente sobre los pilotes. Por ello, la guía plantea emplear el criterio dado por la BS 5400 [16]: emplear un factor de mejora de la resistencia del hormigón ($\Omega=2d/a_v$) sobre las zonas en las que el armado se encuentre perfectamente anclado sobre las cabezas de los pilotes (w_{eff} en la Figura 6.3). La resistencia a cortante de estas secciones aparece en la

Tabla 6.4 a Tabla 6.3 como $2R_{Rd,cs(1^*)}$ y $R_{Rd,cs(2^*)}$. La carga total resistida por el encepado ($V_{Rd,cs(1^*)}$ y $V_{Rd,cs(2^*)}$) se incluye también en ambas tablas para su comparación con la carga de rotura experimental y con la de los demás métodos seccionales.

En cuanto a la consideración de la armadura de cortante, su contribución se suma a la resistencia de toda la sección de hormigón en el primer supuesto, tal y como establece el EC-2. Mientras que en el segundo caso, la *Designers' Guide to EN 1992-2* [49] propone sumar su contribución a la resistencia mejorada de la sección únicamente sobre el ancho eficaz ($v_{Rd,c} \Omega w_{eff} d$).

Tabla 6.3 Resistencia a cortante en secciones (2, 2*) de los encepados de tres pilotes - EC2

| Especímen | $v_{Rd,c}$ (MPa) | Ω | $R_{Rd,cs}$ (kN) | | $V_{Rd,cs}$ (kN) | |
|-----------|---------------------|----------|------------------|-------|------------------|--------|
| | | | (2) | (2*) | (2) | (2*) |
| 3P-N-A1 | 0.92 | 1.51 | 151.9 | 141.0 | 455.6 | 423.1 |
| 3P-N-A2 | 0.92 | 1.51 | 150.8 | 140.1 | 452.5 | 420.3 |
| 3P-N-A3 | 0.93 | 1.51 | 324.6 | 292.4 | 973.7 | 877.3 |
| 3P-N-B1 | 0.65 | 2.28 | 243.4 | 214.6 | 730.1 | 643.9 |
| 3P-N-B2 | 0.67 | 2.28 | 248.4 | 219.1 | 745.3 | 657.4 |
| 3P-N-B3 | 0.67 | 2.28 | 421.1 | 368.7 | 1263.4 | 1106.0 |
| 3P-N-C1 | 0.51 | 3.05 | 338.9 | 290.9 | 1016.7 | 872.7 |
| 3P-N-C2 | 0.52 | 3.05 | 350.1 | 300.5 | 1050.3 | 901.5 |
| 3P-N-C3 | 0.54 | 3.05 | 531.1 | 455.5 | 1593.2 | 1366.4 |

$v_{Rd,c}$: valor de cálculo de la resistencia a cortante del hormigón a lo largo de la sección crítica considerada; Ω : factor de mejora de la resistencia del hormigón; $R_{Rd,cs}$: resistencia a cortante de la sección crítica considerada, considerando la contribución de hormigón y armadura de cortante efectiva A_{sw} ; $V_{Rd,cs}$: resistencia a cortante del encepado, considerando la contribución de hormigón y armadura de cortante efectiva A_{sw} ; A_{sw} : área de armadura de cortante situada a una distancia menor que $0.75a_v$ desde el apoyo

NOTAS:

- El ancho de la sección es idéntico en todos los especímenes de la serie 3P, $b_x=0.55m$
- La armadura de cortante efectiva (A_{sw}) es de $6r\phi 8$ ($3.02cm^2$) en la sección crítica considerada

Tabla 6.4 Resistencia a cortante en secciones (1, 1*) de los encepados de cuatro pilotes - EC-2

| Especímen | $v_{Rd,c}$ (MPa) | Ω | $2R_{Rd,cs}$ (kN) | | $V_{Rd,cs}$ (kN) | |
|---------------------|---------------------|----------|-------------------|-------|------------------|--------|
| | | | (1) | (1*) | (1) | (1*) |
| 4P-N-A1 | 0.85 | 2.59 | 489.4 | 319.8 | 978.9 | 639.5 |
| 4P-N-A2 | 0.97 | 2.59 | 556.8 | 363.7 | 1113.6 | 727.5 |
| 4P-N-A3 | 0.97 | 2.59 | 675.2 | 365.8 | 1350.4 | 731.6 |
| 4P-N-B1 | 0.57 | 3.97 | 771.0 | 444.9 | 1541.9 | 889.8 |
| 4P-N-B2 | 0.62 | 3.97 | 847.4 | 489.0 | 1694.9 | 978.0 |
| 4P-N-B3 | 0.66 | 3.97 | 1011.0 | 516.9 | 2022.0 | 1033.7 |
| 4P-N-C1 | 0.48 | 5.33 | 1170.6 | 633.0 | 2341.3 | 1266.1 |
| 4P-N-C2 | 0.57 | 5.33 | 1388.2 | 750.7 | 2776.4 | 1501.4 |
| 4P-N-C3 | 0.55 | 5.33 | 1474.1 | 734.8 | 2948.2 | 1469.6 |
| 4P-NMM ^a | - | - | - | - | - | - |
| 4P-NM-A2 | 0.94 | 2.59 | 541.5 | 353.8 | 787.7 | 514.6 |
| 4P-NM-A3 | 0.98 | 2.59 | 674.7 | 368.4 | 981.4 | 535.9 |
| 4P-NM-B2 | 0.66 | 3.97 | 899.0 | 518.8 | 1307.7 | 754.6 |
| 4P-NM-B3 | 0.65 | 3.97 | 988.9 | 506.7 | 1438.5 | 737.1 |
| 4P-NM-C2 | 0.52 | 5.33 | 1271.6 | 687.6 | 1849.5 | 1000.2 |
| 4P-NM-C3 | 0.52 | 5.33 | 1395.7 | 694.9 | 2030.2 | 1010.7 |

$v_{Rd,c}$: valor de cálculo de la resistencia a cortante del hormigón a lo largo de la sección crítica considerada; Ω : factor de mejora de la resistencia del hormigón; $2R_{Rd,cs}$: resistencia a cortante de la sección crítica considerada, considerando la contribución de hormigón y armadura de cortante efectiva A_{sw} ; $V_{Rd,cs}$: resistencia a cortante del encepado, considerando la contribución de hormigón y armadura de cortante efectiva A_{sw} ; A_{sw} : área de armadura de cortante dentro de la parte central de la longitud $0.75a_v$.

NOTAS:

- El ancho de la sección es idéntico en todos los especímenes de las series 4P, $b_x=b_y=1.15m$
 - La armadura de cortante efectiva (A_{sw}) es de $4r\phi 8$ ($2.01cm^2$) en la sección crítica considerada
- ^a Esta comprobación no aplica en caso de flexión esviada

Tabla 6.5 Resistencia a cortante en secciones (2,2*) de los encepados de cuatro pilotes - EC-2

| Especímen | $v_{Rd,c}$ (MPa) | Ω | $R_{Rd,cs}$ (kN) | | $V_{Rd,cs}$ (kN) | |
|-----------|---------------------|----------|------------------|-------|------------------|--------|
| | | | (2) | (2*) | (2) | (2*) |
| 4P-N-A1 | 0.85 | 1.23 | 150.7 | 145.3 | 602.6 | 581.3 |
| 4P-N-A2 | 0.96 | 1.23 | 171.4 | 165.3 | 685.5 | 661.3 |
| 4P-N-A3 | 0.97 | 1.23 | 402.9 | 370.1 | 1611.5 | 1480.6 |
| 4P-N-B1 | 0.57 | 1.89 | 237.3 | 216.1 | 949.2 | 864.5 |
| 4P-N-B2 | 0.62 | 1.89 | 260.9 | 237.6 | 1043.4 | 950.2 |
| 4P-N-B3 | 0.66 | 1.89 | 506.2 | 453.9 | 2024.9 | 1815.6 |
| 4P-N-C1 | 0.48 | 2.53 | 360.3 | 318.9 | 1441.3 | 1275.7 |
| 4P-N-C2 | 0.57 | 2.53 | 427.3 | 378.2 | 1709.2 | 1512.8 |
| 4P-N-C3 | 0.55 | 2.53 | 648.8 | 569.4 | 2595.1 | 2277.5 |
| 4P-NMM-A2 | 1.04 | 1.23 | 183.9 | 177.4 | 480.6 | 463.6 |
| 4P-NMM-A3 | 1.06 | 1.23 | 410.0 | 374.2 | 1071.6 | 978.0 |
| 4P-NMM-B2 | 0.72 | 1.89 | 301.4 | 274.5 | 787.9 | 717.6 |
| 4P-NMM-B3 | 0.65 | 1.89 | 494.5 | 442.7 | 1292.6 | 1157.1 |
| 4P-NMM-C2 | 0.52 | 2.53 | 395.2 | 349.8 | 1033.0 | 914.2 |
| 4P-NMM-C3 | 0.53 | 2.53 | 620.2 | 544.6 | 1621.2 | 1423.4 |
| 4P-NM-A2 | 0.94 | 1.23 | 166.7 | 160.8 | 484.9 | 467.7 |
| 4P-NM-A3 | 0.98 | 1.23 | 395.1 | 362.1 | 1149.4 | 1053.5 |
| 4P-NM-B2 | 0.66 | 1.89 | 276.7 | 252.0 | 805.0 | 733.2 |
| 4P-NM-B3 | 0.64 | 1.89 | 491.8 | 440.5 | 1430.7 | 1281.5 |
| 4P-NM-C2 | 0.52 | 2.53 | 391.4 | 346.4 | 1138.6 | 1007.8 |
| 4P-NM-C3 | 0.52 | 2.53 | 617.0 | 541.9 | 1795.0 | 1576.6 |

$v_{Rd,c}$: valor de cálculo de la resistencia a cortante del hormigón a lo largo de la sección crítica considerada; Ω : factor de mejora de la resistencia del hormigón; $R_{Rd,cs}$: resistencia a cortante de la sección crítica considerada, considerando la contribución de hormigón y armadura de cortante efectiva A_{sw} ; $V_{Rd,cs}$: resistencia a cortante del encepado, considerando la contribución de hormigón y armadura de cortante efectiva A_{sw} ; A_{sw} : área de armadura de cortante situada a una distancia menor que $0.75a_v$ desde el apoyo

NOTAS:

- El ancho de la sección es idéntico en todos los especímenes de las series 4P, $b_x=b_y=1.15m$
- La armadura de cortante efectiva (A_{sw}) es de $8r\phi 8$ ($4.02cm^2$) en la sección crítica considerada

6.1.1.3 Resistencia a punzonamiento del encepado

La evaluación de la resistencia a punzonamiento en encepados rígidos requiere definir perímetros interiores a $2d$ para evitar que la sección de control contenga las cargas puntuales de los pilotes o el pilar, incluso que se salga del propio encepado. Para cuantificar la resistencia a punzonamiento entorno al pilar, la guía *How to design concrete structures using Eurocode 2* [50] fija el perímetro de control a $1/5$ del diámetro del pilote (sección (4) de la Figura 6.4). Para comprobar el punzonamiento entorno al pilote la *Designers' Guide to EN 1992-2* [49] propone que el perímetro sea tangente al pilar (sección (3) de la Figura 6.4).

Aunque en zapatas el EC-2 permite emplear el factor de mejora de la resistencia del hormigón (Ω) al comprobar perímetros interiores a $2d$, por la cláusula 6.4.3 (7) este factor no debe considerarse en el caso de existir cargas concentradas próximas al pilar (reacciones de los pilotes). El hecho de ignorar completamente el efecto de la proximidad de la carga al apoyo puede resultar una hipótesis excesivamente conservadora en el caso de encepados según la *Designers' Guide to EN 1992-2* [49].

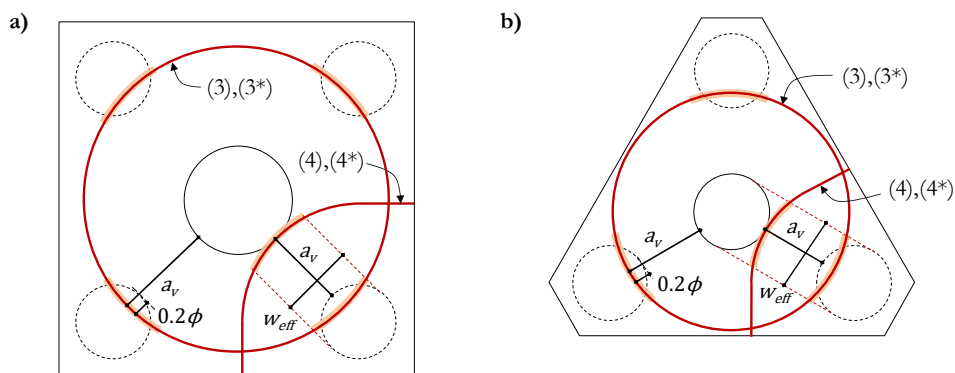


Figura 6.4 Secciones de control para la determinación de la resistencia a punzonamiento - EC-2
a) encepados de cuatro pilotes; b) encepados de tres pilotes

Con el objetivo de contrastar experimentalmente qué propuesta se ajusta mejor a la respuesta real de encepados de tres y cuatro pilotes, en este apartado se compara la resistencia a punzonamiento en dos supuestos: sin considerar el efecto de la cercanía entre carga y apoyos ($V_{Rd,cs(3)}$ y $V_{Rd,cs(4)}$); y aplicando el factor de mejora (Ω) al ancho de los pilotes (w_{eff}) donde el armado se encuentra completamente anclado ($V_{Rd,cs(3^*)}$ y $V_{Rd,cs(4^*)}$), según la propuesta realizada por Clarke [2]. En la

Tabla 6.7 a Tabla 6.9 quedan reflejados los valores de las principales variables consideradas en el cálculo ($v_{Rd,c}$, Ω , β y $f_{yw,ef}$), y la resistencia total a punzonamiento del encepado ($V_{Rd,cs}$) en cada sección de control considerada.

Tabla 6.6 Resistencia a punzonamiento en sec. (3, 3*) de los encepados de tres pilotes - EC-2

| Especímen | $v_{Rd,c}$ (kN) | Ω | β | $f_{yw,ef}$ (MPa) | $V_{Rd,cs}$ (kN) | |
|-----------|--------------------|----------|---------|----------------------|------------------|-------|
| | | | | | (3) | (3*) |
| 3P-N-A1 | 0.92 | 1.51 | 1.00 | - | 445.1 | 515.4 |
| 3P-N-A2 | 0.92 | 1.51 | 1.00 | - | 442.1 | 512.0 |
| 3P-N-A3 | 0.93 | 1.51 | 1.00 | 344.4 | 491.4 | 544.4 |
| 3P-N-B1 | 0.65 | 2.28 | 1.00 | - | 473.9 | 660.4 |
| 3P-N-B2 | 0.67 | 2.28 | 1.00 | - | 483.8 | 674.2 |
| 3P-N-B3 | 0.67 | 2.28 | 1.00 | 373.2 | 532.8 | 676.3 |
| 3P-N-C1 | 0.51 | 3.05 | 1.00 | - | 491.7 | 803.4 |
| 3P-N-C2 | 0.52 | 3.05 | 1.00 | - | 507.9 | 829.9 |
| 3P-N-C3 | 0.54 | 3.05 | 1.00 | 402.5 | 572.9 | 851.4 |

$v_{Rd,c}$: valor de cálculo de la resistencia a punzonamiento del hormigón a lo largo de la sección crítica considerada; Ω : factor de mejora de la resistencia del hormigón; β : coeficiente de excentricidad; $f_{yw,ef}$: valor de cálculo de la resistencia eficaz de la armadura de punzonamiento que se obtiene como $250+0.25d \leq f_{ywd}$; $V_{Rd,cs}$: resistencia a punzonamiento del encepado, considerando la contribución de hormigón y armadura de punzonamiento efectiva A_{sw} ; A_{sw} : área de armadura de punzonamiento situada en el 75% central de un perímetro situado a $2d$ desde el borde del pilar

NOTA:

- La longitud del perímetro de control en la serie 3P es $u_1=2.3m$
- La armadura de punzonamiento efectiva (A_{sw}) es de $9r\phi 8$ ($4.52cm^2$) para todos los encepados de 3P

Tabla 6.7 Resistencia a punzonamiento en sec. (3, 3*) de los encepados de cuatro pilotes - EC-2

| Espécimen | $v_{Rd,c}$ (kN) | Ω | β | $f_{yw,ef}$ (MPa) | $V_{Rd,cs}$ (kN) | |
|-----------|--------------------|----------|---------|----------------------|------------------|--------|
| | | | | | (3) | (3*) |
| 4P-N-A1 | 0.85 | 1.23 | 1.00 | - | 507.3 | 545.0 |
| 4P-N-A2 | 0.96 | 1.23 | 1.00 | - | 577.1 | 619.9 |
| 4P-N-A3 | 0.97 | 1.23 | 1.00 | 343.3 | 987.4 | 1019.7 |
| 4P-N-B1 | 0.57 | 1.89 | 1.00 | - | 520.2 | 670.0 |
| 4P-N-B2 | 0.62 | 1.89 | 1.00 | - | 571.8 | 736.5 |
| 4P-N-B3 | 0.66 | 1.89 | 1.00 | 373.2 | 1203.6 | 1334.1 |
| 4P-N-C1 | 0.48 | 2.53 | 1.00 | - | 588.5 | 881.3 |
| 4P-N-C2 | 0.57 | 2.53 | 1.00 | - | 697.8 | 1045.1 |
| 4P-N-C3 | 0.55 | 2.53 | 1.00 | 402.5 | 1321.6 | 1576.5 |
| 4P-NMM-A2 | 1.04 | 1.23 | 1.29 | - | 480.6 | 516.4 |
| 4P-NMM-A3 | 1.06 | 1.23 | 1.29 | 343.3 | 798.1 | 825.6 |
| 4P-NMM-B2 | 0.72 | 1.89 | 1.29 | - | 513.0 | 660.7 |
| 4P-NMM-B3 | 0.65 | 1.89 | 1.29 | 373.2 | 930.9 | 1031.3 |
| 4P-NMM-C2 | 0.52 | 2.53 | 1.29 | - | 501.0 | 750.3 |
| 4P-NMM-C3 | 0.53 | 2.53 | 1.29 | 402.5 | 1007.4 | 1196.1 |
| 4P-NM-A2 | 0.94 | 1.23 | 1.29 | - | 435.7 | 468.1 |
| 4P-NM-A3 | 0.98 | 1.23 | 1.29 | 343.3 | 769.0 | 794.3 |
| 4P-NM-B2 | 0.66 | 1.89 | 1.29 | - | 470.9 | 606.6 |
| 4P-NM-B3 | 0.64 | 1.89 | 1.29 | 373.2 | 927.5 | 1026.9 |
| 4P-NM-C2 | 0.52 | 2.53 | 1.29 | - | 496.2 | 743.1 |
| 4P-NM-C3 | 0.52 | 2.53 | 1.29 | 402.5 | 1004.4 | 1191.5 |

$v_{Rd,c}$: valor de cálculo de la resistencia a punzonamiento del hormigón a lo largo de la sección crítica considerada; Ω : factor de mejora de la resistencia del hormigón; β : coeficiente de excentricidad; $f_{yw,ef}$: valor de cálculo de la resistencia eficaz de la armadura de punzonamiento que se obtiene como $250+0.25d \leq f_{yw}$; $V_{Rd,cs}$: resistencia a punzonamiento del encepado, considerando la contribución de hormigón y armadura de punzonamiento efectiva A_{sw} ; A_{sw} : área de armadura de punzonamiento situada en el 75% central de un perímetro situado a $2d$ desde el borde del pilar

NOTA:

- La longitud del perímetro de control en las series 4P es $u_1=3.08m$
- La armadura de punzonamiento efectiva (A_{sw}) es de $32r\phi 8$ ($16.08cm^2$) para los encepados tipo A y $40r\phi 8$ ($20.11cm^2$) para los encepados tipo B y C

Tabla 6.8 Resistencia a punzonamiento en sec. (4,4*) de los encepados de cuatro pilotes - EC-2

| Especimen | $v_{Rd,c}$ (kN) | Ω | $f_{yw,ef}$ (MPa) | $R_{Rd,cs}$ (kN) | | $V_{Rd,cs}$ (kN) | |
|-----------|--------------------|----------|----------------------|------------------|-------|------------------|--------|
| | | | | (4) | (4*) | (4) | (4*) |
| 4P-N-A1 | 0.85 | 1.46 | - | 158.6 | 177.5 | 634.3 | 710.0 |
| 4P-N-A2 | 0.96 | 1.46 | - | 180.4 | 201.9 | 721.5 | 807.7 |
| 4P-N-A3 | 0.97 | 1.46 | 343.3 | 308.6 | 324.8 | 1234.4 | 1299.4 |
| 4P-N-B1 | 0.57 | 2.24 | - | 162.6 | 215.0 | 650.4 | 860.2 |
| 4P-N-B2 | 0.62 | 2.24 | - | 178.7 | 236.4 | 714.9 | 945.5 |
| 4P-N-B3 | 0.66 | 2.24 | 373.2 | 329.3 | 375.0 | 1317.1 | 1499.8 |
| 4P-N-C1 | 0.48 | 3.01 | - | 183.9 | 279.9 | 735.7 | 1119.6 |
| 4P-N-C2 | 0.57 | 3.01 | - | 218.1 | 331.9 | 872.5 | 1327.7 |
| 4P-N-C3 | 0.55 | 3.01 | 402.5 | 362.4 | 446.0 | 1449.8 | 1784.0 |
| 4P-NMM-A2 | 1.04 | 1.46 | - | 193.5 | 216.6 | 505.8 | 566.2 |
| 4P-NMM-A3 | 1.06 | 1.46 | 343.3 | 321.3 | 339.1 | 839.8 | 886.3 |
| 4P-NMM-B2 | 0.72 | 2.24 | - | 206.5 | 273.2 | 539.9 | 714.0 |
| 4P-NMM-B3 | 0.65 | 2.24 | 373.2 | 327.9 | 373.1 | 857.0 | 975.3 |
| 4P-NMM-C2 | 0.52 | 3.01 | - | 201.7 | 307.0 | 527.3 | 802.4 |
| 4P-NMM-C3 | 0.53 | 3.01 | 402.5 | 355.0 | 434.6 | 927.8 | 1136.0 |
| 4P-NM-A2 | 0.94 | 1.46 | - | 175.4 | 196.4 | 510.3 | 571.3 |
| 4P-NM-A3 | 0.98 | 1.46 | 343.3 | 309.6 | 325.9 | 900.6 | 948.2 |
| 4P-NM-B2 | 0.66 | 2.24 | - | 189.6 | 250.8 | 551.6 | 729.5 |
| 4P-NM-B3 | 0.64 | 2.24 | 373.2 | 326.5 | 371.3 | 949.8 | 1080.1 |
| 4P-NM-C2 | 0.52 | 3.01 | - | 199.8 | 304.0 | 581.2 | 884.4 |
| 4P-NM-C3 | 0.52 | 3.01 | 402.5 | 353.7 | 432.7 | 1029.1 | 1258.9 |

$v_{Rd,c}$: valor de cálculo de la resistencia a punzonamiento del hormigón a lo largo de la sección crítica considerada; Ω : factor de mejora de la resistencia del hormigón; β : coeficiente de excentricidad; $f_{yw,ef}$: valor de cálculo de la resistencia eficaz de la armadura de punzonamiento que se obtiene como $250+0.25d \leq f_{ywd}$; $R_{Rd,cs}$: resistencia a punzonamiento de la sección crítica considerada, considerando la contribución de hormigón y armadura de punzonamiento efectiva A_{sw} ; $V_{Rd,cs}$: resistencia a punzonamiento del encepado, considerando la contribución de hormigón y armadura de punzonamiento efectiva A_{sw} ; A_{sw} : área de armadura de punzonamiento situada en el 75% central de un perímetro situado a $2d$ desde el borde del pilar

NOTA:

- La longitud del perímetro de control en las series 4P es $u_1=0.96m$
- La armadura de punzonamiento efectiva (A_{sw}) es de $10r\phi 8$ ($5.03cm^2$) para todos los encepados de 4P

Tabla 6.9 Resistencia a punzonamiento en sec. (4,4*) de los encepados de tres pilotes - EC-2

| Espécimen | $V_{Rd,c}$ (kN) | Ω | $f_{yw,ef}$ (MPa) | $R_{Rd,cs}$ (kN) | | $V_{Rd,cs}$ (kN) | |
|-----------|--------------------|----------|----------------------|------------------|-------|------------------|--------|
| | | | | (4) | (4*) | (4) | (4*) |
| 3P-N-A1 | 0.92 | 1.87 | - | 128.7 | 168.4 | 386.0 | 505.3 |
| 3P-N-A2 | 0.92 | 1.87 | - | 127.8 | 167.3 | 383.5 | 502.0 |
| 3P-N-A3 | 0.93 | 1.87 | 344.4 | 200.9 | 230.9 | 602.7 | 692.6 |
| 3P-N-B1 | 0.65 | 2.81 | - | 137.0 | 225.4 | 411.0 | 676.1 |
| 3P-N-B2 | 0.67 | 2.81 | - | 139.9 | 230.1 | 419.6 | 690.2 |
| 3P-N-B3 | 0.67 | 2.81 | 373.2 | 217.8 | 285.6 | 653.3 | 856.9 |
| 3P-N-C1 | 0.51 | 3.78 | - | 142.1 | 282.5 | 426.4 | 847.5 |
| 3P-N-C2 | 0.52 | 3.78 | - | 146.8 | 291.8 | 440.5 | 875.5 |
| 3P-N-C3 | 0.54 | 3.78 | 402.5 | 234.4 | 345.9 | 703.1 | 1037.8 |

$V_{Rd,c}$: valor de cálculo de la resistencia a punzonamiento del hormigón a lo largo de la sección crítica considerada; Ω : factor de mejora de la resistencia del hormigón; β : coeficiente de excentricidad; $f_{yw,ef}$: valor de cálculo de la resistencia eficaz de la armadura de punzonamiento que se obtiene como $250+0.25d \leq f_{yw,ef}$; $R_{Rd,cs}$: resistencia a punzonamiento de la sección crítica considerada, considerando la contribución de hormigón y armadura de punzonamiento efectiva A_{sw} ; $V_{Rd,cs}$: resistencia a punzonamiento del encepado, considerando la contribución de hormigón y armadura de punzonamiento efectiva A_{sw} ; A_{sw} : área de armadura de punzonamiento situada en el 75% central de un perímetro situado a $2d$ desde el borde del pilar

NOTA:

- La longitud del perímetro de control en la serie 3P es $u_1=0.70m$
- La armadura de punzonamiento efectiva (A_{sw}) es de $6r\phi 8$ ($3.02cm^2$) para todos los encepados de 3P

6.1.1.4 Contraste de resultados con los datos experimentales

La evaluación de la resistencia de los encepados frente a los distintos tipos de rotura presentados en los apartados previos se compara con las cargas máximas experimentales dadas en el *Capítulo 4*. Se denomina $V_{u,e}$ al valor experimental de resistencia del encepado, obtenida como suma de las reacciones en los pilotes ($\sum R_{max}$). La mínima de todas las predicciones de resistencia ($V_{min,EC-2}$) será la que condicione el tipo de fallo predicho por los métodos seccionales del EC-2.

La comparación de la carga máxima experimental con la resistencia teórica ($V_{u,e}/V_{min,EC-2}$) se presenta en la Tabla 6.10 a Tabla 6.13. Como resumen gráfico de las cuatro tablas, en la Figura 6.5 se contrastan los dos enfoques empleados en la consideración del efecto de la cercanía entre carga y apoyos que se ha descrito en los apartados anteriores.

Tabla 6.10 Comparación de la carga máxima experimental frente a la resistencia predicha por los métodos seccionales del EC-2, en los encepados de cuatro pilotes

| Especimen | $V_{u,e}$ | Modo de fallo | $V_{u,e}/V_{flex}$ | $V_{u,e}/V_{Rd,cs}$ | | | | $V_{u,e}/V_{min,EC-2}$ |
|-----------|-----------|--------------------------------------|--------------------|---------------------|------|------|------|------------------------|
| | | | | (1) | (2) | (3) | (4) | |
| 4P-N-A1 | 605.6 | F-Y _B | 0.74 | 0.62 | 1.00 | 1.19 | 0.95 | 1.19 (3) |
| 4P-N-A2 | 813.4 | F-Y _{BH} | 0.73 | 0.73 | 1.19 | 1.41 | 1.13 | 1.41 (3) |
| 4P-N-A3 | 973.2 | D-Y _{BHV} | 0.88 | 0.72 | 0.60 | 0.99 | 0.79 | 0.99 (3) |
| 4P-N-B1 | 744.6 | F-Y _B | 0.88 | 0.48 | 0.78 | 1.43 | 1.14 | 1.43 (3) |
| 4P-N-B2 | 861.0 | F-Y _B | 0.75 | 0.51 | 0.83 | 1.51 | 1.20 | 1.51 (3) |
| 4P-N-B3 | 1116.2 | D-Y _{BHV} | 0.97 | 0.55 | 0.55 | 0.93 | 0.85 | 0.97 (f) |
| 4P-N-C1 | 942.6 | D-Y _B | 1.08 | 0.40 | 0.65 | 1.60 | 1.28 | 1.60 (3) |
| 4P-N-C2 | 1159.0 | F-Y _B | 0.91 | 0.42 | 0.68 | 1.66 | 1.33 | 1.66 (3) |
| 4P-N-C3 | 1302.4 | D-Y _{BHV} | 1.02 | 0.44 | 0.50 | 0.99 | 0.90 | 1.02 (f) |
| 4P-NMM-A2 | 586.2 | F-Y _B | 0.81 | ^a | 1.22 | 1.22 | 1.16 | 1.22 (2) |
| 4P-NMM-A3 | 761.5 | D-Y _{BHV} | 1.05 | ^a | 0.71 | 0.95 | 0.91 | 1.05 (f) |
| 4P-NMM-B2 | 751.6 | F-Y _{BH} | 1.03 | ^a | 0.95 | 1.47 | 1.39 | 1.47 (3) |
| 4P-NMM-B3 | 814.8 | D-Y _{BHV} | 1.12 | ^a | 0.63 | 0.88 | 0.95 | 1.12 (f) |
| 4P-NMM-C2 | 955.2 | D-Y _{BH} | 1.11 | ^a | 0.92 | 1.91 | 1.81 | 1.91 (3) |
| 4P-NMM-C3 | 1061.1 | D-Y _{BHV} | 1.24 | ^a | 0.65 | 1.05 | 1.14 | 1.24 (f) |
| 4P-NM-A2 | 575.4 | F-Y _{BH} | 0.73 | 0.73 | 1.19 | 1.32 | 1.13 | 1.32 (3) |
| 4P-NM-A3 | 779.8 | () ^b Y _{BHV} | 0.98 | 0.79 | 0.68 | 1.01 | 0.87 | 1.01 (3) |
| 4P-NM-B2 | 743.7 | F-Y _{BH} | 0.92 | 0.57 | 0.92 | 1.58 | 1.35 | 1.58 (3) |
| 4P-NM-B3 | 809.5 | D-Y _{BHV} | 1.00 | 0.56 | 0.57 | 0.87 | 0.85 | 1.00 (f) |
| 4P-NM-C2 | 900.8 | F-Y _B | 0.94 | 0.49 | 0.79 | 1.82 | 1.55 | 1.82 (3) |
| 4P-NM-C3 | 989.2 | D-Y _{BHV} | 1.04 | 0.49 | 0.55 | 0.98 | 0.96 | 1.04 (f) |
| MEDIA | | | | | | | | 1.31 |
| COV | | | | | | | | 0.21 |

$V_{u,e}$: carga máxima experimental; Modo de fallo: F-frágil, D-dúctil; Y_B-plastificación de la armadura principal en bandas; Y_H-plastificación de la armadura secundaria horizontal; Y_V-plastificación de la armadura secundaria vertical en cercos; V_{flex} : resistencia a flexión del encepado; $V_{Rd,cs}$: resistencia a cortante o punzonamiento del encepado, según la sección de control considerada: (1)-cortante en la sección paralela a uno de los lados, (2)-cortante en la sección de esquina, (3)-punzonamiento del pilar, (4)-punzonamiento del pilote; V_{min} : mínima de todas las anteriores predicciones de resistencia

NOTAS:

^a Esta comprobación no aplica en el caso de encepados de tres pilotes

^b Por un mal funcionamiento del sistema de medida no es posible clasificar el tipo de rotura F/D

Tabla 6.11 Comparación de la carga máxima experimental frente a la resistencia predicha por los métodos seccionales del EC-2, en los encepados de tres pilotes

| Espécimen | $V_{u,e}$ | Modo de fallo | $V_{u,e}/V_{flex}$ | $V_{u,e}/V_{Rd,cs}$ | | | | $V_{u,e}/V_{min,EC-2}$ |
|-----------|-----------|--------------------|--------------------|---------------------|------|------|------|------------------------|
| | | | | (1) | (2) | (3) | (4) | |
| 3P-N-A1 | 480.4 | F | 0.70 | a | 1.05 | 1.08 | 1.24 | 1.24 (4) |
| 3P-N-A2 | 562.0 | F-Y _B | 0.75 | a | 1.24 | 1.27 | 1.47 | 1.47 (4) |
| 3P-N-A3 | 611.8 | F-Y _B | 0.82 | a | 0.63 | 1.25 | 1.02 | 1.25 (3) |
| 3P-N-B1 | 710.9 | F-Y _B | 0.99 | a | 0.97 | 1.50 | 1.73 | 1.73 (4) |
| 3P-N-B2 | 761.9 | F-Y _{BH} | 0.97 | a | 1.02 | 1.57 | 1.82 | 1.82 (4) |
| 3P-N-B3 | 777.3 | F-Y _{BH} | 0.99 | a | 0.62 | 1.46 | 1.19 | 1.46 (3) |
| 3P-N-C1 | 859.2 | D-Y _B | 1.14 | a | 0.85 | 1.75 | 2.01 | 2.01 (4) |
| 3P-N-C2 | 852.0 | F-Y _B | 1.01 | a | 0.81 | 1.68 | 1.93 | 1.93 (4) |
| 3P-N-C3 | 987.2 | D-Y _{BHV} | 1.17 | a | 0.62 | 1.72 | 1.40 | 1.72 (3) |
| MEDIA | | | | | | | 1.63 | |
| COV | | | | | | | 0.16 | |

$V_{u,e}$: carga máxima experimental; Modo de fallo: F-frágil, D-dúctil; Y_B-plastificación de la armadura principal en bandas; Y_H-plastificación de la armadura secundaria horizontal; Y_V-plastificación de la armadura secundaria vertical en cercos; V_{flex} : resistencia a flexión del encepado; $V_{Rd,cs}$: resistencia a cortante o punzonamiento del encepado, según la sección de control considerada: (1)-cortante en la sección paralela a uno de los lados, (2)-cortante en la sección de esquina, (3)-punzonamiento del pilar, (4)-punzonamiento del pilote; V_{min} : mínima de todas las anteriores predicciones de resistencia

NOTAS:

^a Esta comprobación no aplica en el caso de encepados de tres pilotes

Tabla 6.12 Comparación de la carga máxima experimental frente a la resistencia predicha por los métodos seccionales del EC-2 considerando el coeficiente de mejora del hormigón (Ω) actuando sobre el ancho eficaz (W_{ef}), en los encepados de cuatro pilotes

| Especimen | $V_{u,e}$ | Modo de fallo | $V_{u,e}/V_{flex}$ | $V_{u,e}/V_{Rd,cs}$ | | | | $V_{u,e}/V_{min^*,EC-2}$ |
|-----------|-----------|-------------------------------------------------|--------------------|---------------------|------|------|------|--------------------------|
| | | | | (1*) | (2*) | (3*) | (4*) | |
| 4P-N-A1 | 605.6 | F-Y _B | 0.74 | 0.95 | 1.04 | 1.11 | 0.85 | 1.11 (3*) |
| 4P-N-A2 | 813.4 | F-Y _{BH} | 0.73 | 1.12 | 1.23 | 1.31 | 1.01 | 1.31 (3*) |
| 4P-N-A3 | 973.2 | D-Y _{BHV} | 0.88 | 1.33 | 0.66 | 0.95 | 0.75 | 1.33 (1*) |
| 4P-N-B1 | 744.6 | F-Y _B | 0.88 | 0.84 | 0.86 | 1.11 | 0.87 | 1.11 (3*) |
| 4P-N-B2 | 861.0 | F-Y _B | 0.75 | 0.88 | 0.91 | 1.17 | 0.91 | 1.17 (3*) |
| 4P-N-B3 | 1116.2 | D-Y _{BHV} | 0.97 | 1.08 | 0.61 | 0.84 | 0.74 | 1.08 (1*) |
| 4P-N-C1 | 942.6 | D-Y _B | 1.08 | 0.74 | 0.74 | 1.07 | 0.84 | 1.08 (f) |
| 4P-N-C2 | 1159.0 | F-Y _B | 0.91 | 0.77 | 0.77 | 1.11 | 0.87 | 1.11 (3*) |
| 4P-N-C3 | 1302.4 | D-Y _{BHV} | 1.02 | 0.89 | 0.57 | 0.83 | 0.73 | 1.02 (f) |
| 4P-NMM-A2 | 586.2 | F-Y _B | 0.81 | a | 1.26 | 1.14 | 1.04 | 1.26 (2*) |
| 4P-NMM-A3 | 761.5 | D-Y _{BHV} | 1.05 | a | 0.78 | 0.92 | 0.86 | 1.05 (f) |
| 4P-NMM-B2 | 751.6 | F-Y _{BH} | 1.03 | a | 1.05 | 1.14 | 1.05 | 1.14 (3*) |
| 4P-NMM-B3 | 814.8 | D-Y _{BHV} | 1.12 | a | 0.70 | 0.79 | 0.84 | 1.12 (f) |
| 4P-NMM-C2 | 955.2 | D-Y _{BH} | 1.11 | a | 1.04 | 1.27 | 1.19 | 1.27 (3*) |
| 4P-NMM-C3 | 1061.1 | D-Y _{BHV} | 1.24 | a | 0.75 | 0.89 | 0.93 | 1.24 (f) |
| 4P-NM-A2 | 575.4 | F-Y _{BH} | 0.73 | 1.12 | 1.23 | 1.23 | 1.01 | 1.23 (2*) |
| 4P-NM-A3 | 779.8 | (^b) ^b -Y _{BHV} | 0.98 | 1.46 | 0.74 | 0.98 | 0.82 | 1.46 (1*) |
| 4P-NM-B2 | 743.7 | F-Y _{BH} | 0.92 | 0.99 | 1.01 | 1.23 | 1.02 | 1.23 (3*) |
| 4P-NM-B3 | 809.5 | D-Y _{BHV} | 1.00 | 1.10 | 0.63 | 0.79 | 0.75 | 1.10 (1*) |
| 4P-NM-C2 | 900.8 | F-Y _B | 0.94 | 0.90 | 0.89 | 1.21 | 1.02 | 1.21 (3*) |
| 4P-NM-C3 | 989.2 | D-Y _{BHV} | 1.04 | 0.98 | 0.63 | 0.83 | 0.79 | 1.04 (f) |
| MEDIA | | | | | | | | 1.17 |
| COV | | | | | | | | 0.09 |

$V_{u,e}$: carga máxima experimental; Modo de fallo: F-frágil, D-dúctil; Y_B-plastificación de la armadura principal en bandas; Y_H-plastificación de la armadura secundaria horizontal; Y_V-plastificación de la armadura secundaria vertical en cercos; V_{flex} : resistencia a flexión del encepado; $V_{Rd,cs}$: resistencia a cortante o punzonamiento del encepado, según la sección de control considerada: (1*)-cortante en la sección paralela a uno de los lados, (2*)-cortante en la sección de esquina, (3*)-punzonamiento del pilar, (4*)-punzonamiento del pilote; V_{min} : mínima de todas las anteriores predicciones de resistencia

NOTAS:

^a Esta comprobación no aplica en el caso de encepados de tres pilotes

^b Por un mal funcionamiento del sistema de medida no es posible clasificar el tipo de rotura F/D

Tabla 6.13 Comparación de la carga máxima experimental frente a la resistencia predicha por los métodos seccionales del EC-2 considerando el coeficiente de mejora del hormigón (Ω) actuando sobre el ancho eficaz (W_{ef}), en los encepados de tres pilotes

| Espécimen | $V_{u,e}$ | Modo de fallo | $V_{u,e}/V_{flex}$ | $V_{u,e}/V_{Rd,cs}$ | | | | $V_{u,e}/V_{min}^{*,EC-2}$ |
|-----------|-----------|--------------------|--------------------|---------------------|------|------|------|----------------------------|
| | | | | (1*) | (2*) | (3*) | (4*) | |
| 3P-N-A1 | 480.4 | F | 0.70 | a | 1.14 | 0.93 | 0.95 | 1.14 (2*) |
| 3P-N-A2 | 562.0 | F-Y _B | 0.75 | a | 1.34 | 1.10 | 1.12 | 1.34 (2*) |
| 3P-N-A3 | 611.8 | F-Y _B | 0.82 | a | 0.70 | 1.12 | 0.88 | 1.12 (3*) |
| 3P-N-B1 | 710.9 | F-Y _B | 0.99 | a | 1.10 | 1.08 | 1.05 | 1.10 (2*) |
| 3P-N-B2 | 761.9 | F-Y _{BH} | 0.97 | a | 1.16 | 1.13 | 1.10 | 1.16 (2*) |
| 3P-N-B3 | 777.3 | F-Y _{BH} | 0.99 | a | 0.70 | 1.15 | 0.91 | 1.15 (3*) |
| 3P-N-C1 | 859.2 | D-Y _B | 1.14 | a | 0.98 | 1.07 | 1.01 | 1.14 (f) |
| 3P-N-C2 | 852.0 | F-Y _B | 1.01 | a | 0.95 | 1.03 | 0.97 | 1.03 (3*) |
| 3P-N-C3 | 987.2 | D-Y _{BHV} | 1.17 | a | 0.72 | 1.16 | 0.95 | 1.17 (f) |
| MEDIA | | | | | | | 1.15 | |
| COV | | | | | | | 0.07 | |

$V_{u,e}$: carga máxima experimental; Modo de fallo: F-frágil, D-dúctil; Y_B-plastificación de la armadura principal en bandas; Y_H-plastificación de la armadura secundaria horizontal; Y_V-plastificación de la armadura secundaria vertical en cercos; V_{flex} : resistencia a flexión del encepado; $V_{Rd,cs}$: resistencia a cortante o punzonamiento del encepado, según la sección de control considerada: (1*)-cortante en la sección paralela a uno de los lados, (2*)-cortante en la sección de esquina, (3*)-punzonamiento del pilar, (4*)-punzonamiento del pilote; V_{min} : mínima de todas las anteriores predicciones de resistencia

NOTAS:

^a Esta comprobación no aplica en el caso de encepados de tres pilotes

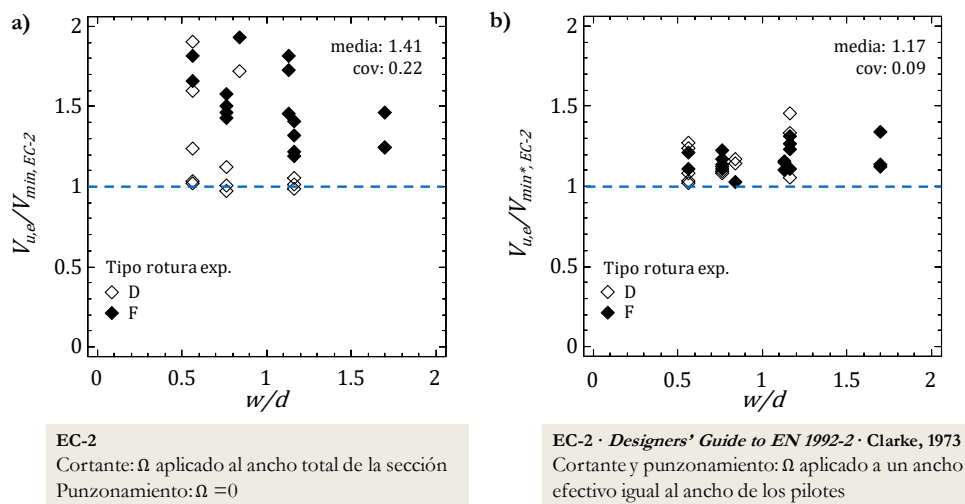


Figura 6.5 Comparación de la carga máxima experimental ($V_{u,e}$) con la mínima resistencia estimada por los métodos seccionales del EC-2

a) Aplicación directa del EC-2; b) Consideración del coeficiente de mejora del hormigón (Ω) actuando sobre el ancho efectivo (w_{eff})

Los resultados obtenidos de este contraste experimental (Figura 6.5) evidencian la necesidad de fijar un ancho efectivo (w_{eff}) para la consideración del factor de mejora de la resistencia del hormigón (Ω) debido a la cercanía entre carga y apoyos. Se obtienen así predicciones de la resistencia más ajustadas (media: 1.17, cov: 0.09) que con la aplicación directa del EC-2 (media: 1.41, cov: 0.22).

Aunque la obtención de la mínima resistencia resulta un planteamiento seguro para el diseño de encepados, los modos de rotura limitantes no siempre se corresponden con los observados experimentalmente. Siguiendo la sistemática planteada por las guías de diseño [49,50], en muchos casos resultan limitante fallos por cortante que llevan a predicciones muy conservadoras. Sin embargo, la campaña experimental llevada a cabo ha revelado complejas superficies de rotura por punzonamiento, pero en ningún caso se detectan planos de fallo por cortante.

Por ello, se completa este contraste experimental comparando la carga máxima experimental ($V_{u,e}$) con la mínima entre V_{flex} y $V_{Rd,cs}$ (3*), que representarían los posibles modos de fallo observados experimentalmente (Figura 6.6).

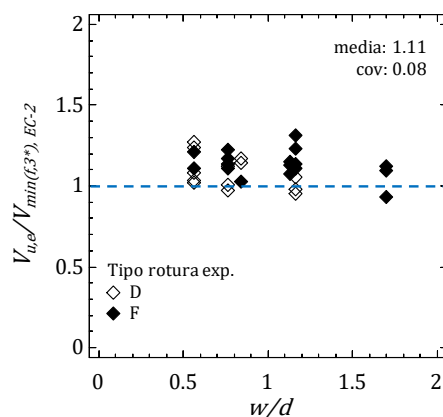


Figura 6.6 Comparación de la carga máxima experimental ($V_{u,e}$) con la resistencia predicha por los métodos de flexión y punzonamiento del EC-2 considerando el coeficiente de mejora del hormigón actuando sobre el ancho eficaz

El resultado de esta comparación muestra un ajuste similar en la predicción de resistencia (media: 1.11, cov: 0.08) sin necesidad de tener en cuenta los posibles fallos por cortante, y resulta coherente en la estimación del modo de fallo.

6.1.2. ACI 318-14

6.1.2.1 Resistencia a flexión del encepado

Aunque para el caso general el ACI 318-14 sitúa la sección de control para el cálculo de la resistencia a flexión en el borde del pilar, la guía de aplicación para encepados (*Design Guide for pile caps* [48]) recomienda situar esta sección a $c/4$ desde el centro del pilar (sección (B) en Figura 6.7), para garantizar un diseño seguro de estos elementos.

La resistencia a flexión del encepado es función del área de armado dispuesta normal al plano de comprobación (A_s), la resistencia del hormigón (ηf_c), la profundidad del bloque de compresiones ($\lambda_1 x$) y el ancho de la sección (b_x o b_y). En la Tabla 6.14 y Tabla 6.15 se presentan estos valores, así como el coeficiente k_{flex} (Ec. (6.5)) que permite obtener la carga en el pilar que lleva al agotamiento por flexión de la sección (V_{flex}).

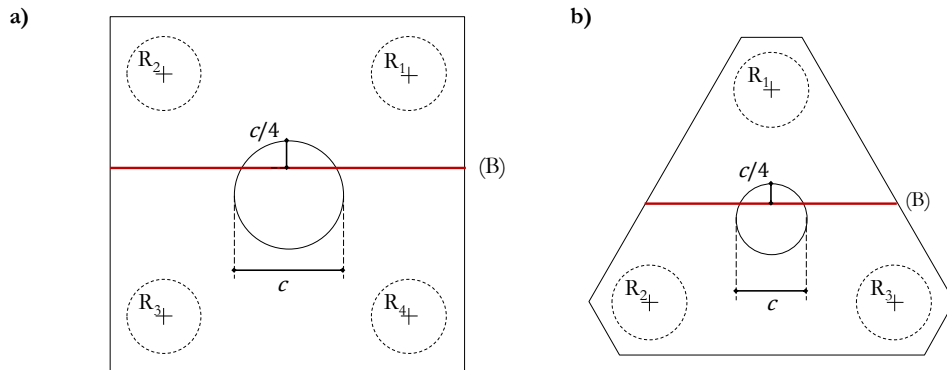


Figura 6.7 Secciones de control para la determinación de la resistencia a flexión – ACI 318-14
a) encepados de cuatro pilotes; b) encepados de tres pilotes

Tabla 6.14 Resistencia a flexión de los encepados de tres pilotes – ACI 318-14

| Espécimen | A_s (cm ²) | $\eta \cdot f_c$ (Mpa) | $\lambda_1 \cdot x$ (m) | M_{Rd} (kNm) | $k_{flex,B}$ | $V_{flex,B}$ (kN) |
|-----------|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|-------------------|--------------|----------------------|
| 3P-N-A1 | 7.84 | 19.81 | 0.024 | 76.9 | 7.51 | 577.3 |
| 3P-N-A2 | 8.62 | 19.42 | 0.027 | 83.9 | 7.51 | 630.1 |
| 3P-N-A3 | 8.62 | 20.13 | 0.026 | 83.4 | 7.51 | 626.2 |
| 3P-N-B1 | 5.28 | 20.99 | 0.015 | 80.8 | 7.51 | 607.1 |
| 3P-N-B2 | 5.78 | 22.33 | 0.016 | 88.2 | 7.51 | 662.4 |
| 3P-N-B3 | 5.78 | 22.54 | 0.015 | 87.7 | 7.51 | 658.5 |
| 3P-N-C1 | 4.08 | 20.37 | 0.012 | 84.5 | 7.51 | 634.6 |
| 3P-N-C2 | 4.58 | 22.46 | 0.012 | 94.9 | 7.51 | 712.7 |
| 3P-N-C3 | 4.58 | 24.25 | 0.011 | 94.4 | 7.51 | 709.0 |

A_{sB} : área de armadura dispuesta en bandas; $A_{s#}$: área de armadura distribuida entre bandas; ηf_c : resistencia del bloque rectangular de compresiones; $\lambda_1 x$: profundidad del bloque rectangular de compresiones; M_{Rd} : resistencia a flexión de la sección; k_{flex} : constante que relaciona la resistencia a flexión de la sección con la carga aplicada en el pilar; V_{flex} : carga en el pilar para la cual se alcanza la resistencia a flexión de la sección

NOTAS:

- El ancho de la sección considerado en encepados de la serie 3P es: $b_{y,B}=0.865m$
- El valor de η es igual a 0.85 en todos los casos porque $f_c < 50MPa$
- El valor de λ_1 es igual a 0.85 en los casos en que $f_c < 28MPa$, pero cuando $28MPa < f_c < 55MPa$ entonces λ_1 se obtiene de: $0.85 - 0.05 \cdot (f_c - 28) / 7$

Tabla 6.15 Resistencia a flexión de los encepados de cuatro pilotes – ACI 318-14

| Espécimen | A_s (cm ²) | $\eta \cdot f_c$ (Mpa) | $\lambda_l \cdot x$ (m) | M_{Rd} (kNm) | $k_{flex,B}$ | $V_{flex,B}$ (kN) |
|-----------|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|-------------------|--------------|----------------------|
| 4P-N-A1 | 10.31 | 23.52 | 0.021 | 104.8 | 6.40 | 670.9 |
| 4P-N-A2 | 14.23 | 25.07 | 0.027 | 142.3 | 6.40 | 910.6 |
| 4P-N-A3 | 14.23 | 25.50 | 0.027 | 142.5 | 6.40 | 911.8 |
| 4P-N-B1 | 6.79 | 22.19 | 0.015 | 109.2 | 6.40 | 699.1 |
| 4P-N-B2 | 9.30 | 21.50 | 0.021 | 148.1 | 6.40 | 948.1 |
| 4P-N-B3 | 9.30 | 25.39 | 0.018 | 149.0 | 6.40 | 953.4 |
| 4P-N-C1 | 5.40 | 27.10 | 0.009 | 113.4 | 6.40 | 725.7 |
| 4P-N-C2 | 7.92 | 30.84 | 0.012 | 165.6 | 6.40 | 1059.9 |
| 4P-N-C3 | 7.92 | 28.92 | 0.013 | 165.4 | 6.40 | 1058.9 |
| 4P-NMM-A2 | 14.23 | 30.96 | 0.022 | 142.0 | 3.99 | 566.4 |
| 4P-NMM-A3 | 14.23 | 33.33 | 0.020 | 142.6 | 3.99 | 568.8 |
| 4P-NMM-B2 | 9.30 | 33.18 | 0.013 | 144.7 | 3.99 | 577.1 |
| 4P-NMM-B3 | 9.30 | 24.65 | 0.018 | 143.6 | 3.99 | 572.6 |
| 4P-NMM-C2 | 7.92 | 24.40 | 0.015 | 170.1 | 3.99 | 678.5 |
| 4P-NMM-C3 | 7.92 | 25.06 | 0.015 | 170.2 | 3.99 | 678.9 |
| 4P-NM-A2 | 14.23 | 23.06 | 0.029 | 139.1 | 4.65 | 647.6 |
| 4P-NM-A3 | 14.23 | 26.05 | 0.026 | 140.4 | 4.65 | 653.6 |
| 4P-NM-B2 | 9.30 | 25.67 | 0.017 | 143.7 | 4.65 | 669.1 |
| 4P-NM-B3 | 9.30 | 23.93 | 0.018 | 143.4 | 4.65 | 667.6 |
| 4P-NM-C2 | 7.92 | 23.70 | 0.016 | 170.0 | 4.65 | 791.4 |
| 4P-NM-C3 | 7.92 | 24.46 | 0.015 | 170.1 | 4.65 | 791.9 |

A_{sB} : área de armadura dispuesta en bandas; A_{sff} : área de armadura distribuida entre bandas; ηf_c : resistencia del bloque rectangular de compresiones; $\lambda_l x$: profundidad del bloque rectangular de compresiones; M_{Rd} : resistencia a flexión de la sección; k_{flex} : constante que relaciona la resistencia a flexión de la sección con la carga aplicada en el pilar; V_{flex} : carga en el pilar para la cual se alcanza la resistencia a flexión de la sección

NOTAS:

- El ancho de la sección es idéntico en todos los especímenes de las series 4P, $b_x = b_y = 1.15m$
- El valor de η es igual a 0.85 en todos los casos porque $f_c < 50MPa$
- El valor de λ_l es igual a 0.85 en los casos en que $f_c < 28MPa$, pero cuando $28MPa < f_c < 55MPa$ entonces λ_l se obtiene de: $0.85 - 0.05 \cdot (f_c - 28) / 7$

6.1.2.2 Resistencia a cortante del encepado

La determinación de la resistencia a cortante del encepado se realiza siguiendo la formulación general del ACI 318-14 en los casos en que $w/d \geq 1$ (encepados de tipo A y B de la serie experimental), pero la propia norma remite a las *Special Investigations* recogidas en el *CRSI Design Handbook* [53] para aquellas situaciones en las que la carga se localiza cerca del apoyo ($w/d < 1$, encepados tipo C). Únicamente en este segundo caso se considera un factor de mejora de la resistencia del hormigón (Ω). Además, la aplicación de esta *Special Investigation* queda limitada a la comprobación del cortante en la sección del pilar, y no resulta extensible a la comprobación del cortante en esquina en la sección del pilote.

En el caso general, la sección de control se sitúa a una distancia d del borde del pilar (sección (1) y (2) en la Figura 6.8), pero en los encepados más rígidos (tipo C) esta sección se sitúa tangente al borde del pilar (sección (1*)) en la Figura 6.8).

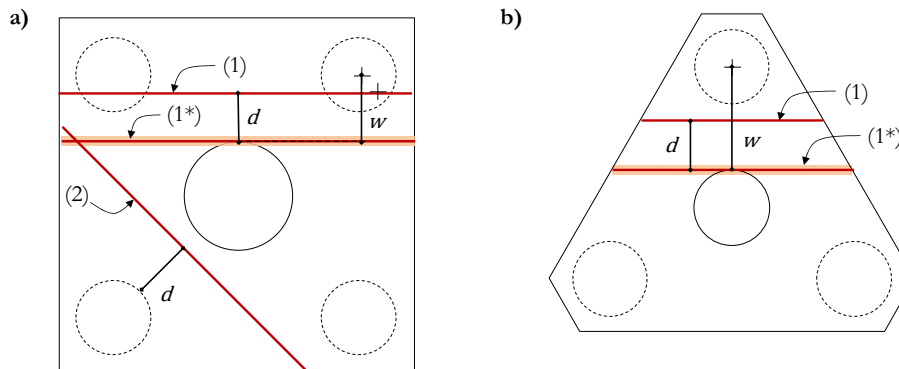


Figura 6.8 Secciones de control para la determinación de la resistencia a cortante – ACI 318-14
a) encepados de cuatro pilotes; b) encepados de tres pilotes

Tabla 6.16 Resistencia a cortante de las sec. (1,1*) de los encepados de cuatro pilotes - ACI 318-14

| Especímen | $v_{Rd,c}$ (MPa) | Ω | $2R_{Rd,cs}$ (kN) | | $R_{Rd,cs}$ (kN) | $V_{Rd,cs}$ (kN) | | |
|-------------------------|---------------------|----------|-------------------|--------|------------------|------------------|--------|--------|
| | | | (1) | (1*) | (2) | (1) | (1*) | (2) |
| 4P-N-A1 | 0.92 | 1.00 | 205.3 | - | 198.6 | 410.6 | - | 794.5 |
| 4P-N-A2 | 0.98 | 1.00 | 218.1 | - | 205.1 | 436.1 | - | 820.3 |
| 4P-N-A3 | 0.98 | 1.00 | 479.0 | - | 437.3 | 958.1 | - | 1749.3 |
| 4P-N-B1 | 1.13 | 1.61 | - | 622.9 | b | - | 1245.8 | b |
| 4P-N-B2 | 1.13 | 1.61 | - | 622.7 | b | - | 1245.4 | b |
| 4P-N-B3 | 1.22 | 1.61 | - | 933.1 | b | - | 1866.1 | b |
| 4P-N-C1 | 1.64 | 2.09 | - | 1581.2 | b | - | 3162.3 | b |
| 4P-N-C2 | 1.77 | 2.09 | - | 1700.2 | b | - | 3400.5 | b |
| 4P-N-C3 | 1.71 | 2.09 | - | 1907.5 | b | - | 3815.0 | b |
| 4P-NMM-A2 | 1.03 | 1.00 | a | a | 227.9 | a | a | 595.7 |
| 4P-NMM-A3 | 1.06 | 1.00 | a | a | 458.0 | a | a | 1197.1 |
| 4P-NMM-B,C ^b | - | 1.00 | - | - | - | - | - | - |
| 4P-NM-A2 | 0.94 | 1.00 | 210.1 | - | 196.7 | 305.6 | - | 572.2 |
| 4P-NM-A3 | 0.99 | 1.00 | 481.1 | - | 430.6 | 699.8 | - | 1252.5 |
| 4P-NM-B2 | 1.23 | 1.61 | - | 677.3 | - | - | 985.1 | - |
| 4P-NM-B3 | 1.19 | 1.61 | - | 904.2 | - | - | 1315.2 | - |
| 4P-NM-C2 | 1.55 | 2.09 | - | 1496.7 | - | - | 2177.0 | - |
| 4P-NM-C3 | 1.58 | 2.09 | - | 1768.9 | - | - | 2572.9 | - |

$v_{Rd,c}$: valor de cálculo de la resistencia a cortante del hormigón a lo largo de la sección crítica considerada; Ω : factor de mejora de la resistencia del hormigón; $2R_{Rd,cs}$: resistencia a cortante de la sección crítica considerada, considerando la contribución de hormigón y armadura de cortante efectiva A_{sw} ; $V_{Rd,cs}$: resistencia a cortante del encepado, considerando la contribución de hormigón y armadura de cortante efectiva A_{sw} ; A_{sw} : área de armadura de cortante situada a un canto útil desde el borde del pilar.

NOTAS:

- El ancho de la sección es idéntico en todos los especímenes de las series 4P, $b_x=b_y=1.15m$
- La armadura de cortante efectiva (A_{sw}) es de $9r\phi 8$ (4.52cm²) en la sección crítica considerada
- ^a Esta comprobación no aplica en caso de flexión esviada
- ^b La comprobación del cortante en pilote de esquina sólo aplica en los encepados tipo A ($w/d < 1$). No existe *Special Investigation* en para los casos de encepados más rígidos (Tipos B y C)

Tabla 6.17 Resistencia a cortante de las sec. (1, 1*) de los encepados de tres pilotes - ACI 318-14

| Espécimen | v_{Rdc} (MPa) | Ω | $R_{Rd,cs}$ (kN) | | $V_{Rd,cs}$ (kN) | |
|-----------|--------------------|----------|------------------|-------|------------------|--------|
| | | | (1) | (1*) | (1) | (1*) |
| 3P-N-A1 | 0.89 | 1.00 | 99.3 | - | 297.9 | - |
| 3P-N-A2 | 0.88 | 1.00 | 98.5 | - | 295.4 | - |
| 3P-N-A3 | 0.90 | 1.00 | 271.9 | - | 815.7 | - |
| 3P-N-B1 | 0.86 | 1.00 | 114.8 | - | 344.4 | - |
| 3P-N-B2 | 0.89 | 1.00 | 118.1 | - | 354.4 | - |
| 3P-N-B3 | 0.89 | 1.00 | 290.6 | - | 871.7 | - |
| 3P-N-C1 | 0.96 | 1.39 | - | 422.9 | - | 1268.8 |
| 3P-N-C2 | 1.00 | 1.39 | - | 443.5 | - | 1330.5 |
| 3P-N-C3 | 1.04 | 1.39 | - | 632.3 | - | 1896.9 |

v_{Rdc} : valor de cálculo de la resistencia a cortante del hormigón a lo largo de la sección crítica considerada; Ω : factor de mejora de la resistencia del hormigón; $R_{Rd,cs}$: resistencia a cortante de la sección crítica considerada, considerando la contribución de hormigón y armadura de cortante efectiva A_{sw} ; $V_{Rd,cs}$: resistencia a cortante del encepado, considerando la contribución de hormigón y armadura de cortante efectiva A_{sw} ; A_{sw} : área de armadura de cortante situada a un canto útil desde el borde del pilar.

NOTAS:

- El ancho de la sección es variable en los encepados de la serie 3P: $b_{y,A}=0.56\text{m}$; $b_{y,B}=0.45\text{m}$, $b_{y,C}=0.79\text{m}$
- La armadura de cortante efectiva (A_{sw}) es de $6\tau\phi 8$ (3.02cm^2) en la sección crítica considerada

6.1.2.3 Resistencia a punzonamiento del encepado

La resistencia a punzonamiento de los encepados que constituyen la serie experimental se determina siguiendo la formulación general del ACI 318-14, puesto que todos cumplen con la condición de que $w/d \geq 0.5$. Por tanto no resulta de aplicación la *Special Investigation* recogida en el *CRSI Design Handbook* [53] para el caso de encepados más rígidos, en los que sí se consideraría un factor de mejora de la resistencia del hormigón (Ω).

La sección de control en todos los casos se sitúa a una distancia $0.5d$ del perímetro del pilar o pilote (secciones (3) y (4) respectivamente en la Figura 6.9).

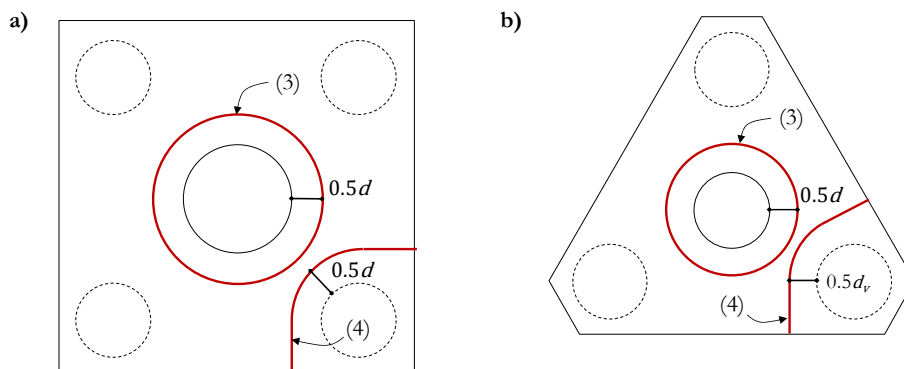


Figura 6.9 Sec. de control para la determinación de la resistencia a punzonamiento - ACI 318-14
a) encepados de cuatro pilotes; b) encepados de tres pilotes

Tabla 6.18 Resistencia a punzonamiento de la sec. (3) de los encepados de tres pilotes - ACI 318-14

| Espécimen | $v_{Rd,c}$ (kN) | Ω | β | $f_{yw,d}$ (MPa) | $V_{Rd,cs}$ (kN) (3) |
|-----------|--------------------|----------|---------|---------------------|-------------------------|
| 3P-N-A1 | 1.59 | 1 | 1.00 | - | 444.0 |
| 3P-N-A2 | 1.58 | 1 | 1.00 | - | 439.6 |
| 3P-N-A3 | 1.61 | 1 | 1.00 | 570.0 | 488.4 |
| 3P-N-B1 | 1.64 | 1 | 1.00 | - | 841.3 |
| 3P-N-B2 | 1.69 | 1 | 1.00 | - | 867.8 |
| 3P-N-B3 | 1.70 | 1 | 1.00 | 570.0 | 964.9 |
| 3P-N-C1 | 1.62 | 1 | 1.00 | - | 1319.6 |
| 3P-N-C2 | 1.70 | 1 | 1.00 | - | 1385.5 |
| 3P-N-C3 | 1.76 | 1 | 1.00 | 570.0 | 1439.8 |

$v_{Rd,c}$: valor de cálculo de la resistencia a punzonamiento del hormigón a lo largo de la sección crítica considerada; Ω : factor de mejora de la resistencia del hormigón; β : coeficiente de excentricidad; $f_{yw,d}$: valor de cálculo de la resistencia de la armadura de punzonamiento; $V_{Rd,cs}$: resistencia a punzonamiento del encepado, considerando la contribución de hormigón y armadura de punzonamiento efectiva A_{sw} ; A_{sw} : área de armadura de punzonamiento incluida dentro perímetro situado a d desde el borde del pilar.

NOTA:

- La longitud del perímetro de control en la serie 3P es $u_{1,A}=1.71\text{m}$; $u_{1,B}=2.04\text{m}$; $u_{1,C}=2.36\text{m}$
- La armadura de punzonamiento efectiva (A_{sw}) es de $20r\phi 8$ (10.05cm^2) para los encepados de 4P de tipo A y B, y $40r\phi 8$ (20.10cm^2) para los encepados de tipo C.

Tabla 6.19 Resistencia a punzonamiento de la sec. (3) de los encepados de cuatro pilotes - ACI 318-14

| Especímen | v_{Rdc} (kN) | Ω | β | $f_{yw,d}$ (MPa) | $V_{Rd,cs}$ (kN) (3) |
|-----------|-------------------|----------|---------|---------------------|-------------------------|
| 4P-N-A1 | 1.74 | 1.00 | 1.00 | - | 575.5 |
| 4P-N-A2 | 1.79 | 1.00 | 1.00 | - | 594.2 |
| 4P-N-A3 | 1.81 | 1.00 | 1.00 | 573.3 | 885.0 |
| 4P-N-B1 | 1.69 | 1.00 | 1.00 | - | 1022.9 |
| 4P-N-B2 | 1.66 | 1.00 | 1.00 | - | 1006.9 |
| 4P-N-B3 | 1.80 | 1.00 | 1.00 | 573.3 | 1139.9 |
| 4P-N-C1 | 1.86 | 1.00 | 1.00 | - | 1756.3 |
| 4P-N-C2 | 1.99 | 1.00 | 1.00 | - | 1873.4 |
| 4P-N-C3 | 1.92 | 1.00 | 1.00 | 573.3 | 2087.2 |
| 4P-NMM-A2 | 1.99 | 1.00 | 1.29 | - | 511.2 |
| 4P-NMM-A3 | 2.07 | 1.00 | 1.29 | 550.8 | 701.9 |
| 4P-NMM-B2 | 2.06 | 1.00 | 1.23 | - | 1013.9 |
| 4P-NMM-B3 | 1.78 | 1.00 | 1.23 | 550.8 | 899.1 |
| 4P-NMM-C2 | 1.77 | 1.00 | 1.19 | - | 1394.6 |
| 4P-NMM-C3 | 1.79 | 1.00 | 1.19 | 550.8 | 1655.1 |
| 4P-NM-A2 | 1.72 | 1.00 | 1.29 | - | 441.2 |
| 4P-NM-A3 | 1.83 | 1.00 | 1.29 | 550.8 | 670.3 |
| 4P-NM-B2 | 1.81 | 1.00 | 1.23 | - | 891.8 |
| 4P-NM-B3 | 1.75 | 1.00 | 1.23 | 550.8 | 892.4 |
| 4P-NM-C2 | 1.74 | 1.00 | 1.19 | - | 1374.6 |
| 4P-NM-C3 | 1.77 | 1.00 | 1.19 | 550.8 | 1646.3 |

v_{Rdc} : valor de cálculo de la resistencia a punzonamiento del hormigón a lo largo de la sección crítica considerada; Ω : factor de mejora de la resistencia del hormigón; β : coeficiente de excentricidad; $f_{yw,d}$: valor de cálculo de la resistencia de la armadura de punzonamiento; $V_{Rd,cs}$: resistencia a punzonamiento del encepado, considerando la contribución de hormigón y armadura de punzonamiento efectiva A_{sw} ; A_{sw} : área de armadura de punzonamiento incluida dentro perímetro situado a d desde el borde del pilar.

NOTA:

- La longitud del perímetro de control en las series de 4P es $u_{1,A}=1.71\text{m}$; $u_{1,B}=2.04\text{m}$; $u_{1,C}=2.36\text{m}$
- La armadura de punzonamiento efectiva (A_{sw}) es de $20\text{r}\phi 8$ (10.05cm^2) para los encepados de 4P de tipo A y B, y $40\text{r}\phi 8$ (20.10cm^2) para los encepados de tipo C

Tabla 6.20 Resistencia a punzonamiento de la sec. (4) de los encepados de cuatro pilotes - ACI 318-14

| Especímen | $v_{Rd,c}$ (kN) | Ω | $f_{yw,d}$ (MPa) | $R_{Rd,cs}$ (kN) (4) | $V_{Rd,cs}$ (kN) (4) |
|-----------|--------------------|----------|---------------------|-------------------------|-------------------------|
| 4P-N-A1 | 1.74 | 1.00 | - | 235.3 | 941.1 |
| 4P-N-A2 | 1.79 | 1.00 | - | 242.9 | 971.7 |
| 4P-N-A3 | 1.81 | 1.00 | 573.3 | 356.7 | 1426.9 |
| 4P-N-B1 | 1.69 | 1.00 | - | 392.1 | 1568.4 |
| 4P-N-B2 | 1.66 | 1.00 | - | 386.0 | 1543.9 |
| 4P-N-B3 | 1.80 | 1.00 | 573.3 | 504.2 | 2016.9 |
| 4P-N-C1 | 1.86 | 1.00 | - | 641.4 | 2565.6 |
| 4P-N-C2 | 1.99 | 1.00 | - | 684.2 | 2736.7 |
| 4P-N-C3 | 1.92 | 1.00 | 573.3 | 662.6 | 2650.4 |
| 4P-NMM-A2 | 1.99 | 1.00 | - | 270.0 | 705.6 |
| 4P-NMM-A3 | 2.07 | 1.00 | 550.8 | 365.8 | 956.2 |
| 4P-NMM-B2 | 2.06 | 1.00 | - | 479.5 | 1253.3 |
| 4P-NMM-B3 | 1.78 | 1.00 | 550.8 | 489.8 | 1280.2 |
| 4P-NMM-C2 | 1.77 | 1.00 | - | 608.5 | 1590.6 |
| 4P-NMM-C3 | 1.79 | 1.00 | 550.8 | 616.8 | 1612.1 |
| 4P-NM-A2 | 1.72 | 1.00 | - | 233.0 | 677.8 |
| 4P-NM-A3 | 1.83 | 1.00 | 550.8 | 349.1 | 1015.5 |
| 4P-NM-B2 | 1.81 | 1.00 | - | 421.8 | 1226.9 |
| 4P-NM-B3 | 1.75 | 1.00 | 550.8 | 486.6 | 1415.7 |
| 4P-NM-C2 | 1.74 | 1.00 | - | 599.8 | 1744.8 |
| 4P-NM-C3 | 1.77 | 1.00 | 550.8 | 609.3 | 1772.5 |

$v_{Rd,c}$: valor de cálculo de la resistencia a punzonamiento del hormigón a lo largo de la sección crítica considerada; Ω : factor de mejora de la resistencia del hormigón; β : coeficiente de excentricidad; $f_{yw,d}$: valor de cálculo de la resistencia de la armadura de punzonamiento; $R_{Rd,cs}$: resistencia a punzonamiento de la sección crítica considerada, considerando la contribución de hormigón y armadura de punzonamiento efectiva A_{sw} ; $V_{Rd,cs}$: resistencia a punzonamiento del encepado, considerando la contribución de hormigón y armadura de punzonamiento efectiva A_{sw} ; A_{sw} : área de armadura de punzonamiento incluida dentro perímetro situado a d desde el borde del pilote.

NOTA:

- La longitud del perímetro de control en las series de 4P es $u_{1,A}=0.70\text{m}$; $u_{1,B}=0.78\text{m}$; $u_{1,C}=0.86\text{m}$
- La armadura de punzonamiento efectiva (A_{sw}) es de $8r\phi 8$ (4.02cm^2) para los encepados de 4P de tipo A, y $10r\phi 8$ (5.03cm^2) para los encepados de tipo B y C

Tabla 6.21 Resistencia a punzonamiento de la sec. (4) de los encepados de tres pilotes - ACI 318-14

| Espécimen | $V_{Rd,c}$ (kN) | Ω | $f_{yw,d}$ (MPa) | $R_{Rd,cs}$ (kN) (4) | $V_{Rd,cs}$ (kN) (4) |
|-----------|--------------------|----------|---------------------|-------------------------|-------------------------|
| 3P-N-A1 | 1.59 | 1.00 | - | 184.4 | 553.2 |
| 3P-N-A2 | 1.58 | 1.00 | - | 182.6 | 547.7 |
| 3P-N-A3 | 1.61 | 1.00 | 570.0 | 267.7 | 803.0 |
| 3P-N-B1 | 1.64 | 1.00 | - | 311.3 | 933.8 |
| 3P-N-B2 | 1.69 | 1.00 | - | 321.1 | 963.2 |
| 3P-N-B3 | 1.70 | 1.00 | 570.0 | 338.1 | 1014.2 |
| 3P-N-C1 | 1.62 | 1.00 | - | 446.1 | 1338.4 |
| 3P-N-C2 | 1.70 | 1.00 | - | 468.4 | 1405.2 |
| 3P-N-C3 | 1.76 | 1.00 | 570.0 | 486.7 | 1460.2 |

$V_{Rd,c}$: valor de cálculo de la resistencia a punzonamiento del hormigón a lo largo de la sección crítica considerada; Ω : factor de mejora de la resistencia del hormigón; β : coeficiente de excentricidad; $f_{yw,d}$: valor de cálculo de la resistencia de la armadura de punzonamiento; $R_{Rd,cs}$: resistencia a punzonamiento de la sección crítica considerada, considerando la contribución de hormigón y armadura de punzonamiento efectiva A_{sw} ; $V_{Rd,cs}$: resistencia a punzonamiento del encepado, considerando la contribución de hormigón y armadura de punzonamiento efectiva A_{sw} ; A_{sw} : área de armadura de punzonamiento incluida dentro perímetro situado a d desde el borde del pilote.

NOTA:

- La longitud del perímetro de control en la serie de 3P es $u_{1,A}=0.58\text{m}$; $u_{1,B}=0.64\text{m}$; $u_{1,C}=0.69\text{m}$
- La armadura de punzonamiento efectiva (A_{sw}) es de $6r\phi 8$ (3.02cm^2) para todos los encepados de 3P

6.1.2.4 Contraste de resultados con los datos experimentales

La comparación de la carga máxima experimental ($V_{u,e}$) con la resistencia teórica ($V_{min,ACI}$), obtenida como la mínima de todas las predicciones de resistencia siguiendo la formulación del ACI 318-14, se presenta en la Tabla 6.22 y Tabla 6.23. Estos resultados se resumen gráficamente en la Figura 6.10.

Tabla 6.22 Comparación de la carga máxima experimental frente a la resistencia predicha por los métodos seccionales del ACI 318-14, en los encepados de cuatro pilotes

| Especímen | V_{ue} | Modo de fallo | V_{ue}/V_{flex} | $V_{ue}/V_{Rd,cs}$ | | | | $V_{ue}/V_{min,ACI}$ |
|-----------|----------|-------------------------------------------------|-------------------|--------------------|------|------|------|----------------------|
| | | | | (1), (1*) | (2) | (3) | (4) | |
| 4P-N-A1 | 605.6 | F-Y _B | 0.90 | 1.48 | 0.76 | 1.05 | 0.64 | 1.48 (1) |
| 4P-N-A2 | 813.4 | F-Y _{BH} | 0.89 | 1.87 | 0.99 | 1.37 | 0.84 | 1.87 (1) |
| 4P-N-A3 | 973.2 | D-Y _{BHV} | 1.07 | 1.02 | 0.56 | 1.10 | 0.68 | 1.10 (3) |
| 4P-N-B1 | 744.6 | F-Y _B | 1.07 | 0.60 | c | 0.73 | 0.47 | 1.07 (f) |
| 4P-N-B2 | 861.0 | F-Y _B | 0.91 | 0.69 | c | 0.86 | 0.56 | 0.91 (f) |
| 4P-N-B3 | 1116.2 | D-Y _{BHV} | 1.17 | 0.60 | c | 0.98 | 0.55 | 1.17 (f) |
| 4P-N-C1 | 942.6 | D-Y _B | 1.30 | 0.30 | c | 0.54 | 0.37 | 1.30 (f) |
| 4P-N-C2 | 1159.0 | F-Y _B | 1.09 | 0.34 | c | 0.62 | 0.42 | 1.09 (f) |
| 4P-N-C3 | 1302.4 | D-Y _{BHV} | 1.23 | 0.34 | c | 0.62 | 0.49 | 1.23 (f) |
| 4P-NMM-A2 | 586.2 | F-Y _B | 1.03 | a | 0.98 | 1.15 | 0.83 | 1.15 (3) |
| 4P-NMM-A3 | 761.5 | D-Y _{BHV} | 1.34 | a | 0.64 | 1.08 | 0.80 | 1.34 (f) |
| 4P-NMM-B2 | 751.6 | F-Y _{BH} | 1.30 | a | c | 0.74 | 0.60 | 1.30 (f) |
| 4P-NMM-B3 | 814.8 | D-Y _{BHV} | 1.42 | a | c | 0.91 | 0.64 | 1.42 (f) |
| 4P-NMM-C2 | 955.2 | D-Y _{BH} | 1.41 | a | c | 0.68 | 0.60 | 1.41 (f) |
| 4P-NMM-C3 | 1061.1 | D-Y _{BHV} | 1.56 | a | c | 0.64 | 0.66 | 1.56 (f) |
| 4P-NM-A2 | 575.4 | F-Y _{BH} | 0.89 | 1.88 | 1.01 | 1.30 | 0.85 | 1.88 (1) |
| 4P-NM-A3 | 779.8 | (^b) ^b -Y _{BHV} | 1.19 | 1.11 | 0.62 | 1.16 | 0.77 | 1.19 (f) |
| 4P-NM-B2 | 743.7 | F-Y _{BH} | 1.11 | 0.75 | c | 0.83 | 0.61 | 1.11 (f) |
| 4P-NM-B3 | 809.5 | D-Y _{BHV} | 1.21 | 0.62 | c | 0.91 | 0.57 | 1.21 (f) |
| 4P-NM-C2 | 900.8 | F-Y _B | 1.14 | 0.41 | c | 0.66 | 0.52 | 1.14 (f) |
| 4P-NM-C3 | 989.2 | D-Y _{BHV} | 1.25 | 0.38 | c | 0.60 | 0.56 | 1.25 (f) |
| MEDIA | | | | | | | | 1.29 |
| COV | | | | | | | | 0.19 |

V_{ue} : carga máxima experimental; Modo de fallo: F-frágil, D-dúctil; Y_B-plastificación de la armadura principal en bandas; Y_H-plastificación de la armadura secundaria horizontal; Y_V-plastificación de la armadura secundaria vertical en cercos; V_{flex} : resistencia a flexión del encepado; $V_{Rd,cs}$: resistencia a cortante o punzonamiento del encepado, según la sección de control considerada: (1)-cortante en la sección del pilar, (2)-cortante de esquina en la sección del pilote, (3)-punzonamiento del pilar, (4)-punzonamiento del pilote; V_{min} : mínima de todas las anteriores predicciones de resistencia

NOTAS:

^a Esta comprobación no aplica en el caso de encepados de tres pilotes

^b Por un mal funcionamiento del sistema de medida no es posible clasificar el tipo de rotura F/D

^c No existe *Special Investigation* en para los casos de encepados más rígidos (Tipos B y C)

Tabla 6.23 Comparación de la carga máxima experimental frente a la resistencia predicha por los métodos seccionales del ACI 318-14, en los encepados de cuatro pilotes

| Espécimen | $V_{u,e}$ | Modo de fallo | $V_{u,e}/V_{flex}$ | $V_{u,e}/V_{Rd,cs}$ | | | | $V_{u,e}/V_{min,ACI}$ |
|-----------|-----------|--------------------|--------------------|---------------------|-----|------|------|-----------------------|
| | | | | (1), (1*) | (2) | (3) | (4) | |
| 3P-N-A1 | 605.6 | F-Y _B | 0.83 | 1.61 | a | 1.08 | 0.87 | 1.61 (1) |
| 3P-N-A2 | 813.4 | F-Y _{BH} | 0.89 | 1.90 | a | 1.28 | 1.03 | 1.90 (1) |
| 3P-N-A3 | 973.2 | D-Y _{BHV} | 0.98 | 0.75 | a | 1.25 | 0.76 | 1.25 (3) |
| 3P-N-B1 | 744.6 | F-Y _B | 1.17 | 2.06 | a | 0.84 | 0.76 | 2.06 (1) |
| 3P-N-B2 | 861.0 | F-Y _B | 1.15 | 2.15 | a | 0.88 | 0.79 | 2.15 (1) |
| 3P-N-B3 | 1116.2 | D-Y _{BHV} | 1.18 | 0.89 | a | 0.81 | 0.77 | 1.18 (f) |
| 3P-N-C1 | 942.6 | D-Y _B | 1.35 | 0.68 | a | 0.65 | 0.64 | 1.35 (f) |
| 3P-N-C2 | 1159.0 | F-Y _B | 1.20 | 0.64 | a | 0.61 | 0.61 | 1.20 (f) |
| 3P-N-C3 | 1302.4 | D-Y _{BHV} | 1.39 | 0.52 | a | 0.69 | 0.68 | 1.39 (f) |
| MEDIA | | | | | | | | 1.57 |
| COV | | | | | | | | 0.23 |

$V_{u,e}$: carga máxima experimental; Modo de fallo: F-frágil, D-dúctil; Y_B-plastificación de la armadura principal en bandas; Y_H-plastificación de la armadura secundaria horizontal; Y_V-plastificación de la armadura secundaria vertical en cercos; V_{flex} : resistencia a flexión del encepado; $V_{Rd,cs}$: resistencia a cortante o punzonamiento del encepado, según la sección de control considerada: (1)-cortante en la sección del pilar, (2)-cortante de esquina en la sección del pilote, (3)-punzonamiento del pilar, (4)-punzonamiento del pilote; V_{min} : mínima de todas las anteriores predicciones de resistencia

NOTAS:

^a Esta comprobación no aplica en el caso de encepados de tres pilotes por ser equivalente a la (1)

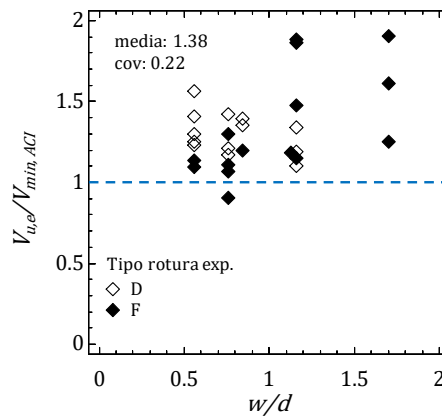


Figura 6.10 Comparación de la carga máxima experimental ($V_{u,e}$) con la mínima resistencia estimada por los métodos seccionales del ACI 318-14

La formulación del ACI 318-14 sobreestima la resistencia a cortante de los encepados de mayor canto (tipo B y C) al tener en cuenta el factor de mejora de la resistencia del hormigón cuando $w/d < 1$, por lo que finalmente resulta limitante su capacidad a flexión. Por otra parte, en el caso de los encepados tipo A ($w/d > 1$) la formulación de cortante resulta muy conservadora. Ambos modos de rotura no se corresponden con los fallos frágiles observados experimentalmente, en los que se aprecia la formación de una superficie de punzonamiento compleja tras la plastificación de las armaduras de la base. La estimación de carga resulta conservadora (media: 1.38) y poco ajustada (cov: 0.22).

Tal y como se ha hecho anteriormente con la formulación del EC-2, al comparar únicamente la carga máxima experimental ($V_{u,e}$) con la mínima resistencia entre la predicha por flexión V_{flex} y por punzonamiento $V_{Rd,cs(3)}$ (Figura 6.11), los resultados de la predicción de carga mejoran aunque siguen siendo conservadores (media: 1.22, cov: 0.11).

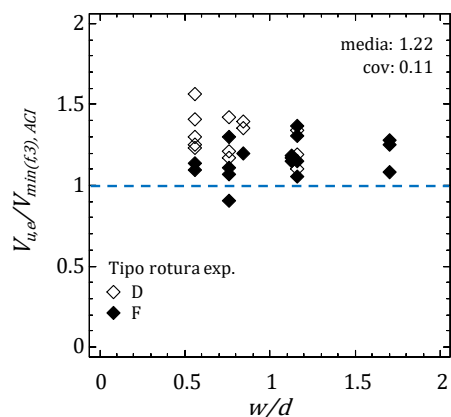


Figura 6.11 Comparación de la carga máxima experimental ($V_{u,e}$) con la resistencia predicha por los métodos de flexión y punzonamiento del ACI 318-14

6.2. Análisis del punzonamiento de encepados según el Código Modelo 2010

Las formulaciones empíricas de punzonamiento y cortante de EC-2 y ACI 318-14 fueron desarrolladas específicamente para losas y vigas y por ello su extensión a encepados resulta compleja, requiere emplear factores de mejora de la resistencia del hormigón por tramos y carece de una sólida base teórica.

En cambio, la formulación de punzonamiento propuesta por el Código Modelo 2010 (CM-2010) [10], está basada en el modelo físico de la *Teoría de la Fisura Crítica* (CSCT por sus siglas en inglés, [21,65]) y puede ser extensible a elementos más rígidos respetando los principios del modelo teórico. De hecho, recientes publicaciones [66–68] abordan el caso particular del punzonamiento de zapatas empleando formulaciones derivadas de la CSCT, obteniendo excelentes resultados en las predicciones de resistencia.

El concepto de fisura crítica se desarrolla para explicar el fallo por cortante en vigas sin armadura de cortante, en las que resulta necesario admitir la colaboración del hormigón en tracción para completar una celosía de transmisión de tensiones. El planteamiento se extiende por analogía al fallo por punzonamiento de losas. Esta fisura crítica es responsable de la reducción de la carga última, y se relaciona su abertura (proporcional a la rotación de la losa (ψ) y al canto útil (d) y rugosidad (función del tamaño máximo de árido, d_g y $d_{g0}=16\text{mm}$) con la resistencia a punzonamiento de la losa. Admitiendo además que la resistencia a cortante es proporcional a la raíz cuadrada de la resistencia a compresión del hormigón, resulta el criterio de rotura (en valores medios) propuesto por Muttoni [65] en la Ec.(6.6):

$$\frac{V_{Rc}}{b_0 d \sqrt{f_c}} = \frac{3/4}{1 + 15 \frac{\psi d}{d_{g0} + d_g}} \quad (6.6)$$

Para los casos de losas muy compactas, Simões et al. [66] han demostrado que la cinemática del fallo es más compleja y que resulta de la combinación de deformaciones de cortante (traslación vertical) además de las rotaciones por flexión pura. Para incorporar al criterio de rotura la posibilidad de que el fallo esté condicionado por uno u otro tipo de deformaciones, Muttoni et al. [67] han propuesto recientemente la Ec. (6.7). Al compararla en la Figura 6.12a con el anterior criterio de rotura, se observa que efectivamente para el caso de peque-

ñas rotaciones $V_{RC,0}$ condicionará la resistencia del elemento, mientras que para rotaciones mayores ambos criterios convergen.

$$V_{RC} = V_{RC,0} \cdot \left(\frac{d_{dg}}{25 \cdot \psi \cdot d} \right)^{2/3} \leq V_{RC,0} \quad (6.7)$$

siendo

$$V_{RC,0} = 0.55 \cdot b_0 \cdot d \cdot \sqrt{f_c}$$

$$d_{dg} = d_{g0} + d_g \cdot \min \left(\left(\frac{60}{f_c} \right)^2, 1 \right) \leq 40 \text{mm}$$

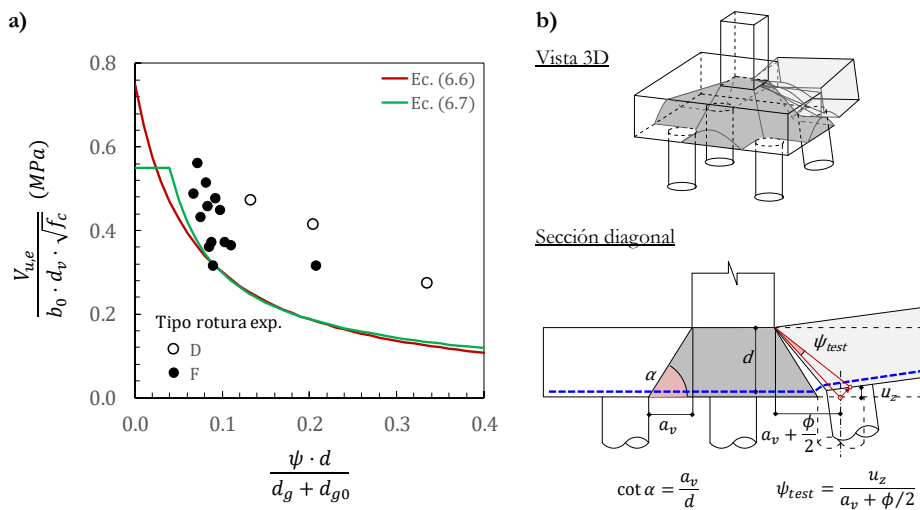


Figura 6.12 Punzonamiento de encepados según la CSCT

a) Comparación del criterio de fallo con los resultados de la serie experimental de encepados sin armadura de punzonamiento; b) Superficie y cinemática del modo de fallo por punzonamiento de encepados (se muestra la rotación de un único pilote para mayor claridad)

Al superponer los datos experimentales de los encepados de pilotes sin armadura de punzonamiento las curvas dadas por las Ec. (6.6) y (6.7) (Figura 6.12a), se observa que aquellos especímenes cuyo fallo fue frágil (marcados con puntos rellenos) muestran una buena correlación con ambos criterios de rotura. A pesar de que los encepados son elementos compactos, han desarrollado deformaciones de flexión previas a la rotura (superando la deformación de plasticificación en la armadura en bandas), lo que se traduce en un predominio de las

rotaciones frente a la deformación de cortante pura. En la Figura 6.12b se muestra la superficie de rotura observada (para un encepado de tipo 4P-N), así como la posible cinemática del fallo.

En los siguientes apartados se analizan los principales parámetros que intervienen en la formulación de punzonamiento basada en la CSCT: definición del perímetro de control de cortante (b_0), obtención de las curvas carga-rotación y evaluación de la contribución resistente de la armadura de punzonamiento. Para el contraste de resultados con los datos experimentales se empleará el criterio de rotura dado por la Ec. (6.6) por ser equivalente al que emplea el CM-2010 en valores característicos. De esta forma se estudia la posible aplicación a encepados de la formulación recogida en este código.

6.2.1. *Perímetro de control de cortante (b_0)*

La evaluación de la resistencia a punzonamiento se realiza sobre un perímetro de control básico (b_l) situado a $0.5d$. Se asume que existe una distribución de esfuerzos cortantes uniforme a lo largo del mismo. Pero esta distribución puede no serlo en casos de transferencia de momento entre pilar y encepado, por la concentración de tensiones en las esquinas de un pilar rectangular o por la cercanía entre carga y apoyos (ratio w/d).

Vaz Rodrigues [69] plantea una metodología general para la determinación de este perímetro de control a partir de un análisis detallado del campo de esfuerzos cortantes mediante un modelo de elementos finitos elástico y lineal. Con este modelo se determina el valor máximo del esfuerzo cortante principal por unidad de longitud ($v_{perp,d,max}$) perpendicular al perímetro de control básico (b_l). El perímetro de control (b_0) se obtiene dividiendo la carga puntual (V) entre $v_{perp,d,max}$, según la Ec. (6.8):

$$b_0 = \frac{V}{v_{perp,d,max}} \quad (6.8)$$

Para obtener la distribución teórica de cortantes en los encepados de la campaña experimental analizada, se han realizado dos modelos de elementos finitos (para la geometría de tres y cuatro pilotes) empleando el programa SAP2000. Siguiendo la metodología planteada por Vaz Rodrigues [69], se realiza un análisis elástico y lineal para cada tipo de carga aplicada (N, NMM o NM). Los elementos empleados son de tipo lámina (Shell-Thick), en la que se tienen en cuenta las deformaciones por cortante. La rigidez a torsión de los elementos se

ha reducido a una octava parte (0.125) para tener en cuenta su disminución tras la fisuración del hormigón [70].

En la Figura 6.13 se muestra un ejemplo del análisis del campo de cortantes para el caso de los encepados de la serie 4P-NMM, solicitados por flexión esviada (excentricidad de la carga hacia uno de los pilotes). En ella se aprecia claramente la concentración de tensiones hacia el pilote más cargado, y la propia distorsión que generan la localización del resto de pilotes tan próximos al pilar. Para la obtención de los flujos e isolíneas de cortante se han post-procesado los resultados del programa SAP2000 mediante MATLAB.

En la Tabla 6.24 y Tabla 6.25 se incluye el valor de la relación entre b_0/b_1 para cada espécimen, obtenido por este método general. Si el valor de este cociente se encuentra próximo a 1 indica que no existe prácticamente concentración de tensiones en el perímetro de control básico (b_1); en cambio cuanto menor sea su valor, mayor será la concentración de tensiones (casos de carga excéntrica).

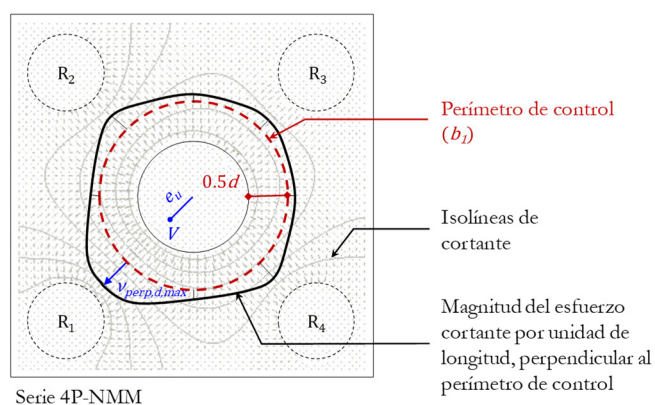


Figura 6.13 Análisis del campo de cortantes para la determinación de $V_{perp,d,max}$

Además de la irregularidad en la distribución de los cortantes en el perímetro de control, Simões et al. [66,71] evidenciaron mediante un análisis límite que la localización del perímetro de control en elementos compactos (en su caso zapatas) es función de la inclinación de la superficie de rotura (α , en la Figura 6.12). Para este tipo de elementos el perímetro de control debería situarse a una distancia menor que la habitual de $0.5d$. Pero para evitar modificar la posición del perímetro de control, Muttoni et al. [67] introducen la limitación $r_s \geq 2.5d$ en la Ec. (6.9), siendo r_s la distancia entre el eje del pilar y el punto de momento flector nulo. Esta limitación se empleará más adelante al evaluar la resistencia a

punzonamiento de los encepados de la serie experimental objeto de estudio. En este caso, al estar apoyados sobre rótulas esféricas, el flector en ejes de pilotes es nulo, y por tanto la distancia r_s es igual a la separación entre pilar y pilotes.

6.2.2. Curva carga-rotación

La resistencia a punzonamiento corresponde al punto de intersección de la curva carga-rotación de la losa con la curva que constituye el criterio de rotura (Ec.(6.6)). La curva carga-rotación puede obtenerse mediante ecuaciones analíticas (para casos sencillos), mediante fórmulas simplificadas de estas ecuaciones analíticas (Niveles de Aproximación I a III del CM-2010, en adelante LoA por sus siglas en inglés) o realizando un análisis no lineal de la estructura con métodos numéricos (LoA IV del CM-2010).

El CM-2010 emplea una parábola con exponente 1.5 para describir la relación carga-rotación (Ec. (6.9)). El cociente entre los valores medios del momento flector solicitante (m_s) y la resistencia a flexión de la sección (m_R) condicionan la abertura de la fisura crítica, que es función de la rotación de la losa (ψ). r_s se define como la distancia entre el eje del pilar y el punto de momento flector nulo, que en el caso de los encepados de la serie experimental analizada es igual a la separación entre pilar y pilotes (ver Figura 6.14 y Figura 6.15).

$$\psi = k_m \frac{r_s}{d} \frac{f_y}{E_s} \left(\frac{m_s}{m_R} \right)^{1.5} \quad (6.9)$$

El LoA-I toma $k_m=1.5$ y supone la plastificación completa del armado en la banda de apoyo ($m_s=m_R$), por lo que la rotación (ψ) resulta un valor constante. Se trata de una formulación útil para la etapa de diseño preliminar, ya que es sencilla de aplicar y conduce a resultados conservadores.

El LoA-II también establece $k_m=1.5$, pero en este caso proporciona unas aproximaciones para obtener m_s en función de la carga de diseño V_{Ed} , las cuales han sido validadas para los casos más habituales del diseño de losas. La Ec. (6.10) sería aplicable para los pilares interiores con armadura ortogonal en dos direcciones:

$$m_{s,0} = V_0 \cdot \left(\frac{1}{8} + \frac{|e_{u,i}|}{2b_s} \right) \quad (6.10)$$

Finalmente, el LoA-III establece que k_m puede tomarse igual a 1.2, siempre que r_s y m_s se determinen de forma más precisa integrando la ley de momentos en la banda de apoyo (b_s), a partir de un análisis lineal elástico (no fisurado). Este análisis se recomienda en el caso de losas irregulares o casos de carga no considerados por las ecuaciones simplificadas anteriores. Es de esperar que de esta forma se capten mejor las particularidades del punzonamiento de encepados, debidas a la proximidad entre carga y apoyos, frente al de losas.

El procedimiento general para losas, recogido en el CM-2010, recomienda considerar un ancho de banda $b_s=1.5r_s$. Esta limitación no parece aplicable al caso particular de encepados rígidos ($w/d \leq 2$), en los cuales resulta más eficiente concentrar el armado en las bandas y disponer una menor cuantía en el centro, mientras que el cálculo elástico de la distribución de flectores actuantes en la sección del pilar muestra valores mayores en la zona central (Figura 6.14d). Por esta razón se considera que los valores del momento actuante (m_s) y resistido (m_R) sólo resultan comparables en términos totales, es decir, extendidos a la sección completa del encepado (b_x o b_y en cada dirección de armado).

