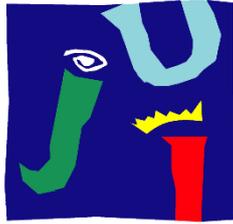


TRABAJO DE FIN DE GRADO



**UNIVERSITAT
JAUME·I**

ESCUELA SUPERIOR DE TECNOLOGÍA Y CIENCIAS EXPERIMENTALES

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

ANÁLISIS TEÓRICO Y EXPERIMENTAL DE PILARES MIXTOS TIPO CFST EMPLEANDO HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA Y AGUA COMO MATERIAL DE RELLENO

AUTOR:

Sergio Benet Gaspar

TUTORA:

Carmen Ibáñez Usach

Castellón, Julio de 2017

RESUMEN

El principal objetivo de este trabajo es analizar el comportamiento seccional de diferentes tipologías de pilares mixtos, tanto del tipo CFST (Concrete Filled Steel Tube) como CFDSST (Concrete Filled Double Skin Steel Tube), ante la variación de parámetros como la excentricidad, la resistencia del hormigón de relleno o la geometría de la sección.

Para ello se llevará a cabo una campaña experimental en la que se ensayarán diferentes tipos de secciones mixtas del tipo CFST y CFDSST para estudiar su comportamiento. De pilares tipo CFST se ensayarán las siguientes formas: cuadradas, rectangulares, circulares y ovaladas. Para las columnas de doble tubo, las configuraciones estudiadas fueron: circular-circular y circular-cuadrado. Se considerará así tanto la tipología recogida en la norma europea (Eurocódigo 4: Diseño de Estructuras Mixtas de Acero y Hormigón) como otras soluciones no contempladas en ella, de las cuales existen actualmente pocos ensayos publicados debido a su carácter novedoso.

El planteamiento de este trabajo de investigación se basa en dos partes, una parte experimental que incluye el diseño, preparación y ejecución de los ensayos; y una parte analítica en la que se analizarán los resultados obtenidos de los ensayos experimentales.

La parte experimental consiste en la realización de una campaña de ensayos a compresión de pilares mixtos de diversos perfiles, anteriormente comentados, y una longitud determinada. Para una mayor comprensión del comportamiento mecánico de dichos pilares se realizarán los ensayos con diferentes configuraciones, variando la excentricidad y utilizando hormigones de diferente resistencia.

La parte analítica consistirá en la comparación de los resultados obtenidos experimentalmente ante la variación de los citados parámetros, para así obtener conclusiones sobre su contribución en el comportamiento mecánico del pilar.

El análisis de los resultados obtenidos, así como sus comparaciones, nos permitirá extraer ciertas tendencias en el comportamiento y conclusiones que permitan establecer recomendaciones de diseño, así como también verificar los actuales modelos en materia de cálculo de pilares mixtos.

Al tratarse de un trabajo de un carácter más científico, contará con las partes que caracterizan este tipo de documentos: Estado del arte a partir de la revisión de la bibliografía, descripción de la campaña experimental, análisis de los resultados, comparación con el método de cálculo establecido en la normativa y conclusiones.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	13
2. ESTRUCTURAS MIXTAS	15
2.1 TIPOS DE PILARES MIXTOS	15
2.1.1 PILARES A BASE DE SECCIONES ABIERTAS PARCIAL O COMPLETAMENTE EMBEBIDAS EN HORMIGÓN.	16
2.1.2 PILARES A BASE DE SECCIONES HUECAS DE ACERO RELLENAS DE HORMIGÓN (CFST)	16
2.1.3 PILARES A BASE DE SECCIONES HUECAS RELLENAS DE HORMIGÓN Y OTRA SECCIÓN DE ACERO (CFDSST)	18
2.2 EJEMPLOS DE USO	20
2.2.1 NEO BANKSIDE	21
2.2.2 APARCAMIENTOS DEL AEROPUERTO TOULOUSE-BLAGNAC	22
2.2.3 PALESTRA	23
3. ACCIÓN COMPUESTA	25
3.1 COMPORTAMIENTO DE LOS MATERIALES	25
3.1.1 HORMIGÓN	25
3.1.2 ACERO	30
3.2 COMPORTAMIENTO MIXTO	30
3.2.1 CONFINAMIENTO	31
3.2.2 ADHERENCIA	34
3.2.3 DUCTILIDAD	35
3.2.4 PANDEO LOCAL	35
4. ESTADO DEL ARTE	39
PILARES CFST	39
PILARES CFDSST	41
5. NORMATIVA EUROPEA	43
5.1 DEFINICIÓN	44
5.2 MÉTODOS DE CÁLCULO	44
5.3 ALCANCE DEL MÉTODO SIMPLIFICADO	45
6. PROGRAMA EXPERIMENTAL	47
6.1 INTRODUCCIÓN	47
6.2 DISEÑO DEL EXPERIMENTO	47
6.2.1 LONGITUD DEL PILAR	47
SERGIO BENET GASPAR	5

6.2.2	MATERIALES	48
6.2.3	EXCENTRICIDAD APLICADA	48
6.2.4	GEOMETRÍA DE LA SECCIÓN	48
6.3	ESPECÍMENES DE ENSAYOS	49
6.3.1	HORMIGÓN	49
6.3.2	AGUA	51
6.3.3	ACERO	51
6.4	DESCRIPCIÓN DE LOS BANCOS DE ENSAYO	52
6.4.1	APOYOS	52
6.4.2	PÓRTICOS DE ENSAYO	54
6.5	CAPTURA DE DATOS	58
6.6	PROCEDIMIENTO DE ENSAYO	58
6.7	RESUMEN DE ENSAYOS	60
7.	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	69
7.1	INFLUENCIA DE LA EXCENTRICIDAD Y EL TIPO DE HORMIGÓN	69
S125.125.3_300_275		69
S125.125.4_300_275		73
S100.100.4_300_275		76
R150.100.4_300_275w		79
R150.100.4_300_275s		81
R150.100.5_300_275w		83
R150.100.5_300_275s		85
R200.120.3_300_275w		87
R200.120.3_300_275s		89
C168.3,2.8_300_275		90
C159,3_300_275		92
C101.6,2_300_275		96
C108,2_300_355		98
C120,2.5_300_275		100
C100,3_300_275		102
C101.6,5_300_275		104
Ov.120.50.2_300_275		105
C-C-A		107
C-C-B		110
C-R-A		111
C-R-B		113
7.2	INFLUENCIA DE LA GEOMETRÍA	116
GRUPO 1		116
GRUPO 2		120
7.3	INFLUENCIA DEL ESPESOR DEL TUBO	123
S125.125		124
R150.100w		126
R150.100s		129
8.	CONCLUSIONES	133

ANEXO I

S100.100.4_300_275	139
GRUPO "A"	139
GRUPO "B"	140
R150.100.4_300_275w	141
R150.100.4_300_275s	142
R150.100.5_300_275w	143
R150.100.5_300_275s	144
C168.3,2.8_300_275	145
C101.6,2_300_275	146
C108,2_300_355	147
C120,2.5_300_275	148
C100,3_300_275	149
C101.6,5_300_275	150
Ov.120.50.2_300_275	151
C-C-B	152
C-R-A	153
C-R-B	154

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Forjado colaborante	13
Figura 2. Secciones de vigas y pilares mixtos	15
Figura 3. Pilares parcial o completamente embebidos en hormigón	16
Figura 4. Pilares CFST.....	16
Figura 5. Pilares CFDSST	18
Figura 6. NEO Bankside. Diferentes vistas, detalle constructivo y uso de pilares mixtos	21
Figura 7. Aparcamientos Toulouse-Blagnac. Vistas generales y de la estructura	22
Figura 8. Palestra. Vistas y detalle constructivo y de la estructura	23
Figura 9. Curvas tensión-deformación para hormigones de diferente resistencia. Ho et al., 2012 [21]	25
Figura 10. Evolución del proceso de fallo del hormigón. Johansson, 2002 [22]	26
Figura 11. Microestructuras del hormigón convencional y de alta resistencia	26
Figura 12. Diagrama de comportamiento del hormigón a compresión	27
Figura 13. Diagrama parábola-rectángulo. Eurocódigo 2 [5]	28
Figura 14. Deformación volumétrica del hormigón. Hernandez-Figueirido, 2012 [20]	28
Figura 15. Variación del límite elástico según la zona de la sección. Wardenier, 2002 [36]	30
Figura 16. Comparación de los comportamientos y modos de fallo. (adaptación de Han et al. 2004 [17])	31
Figura 17. Tensión deformación para un cilindro en compresión triaxial. Efecto del confinamiento. Johansson, 2002 [22]	31
Figura 18. Confinamiento según la forma de la sección.....	32
Figura 19. Variación de la resistencia ante carga axial según D/t. Umamaheswari y Arul Jayachandran, 2014 [34]	33
Figura 20. Tipos de aplicación de carga	34
Figura 21. Mecanismos de adherencia acero-hormigón. Johansson, 2002 [22]	34
Figura 22. Pandeo local en pilares vacíos y CFST. AISC 360-10 [1]	35
Figura 23. Clasificación de secciones.....	36
Figura 24. Condiciones de esbeltez de los elementos. Eurocódigo 4 [6].....	37
Figura 25. Secciones contempladas en el Eurocódigo 4. Eurocódigo 4 [6]	43
Figura 26. Tipos de secciones ensayadas.....	49
Figura 27. Preparación de los componentes según la dosificación	50
Figura 28. Refrentado de una probeta	51
Figura 29. Proceso de corte de los tubos. Hernandez-Figueirido, 2012 [20]	52
Figura 30. Apoyos del banco de ensayos.....	53
Figura 31. Vista del mecanismo de centrado.....	54
Figura 32. Pórtico para probetas de hormigón	55
Figura 33. Modelo CAD del pórtico horizontal y sus componentes. Hernández-Figueirido, 2012 [20].....	56
Figura 34. Pórtico horizontal	57
Figura 35. Curva fuerza-dezplazamiento obtenida mediante el software de Ibertest. Hernandez- Figueirido, 2012 [20].....	58
Figura 36. Marcado de perfiles.....	59
Figura 37. Alineación de los apoyos según la excentricidad.....	59
Figura 38. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie S125.125.3_300_275.30	70
Figura 39. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie S125.125.3_300_275.90	71
Figura 40. Curvas de carga- acortamiento axial para cada excentricidad. Serie S125.125.3_300_275.....	72
Figura 41. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie S125.125.4_300_275.30.....	73
Figura 42. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie S125.125.4_300_275.90.....	74
Figura 43. Curvas de carga- acortamiento axial para cada excentricidad. Serie S125.125.4_300_275.....	75

Figura 44. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie S100.100.4_300_275.30(a)	77
Figura 45. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie S100.100.4_300_275.30(b)	78
Figura 46. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie S100.100.4_300_275.90	78
Figura 47. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie R150.100.4_300_275.30w	80
Figura 48. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie R150.100.4_300_275.90w	81
Figura 49. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie R150.100.4_300_275.30s	82
Figura 50. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie R150.100.4_300_275.90s	83
Figura 51. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie R150.100.5_300_275.30w	84
Figura 52. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie R150.100.5_300_275.90w	85
Figura 53. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie R150.100.5_300_275.30s	86
Figura 54. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie R150.100.5_300_275.90w	87
Figura 55. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie R200.120.3_300_275.90w	88
Figura 56. Curvas de carga-acortamiento axial para $e=0$ mm. Serie R200.120.3_300_275	89
Figura 57. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie R200.120.3_300_275.90s	90
Figura 58. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie C168.3,2.8_300_275.30	91
Figura 59. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie C168.3,2.8_300_275.90	92
Figura 60. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie C159,3_300_275.30	93
Figura 61. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie C159,3_300_275.90	94
Figura 62. Curvas de carga- acortamiento axial para cada excentricidad. Serie C159,3_300_275.30	95
Figura 63. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie C101.6_300_275.30	96
Figura 64. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie C101.6_300_275.90	97
Figura 65. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie C108,2_300_355.30	98
Figura 66. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie C108,2_300_355.90	99
Figura 67. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie C120.2,5_300_275.30	100
Figura 68. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie C120.2,5_300_275.90	101
Figura 69. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie C100,3_300_275.30	102
Figura 70. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie C100,3_300_275.90	103
Figura 71. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie C101.6,5_300_275.30	104
Figura 72. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie C101.6,5_300_275.90	105
Figura 73. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie Ov.120.50.2_300_275.30	106
Figura 74. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie Ov.120.50.2_300_275.90	106
Figura 75. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie C-C-a-30	108
Figura 76. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie C-C-a-90	108
Figura 77. Figura 78. Curvas de carga- acortamiento axial para cada excentricidad. Serie C-C-a	109
Figura 79. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie C-C-b-30	110
Figura 80. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie C-C-b-90	111
Figura 81. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie C-R-a-30	112
Figura 82. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie C-R-a-90	113
Figura 83. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie C-R-b-30	114
Figura 84. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie C-R-b-90	115
Figura 85. Curvas carga-acortamiento axial de especímenes con igual excentricidad y hormigón de relleno de 30 MPa. Grupo 1	117
Figura 86. Curvas carga-acortamiento axial de especímenes con igual excentricidad y hormigón de relleno de 90 MPa. Grupo 1	118
Figura 87. Curvas carga-acortamiento axial de especímenes con $e=10$ mm y hormigón de relleno de 30 MPa. Grupo 1	119
Figura 88. Comparación axil máxima-excentricidad para especímenes con área equivalente. Grupo 1	119
Figura 89. Curvas carga-acortamiento axial de especímenes con igual excentricidad y hormigón de relleno de 30 MPa. Grupo 2	121
Figura 90. Curvas carga-acortamiento axial de especímenes con igual excentricidad y hormigón de relleno de 90 MPa. Grupo 2	122
Figura 91. Comparación axil máxima-excentricidad para especímenes con área equivalente. Grupo 2	123