Las Ecs. (6.11) permiten obtener los momentos solicitantes $m_{sx,0}$ y $m_{sy,0}$, en función de los flectores y torsores (m_x , m_y y m_{xy}) dados por el análisis elástico, para una determinada carga aplicada V_θ (ej. Figura 6.14 y Figura 6.15). Para los encepados de cuatro pilotes, el ángulo de inclinación de las fisuras (θ) se toma igual a 45° , habitual en losas con armado ortogonal. Para los encepados de tres pilotes, cuya armadura en bandas está inclinada 60° , se observa experimentalmente que el ángulo θ que forman las fisuras con la sección de integración (b_{sy} en la Figura 6.15), es de 30° .

$$m_{sx,0} = \frac{1}{B_x} \int_{-B_x/2}^{B_x/2} (m_x + |m_{xy}| \tan \theta) dy; \quad (6.11)$$

$$m_{sy,0} = \frac{1}{B_y} \int_{-B_y/2}^{B_y/2} (m_y + |m_{xy}| \tan \theta) dx$$

Por último, al dividir la carga aplicada (V_θ) entre los momentos solicitantes ($m_{sx,0}$, $m_{sy,0}$) se determinan las constantes de proporcionalidad k_x , k_y , según la Ec. (6.12). Aceptando un comportamiento lineal del encepado de hormigón, estas constantes permiten obtener los momentos flectores solicitantes medios $m_{sx,0}$ y $m_{sy,0}$ para cualquier nivel de carga (V). Los valores de k_x , k_y para la serie experimental analizada se presentan en la Tabla 6.24 y Tabla 6.25.

$$k_x = \frac{V_0}{m_{sx,0}}; k_y = \frac{V_0}{m_{sy,0}} \quad (6.12)$$

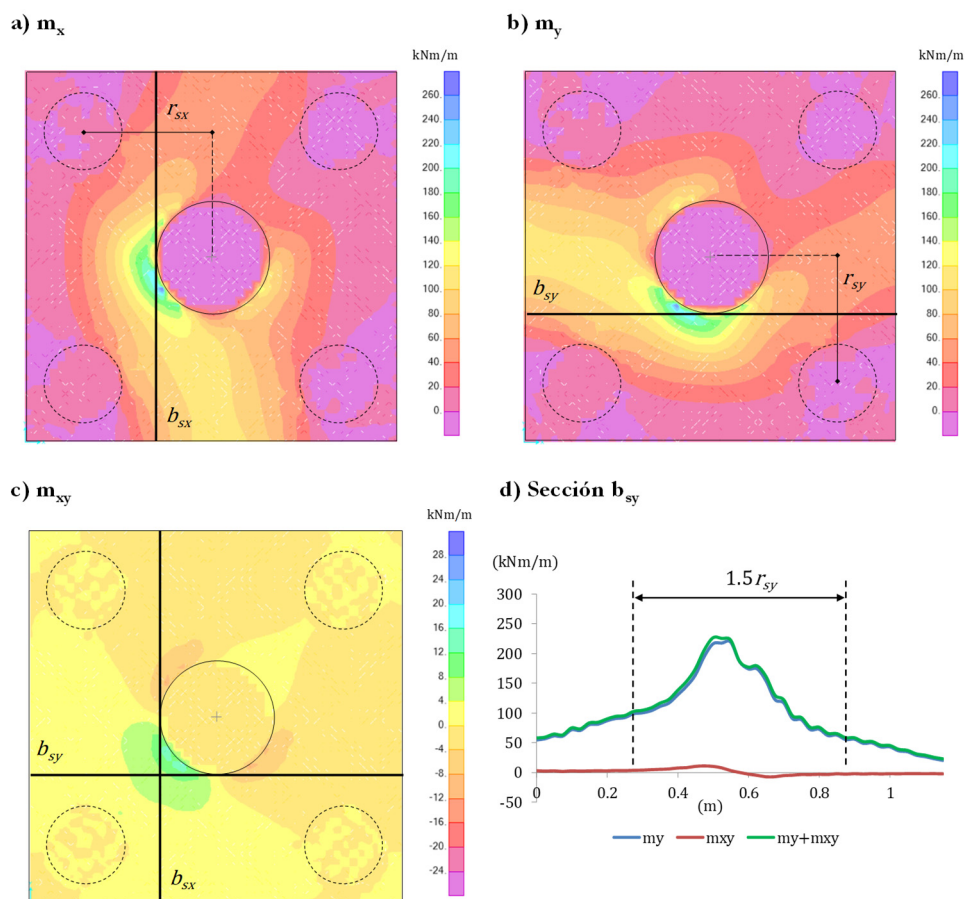


Figura 6.14 Resultados del análisis elástico mediante elementos finitos para los encepados de la serie 4P-NMM.

Carga aplicada en el pilar $V_0=784.15\text{kN}$: a) Flector por unidad de longitud m_x ; b) Flector por unidad de longitud m_y ; c) Torsor por unidad de longitud m_{xy} ; d) Distribución de flectores y torsores sobre la sección b_{sy}

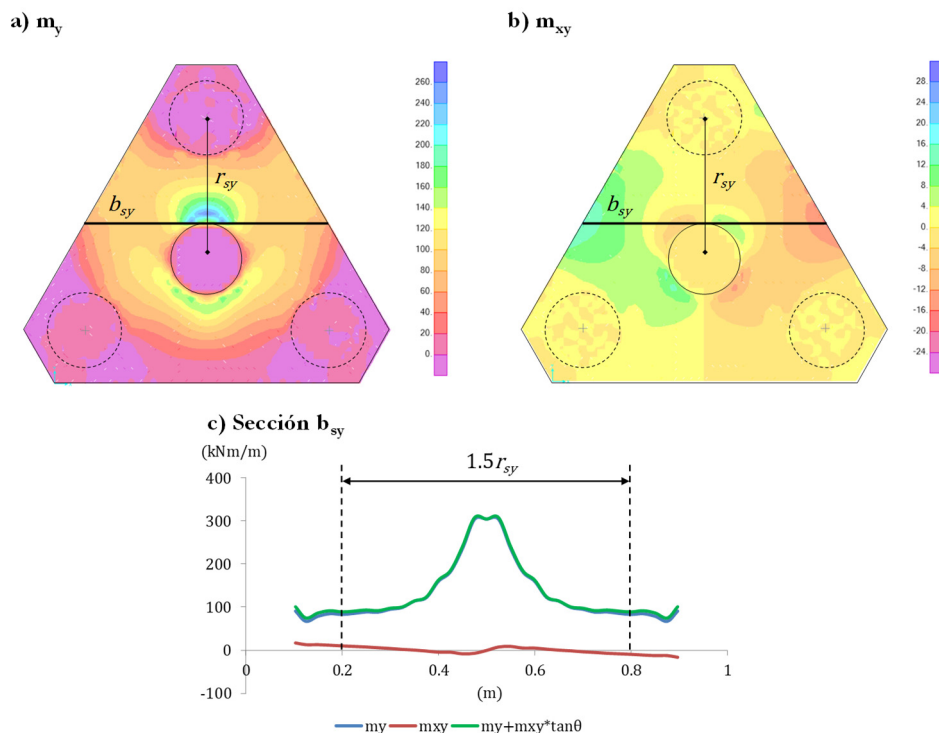
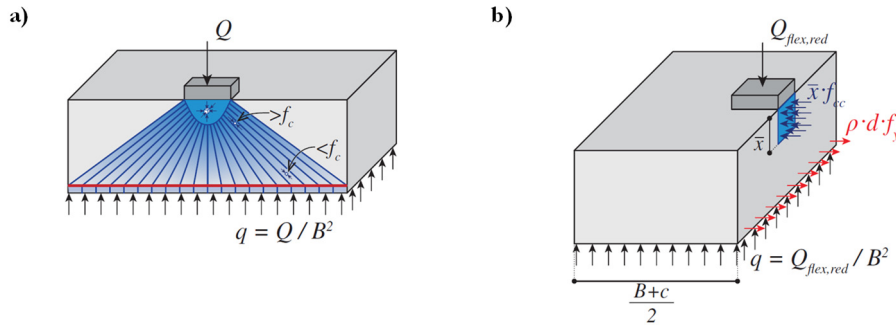


Figura 6.15 Resultados del análisis elástico mediante elementos finitos para los encepados de la serie 3P-N.

Carga aplicada en el pilar $V_0=900\text{kN}$: a) Flector por unidad de longitud m_x ; b) Torsor por unidad de longitud m_{xy} ; c) Distribución de flectores y torsores sobre la sección b_{sy}

En lo que se refiere al cálculo del momento flector resistente m_R en zapatas, Simões et al. [66,71] demostraron que su determinación por el método de las líneas de rotura, aplicable a losas, conducía a una sobreestimación de la capacidad a flexión de estos elementos más rígidos. En estos casos, la interacción entre cortante y flector se traduce en una reducción del brazo mecánico. Estos autores proponen determinar el momento flector resistido por la sección teniendo en cuenta el campo de tensiones que se indica en la Figura 6.16 en el caso de zapatas. Se define una profundidad del bloque de compresiones reducida (\bar{x}), con una resistencia del hormigón mejorada ($f_{cc}=k_{cc}f_c$) debido al estado de compresión triaxial que se genera bajo el pilar. La resultante horizontal de este bloque de compresiones ($\bar{x} \cdot f_{cc} \cdot c$) se equilibra con las tracciones que resiste el armado dispuesto en la base ($\rho \cdot d \cdot B \cdot f_f$).



FUENTE: Muttoni et al. [67]

Figura 6.16 a) Campo de tensiones en una zapata sometida a carga centrada, despreciando la resistencia a tracción del hormigón; b) Equilibrio de fuerzas planteado para tener en cuenta la interacción flexión-cortante en zapatas

En el caso particular de encepados sobre pilotes, el campo de compresiones también se halla concentrado bajo el pilar en un estado de compresión triaxial, pero la tracción resistida por el armado en la base no es constante a lo largo del ancho, sino que depende de la concentración de armado dispuesto sobre las bandas. Además, en los encepados de tres pilotes, la armadura no es perpendicular a la sección considerada. Por ello, para la formulación del momento resistente se considera A_s como el área de armado total dispuesta perpendicular a la sección. La ecuación (6.13) permite calcular el momento resistente por unidad de longitud, m_R en encepados con armadura en bandas (A_{sB}) y secundaria horizontal (A_{sH}).

$$m_R = \frac{1}{B} \left[\bar{x} k_{cc} f_c \left(d - \frac{\bar{x}}{2} \right) \right] \quad (6.13)$$

siendo:

$$\bar{x} = \frac{A_s f_y}{k_{cc} f_c}$$

Los resultados de las curvas carga-rotación obtenidas según el LoA-III para cada ensayo se muestran en la Figura 6.17, Figura 6.18 y Figura 6.19. Como puede observarse en estas gráficas, la intersección entre la curva carga-rotación teórica (Ec. (6.9)) y el criterio de rotura propuesto por la CSCT (Ec. (6.6)) conduce a predicciones de la carga de rotura muy ajustadas, y además permite identificar si se trata de un fallo por punzonamiento o si éste se produce al alcanzar la resistencia a flexión del encepado (V_{flex}).

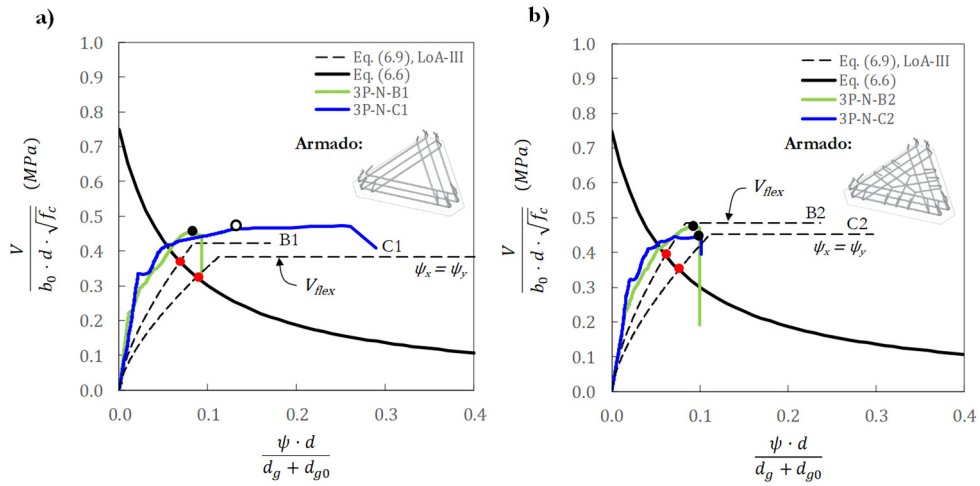


Figura 6.17 Curvas carga-rotación e intersección con el criterio de rotura (en valores medios), para encepados de tres pilotes solicitados por carga centrada
a) Armado tipo 1; b) Armado tipo 2

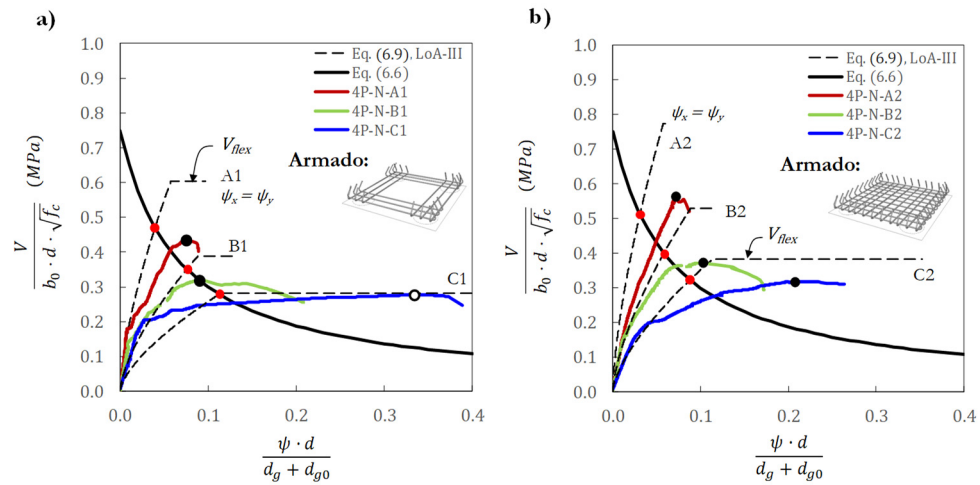


Figura 6.18 Curvas carga-rotación e intersección con el criterio de rotura (en valores medios), para encepados de cuatro pilotes solicitados por carga centrada
a) Armado tipo 1; b) Armado tipo 2

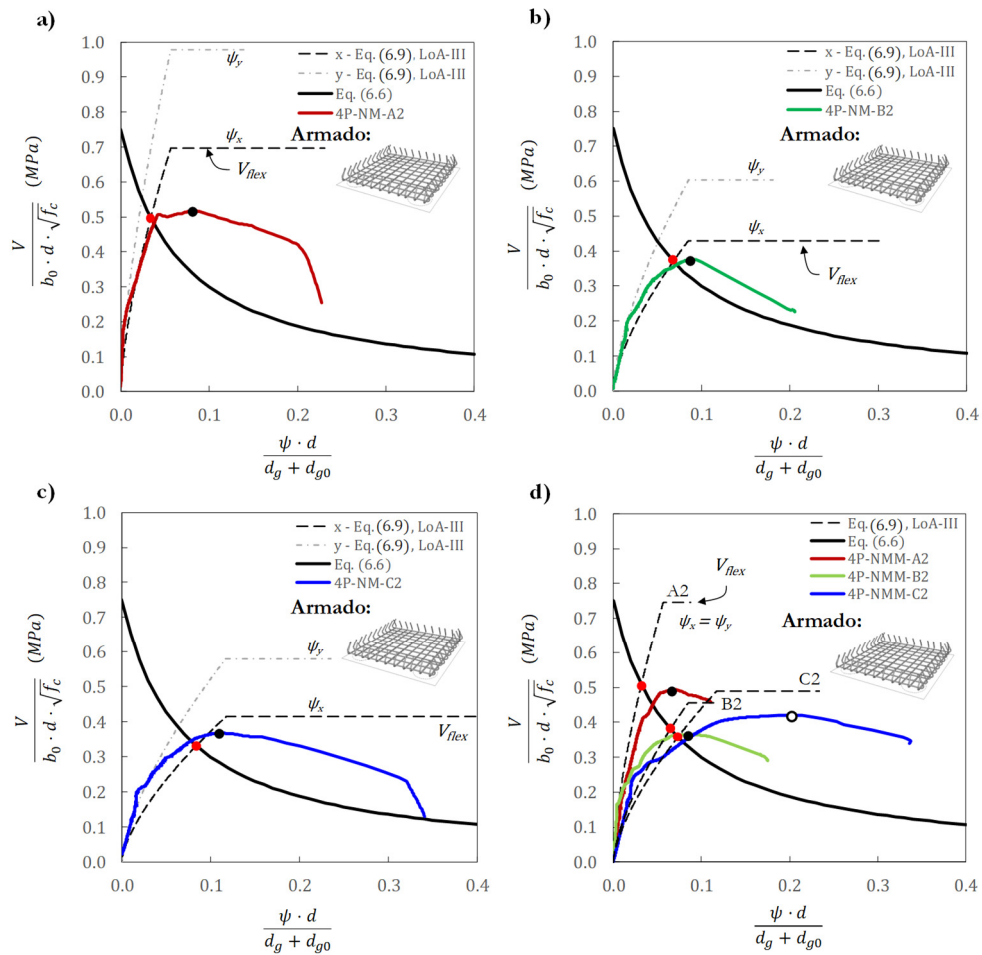


Figura 6.19 Curvas carga-rotación e intersección con el criterio de rotura (en valores medios), para encepados de cuatro pilotes solicitados por carga excéntrica
 a) Encepado tipo A ($w/d=1.16$, $e_x=0.15m$, $e_y=0m$); b) Encepado tipo B ($w/d=0.76$, $e_x=0.15m$, $e_y=0m$); c) Encepado tipo C ($w/d=0.56$, $e_x=0.15m$, $e_y=0m$); d) Encepados tipo A,B y C ($e_x=0.11m$, $e_y=0.11m$)

6.2.3. Contribución resistente de la armadura de punzonamiento

La resistencia que proporciona la armadura de punzonamiento viene dada en el CM-2010 por la Ec. (6.13). La tensión que se activa en la armadura (σ_{swd}) es función de la rotación del elemento (ψ), por lo que ambas irán incrementándose a medida que aumenta la carga aplicada hasta que los cercos alcancen la tensión de plastificación (f_{ywd}).

$$V_{Rs} = \sum A_{sw} k_e \sigma_{swd} \quad (6.14)$$

siendo

$$\sigma_{swd} = \frac{E_s \psi}{6} \left(1 + \frac{f_{bd}}{f_{ywd}} \cdot \frac{d}{\phi_w} \right) \leq f_{ywd}$$

El área de armadura (A_{sw}) que se considera efectiva es aquella que se encuentra correctamente anclada e intersecta la superficie de punzonamiento, zona que el CM-2010 define entre $0.35d$ y d .

Como tanto la resistencia del hormigón como la proporcionada por la armadura de punzonamiento son función de la rotación del encepado, se comparan en la Figura 6.20 a Figura 6.22 las curvas carga-rotación experimental y teórica de estos elementos, junto con el criterio de rotura incorporando la contribución de los cercos.

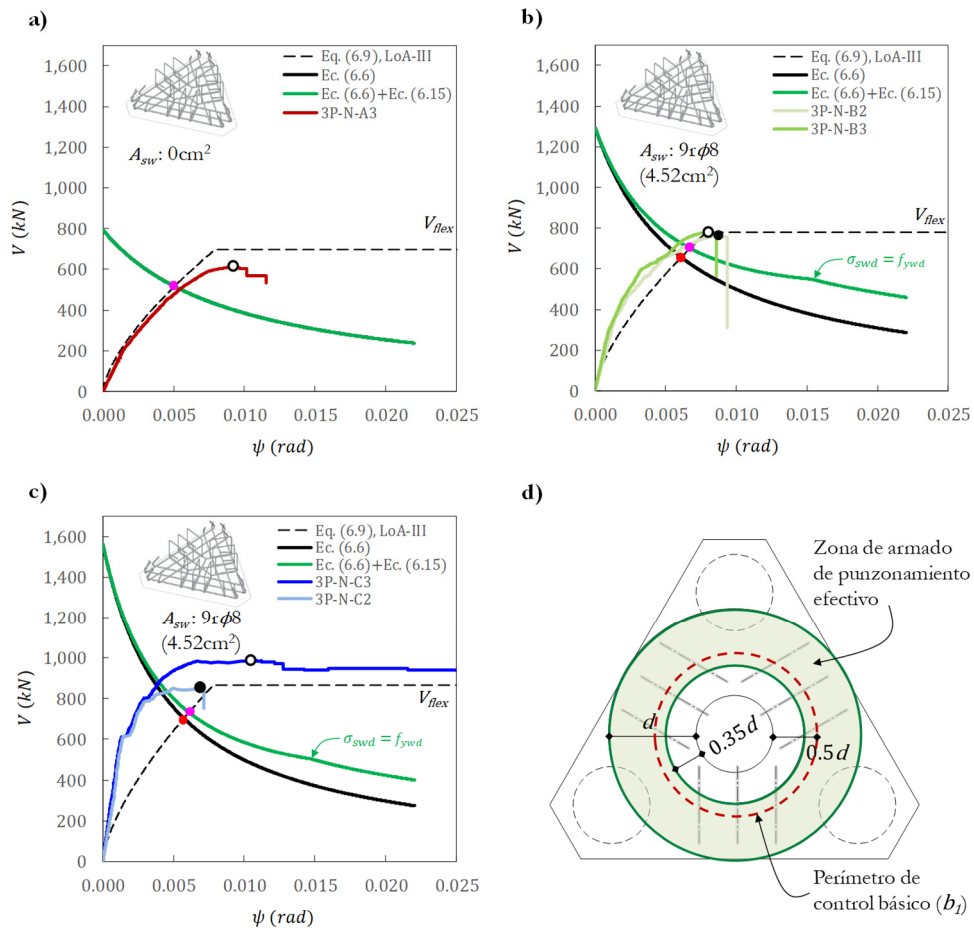


Figura 6.20 Comparación de las curvas carga-rotación, de encepados de tres pilotes bajo carga centrada, al añadir sin armado de punzamiento
a) 3P-N-A3; b) 3P-N-B2,B3; c) 3P-N-C2,C3; d) Zona de armado de punzamiento efectivo

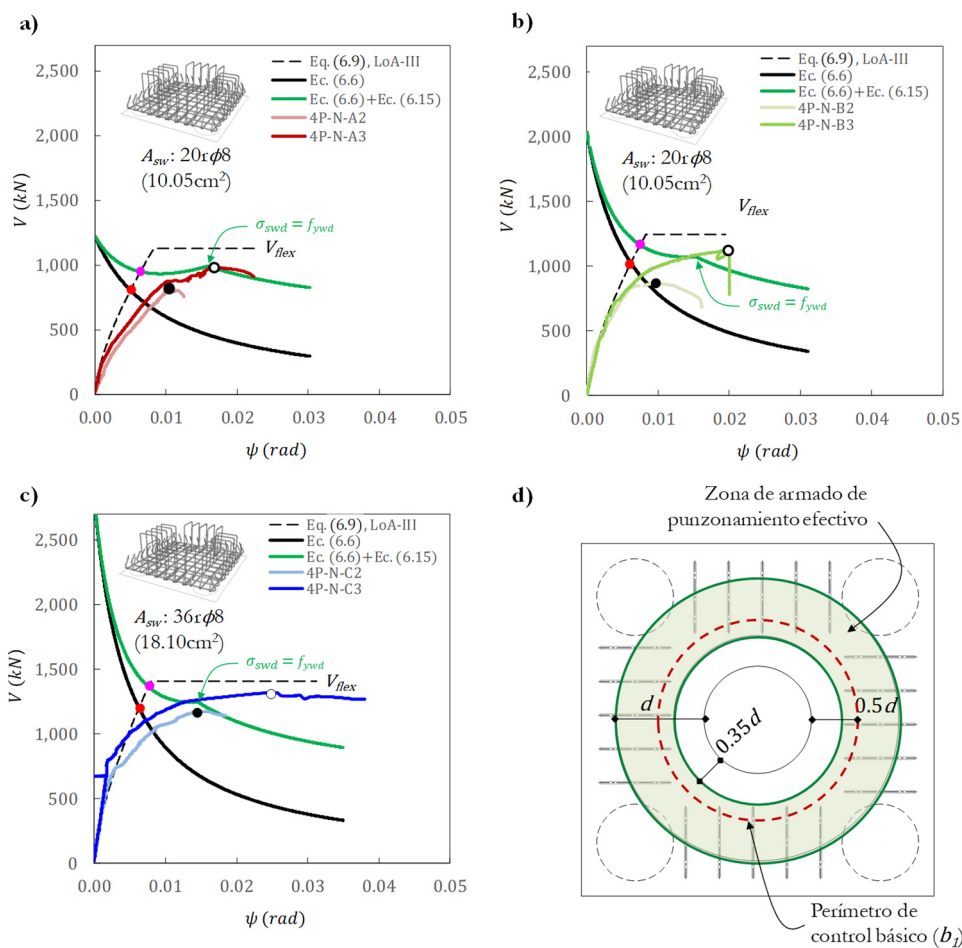


Figura 6.21 Comparación de las curvas carga-rotación, de encepados de cuatro pilotes bajo carga centrada, al añadir sin armado de punzonamiento
a) 4P-N-A2,A3; b) 4P-N-B2,B3; c) 4P-N-C2,C3; d) Zona de armado de punzonamiento efectivo

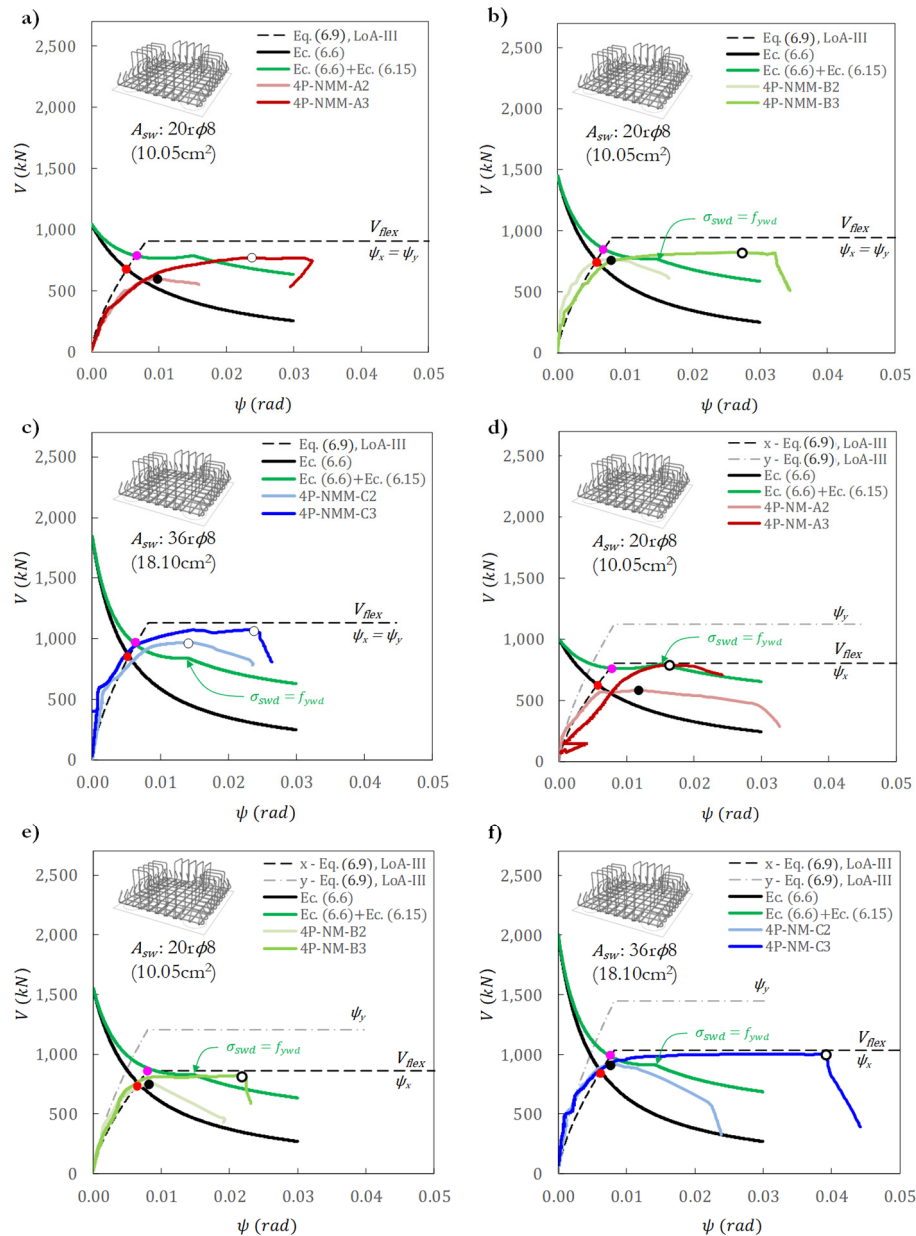


Figura 6.22 Comparación de las curvas carga-rotación, de encepados de cuatro pilotes solicitados por carga excéntrica, al añadir armado de punzonamiento
 a) 4P-NMM-A2,A3; b) 4P-NMM-B2,B3; c) 4P-NMM-C2,C3; d) 4P-NM-A2,A3; e) 4P-NM-B2,B3; f) 4P-NM-C2,C3

6.2.4. Contraste de resultados con los datos experimentales

Una vez revisadas las particularidades en la aplicación de la formulación de punzonamiento propuesta por el CM-2010, se contrastan los resultados experimentales con las predicciones de resistencia dadas por los niveles de aproximación LoA-II y LoA-III para el cálculo de la rotación del encepado.

La comparación de la carga máxima experimental ($V_{u,e}$) con la resistencia teórica ($V_{Rd,cs,CM}$), se presenta en la Tabla 6.24 para los encepados de cuatro pilotes y en la Tabla 6.25 para los de tres pilotes. Estos resultados se resumen gráficamente en la Figura 6.23.

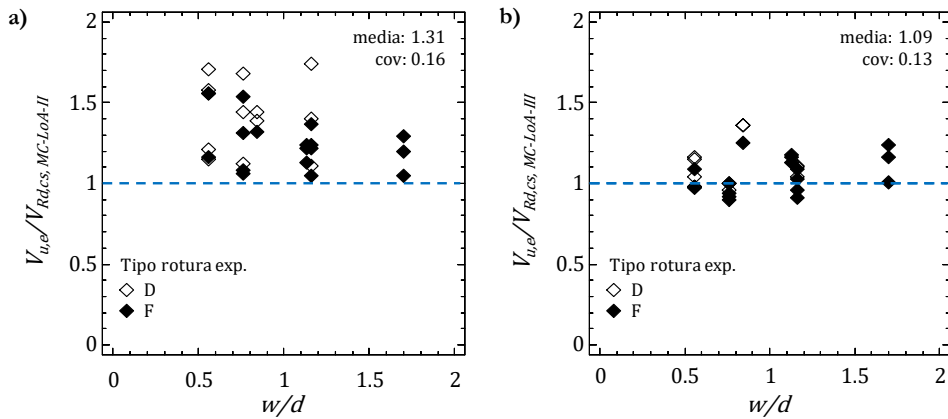


Figura 6.23 Comparación de la carga máxima experimental ($V_{u,e}$) con la resistencia predicha por la formulación de punzonamiento del CM-2010: a) LoA-II; b) LoA-III

Tabla 6.24 Comparación de la carga máxima experimental frente a la resistencia predicha por la formulación de punzonamiento del CM-2010, en los encepados de cuatro pilotes

| Especimen | V_{ue} | Modo de fallo | b_0/b_1 | k_x, k_y | $V_{ue}/V_{Rd,cs,MC}$ | |
|-----------|----------|------------------------------------|-----------|------------|-----------------------|--------|
| | | | | | LoA-III | LoA-II |
| 4P-N-A1 | 605.6 | F-Y _B | 0.92 | 10.0, 10.0 | 1.05 | 0.91 |
| 4P-N-A2 | 813.4 | F-Y _{BH} | 0.92 | 10.0, 10.0 | 1.24 | 1.09 |
| 4P-N-A3 | 973.2 | D-Y _{BHV} | 0.92 | 10.0, 10.0 | 1.11 | 1.11 |
| 4P-N-B1 | 744.6 | F-Y _B | 0.84 | 10.0, 10.0 | 1.06 | 0.90 |
| 4P-N-B2 | 861.0 | F-Y _B | 0.84 | 10.0, 10.0 | 1.08 | 0.92 |
| 4P-N-B3 | 1116.2 | D-Y _{BHV} | 0.84 | 10.0, 10.0 | 1.12 (f) | 1.00 |
| 4P-N-C1 | 942.6 | D-Y _B | 0.70 | 10.0, 10.0 | 1.21 (f) | 0.98 |
| 4P-N-C2 | 1159.0 | F-Y _B | 0.70 | 10.0, 10.0 | 1.16 | 0.97 |
| 4P-N-C3 | 1302.4 | D-Y _{BHV} | 0.70 | 10.0, 10.0 | 1.15 (f) | 0.98 |
| 4P-NMM-A2 | 586.2 | F-Y _B | 0.69 | 7.8, 7.8 | 1.22 | 0.96 |
| 4P-NMM-A3 | 761.5 | D-Y _{BHV} | 0.69 | 7.8, 7.8 | 1.40 (f) | 1.04 |
| 4P-NMM-B2 | 751.6 | F-Y _{BH} | 0.61 | 7.8, 7.8 | 1.31 (f) | 0.94 |
| 4P-NMM-B3 | 814.8 | D-Y _{BHV} | 0.61 | 7.8, 7.8 | 1.44 (f) | 1.00 |
| 4P-NMM-C2 | 955.2 | D-Y _{BH} | 0.49 | 7.8, 7.8 | 1.58 | 1.16 |
| 4P-NMM-C3 | 1061.1 | D-Y _{BHV} | 0.49 | 7.8, 7.8 | 1.56 (f) | 1.15 |
| 4P-NM-A2 | 575.4 | F-Y _{BH} | 0.74 | 7.1, 10.0 | 1.37 | 1.03 |
| 4P-NM-A3 | 779.8 | () ^b -Y _{BHV} | 0.74 | 7.1, 10.0 | 1.74 (f) | 1.10 |
| 4P-NM-B2 | 743.7 | F-Y _{BH} | 0.66 | 7.1, 10.0 | 1.54 (f) | 1.00 |
| 4P-NM-B3 | 809.5 | D-Y _{BHV} | 0.66 | 7.1, 10.0 | 1.68 (f) | 0.96 |
| 4P-NM-C2 | 900.8 | F-Y _B | 0.54 | 7.1, 10.0 | 1.56 (f) | 1.09 |
| 4P-NM-C3 | 989.2 | D-Y _{BHV} | 0.54 | 7.1, 10.0 | 1.71 (f) | 1.04 |
| MEDIA | | | | | 1.35 | 1.02 |
| COV | | | | | 0.17 | 0.07 |

V_{ue} : carga máxima experimental; Modo de fallo: F-frágil, D-dúctil; Y_B-plastificación de la armadura principal en bandas; Y_H-plastificación de la armadura secundaria horizontal; Y_V-plastificación de la armadura secundaria vertical en cercos; b_0/b_1 : relación entre el perímetro de control de cortante y el perímetro de control básico situado a $0.5d$; k_x, k_y : coeficientes que relacionan el valor del momento flector actuante (m_{sx}, m_{sy}) con la carga aplicada (V_{nex}); $V_{Rd,cs}$: resistencia a punzonamiento del encepado. Si está limitada por la resistencia a flexión de la sección (V_{flex}) se indica como (f); LoA-II: Nivel de aproximación II; LoA-III: Nivel de Aproximación III

Tabla 6.25 Comparación de la carga máxima experimental frente a la resistencia predicha por la formulación de punzonamiento del CM-2010, en los encepados de tres pilotes

| Especímen | $V_{u,e}$ | Modo de fallo | b_0/b_1 | k_x, k_y | $V_{u,e}/V_{Rd,cs,MC}$ | |
|-----------|-----------|--------------------|-----------|------------|------------------------|---------|
| | | | | | LoA-II | LoA-III |
| 3P-N-A1 | 605.6 | F-Y _B | 0.81 | -, 6.7 | 1.05 | 1.06 |
| 3P-N-A2 | 813.4 | F-Y _{BH} | 0.81 | -, 6.7 | 1.17 | 1.18 |
| 3P-N-A3 | 973.2 | D-Y _{BHV} | 0.81 | -, 6.7 | 1.26 | 1.27 |
| 3P-N-B1 | 744.6 | F-Y _B | 0.67 | -, 6.7 | 1.22 | 1.23 |
| 3P-N-B2 | 861.0 | F-Y _B | 0.67 | -, 6.7 | 1.20 | 1.21 |
| 3P-N-B3 | 1116.2 | D-Y _{BHV} | 0.67 | -, 6.7 | 1.11 | 1.15 |
| 3P-N-C1 | 942.6 | D-Y _B | 0.49 | -, 6.7 | 1.44 | 1.46 |
| 3P-N-C2 | 1159.0 | F-Y _B | 0.49 | -, 6.7 | 1.26 | 1.27 |
| 3P-N-C3 | 1302.4 | D-Y _{BHV} | 0.49 | -, 6.7 | 1.34 | 1.39 |
| MEDIA | | | | | 1.23 | 1.25 |
| COV | | | | | 0.09 | 0.09 |

$V_{u,e}$: carga máxima experimental; Modo de fallo: F-frágil, D-dúctil; Y_B-plastificación de la armadura principal en bandas; Y_H-plastificación de la armadura secundaria horizontal; Y_V-plastificación de la armadura secundaria vertical en cercos; b_0/b_1 : relación entre el perímetro de control de cortante y el perímetro de control básico situado a $0.5d$; k_x, k_y : coeficientes que relacionan el valor del momento flector actuante (m_{sx}, m_{sy}) con la carga aplicada (V_{flex}); $V_{Rd,cs}$: resistencia a punzonamiento del encepado. Si está limitada por la resistencia a flexión de la sección se indica como (f); LoA-II: Nivel de aproximación II; LoA-III: Nivel de Aproximación III

La formulación de punzonamiento dada por el CM-2010, al estar basada en el modelo mecánico de la CSCT, permite definir un único mecanismo de fallo, que en el caso de la serie experimental analizada es el punzonamiento del encepado entorno al pilar (según la cinemática expuesta en la Figura 6.12b). Además, la determinación de la curva carga-rotación en los niveles de aproximación II y III lleva implícita la determinación de la resistencia a flexión del encepado (V_{flex}), por lo que también se tiene en cuenta esta limitación. Al plasmar gráficamente los resultados de la comparación entre la carga máxima experimental y la predicción de resistencia dada por el CM-2010 (Figura 6.23), se confirma en general el mejor ajuste dado por el LoA-III (media: 1.09 cov: 0.13) frente al obtenido con la formulación del LoA-II (media: 1.31, cov: 0.16). Las fórmulas simplificadas del LoA-II proporcionan predicciones de la carga de rotura precisas para los casos de carga centrada en encepados de tres y cuatro pilotes (media: 1.18, cov: 0.09). Pero las estimaciones resultan más conservadoras al aplicarse la carga con excentricidad (media: 1.51, cov: 0.10). Por otra par-

te, los resultados obtenidos con las fórmulas del LoA-III revelan que en general funcionan mejor para los encepados de cuatro pilotes (media: 1.02, cov: 0.07), que para los de tres (media: 1.25, cov: 0.09). Estos últimos, por su geometría, distan más de la respuesta habitual de una losa regular, y probablemente sería necesario revisar la definición de la curva carga-rotación para mejorar el ajuste (ver Figura 6.20).

6.3. Análisis de los resultados

A partir de los resultados de las estimaciones de carga obtenidas por las tres normativas analizadas (EC-2, ACI 318-14 y MC-2010), se estudia en este apartado si estas captan la influencia de los parámetros que han resultado significativos en la campaña experimental: la esbeltez del encepado (relación w/d), la armadura secundaria y la excentricidad de carga.

Este análisis se realiza con los resultados presentados en la Figura 6.6, Figura 6.11 y Figura 6.23b, en las que únicamente se han considerado los modos de fallo de flexión y punzonamiento entorno al pilar, en vez de todos los indicados por las guías de diseño. Los dos modos de fallo seleccionados se corresponden con las observaciones experimentales y por tanto resulta coherente descartar los demás.

Para detectar la influencia de los parámetros de estudio, cada una de las figuras anteriores se desglosa en cinco gráficos en función del tipo de solicitación (carga centrada y excéntrica) y del tipo de armado (armado tipo 1, tipo 2 y tipo3).

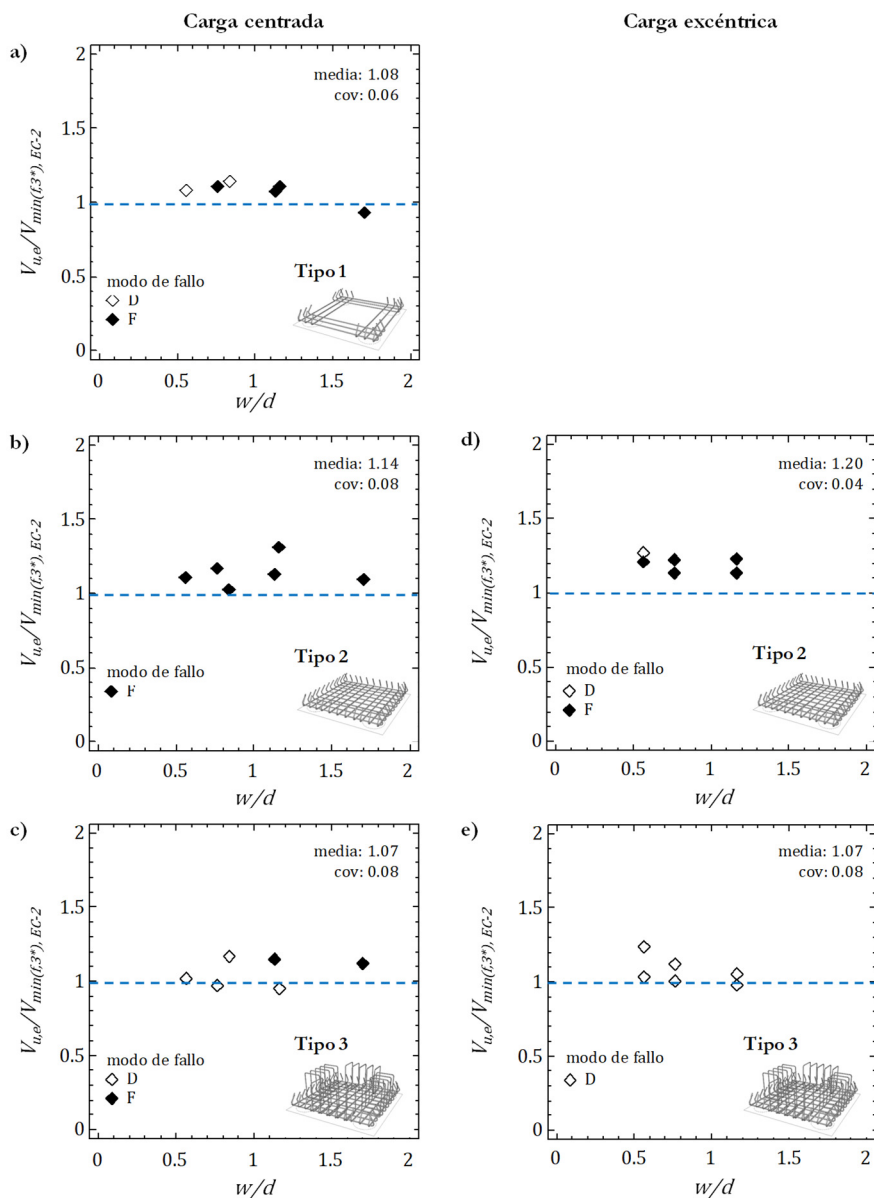


Figura 6.24 Comparación de la carga máxima experimental ($V_{u,e}$) con la resistencia predicha por los métodos de flexión y punzonamiento del EC-2 considerando el coeficiente de mejora del hormigón

a) Carga centrada, armado tipo 1; b) Centrada, armado tipo 2; c) Centrada, armado tipo 3;
d) Excéntrica, armado tipo 2; e) Excéntrica, armado tipo 3

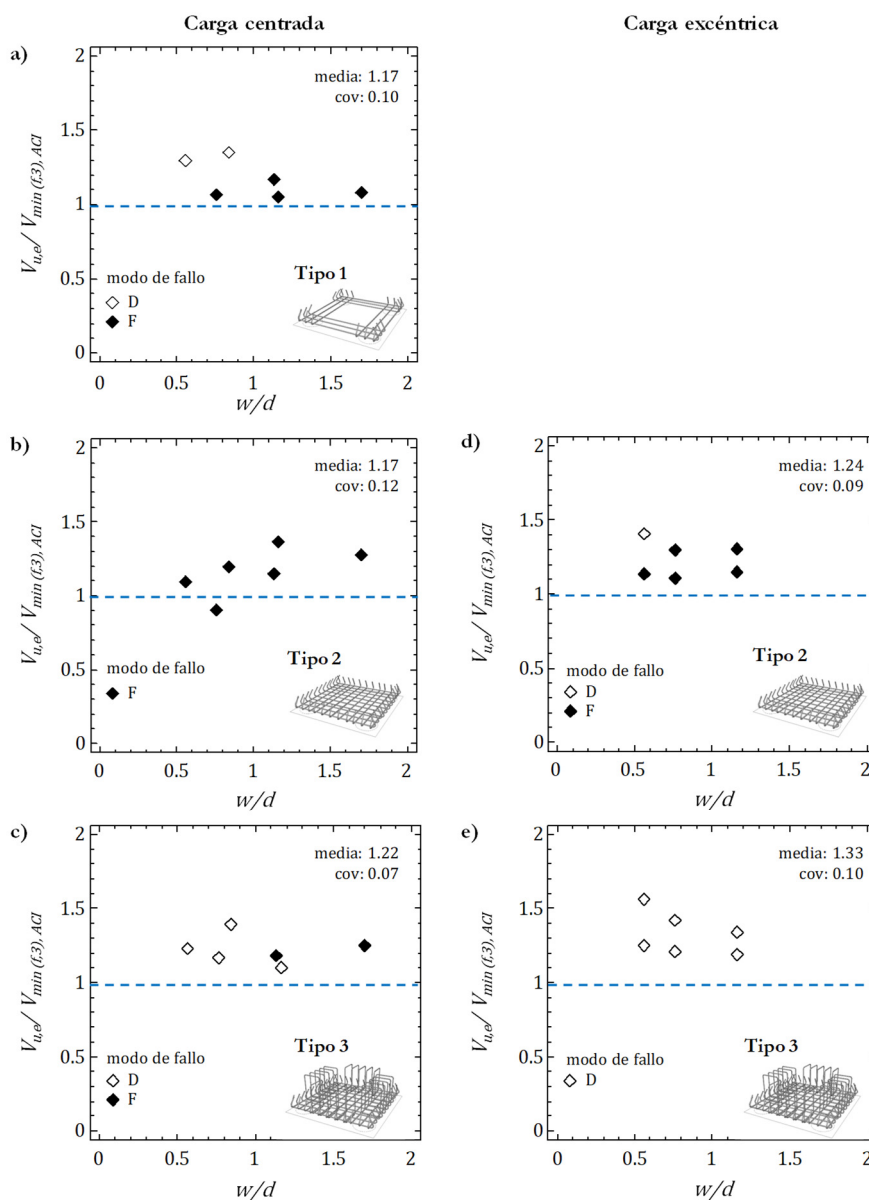


Figura 6.25 Comparación de la carga máxima experimental ($V_{u,e}$) con la resistencia predicha por los métodos de flexión y punzonamiento del ACI 318-14
 a) Carga centrada, armado tipo 1; b) Centrada, armado tipo 2; c) Centrada, armado tipo 3;
 d) Excéntrica, armado tipo 2; e) Excéntrica, armado tipo 3

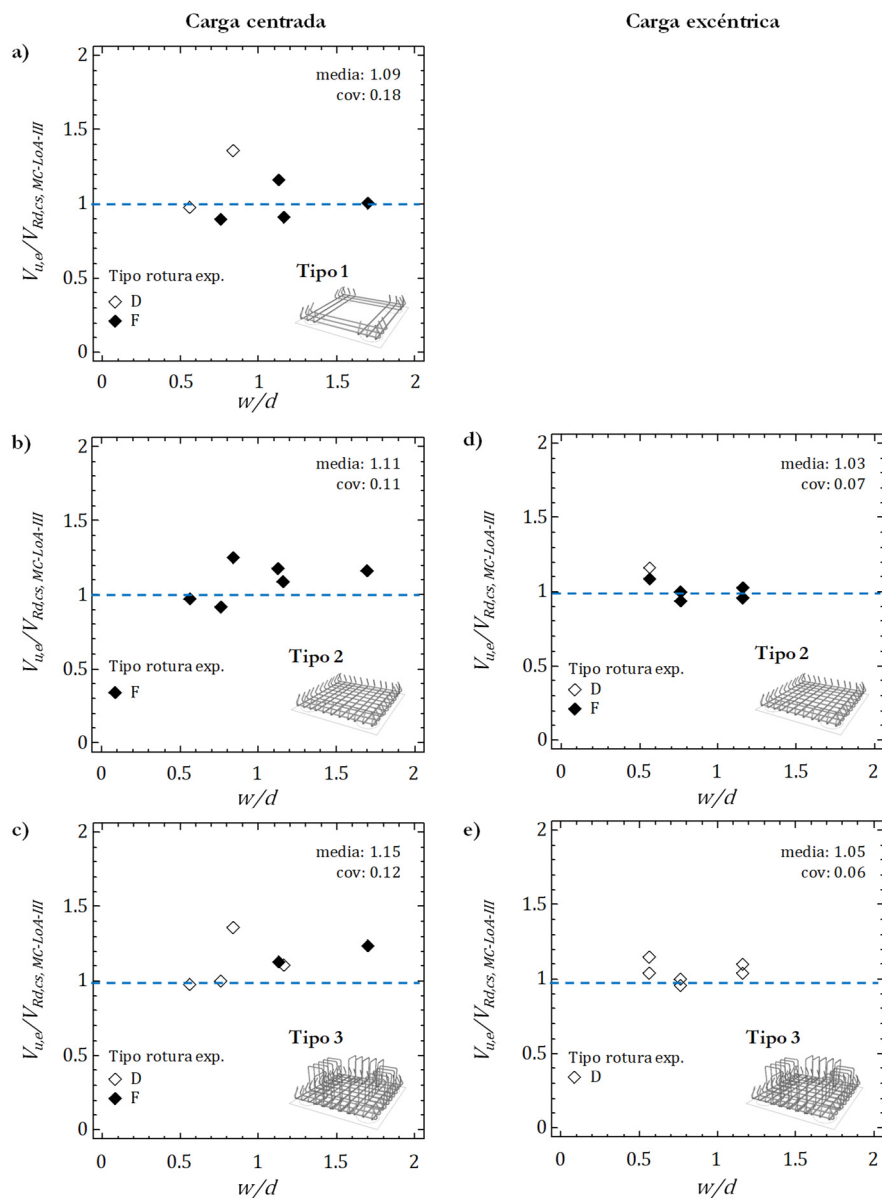


Figura 6.26 Comparación de la carga máxima experimental ($V_{u,e}$) con la resistencia predicha por la formulación de punzonamiento del CM-2010
a) Carga centrada, armado tipo 1; b) Centrada, armado tipo 2; c) Centrada, armado tipo 3;
d) Excéntrica, armado tipo 2; e) Excéntrica, armado tipo 3

6.3.1. Relación vuelo-canto

Los gráficos de la Figura 6.24 indican que la relación entre el valor de la carga máxima alcanzada durante el ensayo y la que predice el EC-2 tiene una línea de tendencia prácticamente horizontal independientemente del tipo de armado y de que la carga sea aplicada con excentricidad. Por tanto, la formulación del EC-2 capta correctamente la influencia de la esbeltez del encepado (medida como la relación vuelo-canto w/d), pero para ello requiere adoptar hipótesis complementarias [2,49,50] que permitan considerar un factor de mejora del hormigón (Ω en la Tabla 6.6 y Tabla 6.7) aplicado al ancho de los pilotes (w_{eff}) donde el armado se encuentra completamente anclado.

Observando las líneas de tendencia de los gráficos de la Figura 6.25, se puede concluir que las predicciones de resistencia dadas por el ACI 318-14 también parecen captar correctamente esta relación vuelo-canto. Sin embargo, la carga está limitada en la mayoría de los casos por la resistencia a flexión de los encepados, lo cual no representa el modo de fallo observado experimentalmente en encepados sin armadura de punzonamiento: rotura frágil tras la plastificación de las armaduras horizontales. La resistencia a flexión resulta limitante porque la formulación de punzonamiento sobreestima la resistencia de los especímenes que se hallan en el rango ($0.5 < w/d \leq 1$), para los que no resulta aplicable la *Special Investigation* del CRSI [53] (sólo válida para encepados muy rígidos ($w/d \leq 0.5$)).

En cuanto a la formulación del CM-2010, la Figura 6.26 refleja de forma resumida que se capta correctamente el efecto de la esbeltez de los encepados de la serie experimental analizada. Para ello ha sido necesario incluir la limitación $r_s/d \geq 2.5$ propuesta por Muttoni et al. [67] para elementos compactos (rígidos) y determinar el perímetro de cortante (b_0) por el método general propuesto por Vaz Rodrigues et al. [69]. En caso de aplicar la formulación general sin estas consideraciones, la carga de punzonamiento estimada resultaría insegura para los encepados más rígidos ($w/d < 1$, tipos B y C).

6.3.2. Armadura secundaria horizontal

Las formulaciones consideradas para determinar la resistencia a flexión del encepado (V_{flex}) tienen en cuenta la contribución de toda la armadura horizontal inferior dispuesta en el ancho del encepado. Por tanto, en los casos en los que esta comprobación resulta limitante, se consigue captar la mayor capacidad que presentan los encepados a los que se ha añadido armadura secundaria horizon-

tal (Tipo 2) frente a los que únicamente tienen armadura concentrada en bandas (Tipo 1).

Por el contrario, no todas las formulaciones de punzonamiento revisadas consideran de la misma forma la influencia de la cuantía de armadura horizontal. El EC-2 tiene en cuenta su efecto al incluir la cuantía de armadura traccionada (ρ) en el cálculo de la resistencia a punzonamiento ($V_{Rd,c}$) del elemento. En la Figura 6.24 a) y b), se pueden comparar las predicciones de resistencia para especímenes del mismo canto con distinta cuantía y configuración de armado horizontal (Tipo 1 y 2). Se detecta que las predicciones resultan ligeramente más conservadoras en el caso de añadir armadura secundaria horizontal.

La formulación de punzonamiento del ACI 318-14 no tiene en cuenta la cuantía de armado, pero esto no se traduce en diferencias significativas entre las gráficas a) y b) de la Figura 6.25 porque la resistencia a flexión resulta limitante para todos los encepados cuyo $w/d < 1$. Sólo entre los especímenes de tipo A ($w/d > 1$) limita el fallo por punzonamiento y la comparación entre los ratios $V_{u,e}/V_{Rd,cs(3)}$ evidencia predicciones más conservadoras para los especímenes con armadura secundaria (4P-NA1: 1.05 vs. 4P-N-A2: 1.37, 3P-N-A1: 1.08 vs. 3P-N-A2: 1.28, valores extraídos de la Tabla 6.22 y Tabla 6.23).

La formulación de punzonamiento del CM-2010 permite considerar el efecto de la cuantía siempre que se emplee un nivel de aproximación igual o superior al II en la determinación de la curva carga-rotación. El área de armado dispuesto influye en el valor del momento resistente (m_R), que interviene en el cálculo de la rotación (ψ según la Ec. (6.9)). Al comparar la media y coeficiente de variación de las gráficas a) y b) de la Figura 6.26 se confirma que este parámetro ha sido correctamente considerado al emplear el LoA-III. Las predicciones ($V_{u,e}/V_{Rd,cs,MC}$ de la Tabla 6.24 y Tabla 6.25) son algo más conservadoras al añadir armadura secundaria horizontal entre los especímenes de tipo A ($w/d > 1$): 4P-NA1: 0.91 vs. 4P-N-A2: 1.09, 3P-NA1: 1.06 vs. 3P-N-A2: 1.18. Y únicamente en el caso de los encepados de tres pilotes de tipo C se tiene una predicción más conservadora en el caso del armado simple en bandas (3P-N-C1: 1.46 vs. 3P-N-C2: 1.27).

6.3.3. Armadura secundaria vertical

Sólo es posible valorar la correcta consideración de la armadura secundaria vertical en los casos en los que resulta limitante la comprobación de punzonamiento, para las formulaciones de EC-2 y ACI 318-14. Esto sucede para algu-

nos de los casos de encepados de menor canto (EC-2: 3P-N-A3, 3P-N-B3, 4P-N-A3 y 4P-NM-A3; ACI 318-14: 3P-N-A3, 4P-N-A3).

En el caso del EC-2, al comparar el valor de las ratios $V_{u,e}/V_{Rd,cs(3^*)}$ (ver Tabla 6.12 y Tabla 6.13) entre los citados especímenes y sus equivalentes sin armadura vertical (3P-N-A2, 3P-N-B2, , 4P-N-A2 y 4P-NM-A2) se detecta que la contribución de los cercos está sobreestimada. Tal vez el criterio de definición del armado de cortante efectivo (A_{sw} situada en el 75% central de en un perímetro situado a $2d$), no sea adecuado para el caso de encepados rígidos en los que no llega a formarse un cono de punzonamiento tan inclinado. La formulación del ACI 318-14 sólo contabilizan como efectivas las ramas dispuestas dentro de un canto útil desde el perímetro de la columna, lo que se traduce en predicciones más ajustadas en todos los casos (ver ratios $V_{u,e}/V_{Rd,cs(3)}$ en la Tabla 6.22 y Tabla 6.23).

La formulación del CM-2010 permite visualizar la contribución de la armadura de punzonamiento mediante las curvas carga-rotación y su intersección con el criterio de rotura. Además de cuantificar el incremento resistente, esta formulación permite identificar el tipo de fallo esperable (frágil o dúctil). Las gráficas de la Figura 6.20 a Figura 6.22 muestran el cambio de un comportamiento frágil a una respuesta más dúctil al añadir armadura secundaria vertical en cercos. Esto puede deberse al efecto de esta armadura en la propia curva del criterio de rotura, la cual presenta un tramo prácticamente horizontal previo a la plastificación del armado de punzonamiento (punto $\sigma_{swd}=f_{ywd}$ en las gráficas). Este comportamiento se observa en los especímenes 4P-N-A3, 4P-N-B3, 4P-NMM-A3, 4P-NMM-B3 y 4P-NM-A3. Pero el cambio a un comportamiento dúctil también puede deberse a que, al añadir los cercos, el encepado puede llegar a alcanzar su resistencia a flexión; se observa en los encepados 4P-N-C3, 4P-NMM-C3, 4P-NM-B3 y 4P-NM-C3 que la curva experimental queda próxima al límite V_{flex} .

6.3.4. Excentricidad

En las formulaciones de punzonamiento de EC-2 y ACI 318-14, el incremento de tensiones tangenciales debido a la excentricidad de la carga en el soporte se tiene en cuenta mediante el coeficiente de excentricidad β , que amplifica la máxima tensión tangencial en el perímetro de control. Este coeficiente se obtiene suponiendo una distribución plástica de las tensiones en el perímetro, según EC-2; mientras que ACI 318-14 plantea una distribución elástica de tensiones.

Como según EC-2, el fallo por punzonamiento resultó limitante en los especímenes 4P-NMM-A2, B2, C2 y 4P-NM-A2, B2, C2. La comparación entre las gráficas b) y d) de la Figura 6.24 (y las ratios $V_{u,e}/V_{Rd,cs(3*)}$ en la Tabla 6.12) revela que se ha captado adecuadamente la influencia de la excentricidad.

Tal y como se ha comentado anteriormente, según ACI 318-14, el fallo por punzonamiento sólo resultó limitante en los especímenes menos rígidos ($w/d < 1$), 4P-NMM-A2 y 4P-NM-A2. Aunque son pocos casos, comparando las ratios $V_{u,e}/V_{Rd,cs(3)}$ en la Tabla 6.22, de ambos especímenes con el 4P-N-A2, se podría concluir que el coeficiente β ha permitido captar correctamente la influencia de la excentricidad en estos casos. Para el resto de los especímenes, cuya resistencia resulta limitada por flexión, la influencia de la excentricidad de la carga se ha tenido en cuenta considerando el incremento de tracción en la armadura debido a la existencia de un momento torsor adicional. Comparando las de la Figura 6.25 se puede concluir que en general la formulación del ACI 318-14 considera adecuadamente la influencia de la excentricidad, independientemente de la variación de los otros parámetros.

Según la formulación del CM-2010, la excentricidad de la carga aplicada influye en la respuesta carga-rotación de los encepados. El momento solicitante medio resulta diferente en cada dirección (m_{sx} , m_{sy}) y esto se traduce en dos curvas carga-rotación diferentes ($V-\psi_x$, $V-\psi_y$). El CM-2010 recomienda, de forma conservadora, determinar la resistencia a punzonamiento a partir de la curva carga-rotación en la dirección de la máxima rotación, $\psi = \max(\psi_x, \psi_y)$. En realidad, aquellos tramos del perímetro de control próximos a la zona de mayores rotaciones alcanzarán antes su resistencia última, mientras el resto de perímetro todavía conserva una resistencia residual. Según esta hipótesis, sería de esperar un cierto grado de redistribución de la carga de punzonamiento previo al fallo, según se describe en el artículo sobre punzonamiento asimétrico de losas de Sagaseta et al. [72]. Pero en los ensayos experimentales realizados no es posible registrar tal redistribución debido a la propia configuración del sistema de carga. Este ha sido programado para asegurar una excentricidad de la carga constante durante todo el ensayo, por lo que la carga total aplicada queda limitada por el fallo del pilote más cargado. Al comparar las curvas carga-rotación teóricas con las experimentales, en la Figura 6.19, se observa que efectivamente la mayor rotación (ψ_x) es la que acota la resistencia a punzonamiento, sin que se registre redistribución de la carga.

Además de su influencia en las curvas carga-rotación, la excentricidad de la carga se traduce en una mayor concentración de tensiones en la dirección en la

que se aplica (mayor $v_{perp,d,max}$). En los especímenes solicitados por carga excéntrica, se aplicó la misma excentricidad total ($e_u=0.15\text{m}$), aunque variando su dirección: $e_x=e_y=0.11\text{m}$ en la serie 4P-NMM; $e_x=0.15\text{m}$, $e_y=0\text{m}$ en la serie 4P-NM). El análisis numérico evidenció mayor concentración de tensiones en los especímenes de la serie 4P-NMM, lo que se traduce en un menor perímetro de control de cortante (b_0), según la Ec. (6.8).

Los gráficos d) y e) de la Figura 6.26 muestran predicciones de resistencia muy ajustadas a los registros experimentales, por lo que se puede afirmar que la formulación del CM-2010 permite considerar adecuadamente la influencia de la excentricidad y de los anteriores parámetros analizados.

*Estudio de encepados de tres y cuatro pilotes solicitados por cargas centradas y excéntricas:
análisis experimental y de las formulaciones de diseño*

Chapter 7

Summary, conclusions and future work

7.1. Summary

This section summarizes the work carried out by the author to develop this research regarding the structural response of three and four-pile caps in different loading scenarios and various reinforcement arrangements. The results and main conclusions of this work, as well as some suggestions for future work, are described in the following sections.

An experimental campaign on 30 full-scale pile caps has been conducted, grouped in 4 series: series 1, three-pile caps subjected to centred load; series 2, four-pile caps subjected to centred load; series 3, four-pile caps subjected to biaxial bending; series 4, four-pile caps subjected to uniaxial bending.

With the aim of assessing the influence of the shear span-depth ratio and secondary reinforcement on pile cap strength, each series was defined by combinations of three different depths (25, 35 and 45 cm) and three reinforcement layouts: bunched reinforcement, bunched in addition with distributed reinforcement and finally, bunched in addition with distributed and vertical secondary reinforcement in stirrups. The shear-span ratio ranges from 0.56 to 1.10 for the four-pile caps and from 0.84 to 1.68 for the three-pile caps.

The structural response is studied with the experimental results: load-displacement curves, maximum load, yielding load and cracking pattern. Based on these observations, up to four different failure modes are identified, depending on the type and amount of reinforcement.

Two different approaches for the analysis of these results are considered. On the one hand, a unified STM formulation is presented, valid for eccentric loads, which considers the strength contribution of the horizontal and vertical secondary reinforcement. This model takes into consideration the location of the upper node and the stress check-up in struts and lower nodal zones.

On the other hand, structural codes like EC-2 and ACI 318 allow for the design of pile caps by sectional methods - assessing flexure, shear and punching capacities. The goodness of structural codes to predict the strength and mode of failure of the 30 specimens has been evaluated. The MC-2010 punching formulation for flat slabs, based on the Critical Shear Crack Theory, is here extended to analyse the experimental series of pile caps.

7.2. Conclusions

A summary of the conclusions drawn from this work is given in this section.

7.2.1. *Conclusions derived from the current state of the art*

- Experimental tests on three and four-pile caps focus mostly on very deep pile ($0.25 < w/d \leq 0.85$), to prove the suitability of the strut-and-tie models (STM) versus the sectional approaches. However, rules of pile spacing and cap thickness used in practice lead to many cases where the slenderness falls in the transition between deep and slender cases ($0.5 < w/d \leq 2$). The experimental database must be completed with specimens within this range.
- Experimental tests with eccentric loads have not been found in the specialized literature. Besides, there are few experimental tests with vertical reinforcement along the sides of the pile caps which allow to describe in detail the contribution of this type of reinforcement to the pile cap strength.
- Brittle failures in pile caps have been registered, and have been usually identified either as punching failures or as splitting of the diagonal struts.
- The STMs proposed to date are simple three-dimensional trusses. Direct struts transfer the load from the column to the piles, and some horizontal ties connect the piles. The location of the upper node is generally set arbitrarily without addressing key variables such as shear span, depth or side of the column. The verification of nodal stresses are limited to simple checks on the load and bearing area or more complex formulations that become difficult to be generalized. Despite everything, the STM provides a safe procedure to determine the reinforcement area at the pile cap base.
- There are a few STM proposals for pile caps under eccentric load, but no experimental backup has been found in the literature.
- The international codes for concrete design (ACI 318, Eurocode 2) allow pile caps to be designed by STM or sectional approximations, considering the bending, shear and punching slab verifications. Both approaches require the support of technical publications or design guides to be extended to pile caps. Moreover, none of them have been exper-

imentally verified neither with eccentric load nor for a range of intermediate slenderness.

7.2.2. Conclusions derived from the experimental research

- Four different failure modes have been detected depending on the type and amount of reinforcement: i) brittle failure without yielding of reinforcement; ii) brittle failure after yielding of the main bunched reinforcement; iii) ductile failure after yielding of the horizontal reinforcement, that happens in pile caps with a low ratio of reinforcement that reached its flexural strength after large plastic deformations; iv) ductile failure after yielding of horizontal and vertical reinforcement, the latter confirms the activation of the stirrups in the failure mechanism.
- The specimens show a load increase from 4% to 54% beyond the yielding load until reaching the peak load. There is an internal stress redistribution that maximizes the pile cap strength.
- After vertical secondary reinforcement reaches the yield point, the pile cap strength is only increased up to a 10%. Generally, beyond the yield point, the specimen has already reached all the feasible resistant mechanisms and is not able to carry larger loads although shows a ductile response.
- Regarding the cracking pattern, first, vertical cracks in the four sides appeared due to the concentration of tensile forces in the bunched reinforcement. Close to the yielding threshold, some of the vertical cracks near the piles became diagonal. In some cases, typical of pile caps without distributed reinforcement (3P-N-A1, B1 and 4P-N-A1, B1) or loaded under uniaxial loads (4P-NM-A2, 4P-NM-B2), a sudden horizontal (suspension) crack crossed vertical cracks and caused the failure.
- As already described in the literature, the tests confirm that adding horizontal distributed reinforcement reduces the crack width of the underside and increases the pile cap strength.
- Adding secondary vertical reinforcement not only increases the pile cap strength, but also improves its ductility at failure.

- The influence of the shear span-depth ratio (w/d) and the contribution of the secondary reinforcement in those pile caps tested under eccentric loads, is similar to those tested under centred loads.

7.2.3. Conclusions derived from unified strut-and-tie model for pile caps under centred and eccentric loads

- Two strut-and-tie models are combined: one with direct struts that transfer the load from the column to the piles (MBT-1), and another that distributes the load from the column along the sides between piles (MBT-2). Both models share the main ties between piles. This proposal provides a rational tool to describe the flow of tensile forces and how each reinforcement group contributes to the total strength.
- The keys for the extension of the model of Meléndez, C. [17] to three and four-pile caps with stirrups and eccentric loads, are given. This model links the checks of crushing and splitting of the concrete with the area of the struts or nodal zones as a function of the strut inclination. By using a variable strut inclination, the increase in the carried load after the yielding can be explained.
- The unified STM proposal provides accurate predictions of the strength in 52 experimental tests regardless the slenderness of the pile cap (range $w/d = [0.25-1.70]$). Although somewhat more conservative predictions are obtained when eccentricity is applied to the load. The average value of $V_{u,e}/P_{MBT}$ for the 52 specimens is 1.13 with a coefficient of variation equal to 0.14.
- The unified STM proposal provides the same level of accuracy in the strength prediction of specimens without vertical shear reinforcement than with it. The implementation of MBT-2 proves to be satisfactory.
- The local failure criteria presented identifies the failure modes with reasonable accuracy for the considered specimens. The analysis of the failure curves helps to understand the change from brittle to ductile failures when adding vertical secondary reinforcement.

7.2.4. Conclusions derived from the comparison of experimental results with the calculated strength by sectional methods

- The predicted strength given by the sectional formulations of bending, shear and punching of EC-2 and ACI 318 is safe, however the failure modes do not always match with those experimentally observed for the 30 specimens studied.
- **EC-2** requires multiple hypotheses to apply its punching formulation to pile caps, such as considering the enhancement of an effective width of concrete. Comparison with the experimental tests confirms that the enhancement factor is efficient to capture the effect of slenderness on punching failures. The EC-2 formulation allows proper consideration of the horizontal secondary reinforcement on strength through the ratio of longitudinal tension reinforcement. However, EC-2 overestimates the contribution of the stirrups to the punching strength, leading to unsafe predictions in some specimens. After all the assumptions made regarding the shear strength enhancement, the average value of $V_{u,e}/V_{min*EC-2}$ for the 30 specimens is 1.17 with a coefficient of variation equal to 0.09.
- **ACI 318-14** includes a specific punching shear formulation for the deepest pile caps and thus, does not require the practitioner to adopt additional hypotheses. Although this is a great advantage, in the case of medium-slender pile caps ($0.5 < w/d \leq 1$) the influence of the shear span-depth ratio is not adequately captured and the strength of the deepest is overestimated. The ACI 318-14 formulation does not consider the influence of the ratio of longitudinal tension reinforcement in the strength, which has been found experimentally relevant. The secondary vertical reinforcement can be considered as punching reinforcement, although only the stirrups arranged inside the effective depth from the perimeter of the column are considered effective. In any case, the flexural strength is limiting in most cases and leads to conservative predictions. The average value of $V_{u,e}/V_{min,ACI}$ for the 30 specimens is 1.38 with a coefficient of variation equal to 0.22.
- The strength assessment using the Critical Shear Crack Theory (CSCT) implemented in **Model Code 2010** is coherent with the mode of failure observed: punching of the cap with the development of an irregular punching surface between the column and the piles. The pile cap test

data (load and rotation at failure) followed the average failure criterion for punching proposed by the CSCT. For this reason, the MC-2010 formulation appears to be suitable to assess its strength although considerations are necessary to address the differences between pile caps and flat slab situations:

- ✓ The shear-resisting control perimeter (b_0) should be obtained on the basis of a detailed shear field analysis. In this way, the influence of the shear span-depth ratio and eccentricity in the concentration of shear forces along the basic control perimeter is correctly captured.
 - ✓ The limitation of $r_s/d > 2.5$ justified by Muttoni et al. [67] for deep footings is also adopted herein for the evaluation of punching strength of pile caps.
 - ✓ If LoA III is used to derive the rotations, the average moment (m_s) and flexural strength per unit length (m_R) should be calculated over the whole width of the pile cap. This way both values are comparable if the reinforcement is placed concentrated in strips linking the pile heads.
- **MC-2010** using **LoA-III** provides accurate failure load predictions for the 30 specimens, with an average value of $V_{u,e}/V_{Rd,cs,CM}$ equal to 1.09 and a coefficient of variation equal to 0.13. The results are trend-free from the studied variables such as slenderness (w/d), load eccentricity and shear reinforcement. Moreover, the theoretical load-rotation curves of LoA-III adequately approximate the actual response of the specimens, allowing to distinguish brittle from ductile failures. The latter is governed by yielding of both the flexure and shear reinforcement.
 - **MC-2010** using **LoA-II** is easier to compute than using LoA-III and leads to conservative predictions. The average value of $V_{u,e}/V_{Rd,cs,CM}$ for the 30 specimens is 1.31 with a coefficient of variation equal to 0.16. These predictions are very accurate for tests under centered load (av: 1.18, cov: 0.09), but the simplified formula considering the eccentricity leads to poorer predictions (av: 1.51, cov: 0.10).

7.3. Future work

This research has provided new experimental results of pile caps with vertical secondary reinforcement tested under two different eccentric loads. Both factors proved to be significant in pile cap strength, therefore more research is needed to complete de experimental database. The following ***experimental future work*** is proposed:

- Study of the influence of load eccentricity on the pile cap strength. The experimental series should be completed with different levels of eccentricity, combining x-y directions, keeping the remainder parameters constant.
- Research on the effect of the vertical ratio of reinforcement on pile cap strength. It should be verified how the STM-2 captures the influence of different levels of vertical reinforcement.

Regarding the unified ***STM proposal***, a complete verification process was presented and the comparison with the experimental database showed accurate strength and mode of failure predictions. After wider experimental contrast with the experimental results proposed above, it would be interesting to continue with the ***next objective***:

- To develop a design approach based on this STM proposal. This code-like approach should be easily used to obtain the area of main (bunched) and secondary reinforcement, and at the same time to check the adequacy of the cap geometry for a given design load.

Sectional approaches can be a safe alternative for the design of pile caps in the transition between deep and slender behaviour ($0.5 < w/d \leq 2$). However, ***the following aspects should be considered***:

- Regarding ACI 318 punching formulation, the existing special formulation (by CRSI) is only applicable to very deep pile caps ($w/d \leq 0.5$), while the general formula leads to unsafe predictions in the intermediate situation of ($0.5 < w/d \leq 1$). It would be advisable to extend the special investigation to this very common range of shear span-depth ratios.
- The shear field analysis, required by MC-2010 to determine the shear control perimeter (b_0), can be time consuming for conventional pile cap design and therefore a simplified approach would be very practical. The multiple effects that influence the shear forces concentration along the

basic control perimeter (b_l) in pile caps, could be approximately considered through a coefficient, similar to the existing k_e of eccentricity. This work has already been initiated by the author, in collaboration with Dr. Juan Sagasetta, during a stay of research at the University of Surrey.

*Estudio de encepados de tres y cuatro pilotes solicitados por cargas centradas y excéntricas:
análisis experimental y de las formulaciones de diseño*

Referencias bibliográficas

- [1] Blevot J, Frémy R. Semelles sur pieux. Ann l'Institut Tech Du Bâtiment Des Trav Publics 1967;20:223–95.
- [2] Clarke JL. Behaviour and design of pile caps with four pile caps. Cem Concr Assoc 1973.
- [3] Sabnis GM, Gogate AB. Investigation of Thick Slab (Pile Cap) Behavior. ACI J 1984;81:35–9.
- [4] Adebar P, Zhou Z. Design of deep pile caps by strut-and-tie models. ACI Struct J 1996;93:437–48.
- [5] Fédération Internationale du Béton (fib). Punching of structural concrete slabs. fib Bulletin 12. Lausanne, Switzerland: 2001.
- [6] ACI Committee 318. Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary (ACI 318-14/ACI 318S-14). American Concrete Institute; 2014.
- [7] CSA group. CSA A23.3-14 Design of Concrete Structures. Canadian Standards Association; 2014.
- [8] ABNT/CB-02. NBR 6118:2014 Design of concrete structures - Procedure (In Portuguese). Rio de Janeiro City, Brazil: Brazilian Association of Technical Standards; 2014.
- [9] CEN. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings; Spanish version UNE-EN-1992-1-1:2004. 2013.
- [10] Fédération Internationale du Béton (fib). Model Code 2010, final drafts (Vol. 2). Lausanne, Switzerland: 2012.
- [11] Comisión Permanente del Hormigón. Instrucción de Hormigón Estructural EHE-2008. Madrid: Ministerio de Fomento; 2008.
- [12] Fédération Internationale du Béton (fib). Design examples for strut-and-tie models. fib Bulletin 61. 2011.
- [13] ACI. SP-273 Further Examples for the Design of Structural Concrete

- with Strut-and-Tie Models. 2011.
- [14] Adebar P, Zhou Z. Bearing Strength of Compressive Struts Confined by Plain Concrete. *ACI Struct J* 1993;90:534–41.
 - [15] Guo H. Evaluation of column load for generally uniform grid-reinforced pile cap failing in punching. *ACI Struct J* 2015;112. doi:10.14359/51687420.
 - [16] Technical Committee CSB/30. BS 5400-4: 1990 Steel, concrete and composite bridges - Part 4: Code of practice for design of concrete bridges. British Standard Institution; 1990.
 - [17] Meléndez C. A finite element-based approach for the analysis and design of 3D reinforced concrete elements and its application to D-regions. Universitat Politècnica de València, 2017.
 - [18] Miguel PF, Fernández MA, Bonet JL, Pastor JM. Modelo automático para determinar el esquema de bielas y tirantes de una región D de forma cualquiera. II Congr. ACHE puentes y Estructuras Edif. - Madrid, 2002.
 - [19] Sola C, Miguel PF, Fernández MA. Herramienta informática avanzada para el análisis y diseño de regiones D en estructuras de hormigón. IV Congr. ACHE - Val., 2008.
 - [20] Sola C, Miguel PF, Pallarés MA, Mata J. Aplicación de la Herramienta informática MEFBT para el diseño y análisis de ensayos experimentales de apoyos a media madera. V Congr. ACHE - Barcelona, 2011.
 - [21] Muttoni A, Schwartz J. Behaviour of Beams and Punching in Slabs without Shear Reinforcement. *IABSE Reports* 1991;62:703–8.
 - [22] Lebel P. Semelles de béton armé. *Compte-rendu des annales de l'ITBTP*, décembre 1934 et *Mémoires de l'Association Internationale des Ponts et Charpentiers* 1935:1935.
 - [23] Schlaich J, Schafer K. Towards a Consistent Design of Reinforced Concrete Structures. 12th Congr. IABSE, Vancouver: 1984, p. 1984.
 - [24] Schlaich J, Kurt S, Jennewein M. Toward a consistent design of reinforced structural concrete. *J Prestress Concr Inst* 1987;32:74–150.
 - [25] Ritter W. *Die Bauweise Hennebique*. Zürich, Switzerland: Schweizerische Bauzeitung; 1899.

- [26] Mörsch E. *Der Eisenbetonbau - Seine Theorie und Anwendung*. Stuttgart, Germany: 1908.
- [27] ACI Committee 318. *Building Code Requirements for Reinforced Concrete (318-77)*. Detroit: 1977.
- [28] *CRSI Handbook (1978)*. Chicago: Concrete Reinforcing Steel Institute; 1978.
- [29] Adebar P, Kuchma D, Collins MP. Strut-and-tie models for the design of pile caps: an experimental study. *ACI Struct J* 1990;87:81–92.
- [30] Suzuki K, Otsuki K, Tsubata T. Influence of bar arrangement on ultimate strength of four-pile caps. *Trans Japan Concr Inst* 1998;20:195–202.
- [31] Suzuki K, Otsuki K, Tsubata T. Experimental Study on Four Pile Caps with Taper. *Trans Japan Concr Inst* 1999;21:327–34.
- [32] Suzuki K, Otsuki K, Tsuchiya T. Influence of Edge Distance on Failure Mechanisms of Pile Caps. *Trans Japan Concr Inst* 2000;22:361–8.
- [33] Suzuki K, Otsuki K. Experimental study on corner shear failure of pile caps. *Trans Japan Concr Inst* 2002;23:303–10.
- [34] Otsuki K, Suzuki K. Experimental Study on Bending Ultimate Strength of Four Pile Caps. *Trans Japan Concr Inst* 1996:93–102.
- [35] Chan TK, Poh CK. Behaviour of precast reinforced concrete pile caps. *Constr Build Mater* 2000;14:73–8. doi:10.1016/S0950-0618(00)00006-4.
- [36] Subcommittee B/525/2. BS 8110-1:1997 Structural use of Concrete. Part 1: Code of practice for design and construction. British Standard Institution; 1997.
- [37] Miguel MG, Takeya T, Giongo JS. Structural behaviour of three-pile caps subjected to axial compressive loading. *Mater Struct* 2008;41:85–98. doi:10.1617/s11527-007-9221-5.
- [38] Cao J. The shear behaviour of the reinforced concrete four-pile caps. PhD Thesis. University of Southampton, UK, 2009.
- [39] Gu Q, Sun CF, Peng SM. Experimental Study on Deep Four-Pile Caps with Different Reinforcement Layouts Based on 3D Strut-and-Tie Analogy. *Key Eng Mater* 2009;400–402:917–22. doi:10.4028.

- [40] Gao DY, Fan H, Lei J. The Failure Mode and Anti-Crack Performance of the Steel Fiber Reinforced High Strength Concrete Four-Pile Cap. *Adv Mater Res* 2011;306–307:927–33. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.306-307.927.
- [41] Lei J, Gao DY, Fan H. Study on the Influence Factors of Bearing Capacity of the Fiber Reinforced High Strength Concrete Three-Pile Caps. *Adv Mater Res* 2010;163–167:1586–91. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.163-167.1586.
- [42] Cao J, Bloodworth AG. Shear behaviour of reinforced concrete pile caps under full-width wall loading. *Proc Inst Civ Eng - Struct Build* 2012;165:165–77.
- [43] Souza R, Kuchma D, Park J, Bittencourt T. Adaptable Strut and Tie Model for Design and Verification of four pile caps. *ACI Struct J* 2009;106:142–50.
- [44] Siao W Bin. Strut-and-Tie model for shear behavior in deep beams and pile caps failing in diagonal splitting. *ACI Struct J* 1993;90:356–63.
- [45] Souza R, Kuchma D, Park J, Bittencourt T. Nonlinear finite element analysis of four pile-caps supporting columns subjected to generic loading. *Comput Concr* 2007;4:363–76.
- [46] ACHE Comisión 1. Monografía M6 Método de Bielas y Tirantes (in Spanish). 2003.
- [47] Leonhardt F. *Estructuras de Homigón Armado. Tomo III.* Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag; 1977.
- [48] Mays TW. *Design Guide for Pile Caps.* Concrete Reinforcing Steel Institute; 2015.
- [49] Hendy CR, Smith DA. *Designers' Guide to EN 1992-2.* London: Thomas Telford; 2007.
- [50] Bond AJ, Brooker O, Harris AJ, Harrison T, Moss RM, Narayanan RS, et al. *How to Design Concrete Structures using Eurocode 2.* Camberley: The Concrete Centre; 2006.
- [51] CP 110-1:1972 Code of practice for the structural use of concrete. Design, materials and workmanship. British Standard Institution; 1972.
- [52] Hanson NW, Hanson JM. *Shear and Moment Transfer Between*

- Concrete Slabs and Columns. *J Portl Cem Assoc* 1968;10:2–16.
- [53] CRSI Handbook, 10th Edition. Schaumburg, IL: Concrete Reinforcing Steel Institute; 2008.
- [54] UNE-EN 12390-3:2009. Ensayos de hormigón endurecido - Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas. 2009.
- [55] UNE-EN 12390-2:2009. Ensayos de hormigón endurecido - Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia. 2009.
- [56] UNE-EN 12390-6:2010. Ensayos de hormigón endurecido - Parte 6: Resistencia a tracción indirecta de probetas. 2010.
- [57] UNE-EN ISO 15630-1. Aceros para el armado y el pretensado del hormigón. Métodos de ensayo - Parte 1: Barras, alambres y alambres para hormigón armado. 2011.
- [58] Falcón JM. Estudio del comportamiento en servicio y rotura de los apoyos a media madera. Universitat Poliècnica de València; 2015.
- [59] Jensen UG, Hoang LC. Collapse mechanisms and strength prediction of reinforced concrete pile caps. *Eng Struct* 2012;35:203–14. doi:10.1016/j.engstruct.2011.11.006.
- [60] Fédération Internationale du Béton (fib). Practitioners guide to finite element modelling of reinforced concrete structures. *fib Bulletin* 45. 208AD.
- [61] Park J, Kuchma D, Souza R. Strength predictions of pile caps by a strut-and-tie model approach. *Can J Civ Eng* 2008;35:1399–413. doi:10.1139/L08-062.
- [62] Muttoni A, Schwartz J, Thürlimann B. Design of concrete structures with stress fields. Birkhäuser Verlag; 1997.
- [63] Vecchio FJ, Collins MP. The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear. *ACI J* 1986;83:219–31. doi:10.14359/10416.
- [64] Miguel MG. Análises Experimental e Numérica de Blocos Sobre Tres Estacas. 2000.
- [65] Muttoni A. Punching shear strength of reinforced concrete slabs without transverse reinforcement. *ACI Struct J* 2008;105:440–50.

- [66] Simões JT, Faria DM V, Ruiz MF, Muttoni A. Strength of reinforced concrete footings without transverse reinforcement according to limit analysis 2016;112:146–61. doi:10.1016/j.engstruct.2016.01.010.
- [67] Muttoni A, Fernández Ruiz M, Simões JT. The theoretical principles of the critical shear crack theory for punching shear failures and derivation of consistent closed-form design expressions. *Struct Concr* 2017;1–17. doi:10.1002/suco.201700088.
- [68] Kueres D, Hegger J. Two-parameter kinematic theory for punching shear in reinforced concrete slabs without shear reinforcement. *Eng Struct* 2018;175:201–16. doi:10.1016/j.engstruct.2018.08.023.
- [69] Vaz Rodrigues R, Fernandez-Ruiz M, Muttoni A. Shear strength of R / C bridge cantilever slabs. *Eng Struct* 2008;30:3024–33. doi:10.1016/j.engstruct.2008.04.017.
- [70] Vaz Rodrigues R. Shear strength of reinforced concrete bridge deck slabs. PhD Thesis. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Switzerland, 2007.
- [71] Simões JT, Faria DM V, Muttoni A, Fernández Ruiz M. Limit Analysis for Punching Shear Design of Compact Slabs and Footings. *fib Symp.*, Copenhagen, Denmark: 2015, p. 13.
- [72] Sagaseta J, Muttoni A, Fernández Ruiz M, Tassinari L. Non-axis-symmetrical punching shear around internal columns of RC slabs without transverse reinforcement. *Mag Concr Res* 2011;63:441–57. doi:10.1680/macr.10.00098.

Anejo A

Ensayos de control del hormigón

En este anejo se muestran los ensayos para la obtención de las propiedades mecánicas del hormigón.

Para la fabricación de los 30 especímenes se han realizado un total de 10 series de hormigonado. En cada serie se extrajeron 18 probetas de control cilíndricas: 12 probetas de acompañamiento (4 por espécimen), 2 probetas para determinar la resistencia a compresión del hormigón a los 7 días y 4 probetas de control que se ensayan a los 28 días, las cuales se curan en el molde durante 24 horas y después se conservan en cámara a 20°C y 100% de humedad.

A.1. Ensayos de compresión simple

La determinación de la resistencia a compresión simple se evalúa mediante el ensayo de probetas cilíndricas de 150mm de diámetro y 300mm de altura, según lo indicado en la norma UNE EN-12390-3:2009 [54].

La cara superior de las probetas que no queda en contacto con el molde se prepara mediante refrentado con una mezcla de azufre. Este procedimiento puede emplearse si el hormigón tiene una resistencia inferior a 50MPa, según el anexo A de la UNE EN-12390-3:2009 [54].

Al final del siguiente apartado, de la Tabla A.1 a la Tabla A.10 se muestran los resultados de las resistencias a compresión divididos por series de hormigonado.



Figura A.1 Ensayo de compresión simple del hormigón: a) Vista general del ensayo; b) Probeta tras la rotura

A.2. Tracción indirecta

Para obtener la resistencia a tracción del hormigón se realizan ensayos de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas de 150mm de diámetro y 300mm de altura, según lo indicado en la norma UNE EN-12390-6:2010 [56].



Figura A.2 Detalles del ensayo de una probeta por tracción indirecta

A continuación, se incluyen las tablas que muestran los resultados de las resistencias a compresión y tracción del hormigón para cada serie de hormigonado.

Tabla A.1 Serie H1 -Resultados de los ensayos de compresión y tracción indirecta

| Fecha rotura | Edad (días) | Tipo probeta | f_c (MPa) | | | f_{ct} (MPa) | | |
|--------------|-------------|--------------|-------------|-------|-------|----------------|------|-------|
| | | | P1 | P2 | media | P3 | P4 | media |
| 11/11/2014 | 8 | Control-7 | 15.53 | 11.62 | 15.53 | - | - | - |
| 27/11/2014 | 24 | 3P-N-A1 | 23.31 | 14.41 | 23.31 | 2.77 | 2.29 | 2.53 |
| 05/12/2014 | 32 | 3P-N-A2 | 22.85 | 19.70 | 21.28 | 2.77 | 2.63 | 2.70 |
| 09/12/2014 | 36 | 3P-N-A3 | 23.76 | 23.60 | 23.68 | 2.70 | 2.29 | 2.50 |
| 03/12/2014 | 30 | Control-28 | 26.62 | 8.95 | 26.62 | 2.84 | 2.91 | 2.88 |

f_c : resistencia del hormigón a compresión; f_{ct} : resistencia del hormigón a tracción

DATOS HORMIGONADO

- Fecha: 03/11/2014
- Designación del hormigón: HA-25/F/12
- Relación A/C: 0.65

Tabla A.2 Serie H2 -Resultados de los ensayos de compresión y tracción indirecta

| Fecha rotura | Edad (días) | Tipo probeta | f_c (MPa) | | | f_{ct} (MPa) | | |
|--------------|-------------|--------------|-------------|-------|-------|----------------|------|-------|
| | | | P1 | P2 | media | P3 | P4 | media |
| 05/12/2014 | 15 | Control-7 | 22.86 | 24.71 | 23.79 | - | - | - |
| 12/12/2014 | 22 | 3P-N-B1 | 24.12 | 25.27 | 24.69 | 3.19 | 3.12 | 3.16 |
| 17/12/2014 | 27 | 3P-N-B2 | 26.68 | 25.87 | 26.28 | 3.05 | 3.19 | 3.12 |
| 18/12/2014 | 28 | 3P-N-B3 | 28.64 | 24.41 | 26.52 | 2.56 | 3.19 | 2.88 |
| 18/12/2014 | 28 | Control-28 | 24.72 | 28.01 | 26.37 | 2.77 | 2.56 | 2.67 |

f_c : resistencia del hormigón a compresión; f_{ct} : resistencia del hormigón a tracción

DATOS HORMIGONADO

- Fecha: 20/11/2014
- Designación del hormigón: HA-25/F/12
- Relación A/C: 0.65

Tabla A.3 Serie H3 -Resultados de los ensayos de compresión y tracción indirecta

| Fecha rotura | Edad (días) | Tipo probeta | f_c (MPa) | | | f_{ct} (MPa) | | |
|--------------|-------------|--------------|--------------|-------|--------------|----------------|------|-------------|
| | | | P1 | P2 | media | P3 | P4 | media |
| 28/01/2015 | 7 | Control-7 | 22.86 | 22.10 | 22.48 | - | - | - |
| 03/02/2015 | 13 | 3P-N-C1 | 25.47 | 22.47 | 23.97 | 2.98 | 3.19 | 3.09 |
| 06/02/2015 | 16 | 3P-N-C2 | 27.27 | 25.57 | 26.42 | 2.91 | 2.63 | 2.77 |
| 10/02/2015 | 20 | 3P-N-C3 | 28.83 | 28.23 | 28.53 | 3.05 | 3.12 | 3.09 |
| 19/02/2015 | 29 | Control-28 | 18.85 | 26.52 | 26.52 | 3.19 | 3.47 | 3.33 |

f_c : resistencia del hormigón a compresión; f_{ct} : resistencia del hormigón a tracción

DATOS HORMIGONADO

- Fecha: 21/01/2015
- Designación del hormigón: HA-25/F/12
- Relación A/C: 0.65

Tabla A.4 Serie H4 -Resultados de los ensayos de compresión y tracción indirecta

| Fecha rotura | Edad (días) | Tipo probeta | f_c (MPa) | | | f_{ct} (MPa) | | |
|--------------|-------------|--------------|-------------|-------|--------------|----------------|------|-------------|
| | | | P1 | P2 | media | P3 | P4 | media |
| 09/07/2015 | 10 | Control-7 | 22.26 | 22.63 | 22.45 | - | - | - |
| 05/10/2015 | 98 | 4P-N-A1 | 30.91 | 24.42 | 27.67 | 3.19 | 3.26 | 3.23 |
| 08/10/2015 | 101 | 4P-N-A2 | 30.16 | 28.83 | 29.49 | 2.77 | 3.47 | 3.12 |
| 19/10/2015 | 112 | 4P-N-A3 | 28.34 | 31.66 | 30.00 | 2.91 | 3.19 | 3.05 |
| 27/07/2015 | 28 | Control-28 | 24.27 | 24.15 | 24.21 | 2.77 | 2.91 | 2.84 |

f_c : resistencia del hormigón a compresión; f_{ct} : resistencia del hormigón a tracción

DATOS HORMIGONADO

- Fecha: 29/06/2015
- Designación del hormigón: HA-25/F/12
- Relación A/C: 0.65

Tabla A.5 Serie H5 -Resultados de los ensayos de compresión y tracción indirecta

| Fecha rotura | Edad (días) | Tipo probeta | f_c (MPa) | | | f_{ct} (MPa) | | |
|--------------|-------------|--------------|--------------|-------|--------------|----------------|------|-------------|
| | | | P1 | P2 | media | P3 | P4 | media |
| 01/07/2015 | 10 | Control-7 | 18.88 | 17.51 | 18.20 | - | - | - |
| 15/09/2015 | 98 | 4P-N-B1 | 26.24 | 25.97 | 26.11 | 3.19 | 3.05 | 3.12 |
| 18/09/2015 | 101 | 4P-N-B2 | 28.74 | 21.85 | 25.30 | 2.91 | 2.70 | 2.81 |
| 30/09/2015 | 112 | 4P-N-B3 | 30.35 | 29.39 | 29.87 | 2.29 | 2.15 | 2.22 |
| 20/07/2015 | 28 | Control-28 | 14.83 | 23.12 | 23.12 | 1.39 | 2.36 | 1.88 |

f_c resistencia del hormigón a compresión; f_{ct} resistencia del hormigón a tracción

DATOS HORMIGONADO

- Fecha: 22/06/2015
- Designación del hormigón: HA-25/F/12
- Relación A/C: 0.65

Tabla A.6 Serie H6 -Resultados de los ensayos de compresión y tracción indirecta

| Fecha rotura | Edad (días) | Tipo probeta | f_c (MPa) | | | f_{ct} (MPa) | | |
|--------------|-------------|--------------|-------------|-------|--------------|----------------|------|-------------|
| | | | P1 | P2 | media | P3 | P4 | media |
| 13/10/2015 | 13 | Control-7 | 33.25 | 33.12 | 33.18 | - | - | - |
| 27/10/2015 | 27 | 4P-N-C1 | 30.12 | 33.66 | 31.89 | 3.74 | 3.47 | 3.61 |
| 23/10/2015 | 23 | 4P-N-C2 | 37.65 | 34.91 | 36.28 | 3.47 | 2.22 | 2.85 |
| 21/10/2015 | 21 | 4P-N-C3 | 34.49 | 33.57 | 34.03 | 2.91 | 2.50 | 2.71 |
| 28/10/2015 | 28 | Control-28 | 33.68 | 33.23 | 33.45 | 3.12 | 3.74 | 3.43 |

f_c resistencia del hormigón a compresión; f_{ct} resistencia del hormigón a tracción

DATOS HORMIGONADO

- Fecha: 30/09/2015
- Designación del hormigón: HA-25/F/12
- Relación A/C: 0.65

Tabla A.7 Serie H7 -Resultados de los ensayos de compresión y tracción indirecta

| Fecha rotura | Edad (días) | Tipo probeta | f_c (MPa) | | | f_{ct} (MPa) | | |
|--------------|-------------|--------------|-------------|-------|--------------|----------------|------|-------------|
| | | | P1 | P2 | media | P3 | P4 | media |
| 30/11/2015 | 11 | Control-7 | 27.42 | 33.33 | 30.37 | - | - | - |
| 16/12/2015 | 27 | 4P-NMM-A2 | 32.80 | 40.05 | 36.42 | 3.12 | 3.40 | 3.26 |
| 22/12/2015 | 33 | 4P-NMM-A3 | 38.45 | 39.98 | 39.22 | 3.81 | 3.81 | 3.81 |
| 12/01/2016 | 54 | 4P-NMM-B2 | 40.42 | 37.66 | 39.04 | 3.47 | 3.05 | 3.26 |
| 17/12/2015 | 28 | Control-28 | 33.82 | 33.71 | 33.76 | 3.74 | 3.95 | 3.85 |

f_c : resistencia del hormigón a compresión; f_{ct} : resistencia del hormigón a tracción

DATOS HORMIGONADO

- Fecha: 19/11/2015
- Designación del hormigón: HA-25/F/12
- Relación A/C: 0.65

Tabla A.8 Serie H8 -Resultados de los ensayos de compresión y tracción indirecta

| Fecha rotura | Edad (días) | Tipo probeta | f_c (MPa) | | | f_{ct} (MPa) | | |
|--------------|-------------|--------------|-------------|-------|--------------|----------------|------|-------------|
| | | | P1 | P2 | media | P3 | P4 | media |
| - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 14/01/2016 | 45 | 4P-NMM-B3 | 28.11 | 29.89 | 29.00 | 2.77 | 2.77 | 2.77 |
| 18/01/2016 | 49 | 4P-NMM-C2 | 27.38 | 30.02 | 28.70 | 2.70 | 2.63 | 2.67 |
| 20/01/2016 | 51 | 4P-NMM-C3 | 28.50 | 30.47 | 29.48 | 3.05 | 3.12 | 3.09 |
| 28/12/2015 | 28 | Control-28 | 25.53 | 20.83 | 23.18 | 3.19 | 3.19 | 3.19 |

f_c : resistencia del hormigón a compresión; f_{ct} : resistencia del hormigón a tracción

DATOS HORMIGONADO

- Fecha: 30/11/2015
- Designación del hormigón: HA-25/F/12
- Relación A/C: 0.65

Tabla A.9 Serie H9 -Resultados de los ensayos de compresión y tracción indirecta

| Fecha rotura | Edad (días) | Tipo probeta | f_c (MPa) | | | f_{ct} (MPa) | | |
|--------------|-------------|--------------|-------------|-------|--------------|----------------|------|-------------|
| | | | P1 | P2 | media | P3 | P4 | media |
| - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 16/02/2016 | 56 | 4P-NM-A2 | 19.50 | 34.77 | 27.13 | 2.7 | 3.33 | 3.02 |
| 18/02/2016 | 58 | 4P-NM-A3 | 34.46 | 26.84 | 30.65 | 3.05 | 3.19 | 3.12 |
| 23/02/2016 | 63 | 4P-NM-B2 | 25.67 | 33.38 | 30.20 | 3.12 | 2.84 | 2.98 |
| | | | | 31.56 | | | | |
| 20/01/2016 | 29 | Control-28 | 26.83 | 26.94 | 26.89 | 2.5 | 3.19 | 2.85 |

f_c : resistencia del hormigón a compresión; f_{ct} : resistencia del hormigón a tracción

DATOS HORMIGONADO

- Fecha: 22/12/2015
- Designación del hormigón: HA-25/F/12
- Relación A/C: 0.65

Tabla A.10 Serie H10 -Resultados de los ensayos de compresión y tracción indirecta

| Fecha rotura | Edad (días) | Tipo probeta | f_c (MPa) | | | f_{ct} (MPa) | | |
|--------------|-------------|--------------|-------------|-------|--------------|----------------|------|-------------|
| | | | P1 | P2 | media | P3 | P4 | media |
| 23/02/2016 | 19 | Control-7 | 16.46 | 22.37 | 19.41 | - | - | - |
| 25/02/2016 | 21 | 4P-NM-B3 | 28.41 | 27.89 | 28.15 | 2.98 | 3.05 | 3.02 |
| 01/03/2016 | 26 | 4P-NM-C2 | 29.35 | 26.42 | 27.88 | 2.63 | 2.91 | 2.77 |
| 03/03/2016 | 28 | 4P-NM-C3 | 26.56 | 30.99 | 28.78 | 2.63 | 2.77 | 2.70 |
| 03/03/2016 | 28 | Control-28 | 30.94 | 28.13 | 29.54 | 2.77 | 2.91 | 2.84 |

f_c : resistencia del hormigón a compresión; f_{ct} : resistencia del hormigón a tracción

DATOS HORMIGONADO

- Fecha: 04/02/2016
- Designación del hormigón: HA-25/F/12
- Relación A/C: 0.65

Anejo B

Ensayos de caracterización
de las barras de acero
corrugado

En este anejo se muestran los ensayos para la obtención del límite elástico y la tensión máxima de las barras de acero corrugado, siguiendo la norma UNE-EN ISO 15630-1:2010 [57].

La máquina de ensayo registra la carga aplicada a través de un transductor de presión integrado. La deformación en la armadura se mide mediante un transductor de desplazamiento, teniendo en cuenta la longitud inicial entre las mordazas que fijan la barra corrugada.

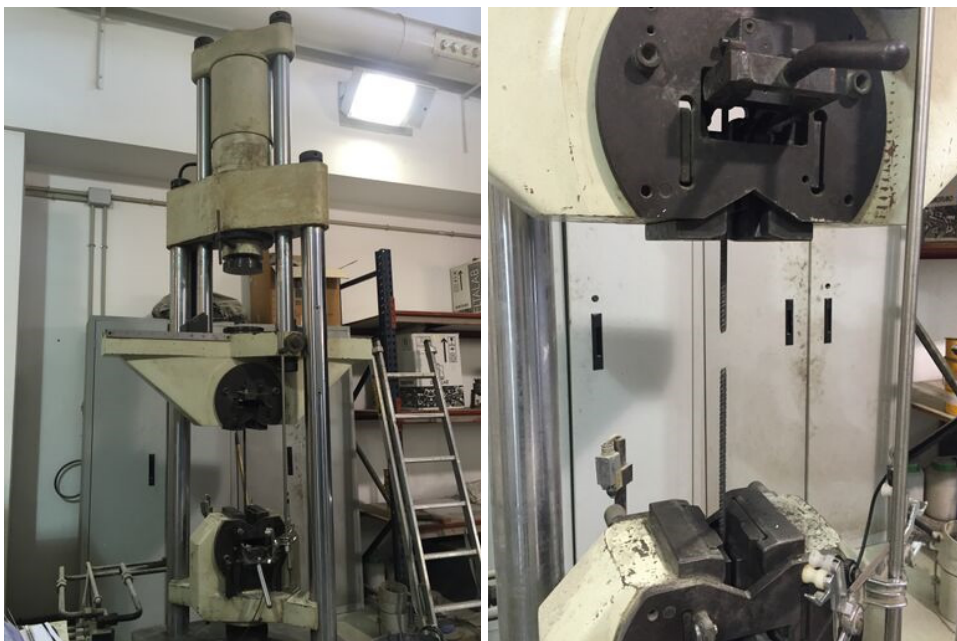


Figura B.1 Ensayo de tracción de las barras de acero corrugado: a) Vista general del ensayo; b) Barra corrugada tras la rotura

La obtención del límite elástico se realiza según el procedimiento indicado en la norma UNE-EN ISO 15630-1:2010 [57]: se realiza un ajuste lineal del tramo recto de la curva tensión-deformación y esta recta se decala hacia la izquierda un 0.2%. La intersección de la recta decalada con la curva tensión-deformación define el punto del límite elástico. En la Figura B.2 se muestra gráficamente el procedimiento descrito.

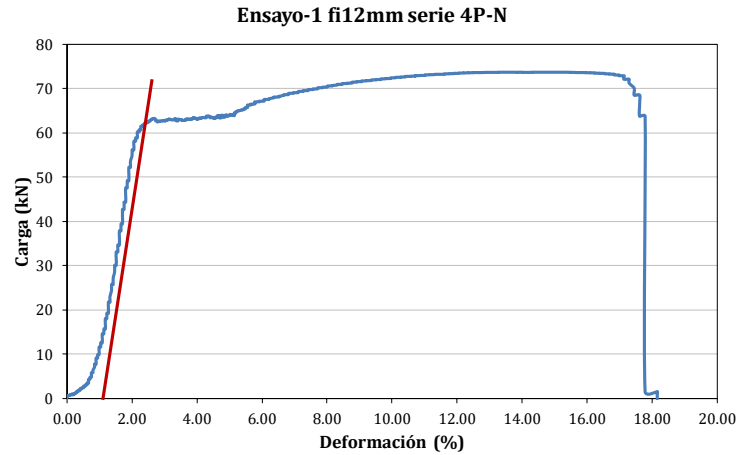


Figura B.2 Proceso de determinación del límite elástico

A continuación, se incluyen las tablas que muestran los resultados del límite elástico (f_y) y la resistencia máxima a tracción (f_{max}). La ferralla empleada como armadura en los especímenes procede de tres lotes diferentes: uno para la serie 1 (3P-N), otro para la serie 2 (4P-N) y el tercero para las series 3 y 4 (4P-NMM y 4P-NM respectivamente).

En el primer lote se realizaron dos ensayos por cada diámetro de barra, mientras que para los otros dos lotes se realizaron tres determinaciones por diámetro.

**Tabla B.1 Resultados del ensayo de tracción de las barras corrugadas
Lote 1 – Serie 3P-N**

| φ (mm) | f_y (MPa) | | | | f_{max} (MPa) | | | |
|-------------------|-------------|-------|----|--------------|-----------------|-------|----|--------------|
| | b1 | b2 | b3 | media | b1 | b2 | b3 | media |
| 8 | 570.0 | - | - | 570.0 | 667.0 | - | - | 667.0 |
| 10 | 520.0 | 525.0 | - | 522.5 | 627.0 | 630.0 | - | 628.5 |
| 12 | 525.0 | 530.0 | - | 527.5 | 624 | 630.0 | - | 627.0 |
| 16 | - | - | - | - | - | - | - | - |

φ : diámetro de la armadura; f_y : límite elástico del acero; f_{max} : resistencia máxima a tracción del acero

**Tabla B.2 Resultados del ensayo de tracción de las barras corrugadas
Lote 2 – Serie 4P-N**

| φ (mm) | f_y (MPa) | | | | f_{max} (MPa) | | | |
|-------------------|-------------|-------|-------|--------------|-----------------|-------|-------|--------------|
| | b1 | b2 | b3 | media | b1 | b2 | b3 | media |
| 8 | 559.0 | 587.5 | | 573.3 | 660.8 | 641.1 | | 650.9 |
| 10 | 539.0 | 567.5 | 451.5 | 519.3 | 630.8 | 645.3 | 627.8 | 634.7 |
| 12 | 560.5 | 554.5 | 546.5 | 553.8 | 652.0 | 641.6 | 631.9 | 641.8 |
| 16 | 551.0 | 550.5 | 563.0 | 554.8 | 642.7 | 641.1 | 650.8 | 644.8 |

φ : diámetro de la armadura; f_y : límite elástico del acero; f_{max} : resistencia máxima a tracción del acero

**Tabla B.3 Resultados del ensayo de tracción de las barras corrugadas
Lote 3 – Series 4P-NMM y 4P-NM**





| φ (mm) | f_y (MPa) | | | | f_{max} (MPa) | | | |
|-------------------|-------------|-------|-------|--------------|-----------------|-------|-------|--------------|
| | b1 | b2 | b3 | media | b1 | b2 | b3 | media |
| 8 | 543.5 | 557.5 | 551.5 | 550.8 | 648.8 | 647.7 | 648.4 | 648.3 |
| 10 | 555.0 | 557.5 | 552.0 | 554.8 | 645.1 | 644.6 | 643.7 | 644.4 |
| 12 | 526.5 | 531.5 | 543.0 | 533.7 | 622.2 | 624.9 | 642.6 | 629.9 |
| 16 | 551.0 | 548.5 | 552.5 | 550.7 | 649.2 | 649.8 | 652.9 | 650.6 |





φ : diámetro de la armadura; f_y : límite elástico del acero; f_{max} : resistencia máxima a tracción del acero

Anejo C

Protocolo de ensayo

Para garantizar una correcta realización de los ensayos experimentales, es imprescindible realizar una planificación previa y sistemática de los mismos. El grupo de investigación cuenta con una amplia experiencia en ensayos experimentales, que ha dado lugar al riguroso protocolo de ensayo que se presenta en este anejo. Este protocolo se ha configurado como tabla para que sirva de hoja de control en las sucesivas fases.

| | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
|  |  UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA |  GOBIERNO DE ESPAÑA |  MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD | ESPÉCIMEN <p style="text-align: right;">pág.1/2</p> |
| PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes | | | | |
| CHECK LIST LABORATORIO | | | | |
| A. PREVIO AL HORMIGONADO | | | | |
| FERRALLA | | | | <input type="checkbox"/> |
| Revisión de la ferralla y montaje según planos de armado. Registro recubrimiento real. | | | | |
| GALGAS | | | | <input type="checkbox"/> |
| Pegado de galgas. Registrar factor de galga empleado. Etiquetar. Protección cables. | | | | |
| PROBETAS CONTROL | | | | <input type="checkbox"/> |
| Preparación de moldes para probetas de control y acompañamiento (18) | | | | |
| B. HORMIGONADO | | | | |
| CURADO | | | | <input type="checkbox"/> |
| A las 4h riego con agua y cubrición con plásticos para el curado. | | | | |
| C. DESENCOFRADO | | | | |
| PROBETAS CONTROL | | | | <input type="checkbox"/> |
| A las 24h del hormigonado. Guardar en cámara húmeda y romper en 28 días. | | | | |
| PROBETAS ACOMPAÑAMIENTO | | | | <input type="checkbox"/> |
| A las 24h del hormigonado Guardar en mismas condiciones que las piezas a ensayar. | | | | |
| PIEZAS | | | | <input type="checkbox"/> |
| A los 7 días del hormigonado. | | | | |
| D. MONTAJE DE UTILLAJES AUXILIARES | | | | |
| ROTULAS | | | | <input type="checkbox"/> |
| Roscado de pieza rótula esférica macho a encepado. | | | | |
| EJE DE ARMADURAS | | | | <input type="checkbox"/> |
| Pintado de eje de armaduras sobre caras laterales y base. | | | | |
| UTILLAJES PORTICO | | | | <input type="checkbox"/> |
| Montaje según planos, dependiendo del canto de la pieza a ensayar. | | | | |
| E. COLOCACIÓN DE LA PIEZA | | | | |
| F. OPERACIONES DE LABORATORIO | | | | |
| PROBETAS CONTROL | | | | <input type="checkbox"/> |
| Rotura de probetas de control del hormigón a 28 días | | | | |
| BARRAS CORRUGADAS | | | | <input type="checkbox"/> |
| Rotura de barras corrugadas a tracción. | | | | |





| | | | | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|
|  |  UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA |  GOBIERNO DE ESPAÑA |  MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD | ESPÉCIMEN |
| PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes | | | | pág.2/2 |
| CHECK LIST LABORATORIO (continuación) | | | | |
| G. INSTRUMENTACIÓN | | | | |
| GALGAS. Pelado de cables y colocación de punteras. Conexión a las regletas del equipo de adquisición. <input type="checkbox"/> | | | | |
| CAPTADORES DESPL. Replanteo ubicación según planos. Taladro placas de sujeción y colocación del captador en posición. Conexión al equipo de adquisición. <input type="checkbox"/> | | | | |
| CÉLULAS DE CARGA. Conexión al equipo de adquisición. <input type="checkbox"/> | | | | |
| EQUIPO ADQUISICIÓN. Configuración (canales y nombres de sensores) y revisión del funcionamiento de toda la instrumentación. Preparación de fórmulas y gráficos. <input type="checkbox"/> | | | | |
| H. FOTOGRAFÍA DURANTE EL ENSAYO | | | | |
| Configuración de las cámaras. Sincronización horaria con equipo de adquisición. Conexión a equipo de disparo automático. <input type="checkbox"/> | | | | |
| I. ENSAYO | | | | |
| J. POST-ENSAYO | | | | |
| DATOS. Grabación de los archivos de datos del ensayo en dispositivo de memoria externa. Copia de seguridad. <input type="checkbox"/> | | | | |
| PROBETAS ACOMPAÑAMIENTO. Rotura de probetas de control de acompañamiento. <input type="checkbox"/> | | | | |
| CHECK LIST REGISTRO FOTOGRÁFICO | | | | |
| Ferralla y encofrado previo a colocación de estructura auxiliar para posicionamiento de placa de carga superior. <input type="checkbox"/> | | | | |
| Ferralla, encofrado y placa de carga superior listos para hormigonar. <input type="checkbox"/> | | | | |
| Montaje de utillajes auxiliares. <input type="checkbox"/> | | | | |
| Encepado desencofrado y con esferas roscadas lista para colocar en posición. <input type="checkbox"/> | | | | |
| Configuración general del ensayo e instrumentación. <input type="checkbox"/> | | | | |
| Fotos automáticas sincronizadas durante el proceso de carga. <input type="checkbox"/> | | | | |
| Fotografiado en detalla de la zona de rotura. <input type="checkbox"/> | | | | |
| OBSERVACIONES | | | | |
| | | | | |

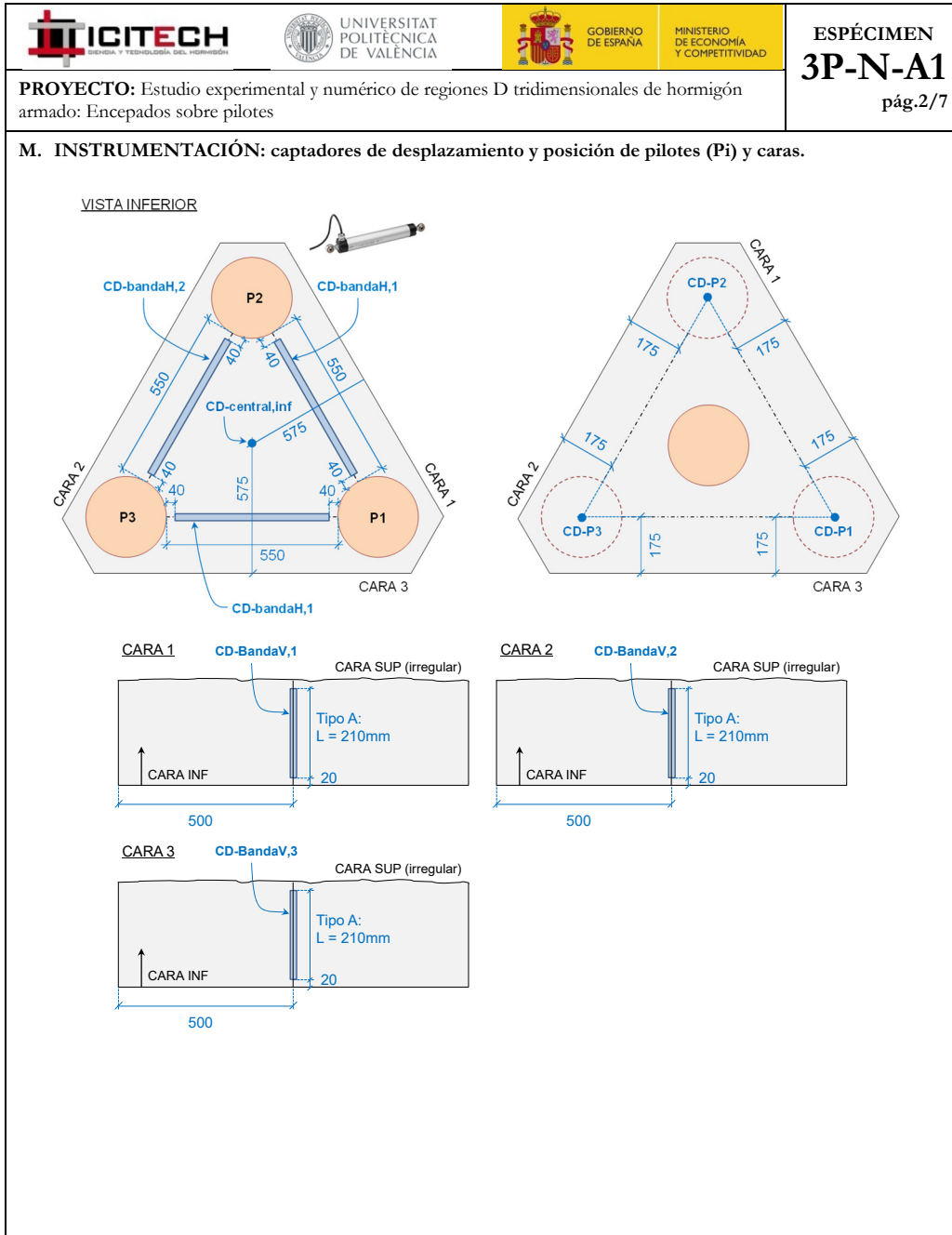
*Estudio de encepados de tres y cuatro pilotes solicitados por cargas centradas y excéntricas:
análisis experimental y de las formulaciones de diseño*

Anejo D

Fichas de ensayo

Este anejo constituye un documento fundamental en el que queda recogida la definición geométrica y de armado de cada espécimen, su instrumentación completa y los resultados principales con gráficos y fotos de las caras. La información se ha organizado en forma de fichas, una por cada espécimen, de forma que resulte fácilmente comprensible.

| | | | | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
|  |  UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA |  GOBIERNO DE ESPAÑA |  MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD | ESPÉCIMEN 3P-N-A1 pág.1/7 |
| PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes | | | | |
| K. DATOS PRINCIPALES DEL ENSAYO Fecha horm.: 03/11/2014 Fecha ensayo: 27/11/2014 Edad (días): 24 f_c / f_{ct} (MPa): 23.3 / 2.5 Tipo sollicitación: carga centrada $\Sigma R_{max,W}$ (kN): 480.9 Modo de fallo: F | | | | |
| L. GEOMETRÍA DEL ENCEPADO Y ARMADO Descripción del armado y su monitorización: <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div data-bbox="399 929 558 1086" style="width: 30%;"> <p>L (mm): 1000 h (mm): 250 e (mm): 800 ϕ (mm): 250 c (mm): 250 $r_{geo,inf}$ (mm): 40</p> </div> <div data-bbox="590 1041 670 1131" style="width: 20%;"> <p>ARMADO BANDA: 4Ø12 SEC. HORIZ: - SEC. VERTICAL: -</p> </div> <div data-bbox="590 1198 694 1243" style="width: 20%;"> <p>NOMENCLATURA GALGAS GA1 - 10 s/plano</p> </div> <div data-bbox="718 1041 1173 1444" style="width: 40%;"> </div> </div> <div style="margin-top: 20px;"> <p>ARMADO</p> <p>Banda: 4Ø12</p> <p>Sec. horizontal: -</p> <p>Sec. vertical: -</p> <p>30 GALGAS: GA1-id s/plano</p> </div> | | | | |

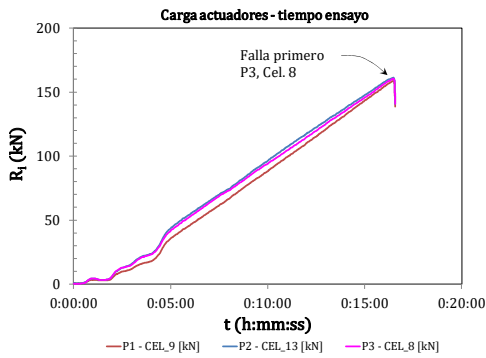




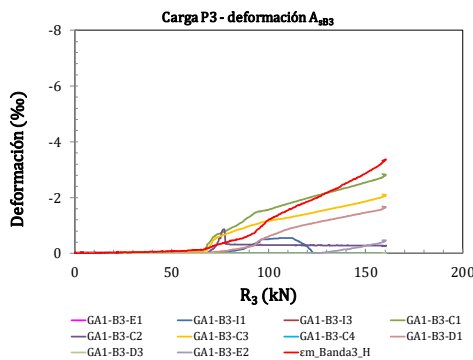
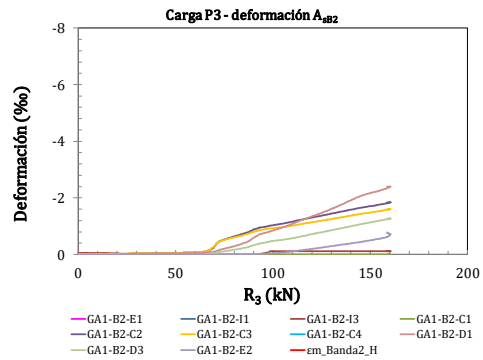
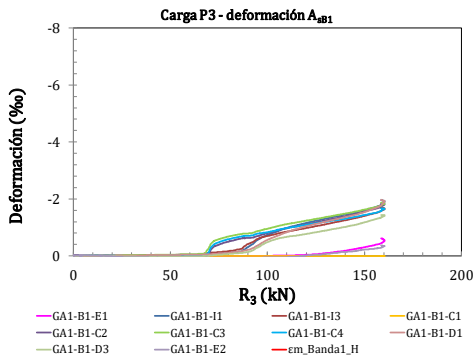
ESPÉCIMEN
3P-N-A1
pág.3/7

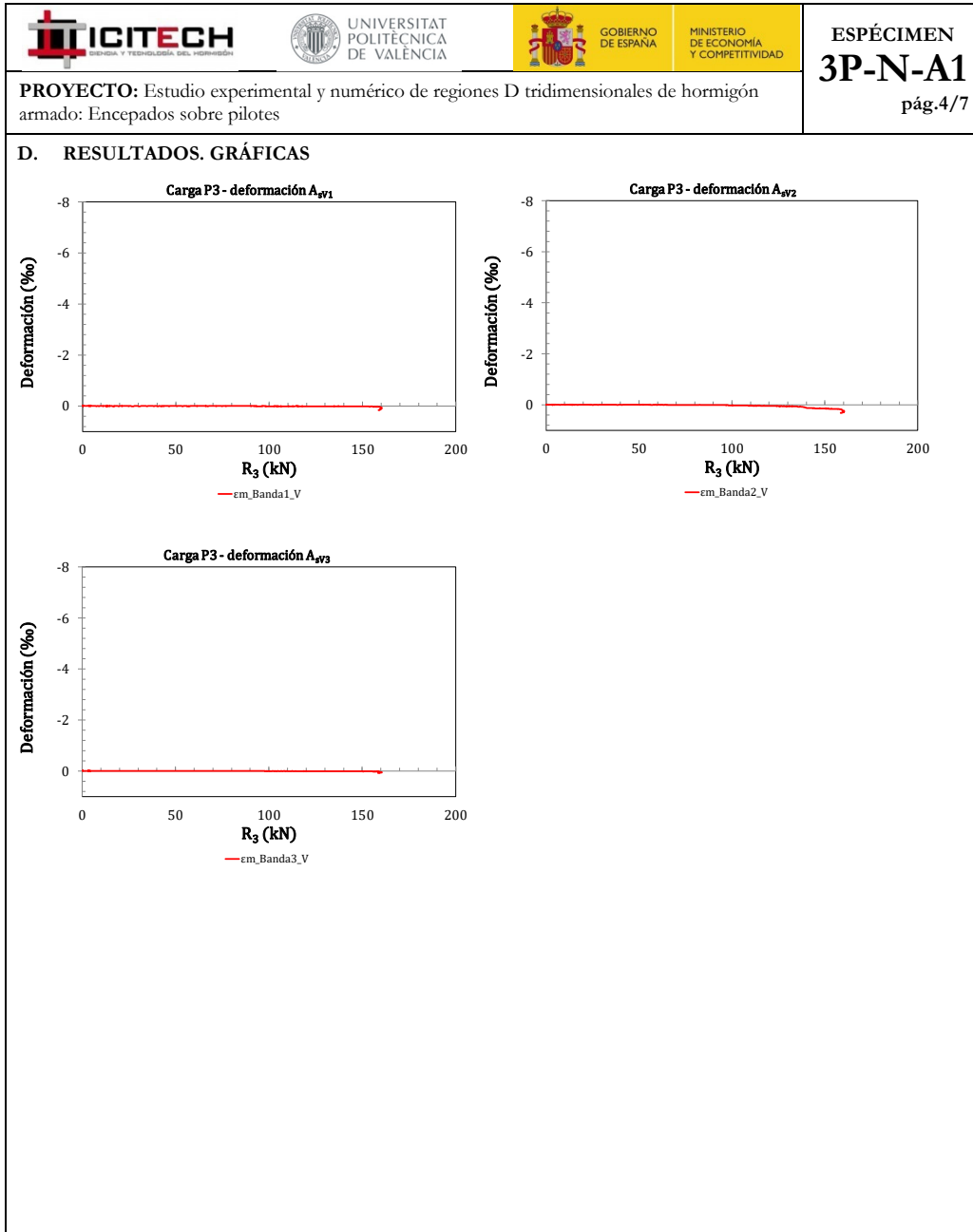
PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

N. RESULTADOS. GRÁFICAS



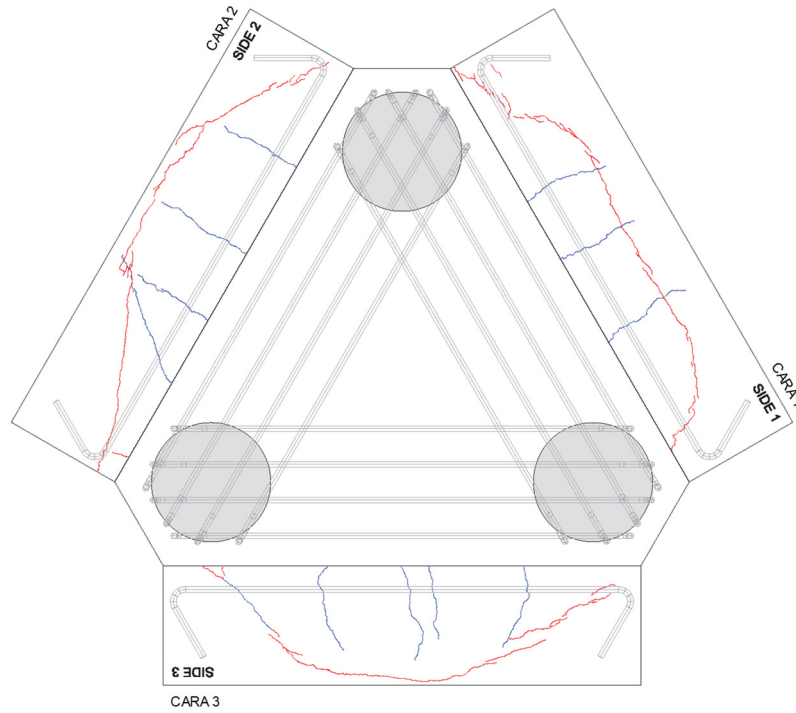
No se dispone de registro de datos del captador central inferior







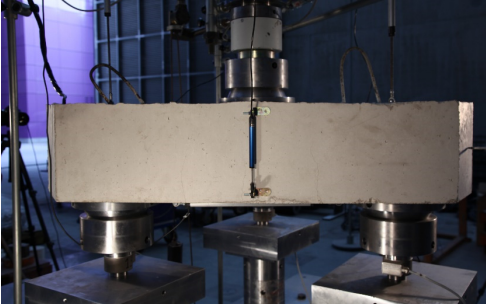
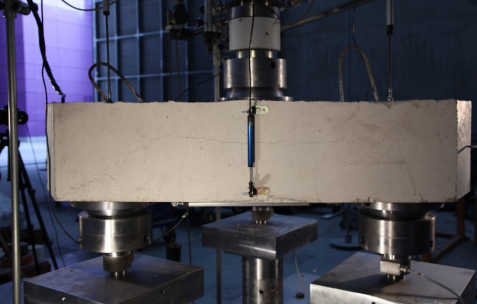
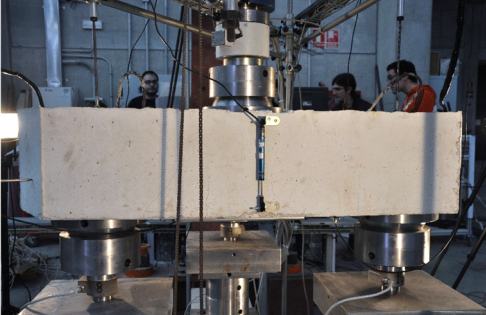
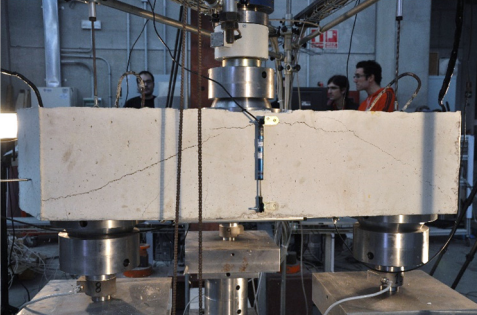
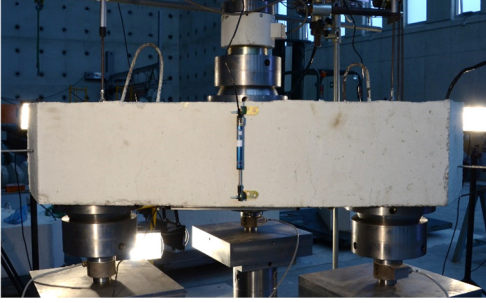
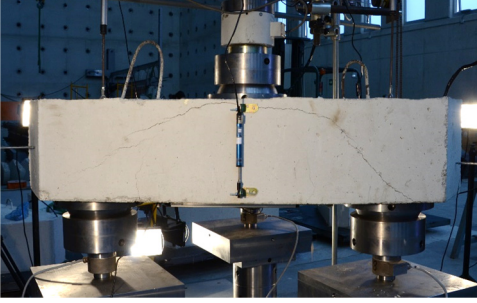


PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

E. RESULTADOS. PATRÓN DE FISURACIÓN



LEYENDA
— carga máxima
— colapso

| | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
|  |  UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA |  GOBIERNO DE ESPAÑA |  MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD | ESPÉCIMEN 3P-N-A1 pág.6/7 |
| PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes | | | | |
| F. FOTOS DE LOS ENSAYOS | | | | |
| CARA 1 – Instante de carga máxima | | CARA 1 – Colapso | | |
|  | |  | | |
| CARA 2 – Instante de carga máxima | | CARA 2 – Colapso | | |
|  | |  | | |
| CARA 3 – Instante de carga máxima | | CARA 3 – Colapso | | |
|  | |  | | |



ESPÉCIMEN
3P-N-A1
pág.7/7

PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes





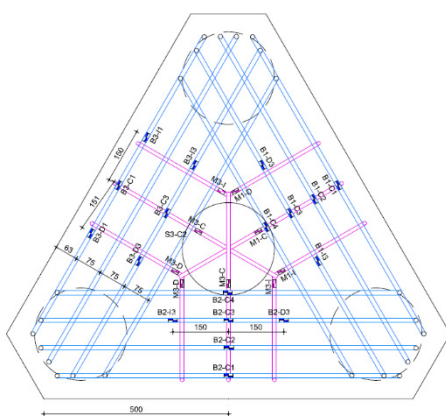
F. FOTOS DE LOS ENSAYOS

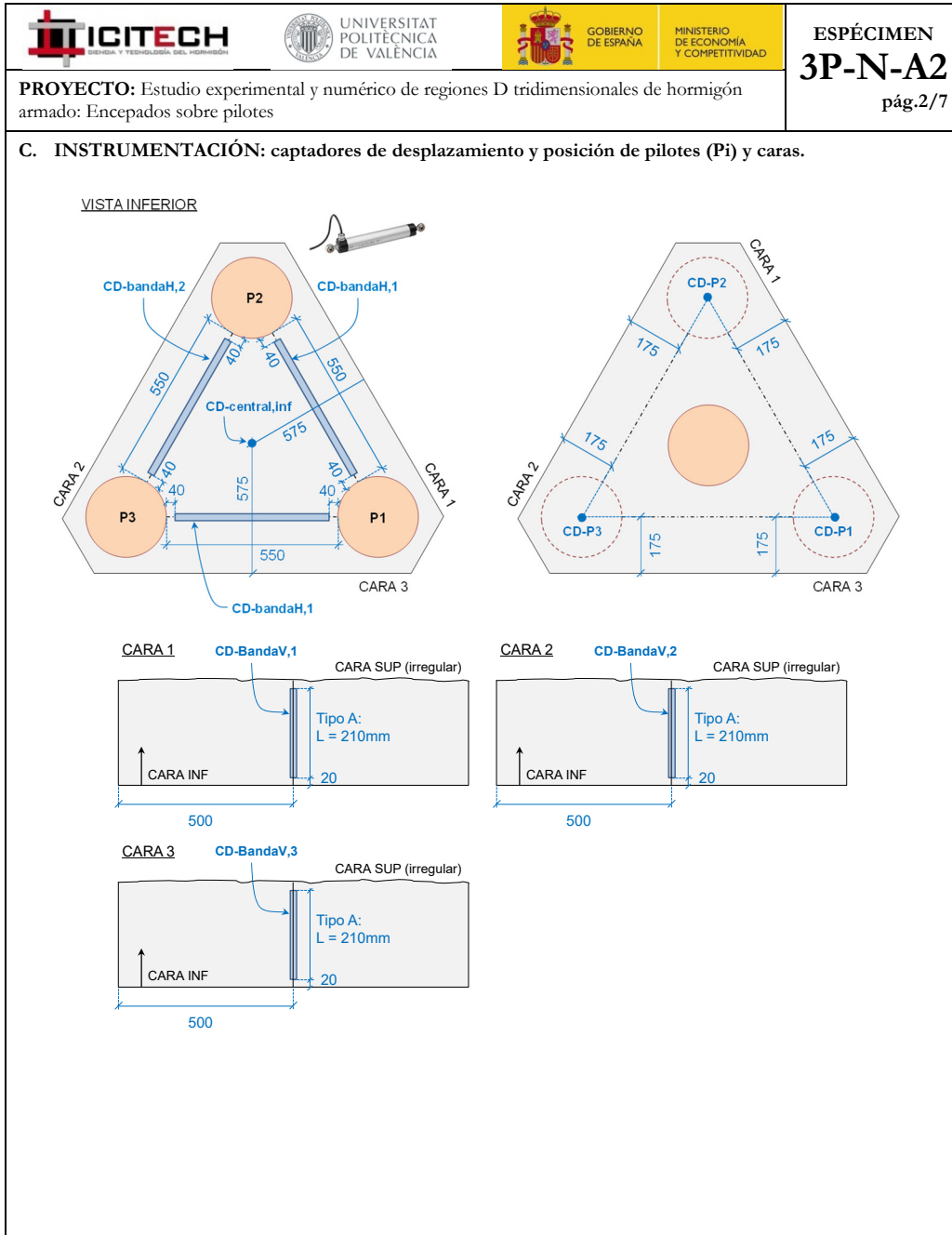
CARA INF – Instante de carga máxima



CARA INF – Colapso



| | | | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
|  |  UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA |  GOBIERNO DE ESPAÑA |  MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD | ESPÉCIMEN 3P-N-A2 pág.1/7 |
| PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes | | | | |
| A. DATOS PRINCIPALES DEL ENSAYO | | | | |
| <p>Fecha horm.: 03/11/2014 Fecha ensayo: 03/12/2014 Edad (días): 30 f_c / f_{ct} (MPa): 21.3 / 2.7</p> <p>Tipo sollicitación: carga centrada</p> <p>$\Sigma R_{max,W}$ (kN): 562.5 Modo de fallo: F-YB</p> | | | | |
| B. GEOMETRÍA DEL ENCEPADO Y ARMADO | | | | |
| <p>L (mm): 1000 h (mm): 250 e (mm): 800 ϕ (mm): 250 c (mm): 250 $r_{geo,inf}$ (mm): 40</p> | Descripción del armado y su monitorización: |  | | |
| <p>ARMADO</p> <p>Banda: 4ϕ12</p> <p>Sec. horizontal: 3ϕ10</p> <p>Sec. vertical: -</p> | <p>ARMADO</p> <p>BANDA: 4ϕ12</p> <p>SEC. HORIZ: 3ϕ10</p> <p>SEC. VERTICAL: -</p> <p>NOMENCLATURA GALGAS</p> <p>GA2-id sistema</p> <p>27 GALGAS</p> | | | |

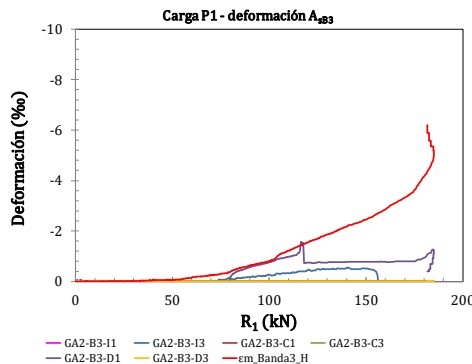
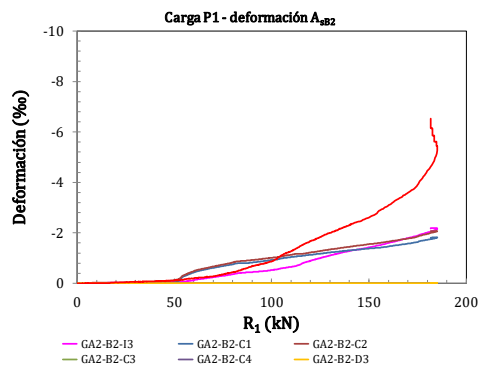
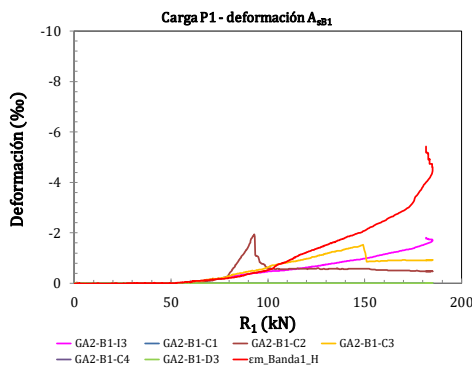
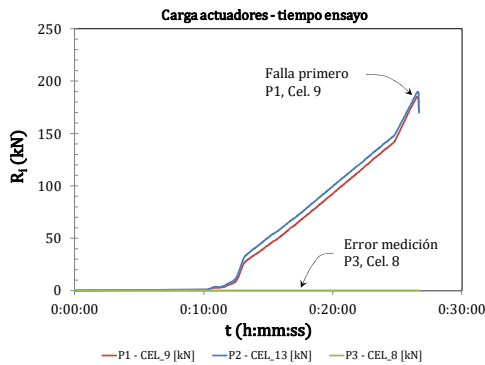


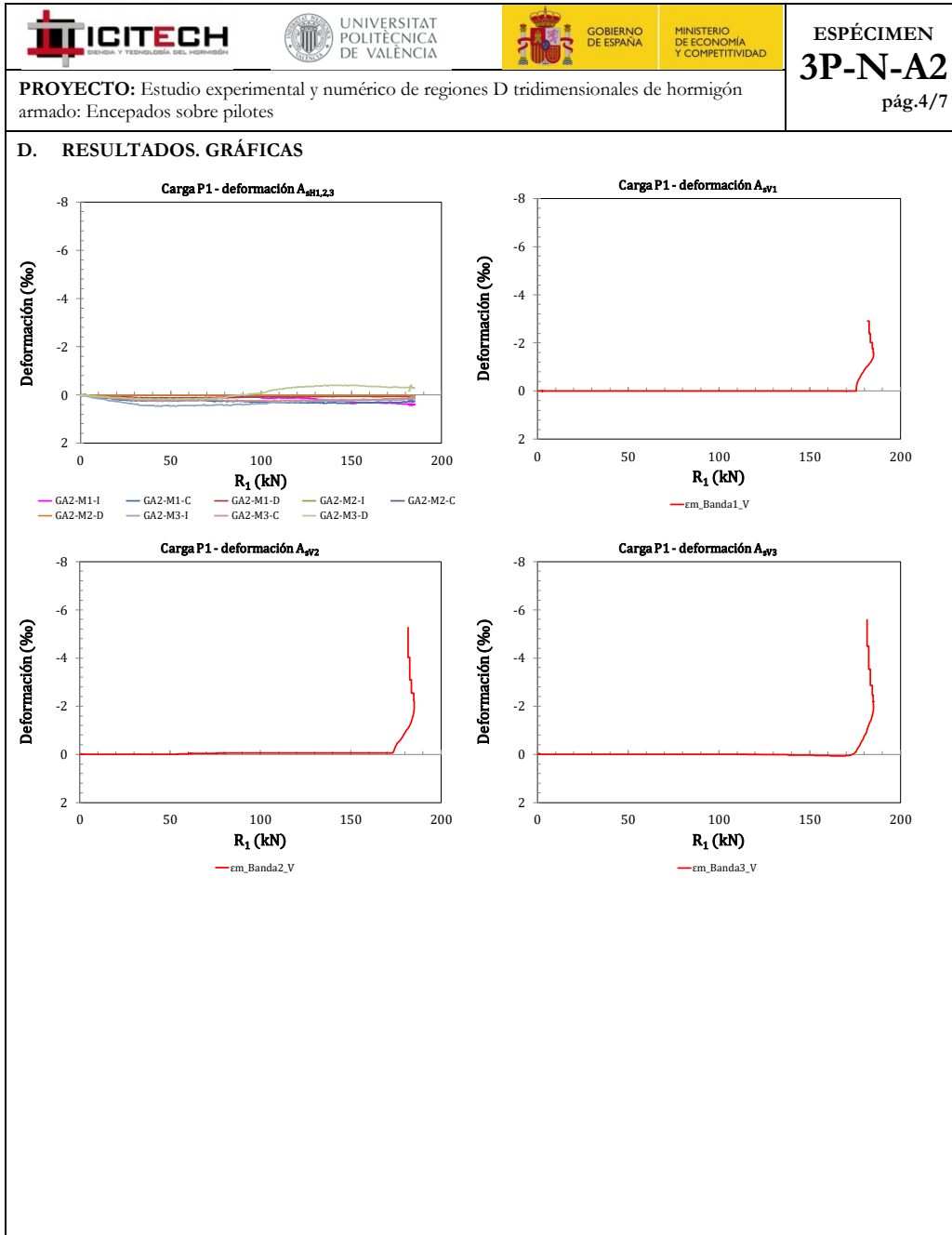


ESPÉCIMEN
3P-N-A2
pág.3/7

PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

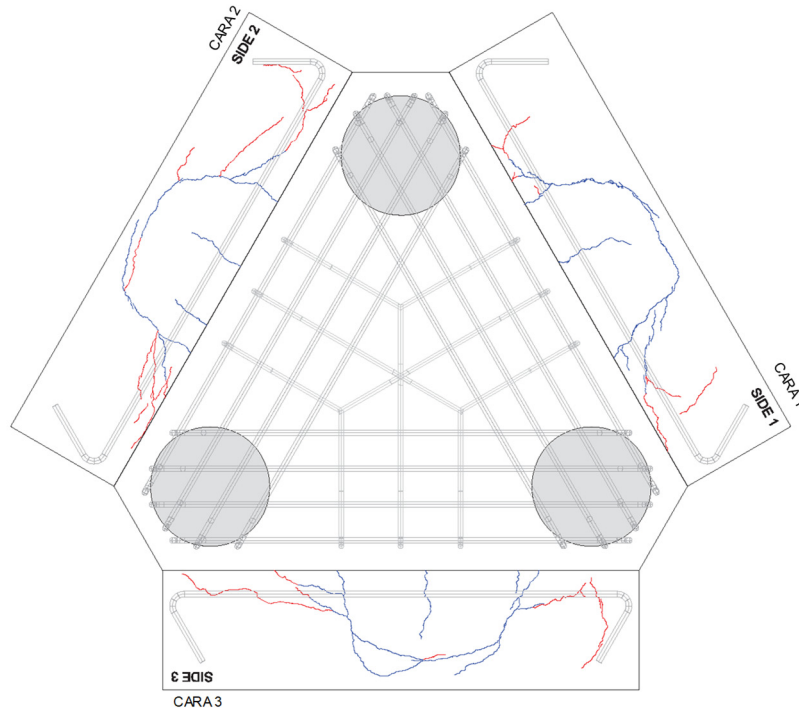
D. RESULTADOS. GRÁFICAS









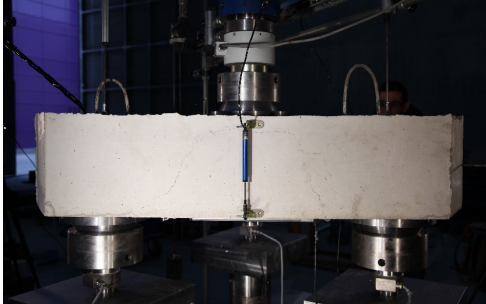
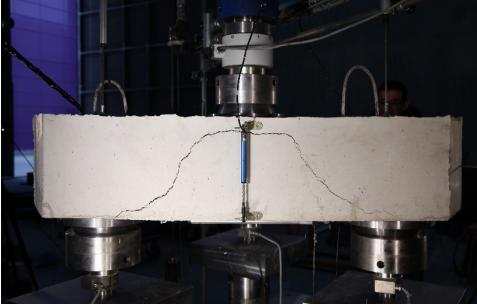
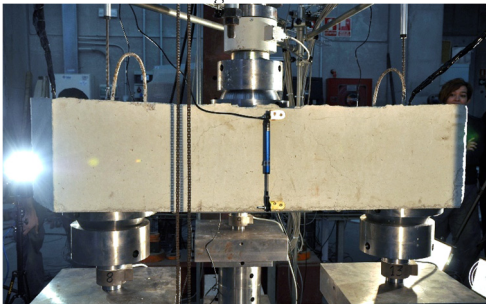
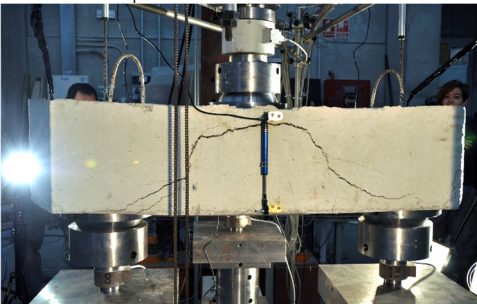


PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

E. RESULTADOS. PATRÓN DE FISURACIÓN



LEYENDA

- carga máxima
- colapso

| | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
|  |  UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA |  GOBIERNO DE ESPAÑA |  MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD | ESPÉCIMEN 3P-N-A2 pág.6/7 |
| PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes | | | | |
| F. FOTOS DE LOS ENSAYOS | | | | |
| CARA 1 – Instante de carga máxima | | | | |
|  | | CARA 1 – Colapso | | |
|  | | CARA 2 – Instante de carga máxima | | |
|  | | CARA 2 – Colapso | | |
|  | | CARA 3 – Instante de carga máxima | | |
|  | | CARA 3 – Colapso | | |
|  | | | | |



ESPÉCIMEN
3P-N-A2
pág.7/7

PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

F. FOTOS DE LOS ENSAYOS

CARA INF – Instante de carga máxima



CARA INF – Colapso





ESPÉCIMEN
3P-N-A3
pág.1/7

PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

A. DATOS PRINCIPALES DEL ENSAYO

Fecha horm.: 03/11/2014
Fecha ensayo: 09/12/2014
Edad (días): 36
 f_c / f_{ct} (MPa): 23.7 / 2.5

Tipo sollicitación: carga centrada

$\Sigma R_{max,W}$ (kN): 612.3
Modo de fallo: F-YB

B. GEOMETRÍA DEL ENCEPADO Y ARMADO

Descripción del armado y su monitorización:

L (mm): 1000
h (mm): 250
e (mm): 800
 ϕ (mm): 250
c (mm): 250
 $r_{geo,inf}$ (mm): 40

ARMADO

Banda:
4 ϕ 12

Sec. horizontal:
3 ϕ 10

Sec. vertical:
3c ϕ 8

45 GALGAS:
GA3-id s/plano

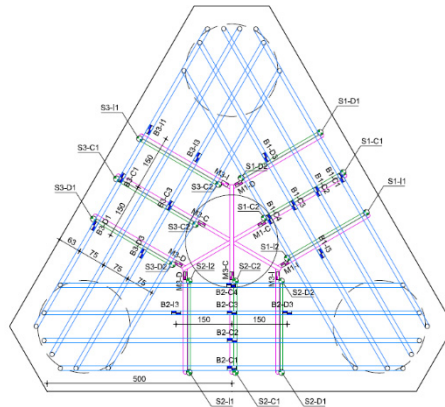
ARMADO

BANDA:
4 ϕ 12
SEC. HORIZ:
3 ϕ 10
SEC. VERTICAL:
3c ϕ 8

NOMENCLATURA GALGAS

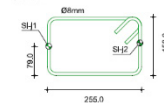
GA3 - id s/plano

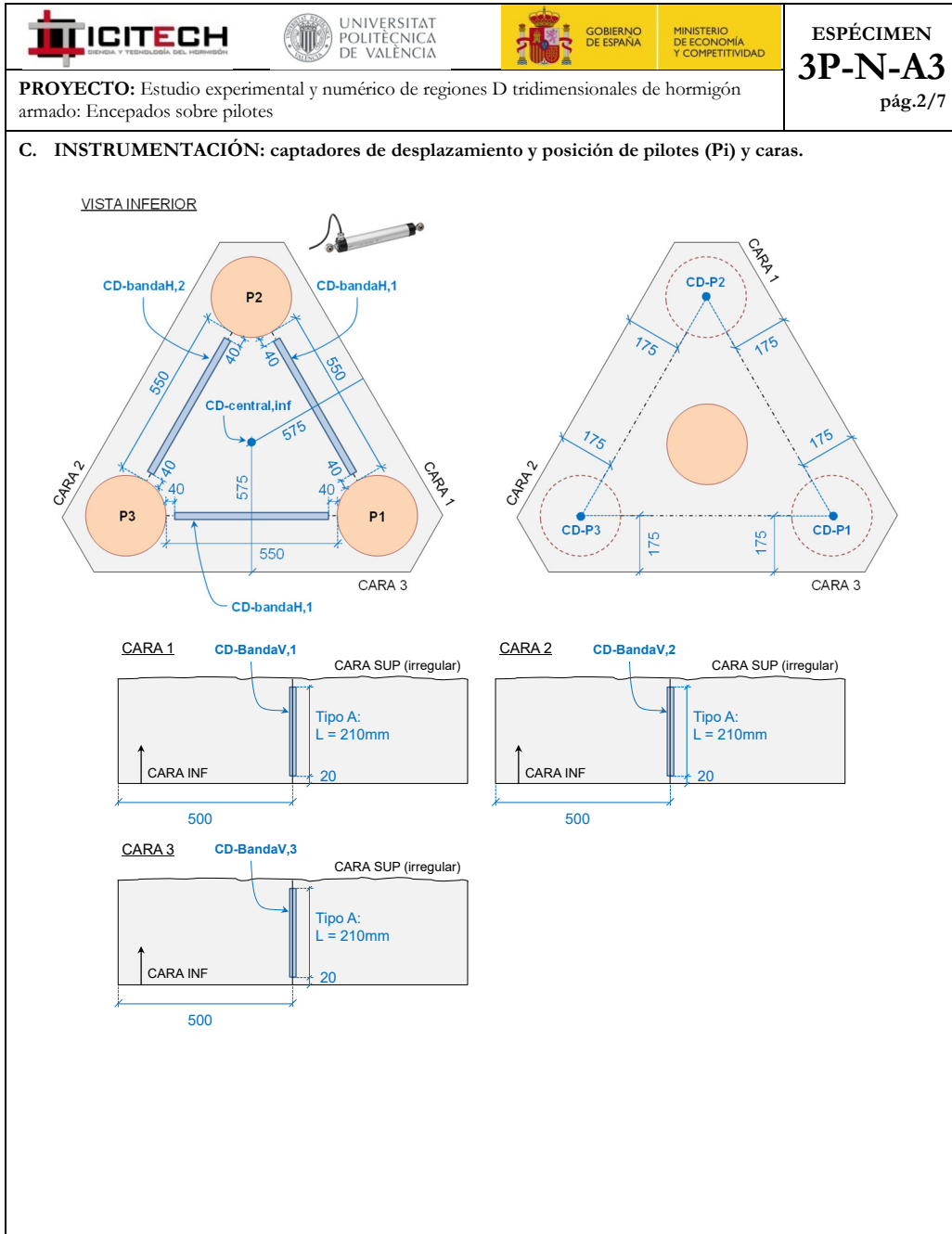
45 GALGAS



GALGAS EN CERCOS

i: 1, 2, 3
j: I, C, D



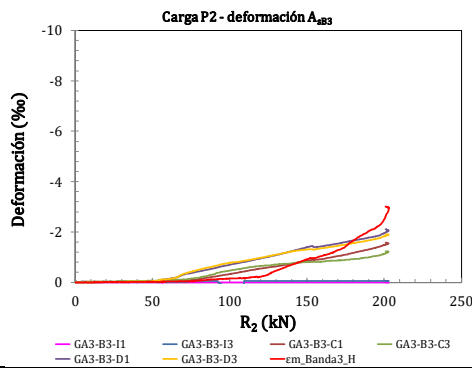
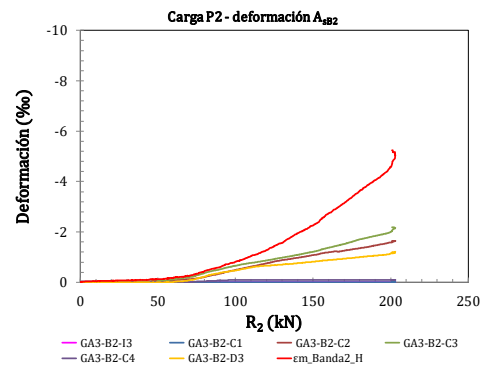
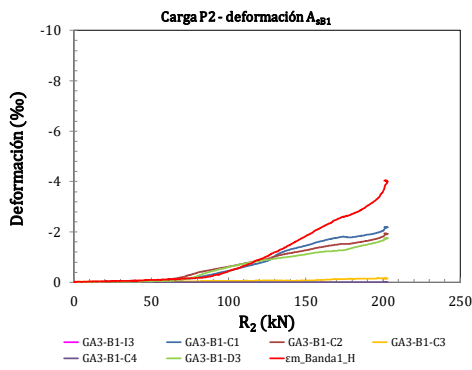
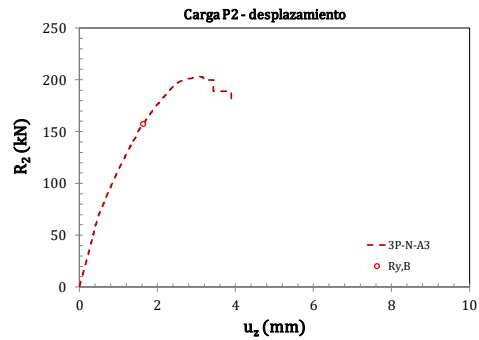
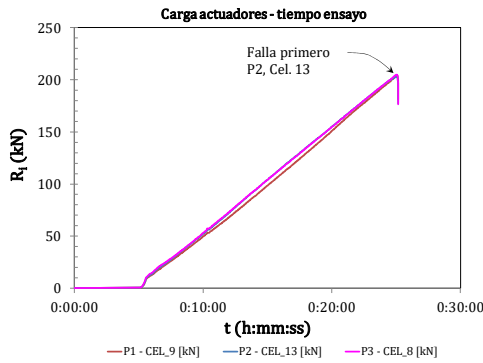


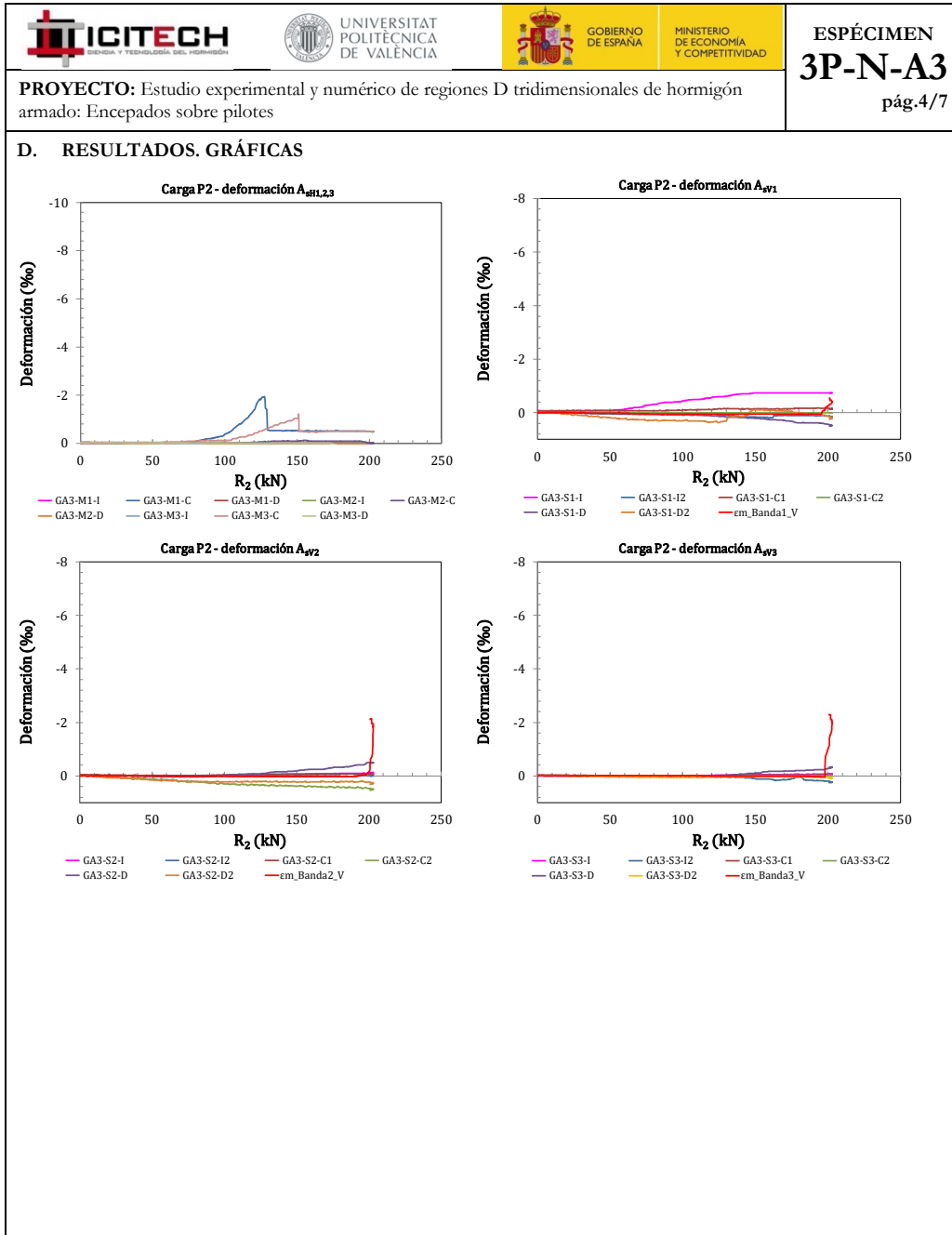


ESPÉCIMEN
3P-N-A3
pág.3/7

PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

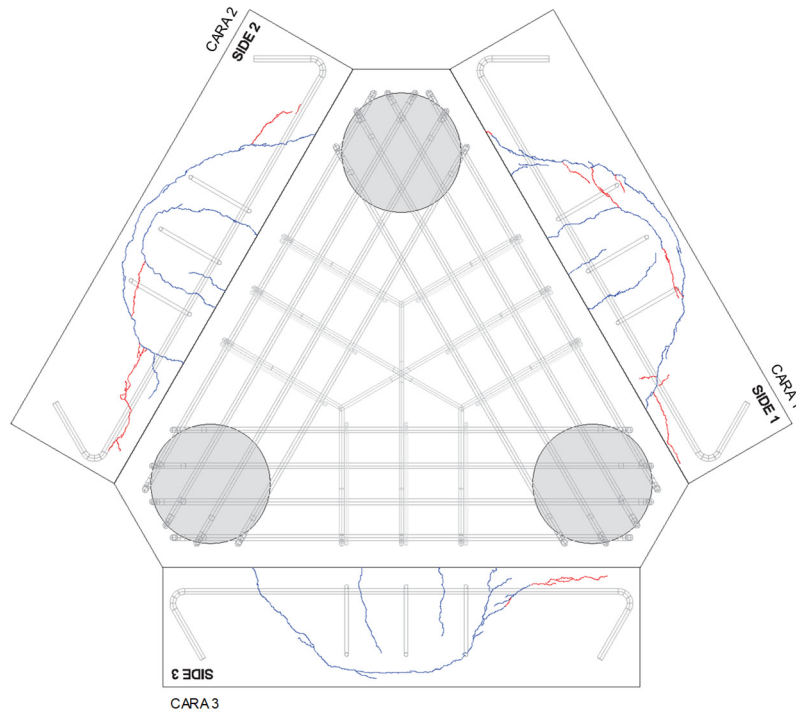
D. RESULTADOS. GRÁFICAS









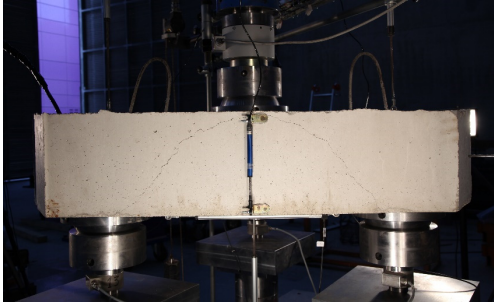

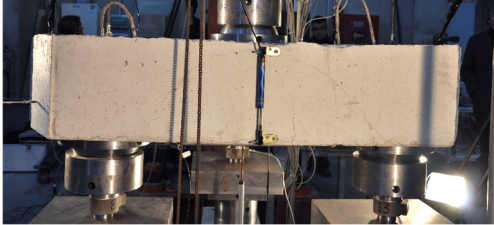

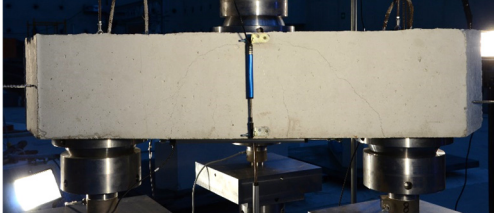

PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

E. RESULTADOS. PATRÓN DE FISURACIÓN



LEYENDA

- carga máxima
- colapso

| | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
|  |  UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA |  GOBIERNO DE ESPAÑA |  MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD | ESPÉCIMEN 3P-N-A3 pág.6/7 |
| PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes | | | | |
| F. FOTOS DE LOS ENSAYOS | | | | |
| CARA 1 – Instante de carga máxima | | | | |
|  | | | | |
| CARA 1 – Colapso | | | | |
|  | | | | |
| CARA 2 – Instante de carga máxima | | | | |
|  | | | | |
| CARA 2 – Colapso | | | | |
|  | | | | |
| CARA 3 – Instante de carga máxima | | | | |
|  | | | | |
| CARA 3 – Colapso | | | | |
|  | | | | |



ESPÉCIMEN
3P-N-A3
pág.7/7

PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes





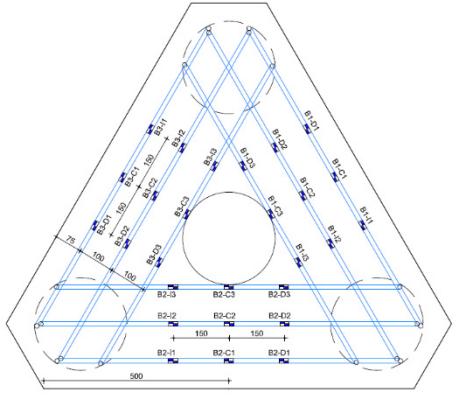
F. FOTOS DE LOS ENSAYOS

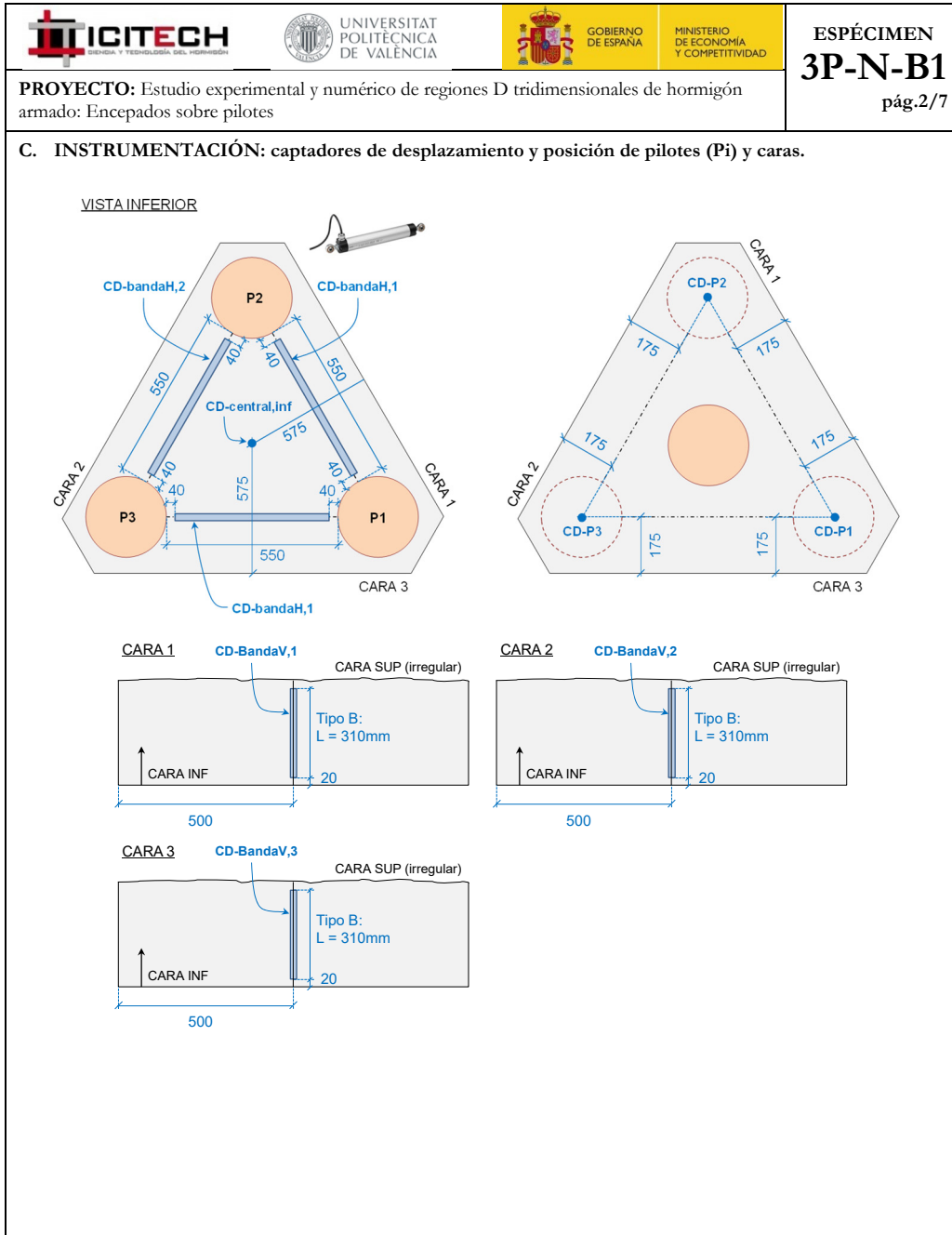
CARA INF – Instante de carga máxima



CARA INF – Colapso



| | | | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
|  |  UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA |  GOBIERNO DE ESPAÑA |  MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD | ESPÉCIMEN 3P-N-B1 pág.1/7 |
| PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes | | | | |
| A. DATOS PRINCIPALES DEL ENSAYO | | | | |
| Fecha horm.: 20/11/2014 Fecha ensayo: 12/12/2014 Edad (días): 22 f_c / f_{ct} (MPa): 24.7 / 3.2 Tipo sollicitación: carga centrada $\Sigma R_{max,W}$ (kN): 711.6 Modo de fallo: F-YB | | | | |
| B. GEOMETRÍA DEL ENCEPADO Y ARMADO | | | | |
| Descripción del armado y su monitorización: | | | | |
| L (mm): 1000 h (mm): 350 e (mm): 800 ϕ (mm): 250 c (mm): 250 $r_{geo,inf}$ (mm): 40 | ARMADO BANDA: 2012+10110 SEC. HORIZ: 203 SEC. VERTICAL: 3008 |  | | |
| ARMADO | NOMENCLATURA GALGAS GB1 - 11 s/plano | 27 GALGAS | | |
| Banda: 2 ϕ 12+1 ϕ 10 | | | | |
| Sec. horizontal: | | | | |
| - Sec. vertical: | | | | |
| 27 GALGAS: GB1-id s/plano | | | | |

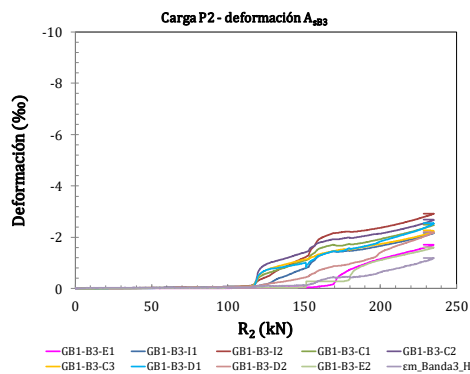
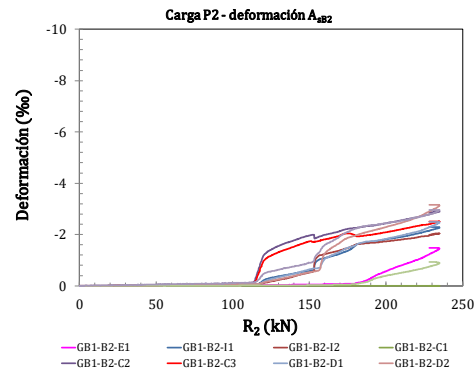
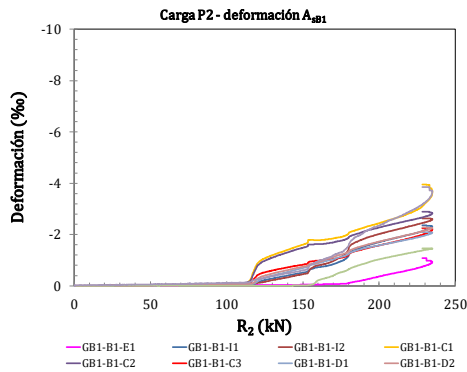
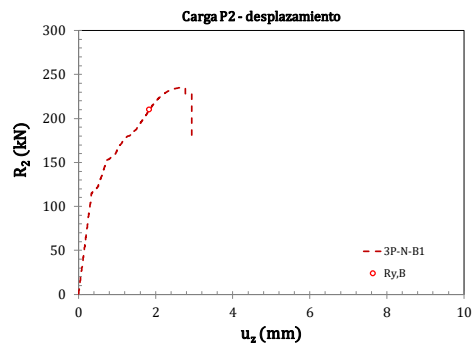
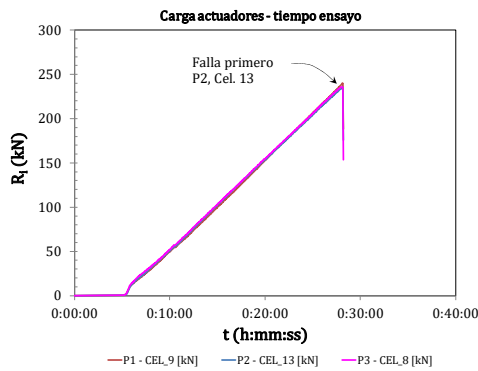


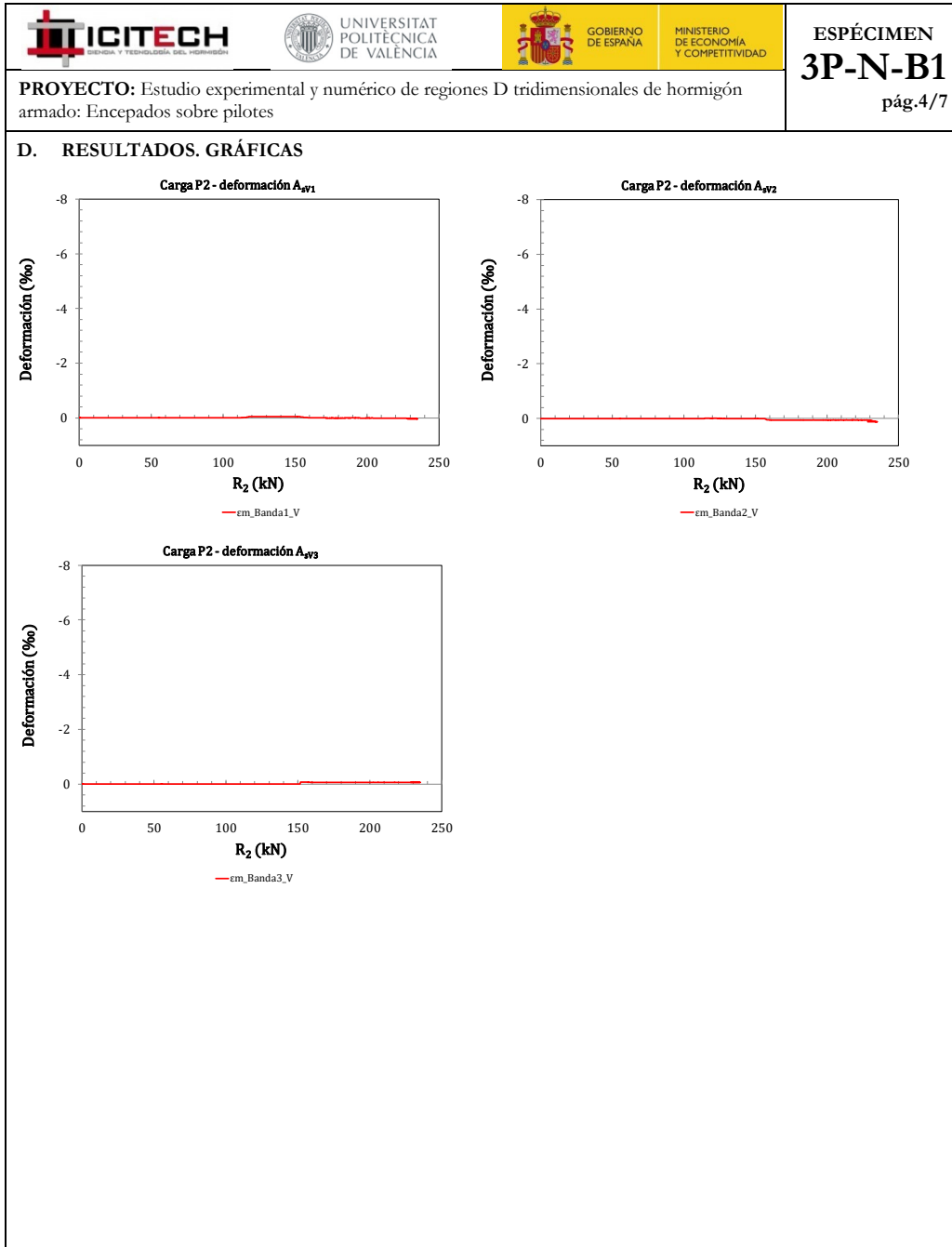


ESPÉCIMEN
3P-N-B1
pág.3/7

PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

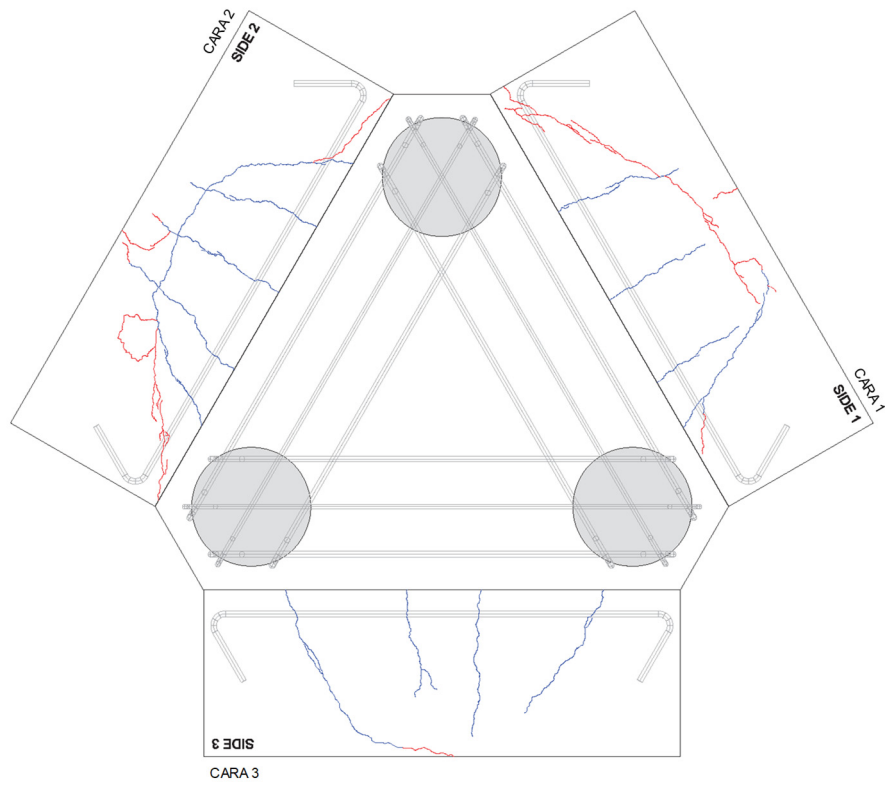
D. RESULTADOS. GRÁFICAS









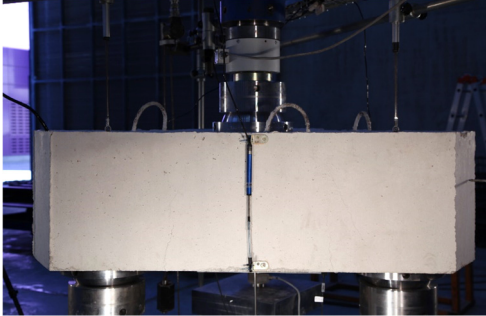
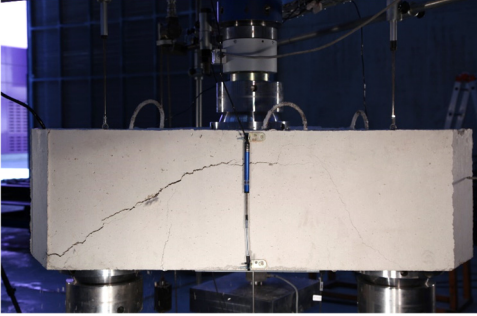
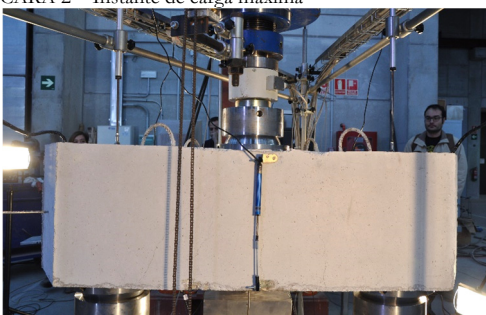
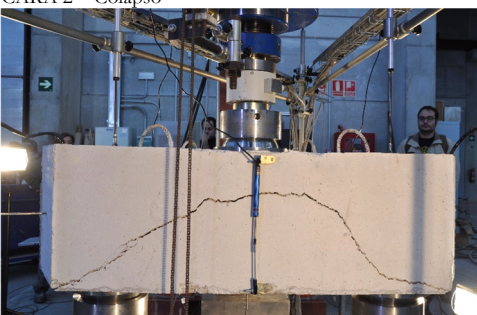
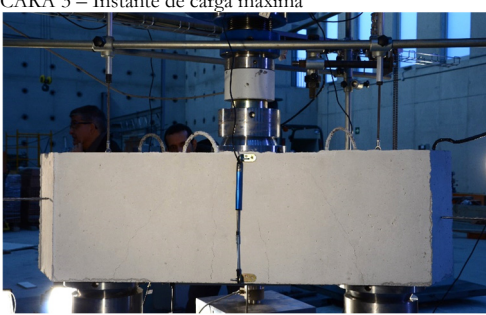
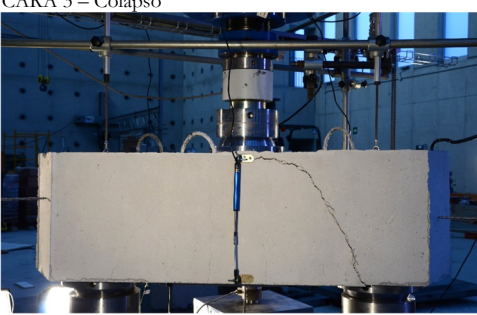
PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

E. RESULTADOS. PATRÓN DE FISURACIÓN



LEYENDA

- carga máxima
- colapso

| | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
|  |  UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA |  GOBIERNO DE ESPAÑA |  MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD | ESPÉCIMEN 3P-N-B1 pág.6/7 |
| PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes | | | | |
| F. FOTOS DE LOS ENSAYOS | | | | |
| CARA 1 – Instante de carga máxima | | CARA 1 – Colapso | | |
|  | |  | | |
| CARA 2 – Instante de carga máxima | | CARA 2 – Colapso | | |
|  | |  | | |
| CARA 3 – Instante de carga máxima | | CARA 3 – Colapso | | |
|  | |  | | |

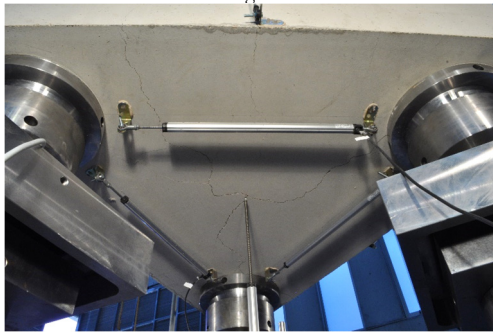


ESPÉCIMEN
3P-N-B1
pág.7/7

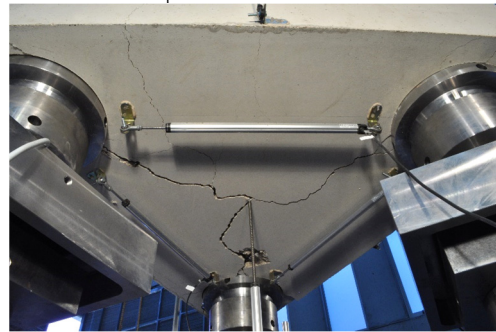
PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

F. FOTOS DE LOS ENSAYOS





CARA INF – Instante de carga máxima

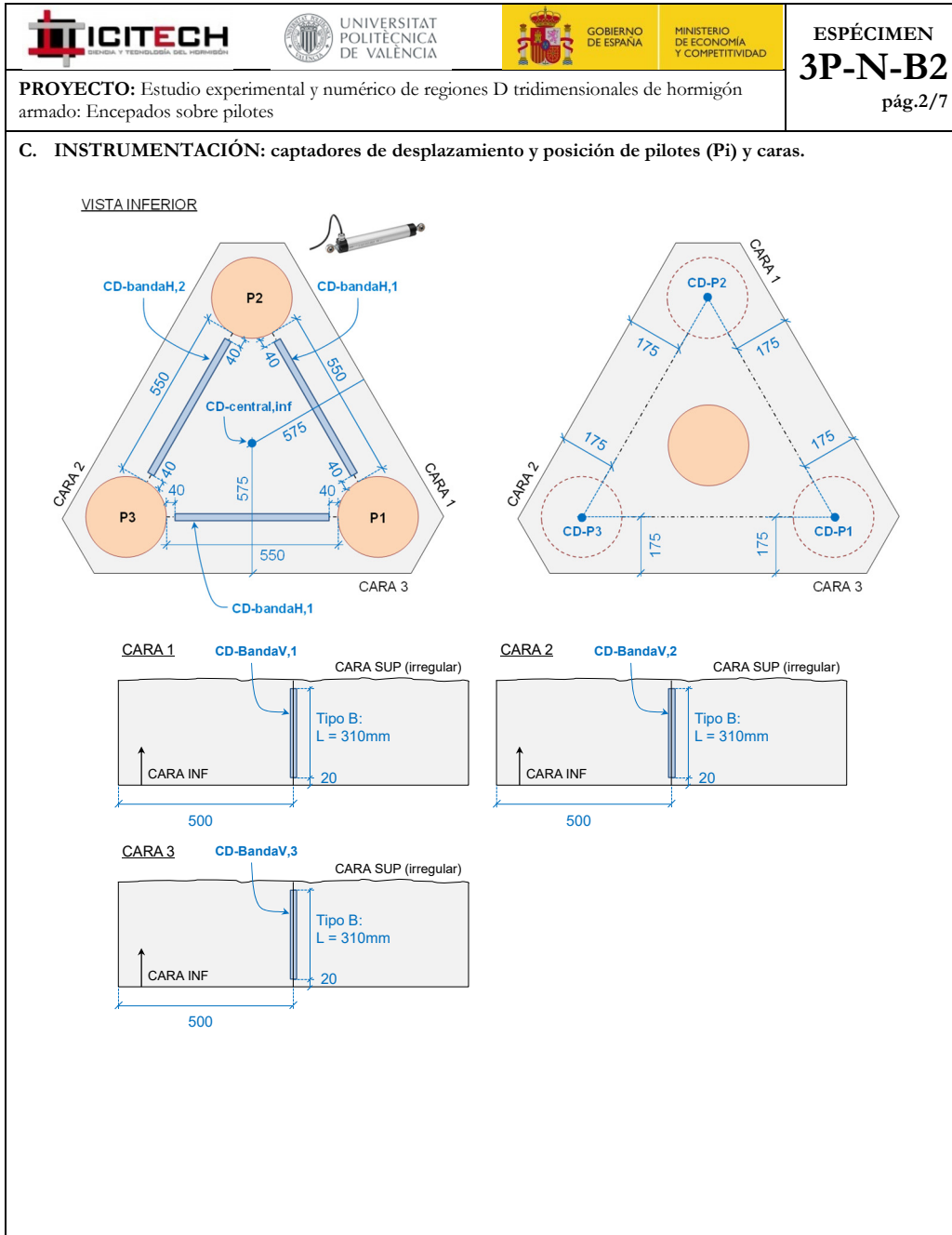


CARA INF – Colapso



*Estudio de encepados de tres y cuatro pilotes solicitados por cargas centradas y excéntricas:
análisis experimental y de las formulaciones de diseño*

| | | | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
|  |  UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA |  GOBIERNO DE ESPAÑA |  MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD | ESPÉCIMEN 3P-N-B2 pág.1/7 |
| PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes | | | | |
| A. DATOS PRINCIPALES DEL ENSAYO Fecha horm.: 20/11/2014 Fecha ensayo: 16/12/2014 Edad (días): 26 f_c / f_{ct} (MPa): 26.3 / 3.1 Tipo sollicitación: carga centrada $\Sigma R_{max,W}$ (kN): 762.6 Modo de fallo: F-Y _{BH} | | | | |
| B. GEOMETRÍA DEL ENCEPADO Y ARMADO Descripción del armado y su monitorización: <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div data-bbox="399 929 558 1086"> <p>L (mm): 1000 h (mm): 350 e (mm): 800 ϕ (mm): 250 c (mm): 250 $r_{geo,inf}$ (mm): 40</p> </div> <div data-bbox="590 1041 662 1131"> <p>ARMADO BANDA: 2Ø12+1Ø10 SEC. HORIZ: 3Ø8 SEC. VERTICAL: 3øØ8</p> </div> <div data-bbox="590 1198 694 1243"> <p>NOMENCLATURA GALGAS ØB2 - id s/plano</p> </div> <div data-bbox="590 1265 662 1288"> <p>28 GALGAS</p> </div> <div data-bbox="319 1142 446 1422"> <p>ARMADO Banda: 2Ø12+1Ø10 Sec. horizontal: 3Ø8 Sec. vertical: -</p> </div> <div data-bbox="319 1489 462 1568"> <p>28 GALGAS: ØB2-id s/plano</p> </div> <div data-bbox="718 1041 1173 1433"> </div> </div> | | | | |

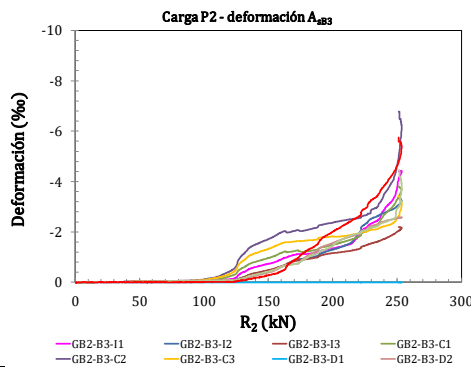
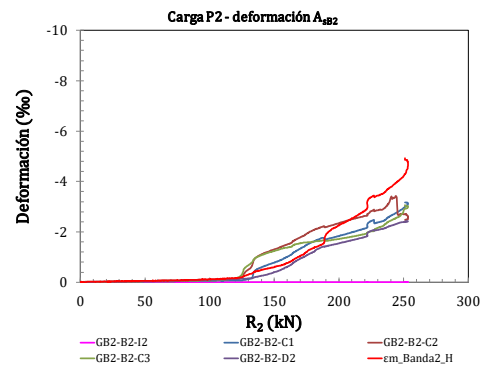
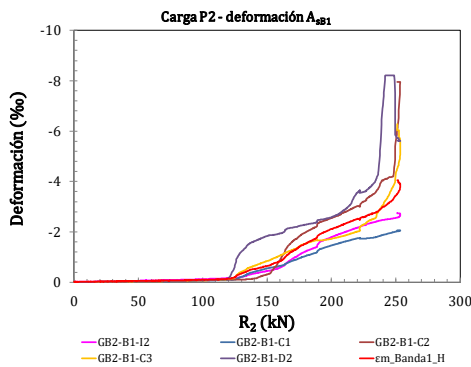
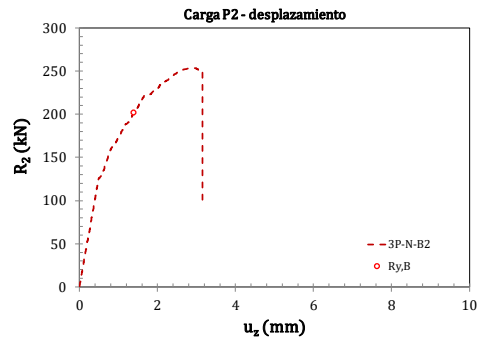
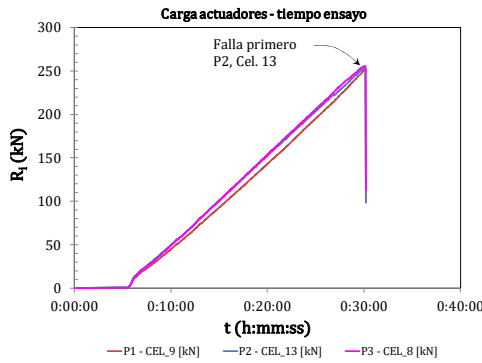


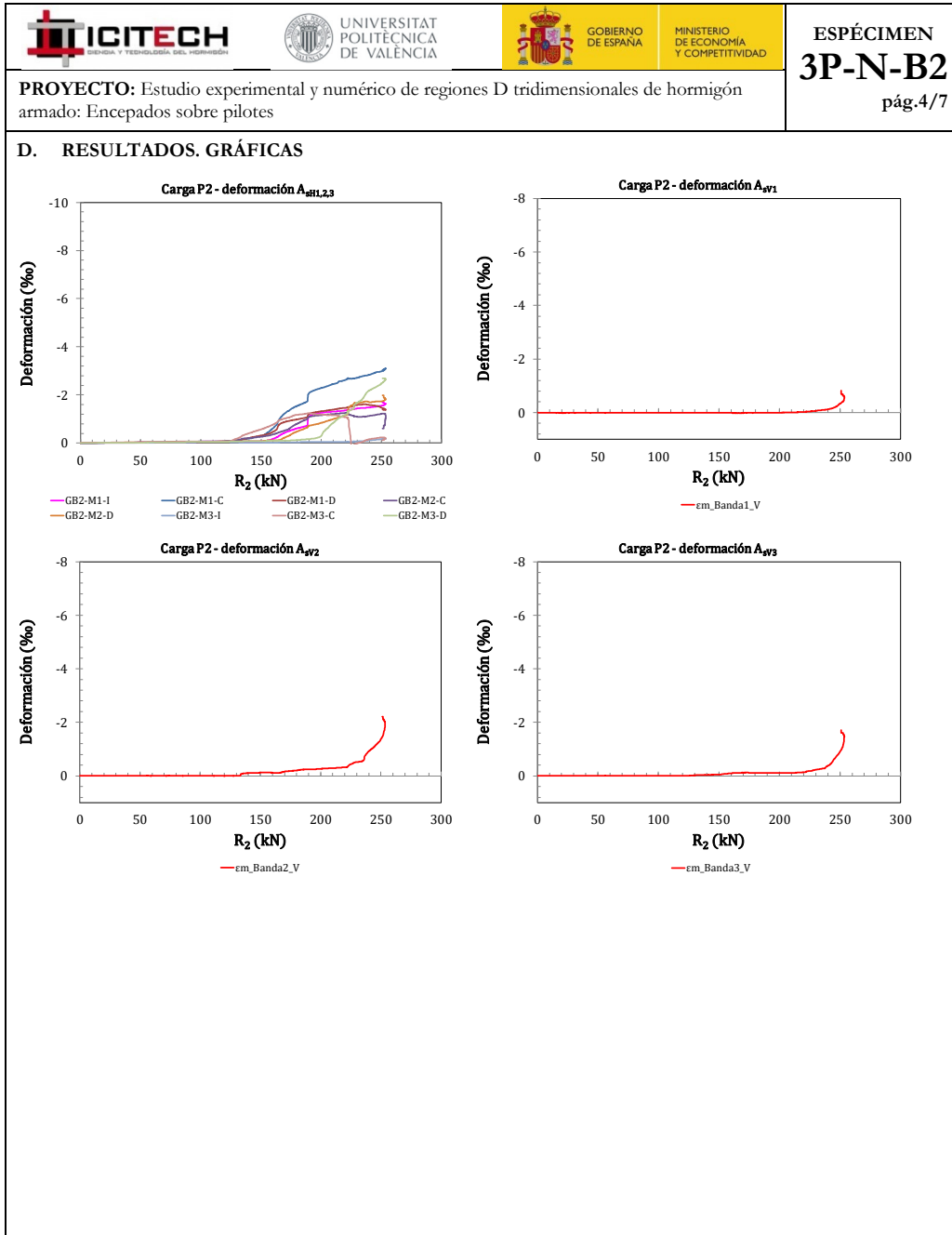


ESPÉCIMEN
3P-N-B2
pág.3/7

PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

D. RESULTADOS. GRÁFICAS







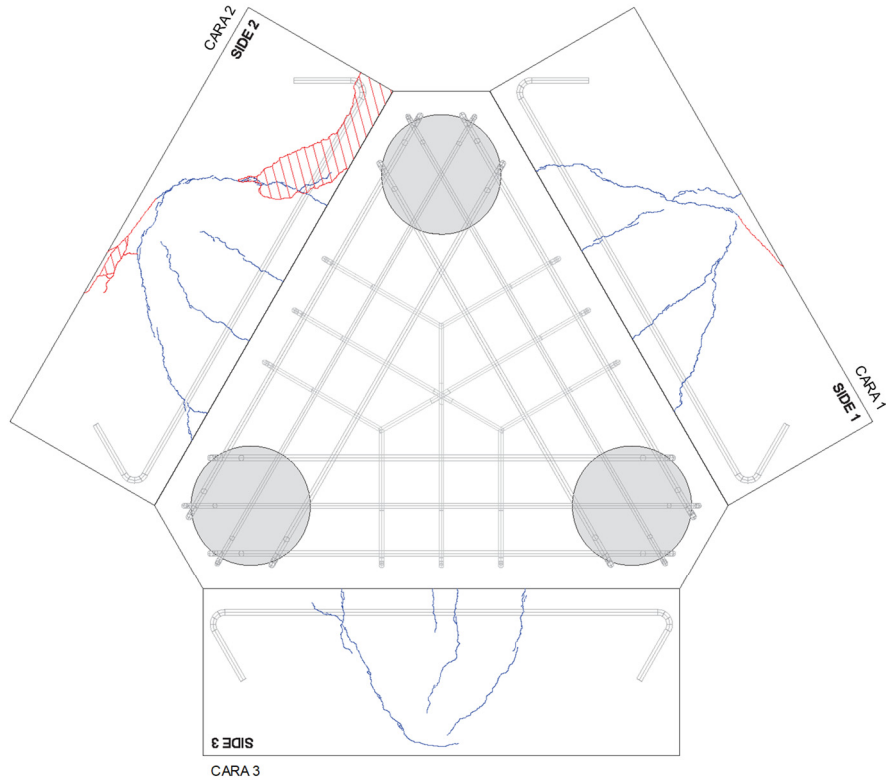
GOBIERNO DE ESPAÑA

MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD

ESPÉCIMEN
3P-N-B2
pág.5/7





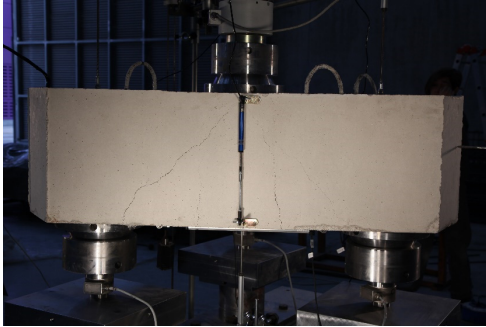
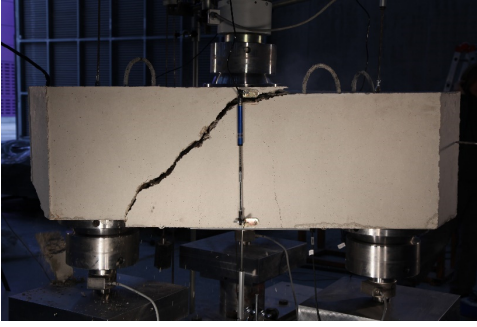
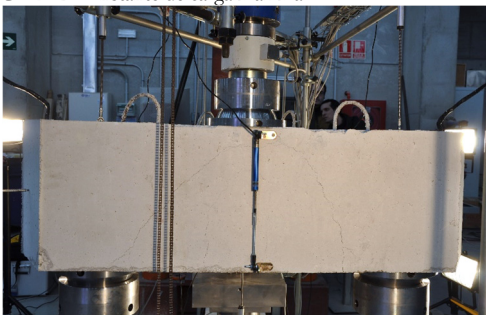
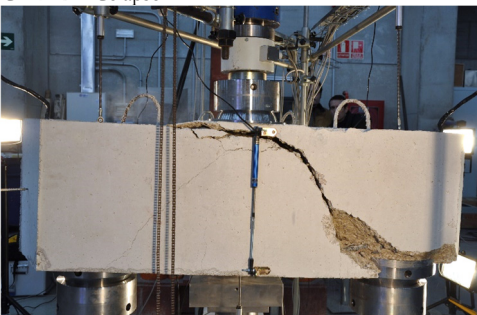
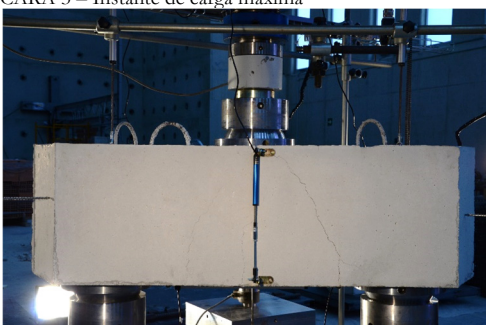
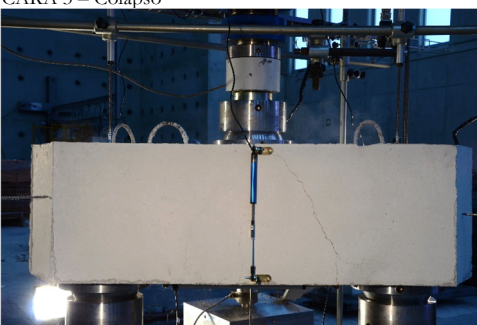
PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

E. RESULTADOS. PATRÓN DE FISURACIÓN



LEYENDA

- carga máxima
- colapso

| | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
|  |  UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA |  GOBIERNO DE ESPAÑA |  MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD | ESPÉCIMEN 3P-N-B2 pág.6/7 |
| PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes | | | | |
| F. FOTOS DE LOS ENSAYOS | | | | |
| CARA 1 – Instante de carga máxima | | CARA 1 – Colapso | | |
|  | |  | | |
| CARA 2 – Instante de carga máxima | | CARA 2 – Colapso | | |
|  | |  | | |
| CARA 3 – Instante de carga máxima | | CARA 3 – Colapso | | |
|  | |  | | |

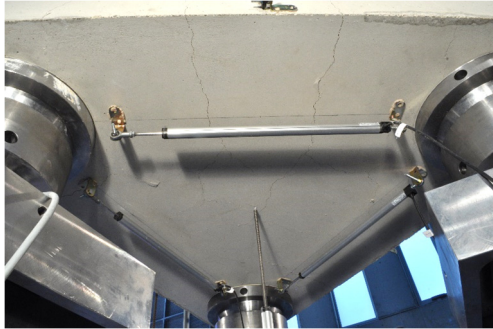


ESPÉCIMEN
3P-N-B2
pág.7/7

PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

F. FOTOS DE LOS ENSAYOS

CARA INF – Instante de carga máxima



CARA INF – Colapso





ESPÉCIMEN
3P-N-B3
pág.1/7

PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

A. DATOS PRINCIPALES DEL ENSAYO

Fecha horm.: 20/11/2014
Fecha ensayo: 19/12/2014
Edad (días): 29
 f_c / f_{ct} (MPa): 26.5 / 2.9

Tipo sollicitación: carga centrada

$\Sigma R_{max,W}$ (kN): 778.0
Modo de fallo: F-YBH

B. GEOMETRÍA DEL ENCEPADO Y ARMADO

Descripción del armado y su monitorización:

L (mm): 1000
h (mm): 350
e (mm): 800
 ϕ (mm): 250
c (mm): 250
 $r_{geo,inf}$ (mm): 40