Figura 92. Curvas carga-acortamiento axial de especímenes con igual excentricidad y hormigón de relleno de 30 MPa. Grupo S125.125	124
Figura 93. Curvas carga-acortamiento axial de especímenes con igual excentricidad y hormigón de relleno de 90 MPa. Grupo S125.125	125
Figura 94. Comparación axil máxima-excentricidad para especímenes con área equivalente. Grupo S125.125	126
Figura 95. Curvas carga-acortamiento axial de especímenes con igual excentricidad y hormigón de relleno de 30 MPa. Grupo R150.100w	127
Figura 96. Curvas carga-acortamiento axial de especímenes con igual excentricidad y hormigón de relleno de 90 MPa. Grupo R150.100w	128
Figura 97. Comparación axil máxima-excentricidad para especímenes con área equivalente. Grupo R150.100w	129
Figura 98. Curvas carga-acortamiento axial de especímenes con igual excentricidad y hormigón de relleno de 30 MPa. Grupo R150.100s	130
Figura 99. Curvas carga-acortamiento axial de especímenes con igual excentricidad y hormigón de relleno de 90 MPa. Grupo R150.100s	131
Figura 100. Comparación axil máxima-excentricidad para especímenes con área equivalente. Grupo R150.100s	132

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Excentricidades aplicadas	48
Tabla 2. Dosificación por m ³ utilizada	49
Tabla 3. Resumen de ensayos de perfiles de sección rectangular/cuadrada	62
Tabla 4. Resumen de ensayos de pilares de sección circular.	64
Tabla 5. Resumen de ensayos de perfiles de sección ovalada.	66
Tabla 6. Resumen de ensayos de perfiles de sección circular-circular	66
Tabla 7. Resumen de ensayos de perfiles de sección circular-rectangular.	67
Tabla 8. Resultados de la serie S125.125.3_300_275	69
Tabla 9. Resultados de la serie S125.125.4_300_275	73
Tabla 10. Resultados de la serie S100.100.4_300_275	76
Tabla 11. Resultados de la serie R150.100.4_300_275.30w	79
Tabla 12. Resultados de la serie R150.100.4_300_275s	82
Tabla 13. Resultados de la serie R150.100.5_300_275	84
Tabla 14. Resultados de la serie R150.100.5_300_27s	86
Tabla 15. Resultados de la serie R200.120.3_300_275w	88
Tabla 16. Resultados de la serie R200.120.3_300_275s	90
Tabla 17. Resultados de la serie C168.3,2.8_300_275	91
Tabla 18. Resultados de la serie C159,3_300_275	93
Tabla 19. Resultados de la serie C101.6,2.0_300_275	96
Tabla 20. Resultados de la serie C108,2_300_355	98
Tabla 21. Resultados de la serie C120.2,5_300_275	100
Tabla 22. Resultados de la serie C100.3_300_275	102
Tabla 23. Resultados de la serie C101,6.5_300_275	104
Tabla 24. Resultados de la serie ov. 120.50.2_300_275	105

<i>Tabla 25. Resultados de la serie C-C-a.....</i>	<i>107</i>
<i>Tabla 26. Resultados de la serie C-C-b.....</i>	<i>110</i>
<i>Tabla 27. Resultados de la serie C-R-a.....</i>	<i>112</i>
<i>Tabla 28. Resultados de la serie C-R-b.....</i>	<i>114</i>

1. INTRODUCCIÓN

Las estructuras mixtas son aquellas estructuras que están formadas por secciones mixtas, que son aquellas secciones en las que el hormigón y el acero trabajan de forma solidaria. La primera, y más conocida tipología de estructura mixta, apareció en la segunda mitad del siglo XIX con la invención del hormigón armado, que consiste en utilizar armaduras de acero para reforzar el hormigón. Posteriormente, durante mediados del siglo XX, aparecen los conocidos como forjados colaborantes, que están formados por una chapa de acero grecada conformada en frío, la cual actúa como encofrado sobre el que se soportan las armaduras y el hormigón, actuando los tres elementos de manera solidaria. Sería también a mediados de esta época cuando aparecieron las primeras vigas y pilares mixtos, siendo estos últimos, en los que se centra este trabajo.

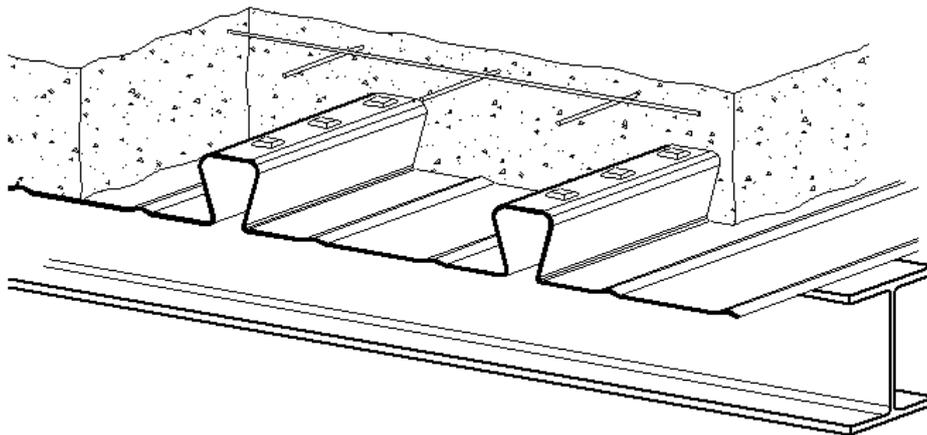


Figura 1. Forjado colaborante

Originalmente, hasta los años 50, los pilares mixtos consistían en perfiles metálicos recubiertos de hormigón de baja resistencia con el objeto de mejorar su resistencia ante la corrosión y el fuego. Así pues, se consideraba que la única función del hormigón de recubrimiento era la protección y, por tanto, no se consideraba la contribución del hormigón a la resistencia del pilar mixto, aunque sí se contabilizaba el peso del hormigón aplicado como una carga muerta. Sería poco después cuando se descubriría que el recubrimiento reducía la esbeltez del pilar y, por tanto, incrementaba su carga de pandeo. Esto, sumado a la aparición de algunas normas como la BS449 británica en 1956 y los diferentes estudios experimentales realizados en ese mismo país, senta las bases de una nueva tipología de pilares; había nacido así el pilar mixto.

Dado que el uso de los pilares mixtos, aunque aún dando sus primeros pasos, comenzaba a ser una realidad tangible, el número de investigaciones fue en aumento. Estas investigaciones estudiaban el efecto de variar los diferentes parámetros de los ensayos obteniendo así un mejor entendimiento de la influencia de dichos parámetros en el comportamiento del pilar. Estas

investigaciones, a su vez, fomentaron la creación de normas específicas de estructuras mixtas y la aparición de diferentes y novedosas tipologías de pilares.

La utilización de este tipo de pilares ha ido creciendo a medida que aumentaba el *know-how* o conocimiento fundamental siendo su uso una realidad tangible, aunque aún no generalizado. En el futuro se espera que el uso de pilares mixtos se extienda debido a las múltiples ventajas que ofrecen y a la racionalidad de materiales y costes.

2. ESTRUCTURAS MIXTAS

El Eurocódigo 4 (EC4) [6] define la estructura mixta como un elemento estructural compuesto por hormigón y acero estructural o conformado en frío unidos por conectores, en caso de que fuera necesario, para así limitar el desplazamiento longitudinal entre el acero y el hormigón, evitando así que los componentes se despeguen entre sí.

En un principio se podría pensar que dentro de esta definición también caben otros tipos de estructuras de hormigón y acero, como por ejemplo el hormigón armado. Sin embargo, en el documento se especifica que la unión entre el acero y el hormigón de un elemento mixto debe ser tal que su resistencia y rigidez permita que ambos componentes puedan ser calculados como parte del mismo elemento estructural. Esta es la diferencia entre otras estructuras de hormigón y acero y las estructuras mixtas. Dicha interconexión permite que ambos componentes actúen sinérgicamente, es decir, el comportamiento conjunto es mejor que la suma de los comportamientos por separado.

Aunque este trabajo se centra en los pilares mixtos, las estructuras mixtas no acaban aquí, sino que también se pueden encontrar vigas y forjados mixtos.

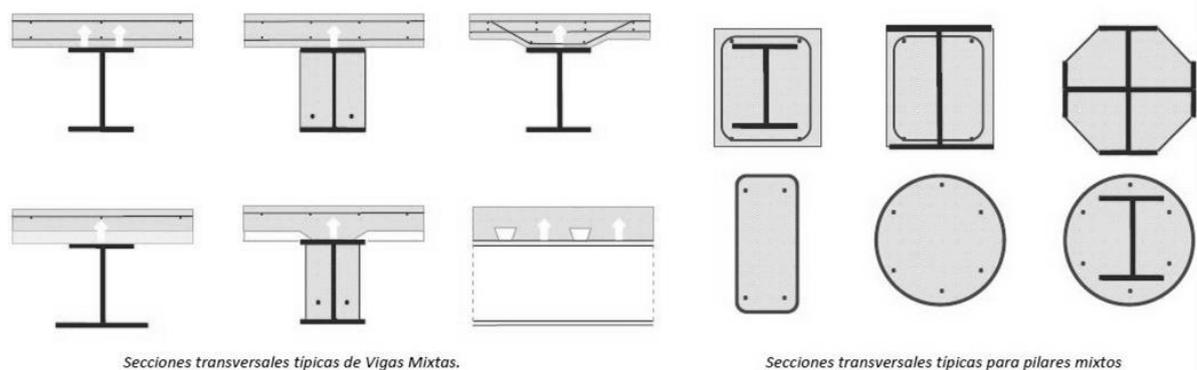


Figura 2. Secciones de vigas y pilares mixtos

2.1 TIPOS DE PILARES MIXTOS

Un pilar mixto es un elemento estructural compuesto por acero y hormigón que trabaja, principalmente, bajo esfuerzos normales de compresión. Este tipo de pilares reúnen una serie de ventajas al combinar los comportamientos de sus componentes, acero y hormigón. Es decir, se tienen propiedades del acero, como su mayor ductilidad que el hormigón armado y la posibilidad de conseguir uniones siguiendo las técnicas utilizadas en las estructuras de acero; y por otro lado el hormigón nos aporta una mayor capacidad de soportar carga y una mayor resistencia al fuego. Los diferentes tipos de pilares mixtos son los siguientes:

2.1.1 Pilares a base de secciones abiertas parcial o completamente embebidas en hormigón.

Se trata de pilares parcialmente embebidos basados en secciones de acero en I o H, con el espacio existente entre las alas relleno de hormigón. En el caso de los pilares completamente embebidos, la sección de acero se encuentra dentro del hormigón con un recubrimiento de este mínimo en todo su contorno.

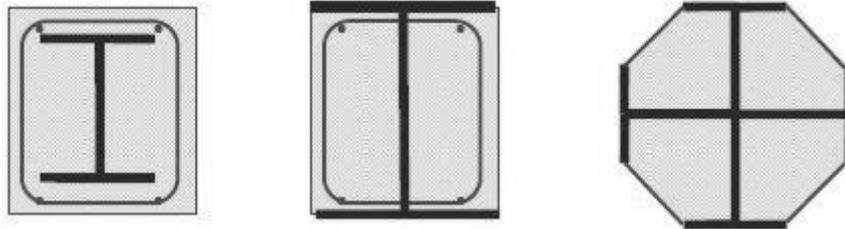


Figura 3. Pilares parcial o completamente embebidos en hormigón

2.1.2 Pilares a base de secciones huecas de acero rellenas de hormigón (CFST)

En esta categoría, se encuentran aquellos pilares basados en perfiles tubulares de acero de diversa tipología: circulares, rectangulares, cuadrados, ovalados, etc.; que se rellenan de hormigón. El perfil de acero actúa como encofrado del hormigón aumentando notablemente su resistencia a compresión debido al confinamiento.