ARMADO
BANDA:
2Ø12+1Ø10
SEC. HORIZ:
3Ø8
SEC. VERTICAL:
3cØ8

NOMENCLATURA GALGAS
GB3 - id s/plano

46 GALGAS

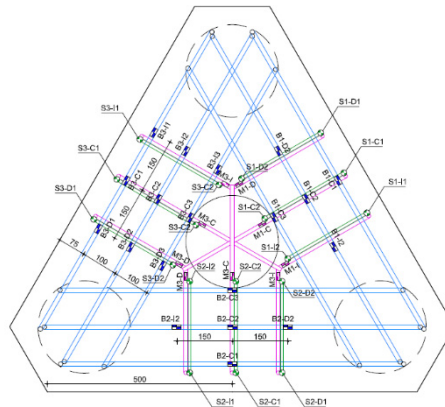
ARMADO

Banda:
2Ø12+1Ø10

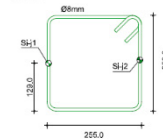
Sec. horizontal:
3Ø8

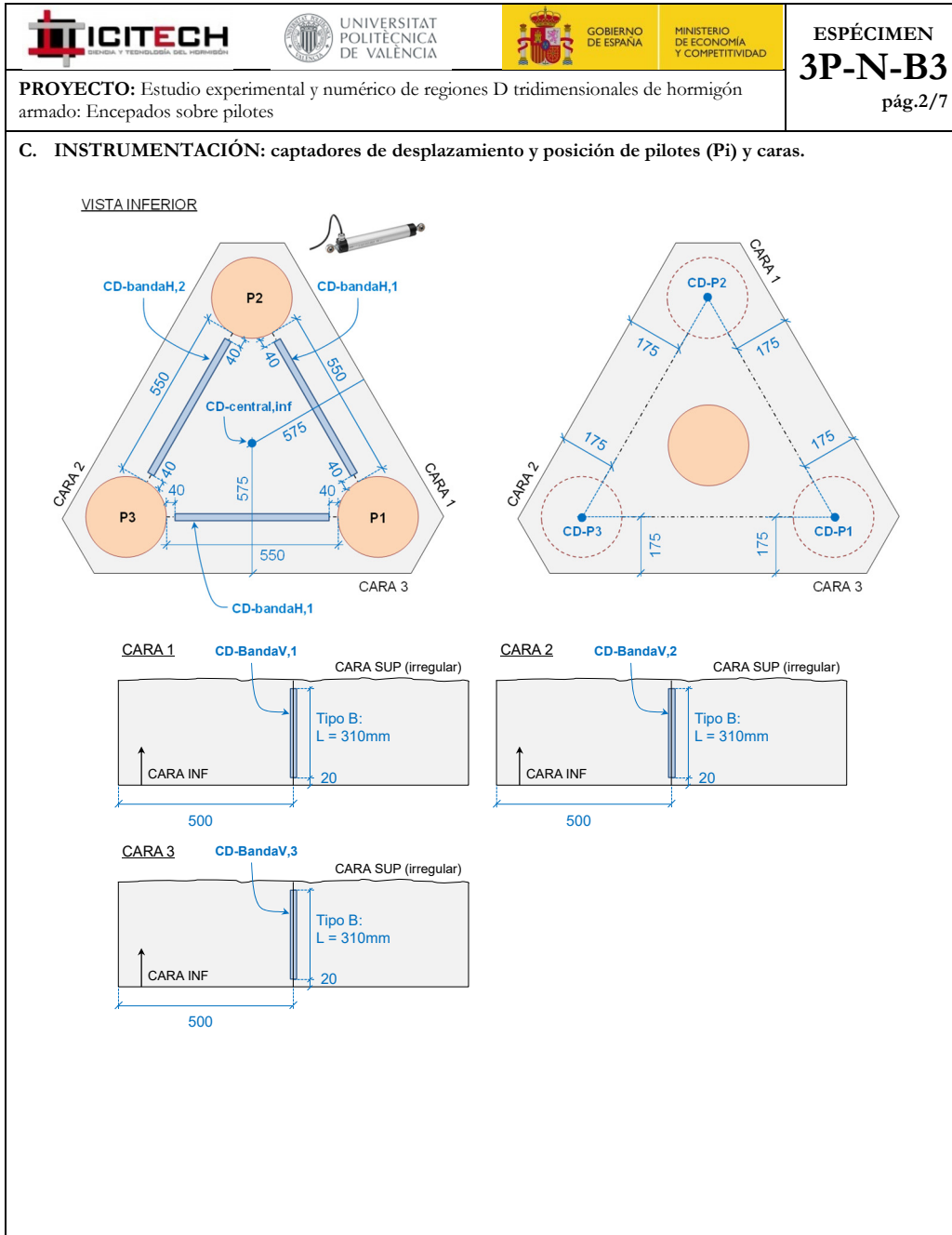
Sec. vertical:
3cØ8

46 GALGAS:
GB3-id s/plano



GALGAS EN CERCOS
I: 1, 2, 3
J: 1, C, D



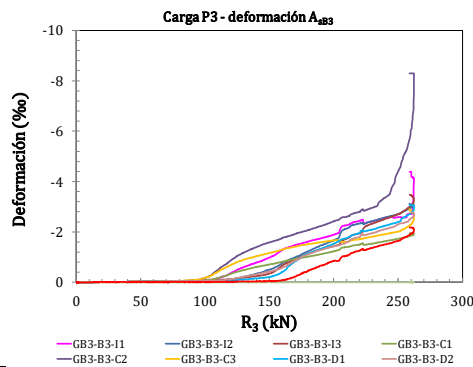
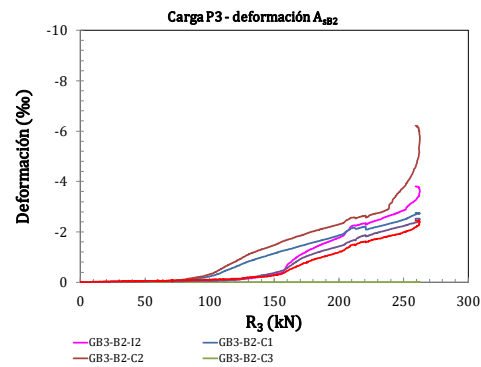
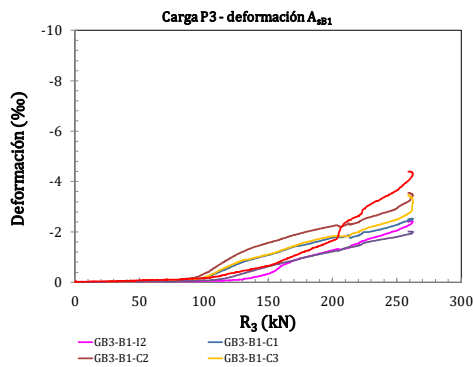
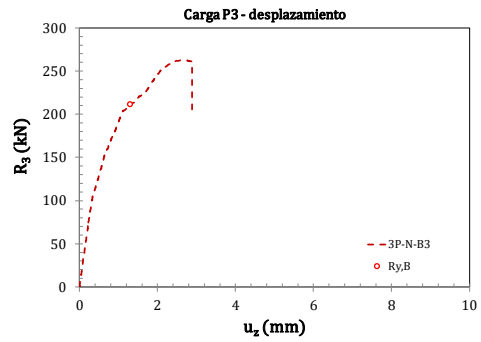
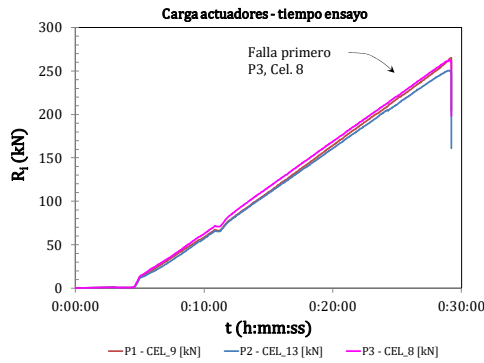


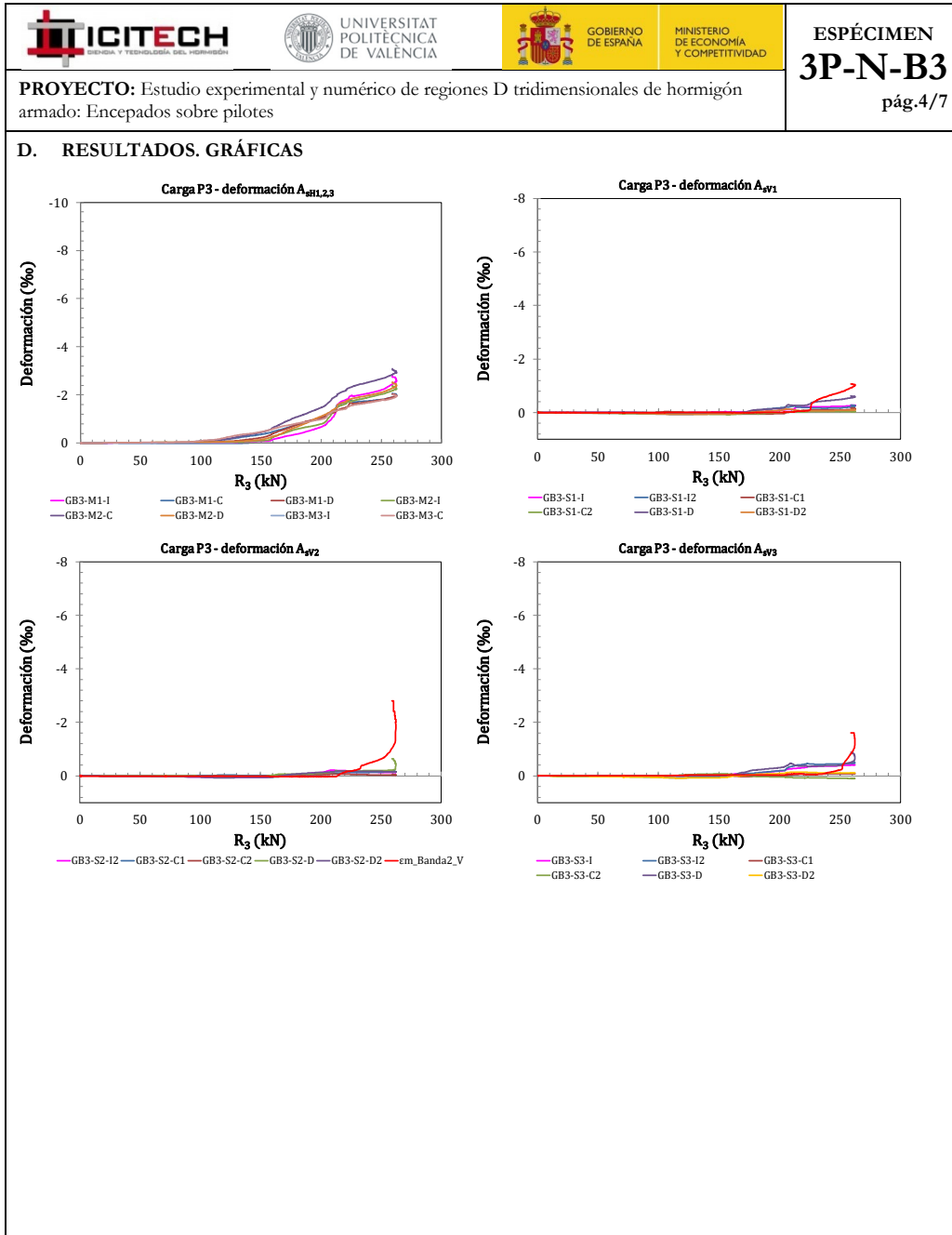


ESPÉCIMEN
3P-N-B3
pág.3/7

PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

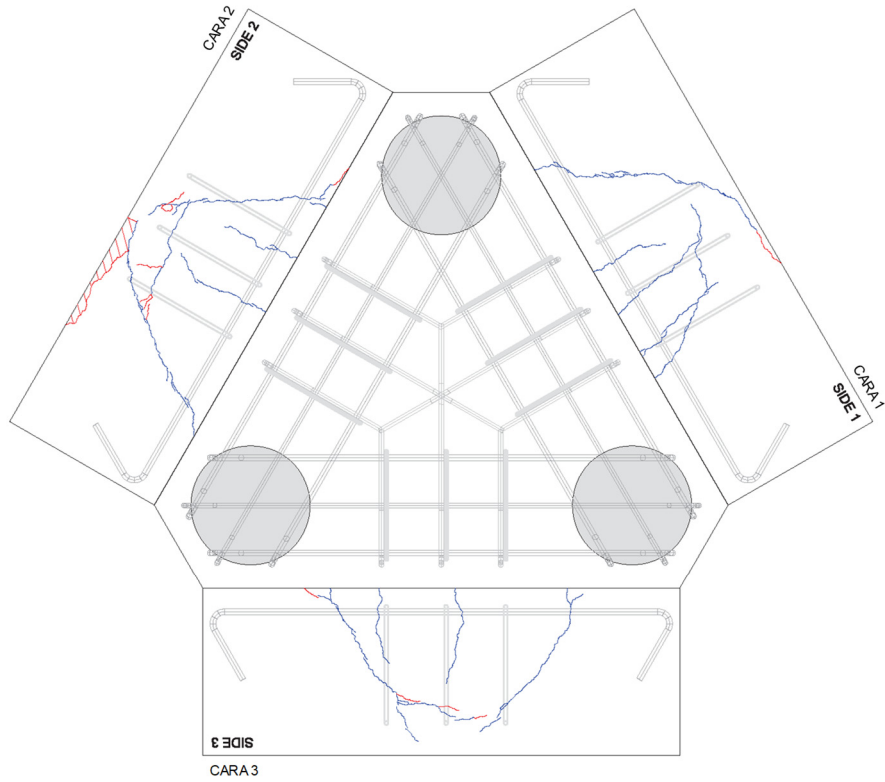
D. RESULTADOS. GRÁFICAS








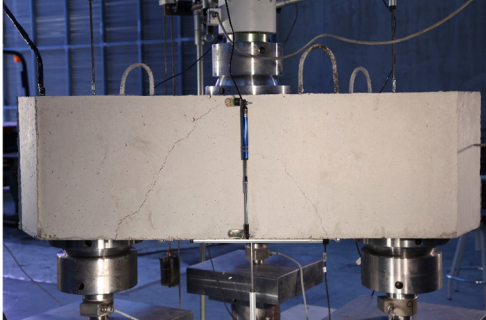
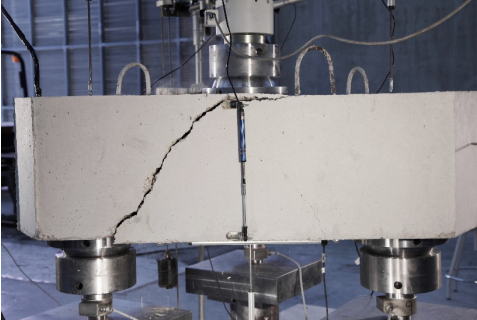
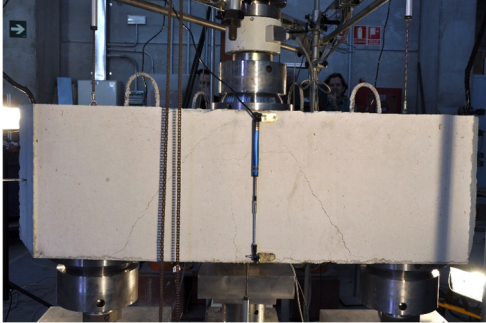
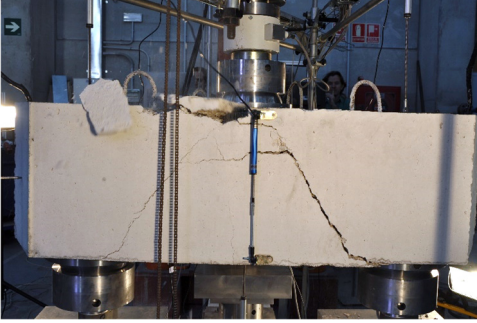
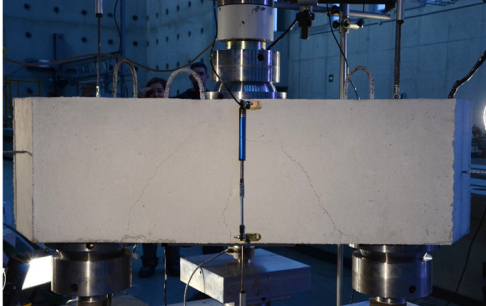
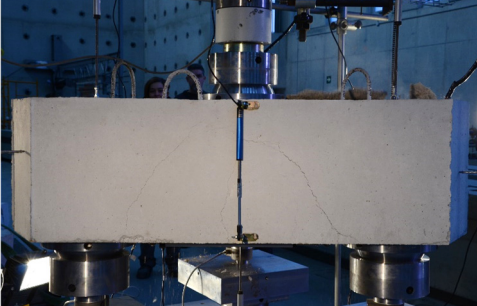
PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

E. RESULTADOS. PATRÓN DE FISURACIÓN



LEYENDA

- carga máxima
- colapso

| | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|
|  |  UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA |  GOBIERNO DE ESPAÑA | MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD | ESPÉCIMEN 3P-N-B3 pág.6/7 |
| PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes | | | | |
| F. FOTOS DE LOS ENSAYOS | | | | |
| CARA 1 – Instante de carga máxima | | CARA 1 – Colapso | | |
|  | |  | | |
| CARA 2 – Instante de carga máxima | | CARA 2 – Colapso | | |
|  | |  | | |
| CARA 3 – Instante de carga máxima | | CARA 3 – Colapso | | |
|  | |  | | |

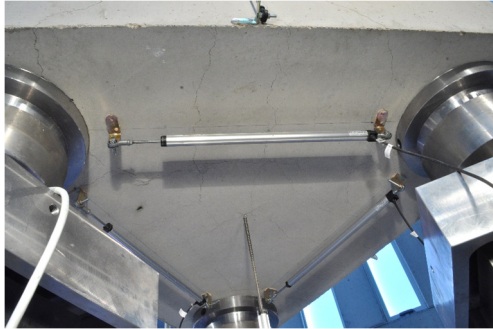


ESPÉCIMEN
3P-N-B3
pág.7/7

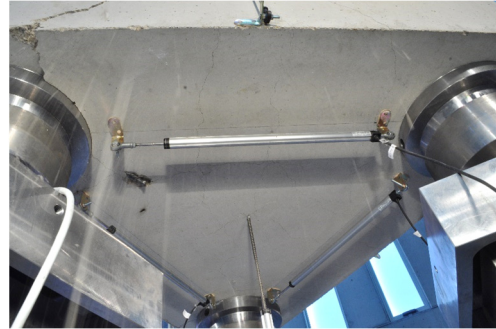
PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes





F. FOTOS DE LOS ENSAYOS

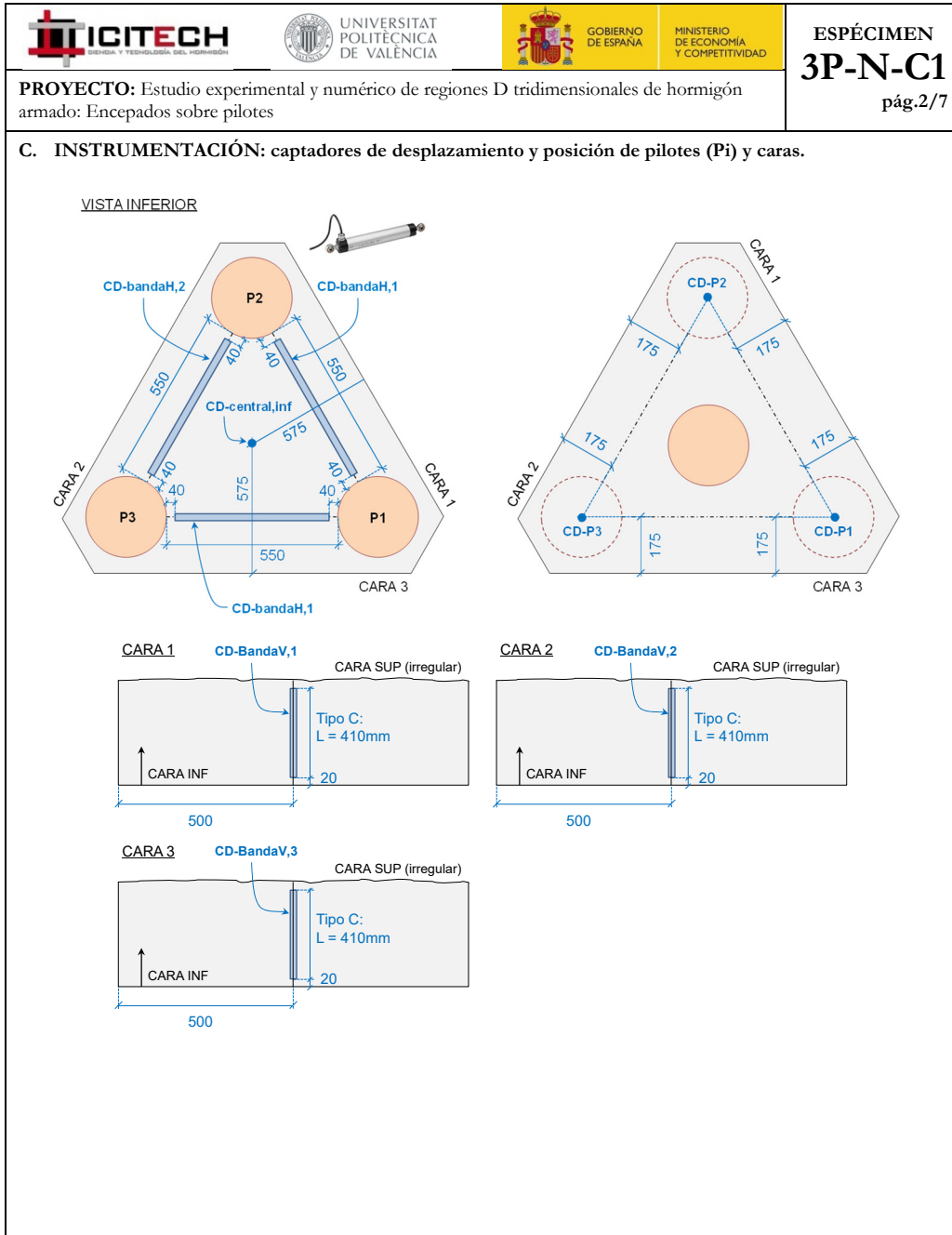
CARA INF – Instante de carga máxima



CARA INF – Colapso



| | | | | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
|  |  UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA |  GOBIERNO DE ESPAÑA |  MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD | ESPÉCIMEN 3P-N-C1 pág.1/7 |
| PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes | | | | |
| A. DATOS PRINCIPALES DEL ENSAYO Fecha horm.: 21/01/2015 Fecha ensayo: 03/02/2015 Edad (días): 13 f_c / f_{ct} (MPa): 24.0 / 3.1 Tipo sollicitación: carga centrada $\Sigma R_{max,W}$ (kN): 860.1 Modo de fallo: D-Y _B | | | | |
| B. GEOMETRÍA DEL ENCEPADO Y ARMADO Descripción del armado y su monitorización: <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div data-bbox="399 929 558 1086" style="width: 30%;"> <p>L (mm): 1000 h (mm): 450 e (mm): 800 ϕ (mm): 250 c (mm): 250 $r_{geo,inf}$ (mm): 40</p> </div> <div data-bbox="590 1041 686 1288" style="width: 20%;"> <p>ARMADO BANDA: 3Ø10 SEC. HORIZ: - SEC. VERTICAL: -</p> <p>NOMENCLATURA GALGAS GC1-id s/plano</p> <p>27 GALGAS</p> </div> <div data-bbox="718 1041 1165 1433" style="width: 45%;"> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div data-bbox="319 1142 446 1422" style="width: 30%;"> <p>ARMADO Banda: 3Ø10</p> <p>Sec. horizontal: -</p> <p>Sec. vertical: -</p> </div> <div data-bbox="319 1489 462 1568" style="width: 30%;"> <p>27 GALGAS: GC1-id s/plano</p> </div> </div> | | | | |

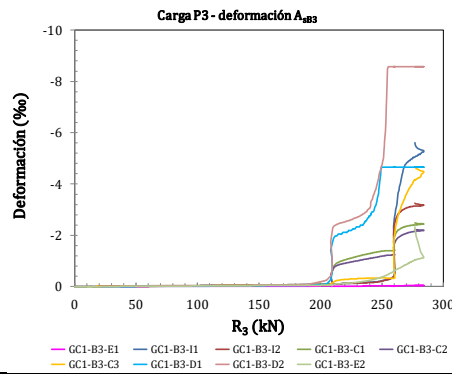
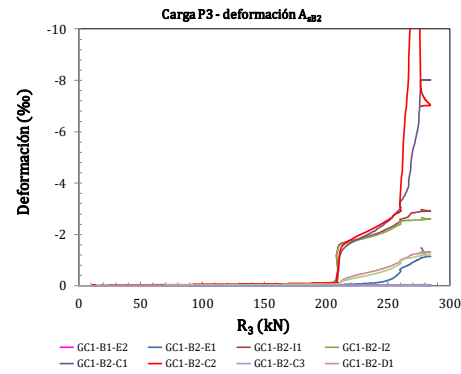
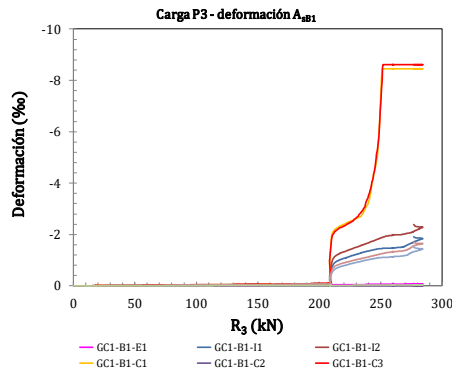
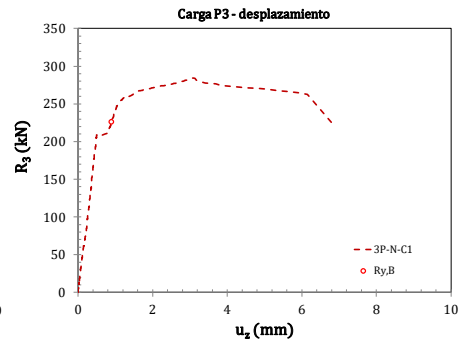
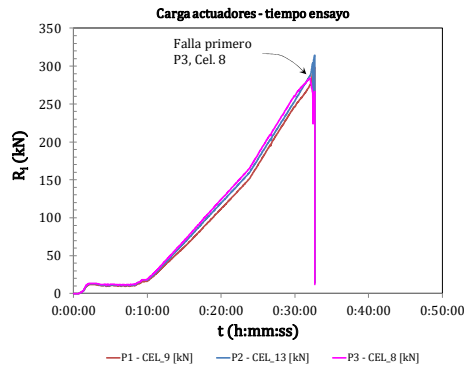


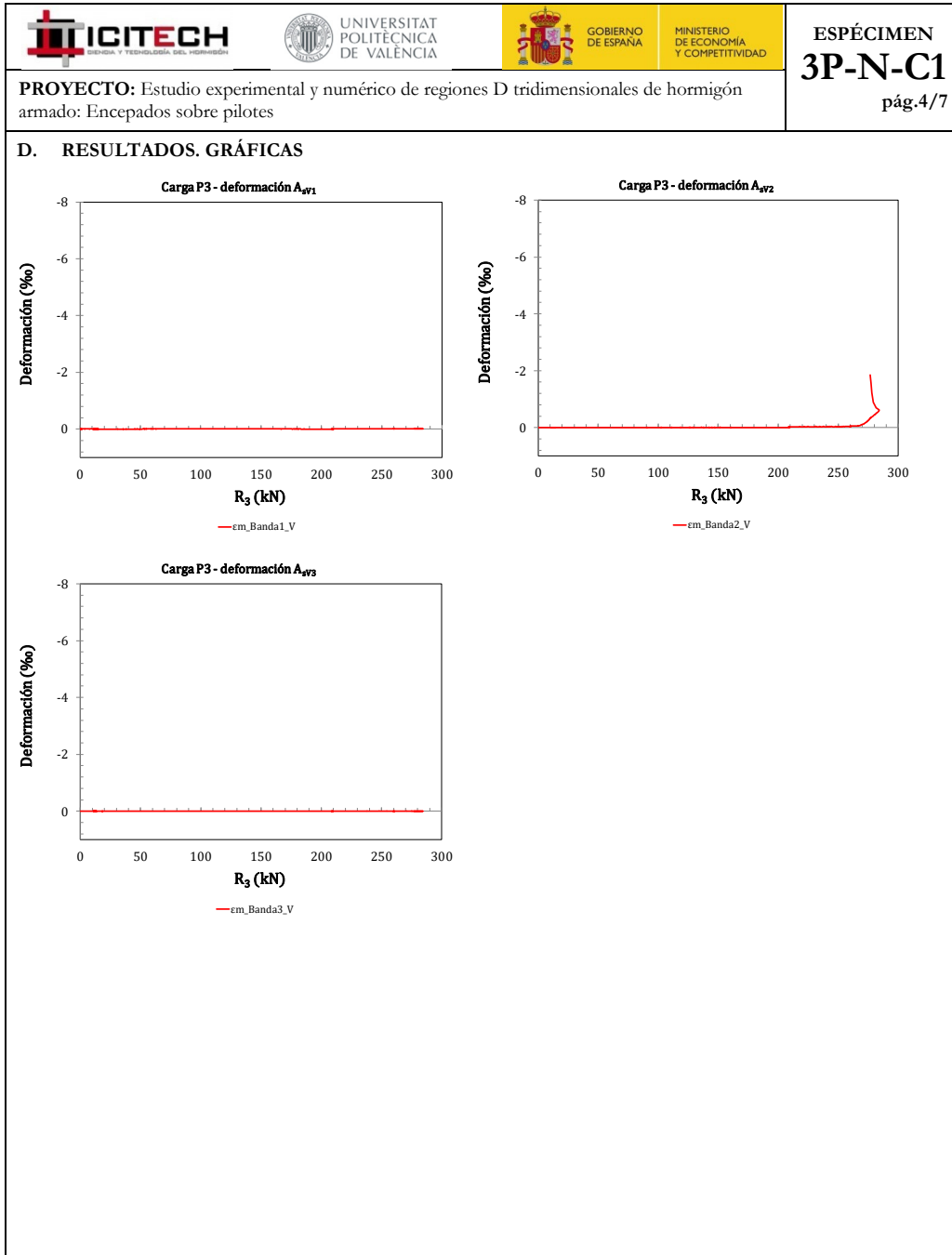


ESPÉCIMEN
3P-N-C1
pág.3/7

PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

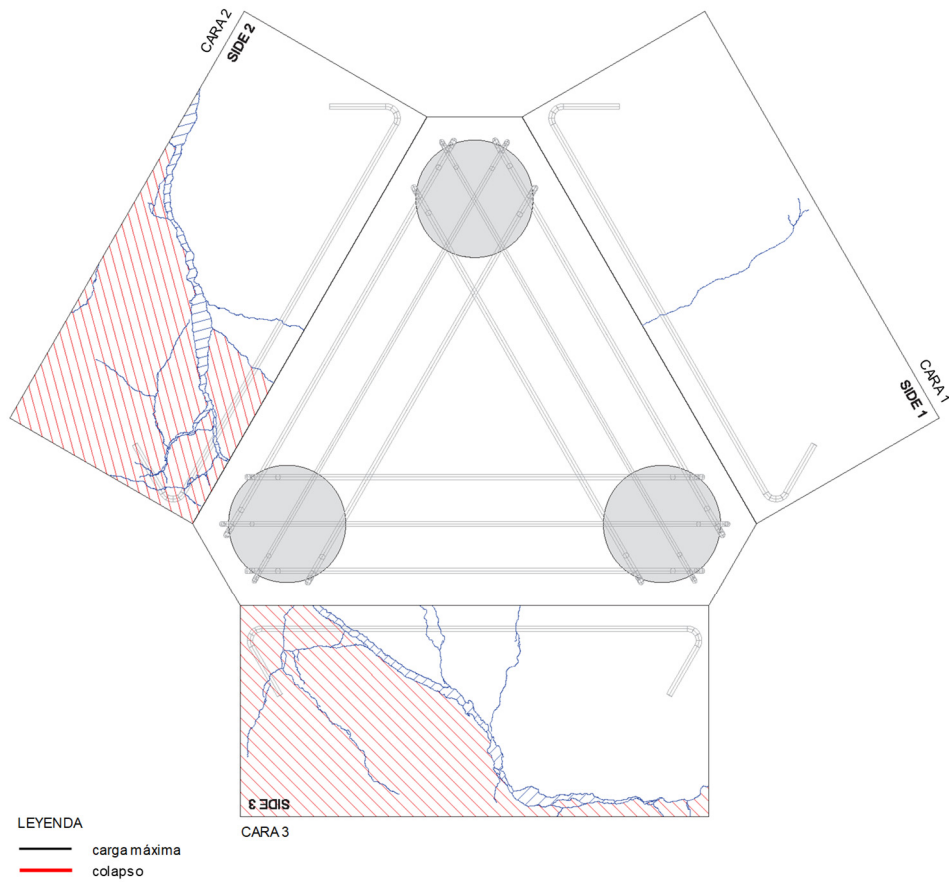
D. RESULTADOS. GRÁFICAS





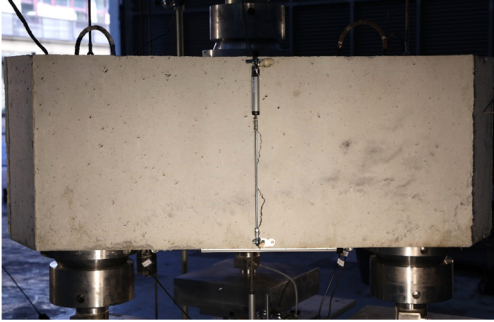
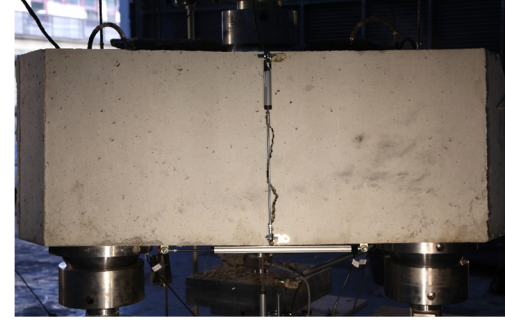
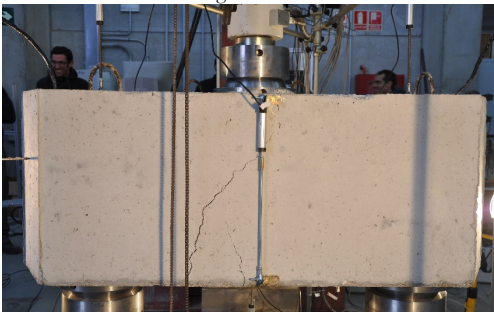

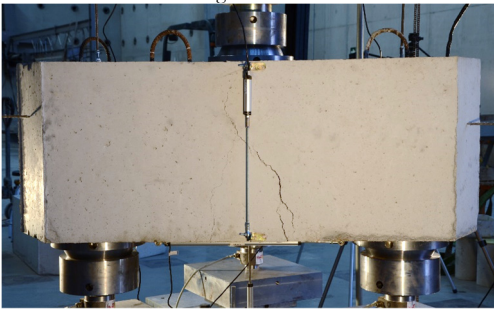





PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

E. RESULTADOS. PATRÓN DE FISURACIÓN



| | | | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
|  |  <p>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA</p> |  <p>GOBIERNO DE ESPAÑA</p>  <p>MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD</p> | <p>ESPÉCIMEN 3P-N-C1 pág.6/7</p> |
| <p>PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes</p> | | | |
| <p>F. FOTOS DE LOS ENSAYOS</p> | | | |
| <p>CARA 1 – Instante de carga máxima</p> | | <p>CARA 1 – Colapso</p> | |
|  | |  | |
| <p>CARA 2 – Instante de carga máxima</p> | | <p>CARA 2 – Colapso</p> | |
|  | |  | |
| <p>CARA 3 – Instante de carga máxima</p> | | <p>CARA 3 – Colapso</p> | |
|  | |  | |



ESPÉCIMEN
3P-N-C1
pág.7/7

PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes





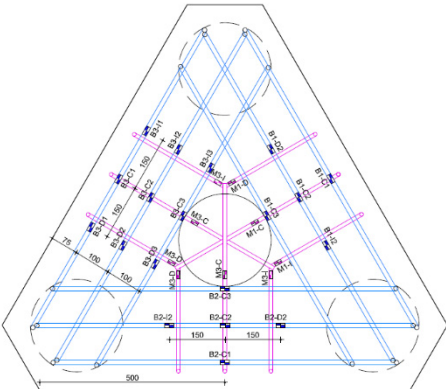
F. FOTOS DE LOS ENSAYOS

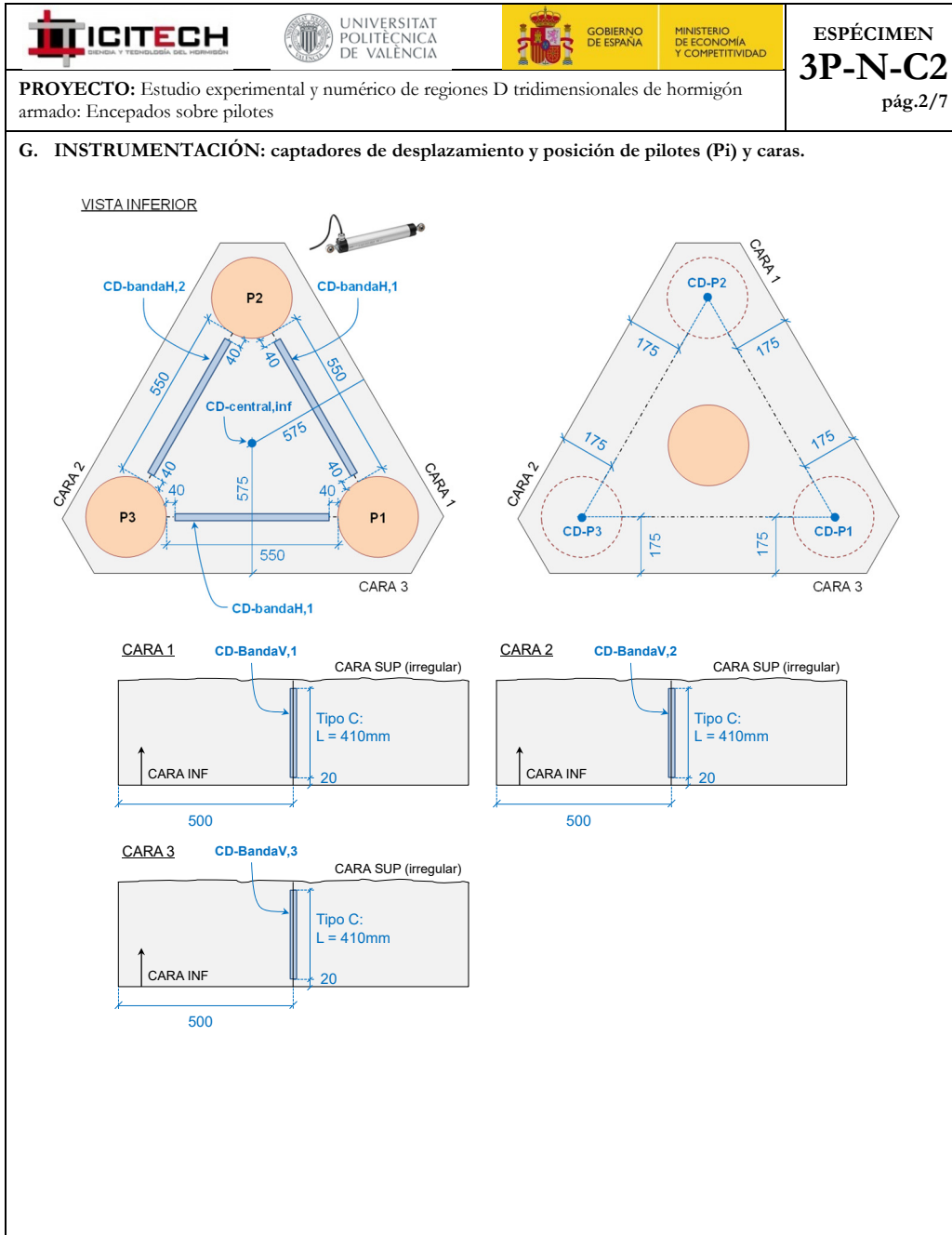
CARA INF – Instante de carga máxima



CARA INF – Colapso



| | | | | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
|  |  |  |  | <p>ESPÉCIMEN 3P-N-C2 pág.1/7</p> |
| <p>PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes</p> | | | | |
| <p>E. DATOS PRINCIPALES DEL ENSAYO</p> <p>Fecha horm.: 21/01/2015 Fecha ensayo: 06/02/2015 Edad (días): 16 f_c / f_{ct} (MPa): 26.4 / 2.8</p> <p>Tipo sollicitación: carga centrada</p> <p>$\Sigma R_{max,W}$ (kN): 852.9 Modo de fallo: F-YB</p> | | | | |
| <p>F. GEOMETRÍA DEL ENCEPADO Y ARMADO</p> <p>Descripción del armado y su monitorización:</p> <p>L (mm): 1000 h (mm): 450 e (mm): 800 ϕ (mm): 250 c (mm): 250 $r_{geo,inf}$ (mm): 40</p> <p>ARMADO</p> <p>Banda: 3ϕ10</p> <p>Sec. horizontal: 3ϕ8</p> <p>Sec. vertical: -</p> <p>28 GALGAS: GC2-id s/plano</p> <div style="display: flex; align-items: flex-start;"> <div style="margin-right: 20px;"> <p>ARMADO</p> <p>BANDA: 3ϕ10</p> <p>SEC. HORIZ: 3ϕ8</p> <p>SEC. VERTICAL: -</p> </div> <div style="margin-right: 20px;"> <p>NOMENCLATURA GALGAS</p> <p>GC2 - id s/plano</p> <p>28 GALGAS</p> </div> <div>  </div> </div> | | | | |

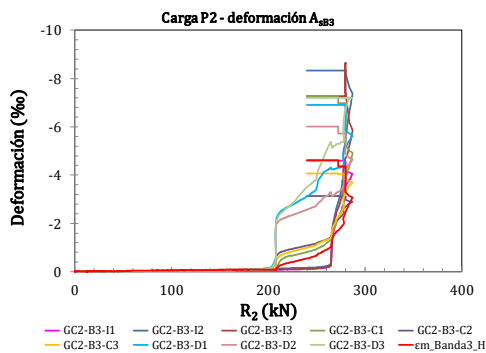
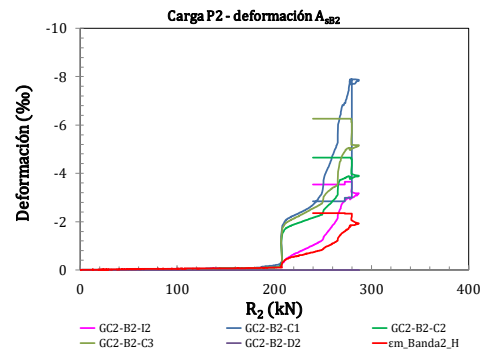
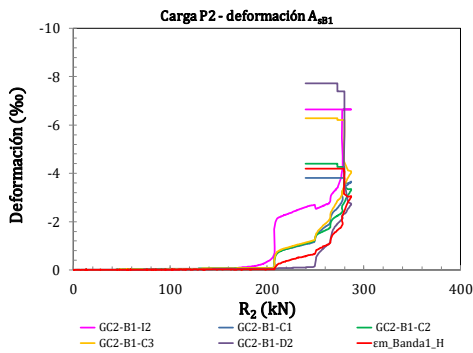
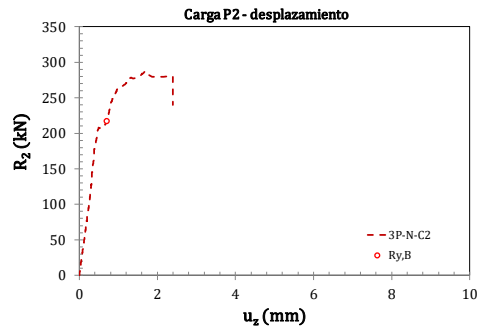
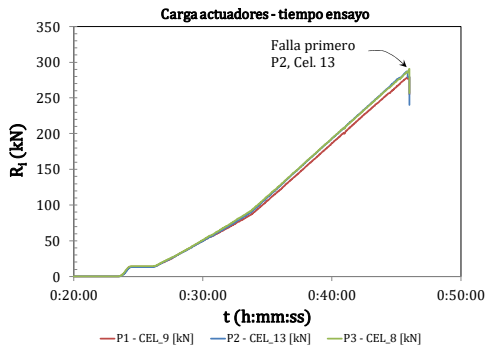


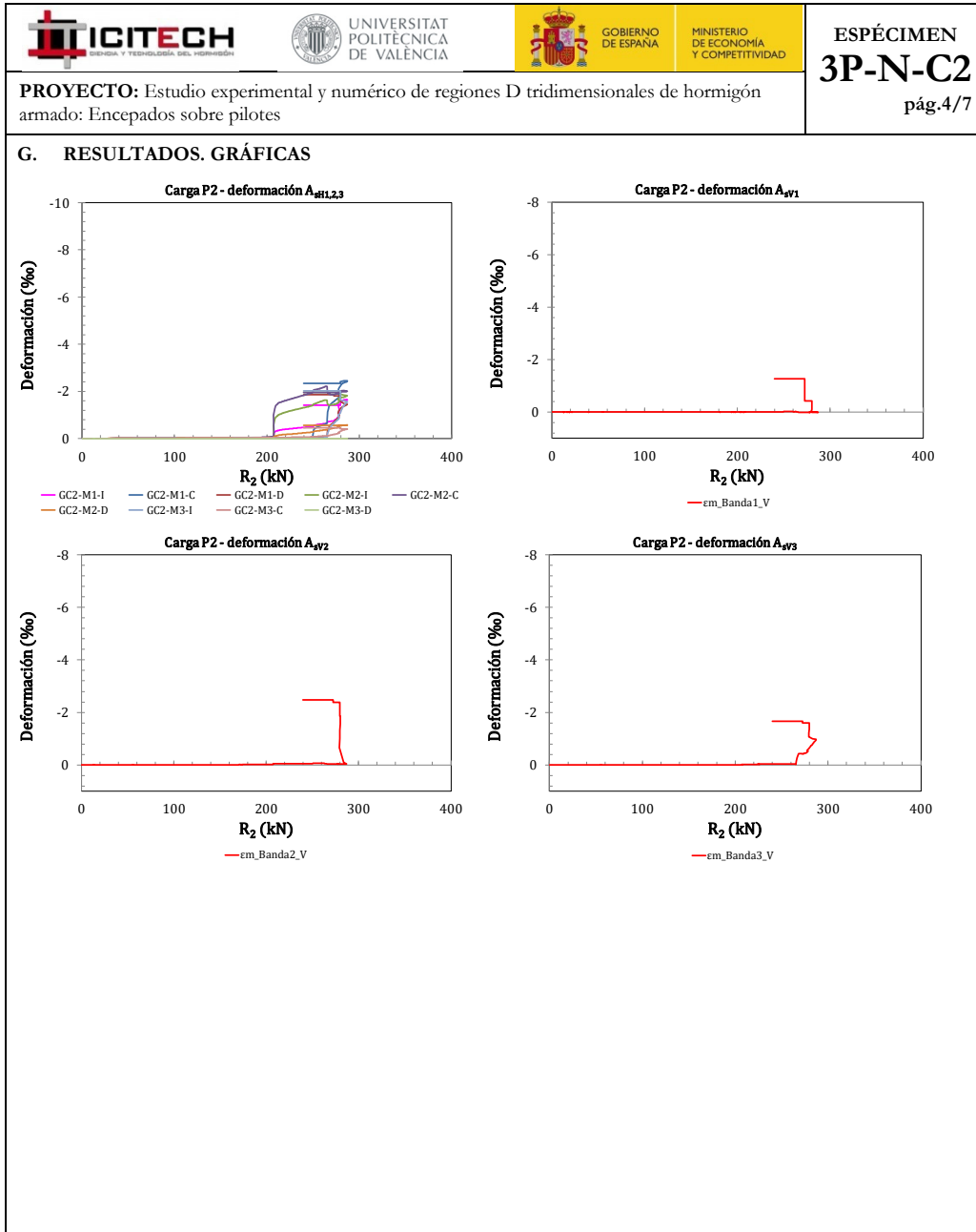


ESPÉCIMEN
3P-N-C2
pág.3/7

PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

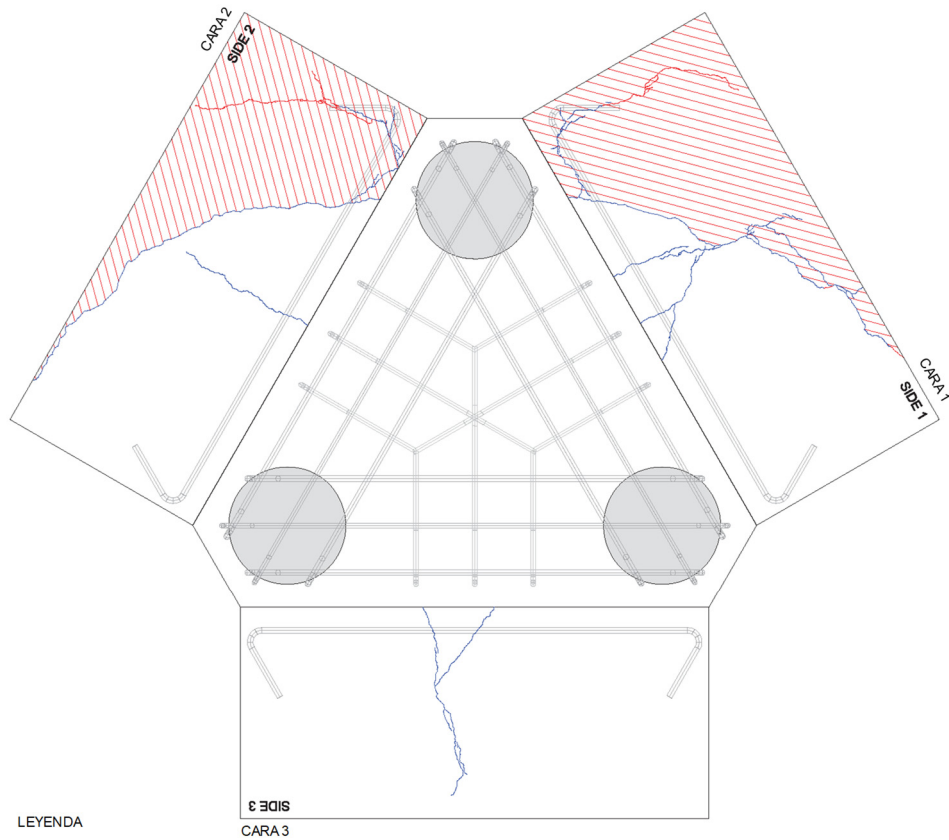
H. RESULTADOS. GRÁFICAS







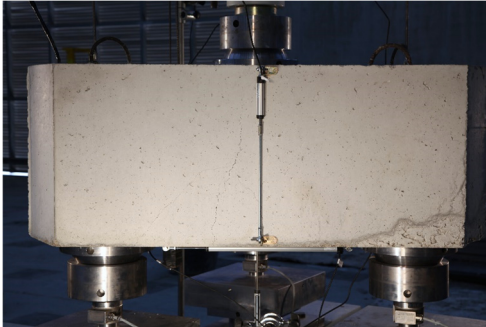
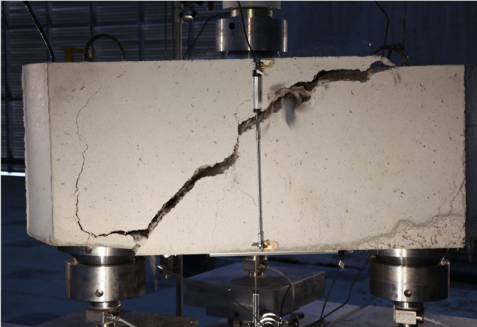


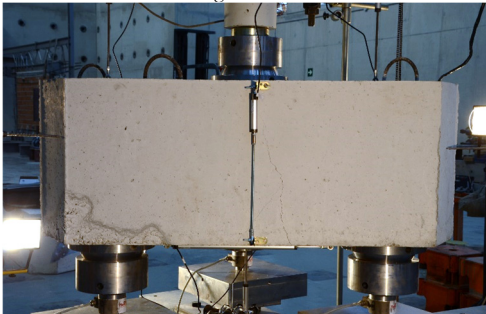
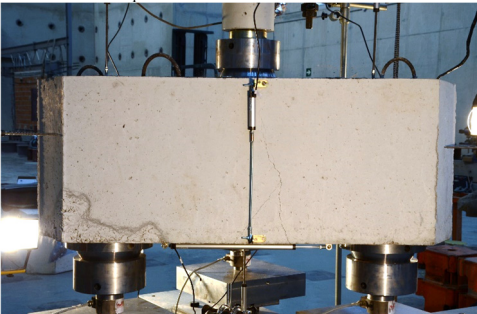


PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

H. RESULTADOS. PATRÓN DE FISURACIÓN



LEYENDA
— carga máxima
— colapso

| | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
|  |  UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA |  GOBIERNO DE ESPAÑA |  MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD | ESPÉCIMEN 3P-N-C2 pág.6/7 |
| PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes | | | | |
| I. FOTOS DE LOS ENSAYOS | | | | |
| CARA 1 – Instante de carga máxima | | CARA 1 – Colapso | | |
|  | |  | | |
| CARA 2 – Instante de carga máxima | | CARA 2 – Colapso | | |
|  | |  | | |
| CARA 3 – Instante de carga máxima | | CARA 3 – Colapso | | |
|  | |  | | |



ESPÉCIMEN
3P-N-C2
pág.7/7

PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes





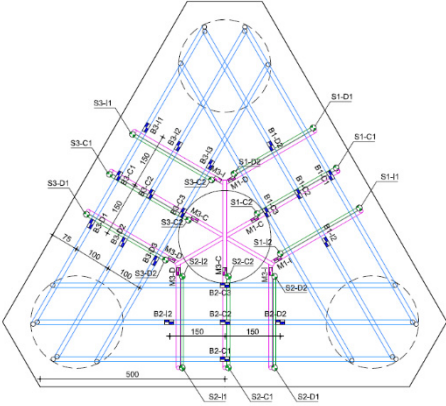
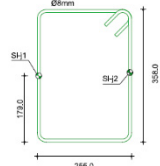
G. FOTOS DE LOS ENSAYOS

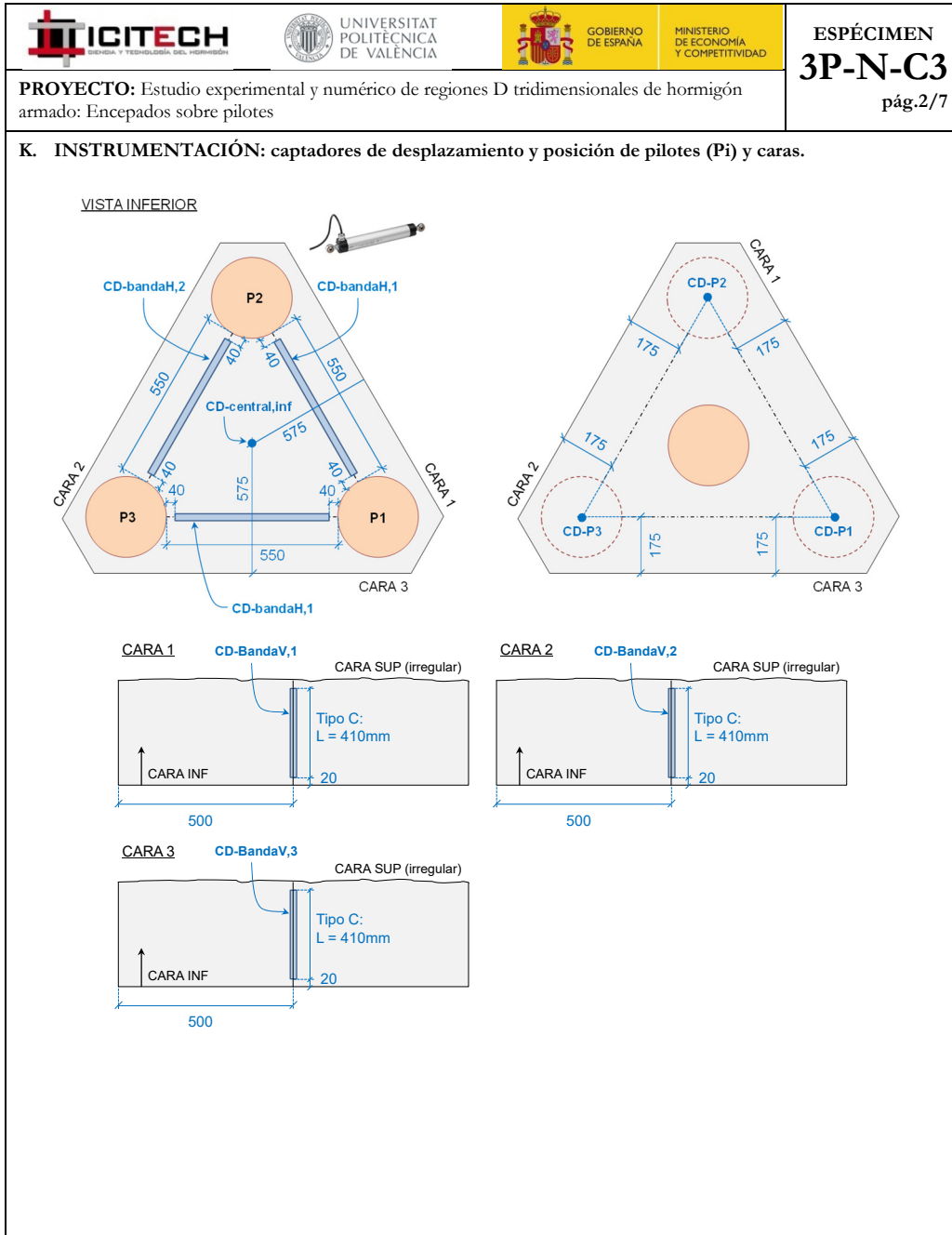
CARA INF – Instante de carga máxima



CARA INF – Colapso



| | | | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  |  |  | <p>ESPÉCIMEN 3P-N-C3 pág.1/7</p> |
| <p>PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes</p> | | | | |
| <p>I. DATOS PRINCIPALES DEL ENSAYO</p> | | | | |
| <p>Fecha horm.: 21/01/2015 Fecha ensayo: 10/02/2015 Edad (días): 20 f_c / f_{ct} (MPa): 28.5 / 3.1</p> | | | | |
| <p>Tipo sollicitación: carga centrada</p> | | | | |
| <p>$\Sigma R_{max,W}$ (kN): 988.1 Modo de fallo: D-Y_{BHV}</p> | | | | |
| <p>J. GEOMETRÍA DEL ENCEPADO Y ARMADO</p> | | | | |
| <p>Descripción del armado y su monitorización:</p> | | | | |
| <p>L (mm): 1000 h (mm): 450 e (mm): 800 ϕ (mm): 250 c (mm): 250 $r_{geo,inf}$ (mm): 40</p> | <p>ARMADO BANDA: S010 SEC. HORIZ: S08 SEC. VERTICAL: S08</p> | <p>NOMENCLATURA GALGAS GC3 - 10 s/plano</p> |  | <p>GALGAS EN CERCOS i: 1, 2, 3 j: I, C, D</p>  |
| <p>ARMADO</p> | | | | |
| <p>Banda: 3ϕ10</p> | | | | |
| <p>Sec. horizontal: 3ϕ8</p> | | | | |
| <p>Sec. vertical: 3cϕ8</p> | | | | |
| <p>46 GALGAS: GC3-id s/plano</p> | | | | |

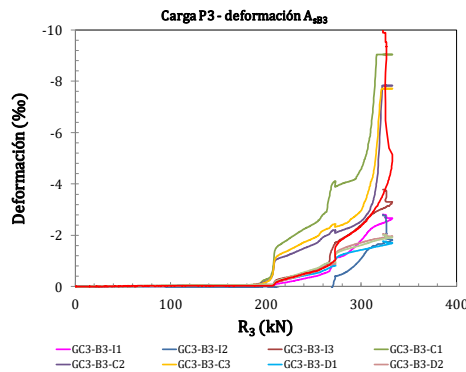
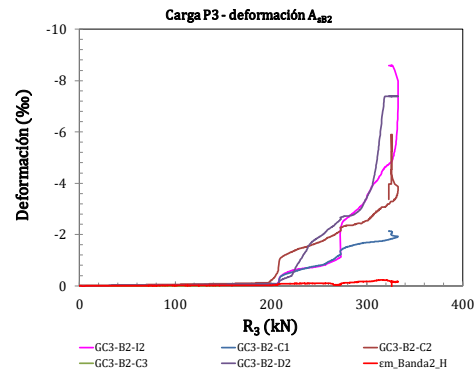
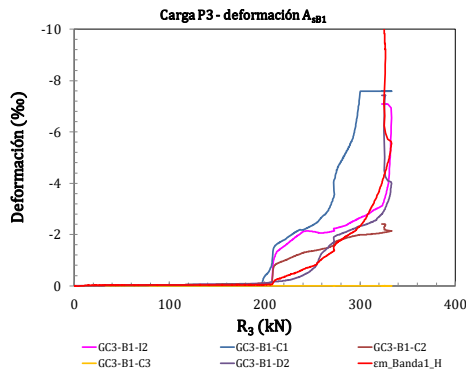
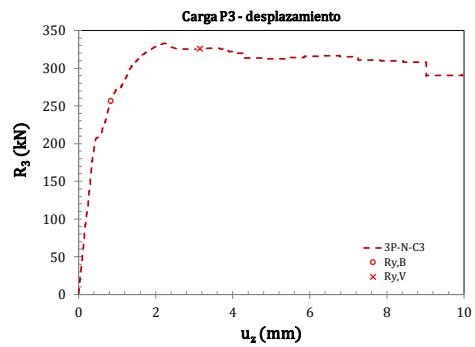
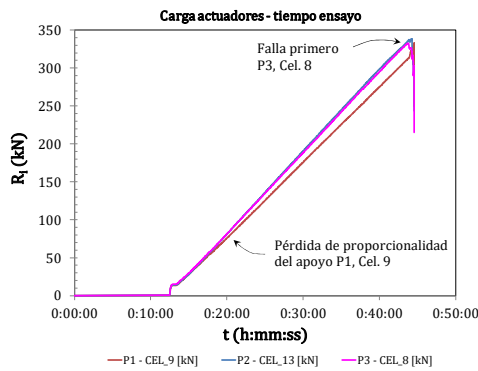


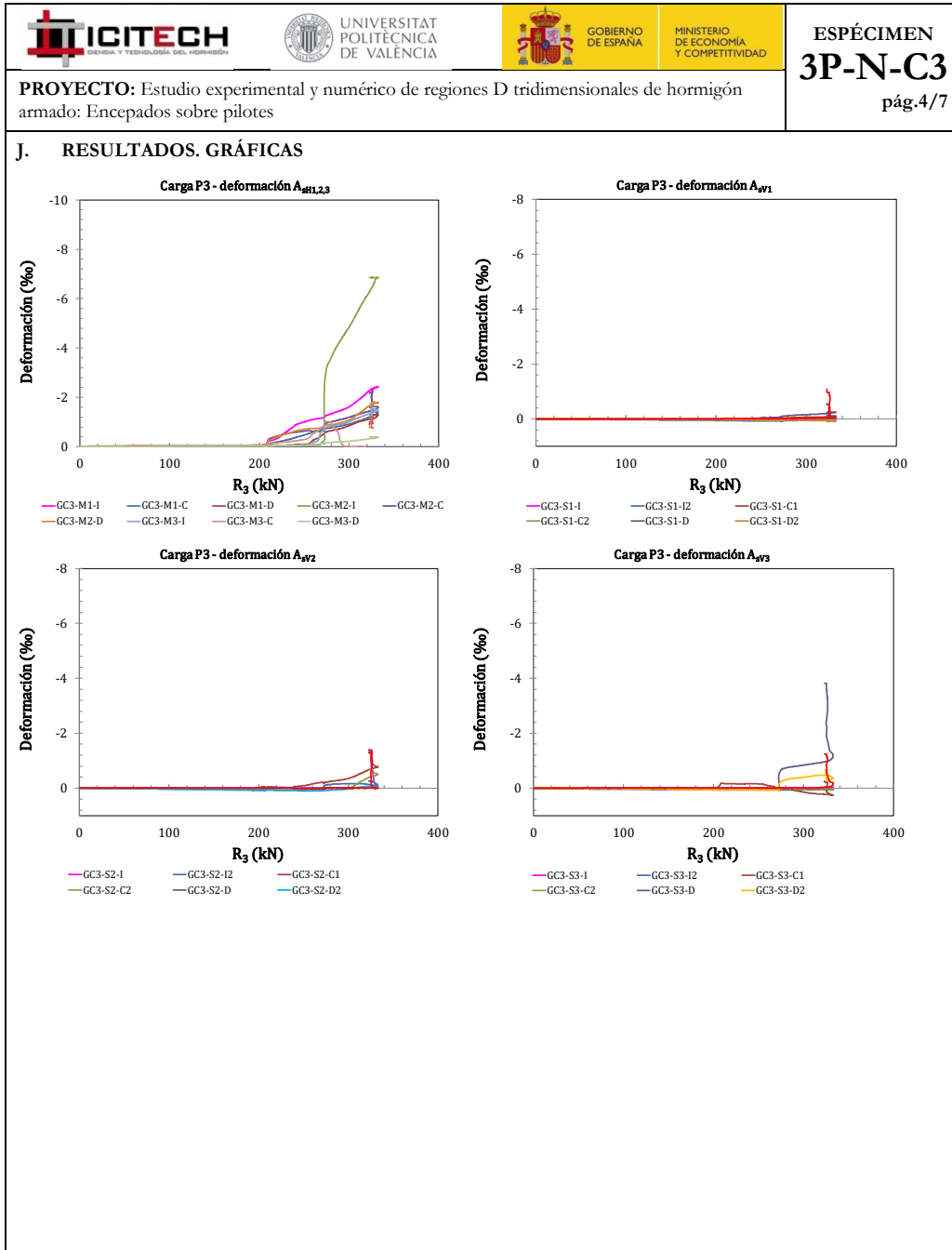


ESPÉCIMEN
3P-N-C3
pág.3/7

PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

L. RESULTADOS. GRÁFICAS



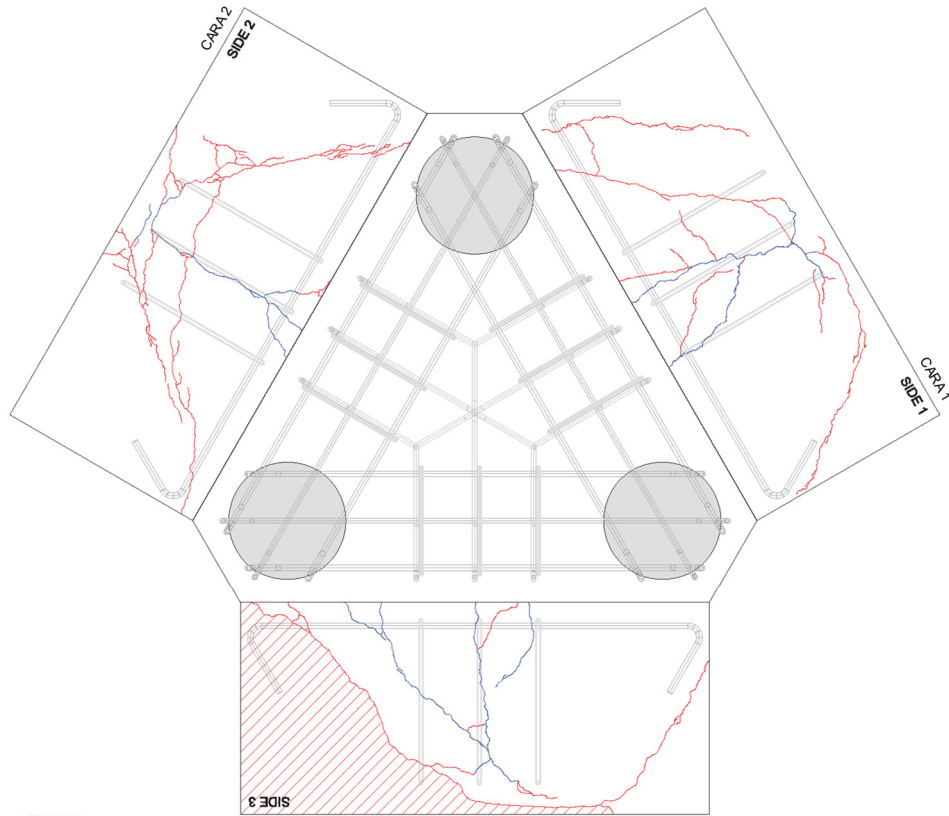








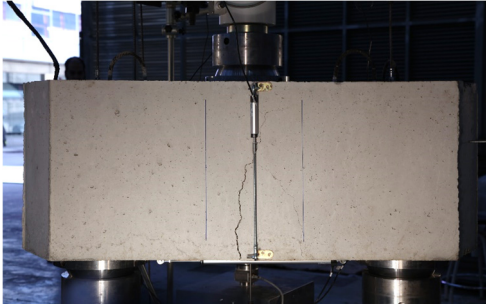
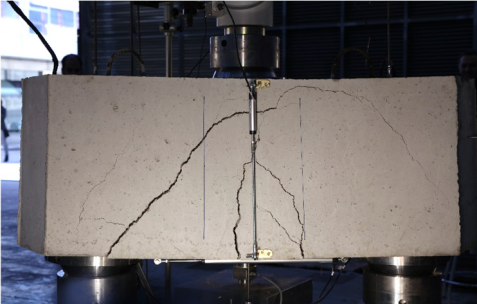
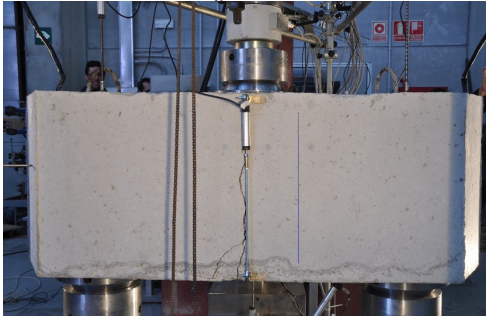
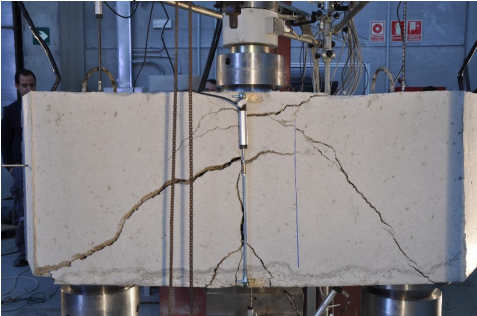
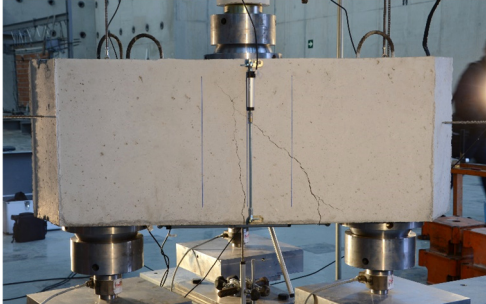
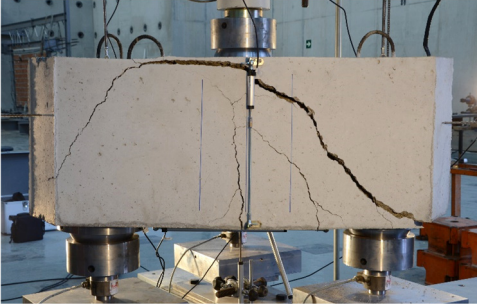
ESPÉCIMEN
3P-N-C3
pág.5/7

PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

K. RESULTADOS. PATRÓN DE FISURACIÓN



LEYENDA
— carga máxima
— colapso

| | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
|  |  UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA |  GOBIERNO DE ESPAÑA |  MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD | ESPÉCIMEN 3P-N-C3 pág.6/7 |
| PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes | | | | |
| L. FOTOS DE LOS ENSAYOS | | | | |
| CARA 1 – Instante de carga máxima | | CARA 1 – Colapso | | |
|  | |  | | |
| CARA 2 – Instante de carga máxima | | CARA 2 – Colapso | | |
|  | |  | | |
| CARA 3 – Instante de carga máxima | | CARA 3 – Colapso | | |
|  | |  | | |



ESPÉCIMEN
3P-N-C3
pág.7/7

PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

H. FOTOS DE LOS ENSAYOS

CARA INF – Instante de carga máxima



CARA INF – Colapso





ESPÉCIMEN
4P-N-A1
pág.1/7

PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encapados sobre pilotes

A. DATOS PRINCIPALES DEL ENSAYO

Fecha horm.: 29/06/2015
Fecha ensayo: 02/10/2015
Edad (días): 95
 f_c / f_{ct} (MPa): 27.7 / 3.2

Carga de rotura total
y por pilote:

$\sum R_{max,W}$ (kN): 613.9
 $R_{max,W}$ (kN): 153.5
Modo de fallo: F-Y_B

Tipo sollicitación: carga centrada
Relación entre cargas actuadores
Act-2/Act-1: 1
Act-3/Act-1: 1
Act-4/Act-1: 1

B. GEOMETRÍA DEL ENCEPADO Y ARMADO

Descripción del armado y su monitorización:

L (mm): 1150
h (mm): 250
e (mm): 800
 ϕ (mm): 250
c (mm): 350
 $r_{geo,inf}$ (mm): 40

ARMADO
BANDA:
2Ø16 + 1Ø12

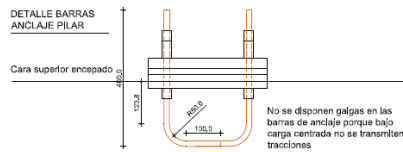
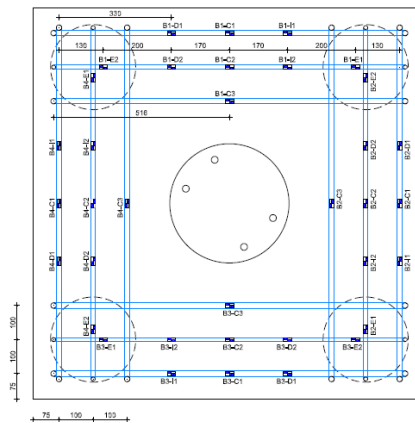
NOMENCLATURA
GALGAS
GA1 = H1 ajetano

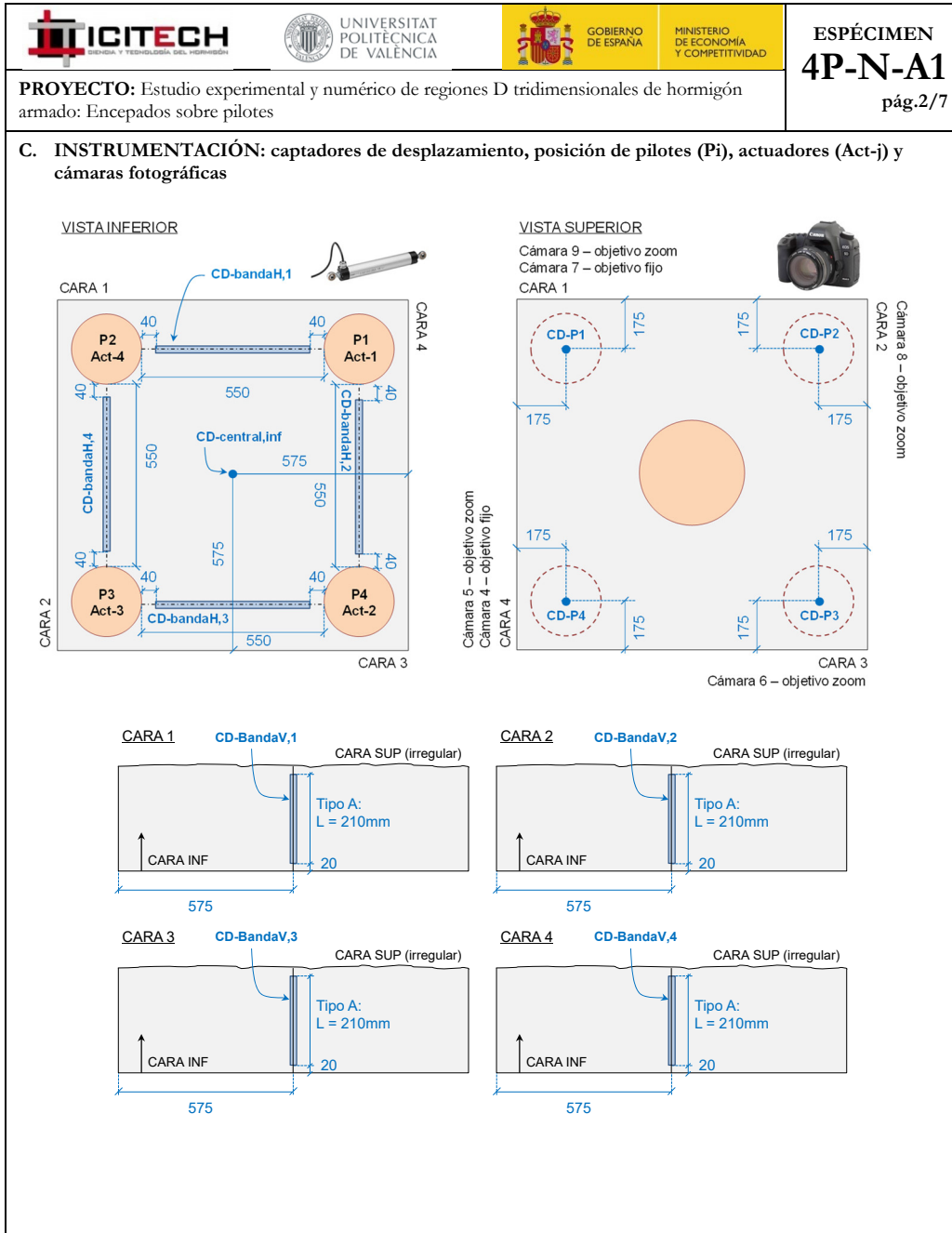
36 GALGAS

ARMADO

Banda:
2Ø16+1Ø12
Sec. horizontal:
-
Sec. vertical:
-
Anclaje pilar:
4Ø16 (Dywidag)

36 GALGAS:
GA1-id s/plano



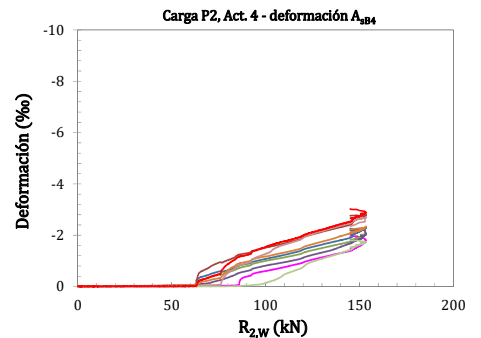
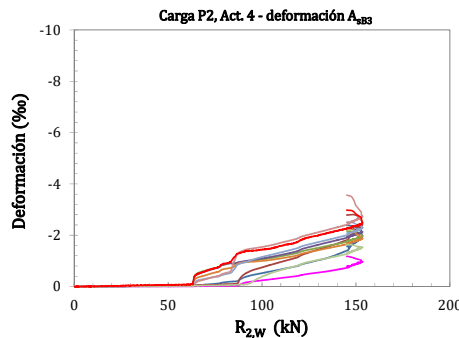
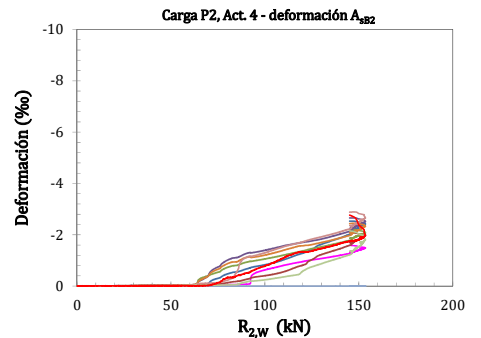
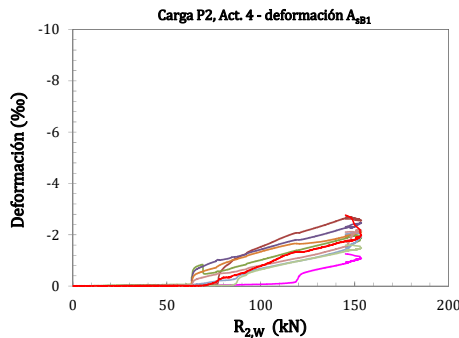
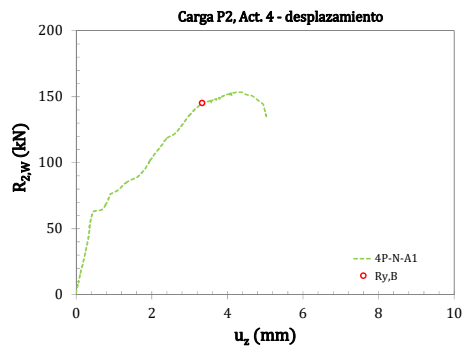
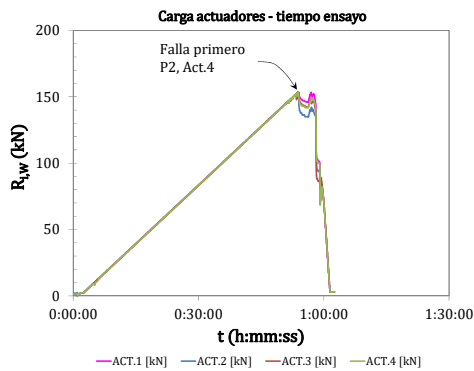


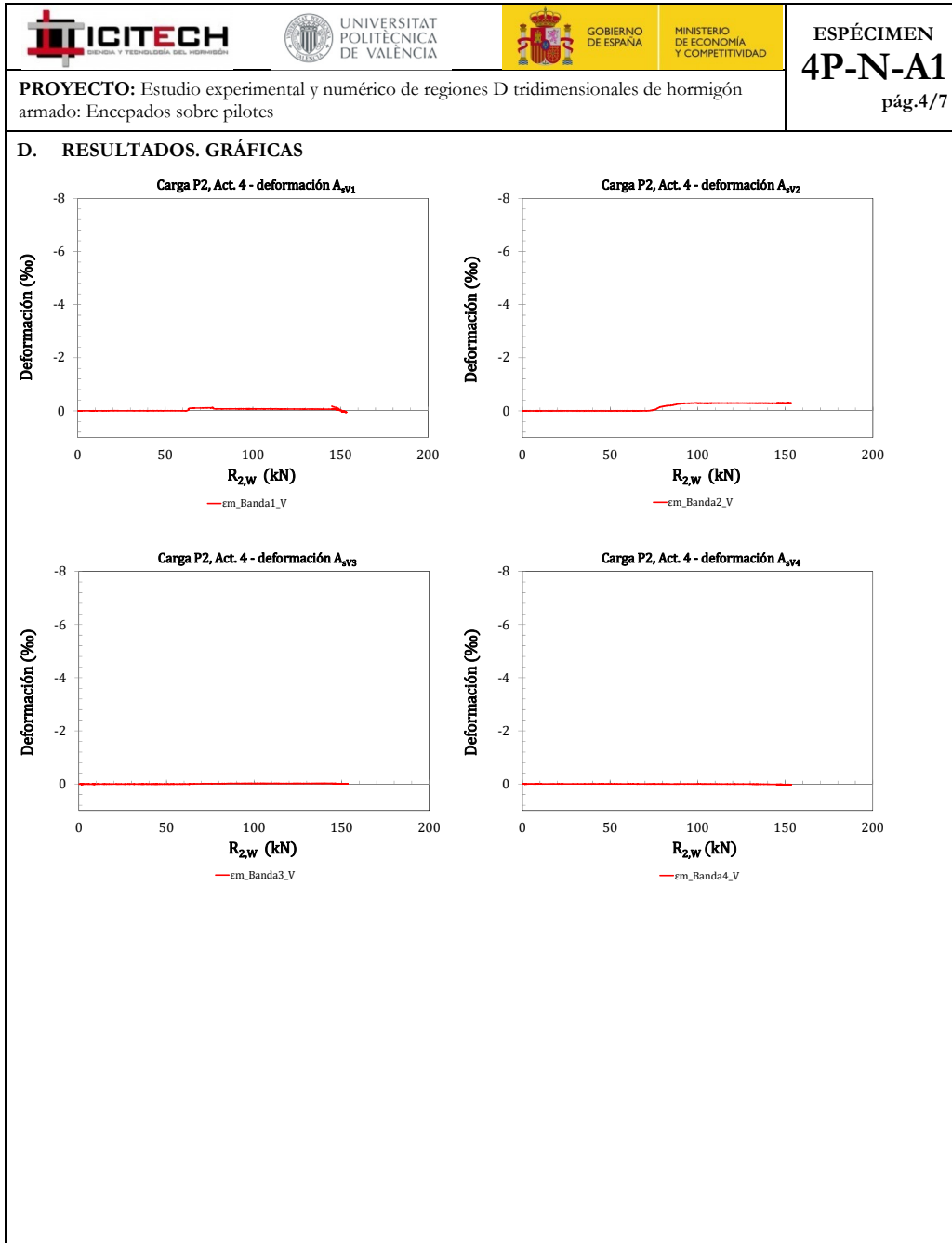


ESPÉCIMEN
4P-N-A1
pág.3/7

PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

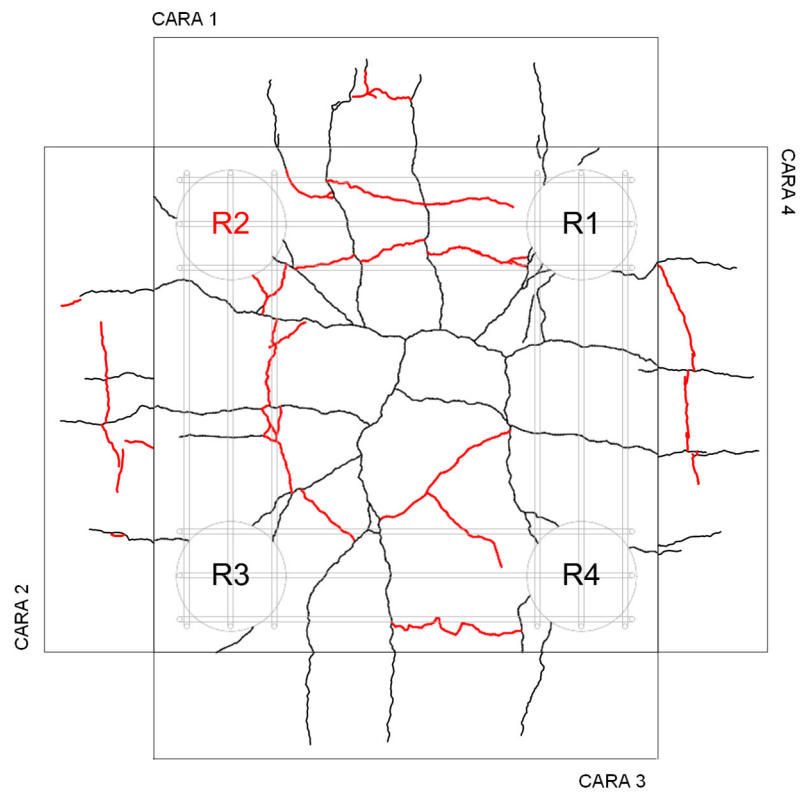
D. RESULTADOS. GRÁFICAS









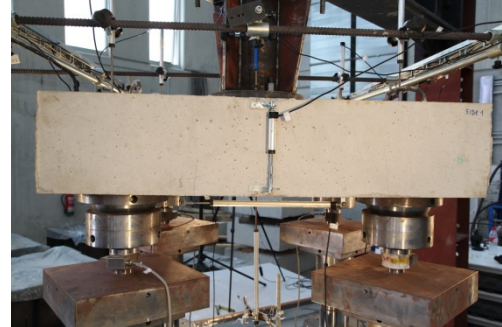
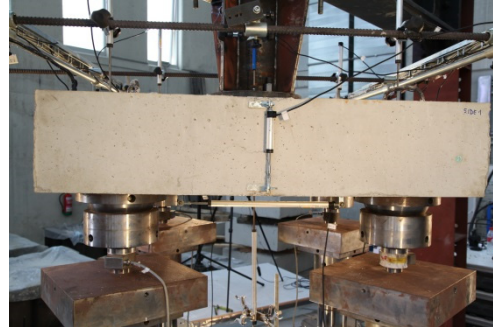
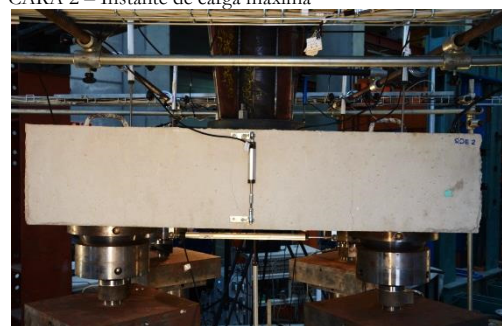
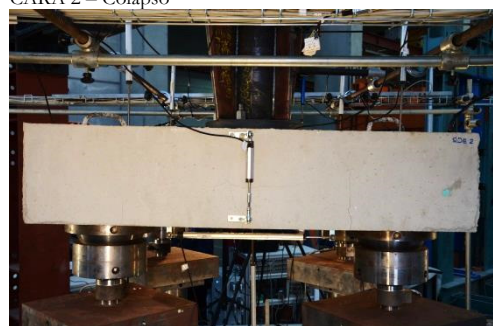
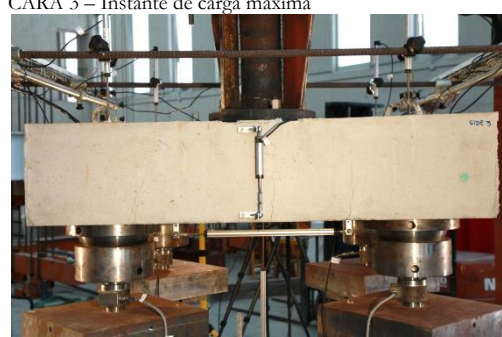
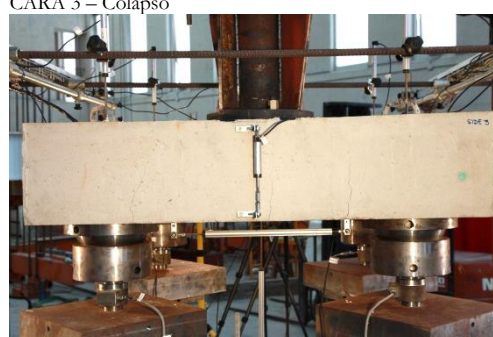
PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

E. RESULTADOS. PATRÓN DE FISURACIÓN



LEYENDA

- carga máxima
- colapso

| | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
|  |  UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA |  GOBIERNO DE ESPAÑA |  MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD | ESPÉCIMEN 4P-N-A1 pág.6/7 |
| PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes | | | | |
| F. FOTOS DE LOS ENSAYOS | | | | |
| CARA 1 – Instante de carga máxima | | | | |
|  | | CARA 1 – Colapso | | |
|  | | CARA 2 – Instante de carga máxima | | |
|  | | CARA 2 – Colapso | | |
|  | | CARA 3 – Instante de carga máxima | | |
|  | | CARA 3 – Colapso | | |
|  | | | | |

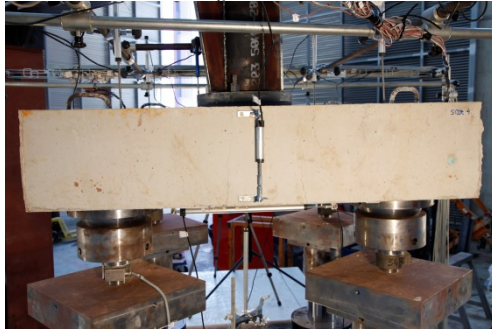


ESPÉCIMEN
4P-N-A1
pág.7/7

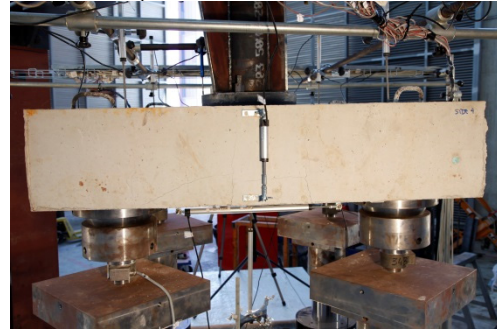
PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

F. FOTOS DE LOS ENSAYOS

CARA 4 – Instante de carga máxima



CARA 4 – Colapso



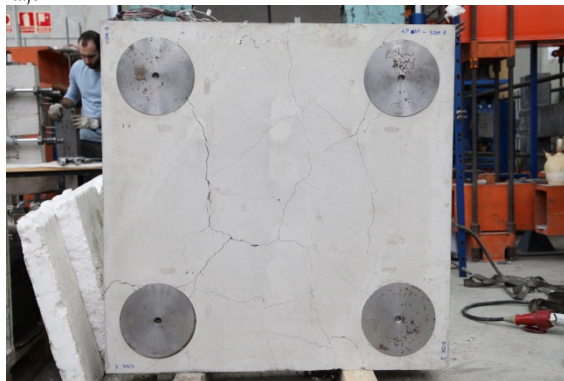
CARA INF – Instante de carga máxima





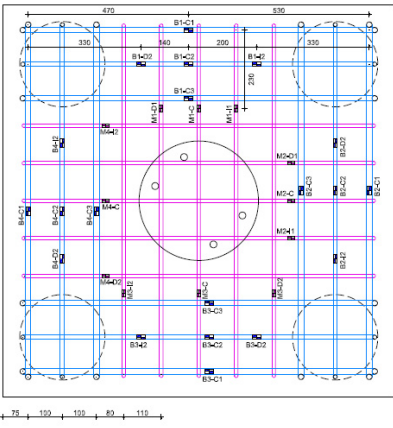
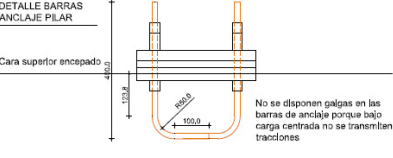
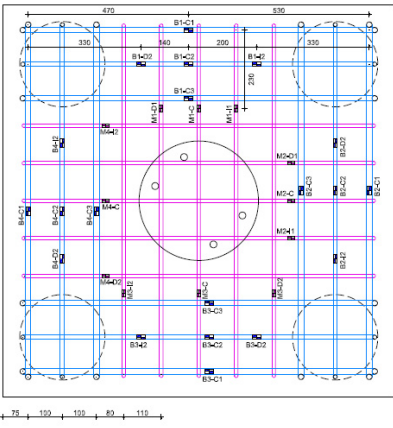
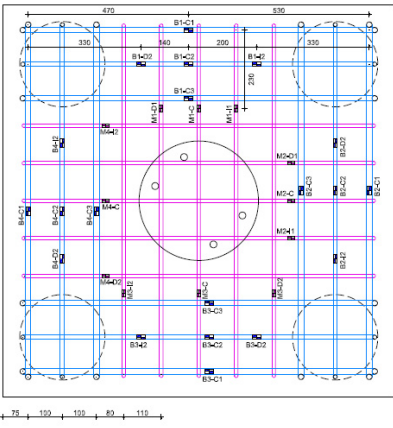


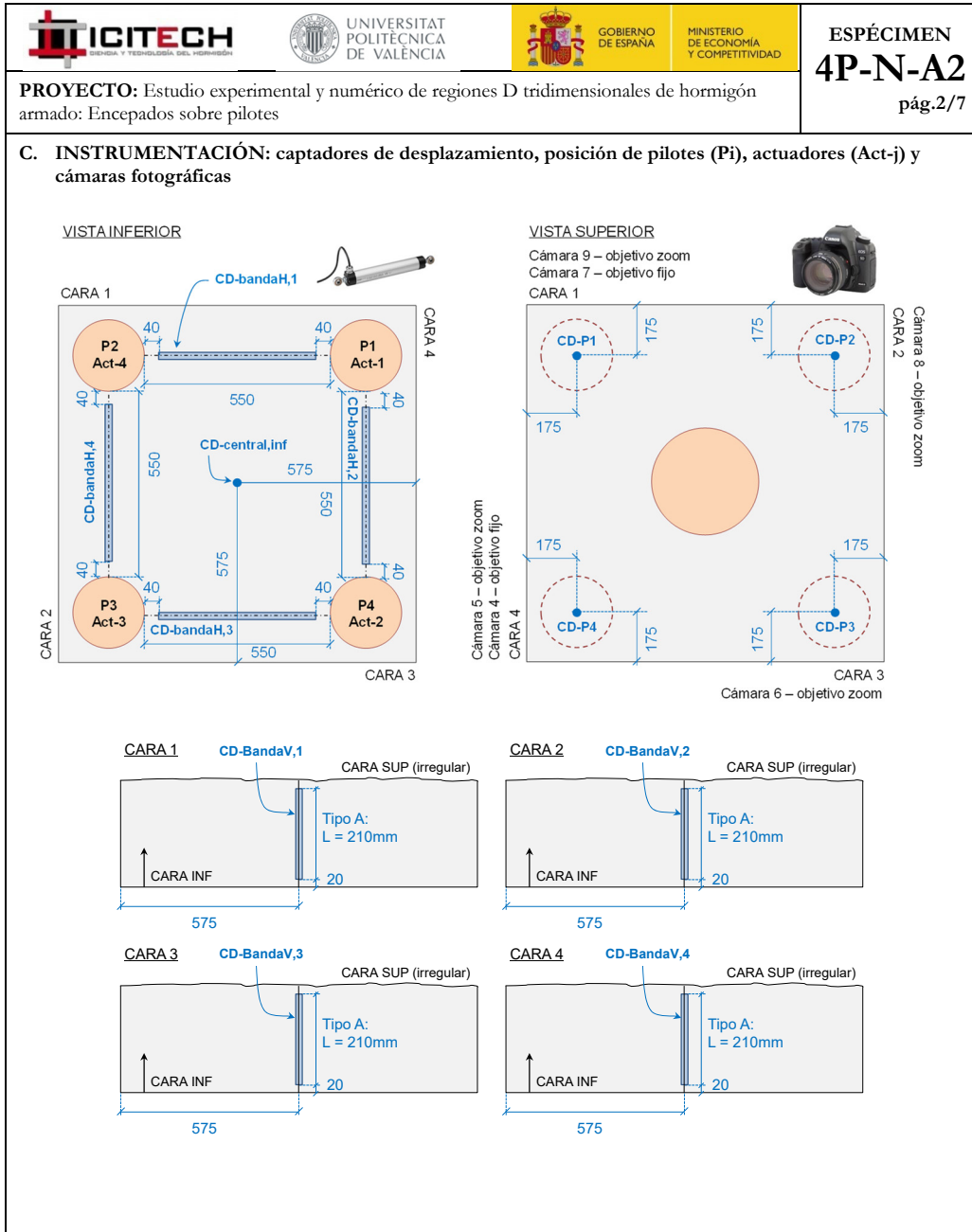
CARA INF – Colapso



CARA INF – Tras desmontaje



| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|-------------|------------------|-------------|----------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------|--|----------------|--|----------------|--|
|  |  |  |  | <p>ESPÉCIMEN 4P-N-A2 pág.1/7</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>A. DATOS PRINCIPALES DEL ENSAYO</p> <table border="0"> <tr> <td>Fecha horm.: 29/06/2015</td> <td>Carga de rotura total y por pilote:</td> </tr> <tr> <td>Fecha ensayo: 07/10/2015</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Edad (días): 100</td> <td></td> </tr> <tr> <td>f_c / f_{ct} (MPa): 29.5 / 3.1</td> <td>$\Sigma R_{max,W}$ (kN): 821.7</td> </tr> <tr> <td>Tipo sollicitación: carga centrada</td> <td>$R_{max,W}$ (kN): 206.9</td> </tr> <tr> <td>Relación entre cargas actuadores</td> <td>Modo de fallo: F-Y_{BH}</td> </tr> <tr> <td>Act-2/Act-1: 1</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Act-3/Act-1: 1</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Act-4/Act-1: 1</td> <td></td> </tr> </table> | | | | | Fecha horm.: 29/06/2015 | Carga de rotura total y por pilote: | Fecha ensayo: 07/10/2015 | | Edad (días): 100 | | f_c / f_{ct} (MPa): 29.5 / 3.1 | $\Sigma R_{max,W}$ (kN): 821.7 | Tipo sollicitación: carga centrada | $R_{max,W}$ (kN): 206.9 | Relación entre cargas actuadores | Modo de fallo: F-Y _{BH} | Act-2/Act-1: 1 | | Act-3/Act-1: 1 | | Act-4/Act-1: 1 | |
| Fecha horm.: 29/06/2015 | Carga de rotura total y por pilote: | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Fecha ensayo: 07/10/2015 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Edad (días): 100 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| f_c / f_{ct} (MPa): 29.5 / 3.1 | $\Sigma R_{max,W}$ (kN): 821.7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Tipo sollicitación: carga centrada | $R_{max,W}$ (kN): 206.9 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Relación entre cargas actuadores | Modo de fallo: F-Y _{BH} | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Act-2/Act-1: 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Act-3/Act-1: 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Act-4/Act-1: 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>B. GEOMETRÍA DEL ENCEPADO Y ARMADO</p> <p>Descripción del armado y su monitorización:</p> <table border="0"> <tr> <td>L (mm): 1150</td> <td rowspan="5">  </td> </tr> <tr> <td>h (mm): 250</td> </tr> <tr> <td>e (mm): 800</td> </tr> <tr> <td>ϕ (mm): 250</td> </tr> <tr> <td>c (mm): 350</td> </tr> </table> <p>$r_{geo,inf}$ (mm): 40</p> <p>ARMADO BANDA: 2Ø16 + 1Ø12 SEC. HORIZ: 5Ø10 SEC. VERT: -</p> <p>ANCLAJE PILAR: 4Ø16 (Dywidag)</p> <p>32 GALGAS: GA2-id s/plano</p> <p>NOMENCLATURA GALGAS: GA2-id s/plano</p> <p>DETALLE BARRAS ANCLAJE PILAR:</p>  <p>Cara superior encepado</p> <p>No se disponen galgas en las barras de anclaje porque bajo carga centrada no se transmiten tracciones</p> | | | | | L (mm): 1150 |  | h (mm): 250 | e (mm): 800 | ϕ (mm): 250 | c (mm): 350 | | | | | | | | | | | | |
| L (mm): 1150 |  | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| h (mm): 250 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| e (mm): 800 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ϕ (mm): 250 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| c (mm): 350 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

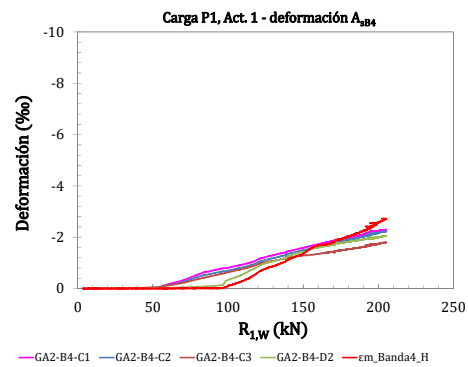
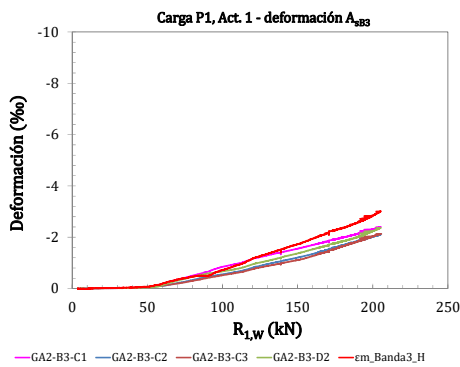
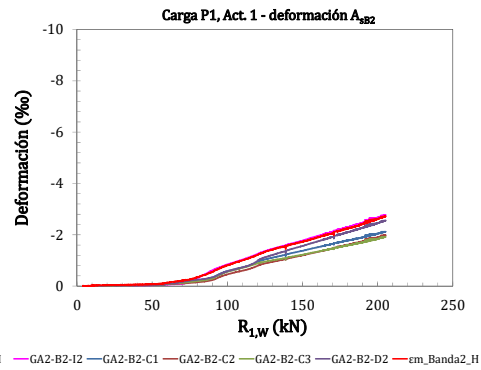
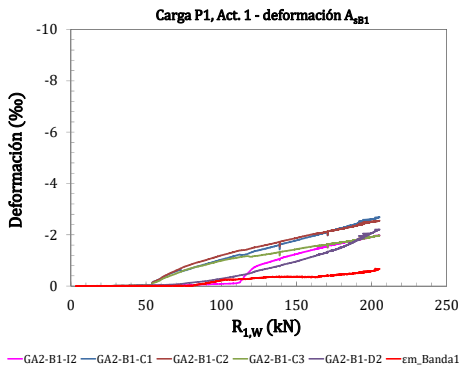
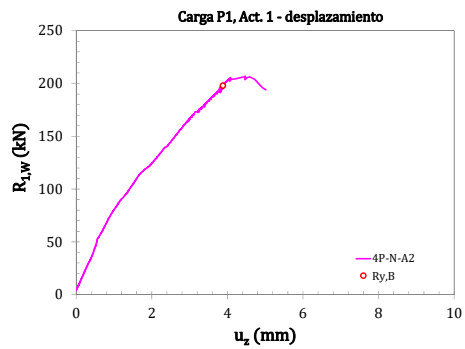
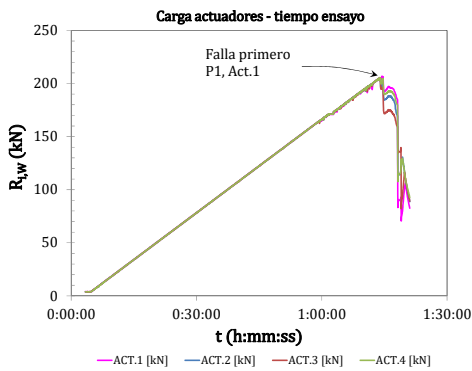


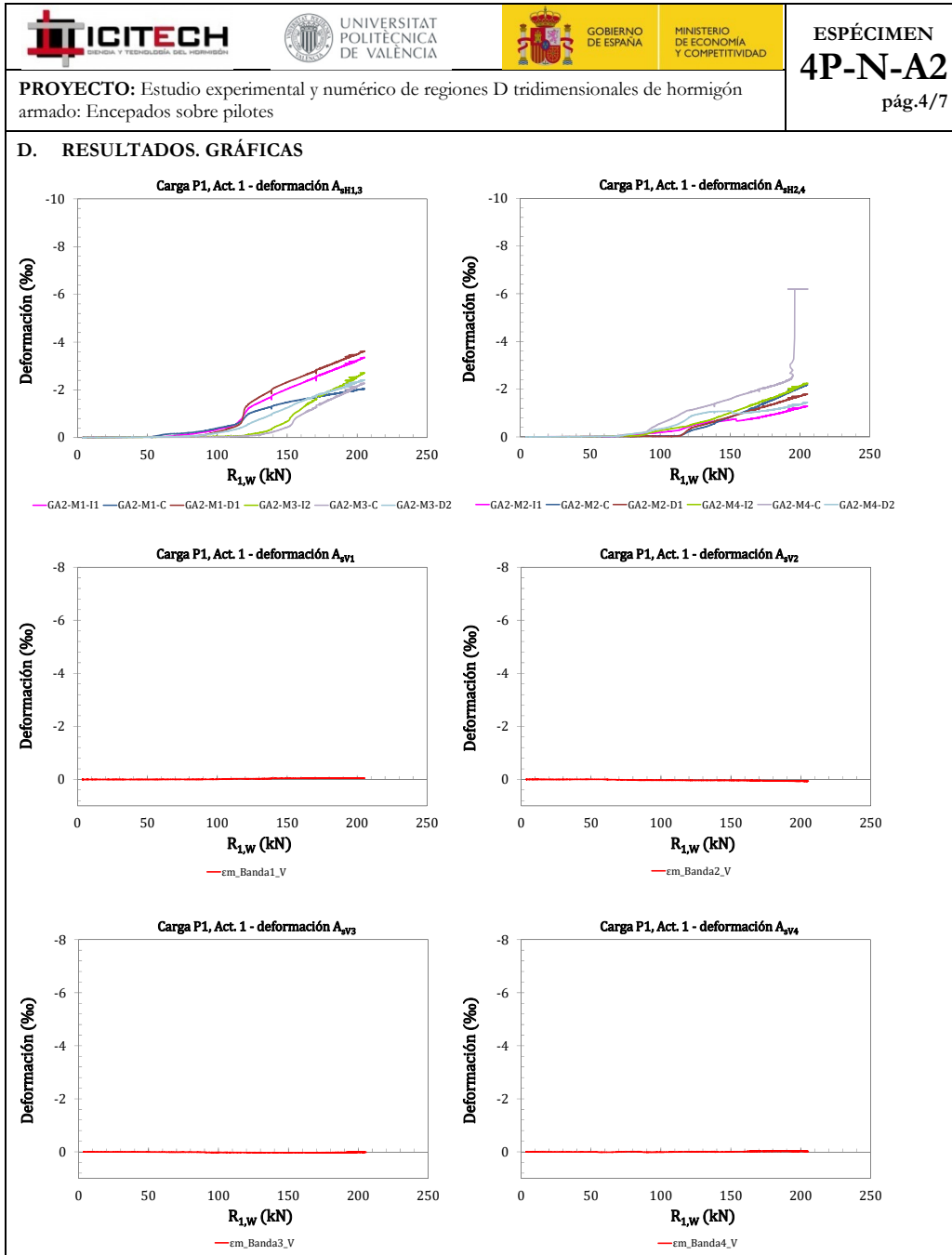


ESPÉCIMEN
4P-N-A2
pág.3/7

PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

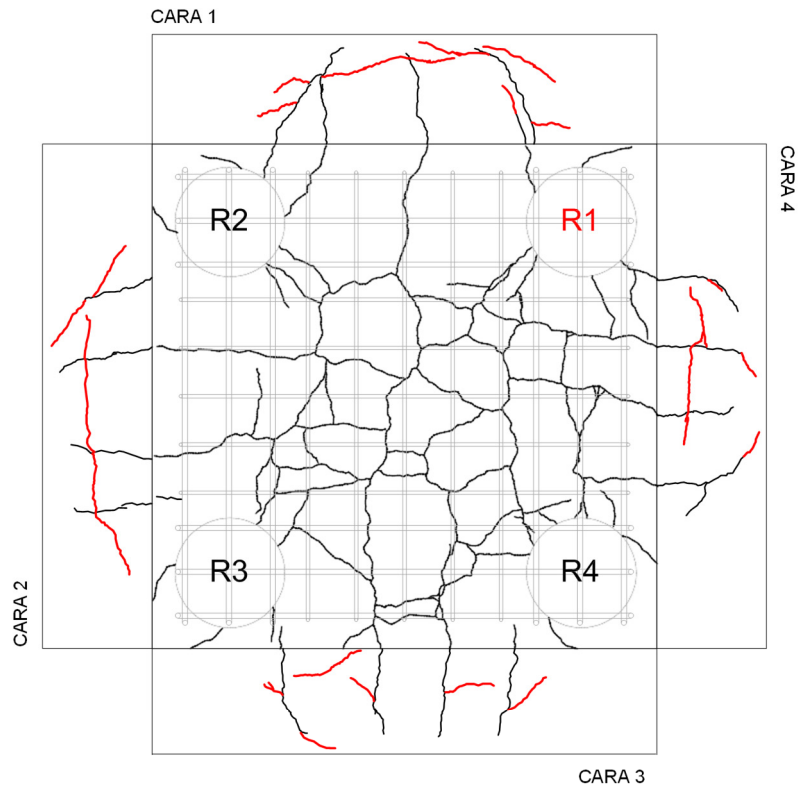
D. RESULTADOS. GRÁFICAS








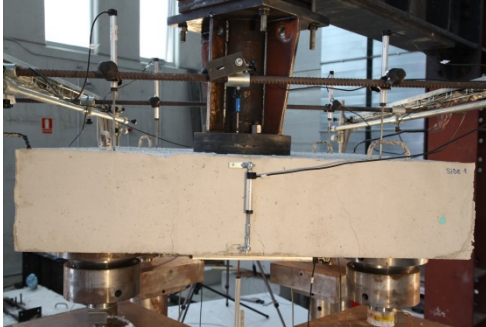
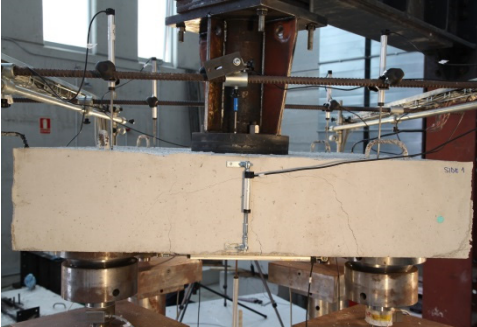
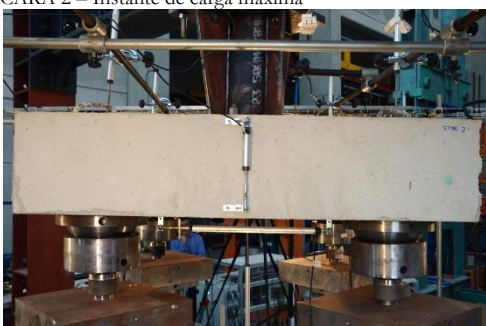
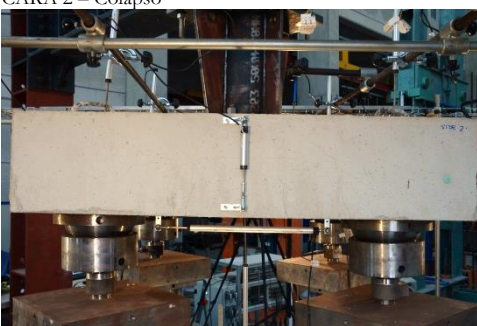
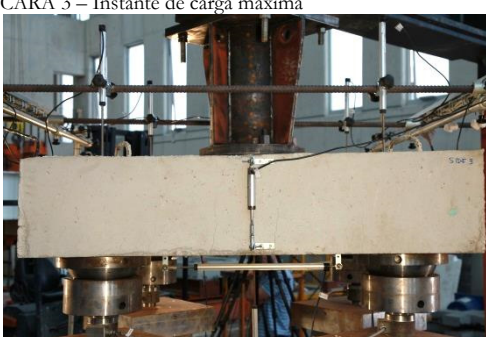

PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

D. RESULTADOS. PATRÓN DE FISURACIÓN



LEYENDA

- carga máxima
- colapso

| | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
|  |  UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA |  GOBIERNO DE ESPAÑA MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD | ESPÉCIMEN 4P-N-A2 pág.6/7 |
| PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes | | | |
| E. FOTOS DE LOS ENSAYOS | | | |
| CARA 1 – Instante de carga máxima | | CARA 1 – Colapso | |
|  | |  | |
| CARA 2 – Instante de carga máxima | | CARA 2 – Colapso | |
|  | |  | |
| CARA 3 – Instante de carga máxima | | CARA 3 – Colapso | |
|  | |  | |

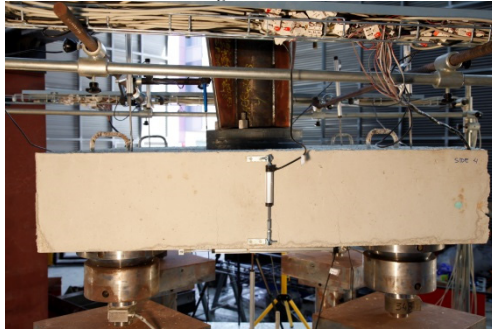


ESPÉCIMEN
4P-N-A2
pág.7/7

PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

E. FOTOS DE LOS ENSAYOS

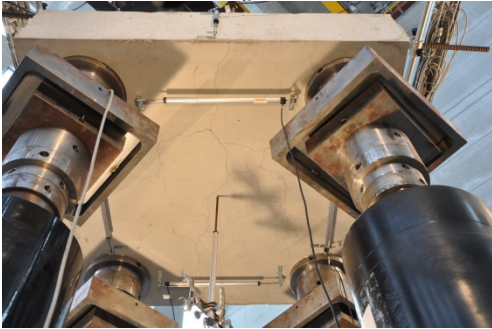
CARA 4 – Instante de carga máxima



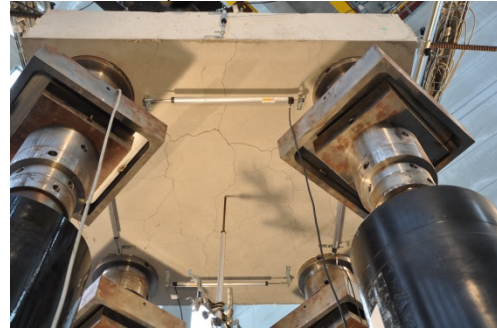
CARA 4 – Colapso



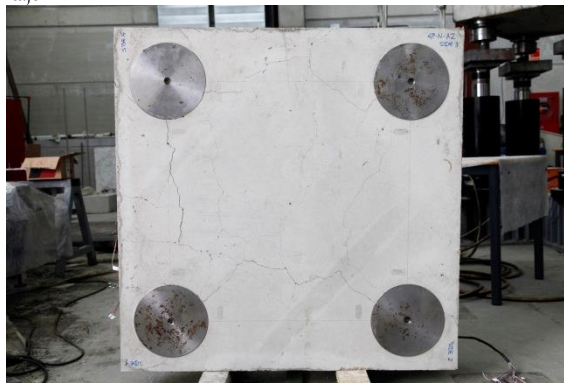
CARA INF – Instante de carga máxima

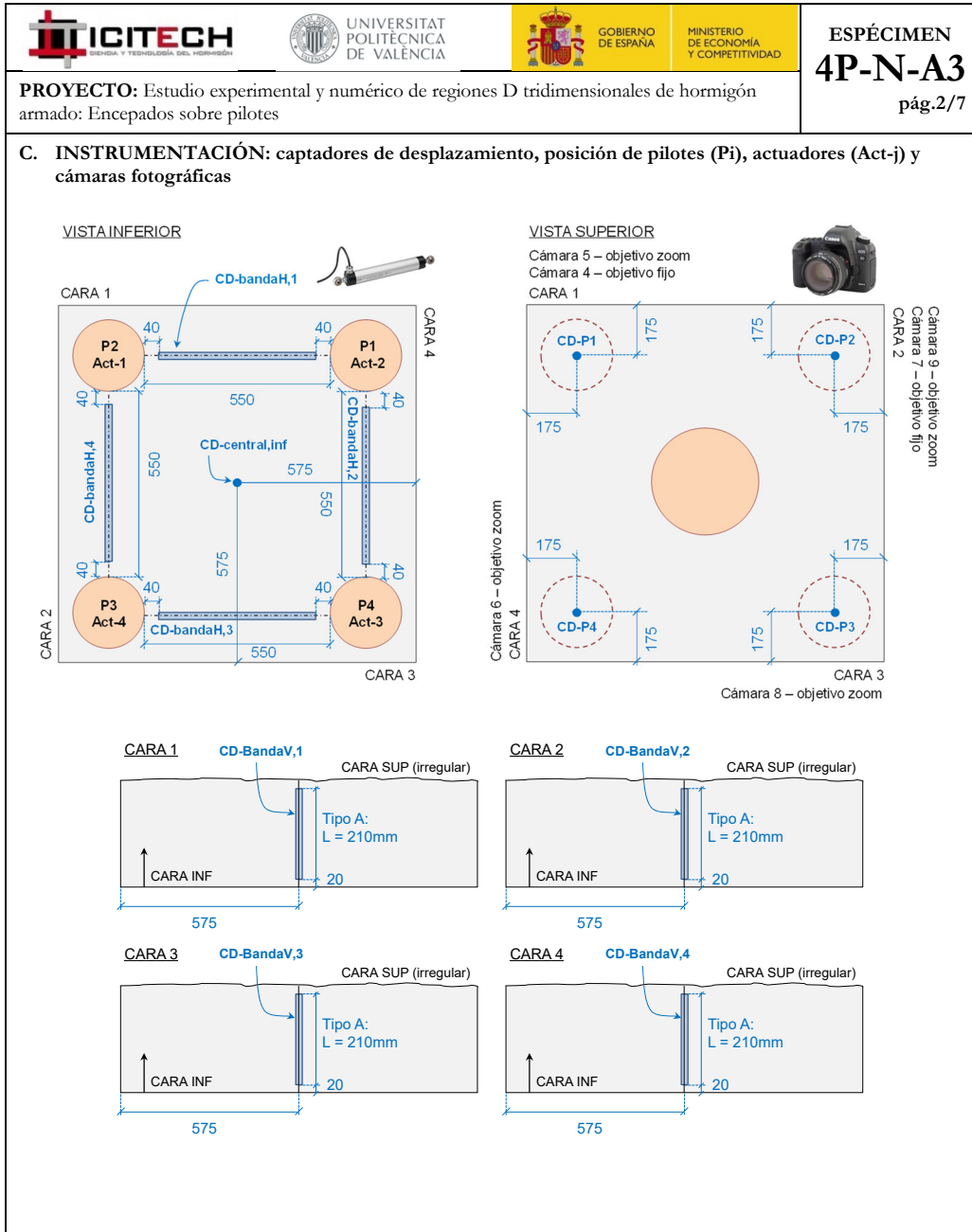


CARA INF – Colapso



CARA INF – Tras desmontaje



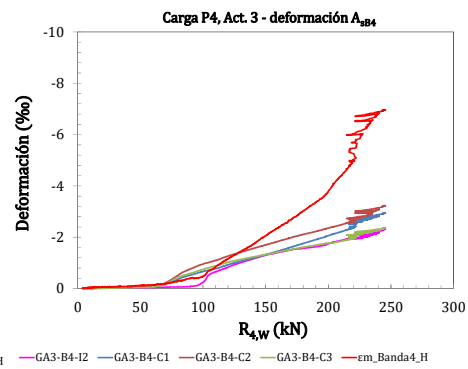
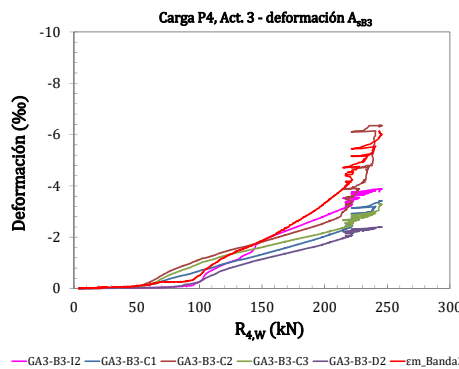
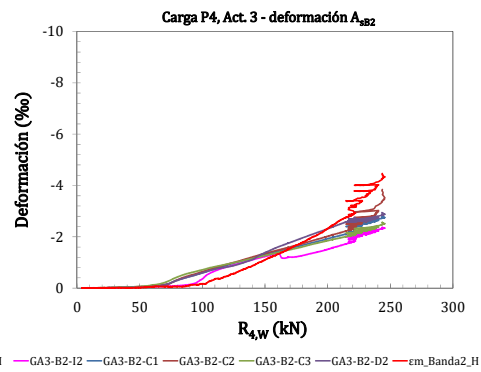
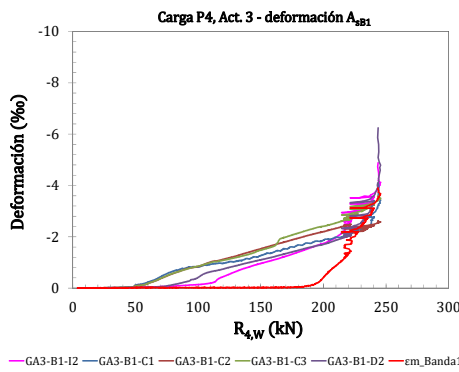
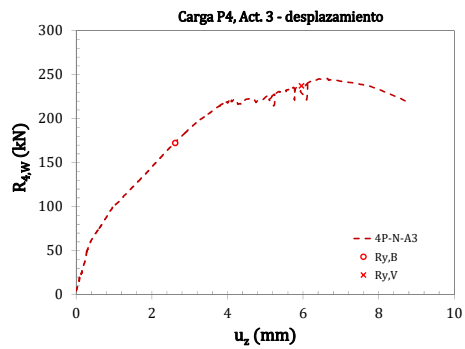
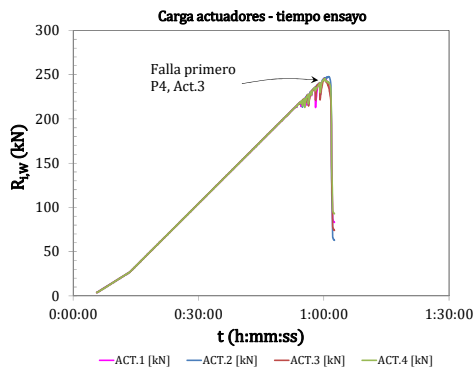


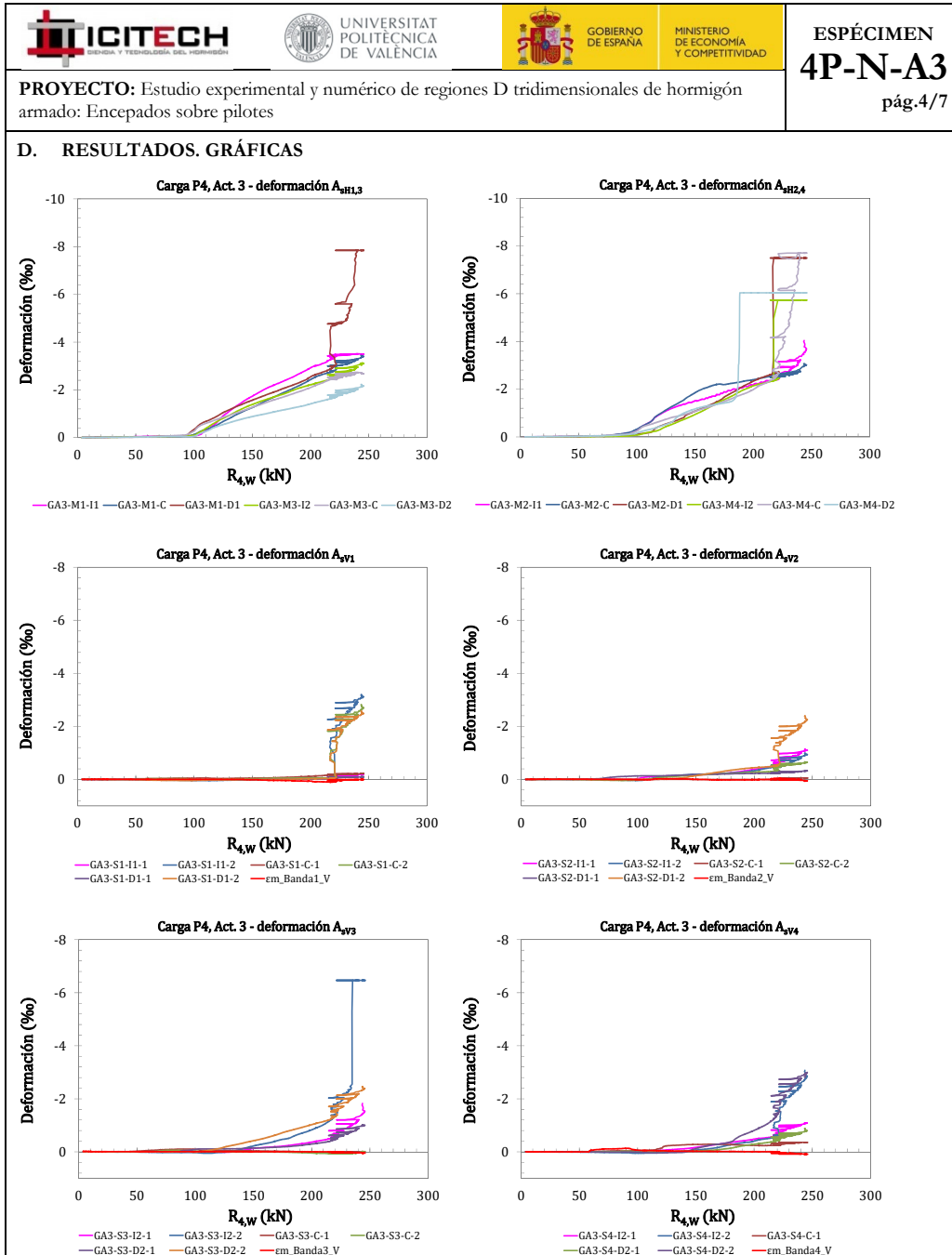


ESPÉCIMEN
4P-N-A3
pág.3/7

PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

D. RESULTADOS. GRÁFICAS



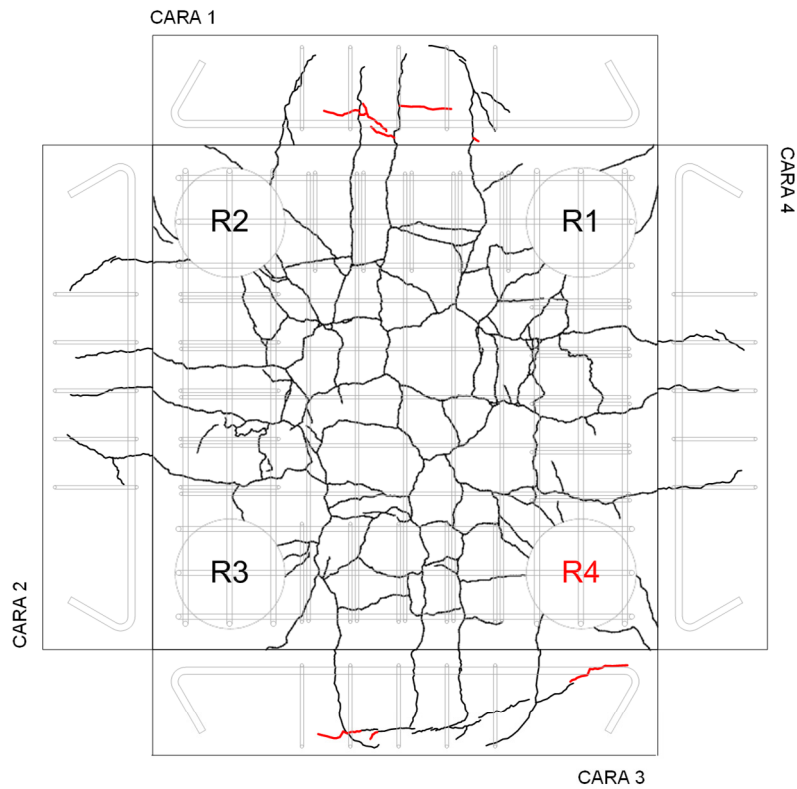






ESPÉCIMEN
4P-N-A3
pág.5/7




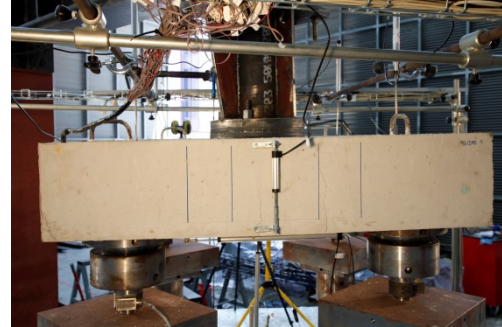
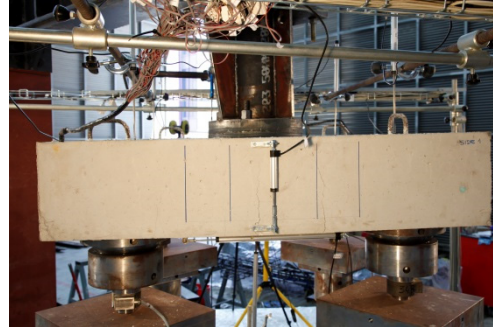
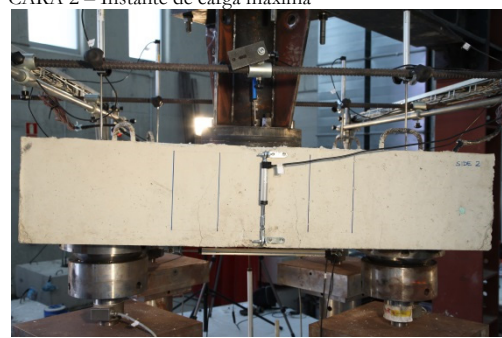
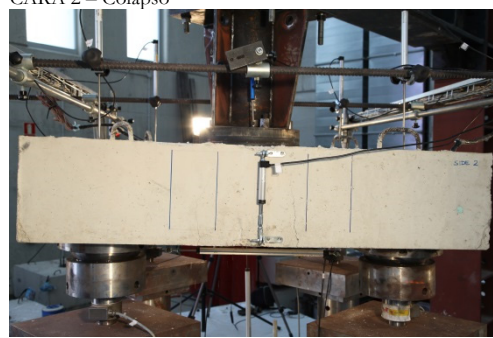
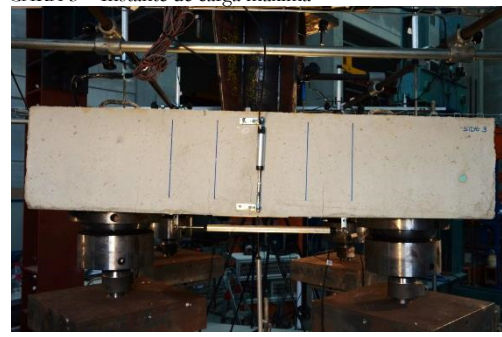
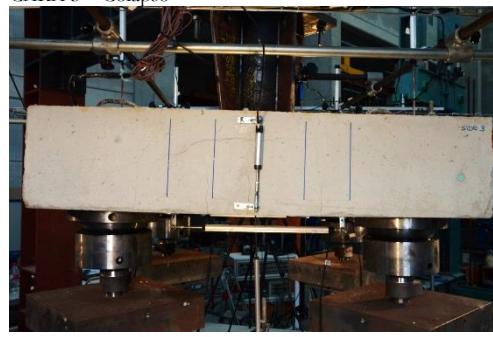
PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

D. RESULTADOS. PATRÓN DE FISURACIÓN



LEYENDA

-  carga máxima
-  colapso

| | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
|  |  UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA |  GOBIERNO DE ESPAÑA MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD | ESPÉCIMEN 4P-N-A3 pág.6/7 |
| PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes | | | |
| E. FOTOS DE LOS ENSAYOS | | | |
| CARA 1 – Instante de carga máxima | | | |
|  | | CARA 1 – Colapso | |
|  | | | |
| CARA 2 – Instante de carga máxima | | | |
|  | | CARA 2 – Colapso | |
|  | | | |
| CARA 3 – Instante de carga máxima | | | |
|  | | CARA 3 – Colapso | |
|  | | | |

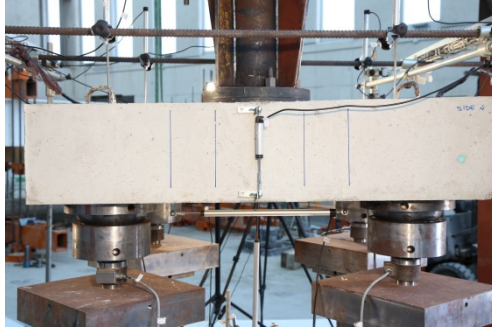


ESPÉCIMEN
4P-N-A3
pág.7/7

PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

E. FOTOS DE LOS ENSAYOS

CARA 4 – Instante de carga máxima



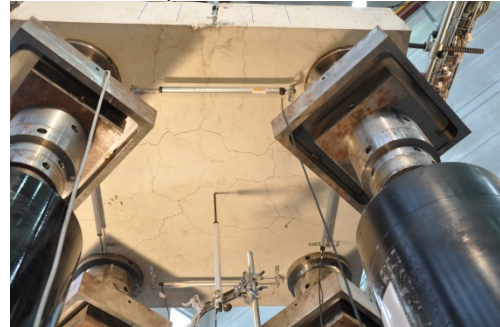
CARA 4 – Colapso



CARA INF – Instante de carga máxima





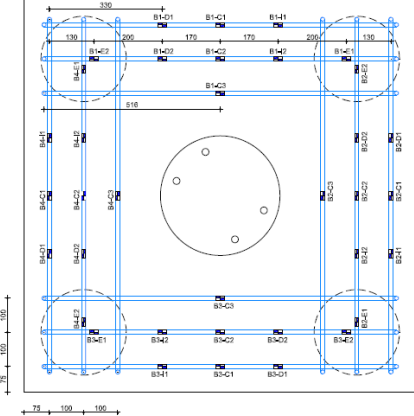
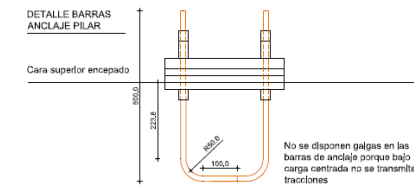


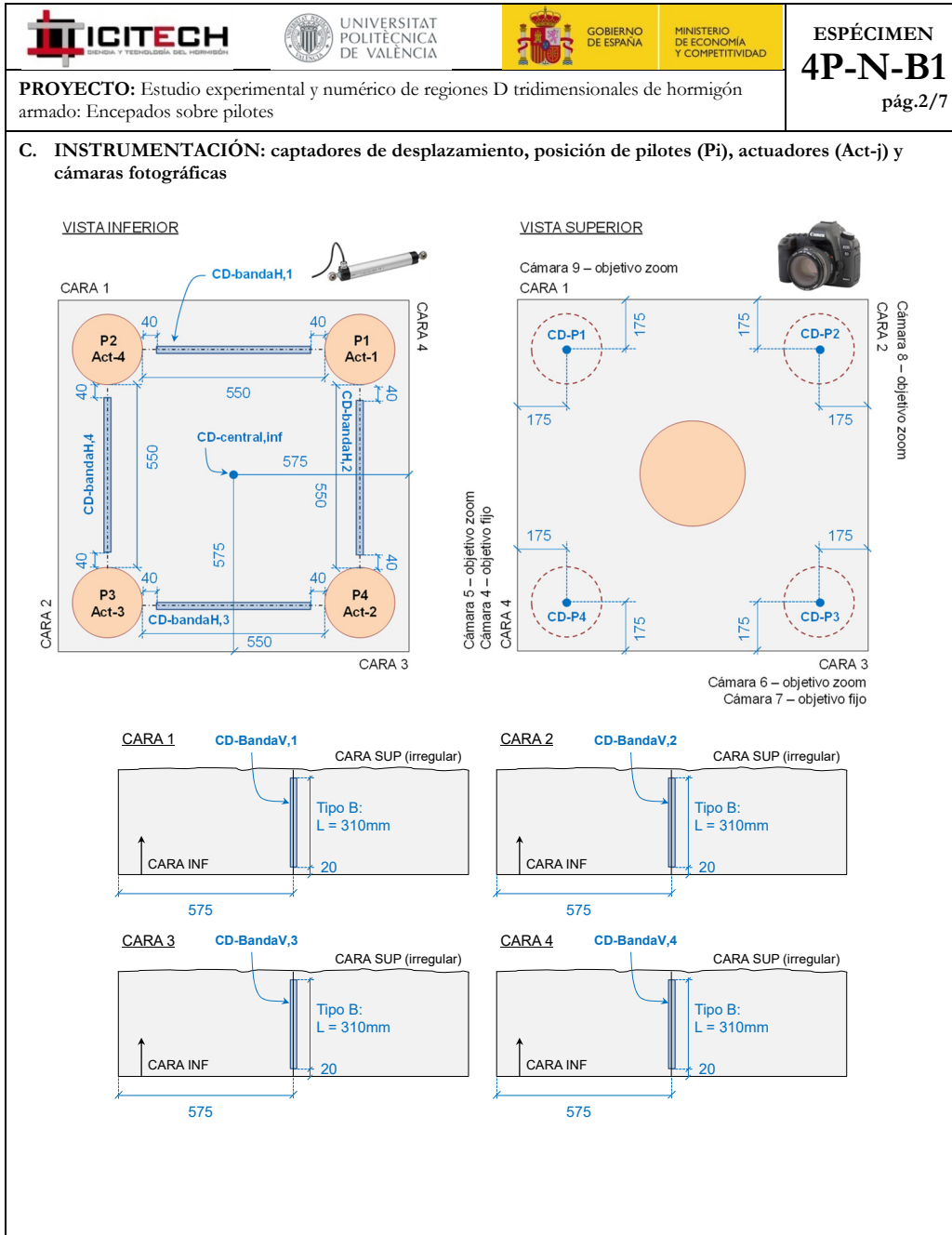
CARA INF – Colapso



CARA INF – Tras desmontaje



| | | | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
|  |  |  |  | <p>ESPÉCIMEN 4P-N-B1 pág.1/7</p> |
| <p>PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes</p> | | | | |
| <p>A. DATOS PRINCIPALES DEL ENSAYO</p> | | | | |
| <p>Fecha horm.: 22/06/2015 Fecha ensayo: 14/09/2015 Edad (días): 84 f_c / f_{ct} (MPa): 26.1 / 3.1</p> <p>Tipo sollicitación: carga centrada</p> <p>Relación entre cargas actuadores Act-2/Act-1: 1 Act-3/Act-1: 1 Act-4/Act-1: 1</p> | <p>Carga de rotura total y por pilote:</p> <p>$\Sigma R_{max,W}$ (kN): 756.2 $R_{max,W}$ (kN): 189.1 Modo de fallo: F-Y_B</p> | | | |
| <p>B. GEOMETRÍA DEL ENCEPADO Y ARMADO</p> | | | | |
| <p>Descripción del armado y su monitorización:</p> <p>L (mm): 1150 h (mm): 350 e (mm): 800 ϕ (mm): 250 c (mm): 350 $r_{geo,inf}$ (mm): 40</p> |  | | | |
| <p>ARMADO</p> <p>Banda: 3ϕ12</p> <p>Sec. horizontal: -</p> <p>Sec. vertical: -</p> <p>Anclaje pilar: 4ϕ16 (Dywidag)</p> | <p>ARMADO</p> <p>BANDA: 3ϕ12</p> <p>Sec. horizontal: -</p> <p>Sec. vertical: -</p> <p>Anclaje pilar: 4ϕ16 (Dywidag)</p> | <p>DETALLE BARRAS ANCLAJE PILAR</p>  <p>No se disponen galgas en las barras de anclaje porque bajo carga centrada no se transmiten tracciones</p> | | |
| <p>36 GALGAS: GB1-id s/plano</p> | | | | |

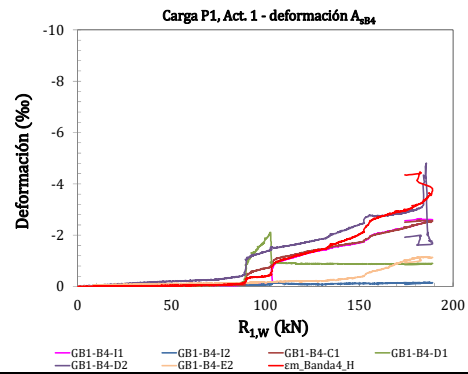
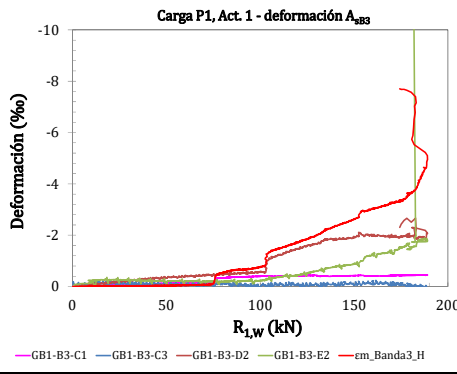
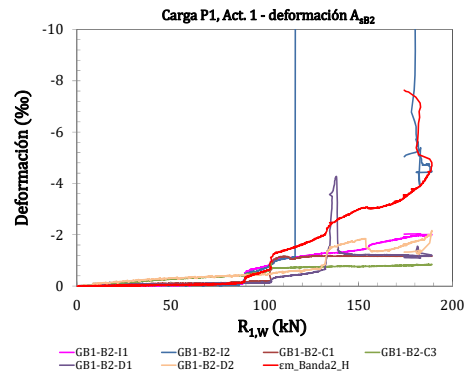
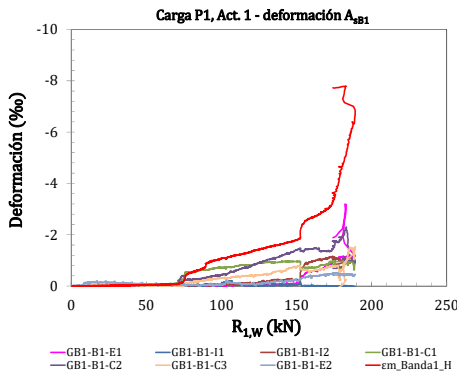
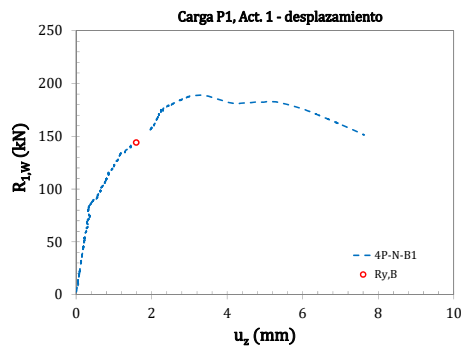
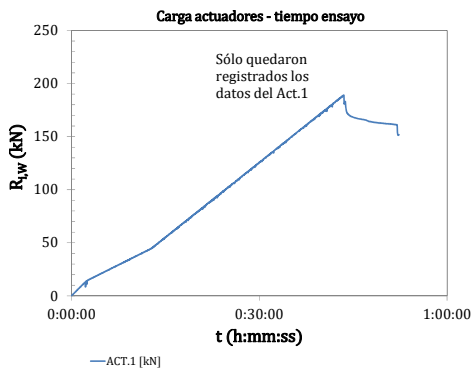


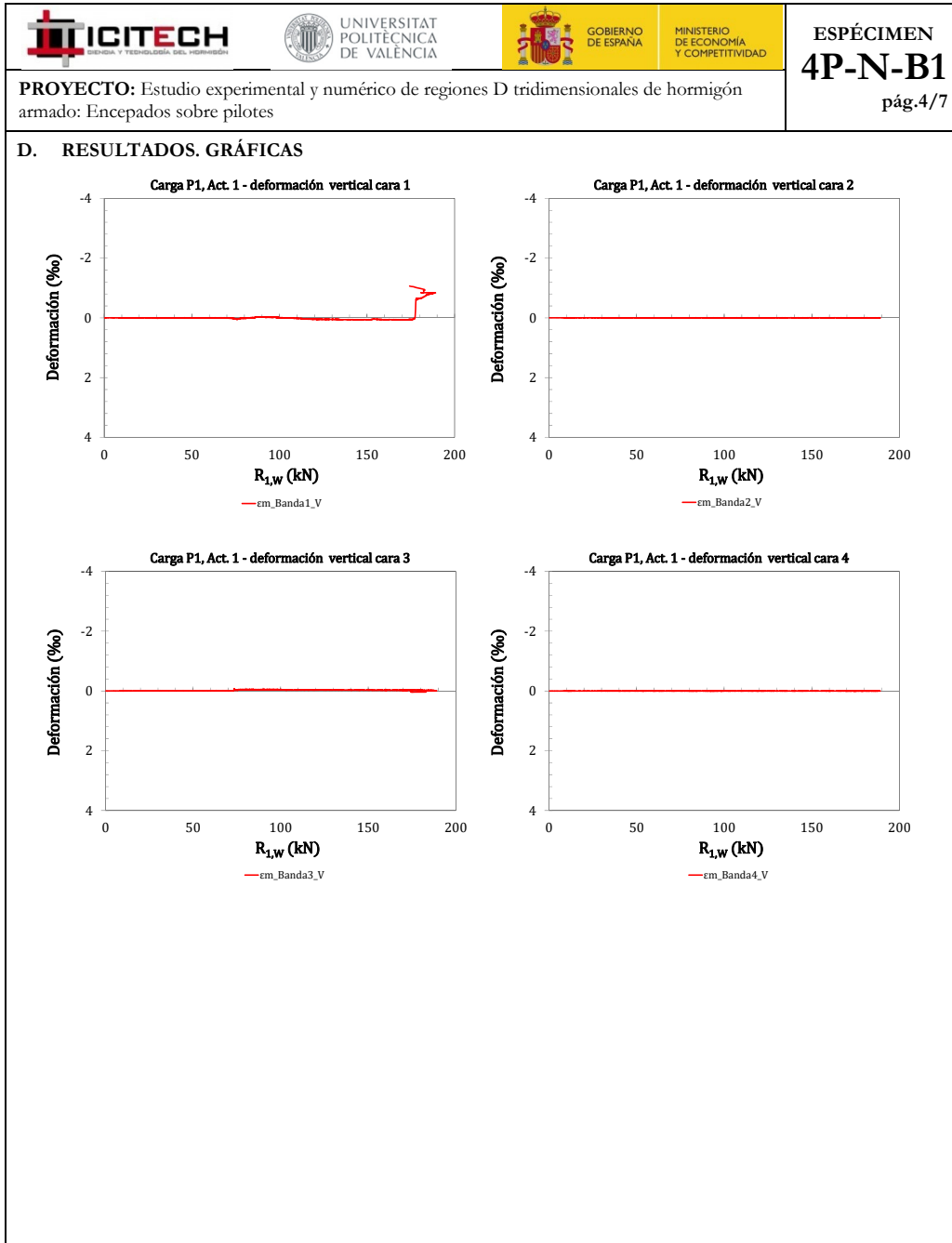


ESPÉCIMEN
4P-N-B1
pág.3/7

PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

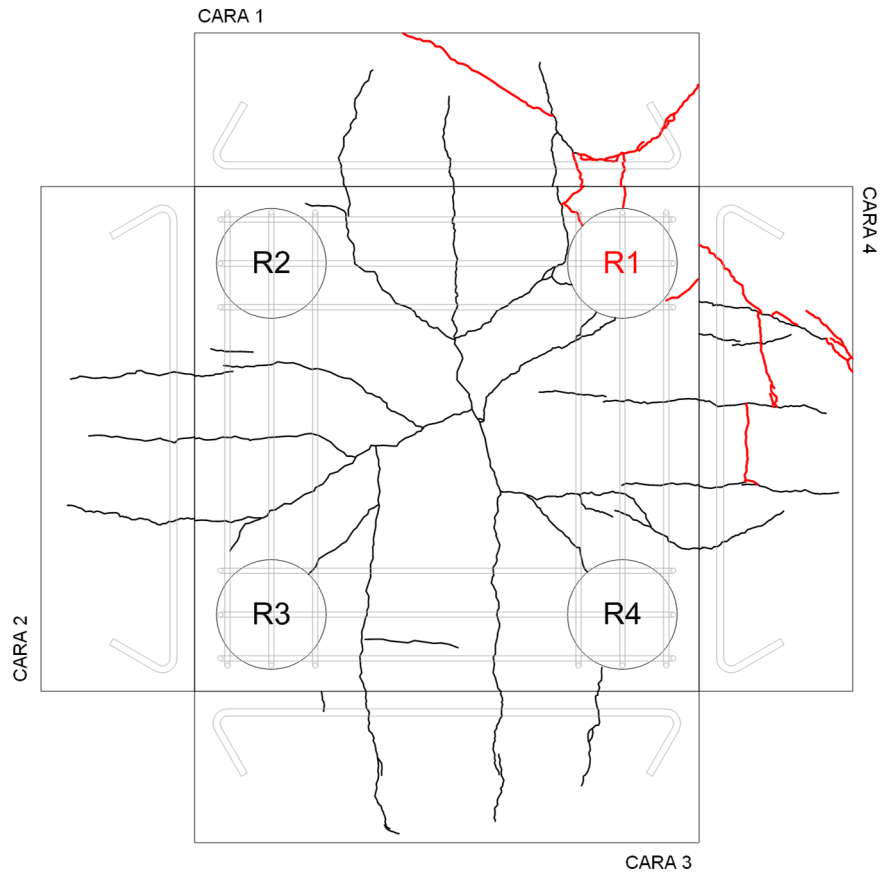
D. RESULTADOS. GRÁFICAS









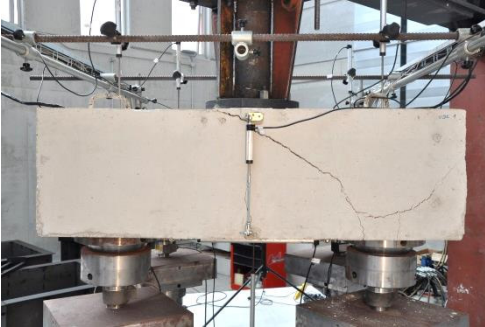
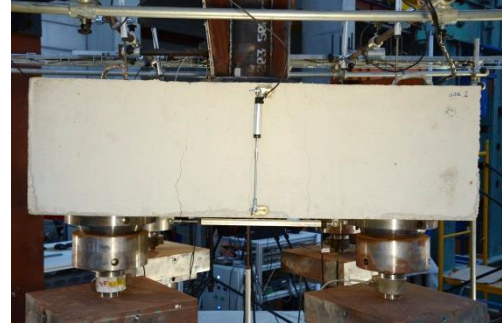
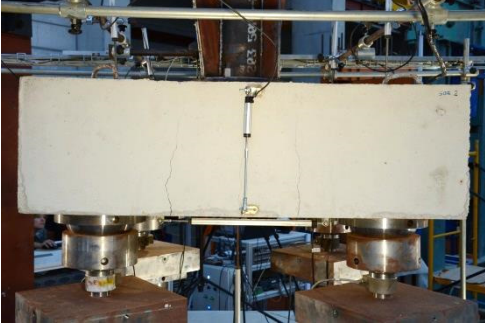
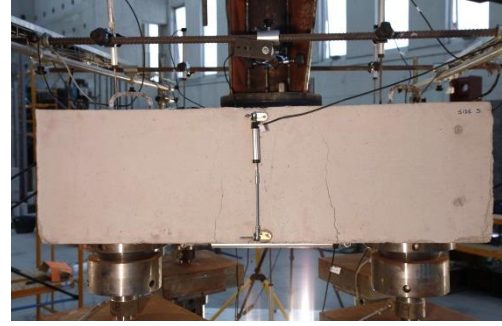
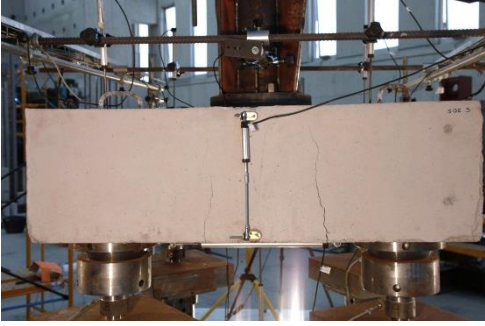
PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

D. RESULTADOS. PATRÓN DE FISURACIÓN



LEYENDA

- carga máxima
- colapso

| | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA |  GOBIERNO DE ESPAÑA |  MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD | ESPÉCIMEN 4P-N-B1 pág.6/7 |
| PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes | | | | |
| E. FOTOS DE LOS ENSAYOS | | | | |
| CARA 1 – Instante de carga máxima | | | | |
| No disponible por fallo del sistema automático de disparo de la cámara 9 | | | | |
| CARA 1 – Colapso | | | |  |
| CARA 2 – Instante de carga máxima | | | | |
|  | | | | CARA 2 – Colapso |
|  | | | | |
| CARA 3 – Instante de carga máxima | | | | |
|  | | | | CARA 3 – Colapso |
|  | | | | |

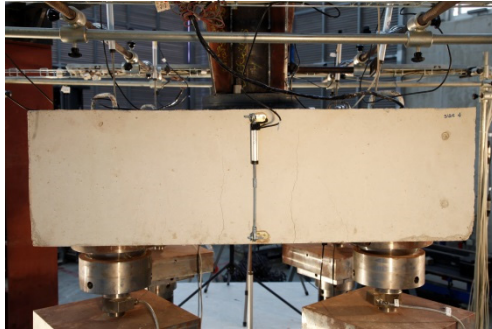


ESPÉCIMEN
4P-N-B1
pág.7/7

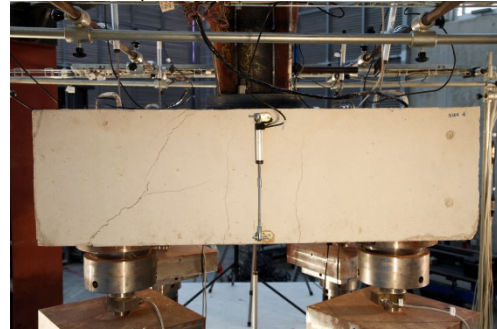
PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

E. FOTOS DE LOS ENSAYOS

CARA 4 – Instante de carga máxima



CARA 4 – Colapso



CARA INF – Instante de carga máxima



CARA INF – Colapso



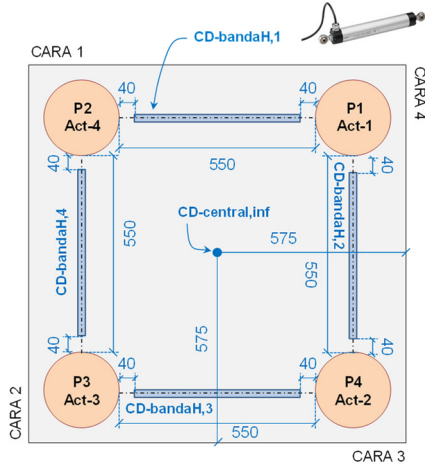
CARA INF – Tras desmontaje



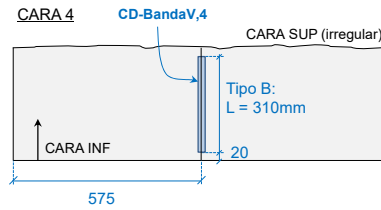
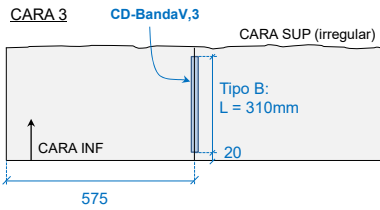
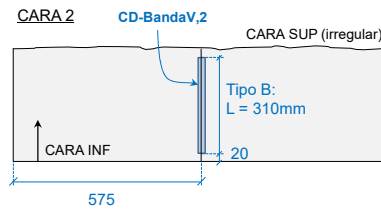
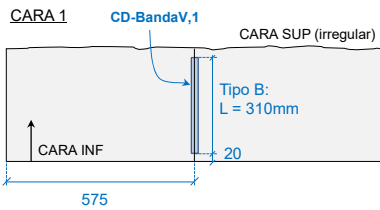
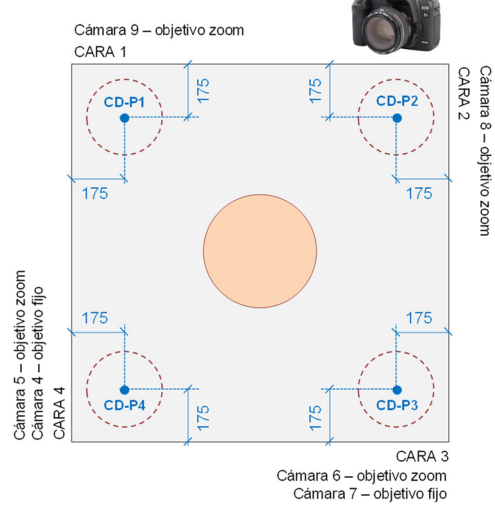
PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

C. INSTRUMENTACIÓN: captadores de desplazamiento, posición de pilotes (Pi), actuadores (Act-i) y cámaras fotográficas

VISTA INFERIOR



VISTA SUPERIOR

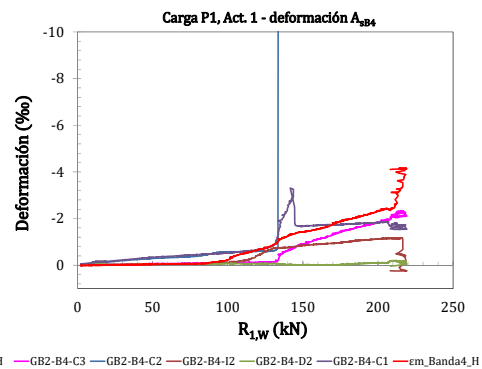
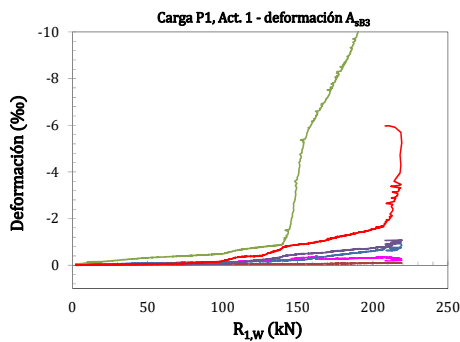
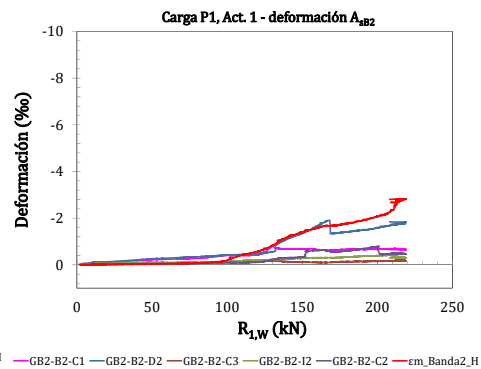
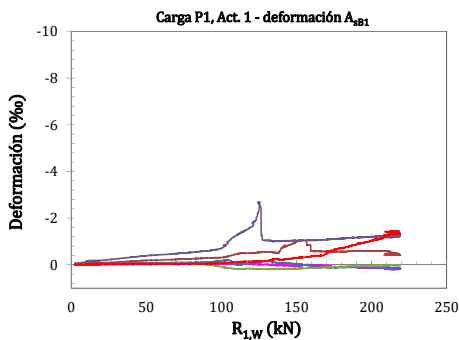
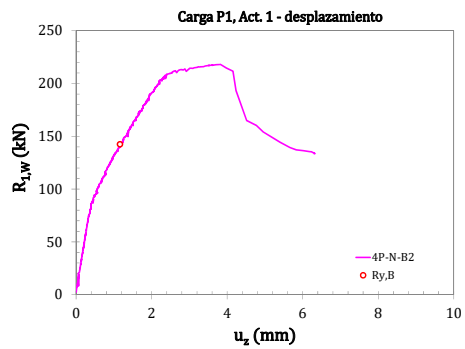
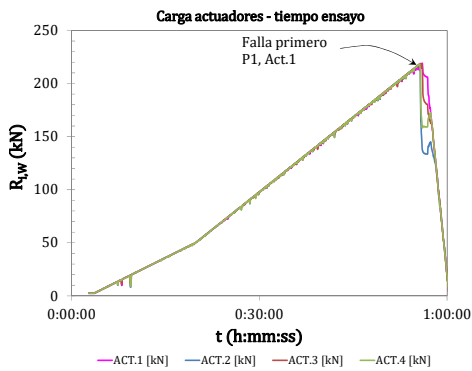


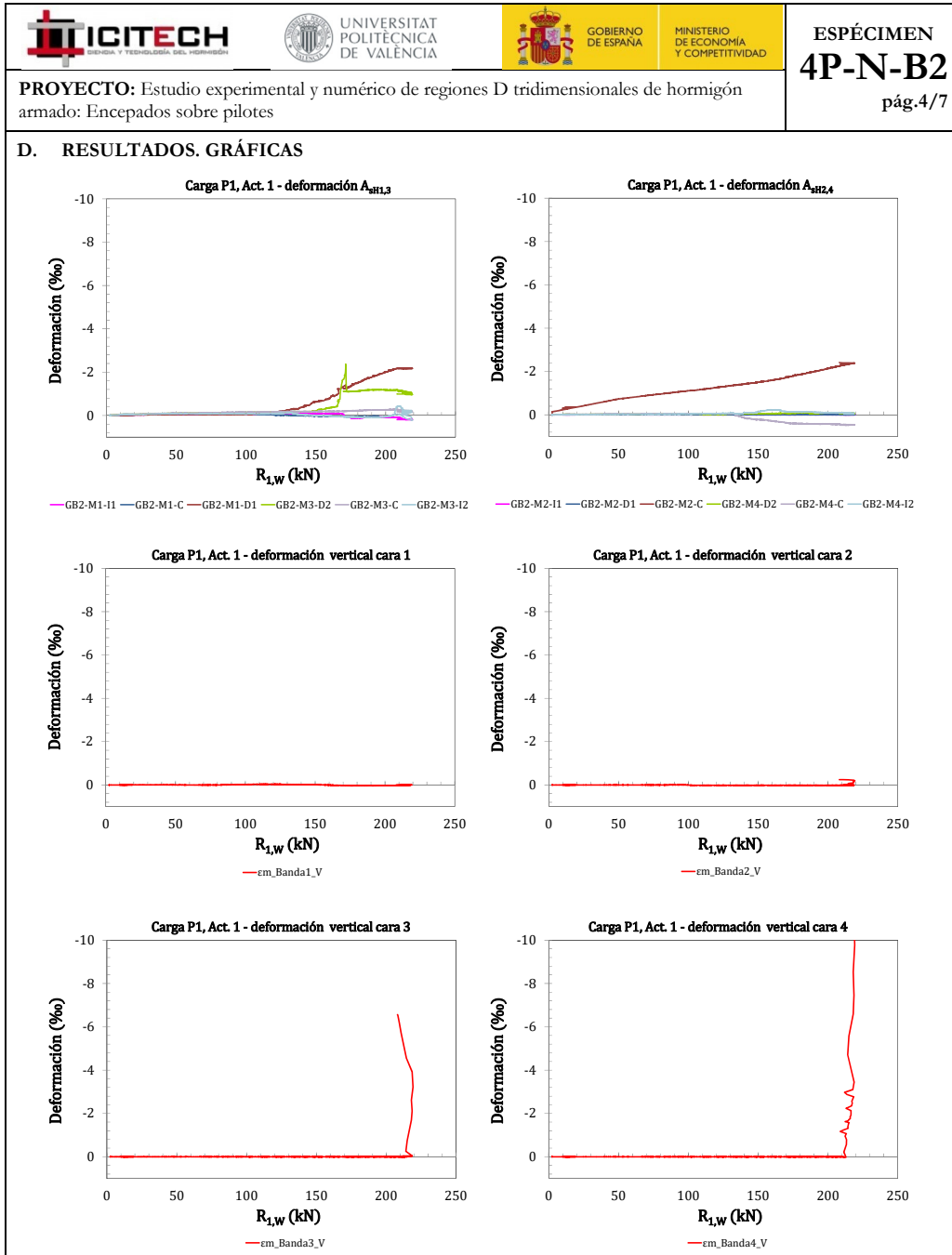


ESPÉCIMEN
4P-N-B2
pág.3/7

PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

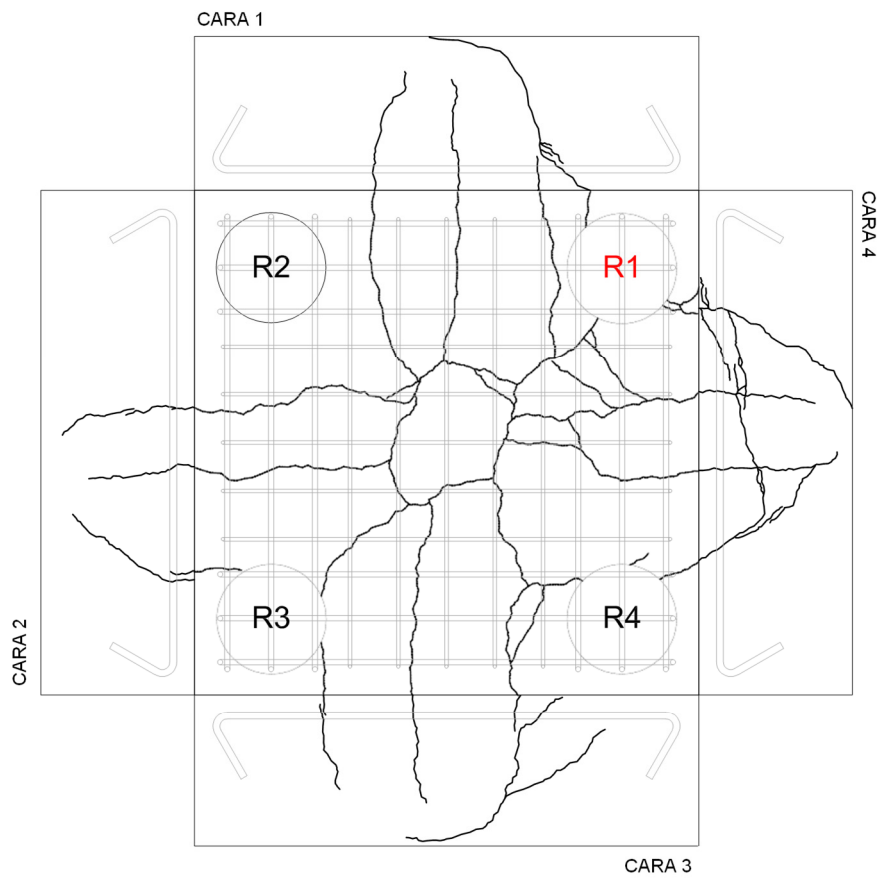
D. RESULTADOS. GRÁFICAS












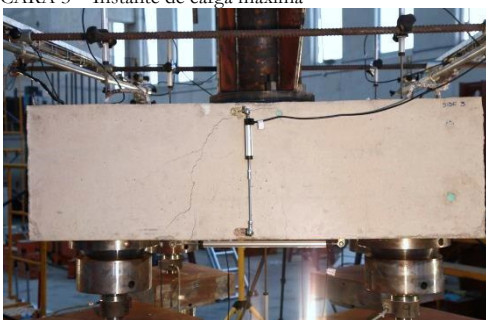

PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

D. RESULTADOS. PATRÓN DE FISURACIÓN



LEYENDA

- carga máxima
- colapso

| | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
|  |  UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA |  GOBIERNO DE ESPAÑA MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD | ESPÉCIMEN 4P-N-B2 pág.6/7 |
| PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes | | | |
| E. FOTOS DE LOS ENSAYOS | | | |
| CARA 1 – Instante de carga máxima | | CARA 1 – Colapso | |
|  | |  | |
| CARA 2 – Instante de carga máxima | | CARA 2 – Colapso | |
|  | |  | |
| CARA 3 – Instante de carga máxima | | CARA 3 – Colapso | |
|  | |  | |



ESPÉCIMEN
4P-N-B2
pág.7/7

PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

E. FOTOS DE LOS ENSAYOS

CARA 4 – Instante de carga máxima



CARA 4 – Colapso



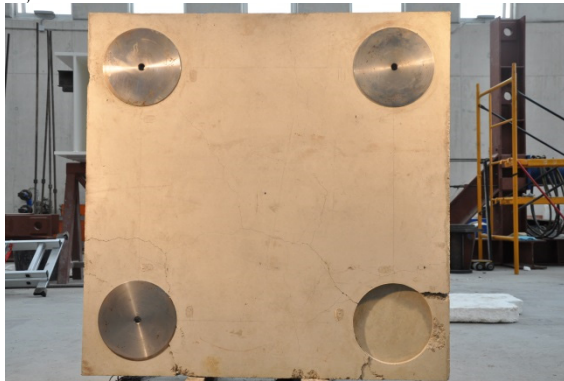
CARA INF – Instante de carga máxima



CARA INF – Colapso



CARA INF – Tras desmontaje



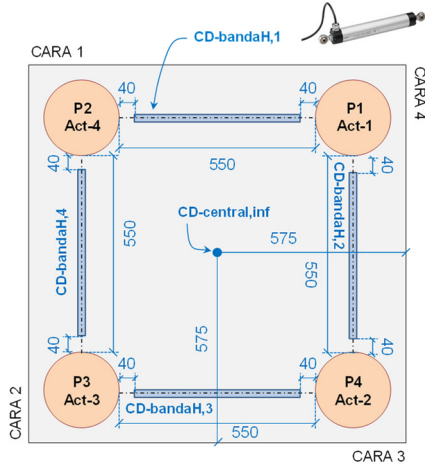
*Estudio de encepados de tres y cuatro pilotes solicitados por cargas centradas y excéntricas:
análisis experimental y de las formulaciones de diseño*

| | | | | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| | | | | <p>ESPÉCIMEN 4P-N-B3 pág.1/7</p> |
| <p>PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes</p> | | | | |
| <p>A. DATOS PRINCIPALES DEL ENSAYO</p> | | | | |
| <p>Fecha horm.: 22/06/2015 Fecha ensayo: 29/09/2015 Edad (días): 99 f_c / f_{ct} (MPa): 29.9 / 2.2</p> <p>Tipo sollicitación: carga centrada</p> <p>Relación entre cargas actuadores Act-2/Act-1: 1 Act-3/Act-1: 1 Act-4/Act-1: 1</p> | | <p>Carga de rotura total y por pilote:</p> <p>$\sum R_{max,W}$ (kN): 1127.8 $R_{max,W}$ (kN): 281.5 Modo de fallo: D-Y_{BHV}</p> | | |
| <p>B. GEOMETRÍA DEL ENCEPADO Y ARMADO</p> | | | | |
| <p>Descripción del armado y su monitorización:</p> | | | | |
| <p>L (mm): 1150 h (mm): 350 e (mm): 800 ϕ (mm): 250 c (mm): 350 $f_{geo,inf}$ (mm): 40</p> | <p>ARMADO BANDA: S212 SEC. HORIZ: E28 SEC. VERTICAL: E28</p> <p>NOMENCLATURA GALGAS GB3-id s/plano</p> <p>56 GALGAS</p> | | <p>GALGAS EN CERCOS BANDAS 2 Y 4 I.2.4 I.1.1 C. D</p> | <p>GALGAS EN CERCOS BANDAS 1 Y 3 I.1.3 I.1.1 C. D</p> |
| <p>ARMADO</p> <p>Banda: 3ϕ12</p> <p>Sec. horizontal: 5ϕ8, por dirección</p> <p>Sec. vertical: 5cϕ8, por banda</p> <p>Anclaje pilar: 4ϕ16 (Dywidag)</p> | <p>56 GALGAS: GB3-id s/plano</p> | <p>DETALLE BARRAS ANCLAJE PILAR</p> <p>Carra superior encepado</p> <p>No se disponen galgas en las barras de anclaje porque bajo carga centrada no se transmiten tracciones</p> | | |

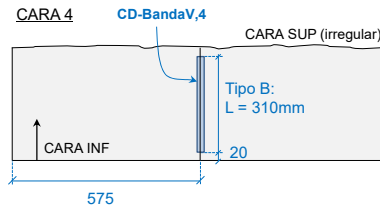
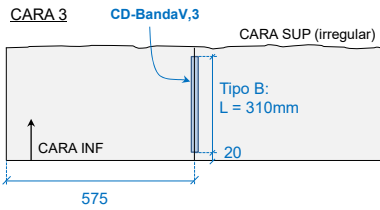
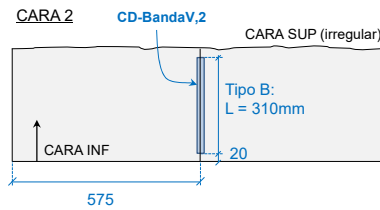
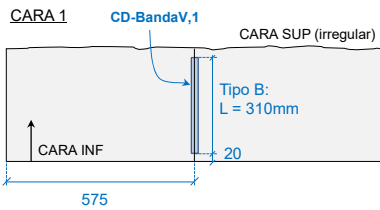
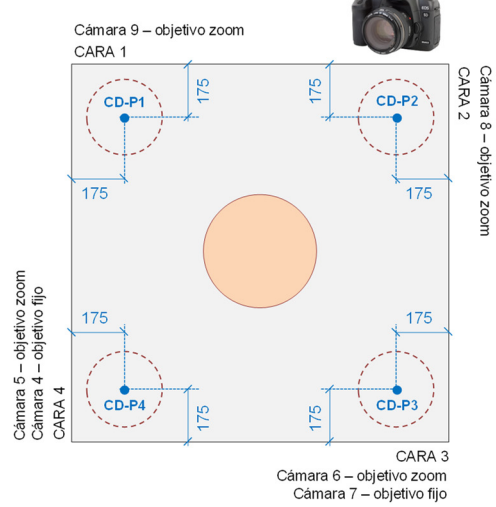
PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

C. INSTRUMENTACIÓN: captadores de desplazamiento, posición de pilotes (Pi), actuadores (Act-i) y cámaras fotográficas

VISTA INFERIOR



VISTA SUPERIOR

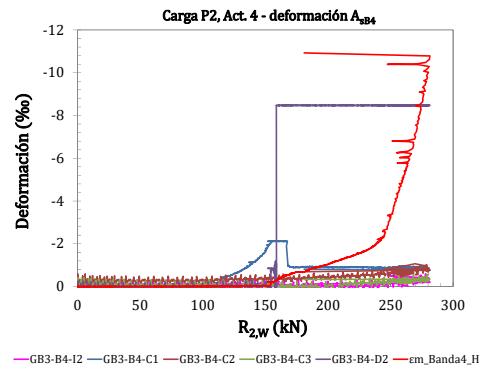
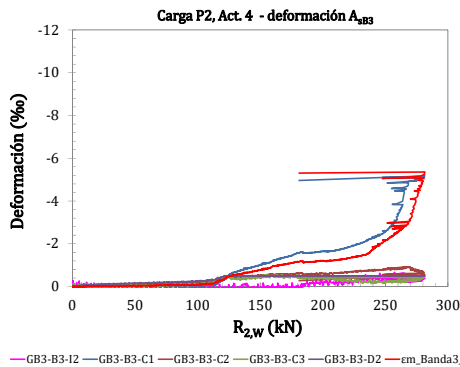
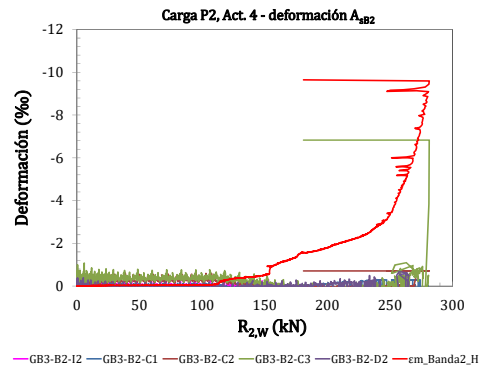
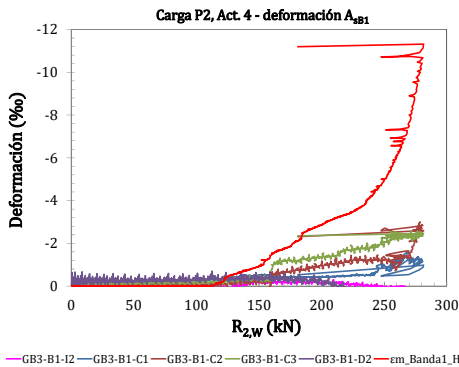
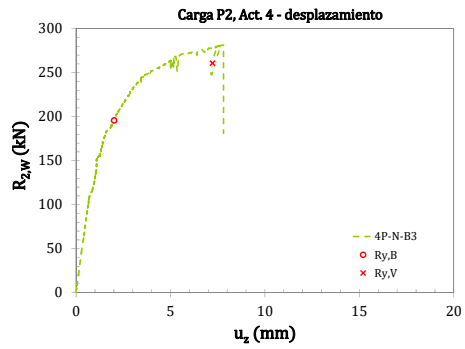
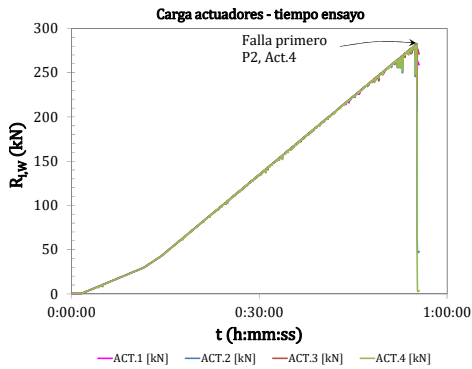


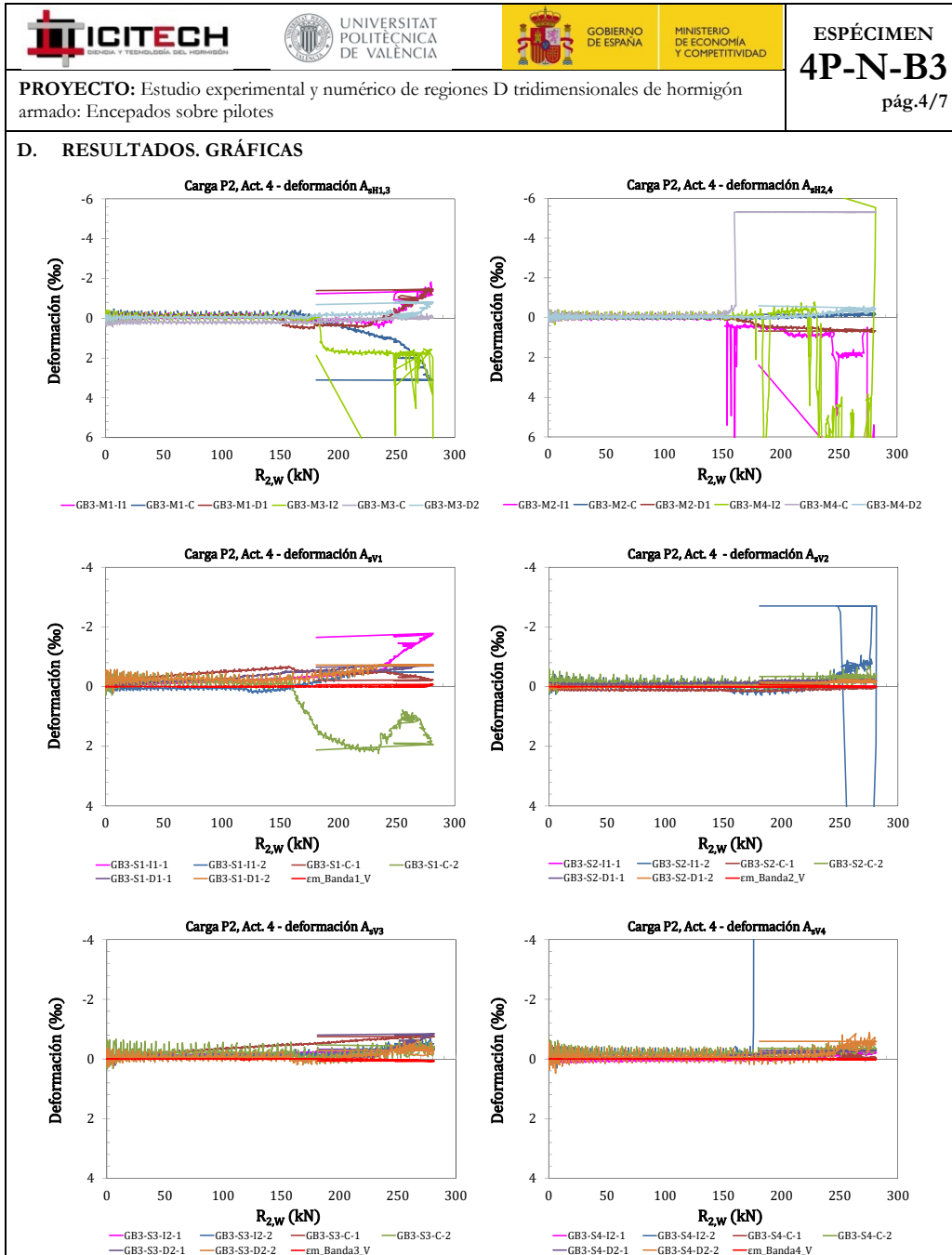


ESPÉCIMEN
4P-N-B3
pág.3/7

PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

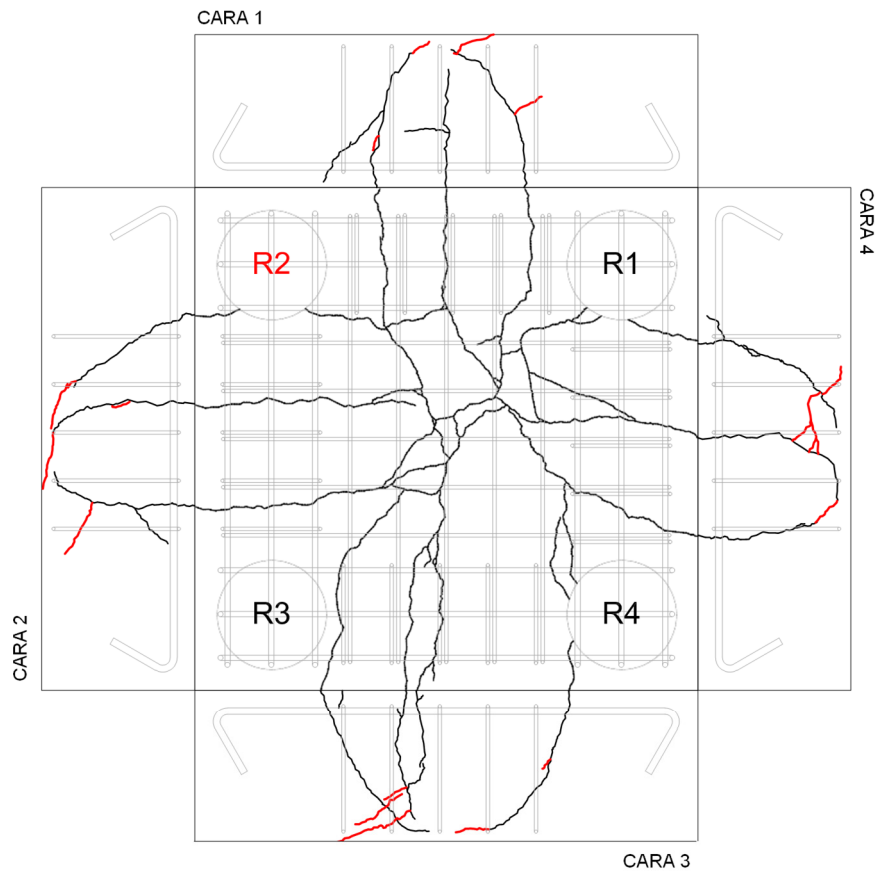
D. RESULTADOS. GRÁFICAS









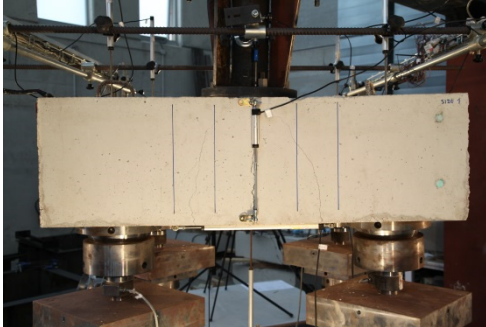
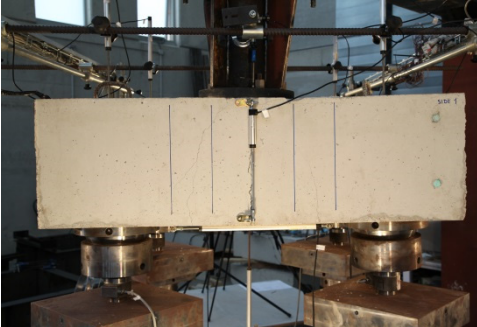
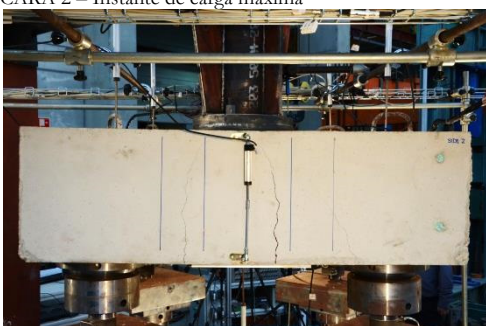
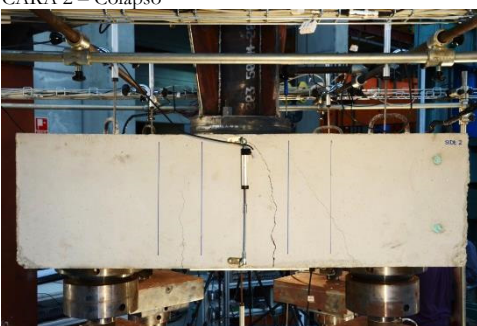

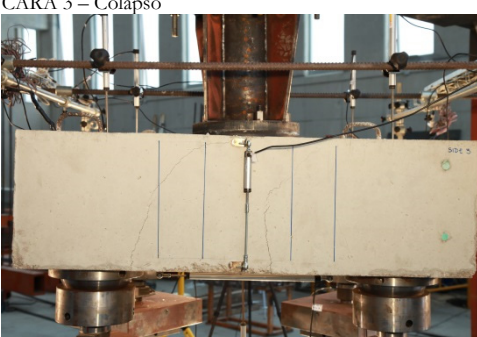
PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

D. RESULTADOS. PATRÓN DE FISURACIÓN



LEYENDA

- carga máxima
- colapso

| | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
|  |  UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA |  GOBIERNO DE ESPAÑA |  MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD | ESPÉCIMEN 4P-N-B3 pág.6/7 |
| PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes | | | | |
| E. FOTOS DE LOS ENSAYOS | | | | |
| CARA 1 – Instante de carga máxima | | | | |
|  | | CARA 1 – Colapso | | |
|  | | CARA 2 – Instante de carga máxima | | |
|  | | CARA 2 – Colapso | | |
|  | | CARA 3 – Instante de carga máxima | | |
|  | | CARA 3 – Colapso | | |
|  | | | | |

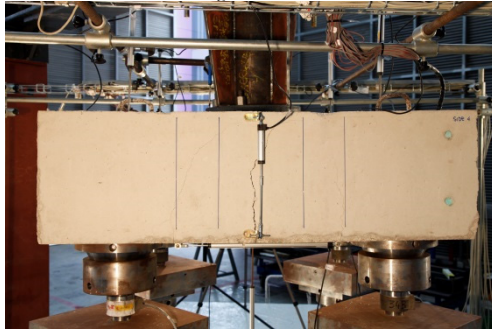


ESPÉCIMEN
4P-N-B3
pág.7/7

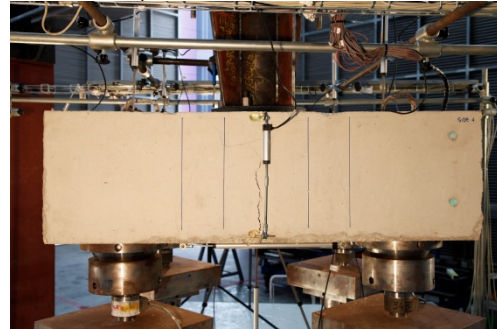
PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

E. FOTOS DE LOS ENSAYOS

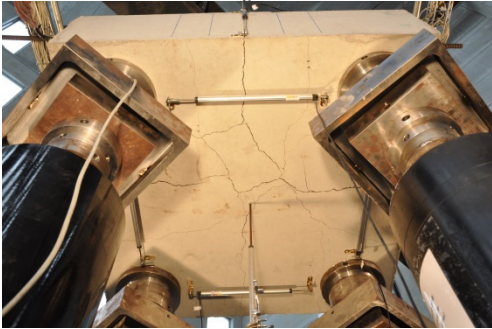
CARA 4 – Instante de carga máxima



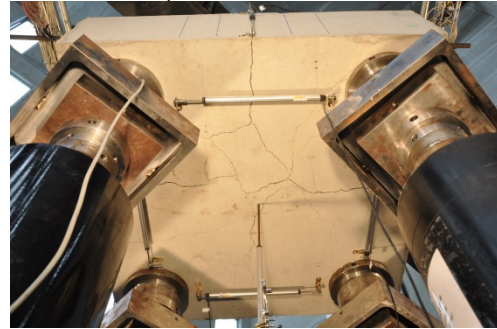
CARA 4 – Colapso



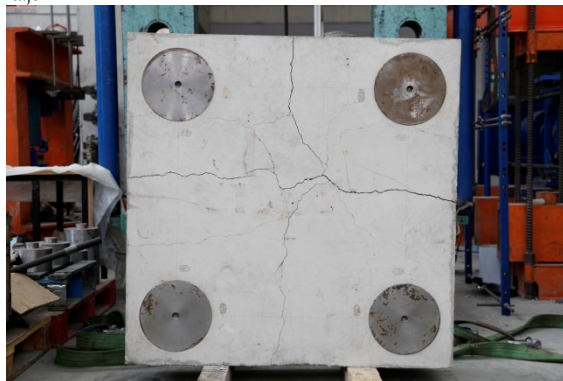
CARA INF – Instante de carga máxima





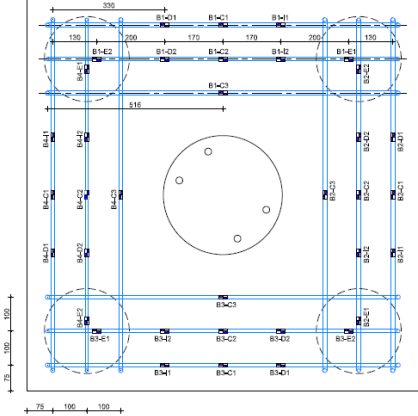
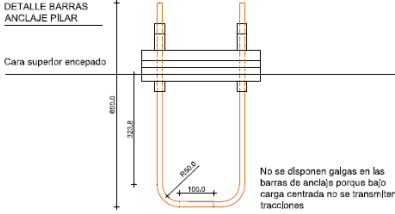


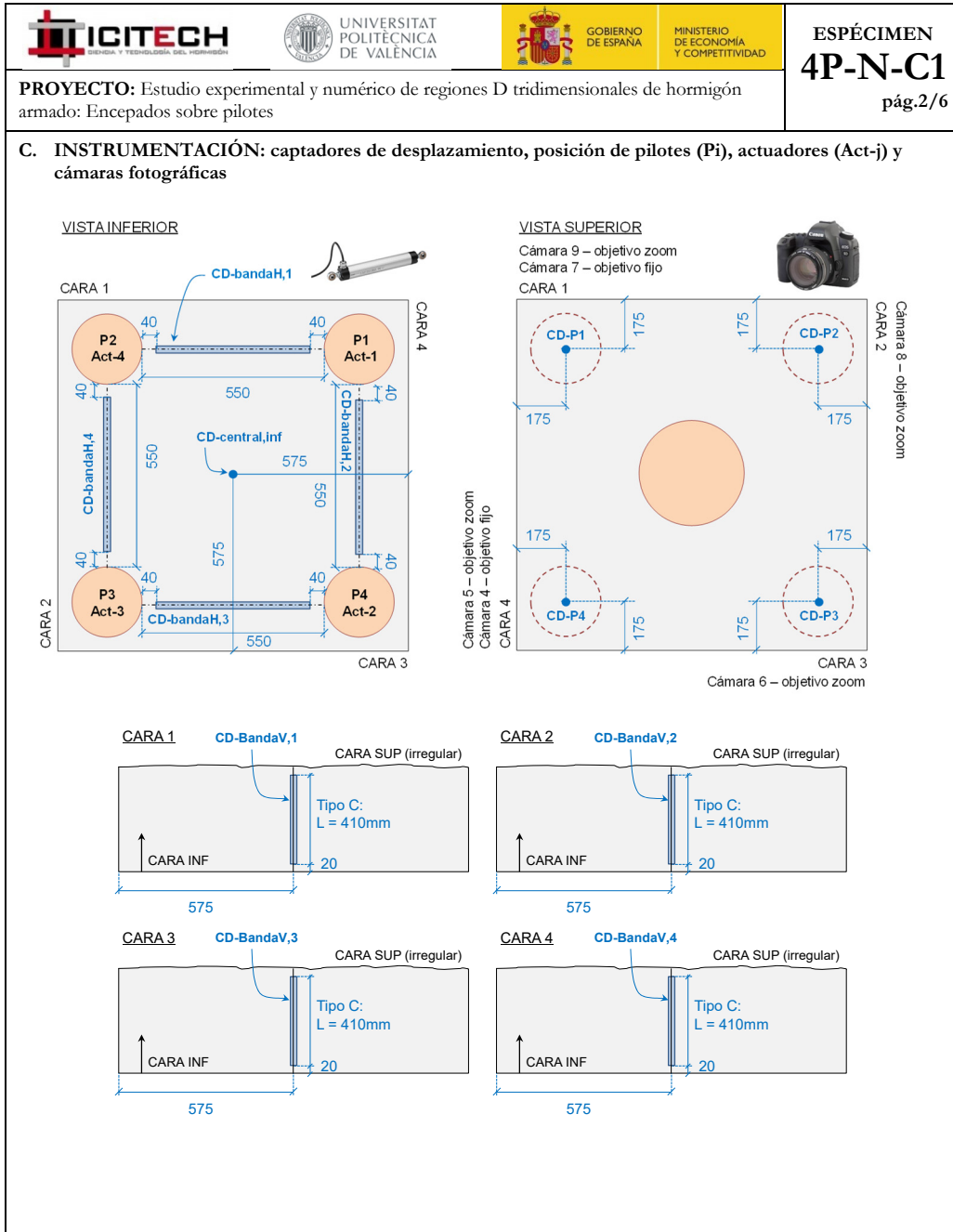
CARA INF – Colapso



CARA INF – Tras desmontaje



| | | | | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
|  |  |  |  | <p>ESPÉCIMEN 4P-N-C1 pág.1/6</p> |
| <p>PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes</p> | | | | |
| <p>A. DATOS PRINCIPALES DEL ENSAYO</p> | | | | |
| <p>Fecha horm.: 30/09/2015 Fecha ensayo: 27/10/2015 Edad (días): 27 f_c / f_{ct} (MPa): 31.9 / 3.6</p> <p>Tipo sollicitación: carga centrada</p> <p>Relación entre cargas actuadores Act-2/Act-1: 1 Act-3/Act-1: 1 Act-4/Act-1: 1</p> | | <p>Carga de rotura total y por pilote:</p> <p>$\sum R_{max,W}$ (kN): 957.5 $R_{max,W}$ (kN): 233.0 Modo de fallo: D-Y_B</p> | | |
| <p>B. GEOMETRÍA DEL ENCEPADO Y ARMADO</p> | | | | |
| <p>Descripción del armado y su monitorización:</p> | | | | |
| <p>L (mm): 1150 h (mm): 450 e (mm): 800 ϕ (mm): 250 c (mm): 350 $r_{geo,inf}$ (mm): 40</p> | <p>ARMADO BANDA: 12B12 + 2B10</p> <p>NOMENCLATURA GALGAS GC1 - B s/plano</p> <p>36 GALGAS</p> |  | | |
| <p>ARMADO Banda: 1ϕ12+2ϕ10 Sec. horizontal: - Sec. vertical: - Anclaje pilar: 4ϕ16 (Dywidag)</p> | <p>36 GALGAS: GC1-id s/plano</p> |  | | |

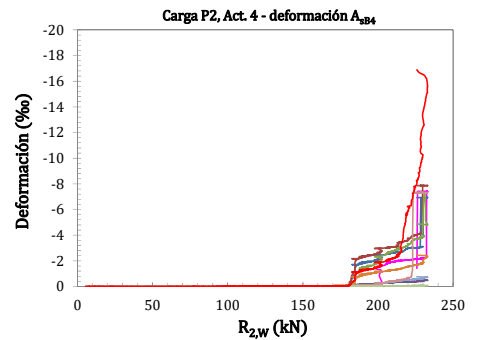
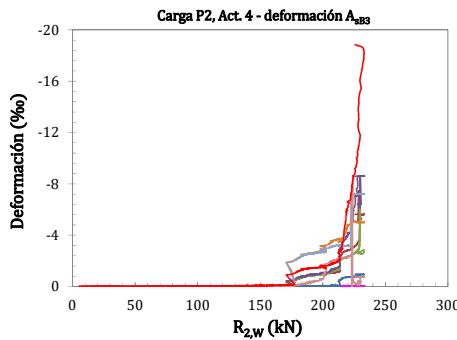
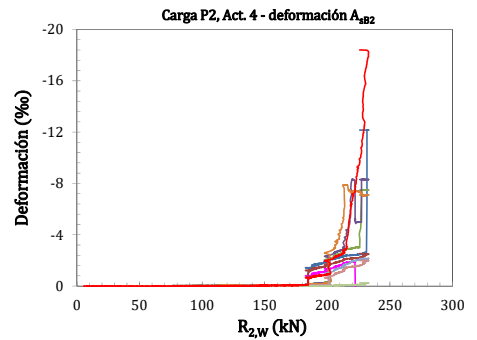
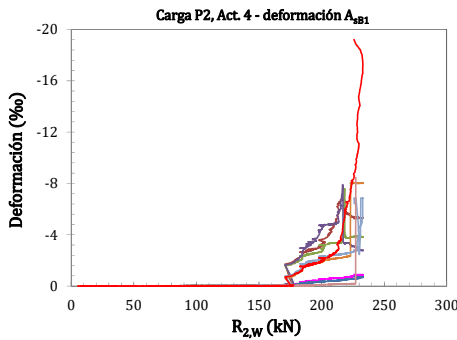
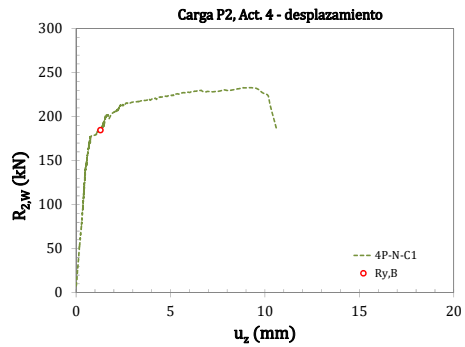
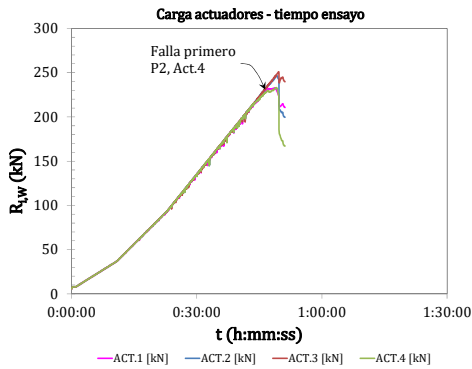