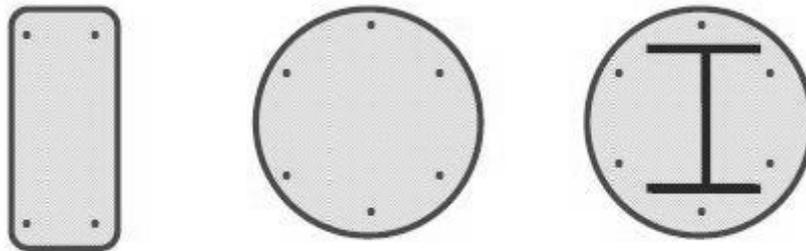


Figura 4. Pilares CFST

Ventajas de los pilares tipo CFST

Esta tipología de pilares ofrece una mejora en el comportamiento en comparación con el uso independiente de los dos materiales, acero y hormigón. Las principales ventajas son las siguientes:

- La interacción entre los materiales mejora el comportamiento del pilar mixto más allá de la suma de los comportamientos de los materiales (sinergia). Así pues, el núcleo de hormigón retrasará el pandeo local del tubo de acero, mientras que este, al confinar al núcleo de hormigón, aumentará su resistencia a compresión evitando su disgregación y aumentará su ductilidad. Esto revierte en la utilización de secciones de menor área para las mismas solicitaciones.
- Se obtiene un mejor aprovechamiento de las características de los materiales ya que están situados en la zona de la sección donde mejor es su comportamiento. El acero se encuentra en la periferia, donde se soportarán los mayores esfuerzos a tracción. De esta forma aumentamos la rigidez a flexión del conjunto al evitar que el hormigón trabaje a tracción.
- Suponen un ahorro en costes y tiempo ya que se puede construir más rápidamente debido a que el perfil de acero actúa de encofrado para el núcleo de hormigón. La capacidad autoportante del encofrado nos permitirá ejecutar varias plantas, aprovechando la facilidad de montaje y unión de las estructuras metálicas y evitando que el curado del hormigón actúe de cuello de botella en los tiempos de ejecución. Cabe señalar también que el coste por unidad de resistencia será menor que el de los pilares de acero o de hormigón armado.
- Utilizando hormigón de alta resistencia (HAR) reducimos el tamaño de las secciones para una misma carga aumentando así el espacio útil por planta. Esto es especialmente ventajoso en las plantas bajas de edificios de gran envergadura.
- Excelente comportamiento ante sismo y fuego. Al poseer una buena absorción de energía, estos pilares tendrán un buen comportamiento ante sismo. Por otra parte, el núcleo de hormigón proporciona resistencias al fuego de 120 minutos sin protección adicional.

Inconvenientes de los pilares tipo CFST

Entre los inconvenientes de este tipo de pilares cabe destacar:

- Para conseguir el comportamiento combinado se debe asegurar la interacción acero-hormigón, para ello la interfaz entre los materiales debe permitir la transferencia de tensiones entre los dos componentes. Se puede mejorar dicha transferencia que el uso de conectores, pero a costa de un aumento del coste.
- Debido a la esbeltez de las secciones cobran especialmente relevancia los efectos de segundo orden.
- La normativa europea vigente actualmente no contempla el uso de hormigones de alta resistencia (sólo contempla hasta 50 – 70 MPa en probeta cilíndrica).
- El uso del hormigón de alta resistencia nos permite un mejor comportamiento a compresión, aunque su menor ductilidad dificulta la redistribución de tensiones. Por otra parte, el novedoso carácter del hormigón de alta resistencia en su uso en pilares mixtos, hace que se haya investigado poco de: su interacción con el acero, su adherencia, efectos del confinamiento, su reología o resistencia a fuego.

Como se observa, las ventajas de este tipo de pilares los hacen especialmente atractivos para la construcción de edificios de altura o puentes con grandes luces. Sin embargo, la escasez de guías de diseño y la falta de investigaciones en el uso de hormigón de alta resistencia (HAR) y su comportamiento mixto, hacen que se suela optar por soluciones constructivas más tradicionales. Por ello su uso, aunque se está extendiendo, aún es moderado.

2.1.3 Pilares a base de secciones huecas rellenas de hormigón y otra sección de acero (CFDSST)

Este tipo de pilares son similares a los CFST sólo que en vez de constar de una sola sección tubular, constan de dos secciones tubulares concéntricas con hormigón relleno el hueco existente entre ellas, y dejando hueco el interior del tubo interior. Del mismo modo que en los pilares CFST, los perfiles de acero pueden tener diversa forma: circular, rectangular... y todas las combinaciones entre ellos.

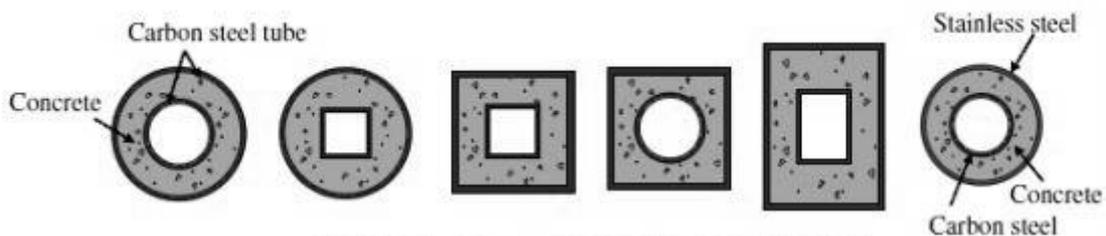


Figura 5. Pilares CFDSST

Ventajas de los pilares tipo CFDSST

A continuación se exponen las ventajas de este tipo de pilares frente a los CFST.

- Presentan un mejor comportamiento seccional para una misma carga que los pilares CFST. Se pueden conseguir, por tanto, secciones más esbeltas sin comprometer la estabilidad del conjunto gracias a su mayor rigidez a flexión y su mayor ductilidad.
- La presencia del tubo interior mejora la absorción de energía teniendo un buen comportamiento ante cargas dinámicas y, por ello, teniendo buenas capacidades sismorresistentes.
- Disminuyen los costes de cimentación al tener menor peso propio y se consigue un mejor aprovechamiento del espacio por su capacidad de obtener pilares más esbeltos que mediante pilares CFST simples.
- El hueco existente en el interior puede usarse para albergar la instalación eléctrica.

Inconvenientes de los pilares tipo CFDSST

Por otra parte los inconvenientes que presentan son:

- Al tratarse de una solución novedosa no existe normativa ni guías de diseño que contemplen dichos pilares por lo que, pese a su gran potencial, son escasamente utilizados.
- Dificultad en la compactación del hormigón que afectará a la interacción acero-hormigón y puede mermar sus capacidades resistentes.

Las características de los pilares CFDSST son superiores a las de los CFST, siendo una alternativa a estos en aplicaciones en las que prime el peso propio del elemento. Sin embargo, su mayor dificultad técnica y la total ausencia de normas y guías de diseño hacen que este tipo de solución estructural este dando sus primeros pasos de vida en cuanto a su aplicación. Un creciente número de estudios sobre esta tipología de pilar se están realizando actualmente, por lo que se esperan avances que mitiguen sus inconvenientes y extiendan su uso.

2.2 EJEMPLOS DE USO

El uso de pilares mixtos del tipo CFST y de doble piel se ha visto incrementado en las últimas décadas, principalmente en la construcción de edificios de altura y puentes y viaductos.

La razón de su escasa utilización se debe a que este tipo pilares apenas están contemplados en las normativas actuales y existen escasas guías de diseño que faciliten su aplicación. Su uso se ha extendido gracias a que tienen unas propiedades superiores a las del hormigón armado como son su mayor ductilidad y absorción de energía, su alta resistencia y un buen comportamiento ante sismo y fuego.

Otros campos de aplicación de estos pilares han sido: edificios industriales, torres de transmisión y distribución eléctrica, sistemas de metro, aparcamientos de coches y bloques de uso residencial u oficinas.

A continuación se exponen algunas de las construcciones en las que se han empleado esta tipología de pilares. Estas construcciones, con diferentes usos, han sido elegidas como ejemplo porque en ellas se emplean diferentes tipos de secciones, contempladas también en la campaña experimental que más adelante se describirá.

2.2.1 NEO Bankside

NEO Bankside es un complejo residencial que ocupa un área de 60700 m² a orillas del Támesis y en las proximidades de la Galería Nacional de Arte Británico (Tate Modern) en el municipio londinense de Southwark. Se compone de cuatro pabellones hexagonales de apartamentos cuyas alturas varían entre las 12 y 24 plantas, incluyendo un edificio de oficinas de 6 plantas. En la construcción de dicho complejo se ha hecho uso de pilares mixtos del tipo CFST de sección cuadrada de 200 mm de lado en la parte oculta de la estructura, mientras que en la parte visible se han utilizado pilares CFST de sección redonda de 219.1 mm de diámetro. Ambas secciones tenían el mismo espesor de 10 mm, eran de acero S355 y el relleno era de hormigón C25/30. Por último, también se han usado pilares CFST de sección elíptica en los arriostramientos de fachada en la planta baja para proteger ante impacto, siendo el resto de los arriostramientos secciones de acero huecas.

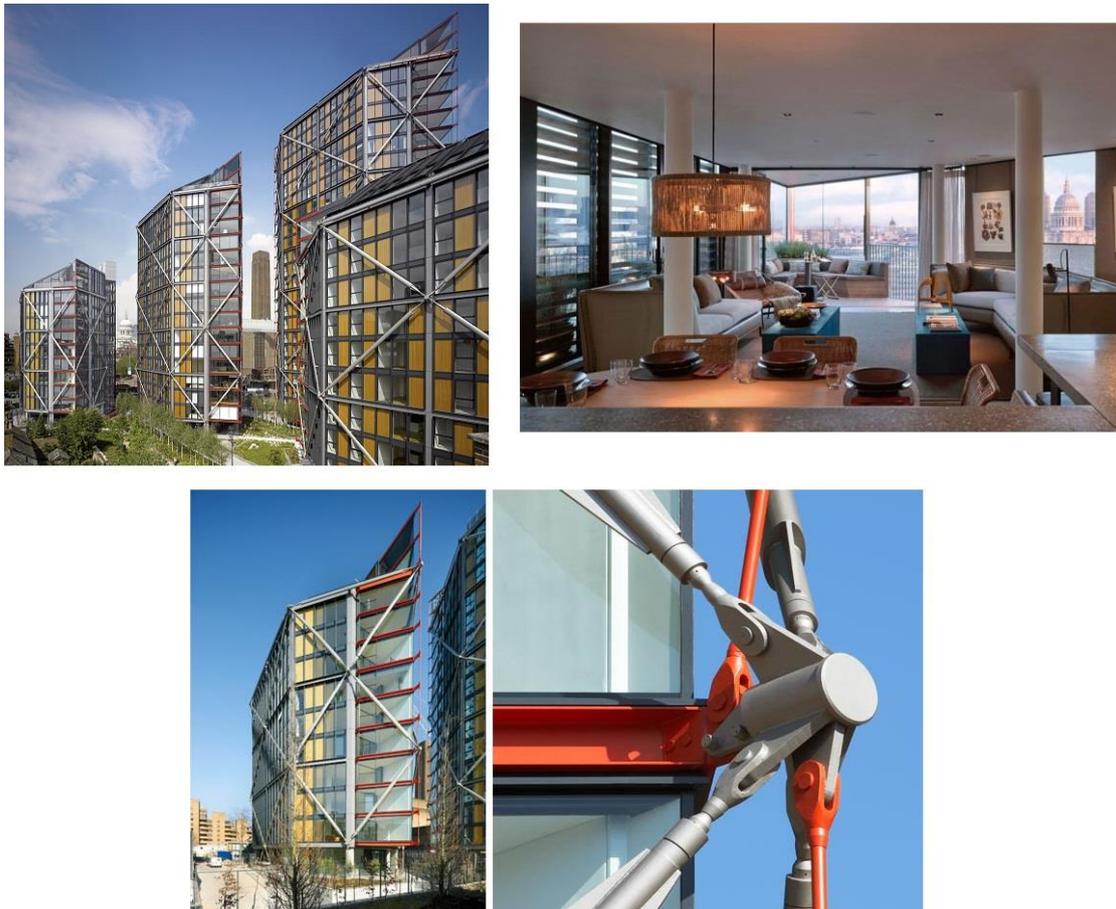


Figura 6. NEO Bankside. Diferentes vistas, detalle constructivo y uso de pilares mixtos

2.2.2 Aparcamientos del aeropuerto Toulouse-Blagnac

Los aparcamientos del aeropuerto Toulouse-Blagnac son unos aparcamientos del tipo silo que constan de 8 plantas teniendo una altura total de 23 m y una superficie de 70000 m² con una capacidad de 3200 plazas de estacionamiento. Los pilares CFST empleados son de sección circular siendo los más empleados los de sección 406.4x8 mm para el anillo interior y los de sección 457x6 mm en el anillo exterior, el acero de los perfiles es S235 JR.