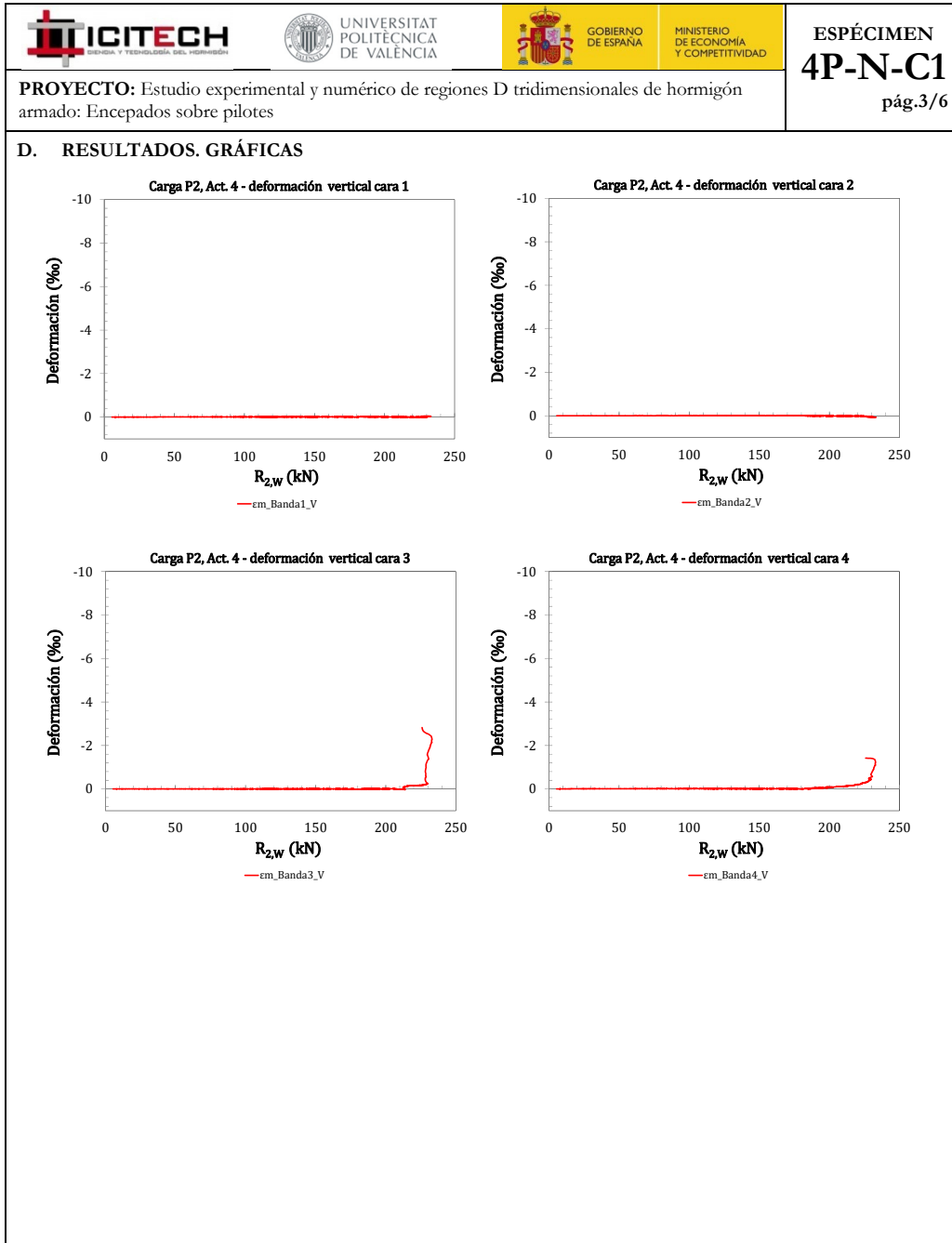


ESPÉCIMEN
4P-N-C1
pág.3/6

PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

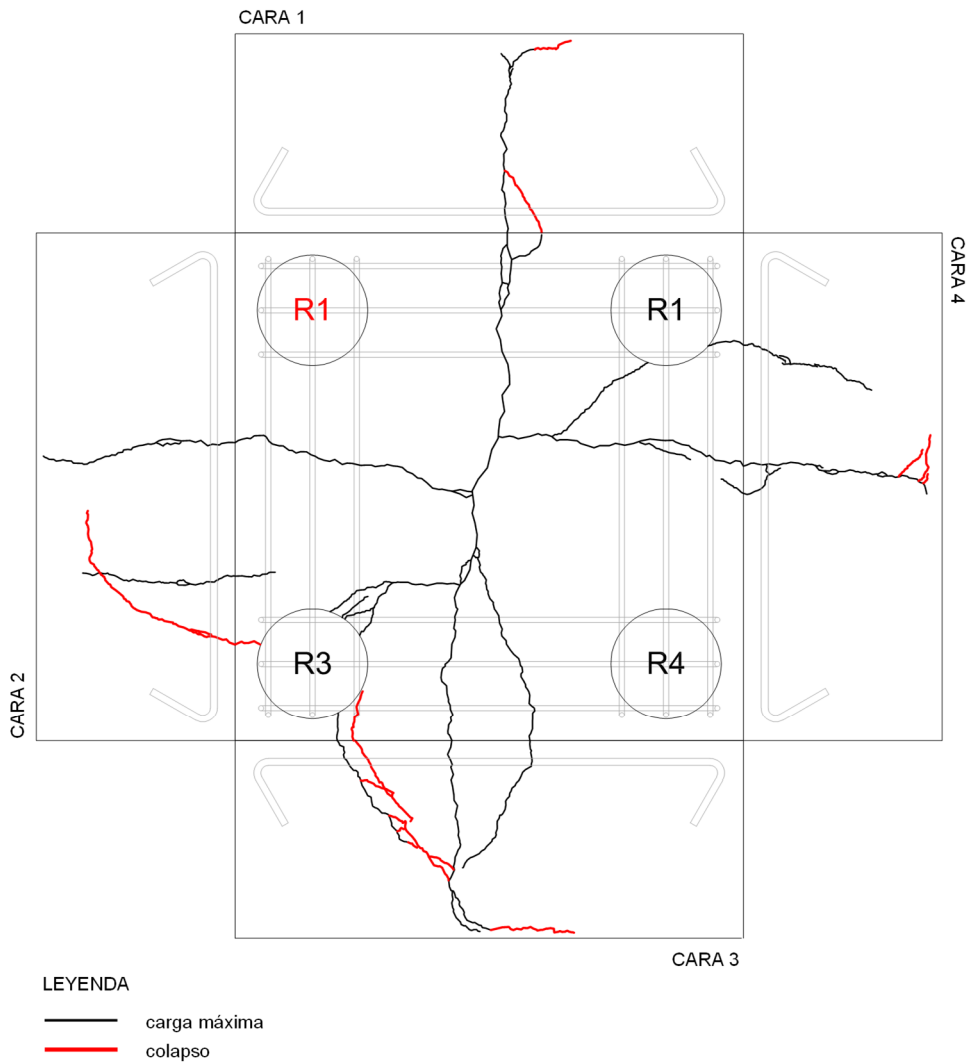
D. RESULTADOS. GRÁFICAS





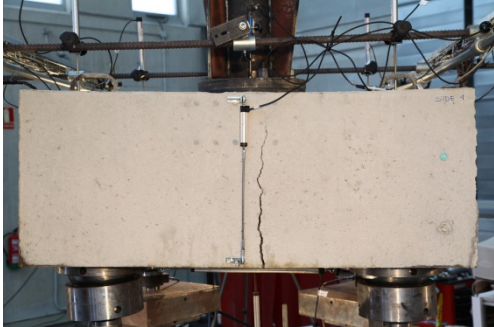

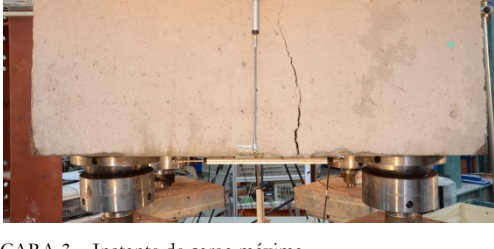







PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

D. RESULTADOS. PATRÓN DE FISURACIÓN



| | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
|  |  UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA |  GOBIERNO DE ESPAÑA |  MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD | ESPÉCIMEN 4P-N-C1 pág.5/6 |
| PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes | | | | |
| E. FOTOS DE LOS ENSAYOS | | | | |
| CARA 1 – Instante de carga máxima | | | | |
|  | | | | |
| CARA 1 – Colapso | | | | |
|  | | | | |
| CARA 2 – Instante de carga máxima | | | | |
|  | | | | |
| CARA 2 – Colapso | | | | |
|  | | | | |
| CARA 3 – Instante de carga máxima | | | | |
|  | | | | |
| CARA 3 – Colapso | | | | |
|  | | | | |

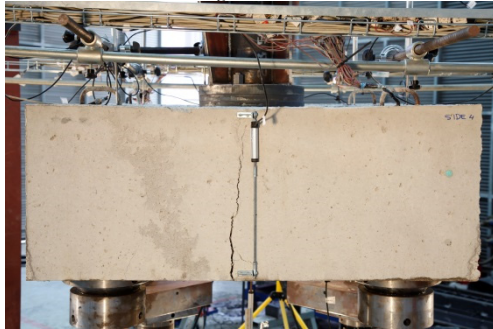


ESPÉCIMEN
4P-N-C1
pág.6/6

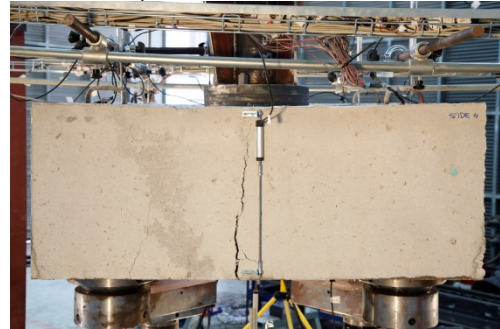
PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

E. FOTOS DE LOS ENSAYOS

CARA 4 – Instante de carga máxima



CARA 4 – Colapso



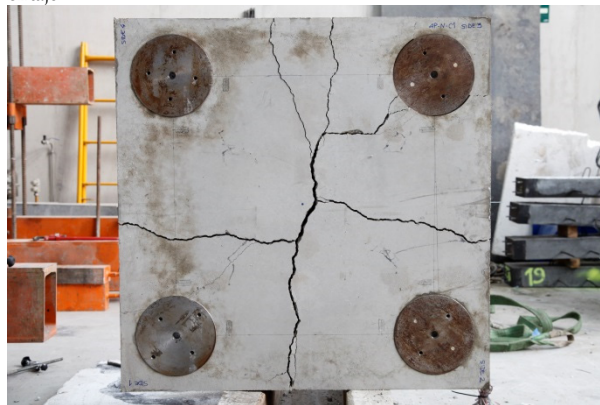
CARA INF – Instante de carga máxima





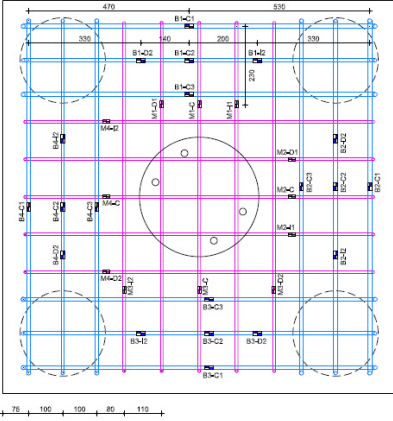
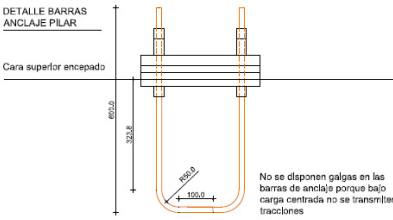


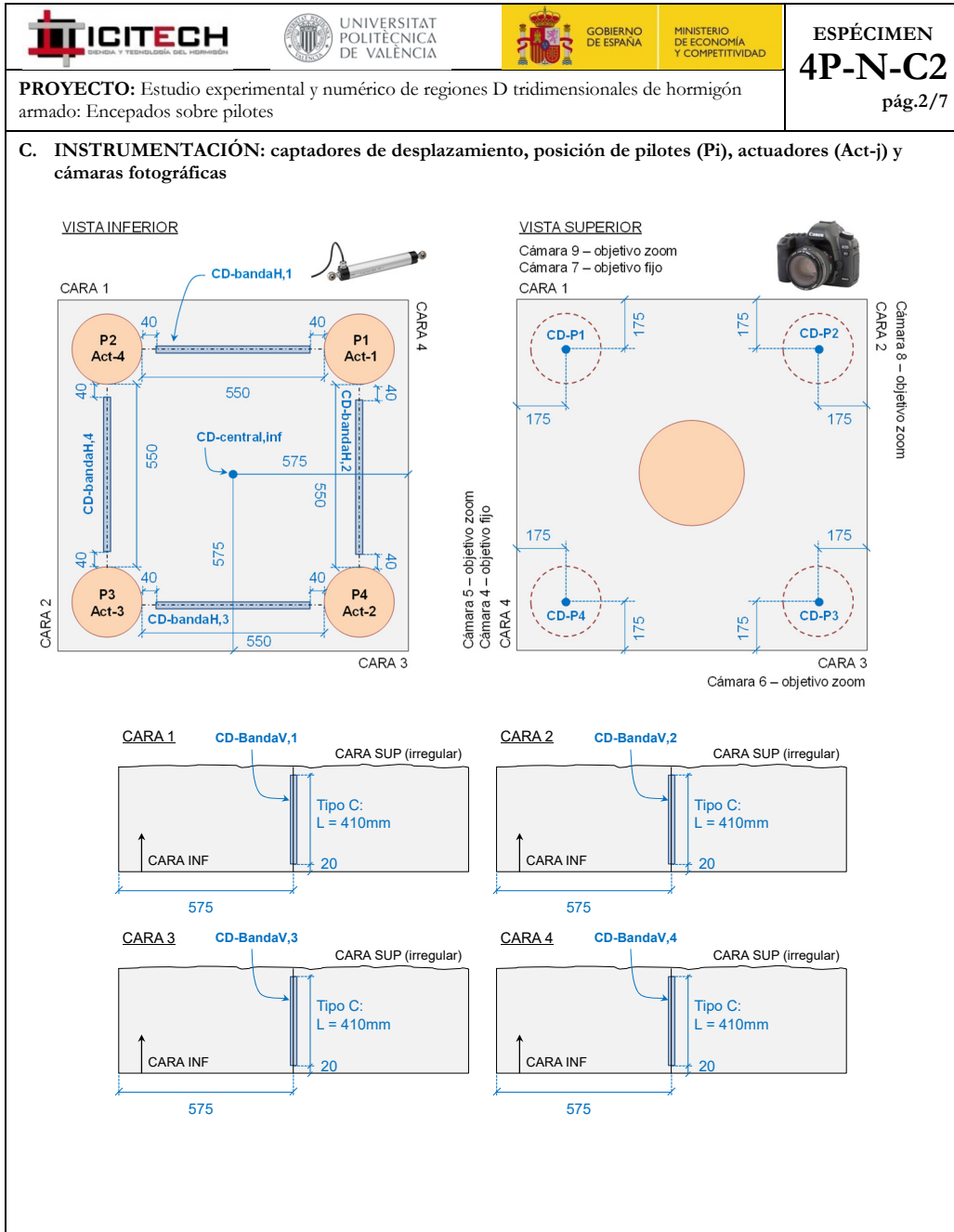
CARA INF – Colapso



CARA INF – Tras desmontaje



| | | | | | | | | | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
|  |  <p>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA</p> |  <p>GOBIERNO DE ESPAÑA</p> |  <p>MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD</p> | | | | | | |
| <p>PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes</p> | | | <p>ESPÉCIMEN 4P-N-C2 pág.1/7</p> | | | | | | |
| <p>A. DATOS PRINCIPALES DEL ENSAYO</p> <table style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%;"> <p>Fecha horm.: 30/09/2015 Fecha ensayo: 22/10/2015 Edad (días): 22 f_c / f_{ct} (MPa): 36.3 / 2.8</p> </td> <td style="width: 50%;"> <p>Carga de rotura total y por pilote:</p> <p>$\sum R_{max,W}$ (kN): 1173.9 $R_{max,W}$ (kN): 293.0 Modo de fallo: F-Y_B</p> </td> </tr> <tr> <td colspan="2"> <p>Tipo sollicitación: carga centrada</p> </td> </tr> <tr> <td colspan="2"> <p>Relación entre cargas actuadores Act-2/Act-1: 1 Act-3/Act-1: 1 Act-4/Act-1: 1</p> </td> </tr> </table> | | | | <p>Fecha horm.: 30/09/2015 Fecha ensayo: 22/10/2015 Edad (días): 22 f_c / f_{ct} (MPa): 36.3 / 2.8</p> | <p>Carga de rotura total y por pilote:</p> <p>$\sum R_{max,W}$ (kN): 1173.9 $R_{max,W}$ (kN): 293.0 Modo de fallo: F-Y_B</p> | <p>Tipo sollicitación: carga centrada</p> | | <p>Relación entre cargas actuadores Act-2/Act-1: 1 Act-3/Act-1: 1 Act-4/Act-1: 1</p> | |
| <p>Fecha horm.: 30/09/2015 Fecha ensayo: 22/10/2015 Edad (días): 22 f_c / f_{ct} (MPa): 36.3 / 2.8</p> | <p>Carga de rotura total y por pilote:</p> <p>$\sum R_{max,W}$ (kN): 1173.9 $R_{max,W}$ (kN): 293.0 Modo de fallo: F-Y_B</p> | | | | | | | | |
| <p>Tipo sollicitación: carga centrada</p> | | | | | | | | | |
| <p>Relación entre cargas actuadores Act-2/Act-1: 1 Act-3/Act-1: 1 Act-4/Act-1: 1</p> | | | | | | | | | |
| <p>B. GEOMETRÍA DEL ENCEPADO Y ARMADO</p> <p style="text-align: center;">Descripción del armado y su monitorización:</p> <table style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 30%;"> <p>L (mm): 1150 h (mm): 450 e (mm): 800 ϕ (mm): 250 c (mm): 350 $r_{geo,inf}$ (mm): 40</p> </td> <td style="width: 30%;"> <p>ARMADO BANDA: 1Ø12 + 2Ø10 SEC. HORIZ: 5Ø8 SEC. VERT: 3Ø8</p> </td> <td style="width: 30%;"> <p>NOMENCLATURA GALGAS GC2 + H s/plano 32 GALGAS</p> </td> <td style="width: 10%;"></td> </tr> </table> <p>ARMADO Banda: 1Ø12+2Ø10 Sec. horizontal: 5Ø8, por dirección Sec. vertical: - Anclaje pilar: 4Ø16 (Dywidag)</p> <p>32 GALGAS: GC2-id s/plano</p> <div style="text-align: center;">  </div> <div style="text-align: center;"> <p>DETALLE BARRAS ANCLAJE PILAR</p>  <p>No se disponen galgas en las barras de anclaje porque bajo carga centrada no se transmiten tracciones</p> </div> | | | | <p>L (mm): 1150 h (mm): 450 e (mm): 800 ϕ (mm): 250 c (mm): 350 $r_{geo,inf}$ (mm): 40</p> | <p>ARMADO BANDA: 1Ø12 + 2Ø10 SEC. HORIZ: 5Ø8 SEC. VERT: 3Ø8</p> | <p>NOMENCLATURA GALGAS GC2 + H s/plano 32 GALGAS</p> | | | |
| <p>L (mm): 1150 h (mm): 450 e (mm): 800 ϕ (mm): 250 c (mm): 350 $r_{geo,inf}$ (mm): 40</p> | <p>ARMADO BANDA: 1Ø12 + 2Ø10 SEC. HORIZ: 5Ø8 SEC. VERT: 3Ø8</p> | <p>NOMENCLATURA GALGAS GC2 + H s/plano 32 GALGAS</p> | | | | | | | |

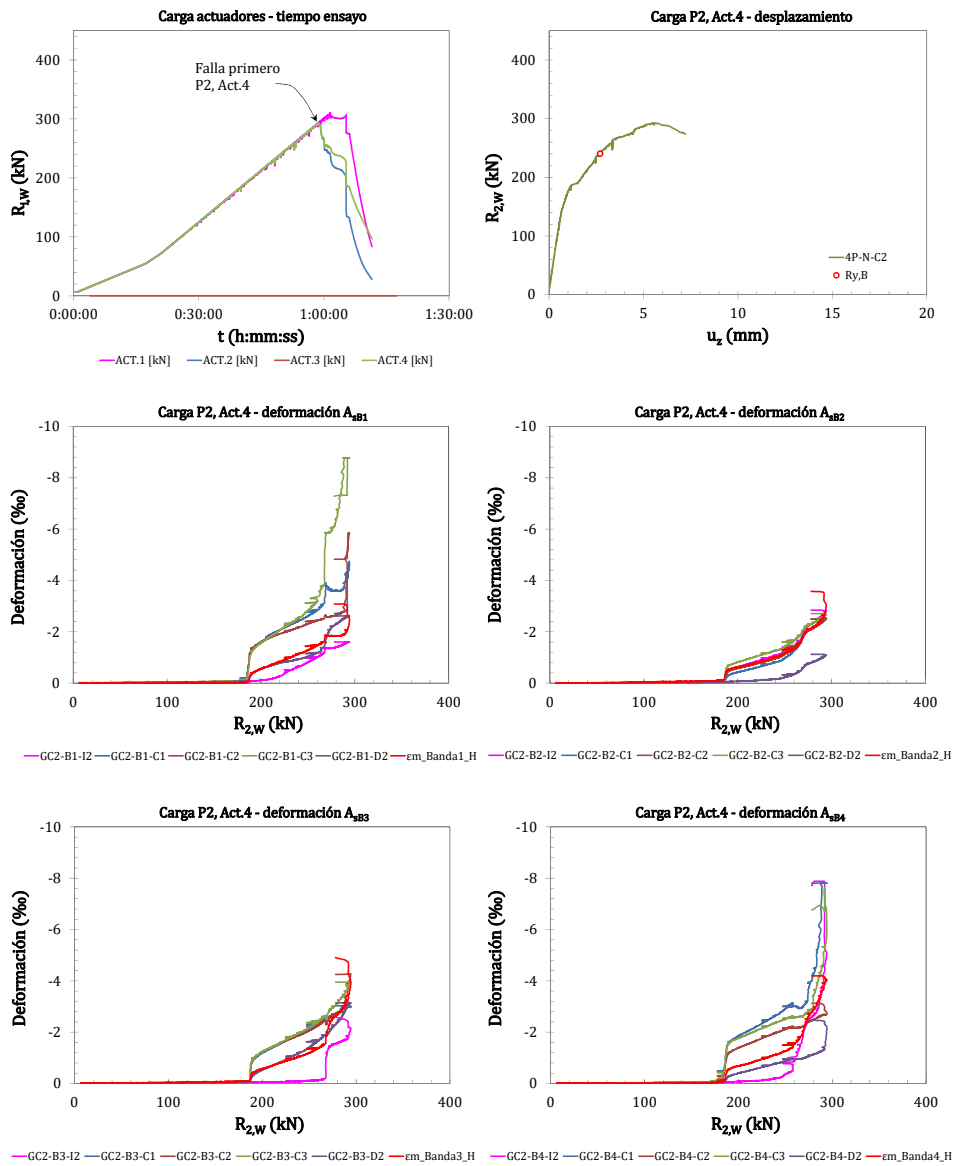


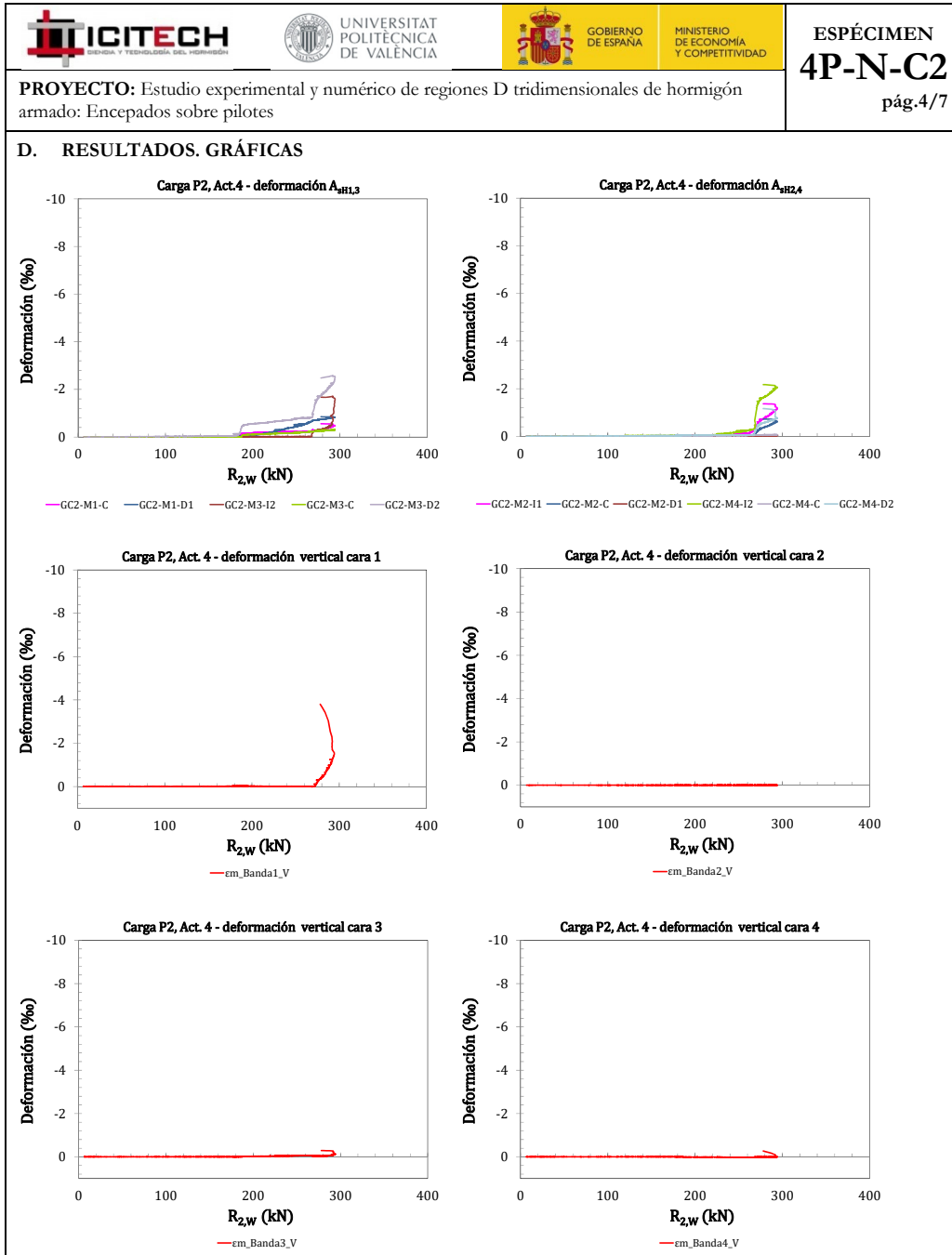


ESPÉCIMEN
4P-N-C2
pág.3/7

PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

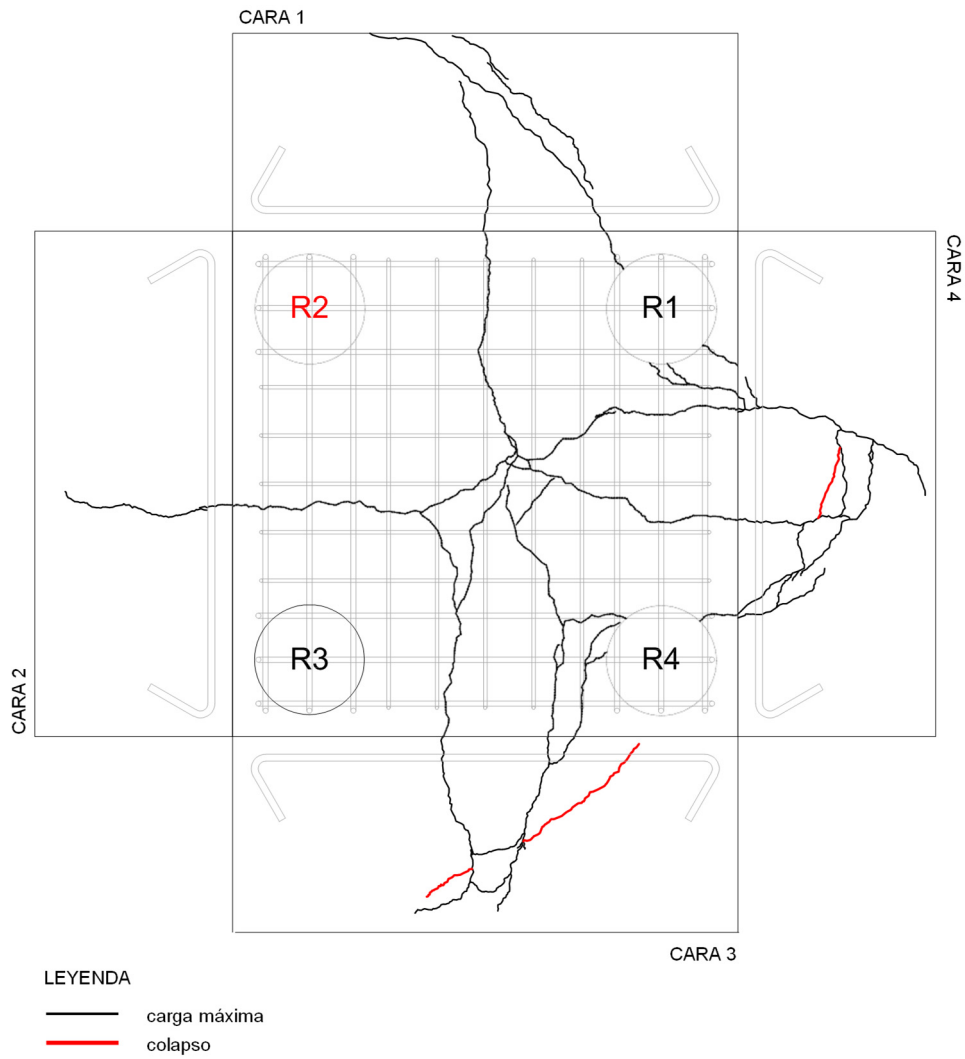
D. RESULTADOS. GRÁFICAS





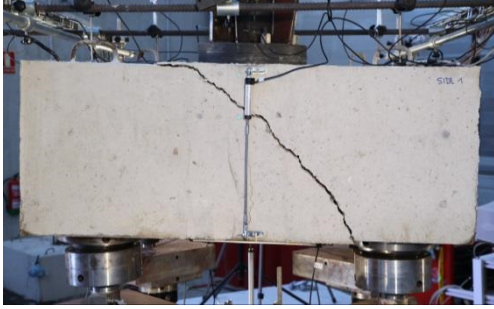
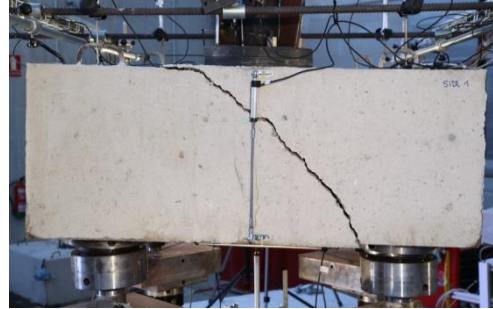
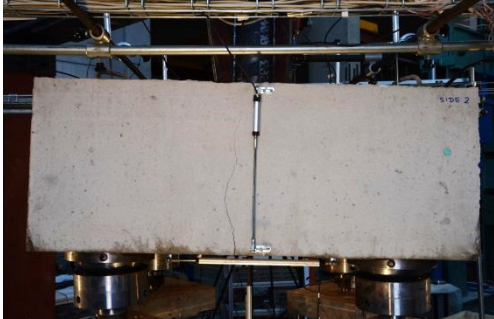
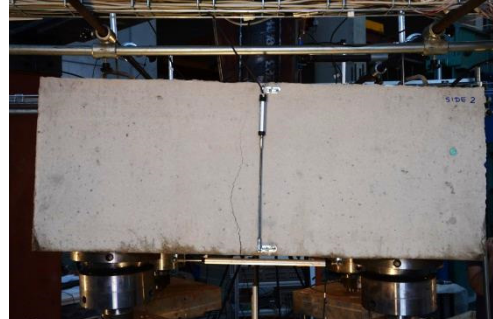
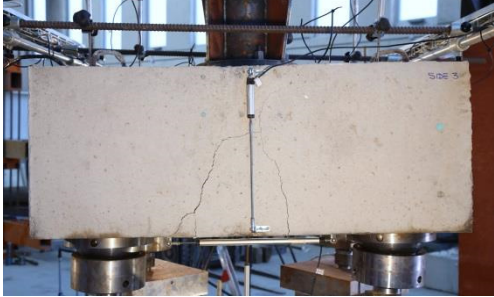





PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

D. RESULTADOS. PATRÓN DE FISURACIÓN



| | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
|  |  UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA |  GOBIERNO DE ESPAÑA |  MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD | ESPÉCIMEN 4P-N-C2 pág.6/7 |
| PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes | | | | |
| E. FOTOS DE LOS ENSAYOS | | | | |
| CARA 1 – Instante de carga máxima | | | | |
|  | | | | |
| CARA 1 – Colapso | | | | |
|  | | | | |
| CARA 2 – Instante de carga máxima | | | | |
|  | | | | |
| CARA 2 – Colapso | | | | |
|  | | | | |
| CARA 3 – Instante de carga máxima | | | | |
|  | | | | |
| CARA 3 – Colapso | | | | |
|  | | | | |



ESPÉCIMEN
4P-N-C2
pág.7/7

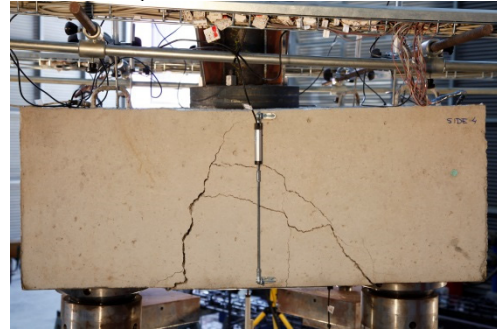
PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

E. FOTOS DE LOS ENSAYOS

CARA 4 – Instante de carga máxima



CARA 4 – Colapso



CARA INF – Instante de carga máxima



CARA INF – Colapso



CARA INF – Tras desmontaje





ESPÉCIMEN
4P-N-C3
pág.1/7

PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

A. DATOS PRINCIPALES DEL ENSAYO

Fecha horm.: 30/09/2015
 Fecha ensayo: 20/10/2015
 Edad (días): 20
 f_c / f_{ct} (MPa): 34.0 / 2.7

Tipo sollicitación: carga centrada
 Relación entre cargas actuadas 1
 Act-2/Act-1: 1
 Act-3/Act-1: 1
 Act-4/Act-1:

Carga de rotura total
y por pilote:

$\sum R_{max,W}$ (kN): 1317.3
 $R_{max,W}$ (kN): 325.0
 Modo de fallo: D-Y_{BHV}

B. GEOMETRÍA DEL ENCEPADO Y ARMADO

Descripción del armado y su monitorización:

L (mm): 1150
 h (mm): 450
 e (mm): 800
 ϕ (mm): 250
 c (mm): 350
 $r_{geo,inf}$ (mm): 40

ARMADO

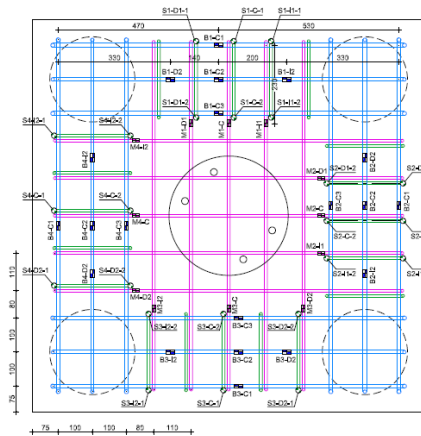
Banda:
 1 ϕ 12+2 ϕ 10
 Sec. horizontal:
 5 ϕ 8, por dirección
 Sec. vertical:
 5c ϕ 8, por banda
 Anclaje pilar:
 4 ϕ 16 (Dywidag)

56 GALGAS:
 GC3-id s/plano

ARMADO
 BANDA:
 1 ϕ 12 + 2 ϕ 10
 SEC. HORIZ:
 5 ϕ 8
 SEC. VERTICAL:
 5c ϕ 8

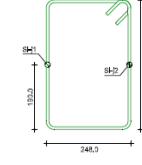
NOMENCLATURA
 GALGAS
 GC3 - Id s/plano

56 GALGAS



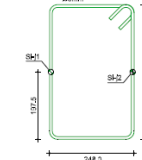
GALGAS EN CERCOS
 BANDAS 2 Y 4

I: 2.4
 J: I, C, D



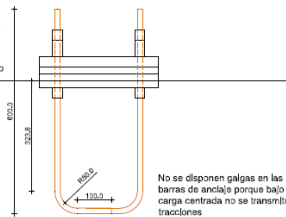
GALGAS EN CERCOS
 BANDAS 1 Y 3

I: 1.3
 J: I, C, D



DETALLE BARRAS
 ANCLAJE PILAR

Cara superior encepado

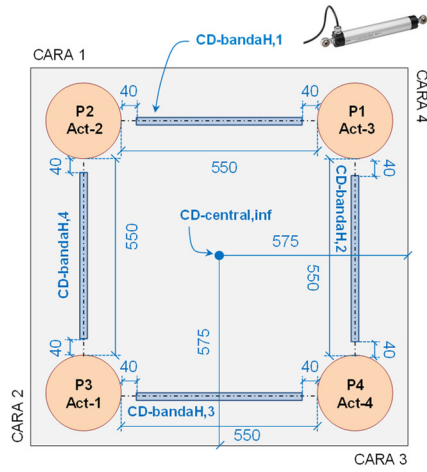


No se disponen galgas en las barras de anclaje porque bajo carga centrada no se transmiten tracciones

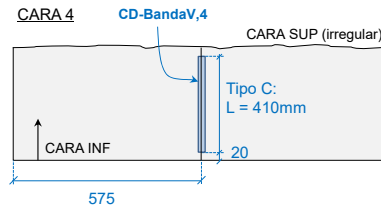
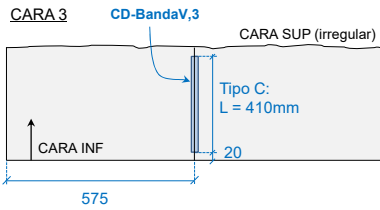
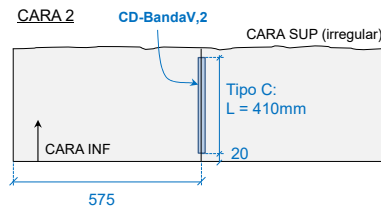
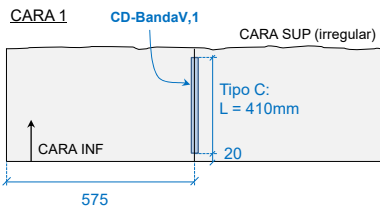
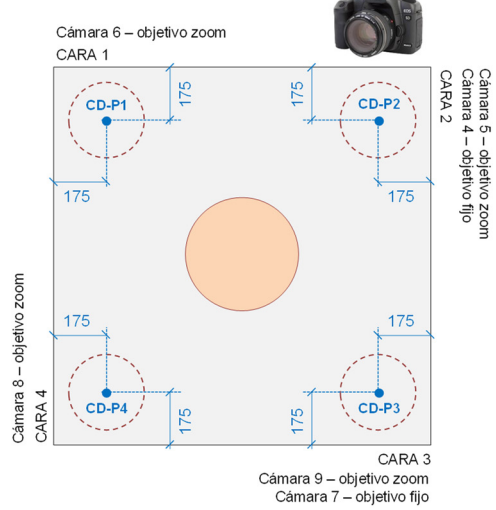
PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

C. INSTRUMENTACIÓN: captadores de desplazamiento, posición de pilotes (Pi), actuadores (Act-i) y cámaras fotográficas

VISTA INFERIOR

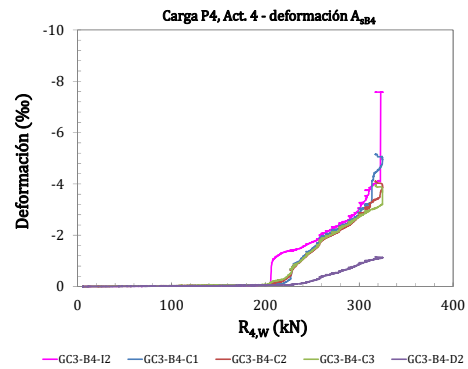
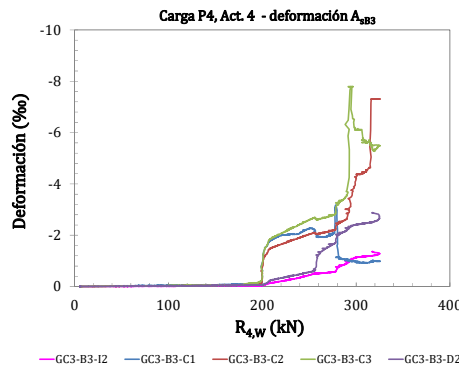
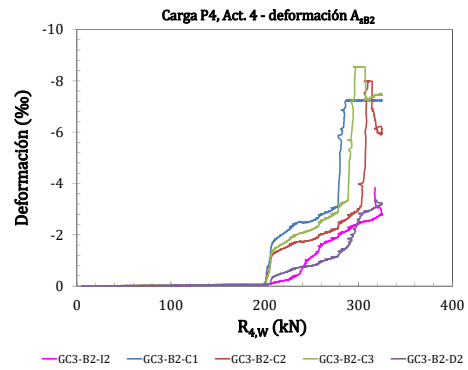
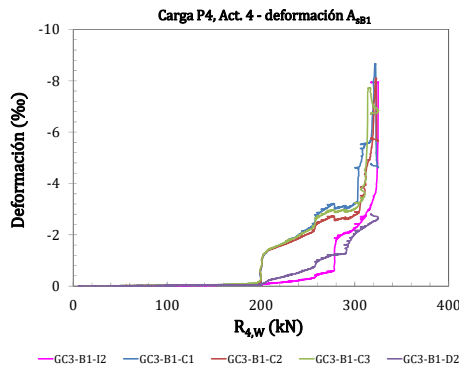
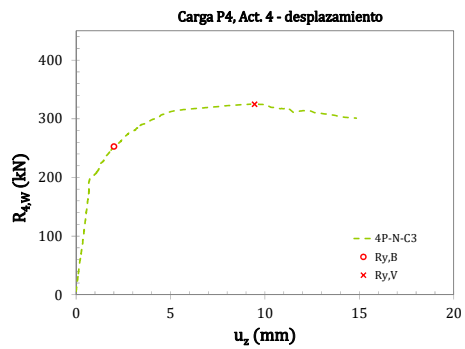
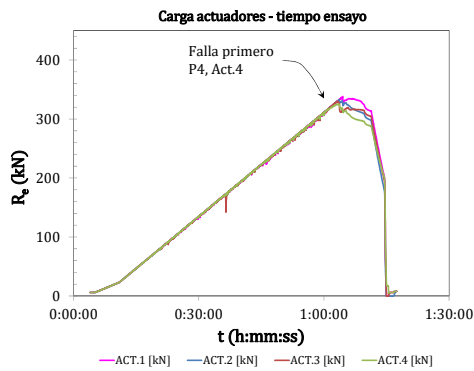


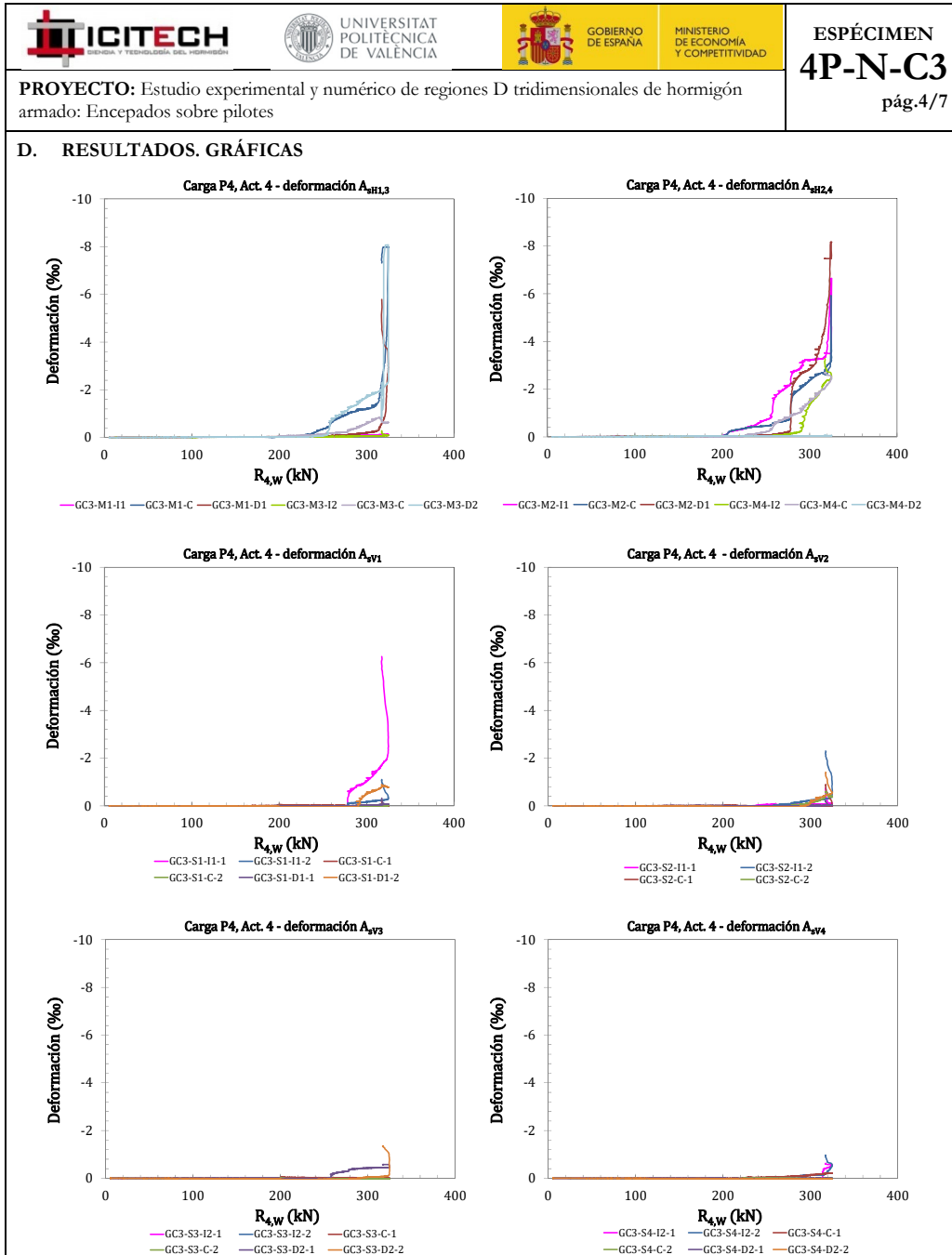
VISTA SUPERIOR



PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

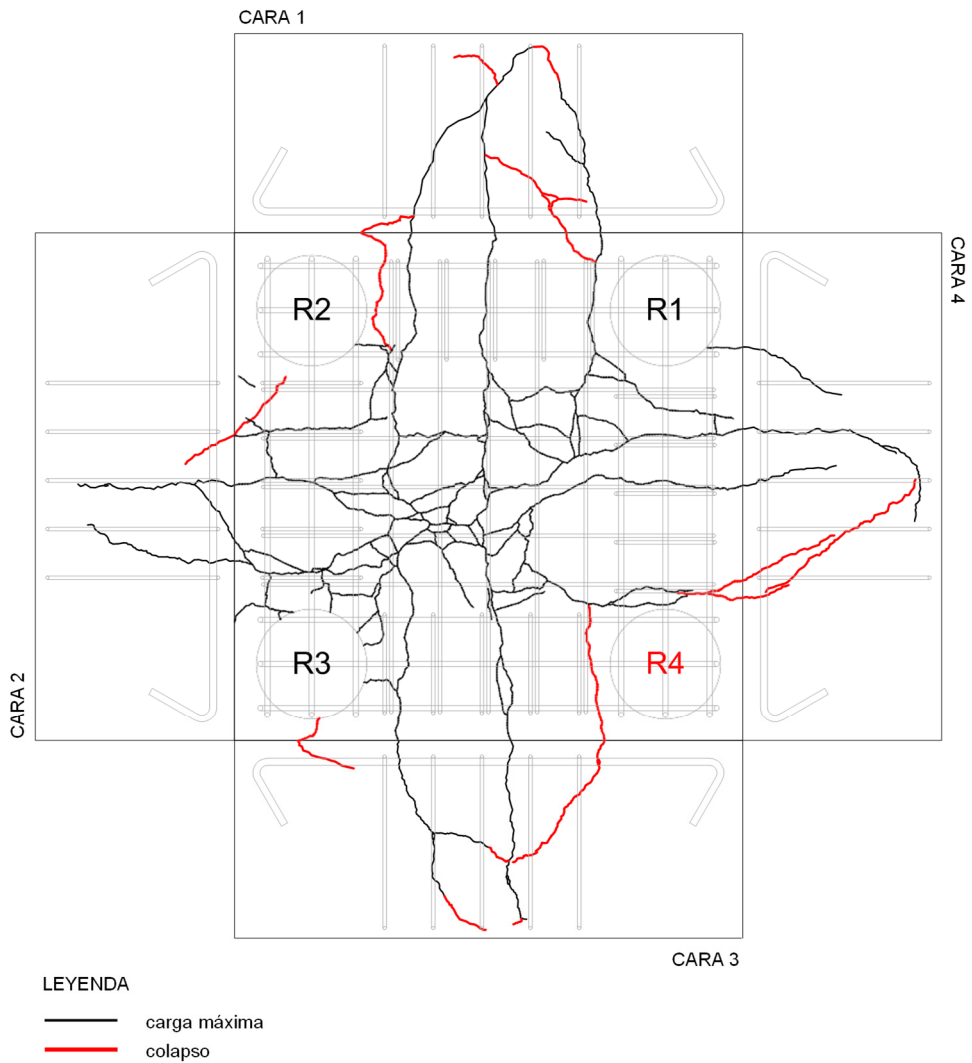
D. RESULTADOS. GRÁFICAS









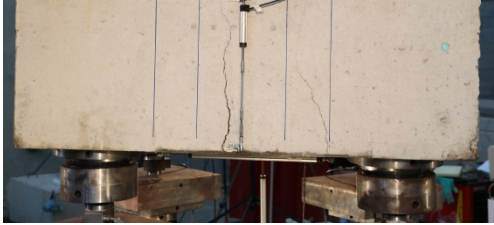





PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

D. RESULTADOS. PATRÓN DE FISURACIÓN



| | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
|  |  UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA |  GOBIERNO DE ESPAÑA |  MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD | ESPÉCIMEN 4P-N-C3 pág.6/7 |
| PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes | | | | |
| E. FOTOS DE LOS ENSAYOS | | | | |
| CARA 1 – Instante de carga máxima | | | | |
|  | | | | |
| CARA 1 – Colapso | | | | |
|  | | | | |
| CARA 2 – Instante de carga máxima | | | | |
|  | | | | |
| CARA 2 – Colapso | | | | |
|  | | | | |
| CARA 3 – Instante de carga máxima | | | | |
|  | | | | |
| CARA 3 – Colapso | | | | |
|  | | | | |

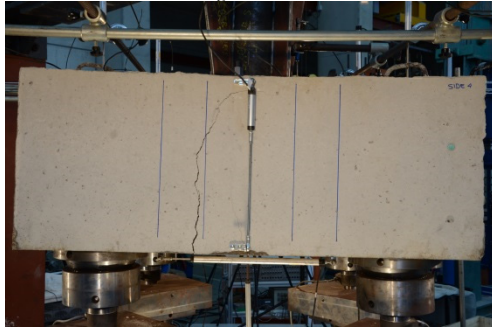


ESPÉCIMEN
4P-N-C3
pág.7/7

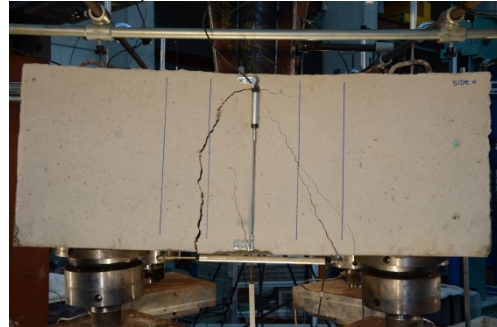
PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

E. FOTOS DE LOS ENSAYOS

CARA 4 – Instante de carga máxima



CARA 4 – Colapso



CARA INF – Instante de carga máxima



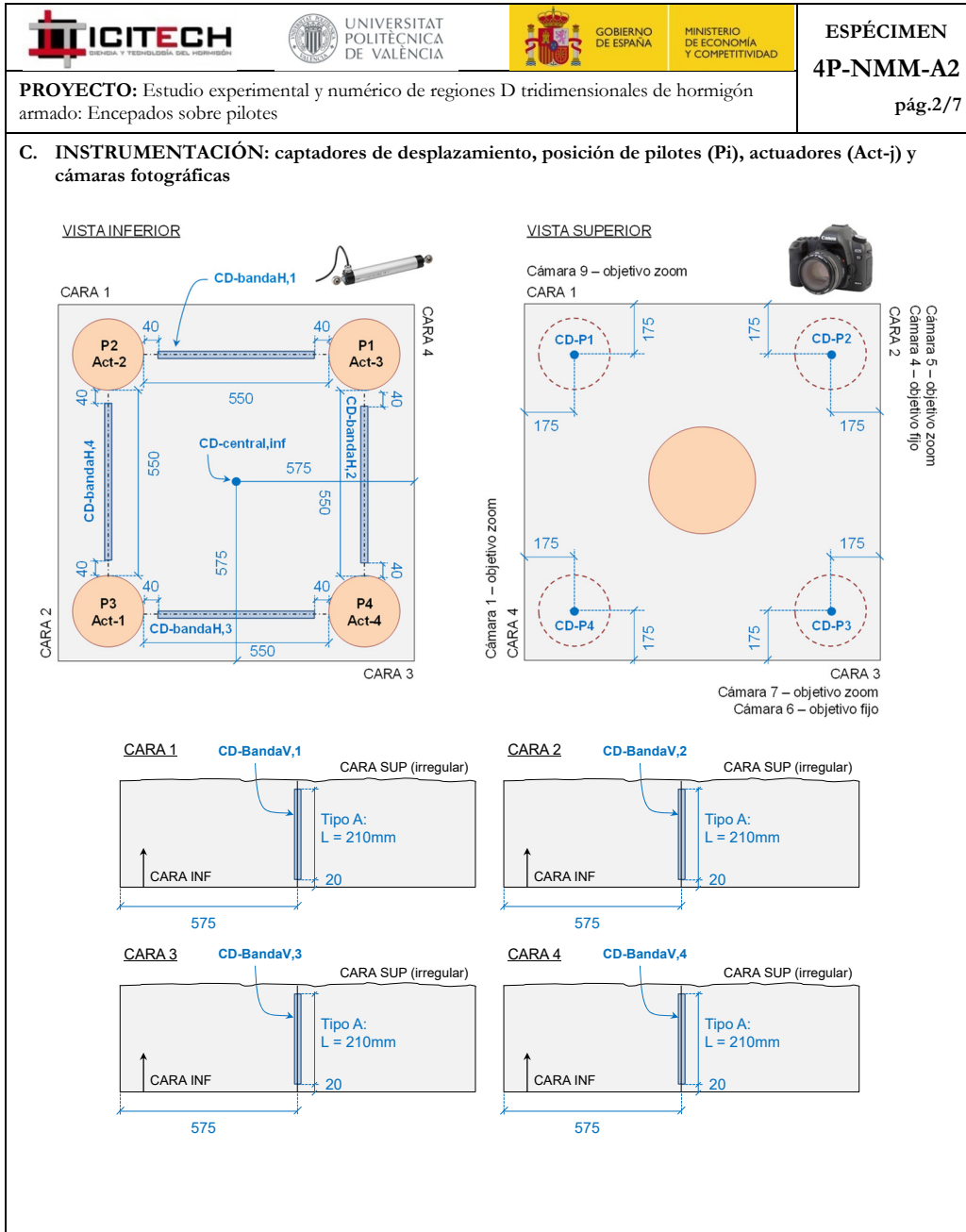
CARA INF – Colapso



CARA INF – Tras desmontaje



| | | | | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|----------------------------------------------------------|
| | | | | <p>ESPÉCIMEN 4P-NMM-A2 pág.1/7</p> |
| <p>PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes</p> | | | | |
| <p>A. DATOS PRINCIPALES DEL ENSAYO</p> | | | | |
| <p>Fecha horm.: 19/11/2015 Fecha ensayo: 15/12/2015 Edad (días): 26 f_c / f_{ct} (MPa): 36.4/ 3.3</p> | <p>Carga de rotura total y por pilote:</p> | <p>$\sum R_{max,W}$ (kN): 594.5 $R_{max,W}$ (kN): 223.9 Modo de fallo: F-YB</p> | | |
| <p>Tipo sollicitación: flexión esviada Relación entre cargas actuadas: res 0.65 Act-2/Act-1: 0.31 Act-3/Act-1: 0.65 Act-4/Act-1:</p> | | | | |
| <p>B. GEOMETRÍA DEL ENCEPADO Y ARMADO</p> | | | | |
| <p>Descripción del armado y su monitorización:</p> | | | | |
| <p>L (mm): 1150 h (mm): 250 e (mm): 800 ϕ (mm): 250 c (mm): 350 $\Gamma_{geo,inf}$ (mm): 40</p> | <p>ARMADO BANDA: 2Ø16 + 1Ø12 SEC. HORIZ: 5Ø10 SEC. VERT: - ANCLAJE PILAR: 4Ø16 (Dywidag)</p> <p>NOMENCLATURA GALGAS GA2-id s/plano</p> <p>Ø2 GALGAS</p> | | | |
| <p>32 GALGAS: GA2-id s/plano</p> | | | | |

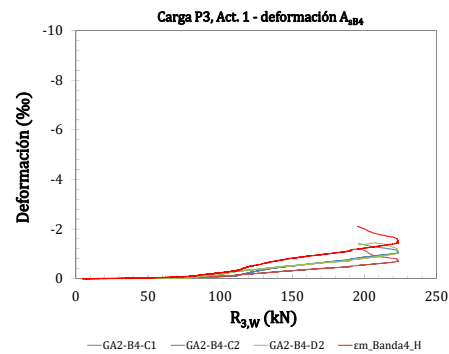
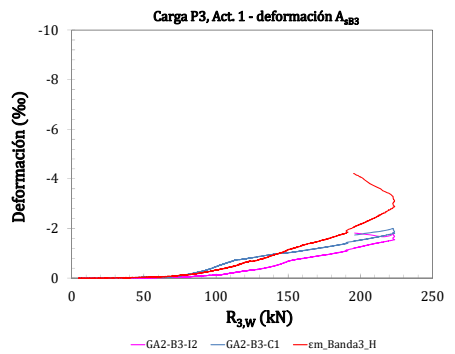
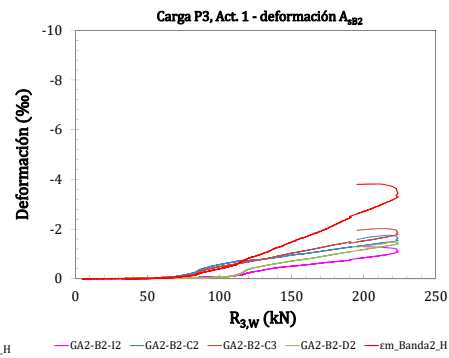
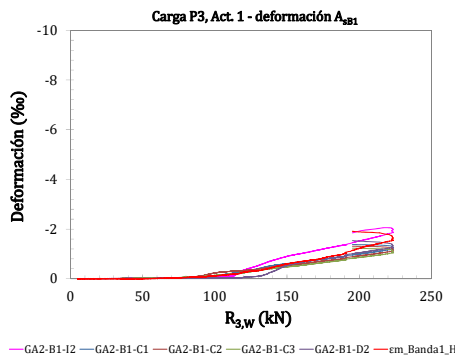
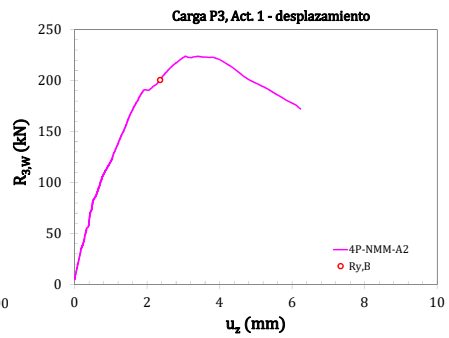
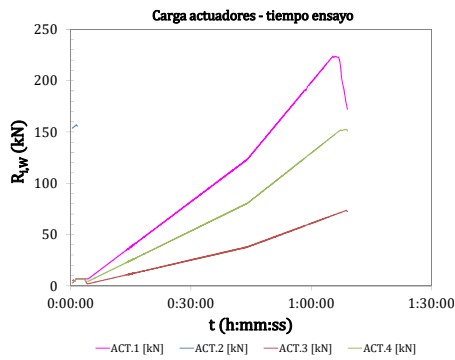


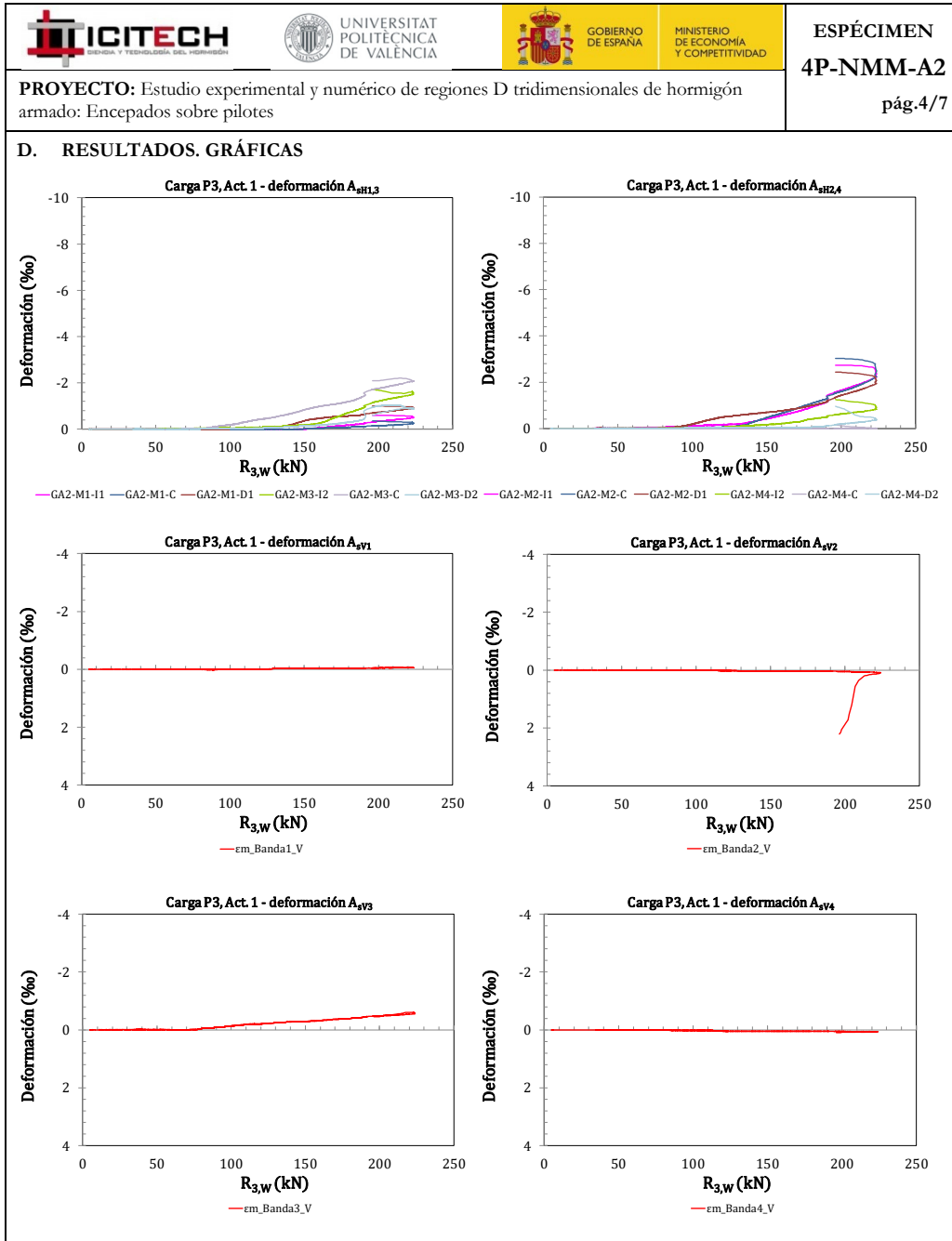


ESPÉCIMEN
4P-NMM-A2
pág.3/7

PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

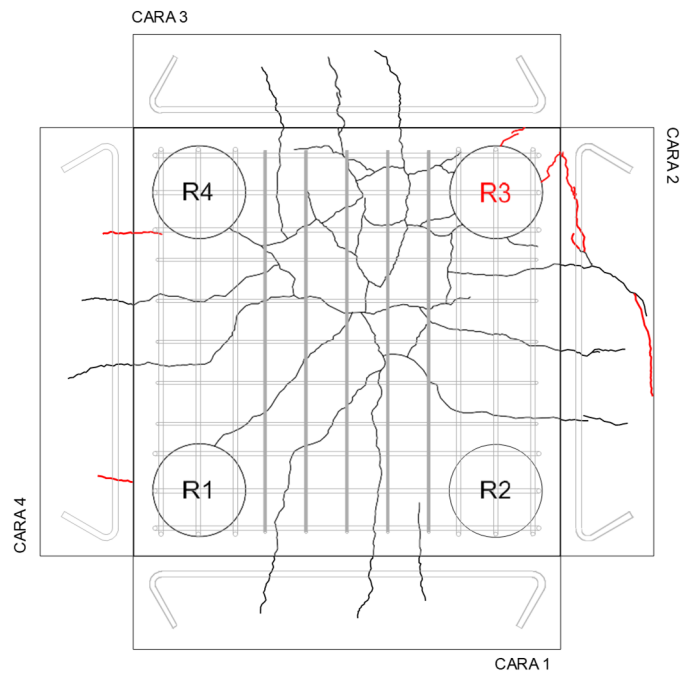
D. RESULTADOS. GRÁFICAS









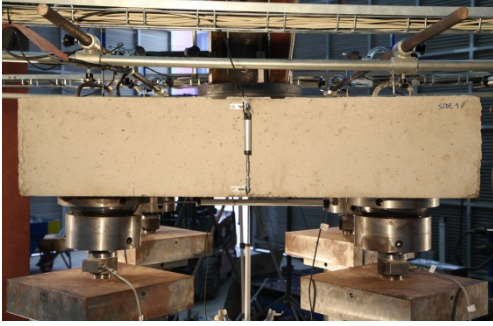

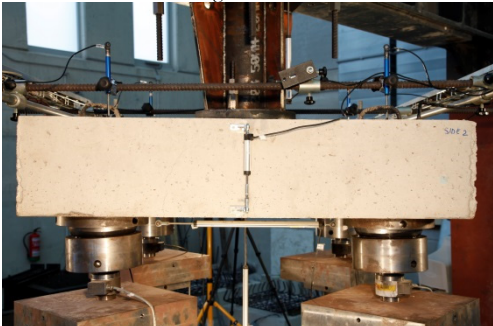
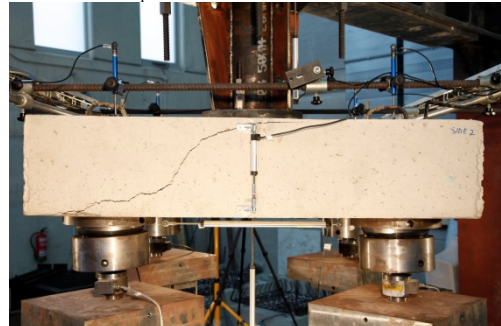
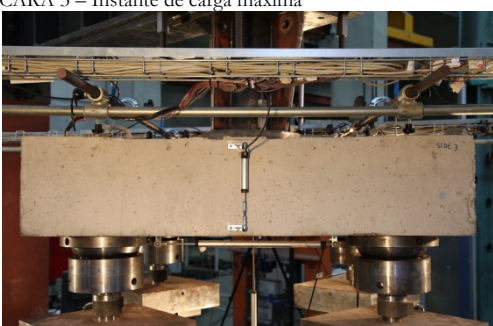
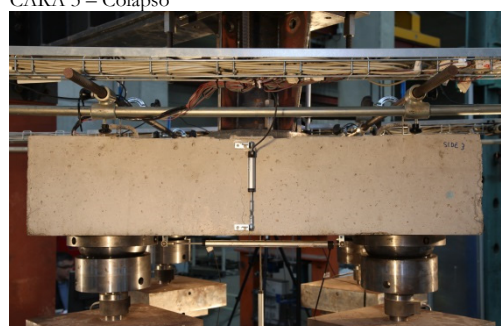
PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

E. RESULTADOS. PATRÓN DE FISURACIÓN



LEYENDA

- carga máxima
- colapso

| | | | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
|  |  <p>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA</p> |  <p>GOBIERNO DE ESPAÑA</p>  <p>MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD</p> | <p>ESPÉCIMEN 4P-NMM-A2 pág.6/7</p> |
| <p>PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes</p> | | | |
| <p>F. FOTOS DE LOS ENSAYOS</p> | | | |
| <p>CARA 1 – Instante de carga máxima</p> | | <p>CARA 1 – Colapso</p> | |
|  | |  | |
| <p>CARA 2 – Instante de carga máxima</p> | | <p>CARA 2 – Colapso</p> | |
|  | |  | |
| <p>CARA 3 – Instante de carga máxima</p> | | <p>CARA 3 – Colapso</p> | |
|  | |  | |

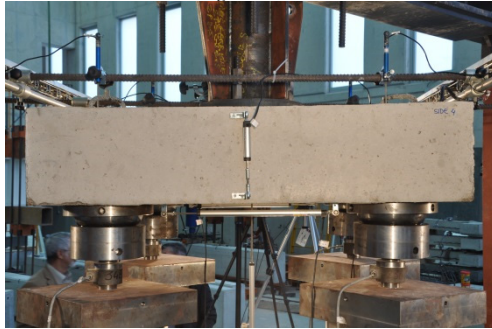


ESPÉCIMEN
4P-NMM-A2
pág.7/7

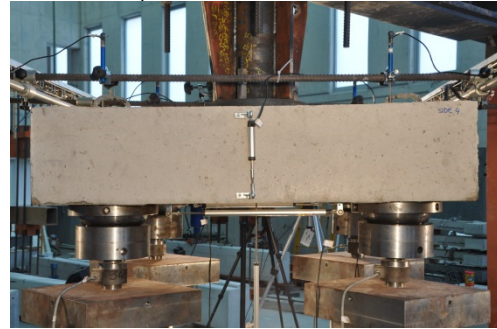
PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

G. FOTOS DE LOS ENSAYOS

CARA 4 – Instante de carga máxima



CARA 4 – Colapso



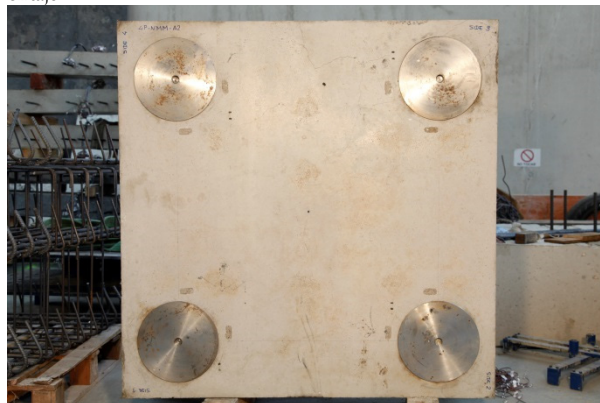
CARA INF – Instante de carga máxima



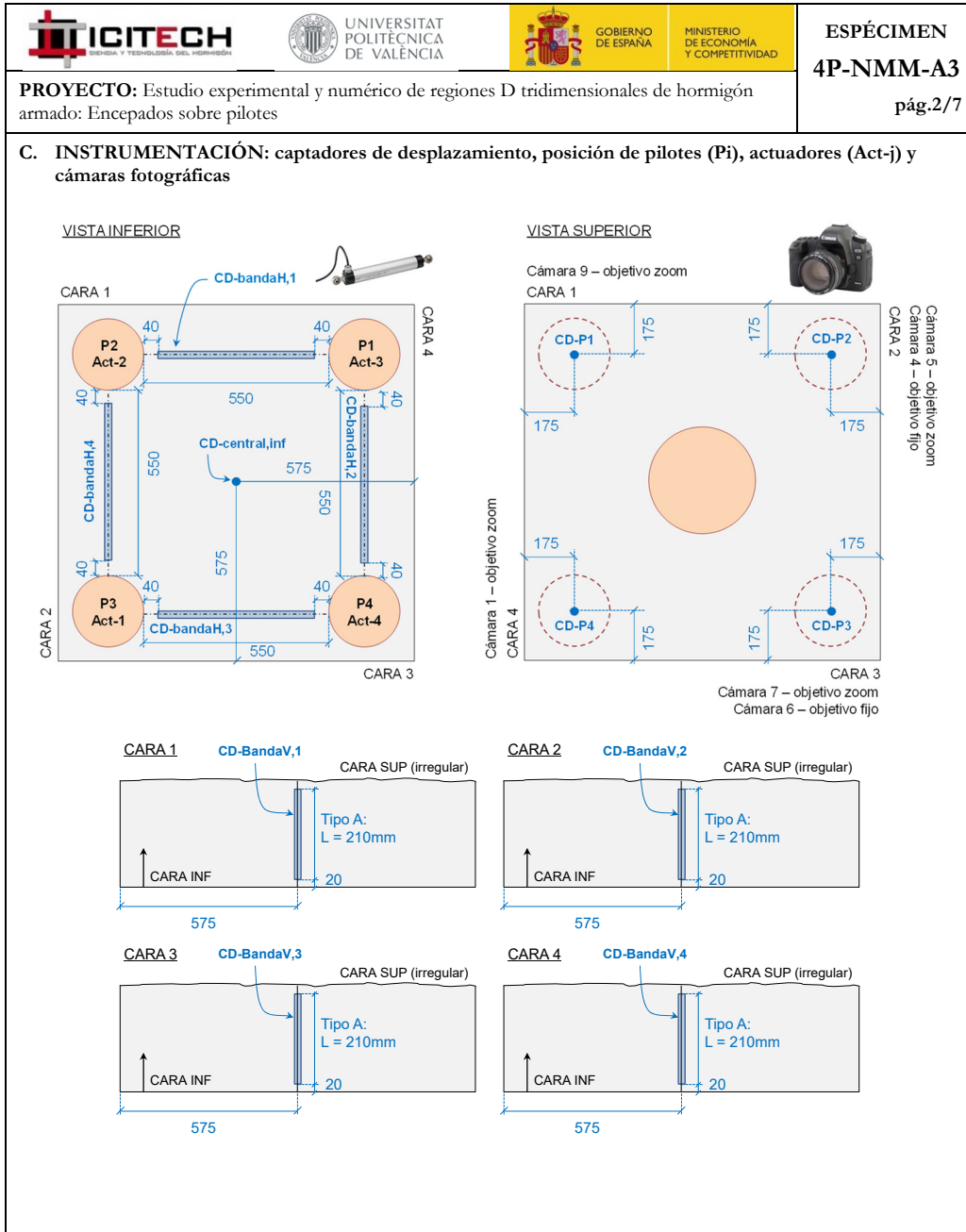
CARA INF – Colapso



CARA INF – Tras desmontaje



| | | | | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | | | | <p>ESPÉCIMEN 4P-NMM-A3 pág.1/7</p> |
| <p>PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes</p> | | | | |
| <p>A. DATOS PRINCIPALES DEL ENSAYO</p> | | | | |
| <p>Fecha horm.: 19/11/2015 Fecha ensayo: 21/12/2015 Edad (días): 32 f_c / f_{ct} (MPa): 39.2/ 3.8</p> | <p>Carga de rotura total y por pilote:</p> | | <p>$\sum R_{max,W}$ (kN): 769.8 $R_{max,W}$ (kN): 285.4 Modo de fallo: D-Y_{BHV}</p> | |
| <p>Tipo sollicitación: flexión esviada Relación entre cargas actuadas res 0.65 Act-2/Act-1: 0.31 Act-3/Act-1: 0.65 Act-4/Act-1:</p> | | | | |
| <p>B. GEOMETRÍA DEL ENCEPADO Y ARMADO</p> | | | | |
| <p>Descripción del armado y su monitorización:</p> | | | | |
| <p>L (mm): 1150 h (mm): 250 e (mm): 800 ϕ (mm): 250 c (mm): 350 $r_{geo,inf}$ (mm): 40</p> | <p>ARMADO BANDA: 2Ø16 + 1Ø12 SEC. HORIZ: SØ10 SEC. VERTICAL: SØ8</p> | <p>NOMENCLATURA GALGAS GA3 = Is s/plano 55 GALGAS</p> | | <p>GALGAS EN CERCOS BANDAS 2 Y 4 E 2.4 S1 C, D</p> <p>GALGAS EN CERCOS BANDAS 1 Y 3 E 1.3 S1 C, D</p> |
| <p>ARMADO</p> | <p>Banda: 2Ø16+1 Ø12 Sec. horizontal: 5Ø10 Sec. vertical: 5cØ8 Anclaje pilar: 4Ø16 (Dywidag)</p> | | | |
| <p>56 GALGAS: GA3-id s/plano</p> | <p>DETALLE BARRAS ANCLAJE PILAR</p> | | | |

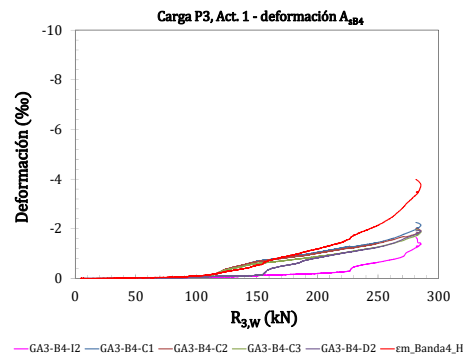
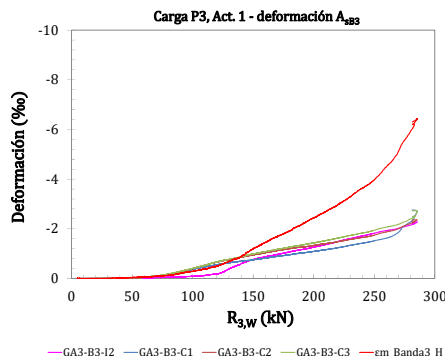
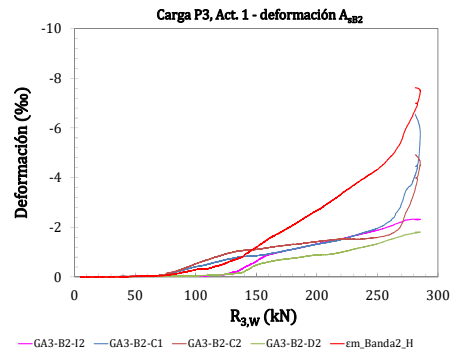
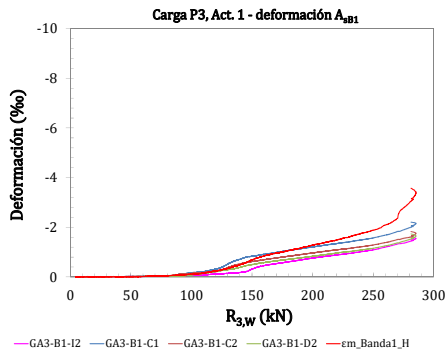
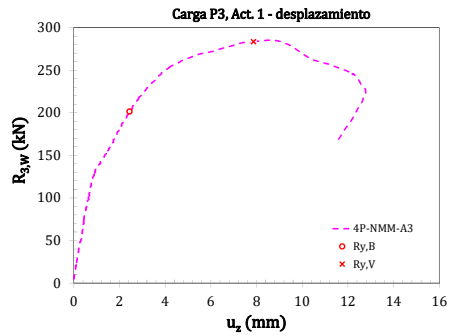
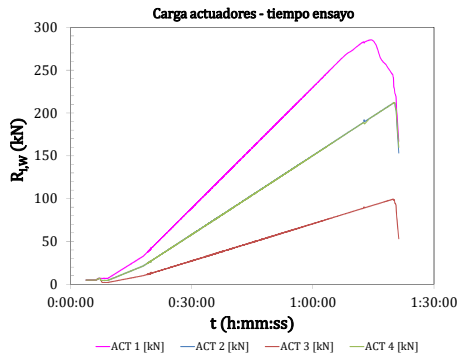


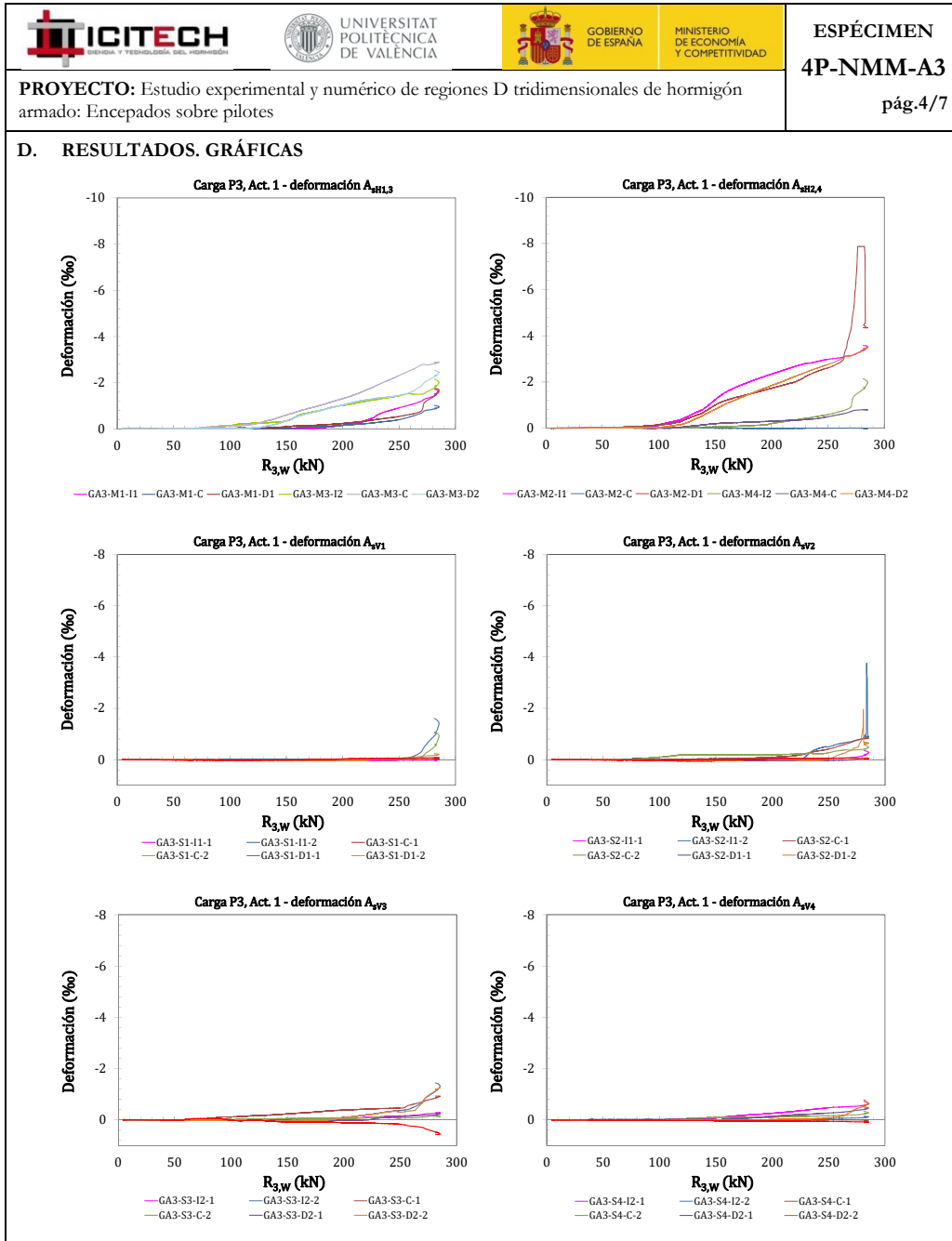


ESPÉCIMEN
4P-NMM-A3
pág.3/7

PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

D. RESULTADOS. GRÁFICAS







GOBIERNO DE ESPAÑA

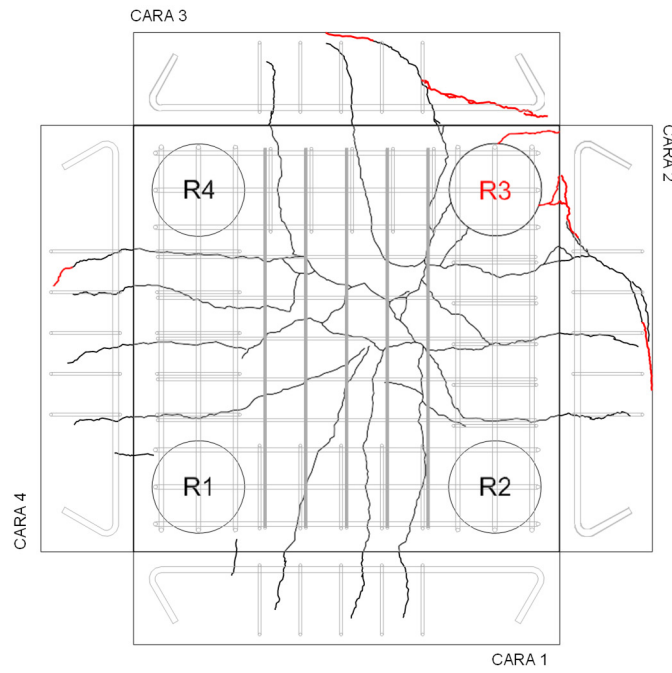
MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD

ESPÉCIMEN
4P-NMM-A3

pág.5/7





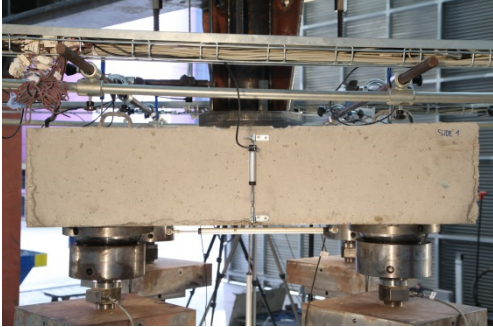

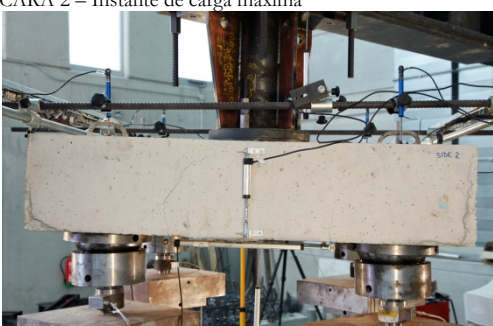
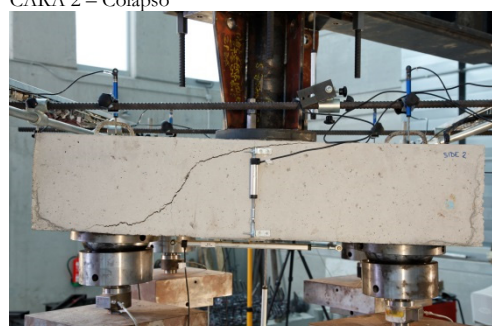

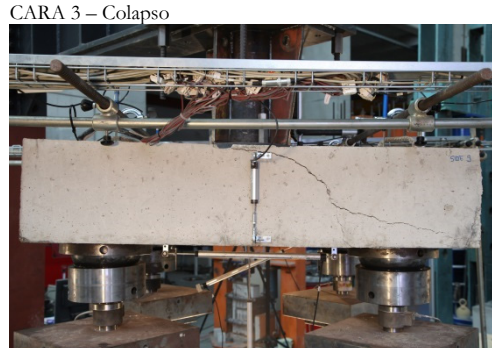
PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

E. RESULTADOS. PATRÓN DE FISURACIÓN



LEYENDA

— carga máxima
— colapso

| | | | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
|  |  <p>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA</p> |  <p>GOBIERNO DE ESPAÑA</p>  <p>MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD</p> | <p>ESPÉCIMEN 4P-NMM-A3 pág.6/7</p> |
| <p>PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes</p> | | | |
| <p>F. FOTOS DE LOS ENSAYOS</p> | | | |
| <p>CARA 1 – Instante de carga máxima</p> | | <p>CARA 1 – Colapso</p> | |
|  | |  | |
| <p>CARA 2 – Instante de carga máxima</p> | | <p>CARA 2 – Colapso</p> | |
|  | |  | |
| <p>CARA 3 – Instante de carga máxima</p> | | <p>CARA 3 – Colapso</p> | |
|  | |  | |



ESPÉCIMEN
4P-NMM-A3
pág.7/7

PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

F. FOTOS DE LOS ENSAYOS

CARA 4 – Instante de carga máxima



CARA 4 – Colapso



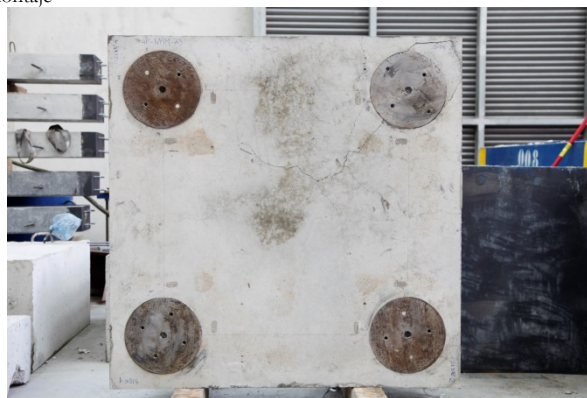
CARA INF – Instante de carga máxima



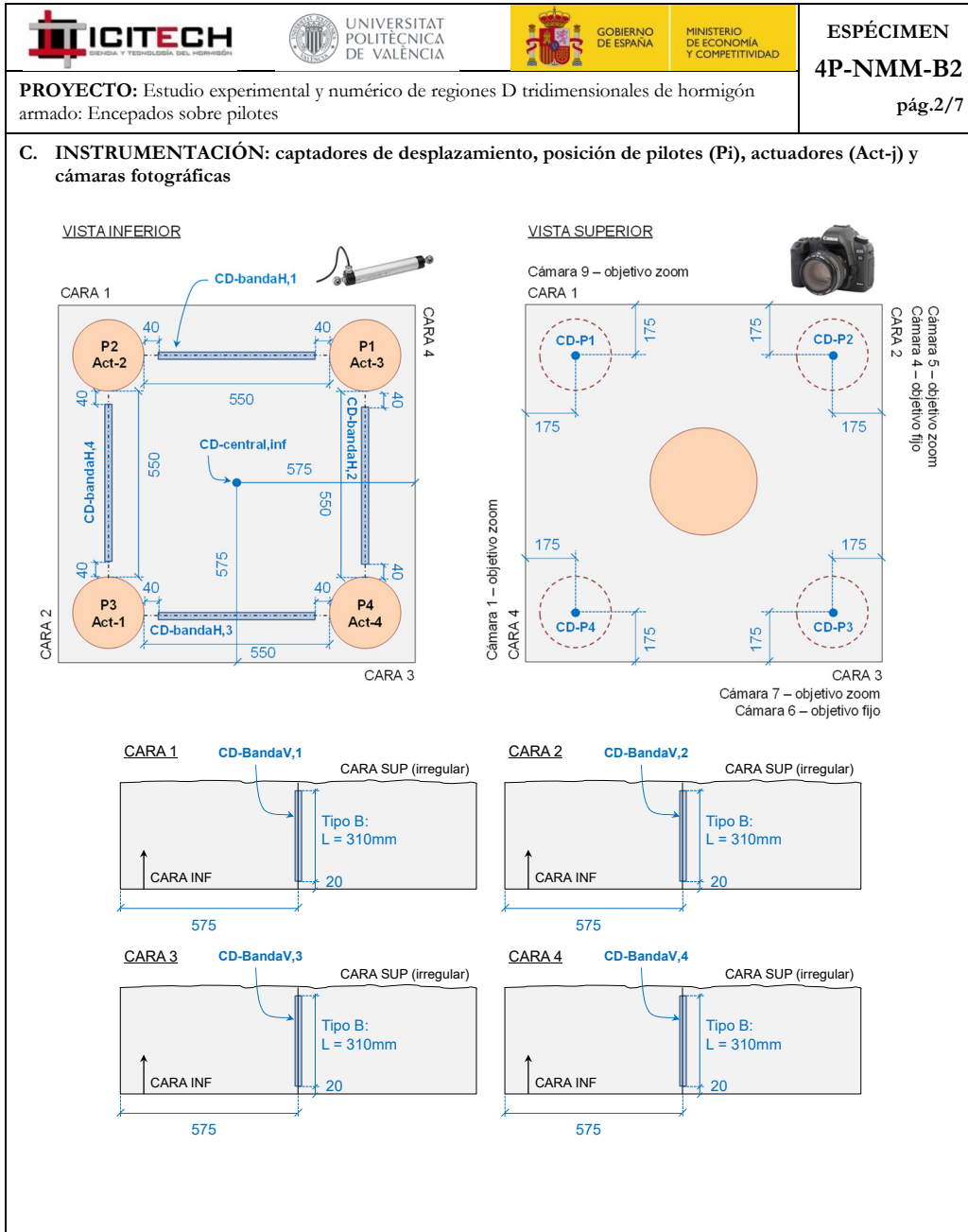
CARA INF – Colapso



CARA INF – Tras desmontaje



| | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|--|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|--|
| | | | | ESPÉCIMEN 4P-NMM-B2 pág.1/7 | | | | | | | | |
| PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes | | | | | | | | | | | | |
| A. DATOS PRINCIPALES DEL ENSAYO <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%;"> Fecha horm.: 19/11/2015 Fecha ensayo: 12/01/2016 Edad (días): 54 f_c / f_{ct} (MPa): 39.0/ 3.3 </td> <td style="width: 50%;"> Carga de rotura total y por pilote: </td> </tr> <tr> <td> Tipo sollicitación: flexión esviada Relación entre cargas actuadas: res 0.65 Act-2/Act-1: 0.31 Act-3/Act-1: 0.65 Act-4/Act-1: </td> <td> $\sum R_{max,W}$ (kN): 763.2 $R_{max,W}$ (kN): 291.8 Modo de fallo: F-YBH </td> </tr> </table> | | | | | Fecha horm.: 19/11/2015 Fecha ensayo: 12/01/2016 Edad (días): 54 f_c / f_{ct} (MPa): 39.0/ 3.3 | Carga de rotura total y por pilote: | Tipo sollicitación: flexión esviada Relación entre cargas actuadas: res 0.65 Act-2/Act-1: 0.31 Act-3/Act-1: 0.65 Act-4/Act-1: | $\sum R_{max,W}$ (kN): 763.2 $R_{max,W}$ (kN): 291.8 Modo de fallo: F-YBH | | | | |
| Fecha horm.: 19/11/2015 Fecha ensayo: 12/01/2016 Edad (días): 54 f_c / f_{ct} (MPa): 39.0/ 3.3 | Carga de rotura total y por pilote: | | | | | | | | | | | |
| Tipo sollicitación: flexión esviada Relación entre cargas actuadas: res 0.65 Act-2/Act-1: 0.31 Act-3/Act-1: 0.65 Act-4/Act-1: | $\sum R_{max,W}$ (kN): 763.2 $R_{max,W}$ (kN): 291.8 Modo de fallo: F-YBH | | | | | | | | | | | |
| B. GEOMETRÍA DEL ENCEPADO Y ARMADO <p>Descripción del armado y su monitorización:</p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 20%;"> L (mm): 1150 h (mm): 350 e (mm): 800 ϕ (mm): 250 c (mm): 350 $r_{geo,inf}$ (mm): 40 </td> <td style="width: 20%;"> ARMADO BANDA: 3Ø12 SEC. HORIZ: 5Ø8 </td> <td style="width: 20%;"> NOMENCLATURA GALGAS GB2-id s/plano </td> <td style="width: 40%; text-align: center;"> </td> </tr> <tr> <td> ARMADO Banda: 3Ø12 Sec. horizontal: 5Ø8 Sec. vertical: - Anclaje pilar: 4Ø16 (Dywidag) </td> <td></td> <td></td> <td style="text-align: center;"> </td> </tr> </table> | | | | | L (mm): 1150 h (mm): 350 e (mm): 800 ϕ (mm): 250 c (mm): 350 $r_{geo,inf}$ (mm): 40 | ARMADO BANDA: 3Ø12 SEC. HORIZ: 5Ø8 | NOMENCLATURA GALGAS GB2-id s/plano | | ARMADO Banda: 3Ø12 Sec. horizontal: 5Ø8 Sec. vertical: - Anclaje pilar: 4Ø16 (Dywidag) | | | |
| L (mm): 1150 h (mm): 350 e (mm): 800 ϕ (mm): 250 c (mm): 350 $r_{geo,inf}$ (mm): 40 | ARMADO BANDA: 3Ø12 SEC. HORIZ: 5Ø8 | NOMENCLATURA GALGAS GB2-id s/plano | | | | | | | | | | |
| ARMADO Banda: 3Ø12 Sec. horizontal: 5Ø8 Sec. vertical: - Anclaje pilar: 4Ø16 (Dywidag) | | | | | | | | | | | | |

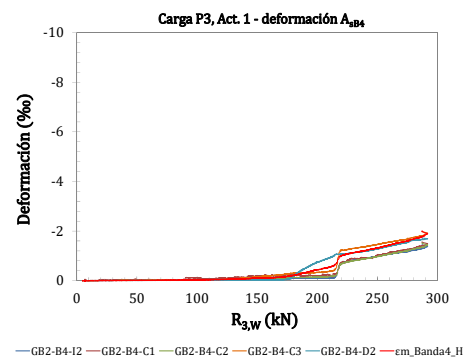
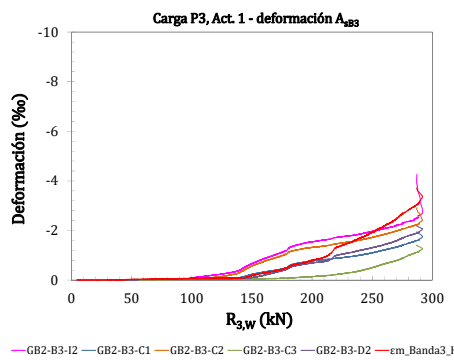
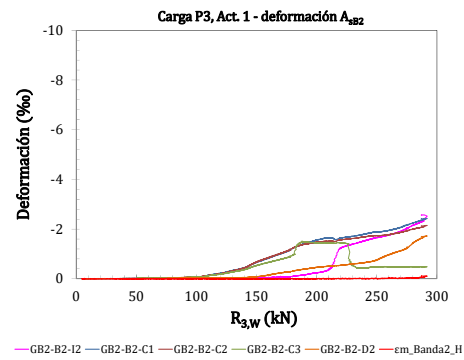
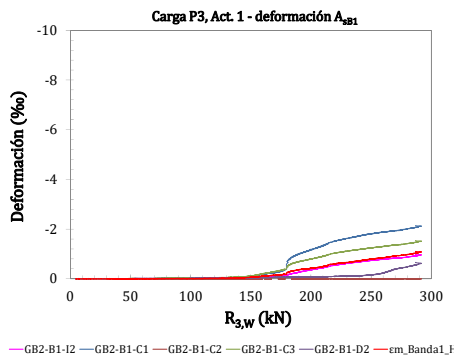
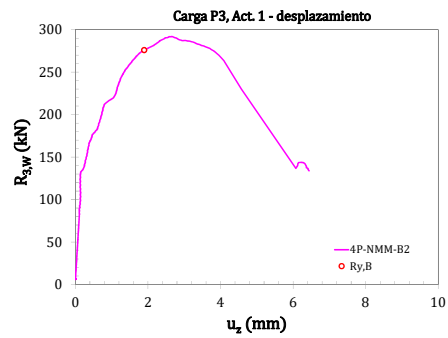
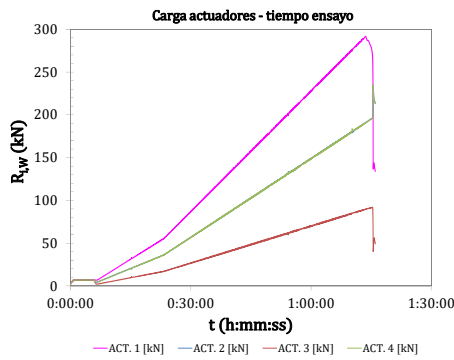