Figura 7. Aparcamientos Toulouse-Blagnac. Vistas generales y de la estructura

2.2.3 Palestra

Palestra es un edificio de oficinas que consta de 12 plantas con una superficie de 28000 m² situado en Southwark, Londres. Este característico edificio tiene columnas danzantes tanto en la planta baja como en la séptima planta, además el edificio se proyecta hacia afuera hasta 9 metros en la elevación frontal. Los pilares utilizados son CFDSST circulares de con un diámetro de 508 mm para el tubo exterior y 273 mm para el tubo interior con el hueco existente relleno de mortero de cemento, para conseguir una resistencia al fuego de 120 minutos sin protección adicional.

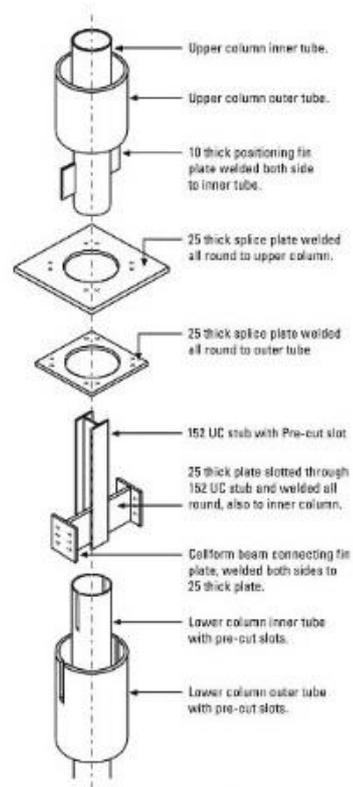
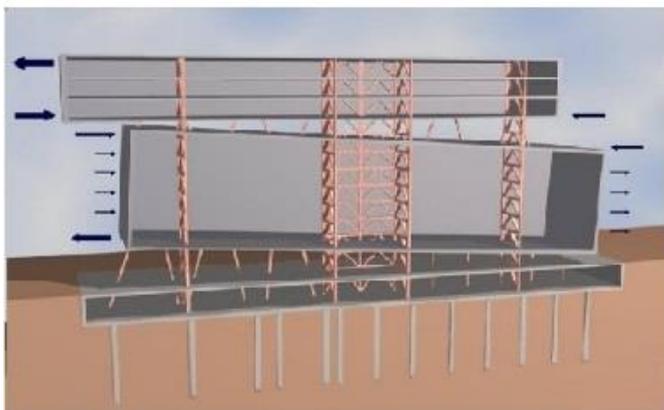


Figura 8. Palestra. Vistas y detalle constructivo y de la estructura

3. ACCIÓN COMPUESTA

El comportamiento mecánico de los elementos mixtos se basa, no sólo en el comportamiento de cada uno de sus materiales por separado, sino también en las propiedades combinadas dadas por la interacción entre los materiales que hace que su comportamiento sea sinérgico.

Debido a que las propiedades de un elemento mixto son una combinación de las características de los materiales, el modo de fallo estará influenciado por la forma y dimensiones de la sección; por las resistencias de ambos materiales y sus efectos característicos (retracción y fluencia en el hormigón y tensiones residuales en el acero); y por las propiedades de la unión (adherencia, confinamiento y pandeo local).

3.1 COMPORTAMIENTO DE LOS MATERIALES

3.1.1 Hormigón

El hormigón es un material heterogéneo formado por una mezcla macroscópica de cemento, agua y áridos de diferentes formas y tamaños. Estos componentes básicos del hormigón pueden ir acompañados de diferentes aditivos con los que se modifican sus propiedades. Contrariamente a lo que pudiera parecer, el hormigón se modela como si fuera un material homogéneo y su comportamiento mecánico se expresa en términos de tensión-deformación.

La figura que se incluye a continuación muestra las curvas tensión-deformación para hormigones de diferente resistencia bajo esfuerzos de compresión. Se observa un descenso de tensión más acusado cuanto mayor es la resistencia del hormigón debido a la mayor acumulación de energía. Esta mayor acumulación de energía hace que, una vez comience el mecanismo de fallo, este sea más rápido al tener que disipar la mayor cantidad de energía acumulada mediante el crecimiento de grieta.

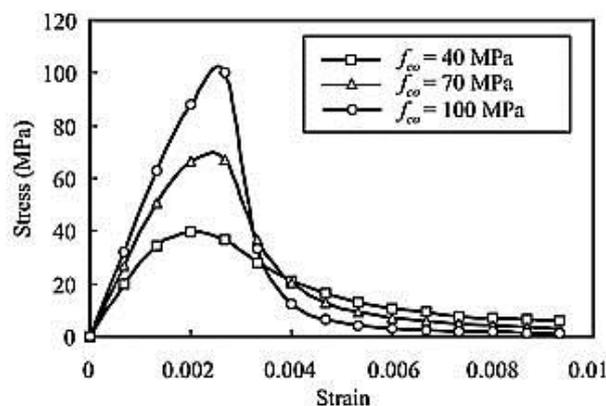


Figura 9. Curvas tensión-deformación para hormigones de diferente resistencia. Ho et al., 2012 [21]

Como se observa en las curvas de la *figura 9*, el comportamiento del hormigón es altamente no lineal y esto es debido a su mecanismo de fallo interno, el cual viene representado en la siguiente figura.

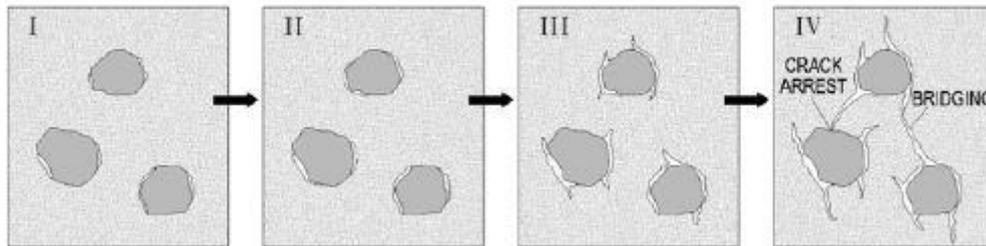


Figura 10. Evolución del proceso de fallo del hormigón. Johansson, 2002 [22]

En primer lugar, se pueden observar microgrietas estables en la interfaz árido-matriz causadas por los fenómenos de expansión térmica y retracción de la matriz de cemento.

A medida que aumenta la tensión a compresión a la que está sometido el hormigón, surgen diferencias en la deformación lateral debidas al mayor módulo elástico de los áridos, actuando así como concentradores de tensiones. Esta diferencia en la deformación lateral produce la aparición de tensiones de cortadura y tracción que dan lugar a un crecimiento de grieta estable. Se observan aquí los primeros signos de no linealidad.

Al llegar al 80-90% de la resistencia máxima, aparece un crecimiento y unión de grietas en la matriz en dirección paralela, o levemente inclinadas, a la dirección aplicación de carga.

Por último, a causa del crecimiento y unión de grietas, aumenta más rápidamente la deformación lateral hasta que la deformación volumétrica se hace nula, consiguiéndose la máxima resistencia. Es entonces cuando las grietas se vuelven inestables y se propagan de forma rápida y descontrolada causando el fallo final.

Como se aprecia en la *figura 9* existen diferentes hormigones según su resistencia. Durante la campaña experimental llevada a cabo se han empleado los hormigones de 30 y 90 MPa, hormigones de uso convencional y de alta resistencia, respectivamente.

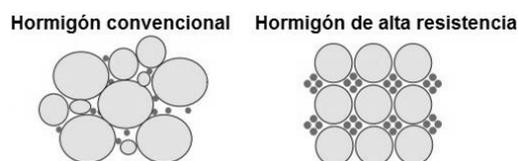


Figura 11. Microestructuras del hormigón convencional y de alta resistencia

Como se observa en la *figura 11*, en el hormigón de alta resistencia el tamaño de los áridos está más controlado y normalizado que en el hormigón convencional. Este hecho le confiere al hormigón de alta resistencia una mayor homogeneidad, que es la causa de su mayor resistencia. Esta mayor resistencia lo convierte en un material más frágil, siendo más propenso al fallo catastrófico al producir la rotura de los áridos durante el crecimiento inestable de grieta. Por el contrario, en el hormigón convencional estos mismos áridos dificultan el avance de grieta al no sufrir rotura.

Para lograr una mayor comprensión sobre el hormigón se precisa explicar su comportamiento a compresión, así como otras particularidades como su carácter reológico. Dicha característica reológica del hormigón nos obliga a hacer un estudio de las deformaciones diferidas con el tiempo. Las principales causas de estas deformaciones diferidas se hayan en los procesos de retracción y fluencia del hormigón.

Comportamiento a compresión

Como se ha visto anteriormente el diagrama de comportamiento a compresión tiene la siguiente forma genérica, cuyos valores característicos son obtenidos experimentalmente.

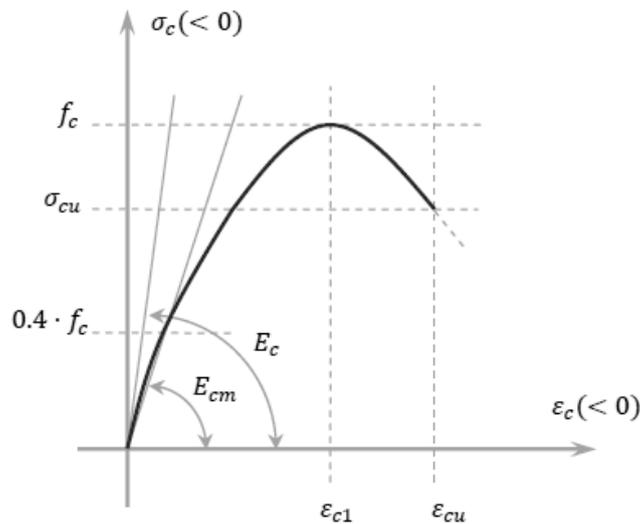


Figura 12. Diagrama de comportamiento del hormigón a compresión

A efectos de cálculo se utilizan diagramas más sencillos en los que prima la seguridad y la facilidad de realizar los cálculos. La simplificación más usada en el cálculo del hormigón es la representada en el diagrama parábola rectángulo.

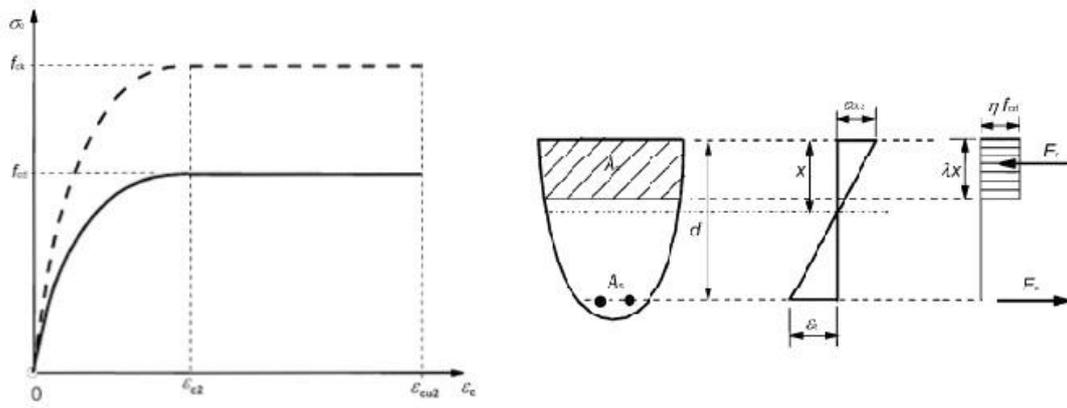


Figura 13. Diagrama parábola-rectángulo. Eurocódigo 2 [5]

Donde:

$\epsilon_{c2} = 0.002$ siendo ϵ_{c2} la deformación para la tensión máxima.

$\epsilon_{cu2} = 0.0035$ siendo ϵ_{cu2} la deformación última.

Deformación volumétrica

Al someter a un sólido deformable como el hormigón a un esfuerzo de compresión se produce un acortamiento longitudinal de la pieza a la vez que un ensanchamiento en el plano perpendicular al de la dirección de aplicación de la carga. El parámetro característico de cada material que indica la relación entre las comentadas deformaciones se llama el coeficiente de Poisson ν [27]. En caso del hormigón se adopta un valor nominal de 0.2 para deformaciones elásticas y se puede suponer nulo si se considera que el hormigón se fisura al trabajar a compresión.

$$\nu = \left| \frac{\epsilon_y}{\epsilon_x} \right| = \left| \frac{\epsilon_z}{\epsilon_x} \right|$$

Siendo la deformación volumétrica ϵ_{vol} para una probeta cilíndrica:

$$\epsilon_{vol} = \epsilon_1 + 2 \cdot \epsilon_r$$

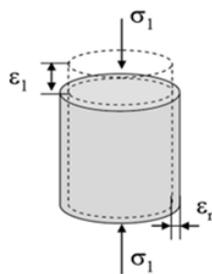


Figura 14. Deformación volumétrica del hormigón. Hernandez-Figueirido, 2012 [20]

Efectos reológicos

La reología es la rama de la mecánica de medios continuos que se encarga de estudiar la evolución de las deformaciones de los materiales causadas por tensiones a lo largo del tiempo. En el caso del hormigón los efectos reológicos que lo afectan son dos, la retracción y la fluencia.