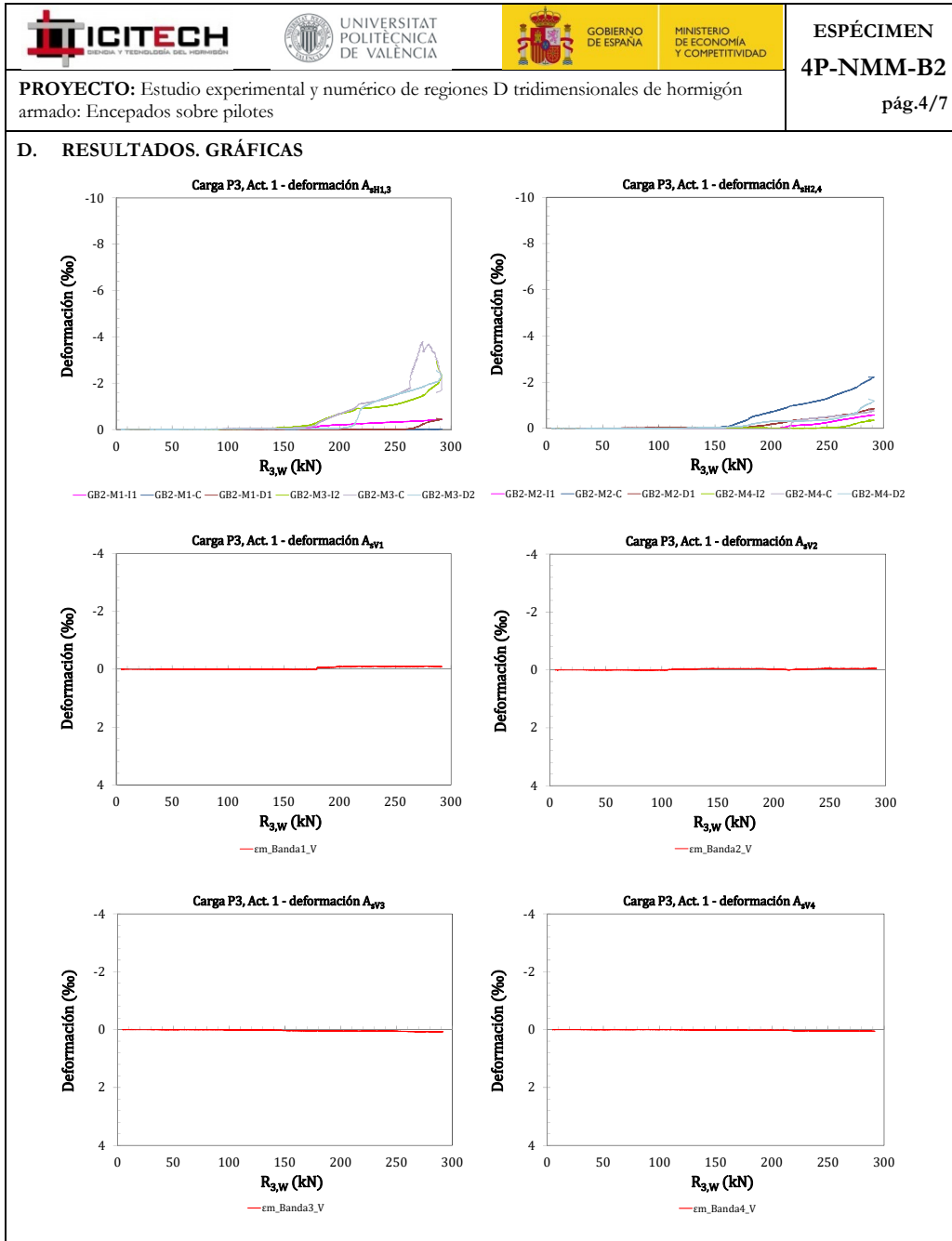


ESPÉCIMEN
4P-NMM-B2
pág.3/7

PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

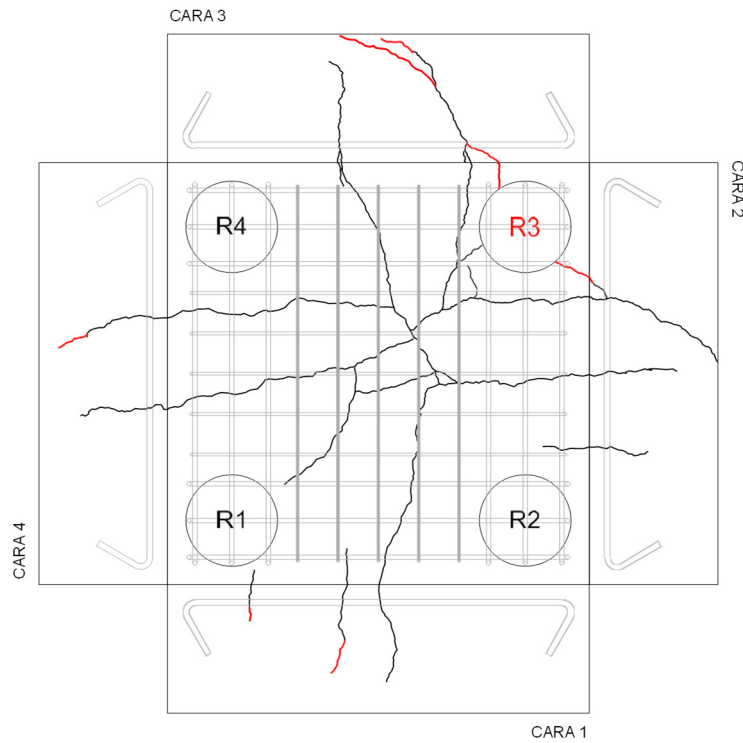
D. RESULTADOS. GRÁFICAS






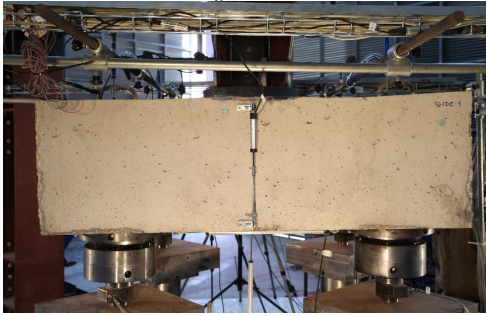
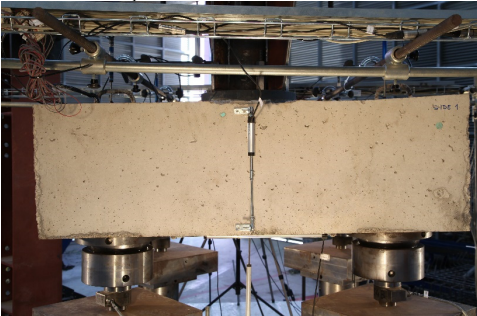
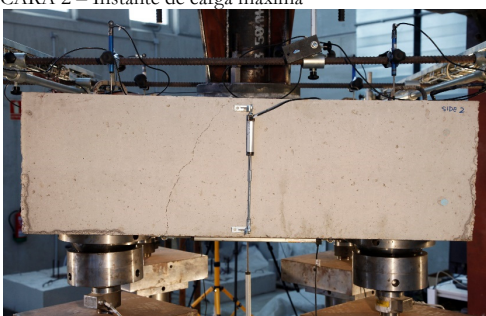
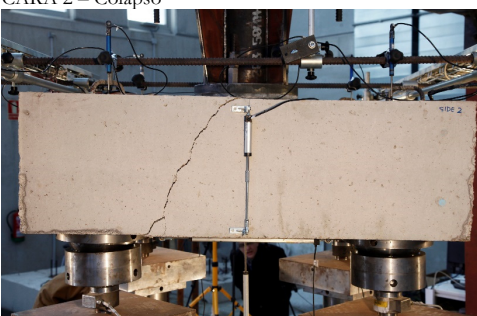

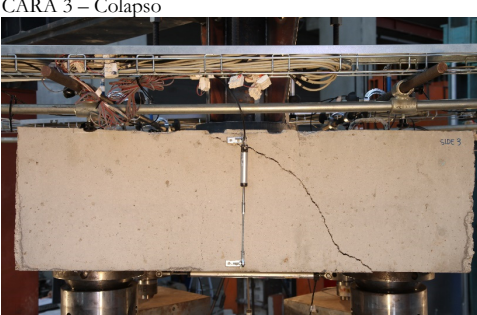


PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

E. RESULTADOS. PATRÓN DE FISURACIÓN



LEYENDA
— carga máxima
— colapso

| | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
|  |  UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA |  GOBIERNO DE ESPAÑA MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD | ESPÉCIMEN 4P-NMM-B2 pág.6/7 |
| PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes | | | |
| F. FOTOS DE LOS ENSAYOS | | | |
| CARA 1 – Instante de carga máxima | | CARA 1 – Colapso | |
|  | |  | |
| CARA 2 – Instante de carga máxima | | CARA 2 – Colapso | |
|  | |  | |
| CARA 3 – Instante de carga máxima | | CARA 3 – Colapso | |
|  | |  | |

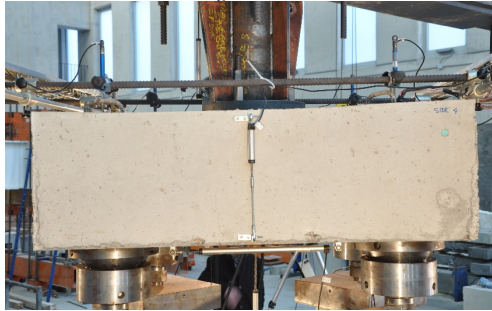


ESPÉCIMEN
4P-NMM-B2
pág.7/7

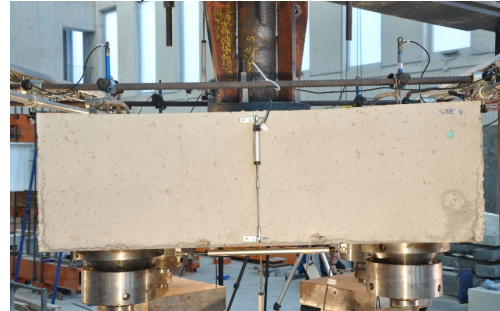
PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

F. FOTOS DE LOS ENSAYOS

CARA 4 – Instante de carga máxima



CARA 4 – Colapso



CARA INF – Instante de carga máxima



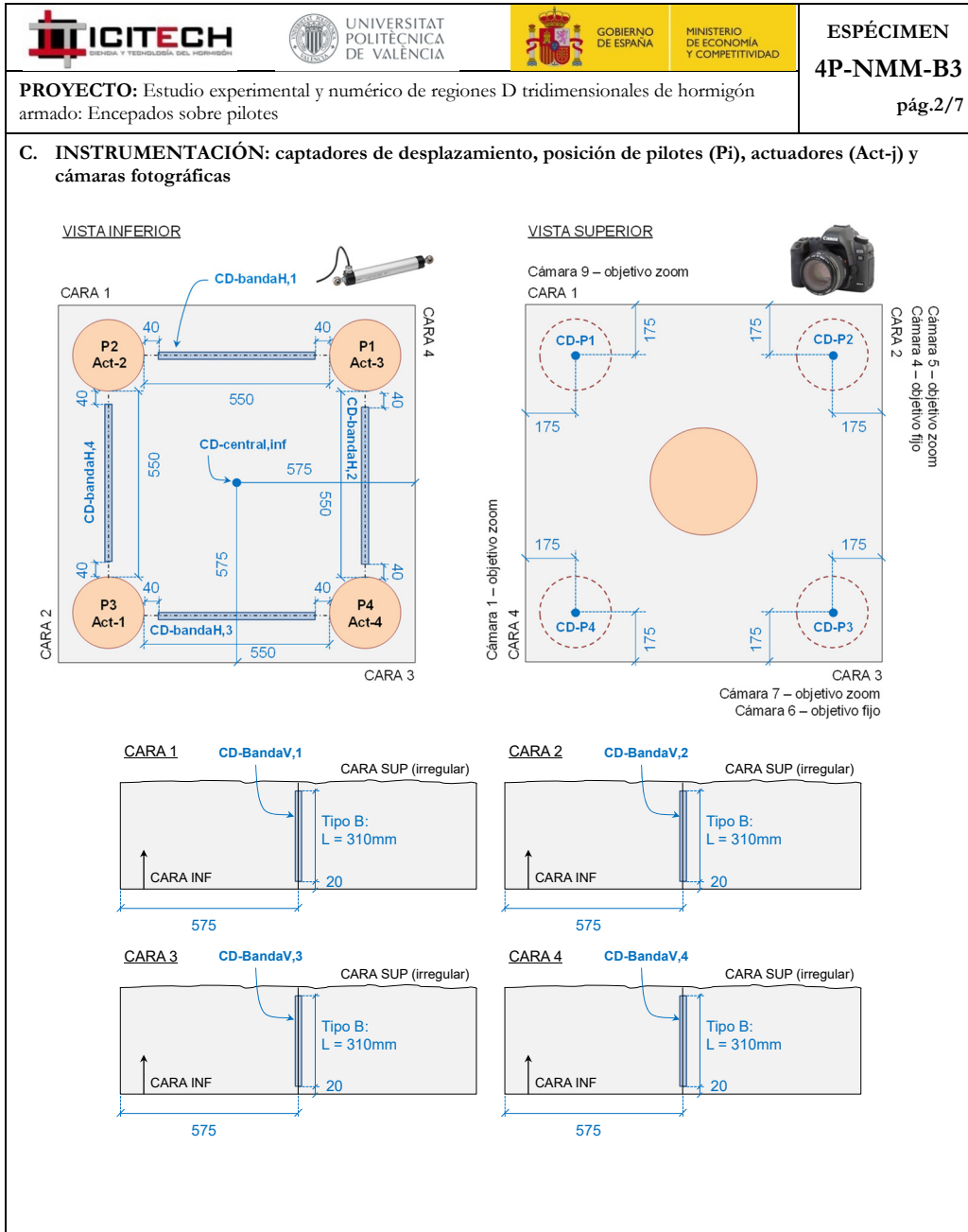
CARA INF – Colapso



CARA INF – Tras desmontaje



| | | | | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| | | | | ESPÉCIMEN 4P-NMM-B3 |
| PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encapados sobre pilotes | | | | <p>pág.1/7</p> |
| A. DATOS PRINCIPALES DEL ENSAYO | | | | |
| Fecha horm.: 30/11/2015 Fecha ensayo: 14/01/2016 Edad (días): 45 f_c / f_{ct} (MPa): 29.0/ 2.8 | Carga de rotura total y por pilote: | $\sum R_{max,W}$ (kN): 826.4 $R_{max,W}$ (kN): 305.2 Modo de fallo: D-Y _{BHV} | | |
| Tipo sollicitación: flexión esviada Relación entre cargas actuadas res 0.65 Act-2/Act-1: 0.31 Act-3/Act-1: 0.65 Act-4/Act-1: | | | | |
| B. GEOMETRÍA DEL ENCEPADO Y ARMADO | | | | |
| Descripción del armado y su monitorización: | | | | |
| L (mm): 1150 h (mm): 350 e (mm): 800 ϕ (mm): 250 c (mm): 350 $r_{geo,inf}$ (mm): 40 | ARMADO | ARMADO BANDA: S012 SEC. HORIZ: S08 SEC. VERTICAL: S08 | NOMENCLATURA GALGAS GB3= lo s/plano | GALGAS EN CERCOS BANDAS 2 Y 4 E: 2,4 I: 1,1 C, D |
| Banda: 3 ϕ 12 Sec. horizontal: 5 ϕ 8 Sec. vertical: 5 $c\phi$ 8 Anclaje pilar: 4 ϕ 16 (Dywidag) | | | GALGAS EN CERCOS BANDAS 1 Y 3 E: 1,2 I: 1,1 C, D | |
| 56 GALGAS: GB3-id s/plano | DETALLE BARRAS ANCLAJE PILAR Cara superior encapado | | | |

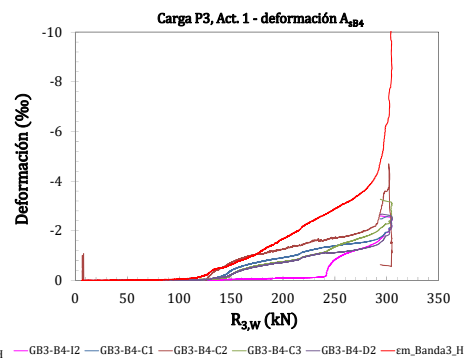
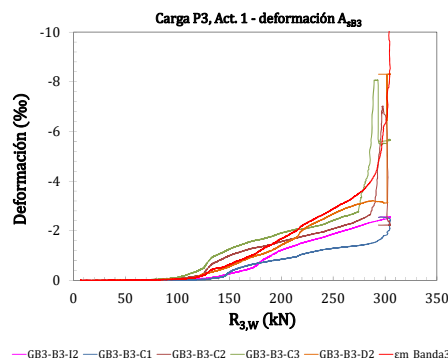
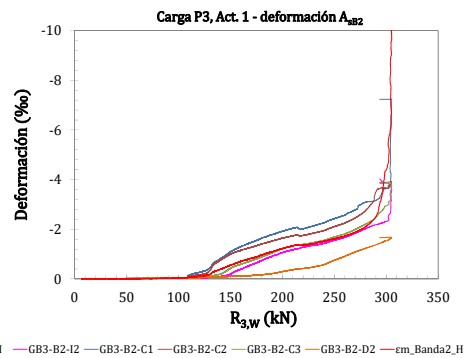
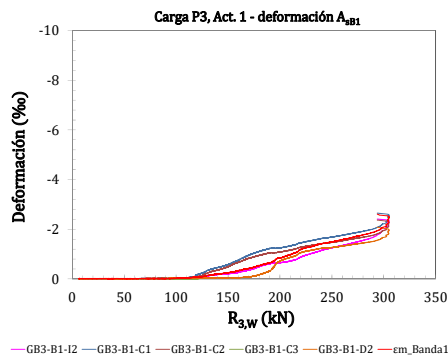
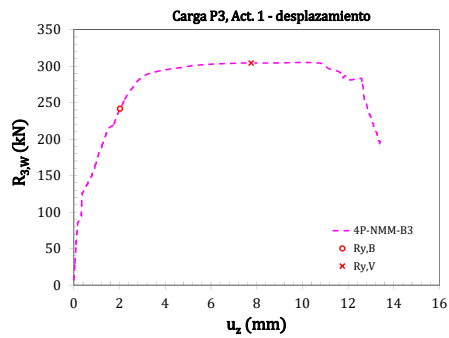
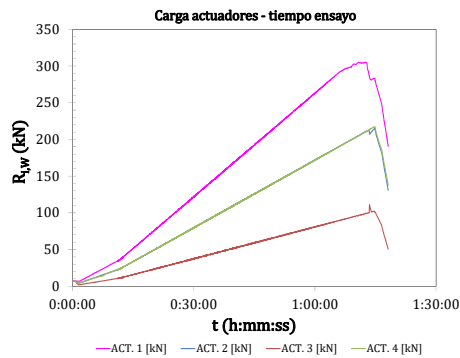


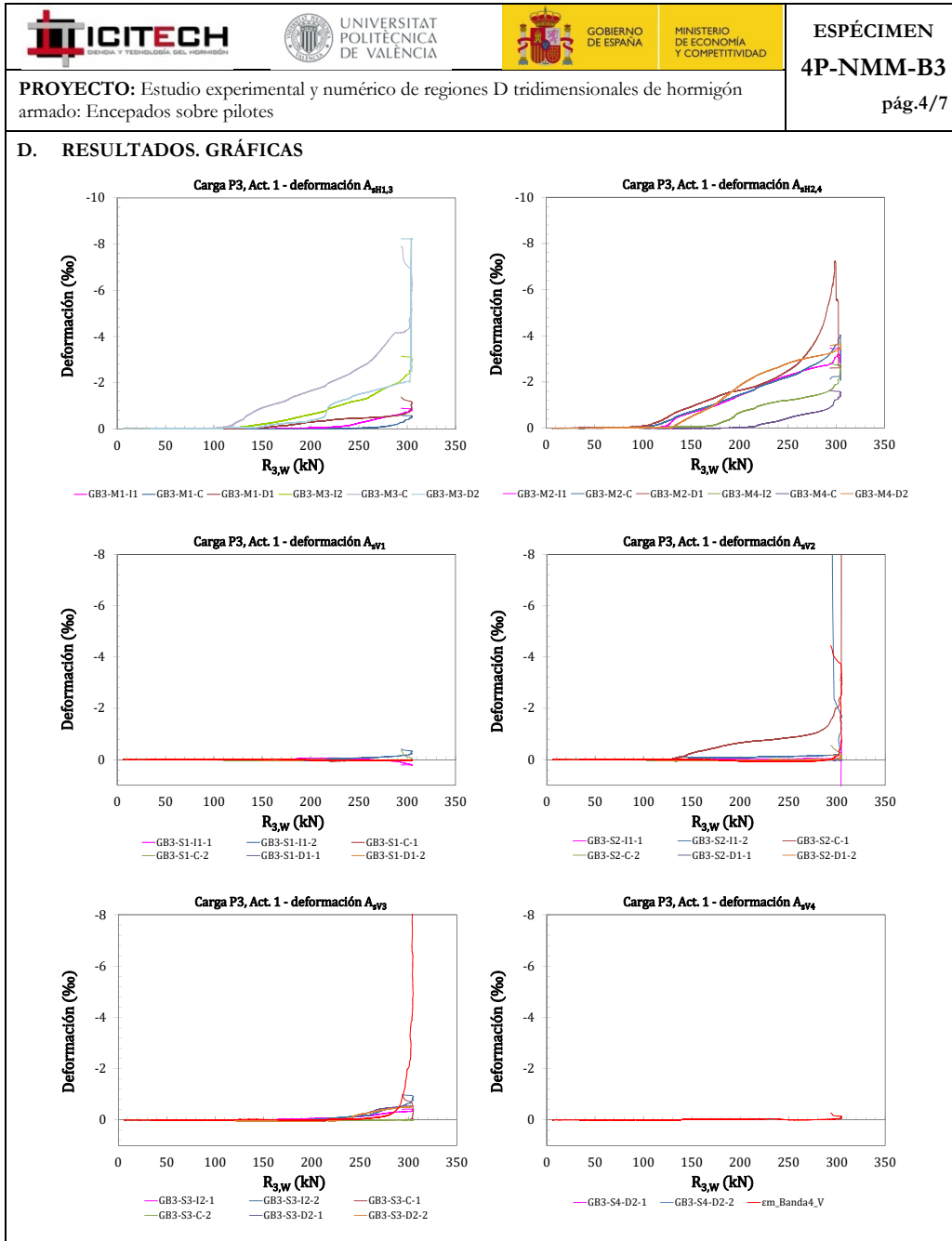


ESPÉCIMEN
4P-NMM-B3
pág.3/7

PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

D. RESULTADOS. GRÁFICAS







GOBIERNO DE ESPAÑA

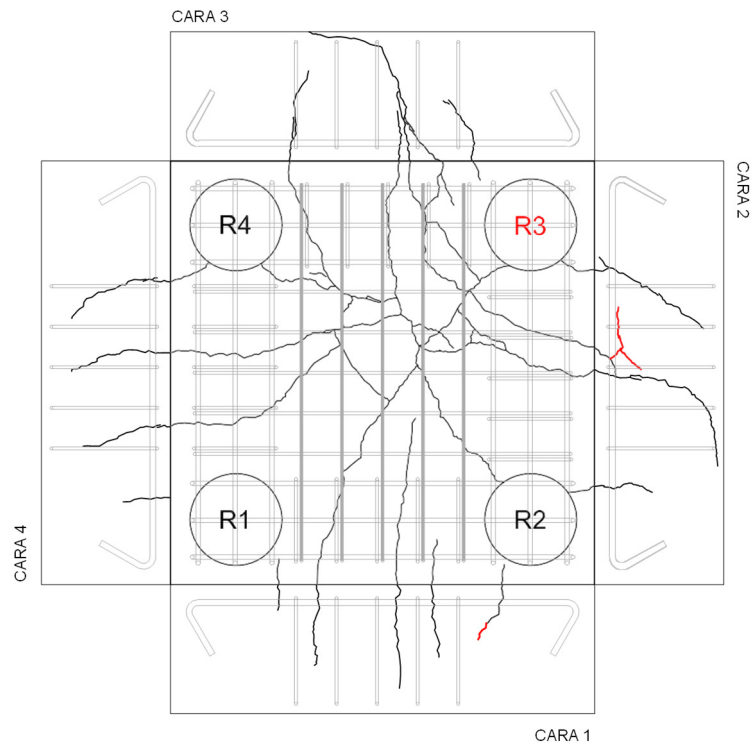
MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD

ESPÉCIMEN
4P-NMM-B3

PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes





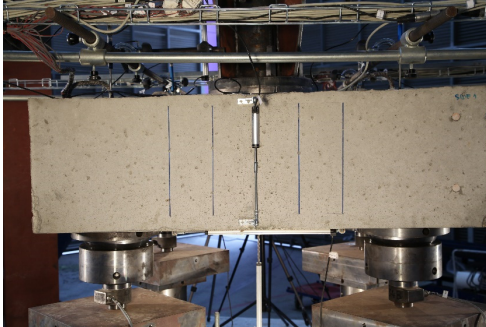
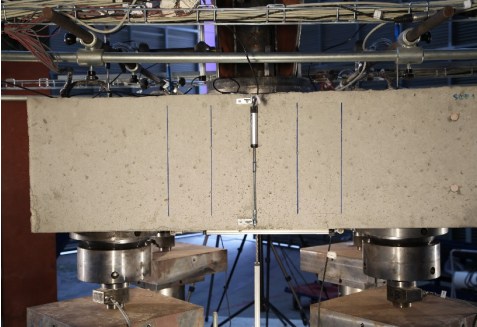
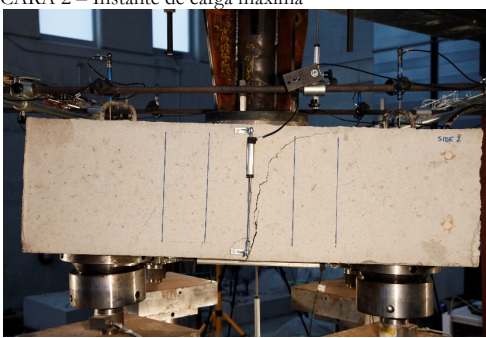
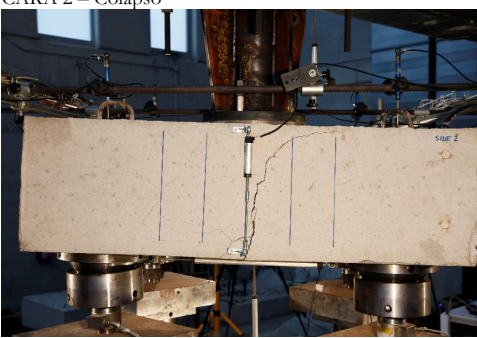
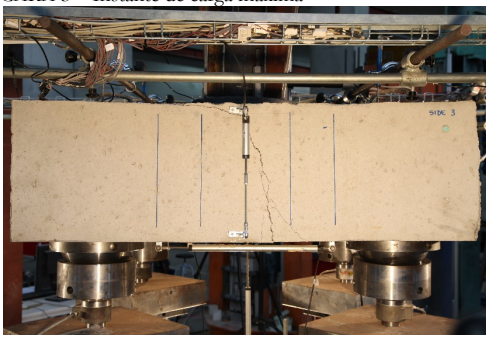
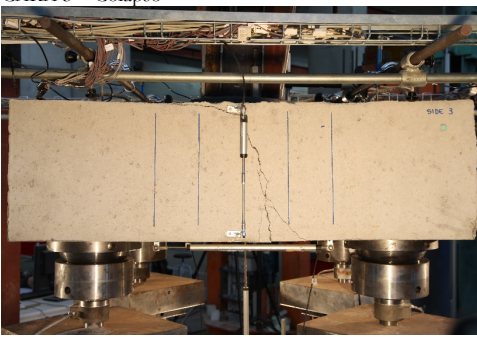
pág.5/7

F. RESULTADOS. PATRÓN DE FISURACIÓN



LEYENDA

- carga máxima
- colapso

| | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
|  |  UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA |  GOBIERNO DE ESPAÑA  MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD | ESPÉCIMEN 4P-NMM-B3 pág.6/7 |
| PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes | | | |
| G. FOTOS DE LOS ENSAYOS | | | |
| CARA 1 – Instante de carga máxima | | CARA 1 – Colapso | |
|  | |  | |
| CARA 2 – Instante de carga máxima | | CARA 2 – Colapso | |
|  | |  | |
| CARA 3 – Instante de carga máxima | | CARA 3 – Colapso | |
|  | |  | |

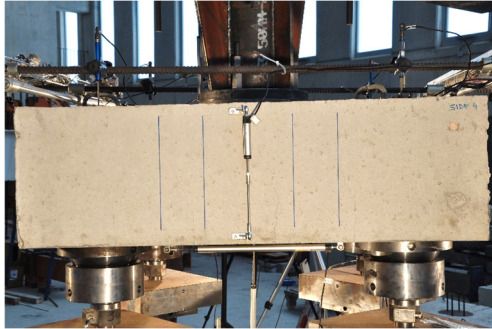


ESPÉCIMEN
4P-NMM-B3
pág.7/7

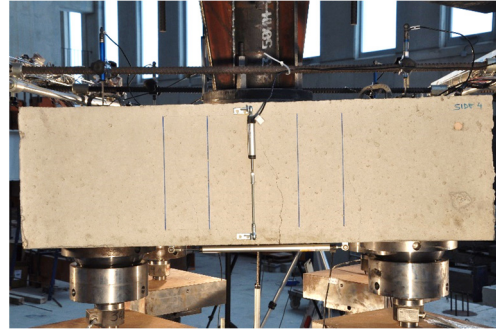
PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

G. FOTOS DE LOS ENSAYOS

CARA 4 – Instante de carga máxima



CARA 4 – Colapso



CARA INF – Instante de carga máxima





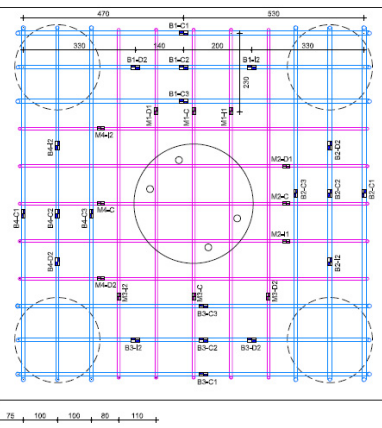
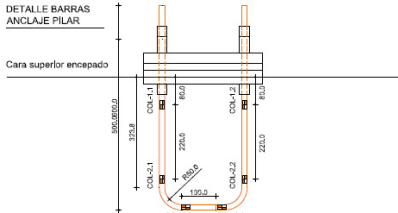


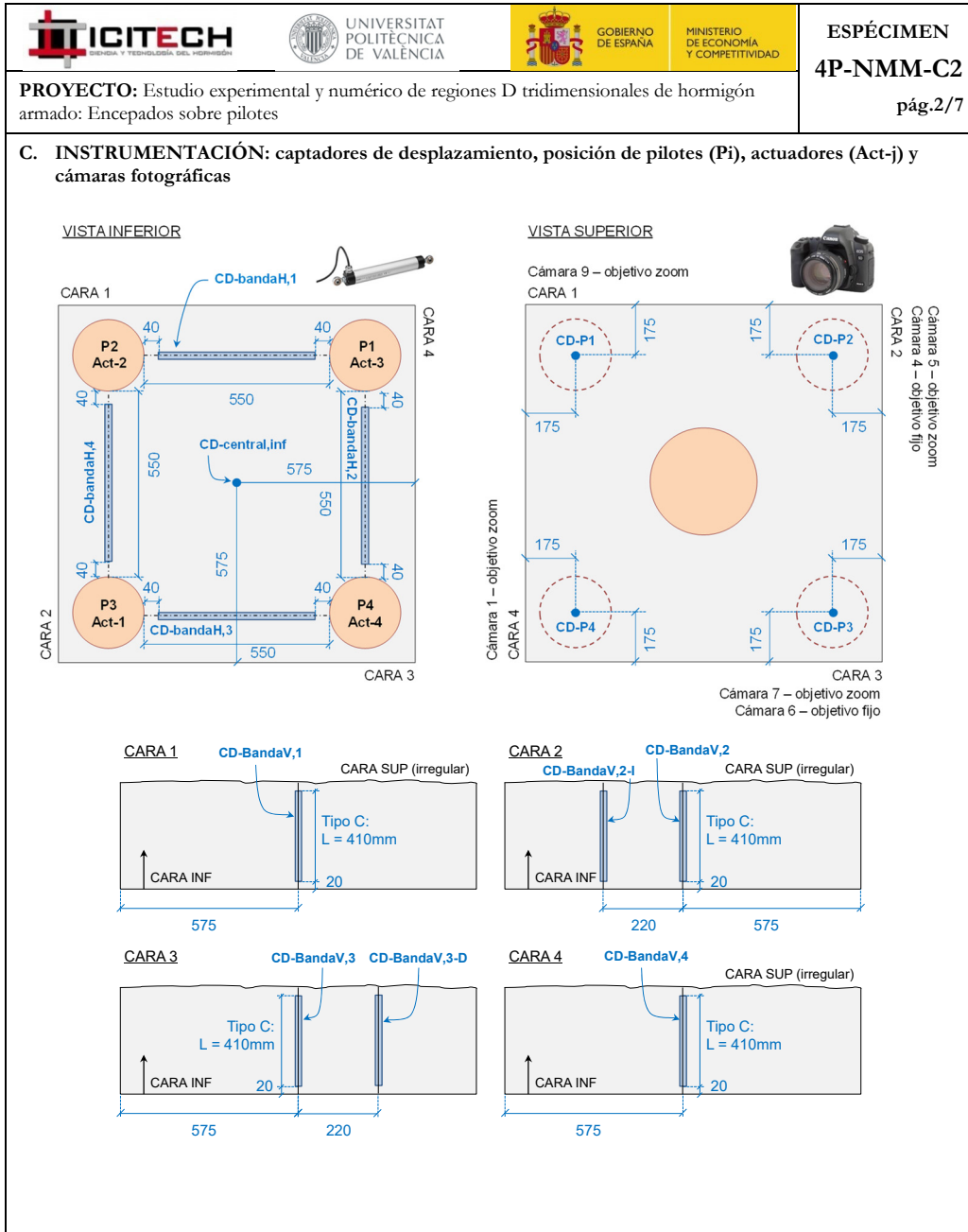
CARA INF – Colapso



CARA INF – Tras desmontaje



| | | | | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA |  GOBIERNO DE ESPAÑA |  MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD | ESPÉCIMEN 4P-NMM-C2 pág.1/7 |
| PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encapados sobre pilotes | | | | |
| A. DATOS PRINCIPALES DEL ENSAYO | | | | |
| Fecha horm.: 30/11/2015 Fecha ensayo: 18/01/2016 Edad (días): 49 f_c / f_{ct} (MPa): 28.7/ 2.7 Tipo sollicitación: flexión esviada Relación entre cargas actuadores Act-2/Act-1: 0.65 Act-3/Act-1: 0.31 Act-4/Act-1: 0.65 | Carga de rotura total y por pilote: $\Sigma R_{max,W}$ (kN): 970.1 $R_{max,W}$ (kN): 366.8 Modo de fallo: D-Y _{BH} | | | |
| B. GEOMETRÍA DEL ENCEPADO Y ARMADO | | | | |
| L (mm): 1150 h (mm): 450 e (mm): 800 ϕ (mm): 250 c (mm): 350 $r_{geo,inf}$ (mm): 40 | Descripción del armado y su monitorización: | ARMADO BANDA: 1 ϕ 12+2 ϕ 10 SEC. HORIZ: 5 ϕ 8 SEC. VERTIC: - Anclaje pilar: 4 ϕ 16 (Dywidag) |  | DETALLE BARRAS ANCLAJE PILAR Cara superior encapado  |
| ARMADO | NOMENCLATURA GALGAS GC2 = ϕ s/plano 32 GALGAS | Banda: 1 ϕ 12+2 ϕ 10 Sec. horizontal: 5 ϕ 8 Sec. vertical: - Anclaje pilar: 4 ϕ 16 (Dywidag) | 32 GALGAS: GC2-id s/plano | |

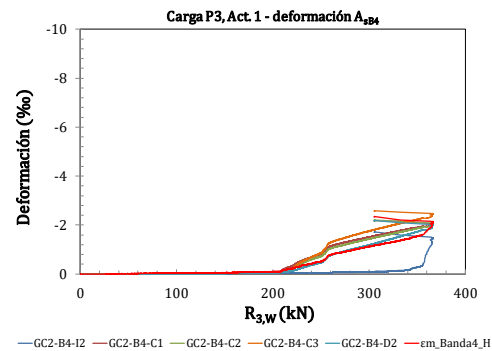
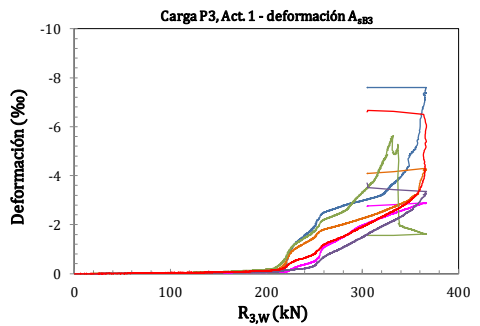
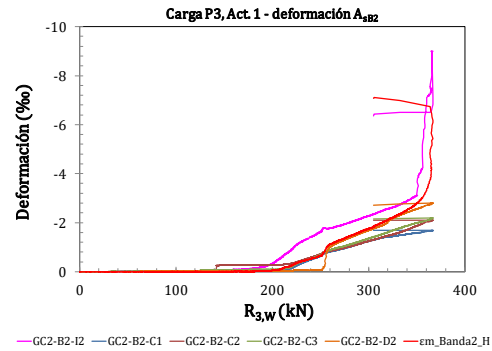
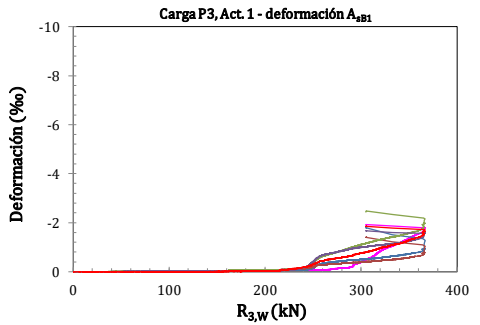
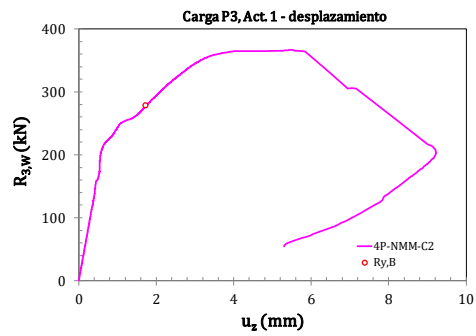
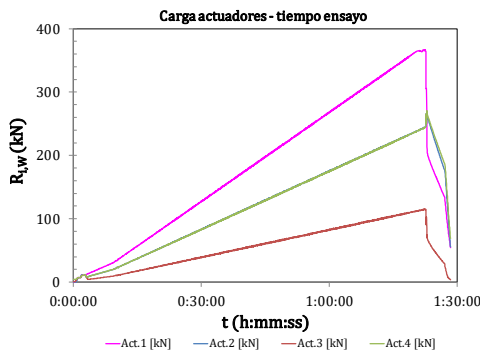


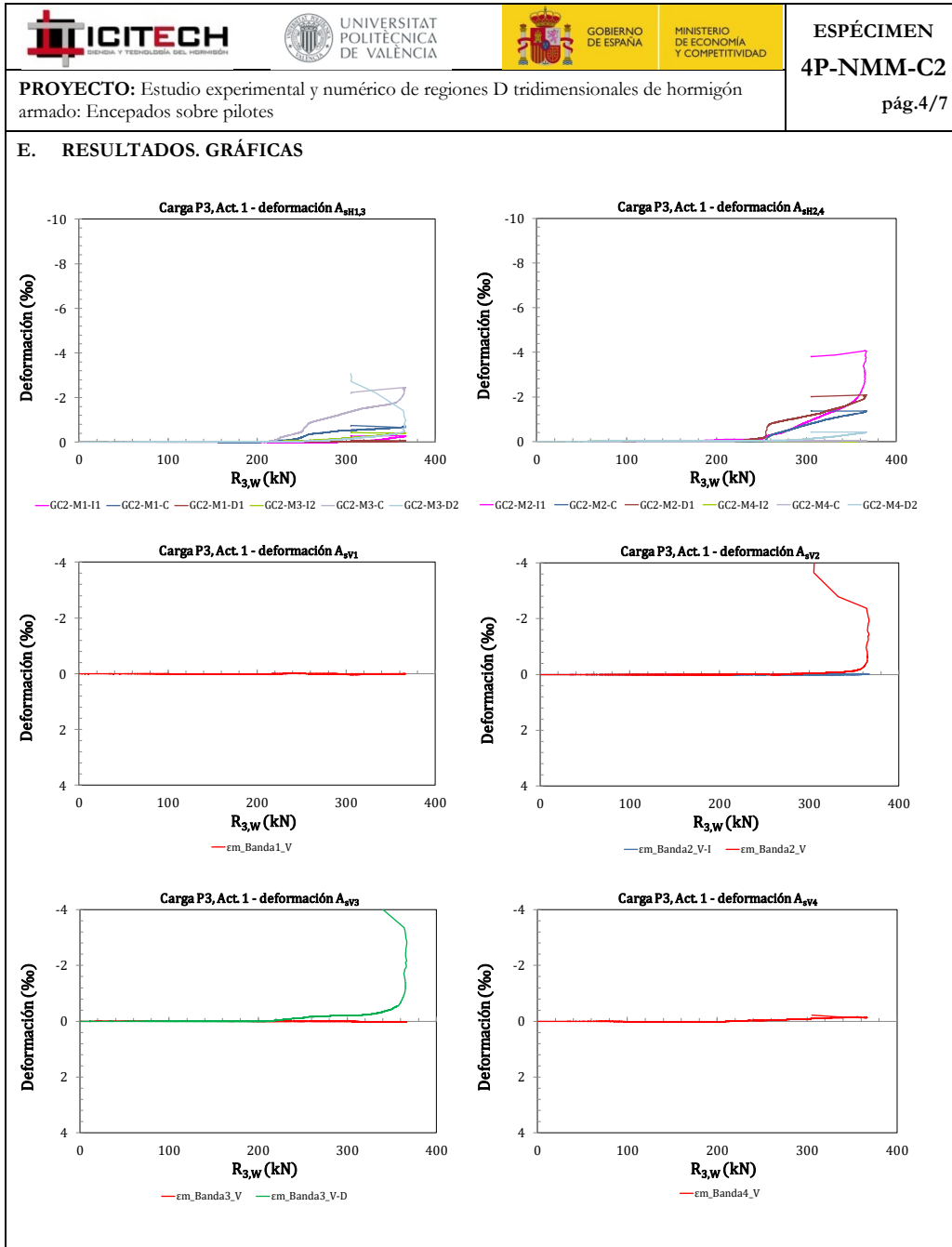


ESPÉCIMEN
4P-NMM-C2
pág.3/7

PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

D. RESULTADOS. GRÁFICAS



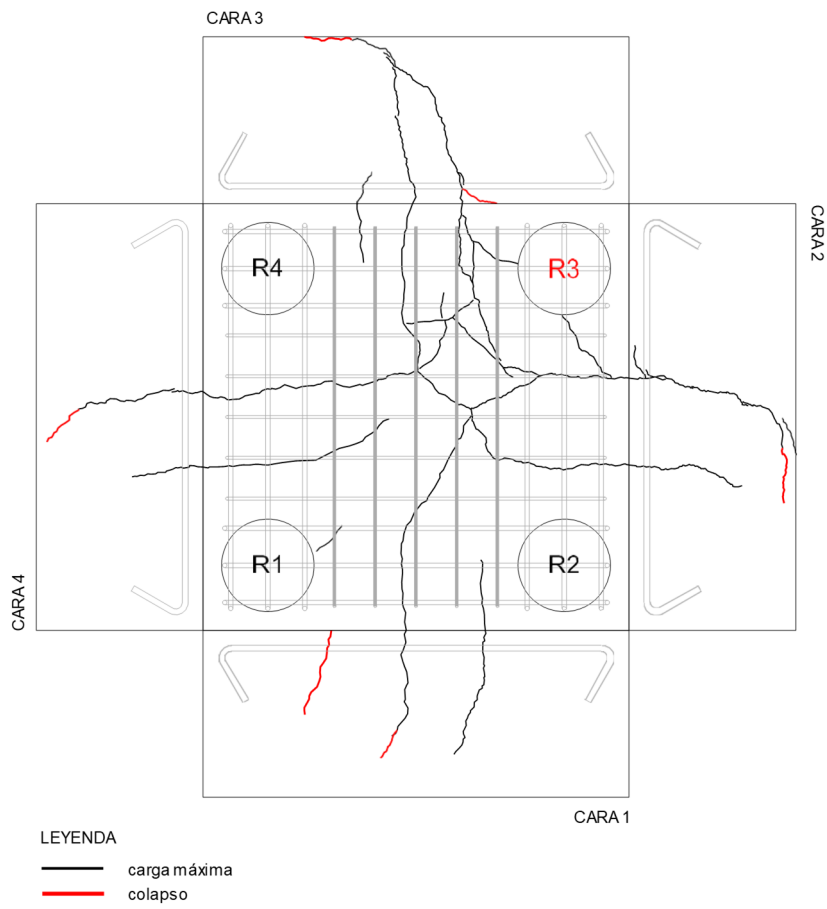





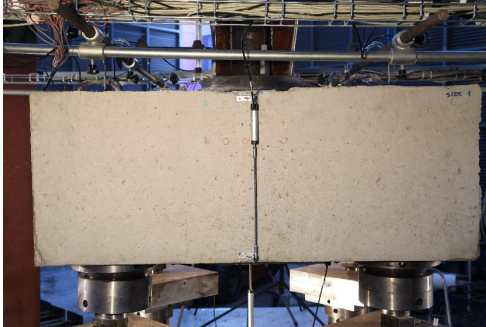

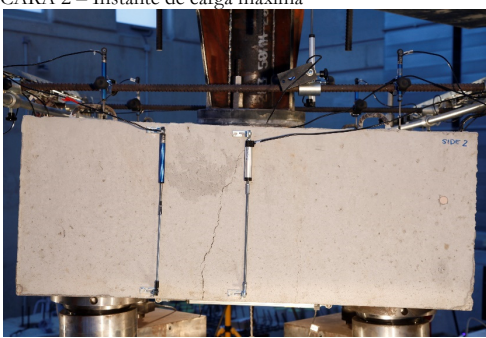
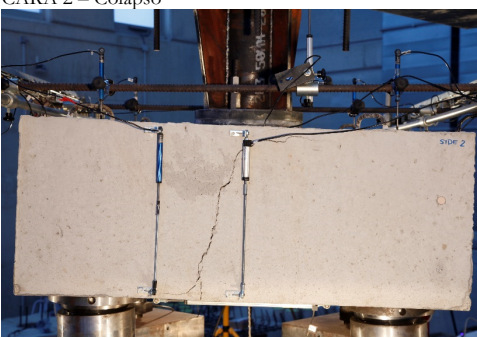
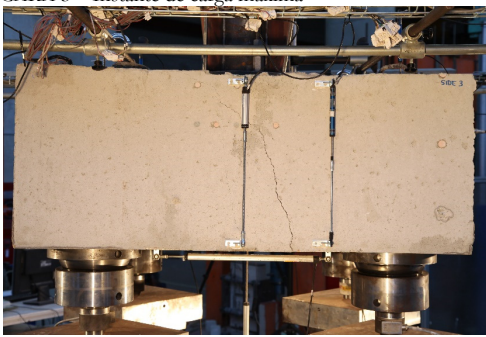
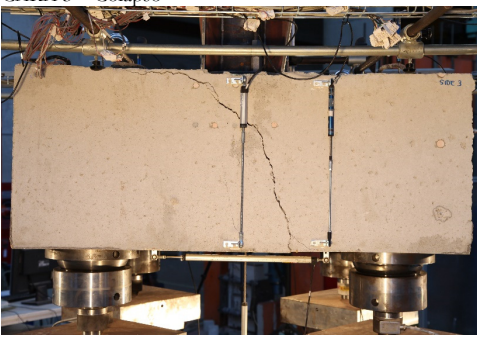


ESPÉCIMEN
4P-NMM-C2
pág.5/7

PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

E. RESULTADOS. PATRÓN DE FISURACIÓN



| | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
|  |  UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA |  GOBIERNO DE ESPAÑA MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD | ESPÉCIMEN 4P-NMM-C2 pág.6/7 |
| PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes | | | |
| F. FOTOS DE LOS ENSAYOS | | | |
| CARA 1 – Instante de carga máxima | | CARA 1 – Colapso | |
|  | |  | |
| CARA 2 – Instante de carga máxima | | CARA 2 – Colapso | |
|  | |  | |
| CARA 3 – Instante de carga máxima | | CARA 3 – Colapso | |
|  | |  | |

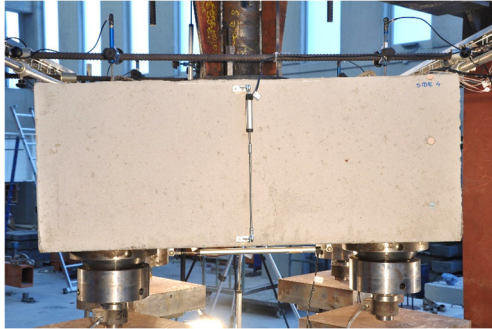


ESPÉCIMEN
4P-NMM-C2
pág.7/7

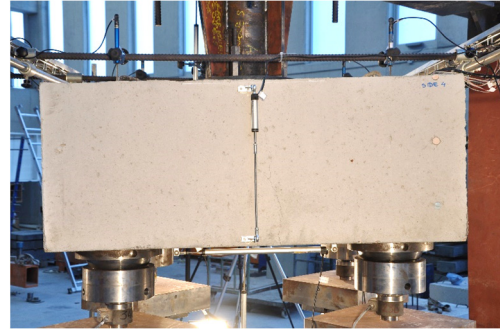
PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

F. FOTOS DE LOS ENSAYOS

CARA 4 – Instante de carga máxima



CARA 4 – Colapso



CARA INF – Instante de carga máxima



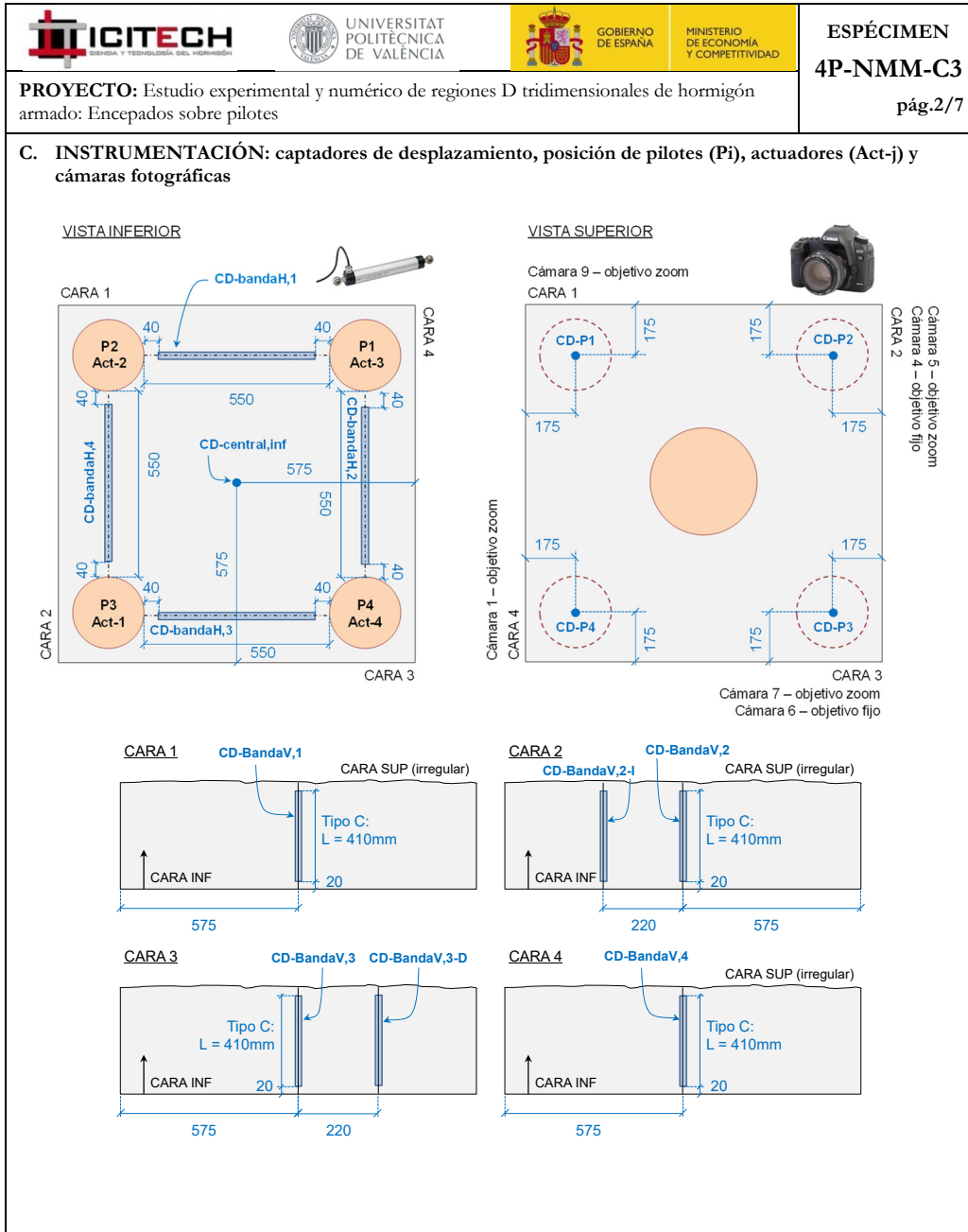
CARA INF – Colapso



CARA INF – Tras desmontaje



| | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| | | | | <p>ESPECÍMEN 4P-NMM-C3 pág.1/7</p> |
| <p>PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes</p> | | | | |
| <p>A. DATOS PRINCIPALES DEL ENSAYO</p> | | | | |
| <p>Fecha horm.: 30/11/2015 Fecha ensayo: 21/01/2016 Edad (días): 52 f_c / f_{ct} (MPa): 29.5/ 3.1</p> <p>Tipo sollicitación: flexión esviada Relación entre cargas actuadas: res 0.65 Act-2/Act-1: 0.31 Act-3/Act-1: 0.65 Act-4/Act-1:</p> | <p>Carga de rotura total y por pilote:</p> <p>$\sum R_{max,W}$ (kN): 1076.0 $R_{max,W}$ (kN): 409.8 Modo de fallo: D-Y_{BHV}</p> | | | |
| <p>B. GEOMETRÍA DEL ENCEPADO Y ARMADO</p> | | | | |
| <p>Descripción del armado y su monitorización:</p> | | | | |
| <p>L (mm): 1150 h (mm): 450 e (mm): 800 ϕ (mm): 250 c (mm): 350 $\Gamma_{geo,inf}$ (mm): 40</p> | <p>ARMADO BANDA: 1Ø12 + 2Ø10 SEC. HORIZ: 5Ø8 SEC. VERTICAL: 5ø8</p> <p>NOMENCLATURA GALGAS GC3 - Id s/plano</p> <p>56 GALGAS</p> | | <p>GALGAS EN CERCOS BANDAS 2 Y 4 1:2,4 3/1, C, D</p> | <p>GALGAS EN CERCOS BANDAS 1 Y 3 1:1,3 3/1, C, D</p> |
| <p>ARMADO Banda: 1Ø12+2Ø10 Sec. horizontal: 5Ø8 Sec. vertical: 5Ø8 Anclaje pilar: 4Ø16 (Dywidag)</p> | <p>DETALLE BARRAS ANCLAJE PILAR</p> <p>Cara superior encepado</p> | | | |
| <p>56 GALGAS: GC3-id s/plano</p> | | | | |

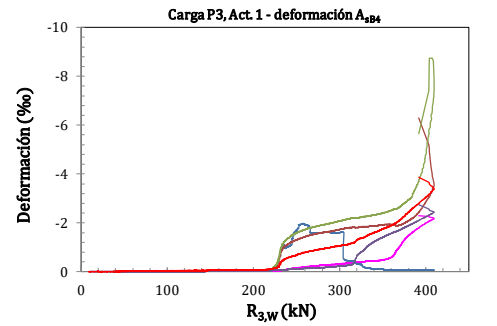
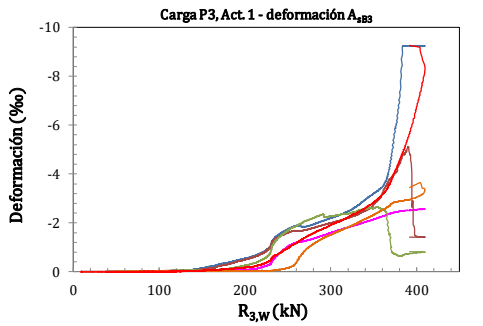
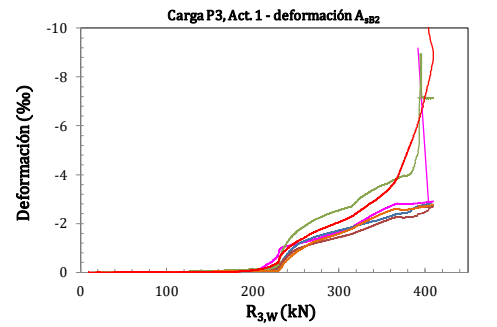
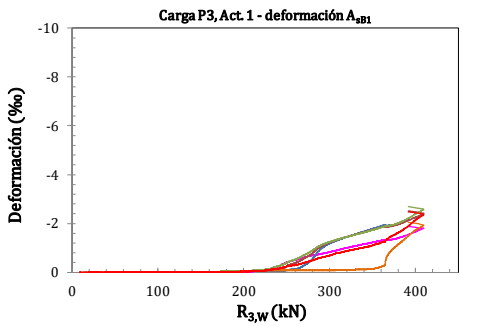
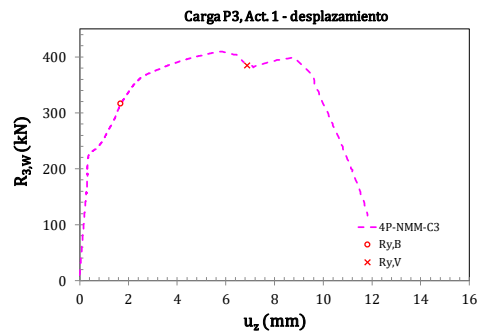
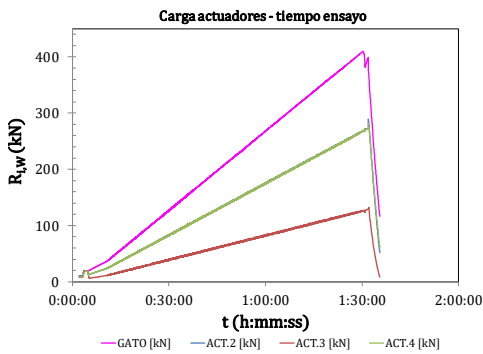


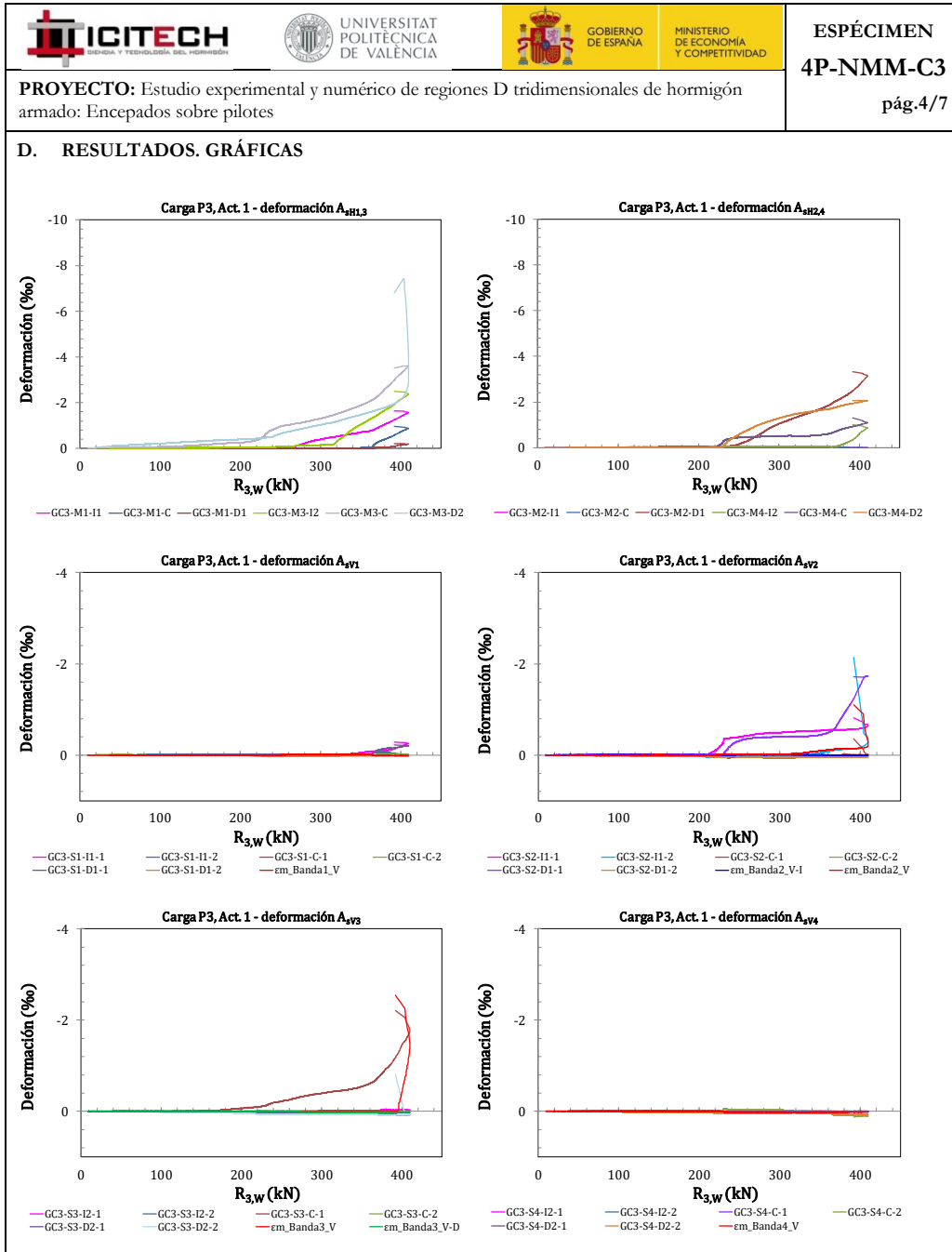


ESPÉCIMEN
4P-NMM-C3
pág.3/7

PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

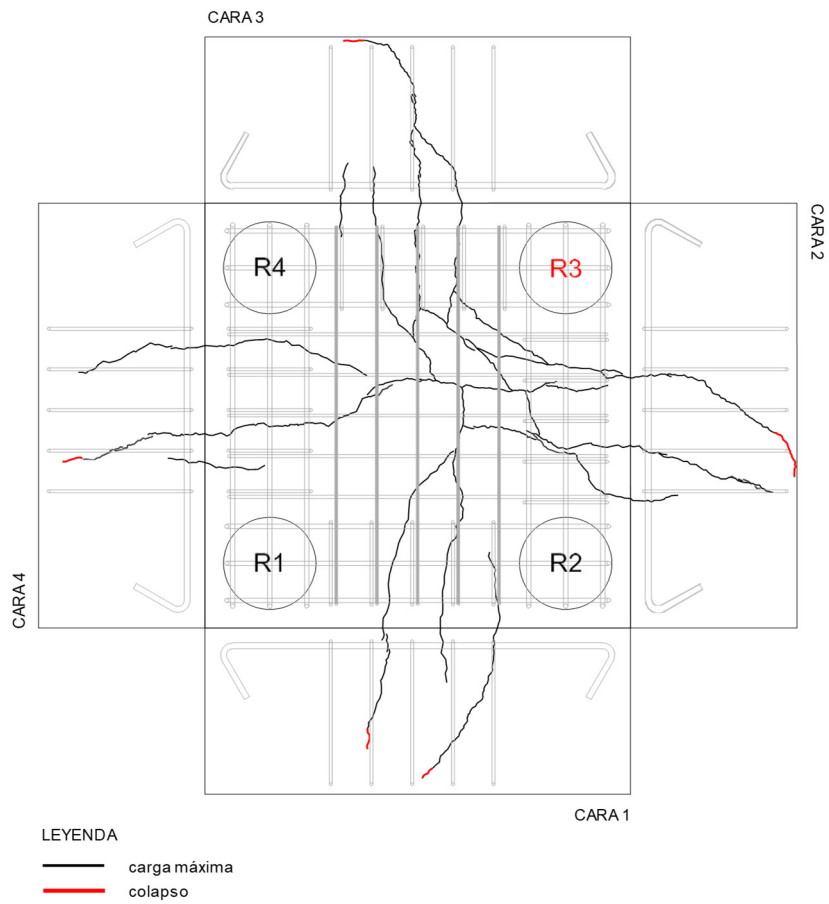
D. RESULTADOS. GRÁFICAS






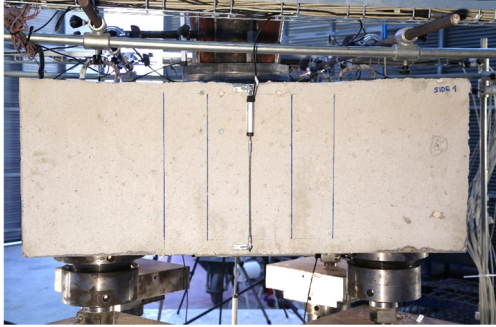
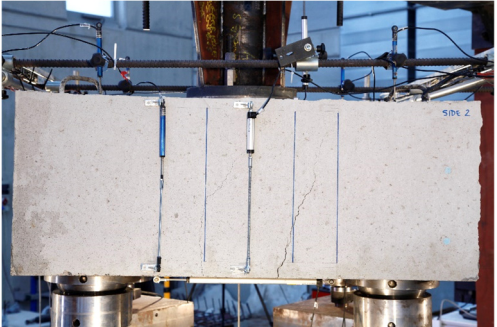
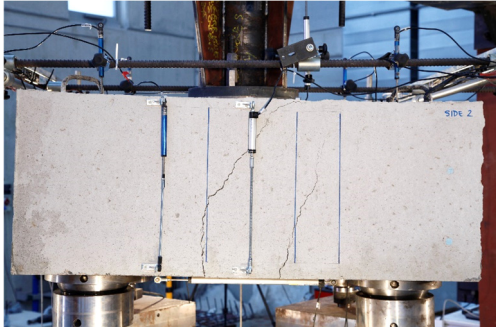
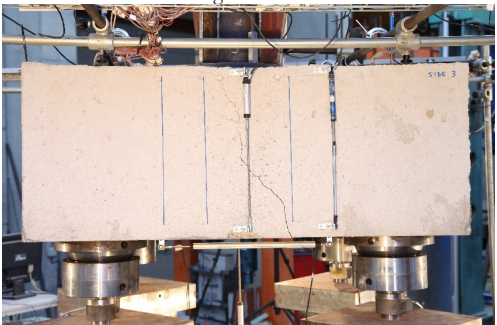
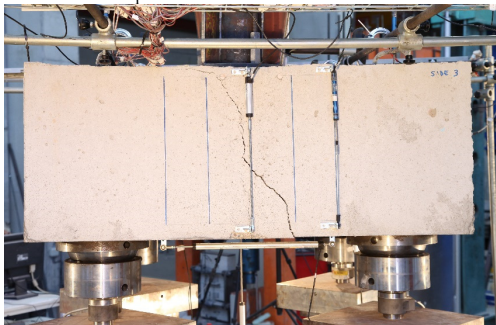




PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

E. RESULTADOS. PATRÓN DE FISURACIÓN



| | | | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
|  |  <p>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA</p> |  <p>GOBIERNO DE ESPAÑA</p>  <p>MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD</p> | <p>ESPÉCIMEN 4P-NMM-C3 pág.6/7</p> |
| <p>PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes</p> | | | |
| <p>F. FOTOS DE LOS ENSAYOS</p> | | | |
| <p>CARA 1 – Instante de carga máxima</p> | | <p>CARA 1 – Colapso</p> | |
|  | |  | |
| <p>CARA 2 – Instante de carga máxima</p> | | <p>CARA 2 – Colapso</p> | |
|  | |  | |
| <p>CARA 3 – Instante de carga máxima</p> | | <p>CARA 3 – Colapso</p> | |
|  | |  | |

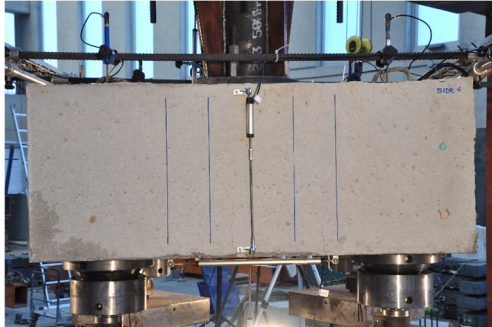


ESPÉCIMEN
4P-NMM-C3
pág.7/7

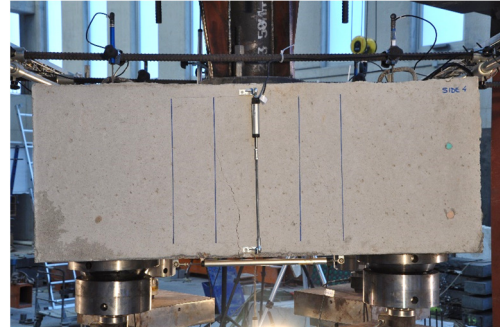
PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

F. FOTOS DE LOS ENSAYOS

CARA 4 – Instante de carga máxima



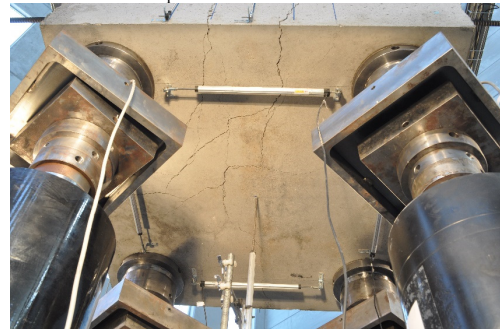
CARA 4 – Colapso



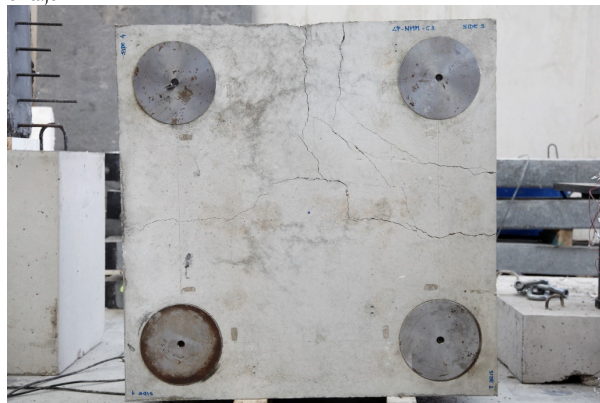
CARA INF – Instante de carga máxima





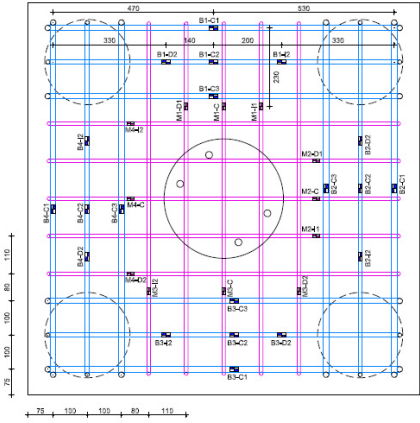
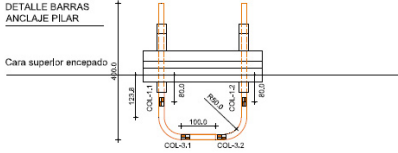


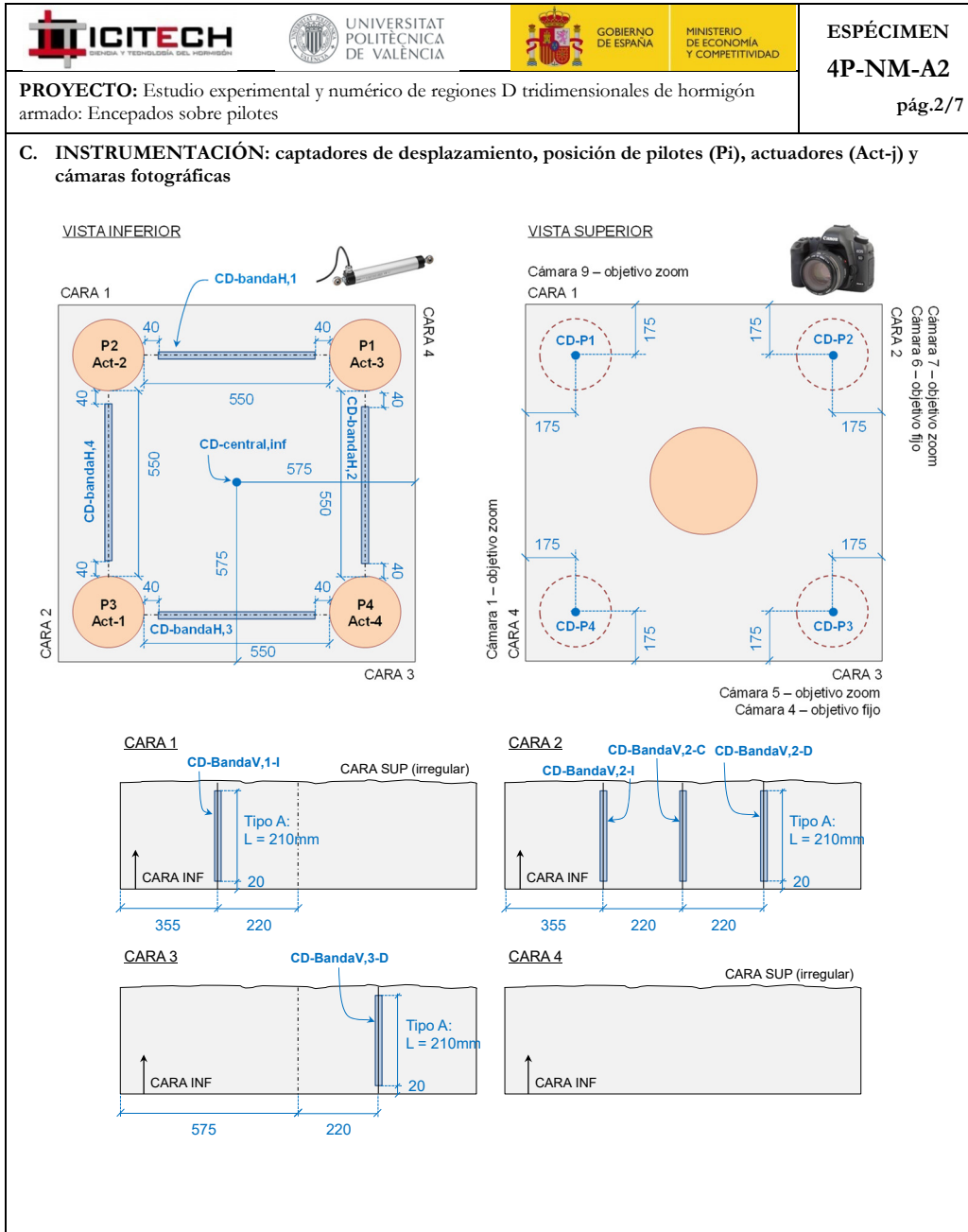
CARA INF – Colapso



CARA INF – Tras desmontaje



| | | | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
|  |  |  |  | <p>ESPÉCIMEN 4P-NM-A2</p> |
| <p>PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes</p> | | | | <p>pág.1/7</p> |
| <p>A. DATOS PRINCIPALES DEL ENSAYO</p> | | | | |
| <p>Fecha horm.: 22/12/2015 Fecha ensayo: 15/02/2016 Edad (días): 55 f_c / f_{ct} (MPa): 27.1/ 3.3</p> | <p>Carga de rotura total y por pilote:</p> | | <p>$\sum R_{max,W}$ (kN): 583.7 $R_{max,W}$ (kN): 196.3 Modo de fallo: F-YBH</p> | |
| <p>Tipo sollicitación: flexión recta Relación entre cargas actuadas res 1.00 Act-2/Act-1: 0.45 Act-3/Act-1: 0.45 Act-4/Act-1:</p> | | | | |
| <p>B. GEOMETRÍA DEL ENCEPADO Y ARMADO</p> | | | | |
| <p>Descripción del armado y su monitorización:</p> | | | | |
| <p>L (mm): 1150 h (mm): 250 e (mm): 800 ϕ (mm): 250 c (mm): 350 $r_{geo,inf}$ (mm): 40</p> | <p>ARMADO BANDA: 2Ø16 + 1Ø12 SEC. HORIZ: 5Ø10 SEC. VERT: - ANCLAJE PILAR: 4Ø16 (Dywidag)</p> <p>NOMENCLATURA GALGAS GA2-id sistema 32 GALGAS</p> |  | | |
| <p>ARMADO Banda: 2Ø16+1Ø12 Sec. horizontal: 5Ø10 Sec. vertical: - Anclaje pilar: 4Ø16 (Dywidag)</p> |  | | | |
| <p>32 GALGAS: GA2-id s/plano</p> | | | | |

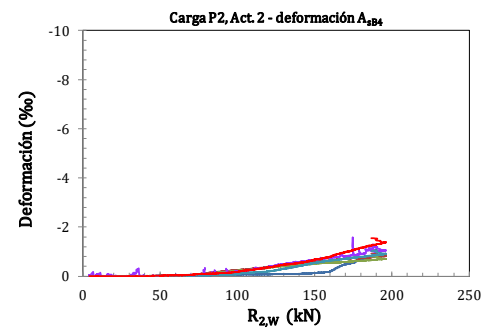
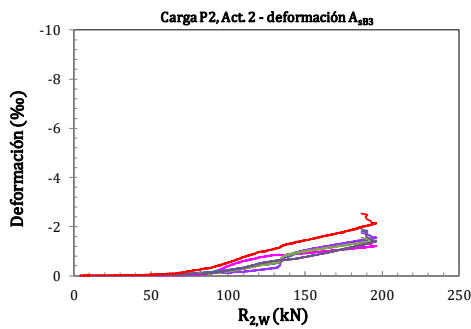
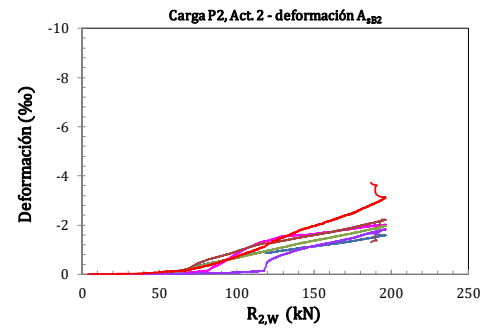
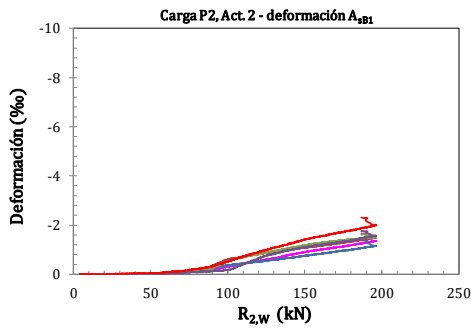
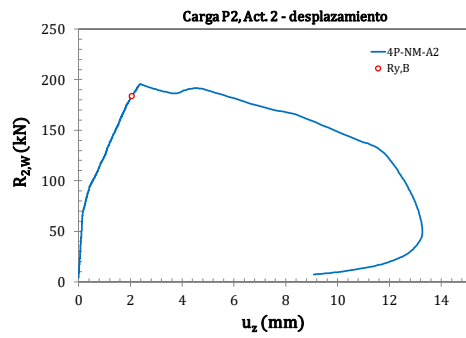
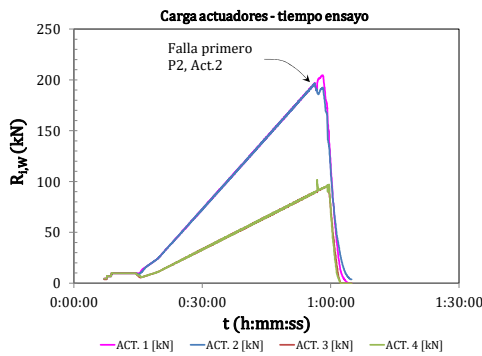


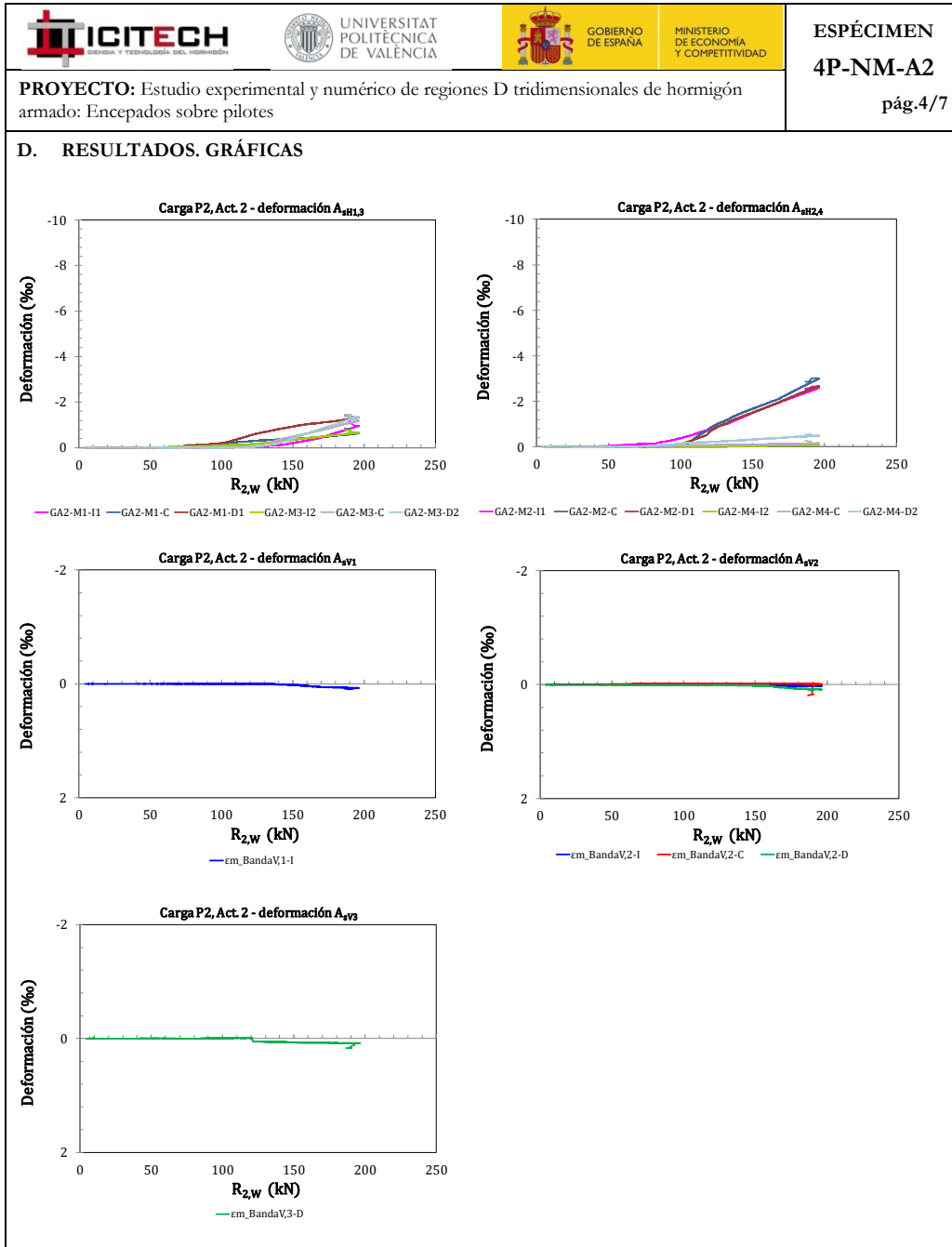


ESPÉCIMEN
4P-NM-A2
pág.3/7

PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encapados sobre pilotes

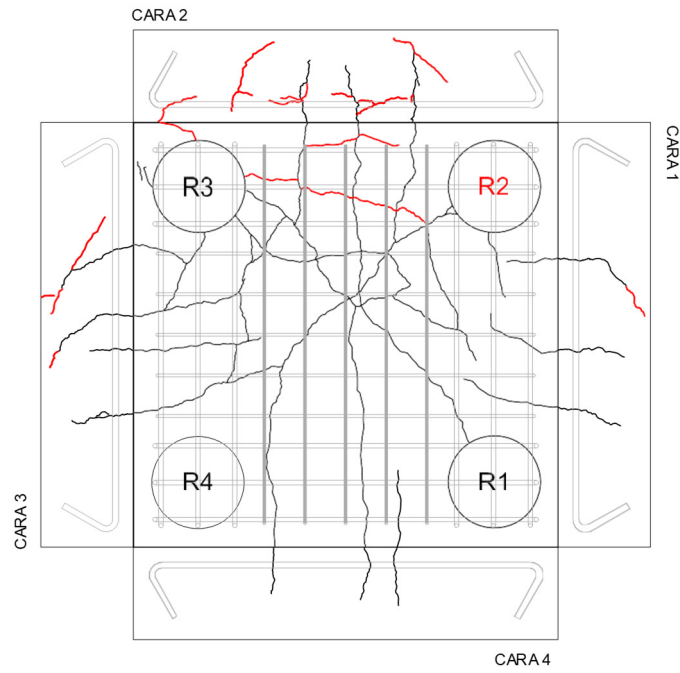
D. RESULTADOS. GRÁFICAS









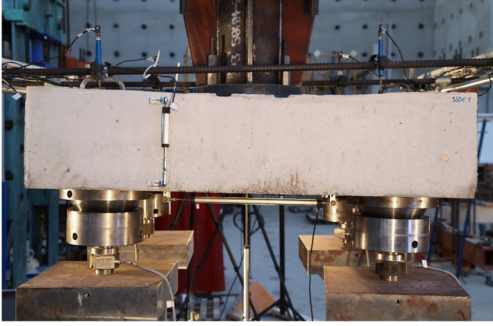
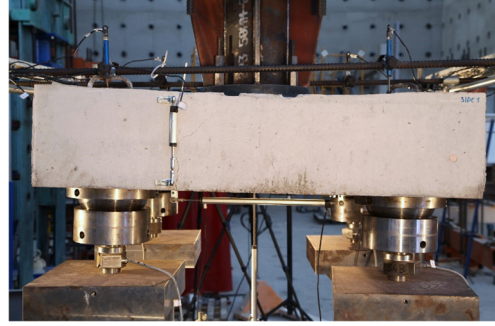
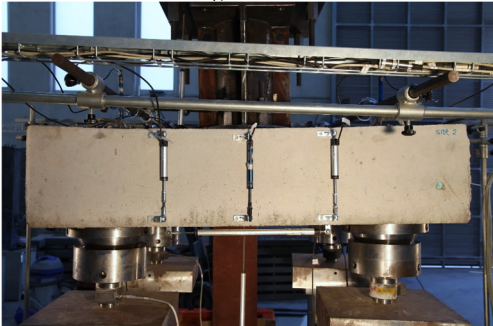
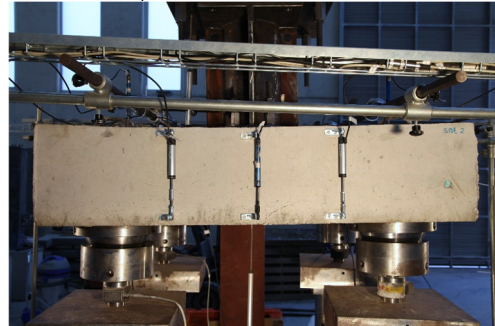
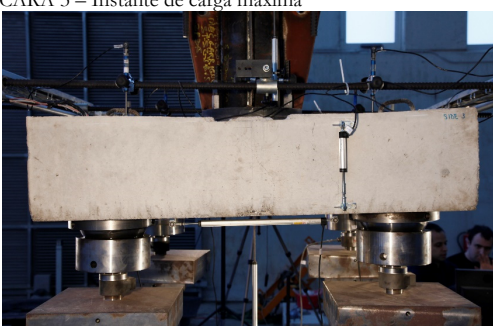
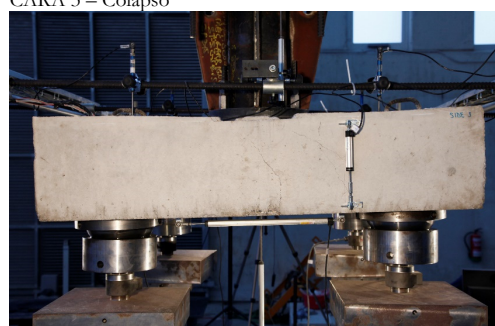
PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

E. RESULTADOS. PATRÓN DE FISURACIÓN



LEYENDA

- carga máxima
- colapso

| | | | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
|  |  <p>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA</p> |  <p>GOBIERNO DE ESPAÑA</p>  <p>MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD</p> | <p>ESPÉCIMEN 4P-NM-A2 pág.6/7</p> |
| <p>PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes</p> | | | |
| <p>F. FOTOS DE LOS ENSAYOS</p> | | | |
| <p>CARA 1 – Instante de carga máxima</p> | | <p>CARA 1 – Colapso</p> | |
|  | |  | |
| <p>CARA 2 – Instante de carga máxima</p> | | <p>CARA 2 – Colapso</p> | |
|  | |  | |
| <p>CARA 3 – Instante de carga máxima</p> | | <p>CARA 3 – Colapso</p> | |
|  | |  | |

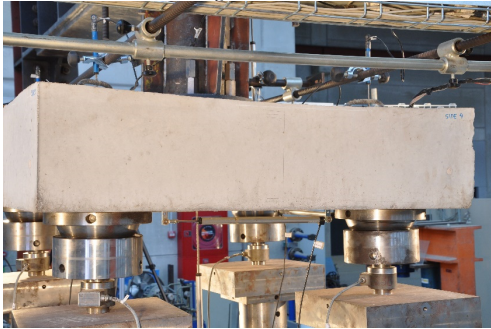


ESPÉCIMEN
4P-NM-A2
pág.7/7

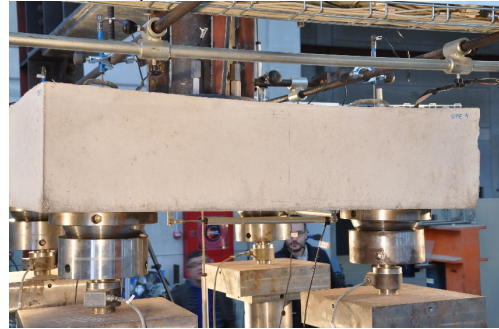
PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

F. FOTOS DE LOS ENSAYOS

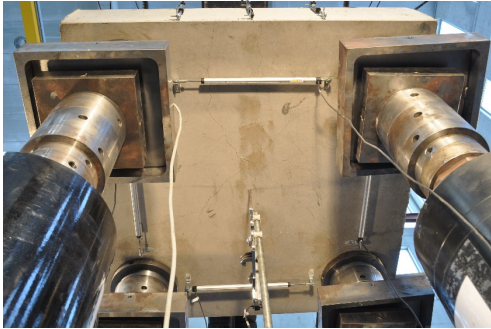
CARA 4 – Instante de carga máxima



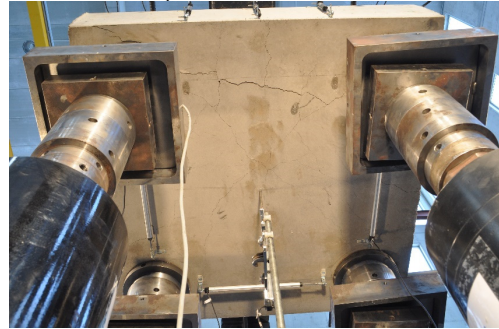
CARA 4 – Colapso



CARA INF – Instante de carga máxima





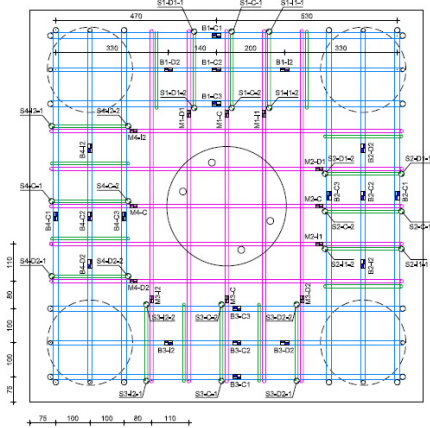
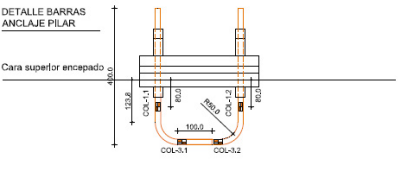
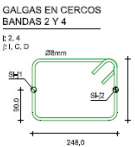
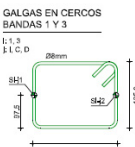


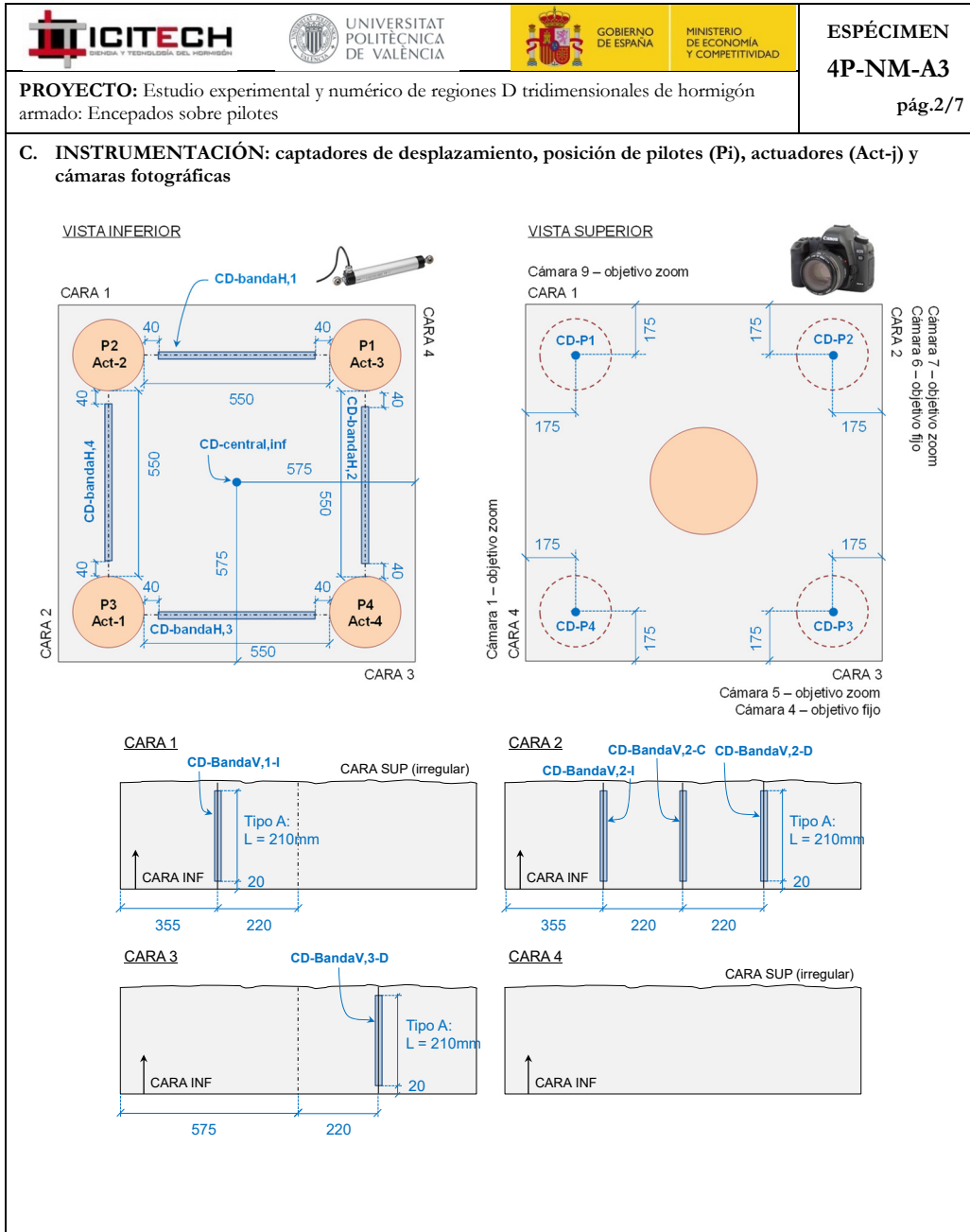
CARA INF – Colapso



CARA INF – Tras desmontaje



| | | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  |  |  |
| PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes | | | ESPÉCIMEN 4P-NM-A3 pág.1/7 |
| A. DATOS PRINCIPALES DEL ENSAYO | | | |
| Fecha horm.: 22/12/2015 Fecha ensayo: 17/02/2016 Edad (días): 57 f_c / f_{ct} (MPa): 30.6/ 3.1 | Carga de rotura total y por pilote: | | |
| Tipo sollicitación: flexión recta Relación entre cargas actuadores Act-2/Act-1: 1.00 Act-3/Act-1: 0.45 Act-4/Act-1: 0.45 | $\Sigma R_{max,W}$ (kN): 788.1 $R_{max,W}$ (kN): 271.1 Modo de fallo: (-)Y _{BHV} | | |
| B. GEOMETRÍA DEL ENCEPADO Y ARMADO | | | |
| Descripción del armado y su monitorización: | | | |
| L (mm): 1150 h (mm): 250 e (mm): 800 ϕ (mm): 250 c (mm): 350 $r_{geo,inf}$ (mm): 40 |  |  | |
| ARMADO Banda: $2\phi 16 + 1\phi 12$ Sec. horizontal: $5\phi 10$ Sec. vertical: $5c\phi 8$ Anclaje pilar: $4\phi 16$ (Dywidag) | ARMADO Banda: $2\phi 16 + 1\phi 12$ Sec. horizontal: $5\phi 10$ Sec. vertical: $5c\phi 8$ Anclaje pilar: $4\phi 16$ (Dywidag) | GALGAS EN CERCOS BANDAS 2 Y 4 L: 2, 4 P: 1, C: D  | |
| 56 GALGAS: GA3-id s/plano | GALGAS EN CERCOS BANDAS 1 Y 3 L: 1, 3 P: 1, C: D  | | |

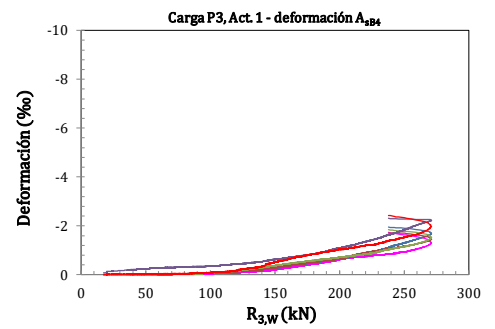
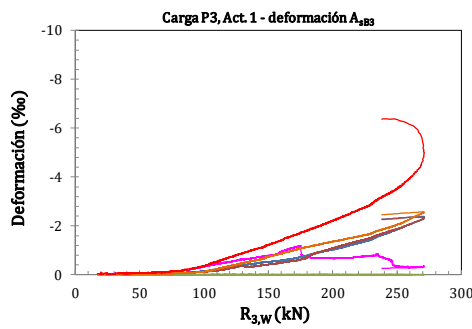
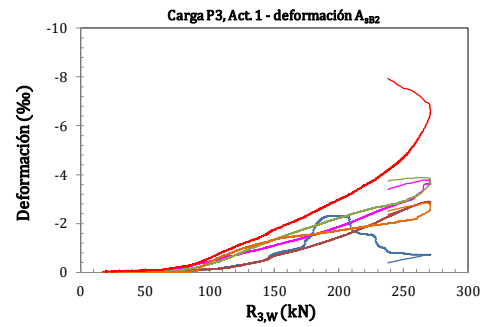
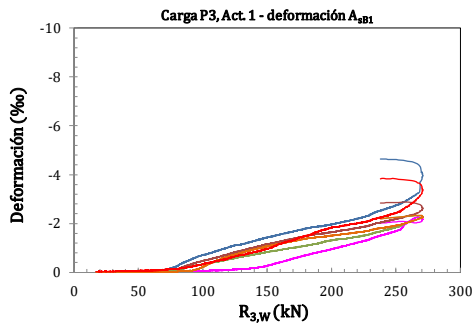
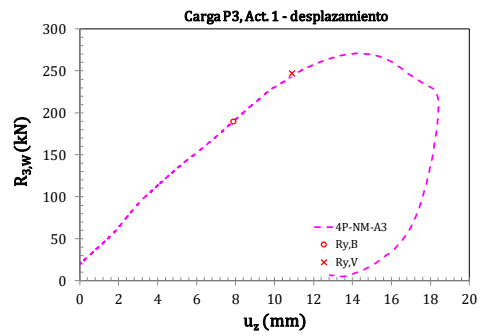
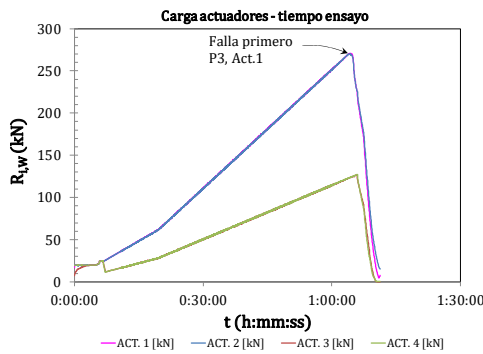