La naturaleza heterogénea del hormigón, su contenido en agua, las condiciones climáticas y de carga, dificultan la cuantificación de sus efectos sobre la respuesta del material

La importancia de estos fenómenos es tal que un diseño inadecuado en cuanto a fluencia y retracción, a menudo constituye la principal razón por la cual las estructuras no completan su vida útil proyectada [4]. Aunque en el caso de los ensayos contemplados en este trabajo, debido a que se ensayan inmediatamente después de que el proceso de curado del hormigón finalice y a que el tiempo que dura la aplicación de carga es tan reducido, la influencia de estos factores es nimia.

A continuación se comentará cada caso con más detalle.

Retracción

La retracción del hormigón se debe a un gradiente de humedades entre el material y el medio en que está inmerso. Esto es debido a que el volumen final de los productos de la hidratación del cemento es menor que los volúmenes iniciales de agua y cemento a causa de fenómenos físico-químicos. Es decir, durante el secado se produce una difusión del agua presente en el hormigón al ambiente, debido a la menor humedad de este. El agua remanente en el cemento desarrollará esfuerzos que traccionan el material sólido adyacente por succión. Este fenómeno se denomina retracción por secado y se trata de un fenómeno mayoritariamente físico. Por el contrario, la retracción autógena o química, es debida a la contracción del volumen como efecto del fraguado químico y consiguiente calentamiento.

La retracción total del hormigón será la suma de la retracción por secado y la retracción química, dependiendo su predominancia de la mezcla, materiales y condiciones durante el secado.

Fluencia

La fluencia es debida a la aplicación de una tensión (o deformación) constante en el tiempo. Tal y como sugiere Neville (2002) [28], la fluencia se puede dividir en dos, la fluencia básica y la fluencia con secado. En la fluencia básica se considera que las condiciones de humedad son constantes, mientras que en la fluencia con secado si se consideran variables.

3.1.2 Acero

El acero es una aleación de hierro y otros elementos (principalmente carbono) que se viene usando desde el siglo XX para la construcción de diversos tipos de estructuras por sus buenas características mecánicas. Entre ellas, cabe destacar su excelente relación resistencia/volumen, bajo coste, estandarización de formas, diversidad de uniones, facilidad de montaje, etc. Por el contrario, presenta una baja resistencia al fuego, lo que es crítico en las estructuras y la seguridad de los usuarios, y problemas de corrosión.

En este caso se usan secciones tubulares de acero, las propiedades mecánicas de los cuales dependerán de su proceso de fabricación. Los procesos de fabricación existentes son: conformado en caliente, conformado en frío y acabado en caliente.

Los perfiles empleados en la campaña han sido conformados en frío, por lo que el límite elástico del perfil no será igual en toda la sección debido al endurecimiento por deformación. Por tanto las zonas de mayor deformación, que serán los bordes tendrán un límite elástico mayor que las zonas no deformadas.

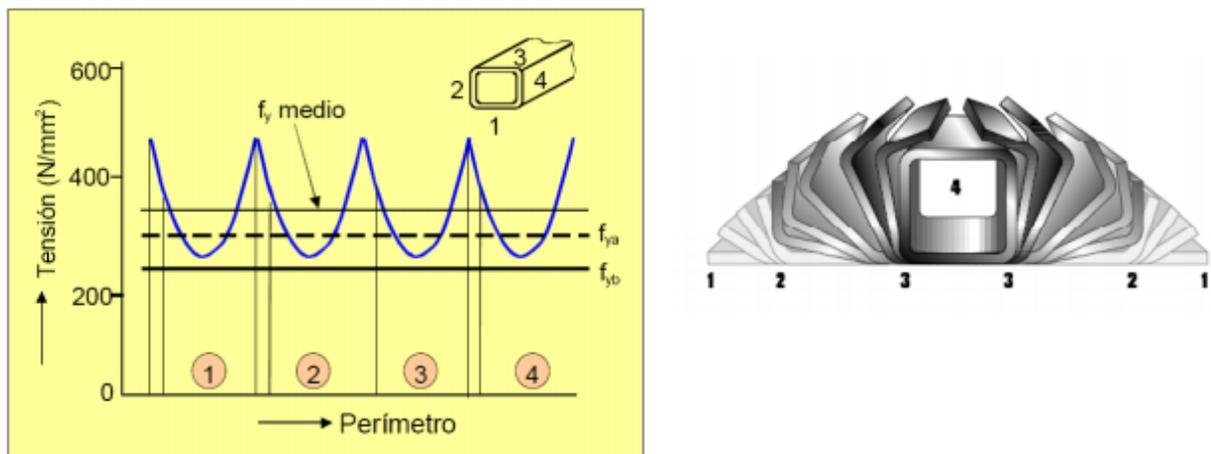


Figura 15. Variación del límite elástico según la zona de la sección. Wardenier, 2002 [36]

El Eurocódigo 4 [6] no contempla estas diferencias del límite elástico producidas por la deformación durante el conformado del perfil, utilizándose como límite elástico el del material base no deformado.

3.2 COMPORTAMIENTO MIXTO

Como se ha comentado anteriormente, el comportamiento de los pilares mixtos no corresponde con el esperado de la unión de las propiedades de ambos, sino que el comportamiento de estos pilares es sinérgico, es decir mejor que la suma de comportamientos.

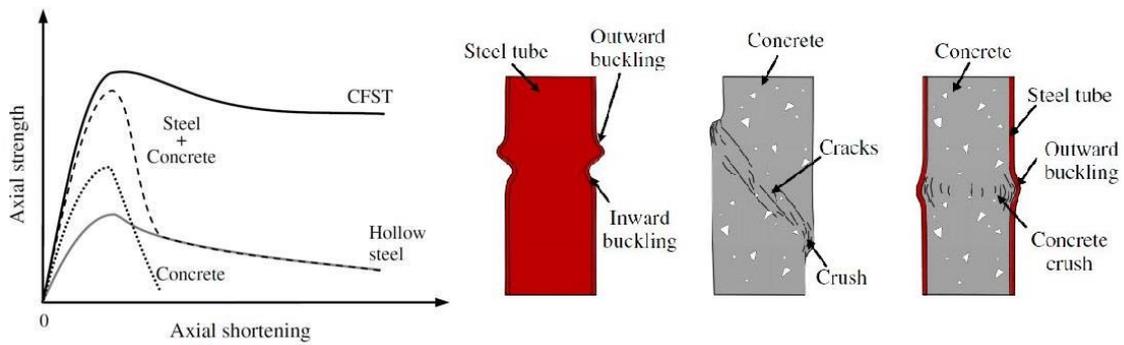


Figura 16. Comparación de los comportamientos y modos de fallo. (adaptación de Han et al. 2004 [17])

A continuación se explicarán los principales fenómenos que afectan al singular comportamiento de los pilares mixtos.

3.2.1 Confinamiento

El hormigón confinado es aquel en el que la expansión en la dirección perpendicular a la aplicación de carga está restringida.

Este confinamiento del hormigón induce un estado triaxial al mismo incrementando notablemente su resistencia y ductilidad debido a que la presión lateral limita la expansión lateral retrasando así el crecimiento de grietas. Como se había comentado antes, en el mecanismo de fallo de hormigón intervienen tensiones a cortante y tracción en la interfaz entre los áridos y la pasta de cemento. Por tanto, la causa última de la mejora de las propiedades mecánicas debido al confinamiento está en que las tensiones de tracción en la interfaz serán en la misma dirección y en sentido contrario a la presión de confinamiento, lo que hace que se equilibren.

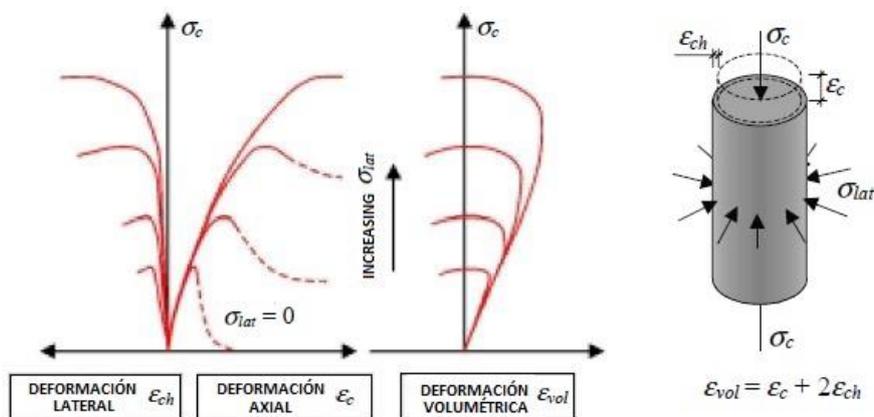


Figura 17. Tensión deformación para un cilindro en compresión triaxial. Efecto del confinamiento. Johansson, 2002 [22]

Existen dos tipos de confinamiento: confinamiento activo y confinamiento pasivo.

Confinamiento activo

Este tipo de confinamiento se da cuando una probeta cilíndrica se ve sometida a una carga axial y una presión hidrostática lateral producida por un fluido. Se llama confinamiento activo porque la presión es independiente de la carga axial aplicada.

Confinamiento pasivo

Este tipo de confinamiento, al contrario que el activo, si depende la carga axial aplicada, más en concreto del aumento de la deformación volumétrica. Esta deriva del incremento de la carga axial que, a su vez, elevará la presión ejercida por el tubo que confina al hormigón. Este es el tipo de confinamiento que se da en los pilares mixtos tipo CFST y CFDSST. El confinamiento pasivo dependerá así de diversos factores como son:

- **Hormigón empleado:** en el hormigón de alta resistencia o HAR, se aprecia un menor aumento de sus características mecánicas ante el confinamiento. Esto es debido a su menor deformación lateral que el hormigón convencional, que hace que su presión radial de confinamiento sea menor.
- **Acero empleado:** el tipo de acero que se utilice (S275 o S355) para confinar el hormigón también influirá, debido a que podremos conseguir mayor o menor presión de confinamiento según el módulo elástico del acero usado. Una vez el acero supere el límite elástico, la presión de confinamiento será constante e independiente de la carga aplicada. [22]
- **Forma de la sección:** se observa una mayor influencia del confinamiento en las secciones circulares que en las secciones rectangulares. Esto es causado por la tensión circunferencial, que en estos últimos no es constante, excepto en las esquinas.

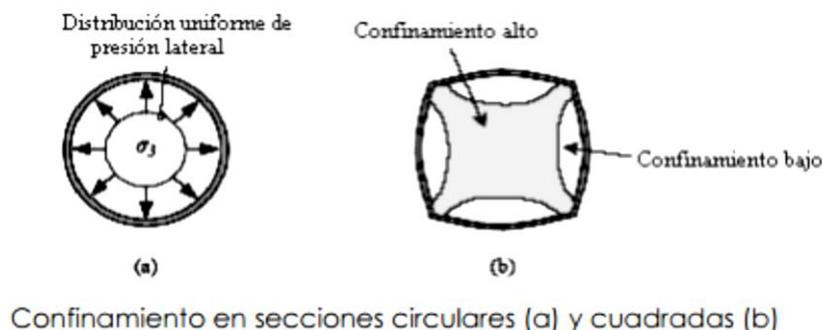


Figura 18. Confinamiento según la forma de la sección

- **Esbeltez del elemento:** a mayor ratio longitud-diámetro (L/D) se producirán efectos de segundo orden, disminuyendo el área que trabaja a compresión y, por tanto, se obtiene un menor confinamiento.
- **Excentricidad aplicada:** al aplicar una excentricidad se hace trabajar al elemento a flexocompresión. Análogamente a lo que ocurre cuando pandea, habrá una menor área a compresión con lo que el confinamiento será menor.
- **Ratio D/t :** el espesor del tubo de confinamiento respecto al diámetro total también tiene efecto sobre el confinamiento, resultando en un menor confinamiento si el espesor del tubo es menor, ya que este dilatará más que un tubo más grueso. Este comportamiento es análogo al apreciado si variamos el acero empleado.

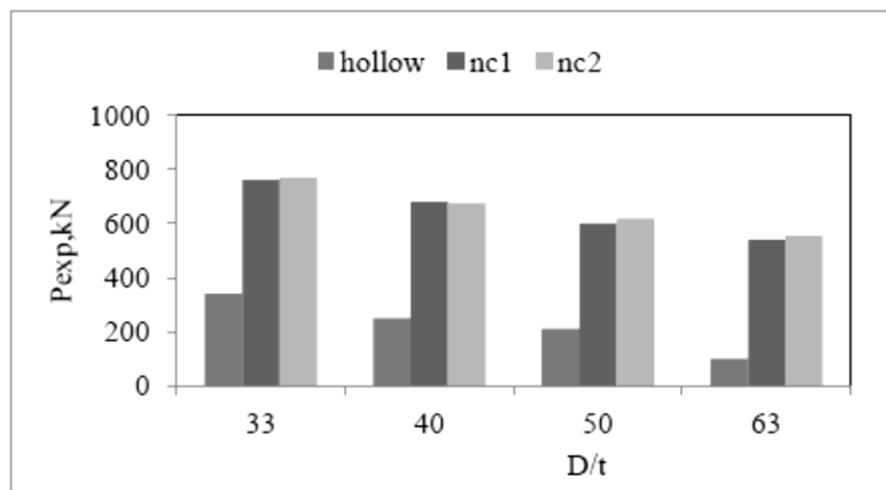


Figura 19. Variación de la resistencia ante carga axial según D/t . Umamaheswari y Arul Jayachandran, 2014 [34]

- **Aplicación de la carga:** existen tres formas diferentes de aplicar la carga en los pilares CFST y dependiendo de ellas surgen diferencias significativas en la efectividad del confinamiento activo.
 - a) Carga sobre el perfil de acero: en este caso no aparecerá ningún tipo de confinamiento. Al aplicarse la carga sobre el tubo de acero, el mayor coeficiente de Poisson de este comparado con el del hormigón, producirán que el tubo de acero se despegue del núcleo de hormigón al haberse superado la fuerza de unión entre ambos. La carga máxima que se aguantará con esta configuración sería muy parecida a la que aguantaría el tubo sólo, excepto que el núcleo de hormigón retrasaría la aparición de pandeo local.
 - b) Carga sobre el núcleo de hormigón: estaremos antes un caso de confinamiento activo. La fuerza axial creará una deformación volumétrica que hará al hormigón expandirse radialmente, en cuyo caso el tubo circundante evitará esta deformación y su consiguiente crecimiento de grieta.

- c) Carga aplicada en toda la sección: se desarrollará un confinamiento pasivo. Al aplicar la carga y comenzar la deformación del hormigón este comenzará a trabajar bajo un estado triaxial de tensiones mientras que el acero estará expuesto a un estado biaxial de tensiones causado por la misma deformación. De acuerdo con el criterio de Von Mises esto causará que el límite elástico del acero en la dirección radial se reduzca, disminuyendo el confinamiento y la resistencia del hormigón. A pesar de esta reducción del confinamiento, la resistencia global se ve compensada por el hecho de que el tubo de acero está soportando parte del axil de compresión. [29]

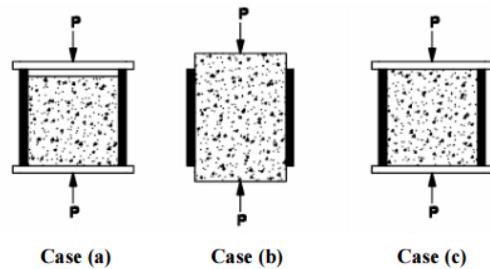


Figura 20. Tipos de aplicación de carga

3.2.2 Adherencia

La transferencia de esfuerzos entre el núcleo de hormigón y el tubo de acero es un punto importante en su comportamiento como un solo elemento. Esta transferencia de esfuerzos se puede mejorar con la incorporación de conectores mecánicos o, en el caso de nuestros pilares CFST, mediante los mecanismos naturales de la unión. Estos mecanismos serán los siguientes:

- Adhesión debido a las reacciones químicas que tienen lugar durante el curado del hormigón dentro del tubo.
- Microinterferencia debido a las irregularidades superficiales en el tubo de acero.
- Fricción debida a la interferencia radial entre el núcleo de hormigón y el tubo de hacer.
- Macrointerferencia debido a las irregularidades geométricas del tubo.

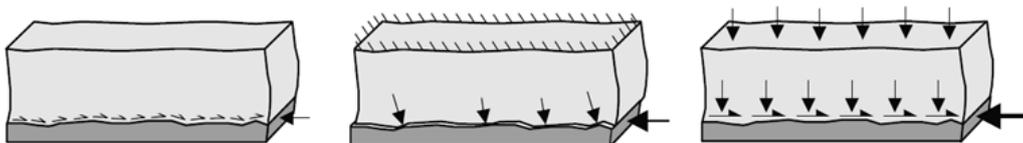


Figura 21. Mecanismos de adherencia acero-hormigón. Johansson, 2002 [22]

3.2.3 Ductilidad

Se define la ductilidad como la capacidad de un material de soportar una gran deformación plástica antes de fallar. Esta capacidad resulta interesante desde el punto de vista de la construcción debido a que cuando se supera la capacidad portante de un elemento, este no fallará espontáneamente (fallo frágil), sino que su deformación será progresiva. Es este comportamiento el que constituye un indicador del fallo.

En el caso del objeto de esta investigación, se estará ante dos materiales de comportamiento opuesto en cuanto a su ductilidad, por una parte se tiene el acero que es un material dúctil, mientras que el hormigón es más dado al fallo súbito, siendo así un material frágil.

La combinación de los comportamientos de los dos materiales otorga a los pilares CFST de una ductilidad superior a la de la suma de la ductilidad de sus componentes. La ductilidad de estos pilares es muy superior a la de los pilares de hormigón armado debido al efecto que tiene el confinamiento del acero impidiendo el fallo frágil. Del mismo modo, la ductilidad del pilar mixto será mayor que la del perfil tubular de acero vacío, debido a que este se vería afectado por efectos de segundo orden antes de alcanzar el límite plástico, como se verá más adelante.

3.2.4 Pandeo local

El pandeo local o abolladura se trata de un efecto de segundo orden el cual produce una inestabilidad local la cual debilita la sección adelantando el fallo, evitando así que el perfil alcance el límite elástico.

El pandeo local de un perfil tubular de acero se muestra como abolladuras hacia el interior y el exterior del tubo en sus caras. En nuestro caso el núcleo de acero impedirá la aparición de la abolladura hacia el interior retrasando de esta manera el pandeo local. Así pues, en el caso de las secciones mixtas de acero rellenas de hormigón se tiene una capacidad 50% mayor de aguantar el pandeo local [26].

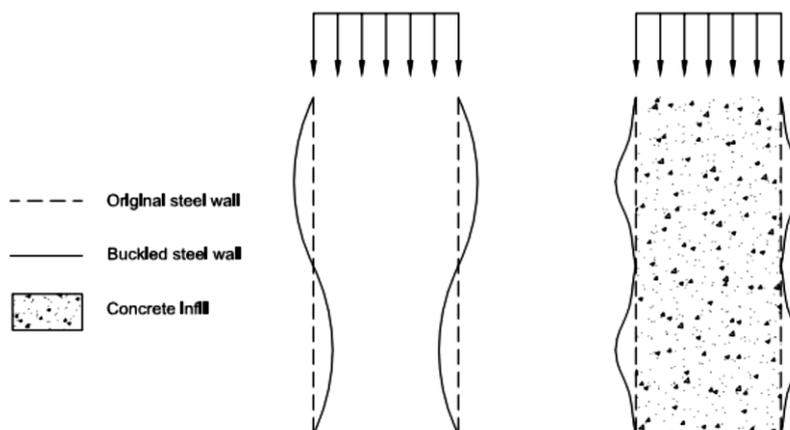


Figura 22. Pandeo local en pilares vacíos y CFST. AISC 360-10 [1]

Un buen diseño teniendo en cuenta la influencia del pandeo local puede reportar un considerable ahorro de material. Esto es debido a un mayor aprovechamiento de la sección, ya que conseguiremos alcanzar la plastificación del acero en la mayoría de los casos.

Esta característica se tiene en consideración en los Eurocódigos 3 y 4 [7] [6], donde se introduce una clasificación según el tipo de secciones transversales. Esta clasificación distingue las secciones según su capacidad de alcanzar el momento resistente plástico y por su facilidad de redistribución de los momentos internos. Así pues la clasificación sería la siguiente:

- **Clase 1 o plástica:** son aquellas capaces tanto de alcanzar su momento resistente plástico, como también poseer la suficiente capacidad de rotación para desarrollar una rótula plástica sin desarrollar problemas de inestabilidad.
- **Clase 2 o compacta:** pueden alcanzar su momento resistente plástico antes de la aparición de inestabilidades, sin embargo no tienen la capacidad de rotación suficiente como para formar rótulas plásticas. Dicho de otro modo, estas secciones pueden aprovechar al máximo el material, pero no permiten considerar para la estructura mecanismos de rotura de tipo plástico.
- **Clase 3, semicomcompacta o elástica:** en ellas la tensión de la fibra más comprimida de la sección puede alcanzar el límite elástico, pero hay la posibilidad de que aparezcan problemas de abolladura local al rebasarlo.
- **Clase 4 o esbelta:** en las que pueden aparecer inestabilidades antes de alcanzar el límite elástico, por lo que para el cálculo de su resistencia a flexo-compresión se necesitaría tener en cuenta los efectos locales de la abolladura.

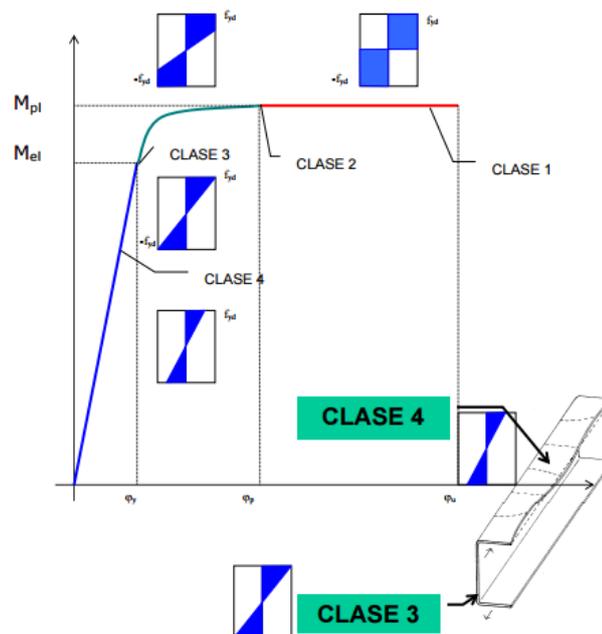


Figura 23. Clasificación de secciones

En el caso de los pilares mixtos, la normativa europea Eurocódigo 4 [6] establece una relación mínima entre el diámetro del tubo y su espesor para prevenir la aparición de pandeo local. Para ello contempla que para secciones parcialmente embebidas y secciones cerradas rellenas de hormigón, la esbeltez de los elementos de la sección de acero deberán satisfacer las condiciones siguientes:

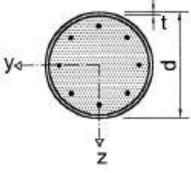
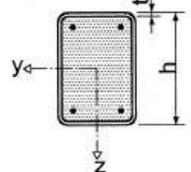
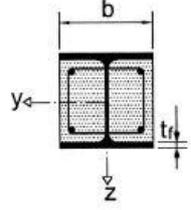
Cross-section	Max (d/t), max (h/t) and max (b/t)
<p>Circular hollow steel sections</p> 	$\max (d/t) = 90 \frac{235}{f_y}$
<p>Rectangular hollow steel sections</p> 	$\max (h/t) = 52 \sqrt{\frac{235}{f_y}}$
<p>Partially encased I-sections</p> 	$\max (b/t_f) = 44 \sqrt{\frac{235}{f_y}}$

Figura 24. Condiciones de esbeltez de los elementos. Eurocódigo 4 [6]

4. ESTADO DEL ARTE

En este apartado se hará un repaso de los estudios publicados estos últimos años sobre pilares mixtos cortos tipo CFST y CFDSST, viendo tanto las investigaciones publicadas por los integrantes del Grupo de Estructuras Mixtas de la Universitat Jaume I, como otras publicaciones externas interesantes que también se centran en estudios experimentales.

Primero cabría comentar la tesis doctoral realizada por David Hernández Figueirido, “Estudio experimental del pandeo de perfiles tubulares rectangulares de acero, rellenos de hormigón de alta resistencia, bajo carga axial y diagrama de momentos variable” [20] del año 2012, que ha servido de preámbulo en la investigación de pilares CFST en la UJI y los resultados de la cual han justificado las campañas realizadas posteriormente.

En la tesis se estudiaron pilares esbeltos sometidos a carga axial y diagrama de momentos no constante, efectuándose en total 58 ensayos de pilares CFST rellenos de hormigón de alta resistencia y comparando los resultados experimentales con las principales normativas. Las variables elegidas para realizar el estudio fueron: el ratio dimensión máxima-espesor del tubo, la longitud del elemento, la resistencia característica del hormigón, la excentricidad máxima aplicada y la relación entre excentricidades en ambos extremos. Una de las conclusiones expuestas en la tesis, después de generar y analizar una extensa base de datos con los ensayos experimentales de 1424 especímenes, fue la falta de un mayor número estudios experimentales en pilares sometidos a carga axial excéntrica, tanto de elementos compactos como esbeltos. Este resultado ha servido como punto de partida y como justificación para el desarrollo de las posteriores campañas experimentales.