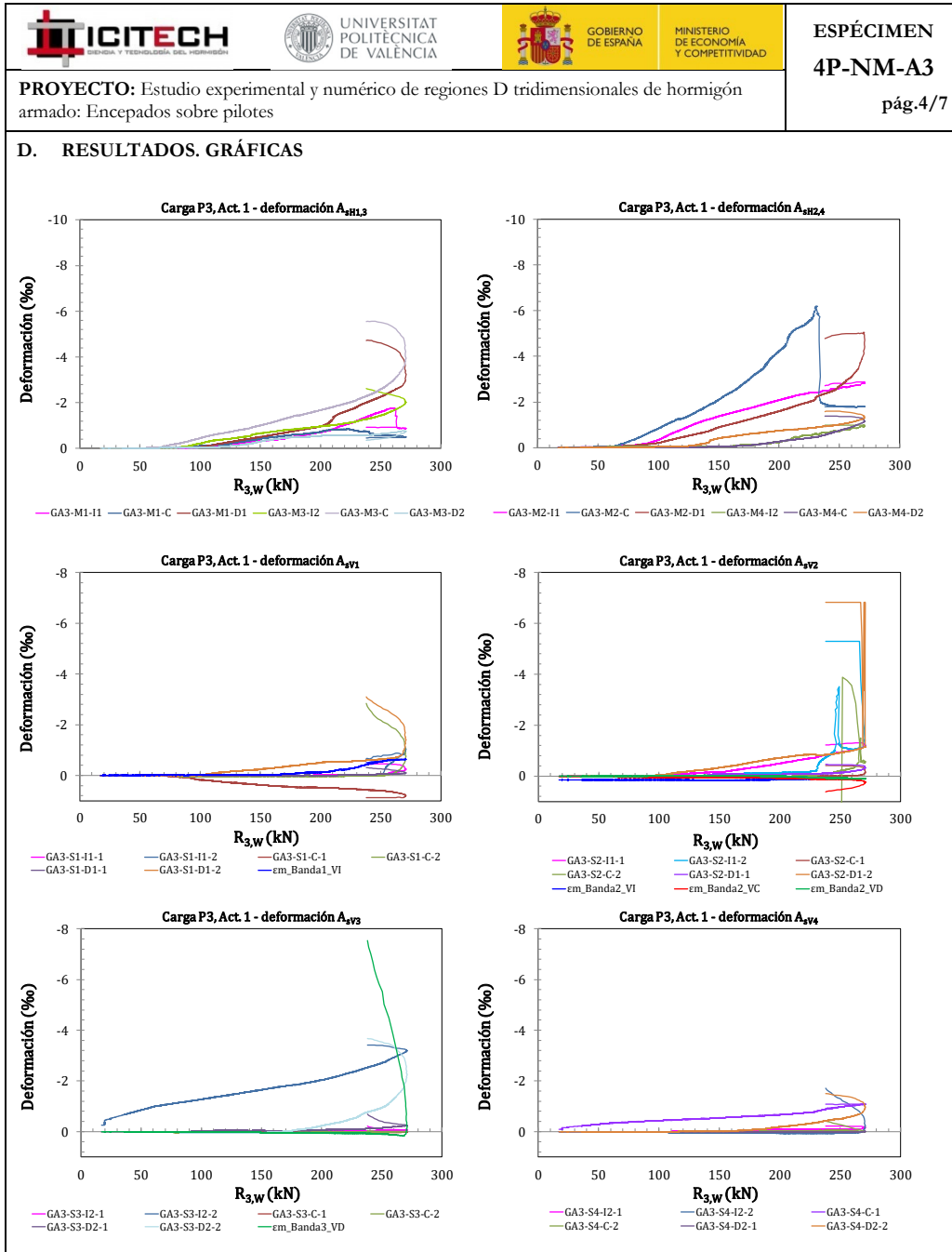


ESPÉCIMEN
4P-NM-A3
pág.3/7

PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

D. RESULTADOS. GRÁFICAS



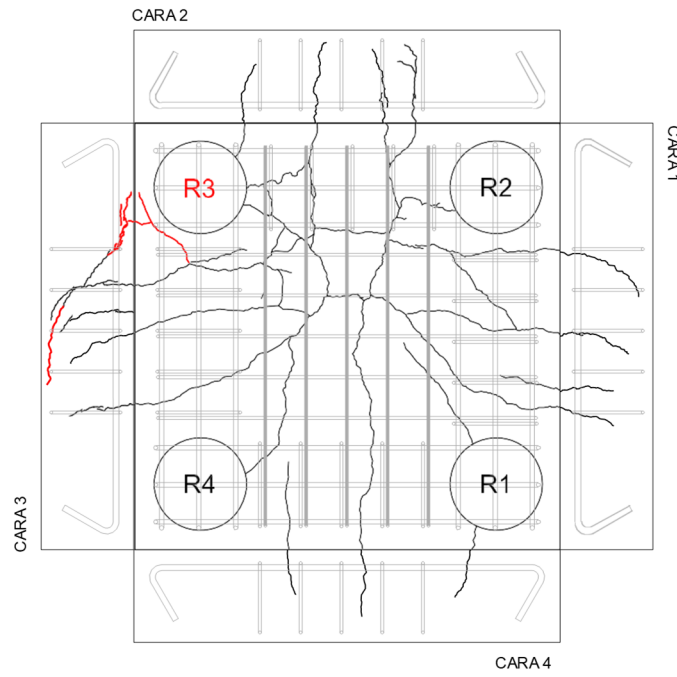






ESPÉCIMEN
4P-NM-A3
pág.5/7

PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

E. RESULTADOS. PATRÓN DE FISURACIÓN



LEYENDA

-  carga máxima
-  colapso

| | | | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
|  |  <p>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA</p> |  <p>GOBIERNO DE ESPAÑA</p>  <p>MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD</p> | <p>ESPÉCIMEN 4P-NM-A3 pág.6/7</p> |
| <p>PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes</p> | | | |
| <p>F. FOTOS DE LOS ENSAYOS</p> | | | |
| <p>CARA 1 – Instante de carga máxima</p> | | <p>CARA 1 – Colapso</p> | |
|  | |  | |
| <p>CARA 2 – Instante de carga máxima</p> | | <p>CARA 2 – Colapso</p> | |
|  | |  | |
| <p>CARA 3 – Instante de carga máxima</p> | | <p>CARA 3 – Colapso</p> | |
|  | |  | |

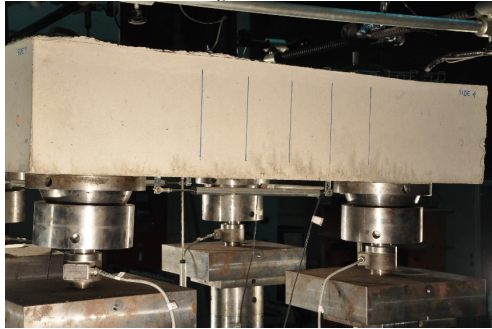


ESPÉCIMEN
4P-NM-A3
pág.7/7

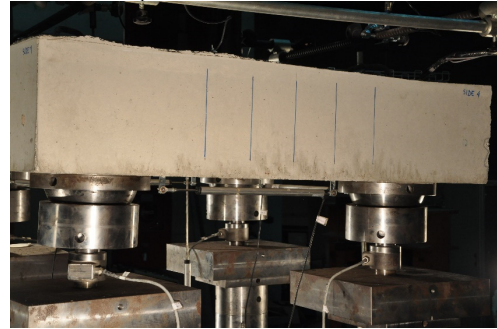
PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

F. FOTOS DE LOS ENSAYOS

CARA 4 – Instante de carga máxima



CARA 4 – Colapso



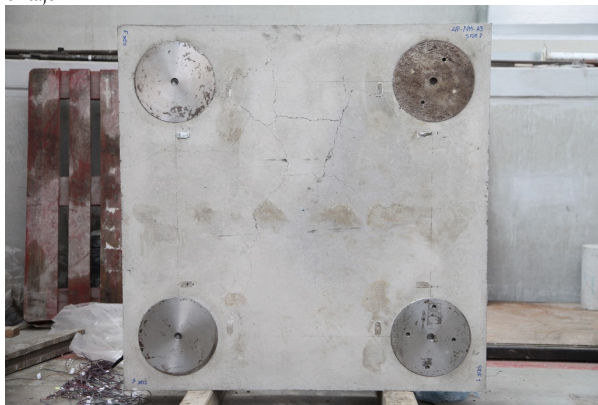
CARA INF – Instante de carga máxima





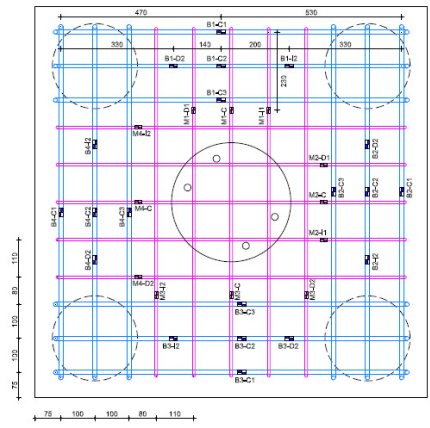
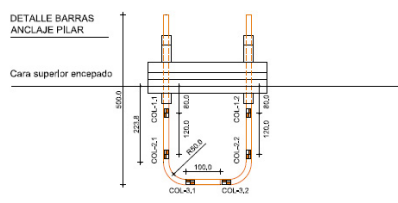


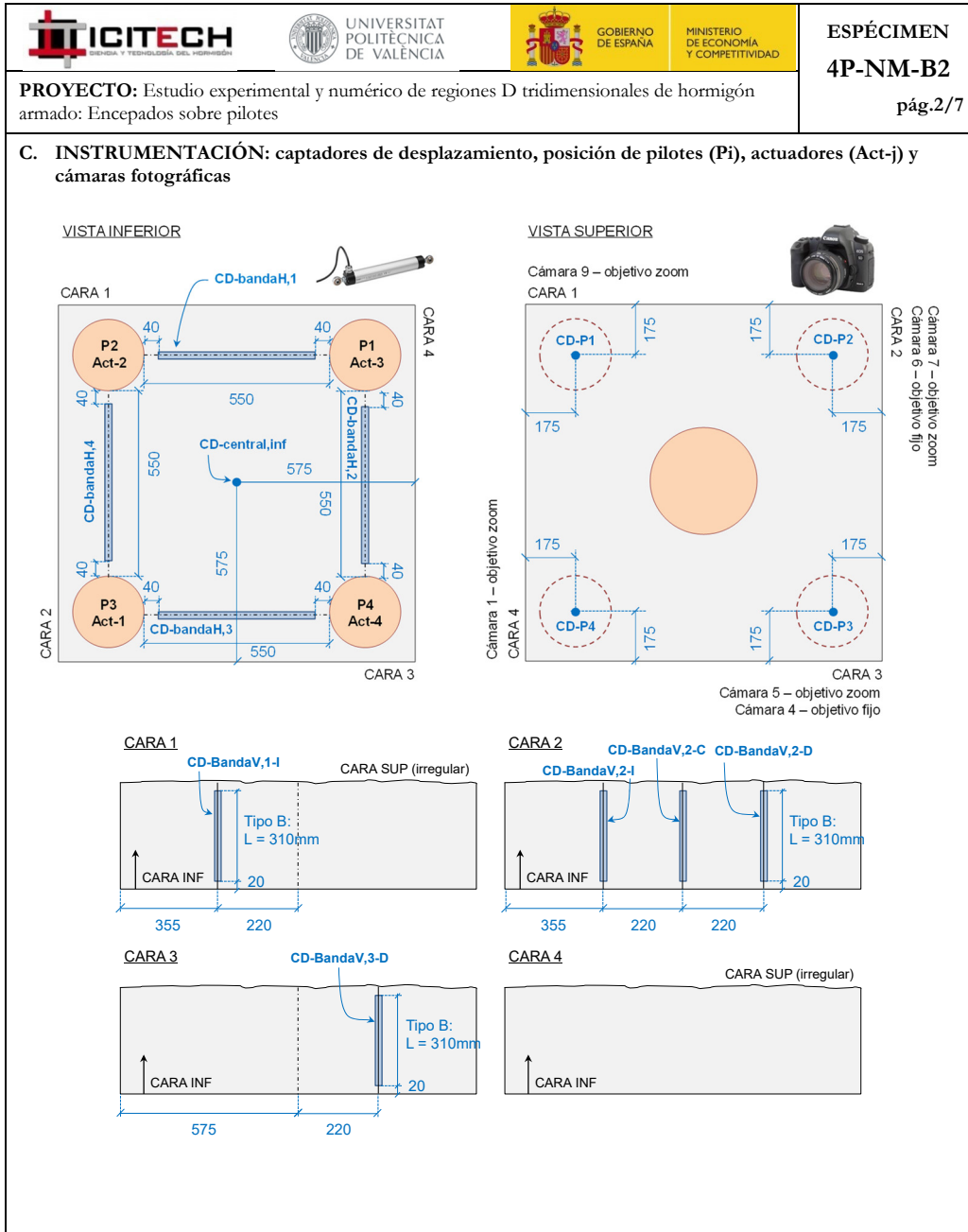
CARA INF – Colapso



CARA INF – Tras desmontaje



| | | | | | | | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
|  |  UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA |  GOBIERNO DE ESPAÑA |  MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD | ESPÉCIMEN 4P-NM-B2 pág.1/7 | | | | |
| PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes | | | | | | | | |
| A. DATOS PRINCIPALES DEL ENSAYO <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%;"> Fecha horm.: 22/12/2015 Fecha ensayo: 23/02/2016 Edad (días): 63 f_c / f_{ct} (MPa): 30.2/ 3.0 </td> <td style="width: 50%;"> Carga de rotura total y por pilote: $\Sigma R_{max,W}$ (kN): 755.3 $R_{max,W}$ (kN): 259.1 Modo de fallo: F-Y_{BH} </td> </tr> <tr> <td colspan="2"> Tipo sollicitación: flexión recta Relación entre cargas actuadores Act-2/Act-1: 1.00 Act-3/Act-1: 0.45 Act-4/Act-1: 0.45 </td> </tr> </table> | | | | | Fecha horm.: 22/12/2015 Fecha ensayo: 23/02/2016 Edad (días): 63 f_c / f_{ct} (MPa): 30.2/ 3.0 | Carga de rotura total y por pilote: $\Sigma R_{max,W}$ (kN): 755.3 $R_{max,W}$ (kN): 259.1 Modo de fallo: F-Y _{BH} | Tipo sollicitación: flexión recta Relación entre cargas actuadores Act-2/Act-1: 1.00 Act-3/Act-1: 0.45 Act-4/Act-1: 0.45 | |
| Fecha horm.: 22/12/2015 Fecha ensayo: 23/02/2016 Edad (días): 63 f_c / f_{ct} (MPa): 30.2/ 3.0 | Carga de rotura total y por pilote: $\Sigma R_{max,W}$ (kN): 755.3 $R_{max,W}$ (kN): 259.1 Modo de fallo: F-Y _{BH} | | | | | | | |
| Tipo sollicitación: flexión recta Relación entre cargas actuadores Act-2/Act-1: 1.00 Act-3/Act-1: 0.45 Act-4/Act-1: 0.45 | | | | | | | | |
| B. GEOMETRÍA DEL ENCEPADO Y ARMADO <p>Descripción del armado y su monitorización:</p> <p>L (mm): 1150 h (mm): 350 e (mm): 800 ϕ (mm): 250 c (mm): 350 $r_{geo,inf}$ (mm): 40</p> <p>ARMADO Banda: 3ϕ12 Sec. horizontal: 5ϕ8 Sec. vertical: - Anclaje pilar: 4ϕ16 (Dywidag)</p> <p>32 GALGAS: GB2-id s/plano</p> <div style="display: flex; align-items: flex-start;"> <div style="margin-right: 20px;"> <p>ARMADO</p> <p>BANDA: 3ϕ12</p> <p>SEC. HORIZ: 5ϕ8</p> </div> <div style="margin-right: 20px;"> <p>NOMENCLATURA GALGAS</p> <p>GB2-id sistema</p> <p>32 GALGAS</p> </div> <div>  </div> </div> <div style="margin-top: 20px;"> <p>DETALLE BARRAS ANCLAJE PILAR</p> <p>Cara superior encepado</p>  </div> | | | | | | | | |

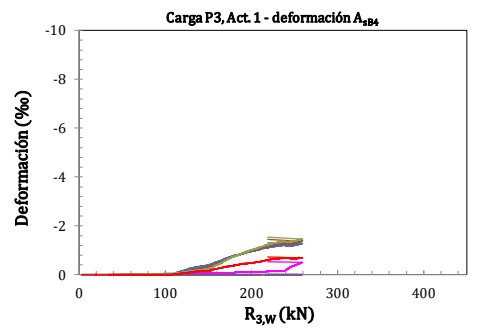
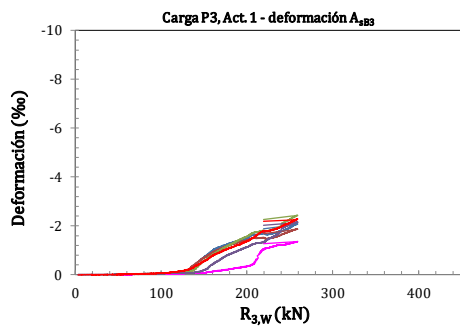
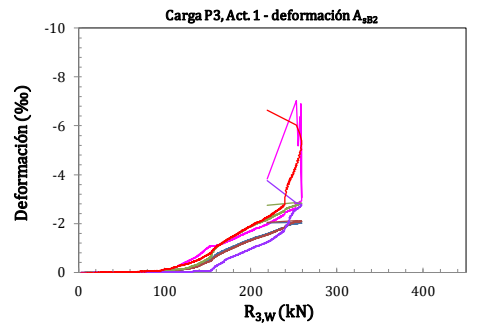
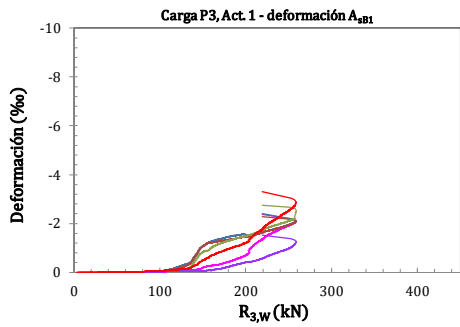
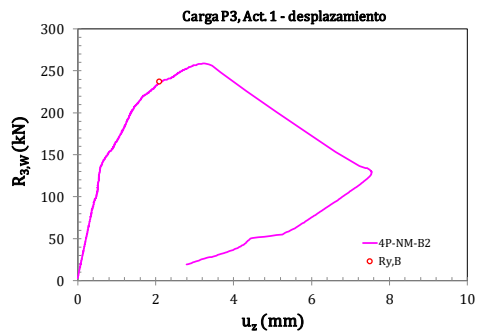
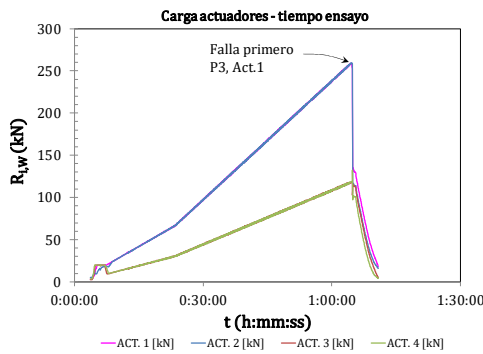


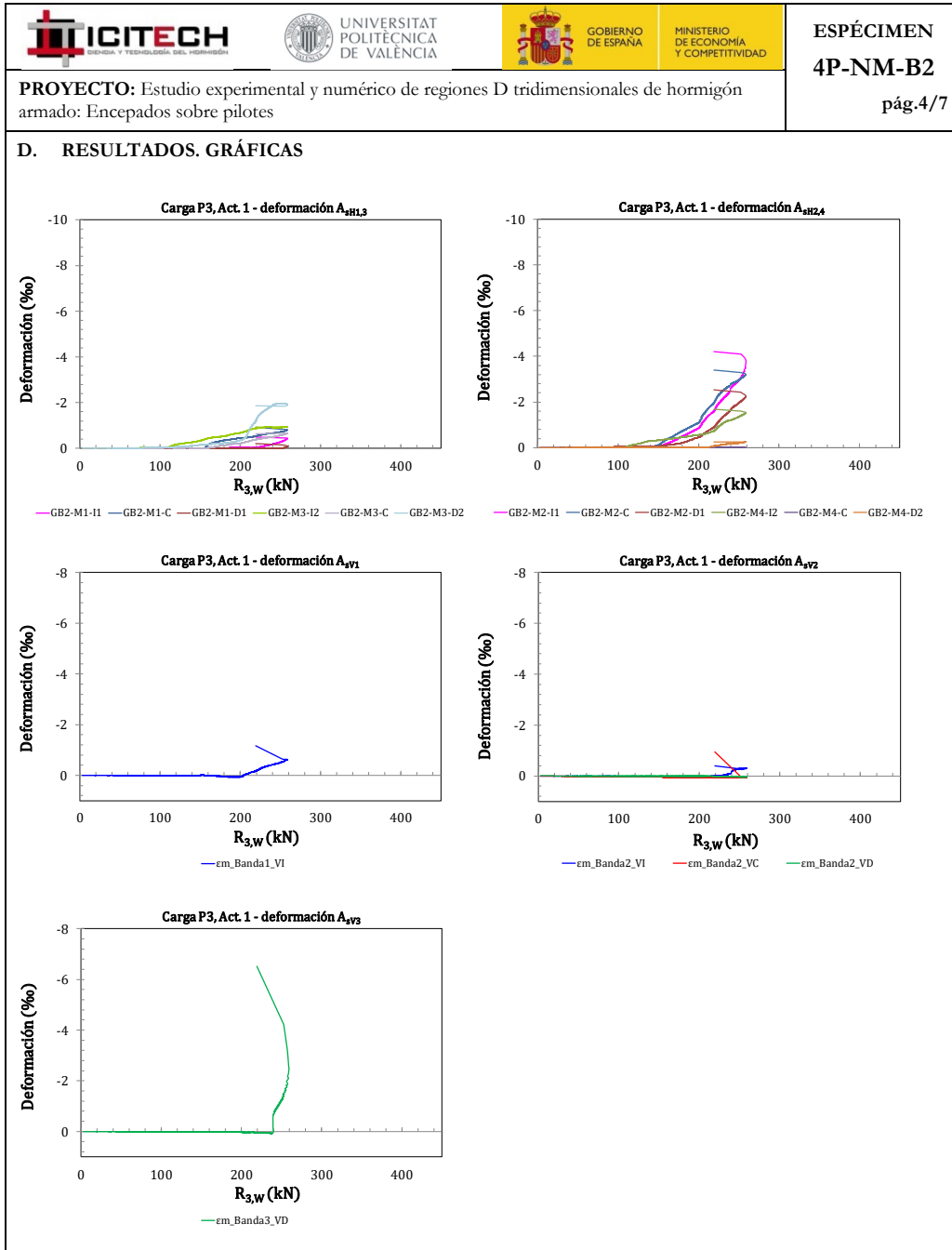


ESPÉCIMEN
4P-NM-B2
pág.3/7

PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

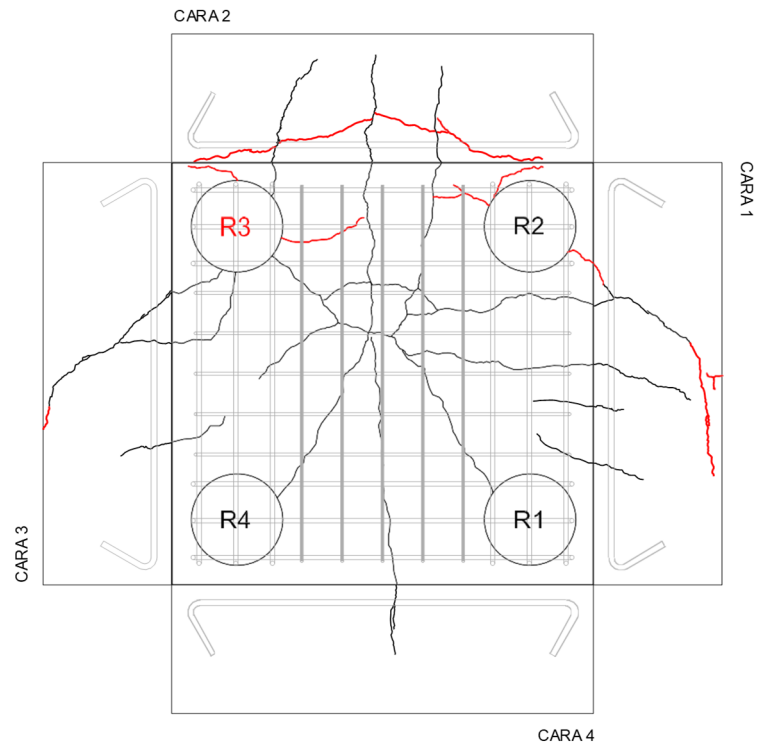
D. RESULTADOS. GRÁFICAS











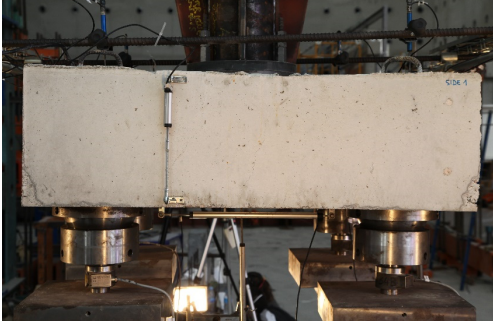
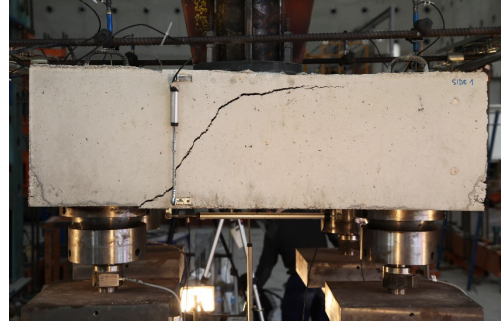

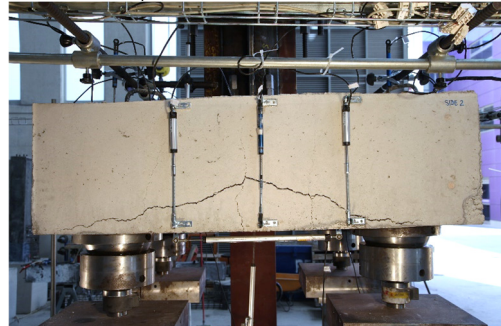
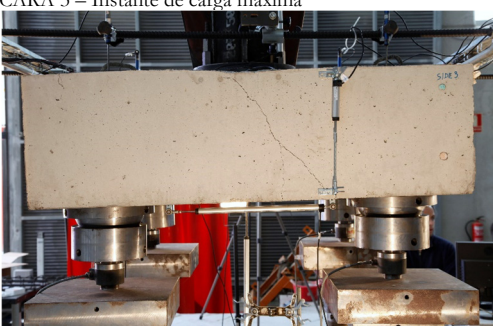
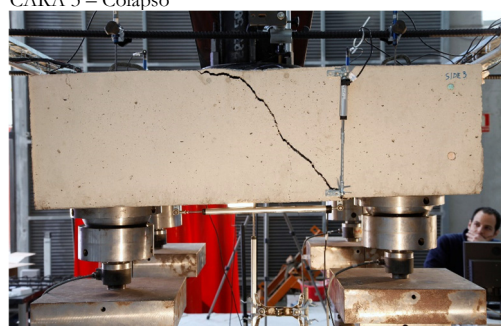
PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

E. RESULTADOS. PATRÓN DE FISURACIÓN



LEYENDA

-  carga máxima
-  colapso

| | | | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
|  |  <p>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA</p> |  <p>GOBIERNO DE ESPAÑA</p>  <p>MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD</p> | <p>ESPÉCIMEN 4P-NM-B2 pág.6/7</p> |
| <p>PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes</p> | | | |
| <p>F. FOTOS DE LOS ENSAYOS</p> | | | |
| <p>CARA 1 – Instante de carga máxima</p> | | <p>CARA 1 – Colapso</p> | |
|  | |  | |
| <p>CARA 2 – Instante de carga máxima</p> | | <p>CARA 2 – Colapso</p> | |
|  | |  | |
| <p>CARA 3 – Instante de carga máxima</p> | | <p>CARA 3 – Colapso</p> | |
|  | |  | |



ESPÉCIMEN
4P-NM-B2
pág.7/7

PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

F. FOTOS DE LOS ENSAYOS

CARA 4 – Instante de carga máxima



CARA 4 – Colapso



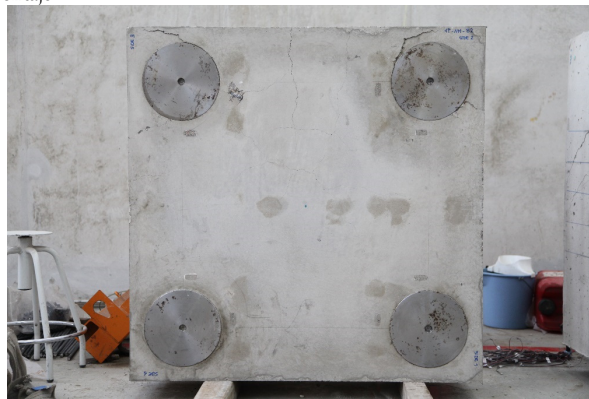
CARA INF – Instante de carga máxima



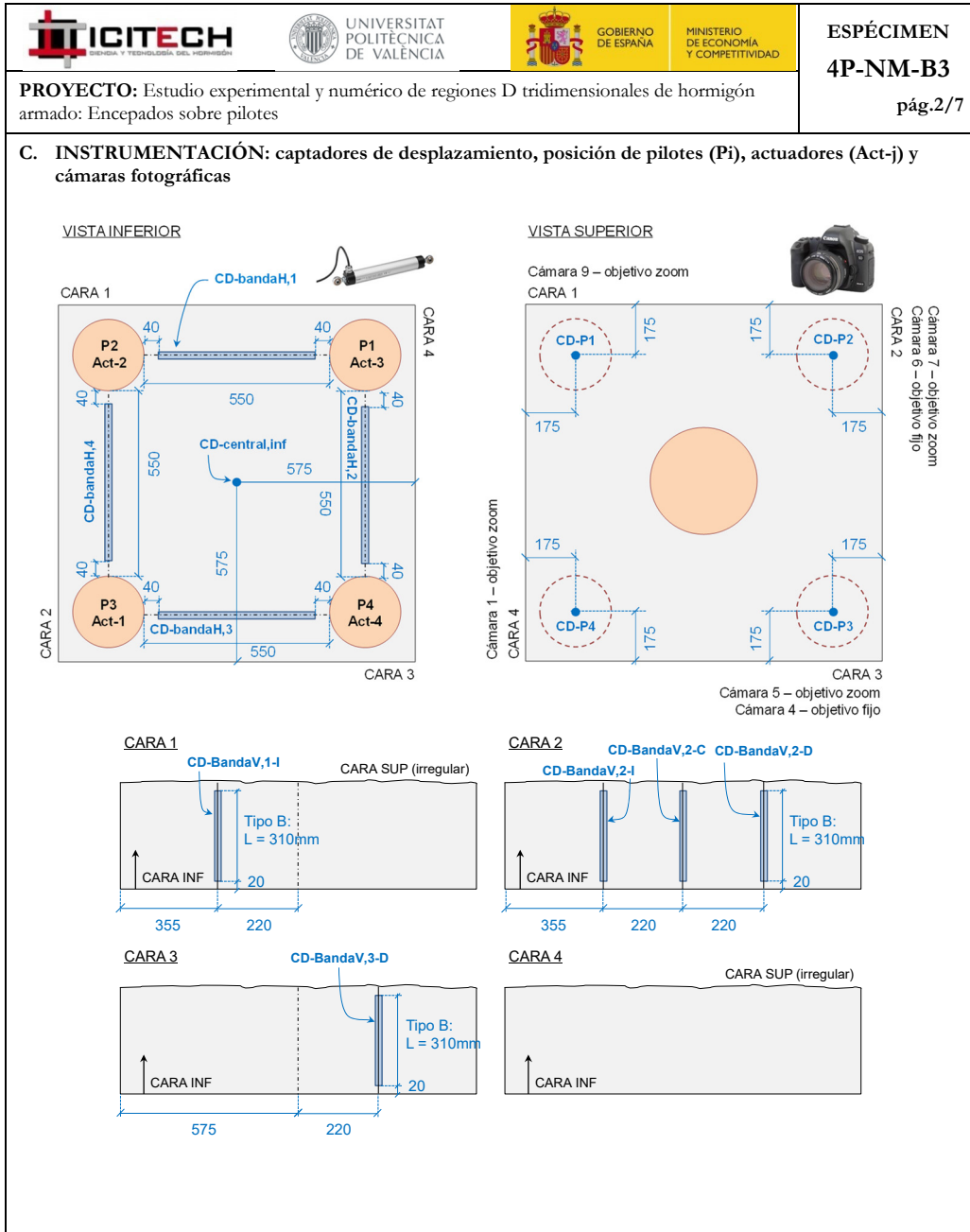
CARA INF – Colapso



CARA INF – Tras desmontaje



| | | | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| | | | | <p>ESPÉCIMEN 4P-NM-B3</p> |
| <p>PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes</p> | | | | <p>pág.1/7</p> |
| <p>A. DATOS PRINCIPALES DEL ENSAYO</p> | | | | |
| <p>Fecha horm.: 04/02/2016 Fecha ensayo: 25/02/2016 Edad (días): 21 f_c / f_{ct} (MPa): 28.1/ 3.0</p> | <p>Carga de rotura total y por pilote:</p> | | <p>$\sum R_{max,W}$ (kN): 821.1 $R_{max,W}$ (kN): 279.3 Modo de fallo: D-Y_{BHV}</p> | |
| <p>Tipo sollicitación: flexión recta Relación entre cargas actuadas res 1.00 Act-2/Act-1: 0.45 Act-3/Act-1: 0.45 Act-4/Act-1:</p> | | | | |
| <p>B. GEOMETRÍA DEL ENCEPADO Y ARMADO</p> | | | | |
| <p>Descripción del armado y su monitorización:</p> | | | | |
| <p>L (mm): 1150 h (mm): 350 e (mm): 800 ϕ (mm): 250 c (mm): 350 $\tau_{geo,inf}$ (mm): 40</p> | <p>ARMADO BANDA: S312 SEC. HORIZ: S38 SEC. VERTICAL: S628</p> | <p>NOMENCLATURA GALGAS GB3- s/ plano</p> | | <p>GALGAS EN CERCOS BANDAS 2 Y 4 I: 2, 4 I: I, C, D 28mm</p> |
| <p>ARMADO</p> | <p>Banda: 3ϕ12 Sec. horizontal: 5ϕ8 Sec. vertical: 5cϕ8 Anclaje pilar: 4ϕ16 (Dywidag)</p> | | | |
| <p>56 GALGAS: GB3-id s/ plano</p> | | | | |
| <p>DETALLE BARRAS ANCLAJE PILAR Cara superior encapado</p> | | | | |



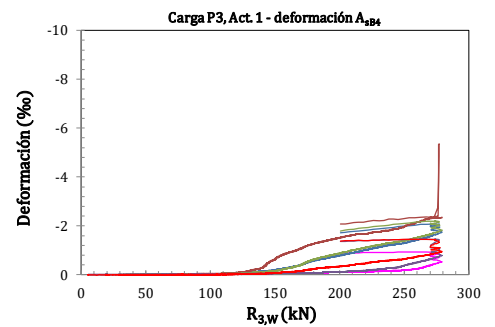
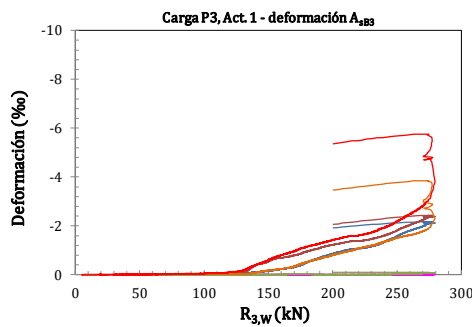
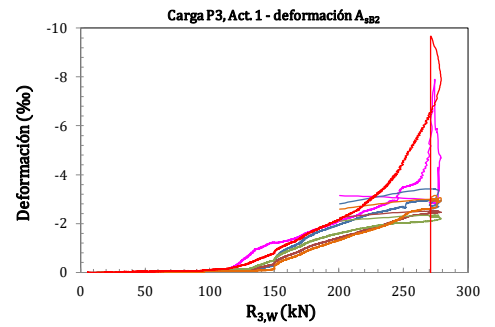
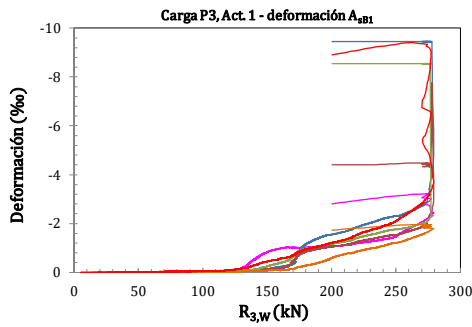
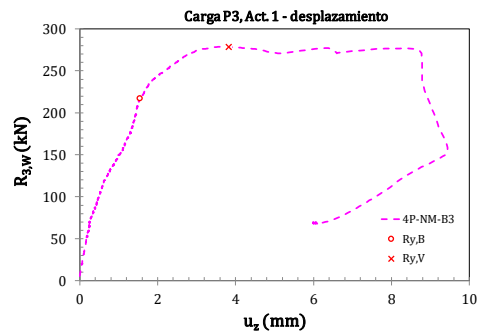
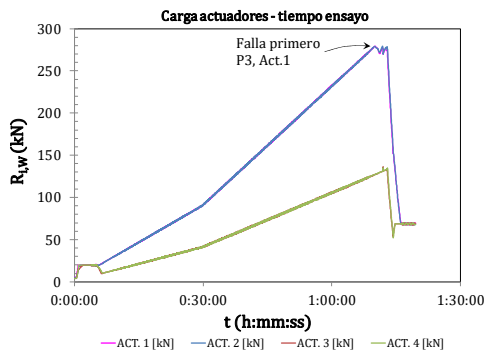


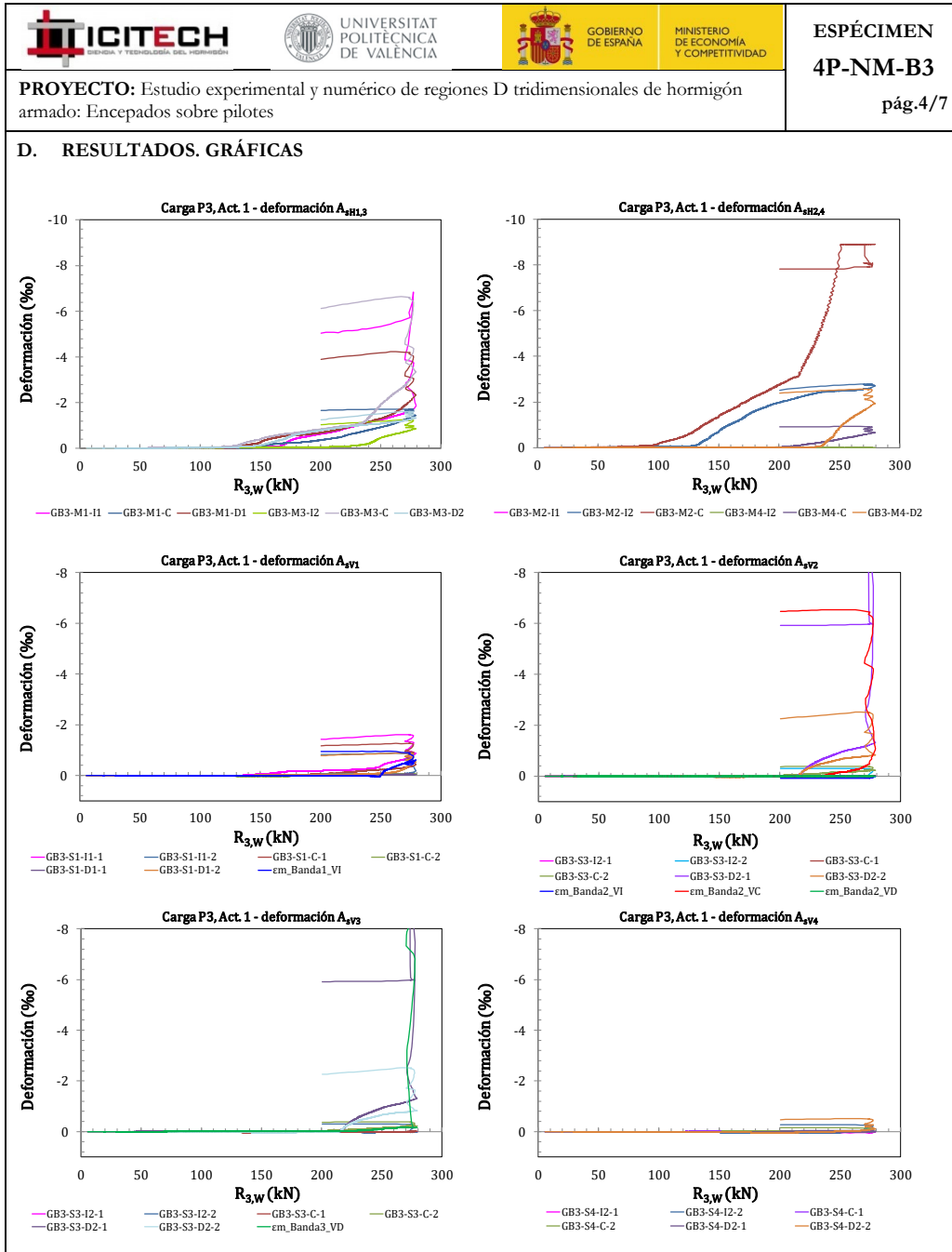
ESPÉCIMEN
4P-NM-B3

pág.3/7

PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

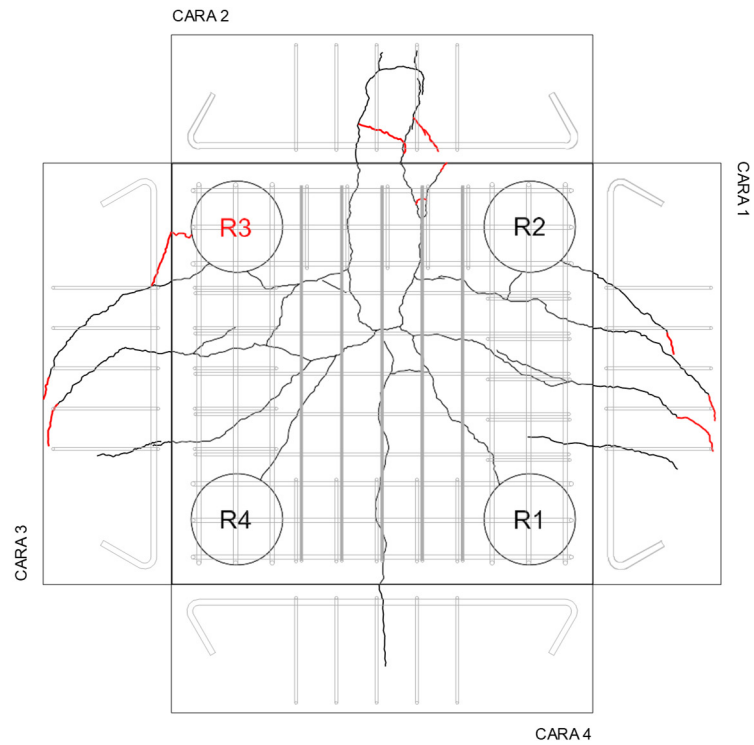
D. RESULTADOS. GRÁFICAS









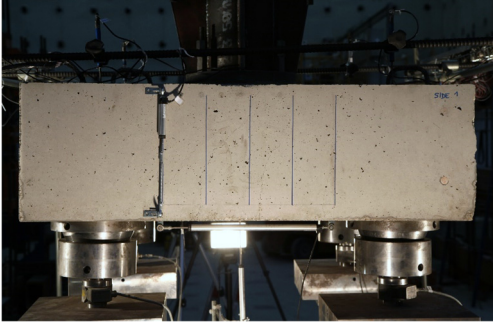
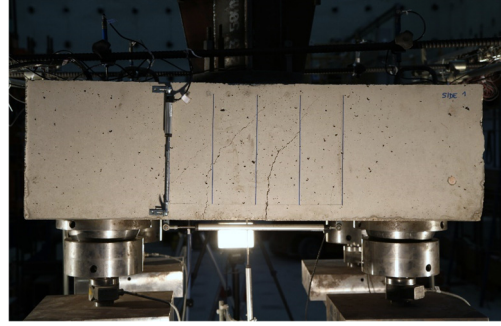
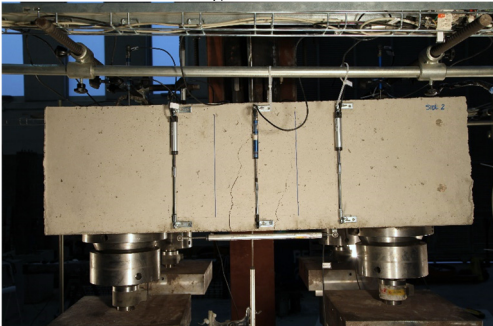
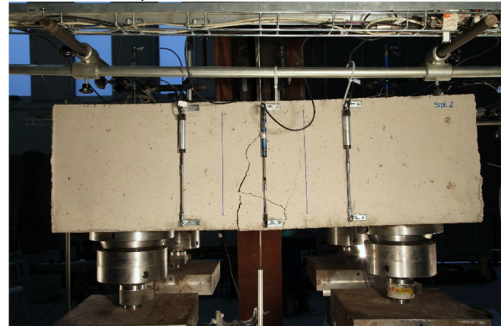
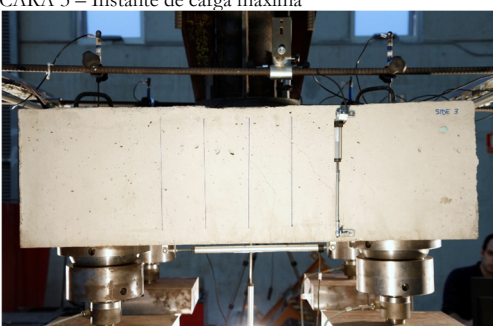
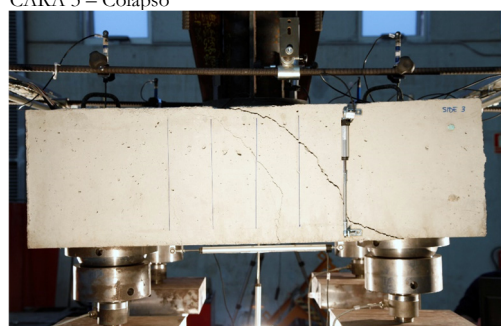
PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

E. RESULTADOS. PATRÓN DE FISURACIÓN



LEYENDA

- carga máxima
- colapso

| | | | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
|  |  <p>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA</p> |  <p>GOBIERNO DE ESPAÑA</p>  <p>MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD</p> | <p>ESPÉCIMEN 4P-NM-B3 pág.6/7</p> |
| <p>PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes</p> | | | |
| <p>F. FOTOS DE LOS ENSAYOS</p> | | | |
| <p>CARA 1 – Instante de carga máxima</p> | | <p>CARA 1 – Colapso</p> | |
|  | |  | |
| <p>CARA 2 – Instante de carga máxima</p> | | <p>CARA 2 – Colapso</p> | |
|  | |  | |
| <p>CARA 3 – Instante de carga máxima</p> | | <p>CARA 3 – Colapso</p> | |
|  | |  | |

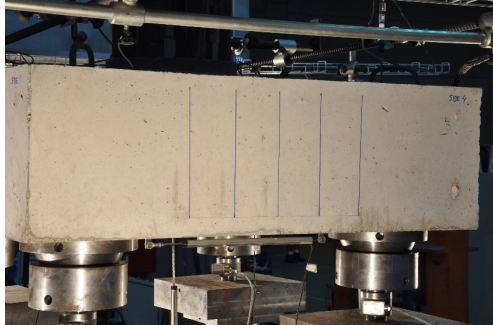


ESPÉCIMEN
4P-NM-B3
pág.7/7

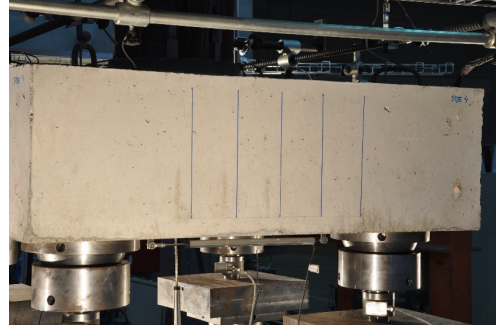
PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

F. FOTOS DE LOS ENSAYOS

CARA 4 – Instante de carga máxima



CARA 4 – Colapso



CARA INF – Instante de carga máxima



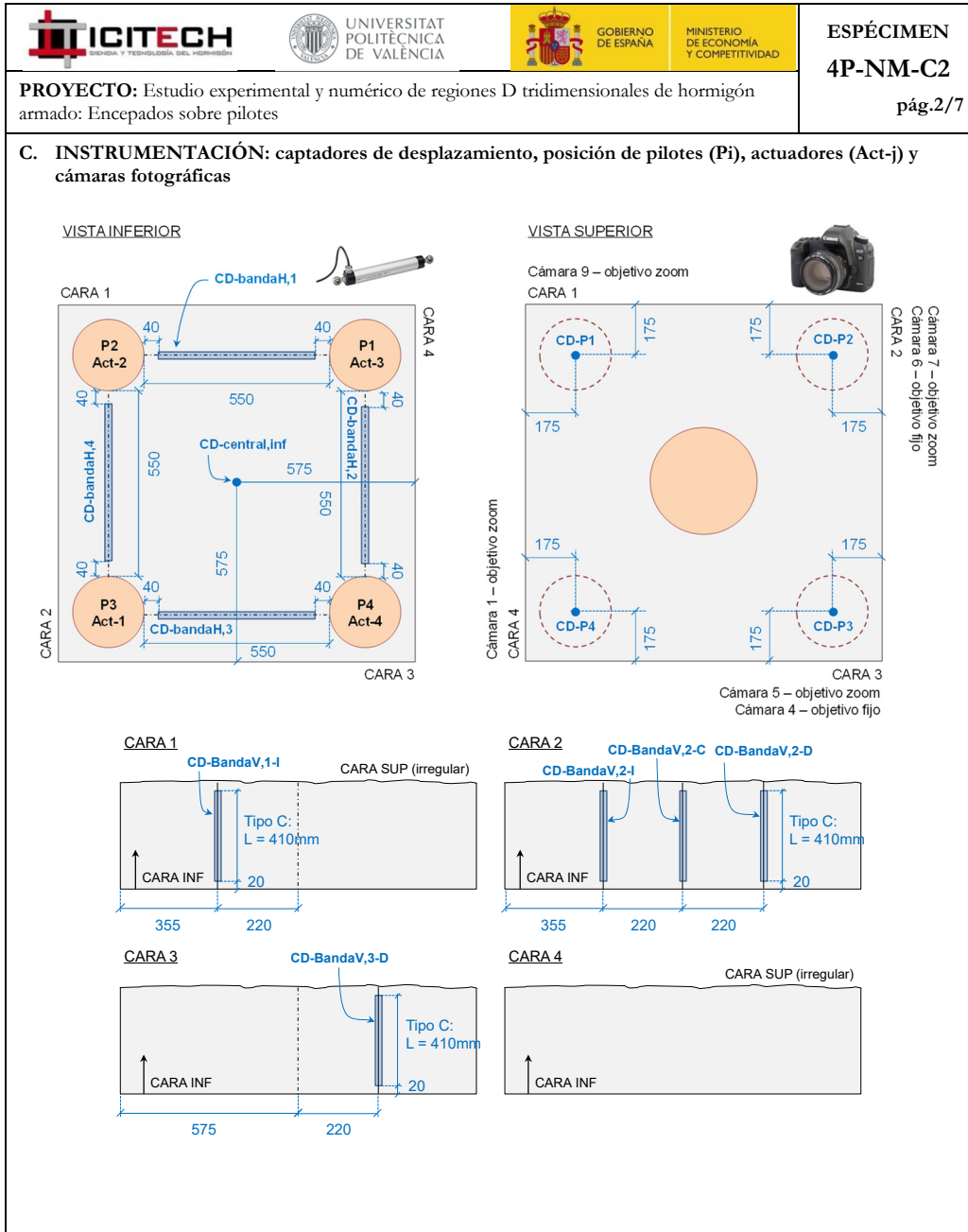
CARA INF – Colapso



CARA INF – Tras desmontaje



| | | | | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-------------------------------------|--|
| | | | | ESPÉCIMEN 4P-NM-C2 | |
| PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes | | | | <p>pág.1/7</p> | |
| A. DATOS PRINCIPALES DEL ENSAYO | | | | | |
| Fecha horm.: 04/02/2016 Fecha ensayo: 01/03/2016 Edad (días): 26 f_c / f_{ct} (MPa): 27.9/ 2.8 | Carga de rotura total y por pilote: | $\sum R_{max,W}$ (kN): 915.7 $R_{max,W}$ (kN): 314.5 Modo de fallo: F-YBH | | | |
| Tipo sollicitación: flexión recta Relación entre cargas actuadas res 1.00 Act-2/Act-1: 0.45 Act-3/Act-1: 0.45 Act-4/Act-1: | | | | | |
| B. GEOMETRÍA DEL ENCEPADO Y ARMADO | | | | | |
| Descripción del armado y su monitorización: | | | | | |
| L (mm): 1150 h (mm): 450 e (mm): 800 ϕ (mm): 250 c (mm): 350 $r_{geo,inf}$ (mm): 40 | ARMADO BANDA: 1212 + 2210 SEC. HORIZ: S29 | | NOMENCLATURA GALGAS GC2 - H s/plano 32 GALGAS | | |
| ARMADO | Banda: 1 ϕ 12+2 ϕ 10 Sec. horizontal: 5 ϕ 8 Sec. vertical: - Anclaje pilar: 4 ϕ 16 (Dywidag) | DETALLE BARRAS ANCLAJE PILAR Cara superior encepado | | | |
| 32 GALGAS: GC2-id s/plano | | | | | |



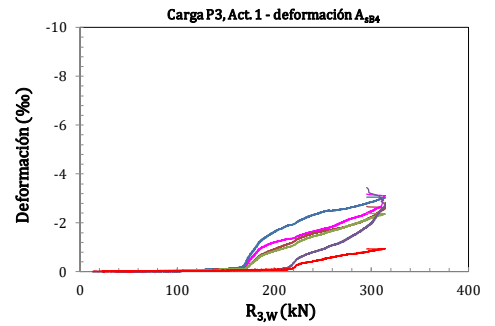
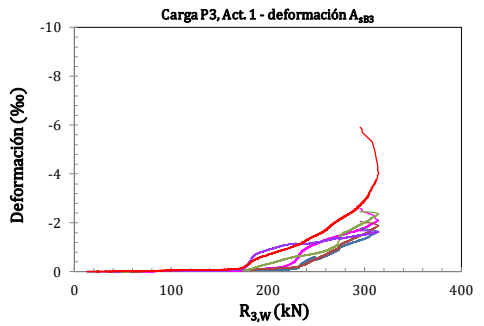
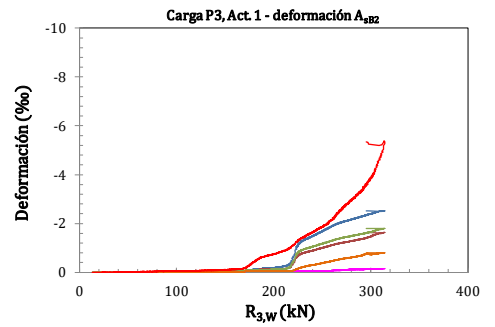
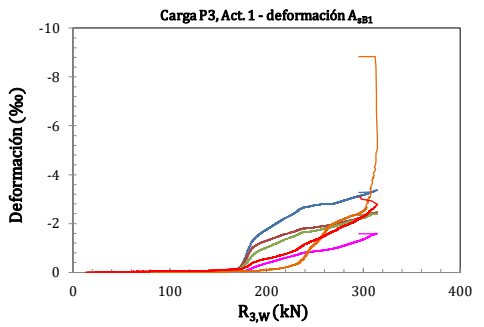
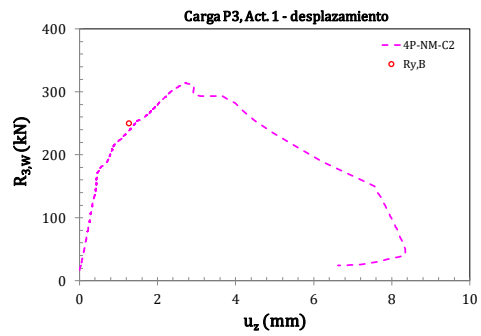
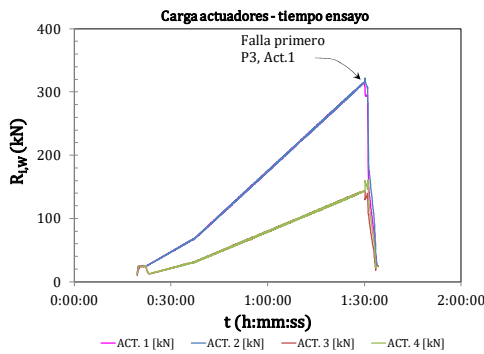


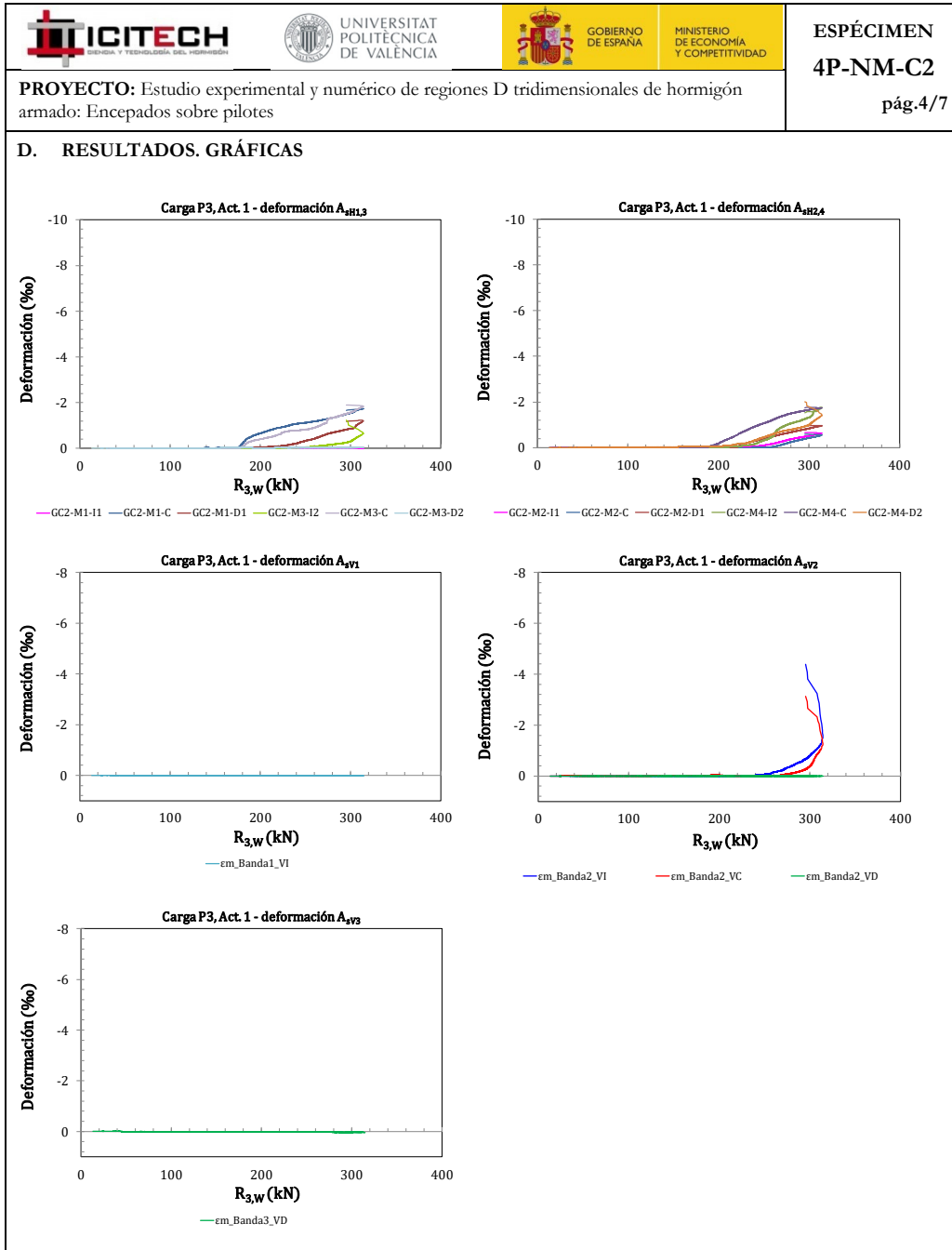
ESPÉCIMEN
4P-NM-C2

pág.3/7

PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

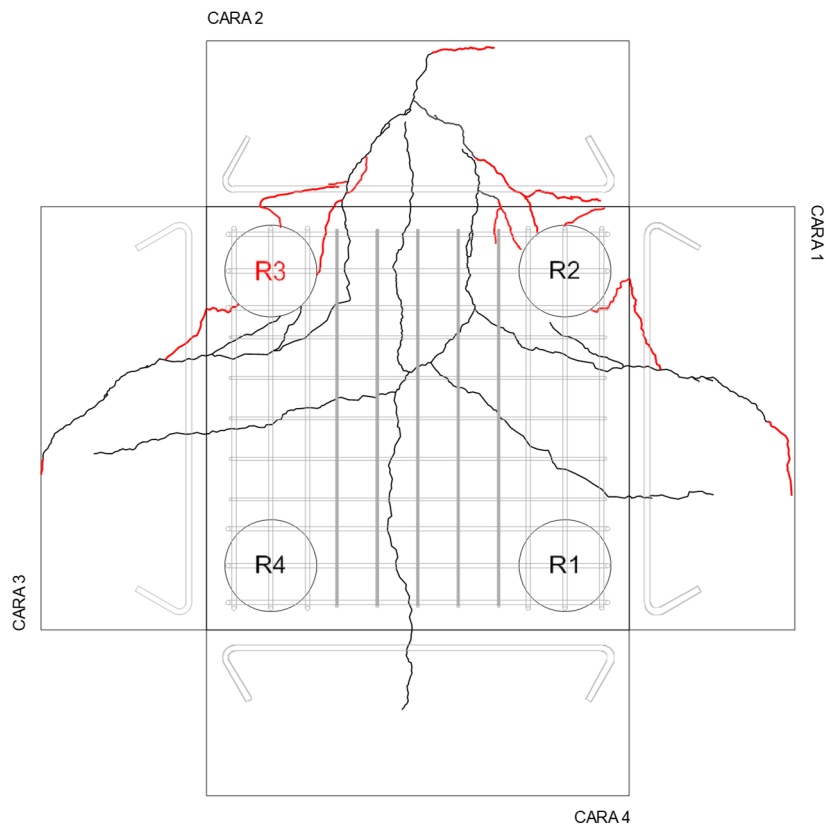
D. RESULTADOS. GRÁFICAS









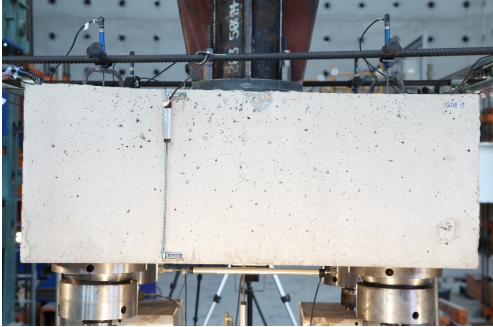
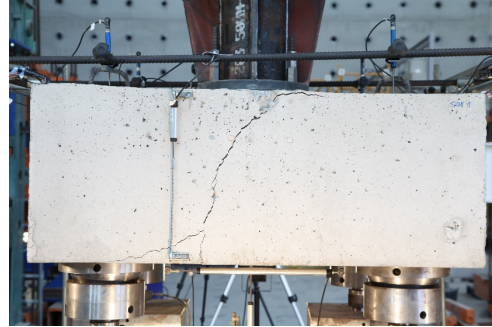

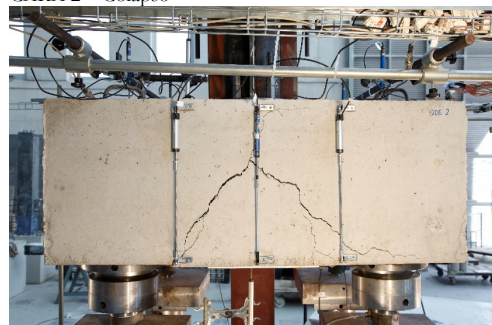

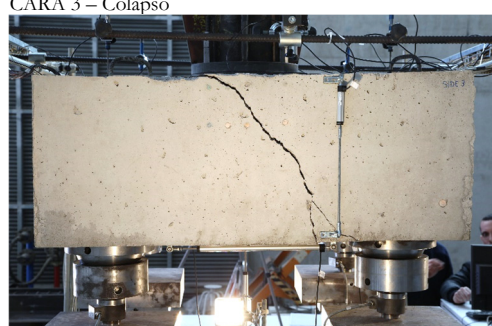
PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

F. RESULTADOS. PATRÓN DE FISURACIÓN



LEYENDA

- carga máxima
- colapso

| | | | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
|  |  <p>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA</p> |  <p>GOBIERNO DE ESPAÑA</p>  <p>MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD</p> | <p>ESPÉCIMEN 4P-NM-C2 pág.6/7</p> |
| <p>PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes</p> | | | |
| <p>F. FOTOS DE LOS ENSAYOS</p> | | | |
| <p>CARA 1 – Instante de carga máxima</p> | | <p>CARA 1 – Colapso</p> | |
|  | |  | |
| <p>CARA 2 – Instante de carga máxima</p> | | <p>CARA 2 – Colapso</p> | |
|  | |  | |
| <p>CARA 3 – Instante de carga máxima</p> | | <p>CARA 3 – Colapso</p> | |
|  | |  | |



ESPÉCIMEN
4P-NM-C2
pág.7/7

PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

F. FOTOS DE LOS ENSAYOS

CARA 4 – Instante de carga máxima



CARA 4 – Colapso



CARA INF – Instante de carga máxima



CARA INF – Colapso



CARA INF – Tras desmontaje





GOBIERNO DE ESPAÑA

MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD

ESPÉCIMEN
4P-NM-C3

pág.1/7

PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

A. DATOS PRINCIPALES DEL ENSAYO

Fecha horm.: 04/02/2016
 Fecha ensayo: 03/03/2016
 Edad (días): 28
 f_c / f_{ct} (MPa): 28.8/ 2.7

Tipo sollicitación: flexión recta
 Relación entre cargas actuadas res 1.00
 Act-2/Act-1: 0.45
 Act-3/Act-1: 0.45
 Act-4/Act-1:

Carga de rotura total
y por pilote:

$\sum R_{max,W}$ (kN): 1004.1
 $R_{max,W}$ (kN): 342.8
 Modo de fallo: D-Y_{BHV}

B. GEOMETRÍA DEL ENCEPADO Y ARMADO

Descripción del armado y su monitorización:

L (mm): 1150
 h (mm): 450
 e (mm): 800
 ϕ (mm): 250
 c (mm): 350
 $r_{geo,inf}$ (mm): 40

ARMADO

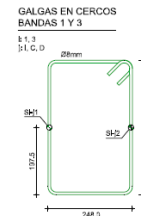
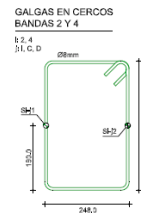
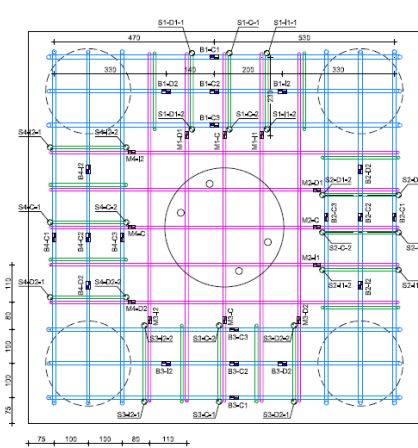
Banda:
 1 ϕ 12+2 ϕ 10
 Sec. horizontal:
 5 ϕ 8
 Sec. vertical:
 5c ϕ 8
 Anclaje pilar:
 4 ϕ 16 (Dywidag)

56 GALGAS:
 GC3-id s/plano

ARMADO
 BANDA:
 1 ϕ 12 + 2 ϕ 10
 SEC. HORIZ:
 5 ϕ 8
 SEC. VERTICAL:
 5c ϕ 8

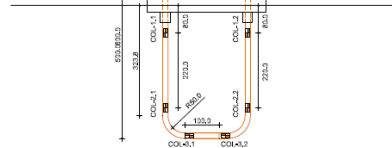
NOMENCLATURA
 GALGAS
 GC3 - id al plano

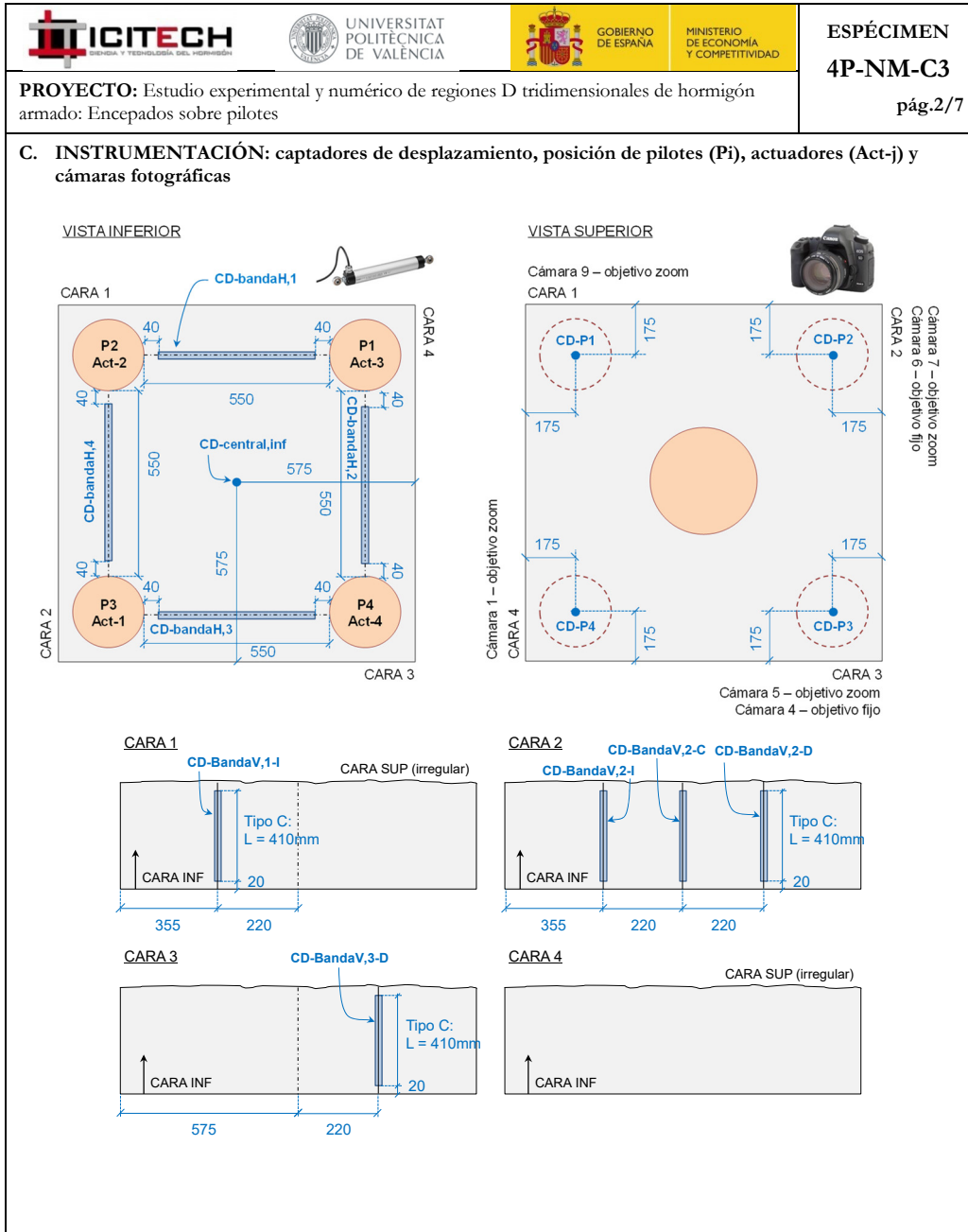
56 GALGAS



DETALLE BARRAS ANCLAJE PILAR

Cara superior encepado



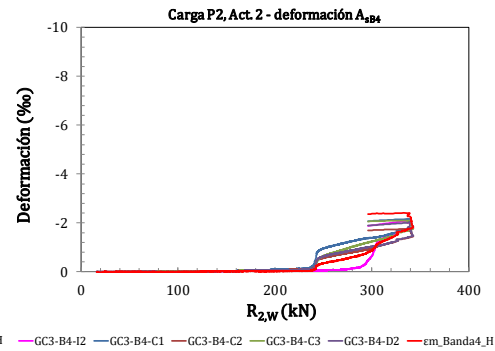
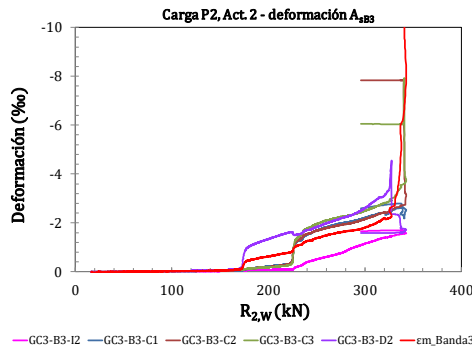
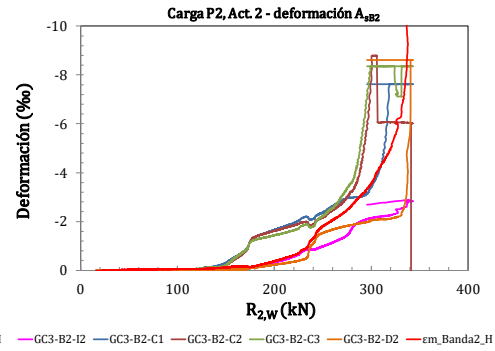
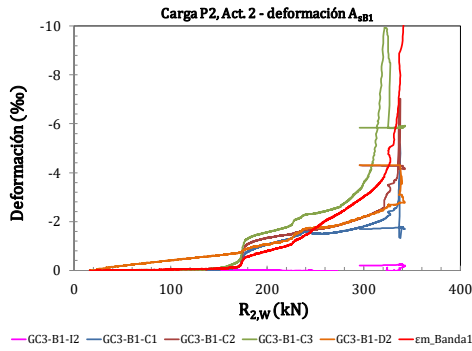
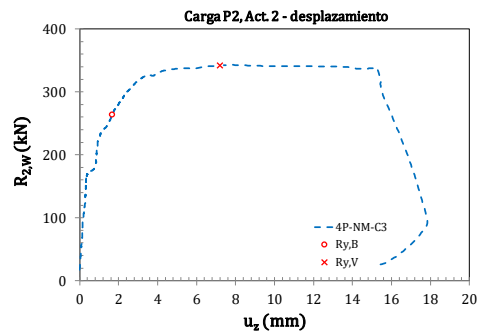
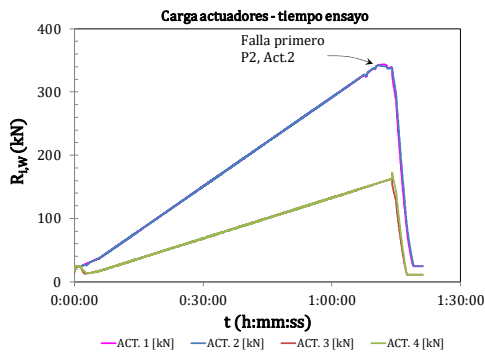


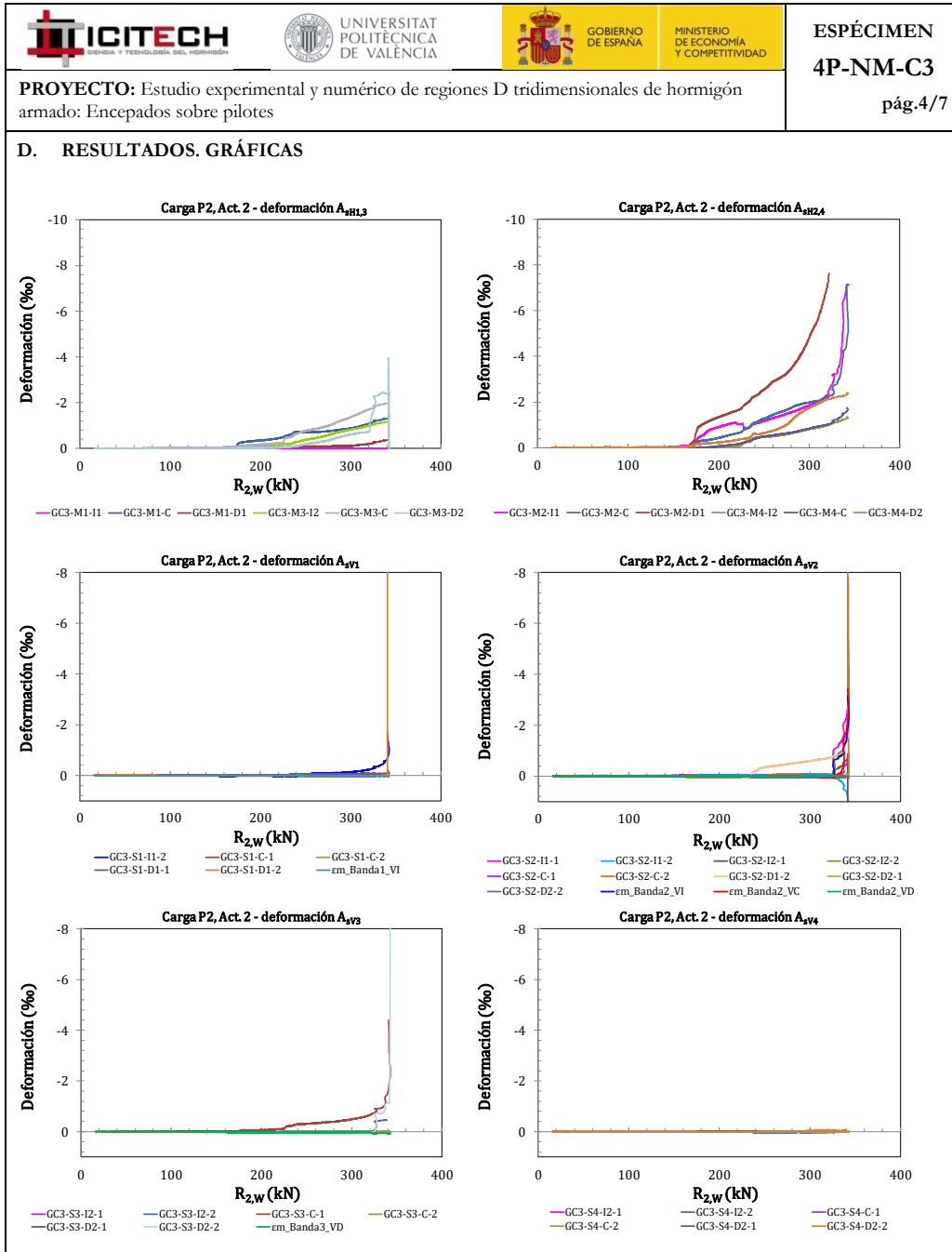


ESPÉCIMEN
4P-NM-C3
pág.3/7

PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

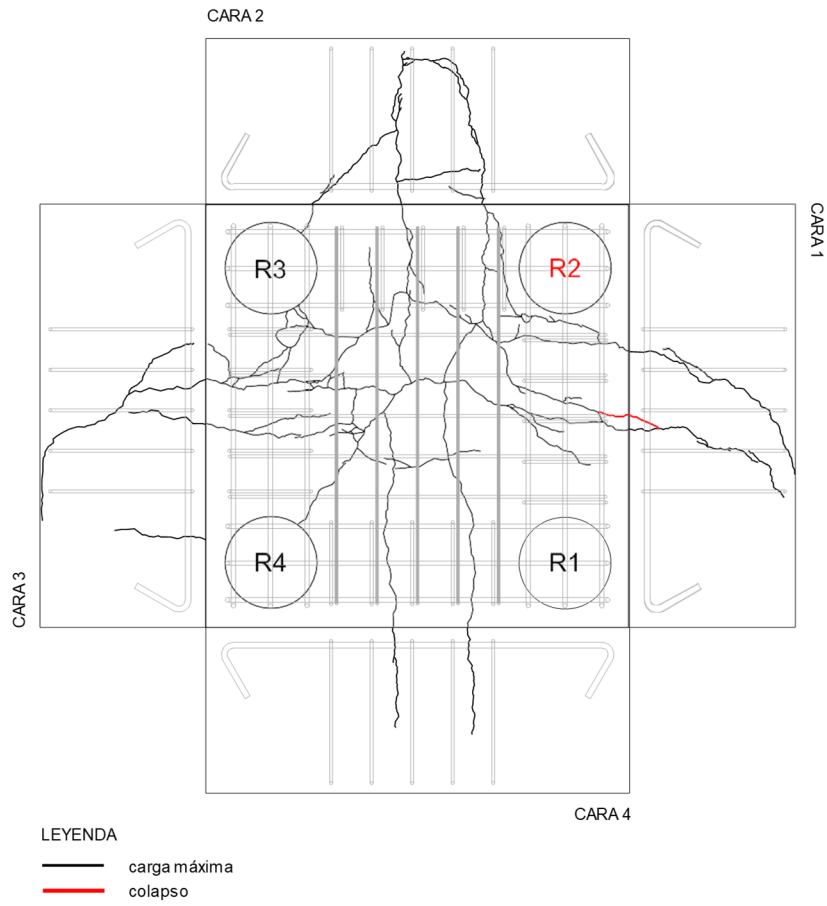
D. RESULTADOS. GRÁFICAS




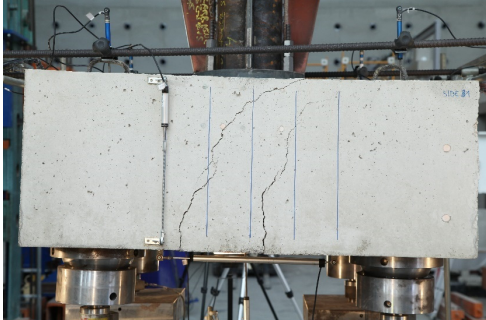
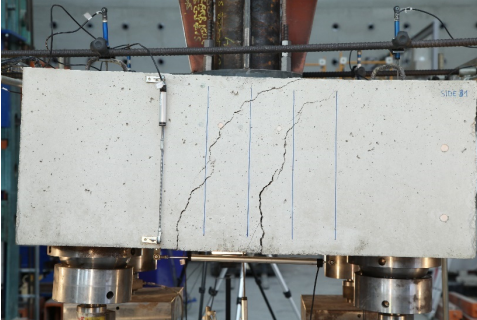
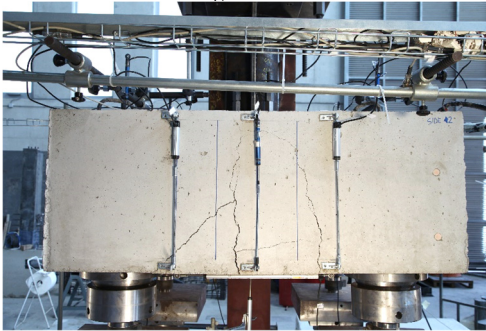
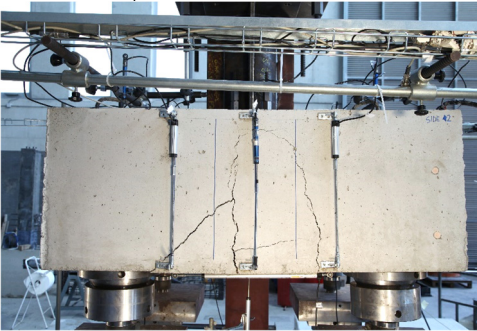
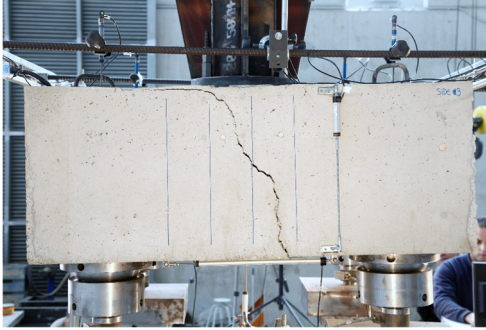
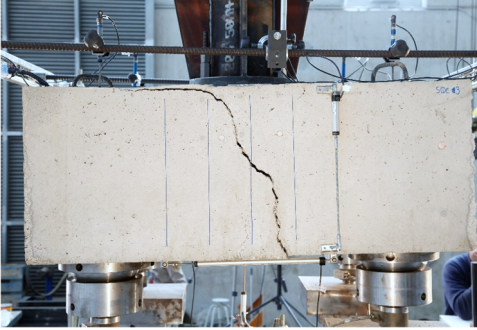




PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

E. RESULTADOS. PATRÓN DE FISURACIÓN



| | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
|  |  UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA |  GOBIERNO DE ESPAÑA MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD | ESPÉCIMEN 4P-NM-C3 pág.6/7 |
| PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes | | | |
| F. FOTOS DE LOS ENSAYOS | | | |
| CARA 1 – Instante de carga máxima | | CARA 1 – Colapso | |
|  | |  | |
| CARA 2 – Instante de carga máxima | | CARA 2 – Colapso | |
|  | |  | |
| CARA 3 – Instante de carga máxima | | CARA 3 – Colapso | |
|  | |  | |

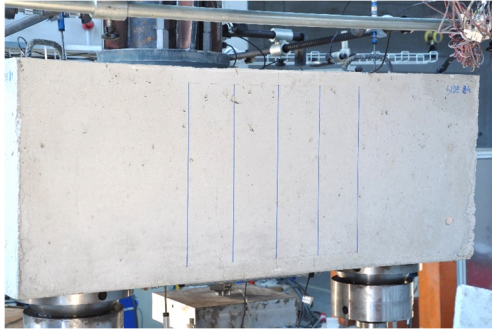


ESPÉCIMEN
4P-NM-C3
pág.7/7

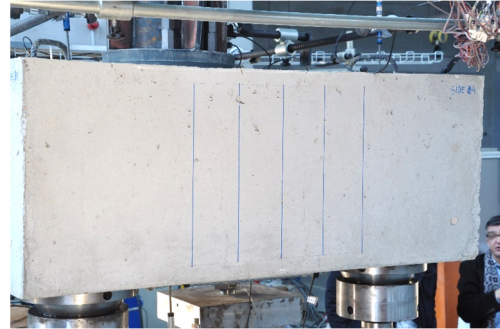
PROYECTO: Estudio experimental y numérico de regiones D tridimensionales de hormigón armado: Encepados sobre pilotes

F. FOTOS DE LOS ENSAYOS

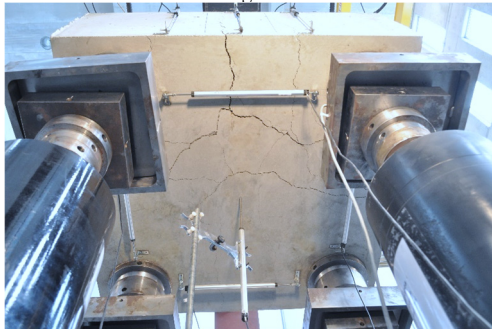
CARA 4 – Instante de carga máxima



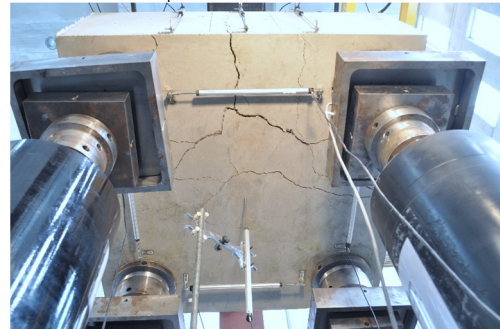
CARA 4 – Colapso



CARA INF – Instante de carga máxima



CARA INF – Colapso



CARA INF – Tras desmontaje



*Estudio de encepados de tres y cuatro pilotes solicitados por cargas centradas y excéntricas:
análisis experimental y de las formulaciones de diseño*

Anejo E

Sistema de carga con actuadores sincronizados

En este anejo se describe el sistema de carga empleado en los ensayos de los encepados de cuatro pilotes. Al tratarse de una sustentación redundante es necesario controlar las reacciones en los pilotes para asegurar que son iguales (en los casos de carga centrada) o que siguen la distribución deseada (en los casos de carga excéntrica). Para ello se emplean cuatro actuadores servo-controlados y sincronizados entre ellos según la ley de proporción que se establece en cada caso de carga.

La programación del sistema de sincronización de los actuadores ha sido realizada por Daniel Tasquer, técnico electrónico del ICITECH.

E.1. Antecedentes

Existen numerosas campañas experimentales sobre encepados de cuatro pilotes, descritas en el *Capítulo 2*, pero sólo en las investigaciones de Clarke [2] y Suzuki [30–33] se han descritos sistemas especiales de carga para asegurar que las cuatro reacciones en los pilotes fuesen iguales (Figura E.1). Los ensayos de Clarke se realizaron con cuatro actuadores conectados a la misma salida de presión. Los ensayos de Suzuki empleaban dos actuadores también conectados a la misma salida de la central de presión, los cuales repartían la carga a dos apoyos mediante una viga de reparto isostática. Esta viga tipo balancín resulta un sistema de carga complejo y poco estable.

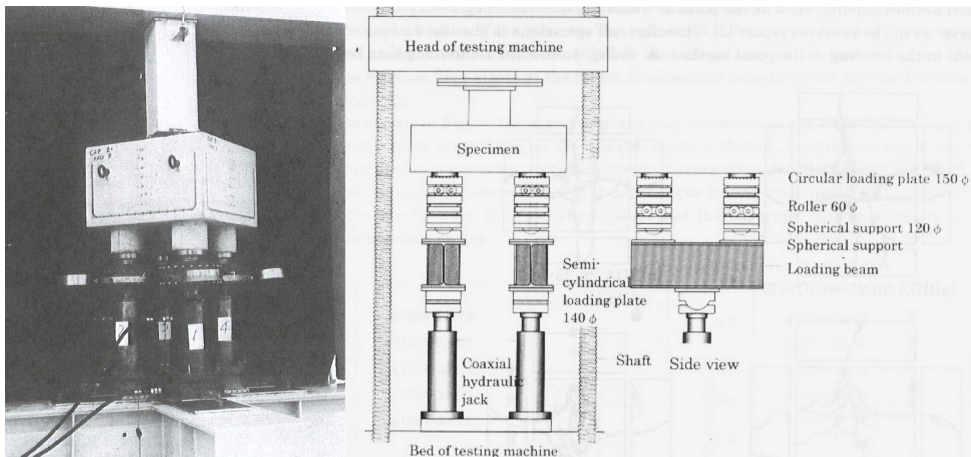


Figura E.1 Sistemas de carga empleados por Clarke (izq) y Suzuki (der)

E.2. Control por servoválvula de los actuadores

Los actuadores se controlan tanto por carga como por desplazamiento. Se establecen para ello dos valores de consigna: desplazamiento u_0 y fuerza f_0 . Para alcanzarlos, cada actuador dispone de un doble proceso de control PID (Proporcional, Integral y Derivativo), con una servoválvula que se controla por intensidad de corriente.

El objetivo del controlador es conseguir, mediante un proceso realimentado, que el error estacionario entre la señal de referencia y la señal de salida sea cero de manera asintótica en el tiempo, lo que se logra mediante la acción integral.

Además, la acción derivativa permite predecir el valor de salida, si se conocen los fundamentos del proceso físico controlado.

Cada una de las iteraciones del proceso de control se realiza en 5ms, lo que permite al controlador alcanzar el valor de consigna más restrictivo en menos de 150ms.

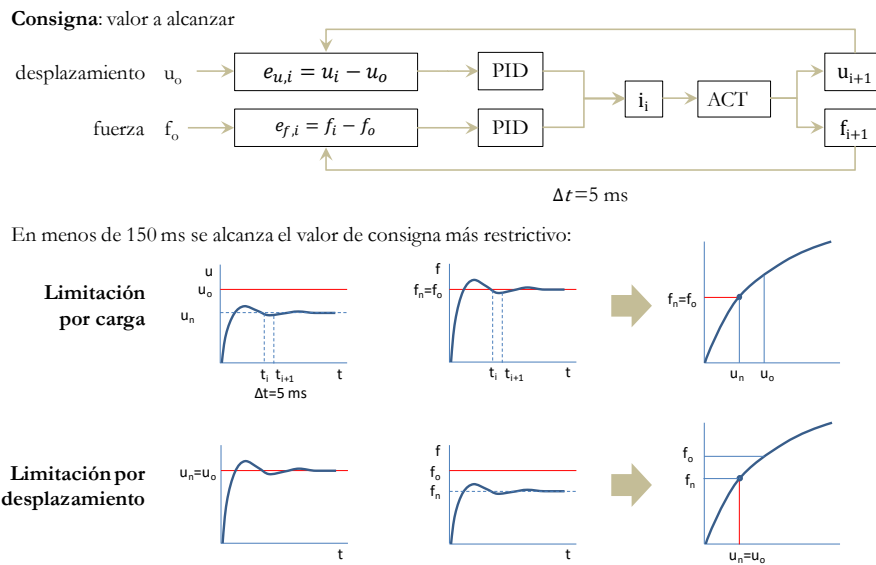


Figura E.2 Esquema del proceso de control PID de los actuadores

E.3. Sistema de sincronización de los actuadores

El control PID permite alcanzar las consignas indicadas a cada actuador, pero además el ensayo requiere que los cuatro actuadores vayan sincronizados siguiendo la ley de proporción establecida en cada caso.

Para ello se emplea un módulo de sincronización que se alimenta con las siguientes variables de entrada: velocidad de carga (v_c), velocidad de desplazamiento (v_d), distribución de las fuerzas aplicadas (k_j), desplazamiento inicial de cada actuador ($u_{o,i}(t_0)$) y fuerza inicial en cada actuador ($f_{o,i}(t_0)$).

Con estos datos se calculan las consignas a alcanzar por cada actuador en función del tiempo: $u_{o,i}(t+\Delta t)$ y $f_{o,i}(t+\Delta t)$. Por seguridad, se limitan estas consignas con unos valores máximos de desplazamiento ($u_{max,i}$) y carga ($f_{max,i}$) en cada actuador.

El control PID de cada actuador logra que se alcance el valor objetivo en un intervalo de tiempo de 150ms.

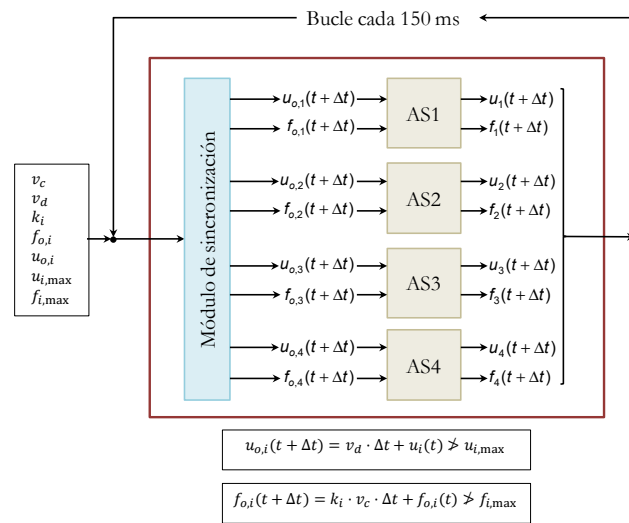


Figura E.3 Proceso de sincronización de los actuadores

E.4. Desarrollo del proceso de carga

Se llevan a cabo tres series distintas de ensayos sobre encepados de cuatro pilotes, con distintas excentricidades de carga: 4P-N ($e_x=e_y=0m$), 4P-NMM ($e_x=e_y=0.11m$) y 4P-NM ($e_x=0m$; $e_y=0.15m$). Asumiendo una distribución plana de las reacciones dada por la Ec. (E.1), esto se traduce en los coeficientes de proporcionalidad que se indican en la Tabla E.1. La velocidad de desplazamiento es de $v_d=0.1mm/s$, la velocidad de carga al inicio del ensayo es de $v_{c1}=5kgf/s$ hasta alcanzar los 50kN en el actuador 1, después se sube la velocidad de carga a $v_{c2}=10kgf/s$ hasta el final del ensayo.

$$k_i = \frac{1}{4} + \frac{x_i}{\sum x_i^2} e_x + \frac{y_i}{\sum y_i^2} e_y \tag{E.1}$$

Tabla E.1 Parámetros de proporcionalidad de la carga de los actuadores

| Serie | e_x, e_y (m) | k_i | | | | k_i / k_1 | | |
|--------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------------|-------------|-------------|
| | | k_1 | k_2 | k_3 | k_4 | k_2 / k_1 | k_3 / k_1 | k_4 / k_1 |
| 4P-N | 0.00, 0.00 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 1 | 1 | 1 |
| 4P-NMM | 0.11, 0.11 | 0.38 | 0.25 | 0.12 | 0.25 | 0.65 | 0.31 | 0.65 |
| 4P-NM | 0.00, 0.15 | 0.34 | 0.34 | 0.16 | 0.16 | 1 | 0.45 | 0.45 |

e_x : excentricidad de la carga en dirección-x; e_y : excentricidad de la carga en dirección-y

Geometría encapado:

$x_1, y_1=0.4, 0.4m$; $x_2, y_2=-0.4, 0.4m$; $x_3, y_3=-0.4, -0.4m$; $x_4, y_4=0.4, -0.4m$

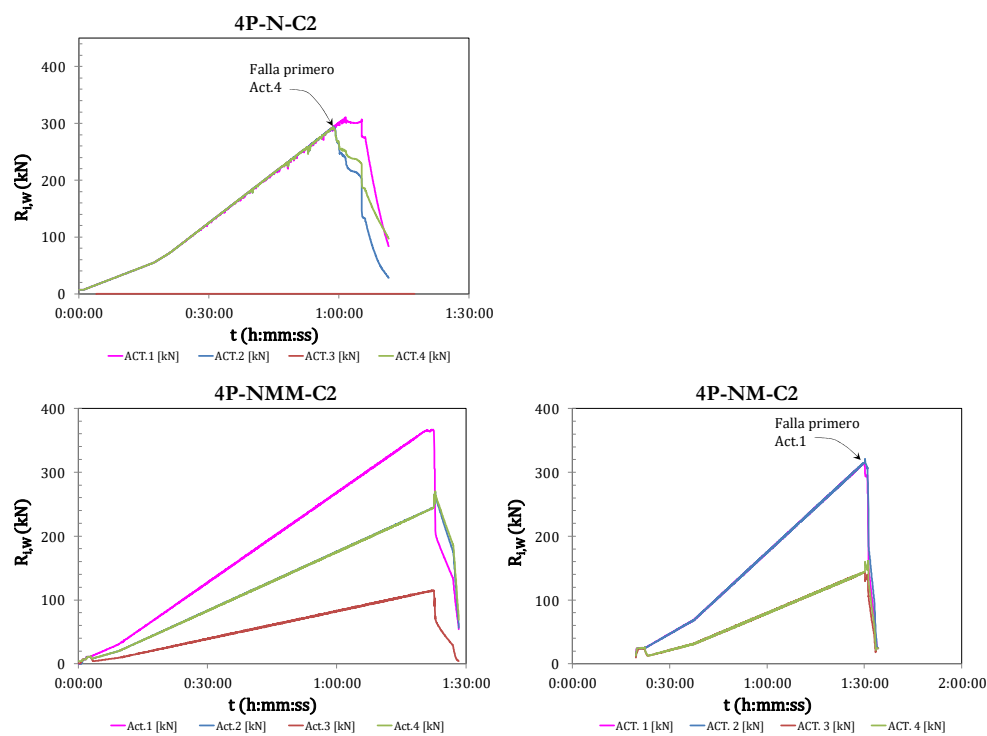


Figura E.4 Gráficas carga-tiempo para los ensayos 4P-N-C2, 4P-NMM-C2 y 4P-NM-C2

*Estudio de encepados de tres y cuatro pilotes solicitados por cargas centradas y excéntricas:
análisis experimental y de las formulaciones de diseño*