PILARES CFST

A continuación se revisarán por orden cronológico algunos de los estudios en materia de pilares CFST que están en la misma línea que el estudio experimental llevado a cabo esta campaña.

En 2004 Giakoumelis y Lam [15] investigaron sobre el comportamiento de pilares CFST de sección circular con hormigones de diferente resistencia (30, 60 y 100 MPa) bajo carga axial. En total se ensayaron 15 especímenes de longitud 300 mm y diámetro 114 mm en los que variaba el espesor del tubo y el hormigón de relleno, con el objetivo de esclarecer el efecto del espesor del tubo, la fuerza de enlace entre el hormigón y el acero, y del confinamiento.

Kuranovas et al. (2009) [24] realizaron un estudio en el que emplearon una base de datos con 1303 y determinaron la capacidad de carga para su comparación la EC4. Entre estos especímenes se incluían pilares largos y cortos, de secciones circulares y rectangulares, con el núcleo de hormigón tanto sólido como hueco, con carga axial centrada o excéntrica.

En el mismo año Oliveira et al. [30] ensayaron ante carga axial 16 especímenes de sección circular rellenos de hormigón de 30, 60, 80 y 100 MPa con ratios longitud-diámetro de 3, 5, 7 y 10, con el objeto hallar el efecto sobre el confinamiento de la esbeltez y la resistencia del hormigón. También se compararon los resultados experimentales con diferentes normas.

Lee et al. (2011) [25] presentaron un estudio experimental de pilares cortos CFST de sección circular, con su posterior análisis numérico mediante elementos tipo fibra y comparación de resultados con los datos por varias normas. Se ensayaron 11 especímenes con acero de alta resistencia ($f_y=460$ MPa o superior) con diversos hormigones ($f_{ck}=31.5$ MPa; 59 MPa), diferentes ratios diametro-espesor y bajo diferentes excentricidades.

Qu et al. (2013) [31] estudiaron el comportamiento de pilares CFST cortos sujetos a carga excéntrica. Para ello se ensayaron un total de 17 especímenes a flexión uniaxial y biaxial con los siguientes parámetros de ensayo: la resistencia del hormigón, el límite elástico del acero, las proporciones de la sección y la excentricidad. Los ensayos se dividieron en dos grupos, uno en que los especímenes estaban sujetos a compresión y flexión en el eje fuerte y el otro en el que estaban sujetos a compresión y flexión biaxial.

Han et al. (2014) [17] analizaron la aplicación estructural de la familia de miembros CFST hasta la fecha y proponen un nuevo marco de investigaciones. También se repasan los diferentes enfoques de diseño de diversas normativas y se describen algunos proyectos con CFST en China.

En 2015 Ding et al. [8] realizaron un estudio experimental de 22 CFSTs cortos de perfil rectangular redondeado en los extremos ensayados bajo carga axial que se compararon con 4 CFSTs cortos de perfil circular. Se estudió la influencia de parámetros como el ratio ancho-espesor, la resistencia del hormigón (39.3, 40.4, 50.4 y 57.4 MPa), el límite elástico del acero y el espesor del tubo. Con ello, el objetivo era observar el efecto de éstos en las curvas tensión-deformación, en la capacidad de carga y en la ductilidad.

Ekmekyapar y Al-Eliwi (2016) [9] presentaron un estudio para esclarecer el efecto del confinamiento y otros parámetros de la columna como: el ratio longitud-diámetro, el ratio diámetro-espesor, el límite elástico del acero y la resistencia del hormigón (56, 66 y 107 MPa). Para ello, se ensayaron 18 especímenes CFST de sección circular de diferentes longitudes, que junto a los datos de 239 especímenes de diversos autores sirvieron para establecer los límites de aplicación de varias normas.

Khan et al. (2017) [23] compararon el comportamiento de perfiles huecos de acero con el de pilares CFST esbeltos de sección cuadrada realizados con materiales de alta resistencia en ambos casos, tanto el acero como el hormigón. En total se ensayaron 15 tubos de acero y 39 pilares CFST con diferentes ratios de anchura-espesor y diferentes esbelteces para ver la influencia de estos parámetros en el tipo de fallo.

En el mismo año Wang et al. [35] analizaron mediante el método de los elementos finitos, validado con datos experimentales, la rigidez a compresión y la capacidad de deformación de pilares CFST. En las simulaciones se cubrieron un gran rango de parámetros para pilares CFST cortos de sección circular y rectangular.

Por último, y también en el 2017, Ding et al. [13] investigaron sobre la influencia de las imperfecciones materiales del tubo de acero realizando ensayos en pilares CFST cortos de sección cuadrada con muescas en el tubo de acero, para simular dichas imperfecciones. Se estudiaron los efectos de las imperfecciones en: la respuesta tensión-deformación, la resistencia del pilar y su efecto en el confinamiento.

PILARES CFDSST

Zhao y Grzebieta [38] en el 2002 llevaron a cabo en serie de ensayos sobre pilares tipo de doble tubo con SHS (Square Hollow Section) tanto en el interior como en el exterior ensayando los pilares y vigas a carga axial y flexión, respectivamente. Mientras que el tubo interior era el mismo en todos los casos, se utilizaban 4 secciones de medidas diferentes para el tubo exterior, variando el ratio ancho-espesor entre 16.7 y 25. Los resultados muestran un aumento de la ductilidad y absorción de energía respecto a los pilares CFST.

En el 2002 también, Elchalakani et al. [11] presentaron un estudio experimental en que se ensayaron pilares cortos con CHS (Circular Hollow Section) en el exterior y SHS en el interior. Se utilizaron 8 secciones de diferentes dimensiones para el tubo exterior con un ratio ancho-espesor entre 19 y 55, y 3 secciones diferentes para el tubo interior con un ratio ancho-espesor entre 20 y 26, hallándose un comportamiento satisfactorio bajo grandes deformaciones con modos dúctiles de fallo.

Tao et al. (2004) [32] realizaron una serie de ensayos de CFDSST tanto para pilares cortos (14 especímenes) como para pilares esbeltos/viga (12 especímenes) de sección doble CHS. Cómo parámetros de ensayo de los pilares cortos se consideran: el ratio de sección hueca (χ) y el ratio ancho-espesor; y para los pilares esbeltos: la excentricidad y la esbeltez. Concluyendo que la mejora del comportamiento de los pilares cortos podía ser explicado como una acción compuesta.

Ese mismo año Han et al. [18] llevaron a cabo la una campaña experimenta muy similar a la realizada por Tao et al. en la que se ensayan 14 pilares cortos, 4 vigas y 12 pilares esbeltos/viga con los mismos parámetros de ensayo pero esta vez con SHS como sección exterior y CHS como sección interior. Se obtuvieron las mismas conclusiones para los pilares cortos.

Zhao y Han (2006) [37] hicieron una revisión de los avances en materia de pilares CFDSST hasta la fecha. Se desarrollaron los antecedentes, las ventajas y los futuros desafíos en esta materia. Por último se propusieron nuevas líneas de investigación como el estudio de su comportamiento ante grandes deformaciones, resistencia al fuego y la influencia del tamaño entre otras.

Uenaka et al. [33] ensayaron CFDSST compactos en los que se fijaron el diámetro del tubo exterior y se tomaron como parámetro el ratio diámetro interior-diámetro exterior y el ratio diámetro-espesor. Los diámetros de los tubos interiores escogidos son 37.5, 75.0 y 112.5 mm con un tubo exterior de 160 mm de diámetro, también se ensayaron CFST con el mismo diámetro. Observaron que el principal modo de fallo era el pandeo local de ambos tubos que iba asociado al fallo del hormigón a cortante.

Haas y Koen (2014) [16] realizaron ensayos sobre 4 especímenes de CFDSST esbeltos con una excentricidad de 20 mm. Los especímenes ensayados son doble CHS con dos longitudes y dos diámetros diferentes para el tubo interior con el objetivo de identificar métodos de predicción del comportamiento de pilares CFDSST ante carga excéntrica.

Hassanein et al. (2015) [19] analizaron mediante el método de los elementos finitos pilares cortos con SHS en el exterior y CHS en el interior variando el ratio diámetro-espesor del tubo exterior y usando hormigones convencional, de alta y ultra-alta resistencia. Los modelos realizados para el análisis de los elementos finitos fueron validados con datos de ensayos experimentales.

Essopjee y Dundu (2015) [12] ensayaron 32 pilares de doble sección CHS esbeltos bajo compresión axial. Los parámetros de diseño utilizados eran: la longitud, diámetro y resistencia de la sección exterior. Se proponen modificaciones en la normativa sudafricana (SANS 10162-1) y en la europea (Eurocódigo 4) para predecir mejor los resultados de carga máxima.

Por último, Ekmekyapar y AL-Eliwi (2017) [10] realizaron un análisis experimental de pilares con sección doble circular con el hueco interior y el existente entre las secciones rellenos de cemento. También realizaron un estudio estadístico de las causas de fallo y contemplan la opción de reparar y reutilizar pilares CFST deformados al añadirles un tubo exterior y rellenar el hueco entre ellos de hormigón.

5. NORMATIVA EUROPEA

Los Eurocódigos son un conjunto de 10 normas europeas que recopilan todos los aspectos del diseño y cálculo estructural para su aplicación en la Unión Europea. Fueron creados por el Comité Europeo de Normalización (CEN) a instancia del Comisión Europea.

El Eurocódigo 4 [6] es de todos los Eurocódigos aquel que se encarga de recoger los métodos de cálculo para estructuras mixtas de acero y hormigón. Este Eurocódigo está dividido en dos partes según su campo de aplicación, la primera EN 1994-1-1 trata sobre el uso de estructuras mixtas en edificios, mientras que la segunda parte EN 1994-2 recoge su aplicación en puentes. También dispondremos de una sección dedicada al cálculo de dichas estructuras ante fuego, EN 1994-1-2. Será la primera parte (EN 1994-1-1), la referente a su aplicación en edificios, y sus métodos de cálculo y más concretamente el apartado 6.7, dedicado al cálculo y comprobación de pilares mixtos los que se trataran en este apartado.

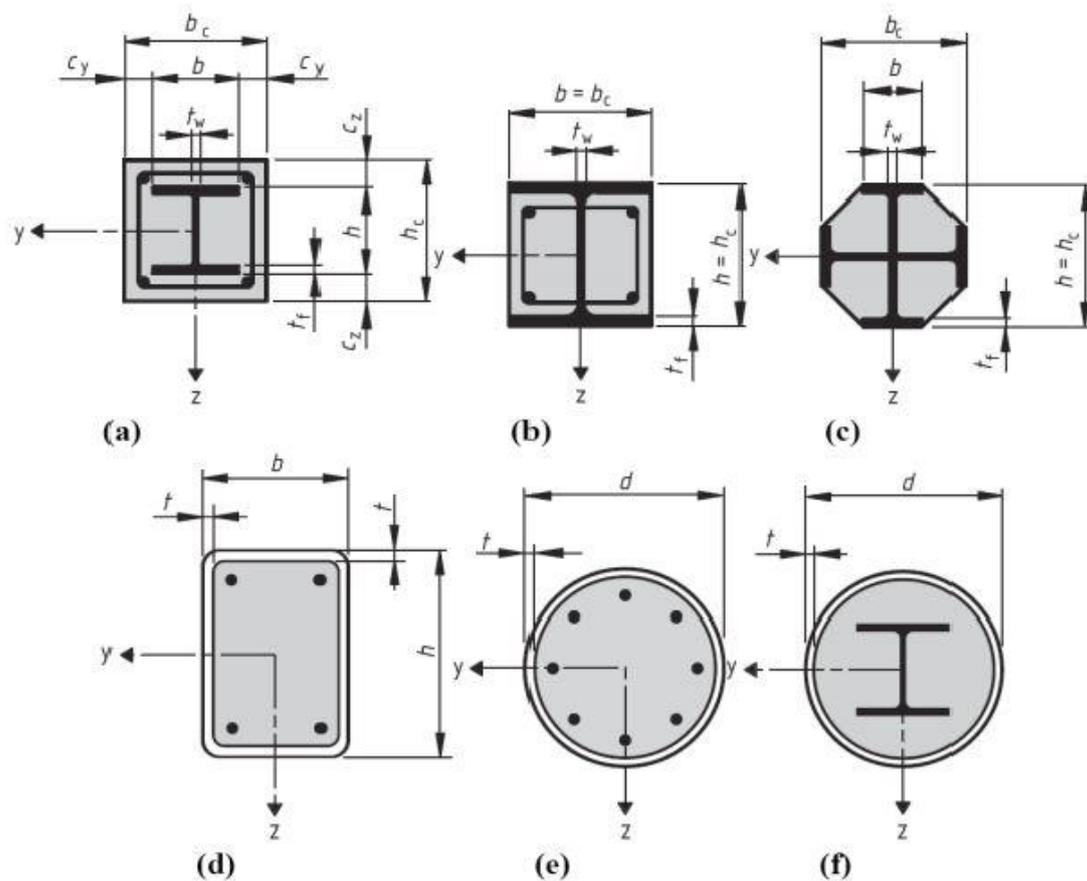


Figura 25. Secciones contempladas en el Eurocódigo 4. Eurocódigo 4 [6]

La actual Normativa Europea en materia de pilares mixtos data del 2004, y por tanto está desactualizada en comparación con otras normas más recientes como la americana ACI 318-14 [2] del año 2014 o la brasileña ABNT NBR 14323:2013 [3] de 2013. Debido a la antigüedad de la norma, no se contempla el uso de hormigones de alta resistencia como relleno ni los pilares de tipo CFDSST. A continuación se procederá a exponer los aspectos más significativos del método de cálculo recogido en dicha norma.

5.1 DEFINICIÓN

El Eurocódigo 4 [6] define un elemento mixto como elemento estructural compuesto por hormigón y acero estructural o conformado en frío, interconectados por conectores para limitar el desplazamiento longitudinal entre el hormigón y acero; y el despegue de un componente del otro.

Como se había comentado en el apartado Estructuras mixtas, esta definición excluye al hormigón armado al introducir la definición de conector del EC4. Unión entre el acero y el hormigón de un elemento mixto que tiene la suficiente resistencia y rigidez para permitir que ambos componentes sean calculados como parte es de un único elemento estructural. Estableciendo así la diferencia entre ambos tipo de estructuras.

5.2 MÉTODOS DE CÁLCULO

El EC4 establece dos métodos de cálculo de la resistencia de los pilares mixtos, un método general y un método simplificado. El primero, que puede aplicarse tanto en pilares de sección transversal asimétrica como en pilares de sección variable con la altura, en el cuál se considerarán de forma explícita los efectos de segundo orden como así también las imperfecciones. Por otra parte, en el método simplificado se emplean las curvas europeas de pandeo, las cuales llevan implícitamente asociados tanto los efectos segundo orden y las imperfecciones. Pese a la diferencia entre los dos métodos, estos se asientan sobre las siguientes suposiciones:

- Hay interacción completa entre las secciones de acero y hormigón hasta que se alcanza el fallo.
- Las imperfecciones geométricas y las tensiones residuales se tienen en cuenta en el cálculo, normalmente, introduciendo una imperfección inicial en la pieza o una falta de rectitud.
- Las secciones planas permanecen planas mientras el pilar se deforma.

Este último método será el empleado en este trabajo debido a su compatibilidad con los casos prácticos estudiados y por su facilidad de aplicación.

5.3 ALCANCE DEL MÉTODO SIMPLIFICADO

El método de cálculo simplificado está limitado a las siguientes restricciones:

1. El pilar debe tener doble simetría y ser de sección uniforme a lo largo de toda su longitud.
2. La relación entre la altura h_c y el ancho b_c de la sección debe estar comprendido en el siguiente rango:
$$0.2 \leq h_c / b_c \leq 5.0$$
3. Esta normativa sólo contempla acero estructurales con el límite elástico f_y comprendido en el siguiente rango $235 \text{ MPa} \leq f_y \leq 460 \text{ MPa}$, y hormigones cuya resistencia característica a compresión f_{ck} se halle entre $25 \text{ MPa} \leq f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$
4. El factor de contribución del acero δ debe estar comprendido entre $0.2 \leq \delta \leq 0.9$

Donde

$$\delta = \frac{A_a \cdot f_{yd}}{N_{plRd}}$$

Siendo

A_a Área de acero

f_{yd} Resistencia de diseño del acero

N_{plRd} Resistencia plástica a compresión

5. La esbeltez relativa máxima $\bar{\lambda}$ debe ser 2.

Donde

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{pLRk}}{N_{cr}}} \leq 2$$

Siendo

$$N_{pLRk} = A_a \cdot F_y + A_c \cdot F_{ck}$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot EI_{eff}}{L^2}$$

$$EI_{eff} = E_a \cdot I_a + K_e \cdot E_{cm} \cdot I_c$$

I_a, I_c Momentos de inercia de la sección transversal de acero estructural e hormigón respectivamente.

E_a Módulo elástico del acero.

E_{cm} Módulo secante del hormigón.

6. Pandeo local

El cálculo de la sección supone que se alcanza la máxima capacidad resistente de la sección en su estado límite último. Para ello se tiene que evitar el fallo causado por una inestabilidad local en el perfil tubular, esto se consigue controlando la relación entre el canto y el espesor del tubo tal y como ya hemos visto anteriormente (Ver *figura 24*).

6. PROGRAMA EXPERIMENTAL

6.1 INTRODUCCIÓN

A continuación, se procederá a describir el programa experimental que se ha llevado a cabo. En él, se ha investigado el comportamiento seccional de pilares mixtos no esbeltos a base de perfiles tubulares de diversa sección, rellenos de hormigón convencional, de alta resistencia y agua; bajo carga axial centrada y excéntrica, para poder comparar su comportamiento según varios parámetros.

6.2 DISEÑO DEL EXPERIMENTO

El comportamiento de los pilares mixtos tipo CFST es dependiente de los materiales utilizados, de las propiedades mecánicas de ambos materiales, de la geometría de la sección, del elemento y de la forma de aplicar la carga.

Para la elección de los parámetros de diseño se han tenido en cuenta los estudios experimentales revisados en el estado del arte, especialmente la tesis de Hernandez-Figueirido [20].

Las variables que se han tenido en cuenta durante el ensayo son:

- Longitud del pilar
- Materiales
- Excentricidad aplicada
- Geometría de la sección

6.2.1 Longitud del pilar

La longitud escogida para realizar los ensayos ha sido de 300 mm, por lo que se trata de pilares cortos, por lo que no se verán afectados por efectos de segundo orden como si lo sería una lección de pilares más esbeltos.

Se cuenta con la ventaja de que al ser secciones pequeñas se pueden rellenar una cantidad considerable de pilares con una misma amasada. Esto nos permitirá la obtención de una comparación más fidedigna del comportamiento del pilar al ser el hormigón de la misma amasada. Por otra parte, el pequeño tamaño de los pilares facilita mucho su colocación en la máquina de ensayos, pudiéndose realizar así un gran número de ensayos en poco tiempo.

6.2.2 Materiales

Hormigón

Durante la campaña experimental se ha trabajado con hormigón de 90 MPa, este hormigón no está contemplado en la norma que sólo recoge el uso de hormigones hasta 50 MPa, y también se han ensayado perfiles rellenos de agua. Los datos obtenidos de los ensayos de estos dos rellenos se han comparado con los datos existentes de campañas anteriores en los que se ha usado hormigón de 30 MPa, todo ello para ver la influencia de la compresibilidad del hormigón de relleno en el comportamiento seccional del pilar.

Por otro lado, también se han rellenado perfiles de agua para poder comparar el comportamiento seccional ante rellenos de diferente compresibilidad: hormigón de 30 MPa, hormigón de 90 MPa y agua (incompresible).

Acero

En cuanto al acero, se han utilizado perfiles tubulares de acero sobrantes de campañas anteriores con un límite elástico de 275 MPa (S275) y 355 MPa (S355). Originalmente estos tubos tenían una longitud de 6 m que se han ido cortando en perfiles de longitud menor según las exigencias de los ensayos. Como con el hormigón, también se busca comparar la influencia del tipo de material.

6.2.3 Excentricidad aplicada

Las excentricidades aplicadas han sido iguales en los dos extremos del pilar y se han adoptado los valores que se muestran a continuación.

Tabla 1 Excentricidades aplicadas

	Excentricidad					
e (mm)	0	5	10	20	25	50

6.2.4 Geometría de la sección

Las geometrías de las secciones ensayadas se muestran en la siguiente figura.

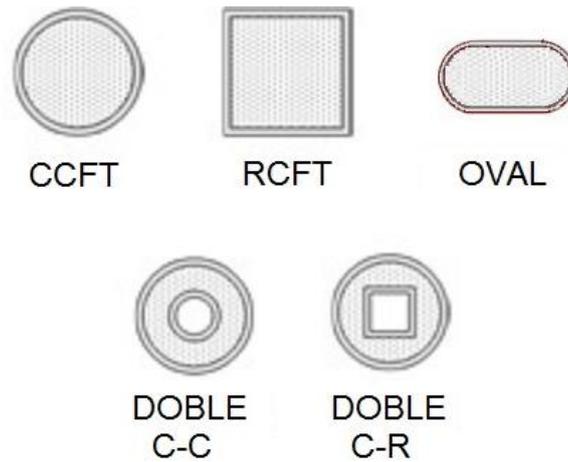


Figura 26. Tipos de secciones ensayadas

Como se puede observar se han ensayado un una gran variedad de secciones para observar la influencia de la forma de la sección. También se han ensayado dentro de cada forma, diferentes perfiles tubulares, ya sea variando la medida de la altura, base o diámetro o manteniendo estas medidas y variando el espesor. Esto se puede observar en el apartado Resumen de ensayos.

La geometría de la sección influirá en el pandeo local, como ya se ha comentado con anterioridad (Pandeo local), pudiendo ser el causante de un fallo prematuro.

6.3 ESPECÍMENES DE ENSAYOS

6.3.1 Hormigón

La construcción y ensayo de los especímenes de la campaña experimental se realizaron en el Laboratorio de Estructuras de la Universitat Jaume I de Castellón. El amasado del hormigón se llevó a cabo en el mismo laboratorio utilizando las dosificaciones recogidas en la siguiente tabla.

f_c (MPa)	Cemento (Kg)	Arena (Kg)	Grava (Kg)	Agua (l)	Humo de sílice (Kg)	Fluidificante (Kg)
30	307	1119	666	220	-	-
90	570	705	890	180	50	12.3

Tabla 2. Dosificación por m^3 utilizada

El proceso de amasada es aquel mediante el cual se obtendrá el hormigón. Para ello se mezclaba los diferentes componentes: cemento, arena, grava y agua y, en caso de hormigón de alta resistencia se añade superfluidificante y humo de sílice. Posteriormente se procede a la homogeneización de la mezcla mediante una hormigonera.



Figura 27. Preparación de los componentes según la dosificación

Primero, se pesaban con una báscula las cantidades de los diferentes materiales para fabricar el volumen de hormigón necesario para poder rellenar los perfiles planeados para esa amasada. Para ello, el supervisor facilitaba una hoja donde venían especificadas las cantidades de cada material siguiendo las dosificaciones expuestas en la Tabla 2.

Posteriormente, se cargaban los materiales en la hormigonera y se procedía a mezclarlos. Primeramente, se mezclaban la arena y la grava junto con un poco de agua. A continuación, se depositaba el humo de sílice junto con el cemento, el agua y, en nuestro caso, el líquido superfluidificante hasta lograr la consistencia requerida.

Después se procedía a rellenar y posteriormente enrasar los perfiles junto con 3 probetas de hormigón que sirven para la caracterización mecánica del mismo hormigón. Durante el proceso de llenado se realizaba el vibrado mediante un vibrador manual para eliminar las burbujas de aire de la mezcla y así evitar la formación de coqueas que disminuyesen la resistencia del hormigón.

El interior del molde de las probetas de hormigón se lubricaba mediante un desencofrante antes de su llenado para evitar que el hormigón se adhiriera y facilitar el posterior desencofrado.

Por último, se cubrían todos los especímenes con un plástico para evitar la retracción del hormigón debido a un secado muy rápido que podría dar lugar a su fisuración.

Al día siguiente, se desmoldaban las probetas de hormigón y se llevaban a la cámara climática, la cual las mantenía a unas condiciones normalizadas de 20° C y una humedad del 99%, para su curado durante 28 días.

Para obtener la resistencia característica del hormigón se realizaba un ensayo a compresión. En primer lugar, se refrentaba la cara rugosa de las probetas de hormigón de acuerdo con las conclusiones expuestas en la tesis de Garavito [14] sobre la idoneidad del uso de una capa de mortero de azufre de 3 mm en las probetas de hormigón de alta resistencia. Para ello se utilizaba azufre que, tras licuar en un recipiente de calentamiento, se vertía sobre un plato de refrentado lubricado con desencofrante sobre el que se apoyaba la cara rugosa de la probeta. Una vez el

azufre había solidificado, la probeta ya estaba lista para proceder a la determinación de la resistencia de la amasada de hormigón mediante un ensayo a compresión tal y como marca la norma correspondiente UNE EN 12390. Las probetas se ceñían a las medidas de 150 mm de diámetro y una longitud de 300 mm que establecen la norma anteriormente citada.



Figura 28. Refrentado de una probeta

6.3.2 Agua

Los especímenes rellenos de agua se fabricaban y ensayaban, como los de hormigón, in situ. Para su fabricación se partía de una sección tubular de longitud ligeramente inferior a 300 mm y se soldaban, mediante soldadura MIG, placas de acero en cada extremo, tapando así el tubo por los dos extremos y con una longitud cercana a los 300 mm. Posteriormente se realizaba un taladro roscado pasante en una de las tapas con tal de poder rellenar el perfil posteriormente.

Para el correcto desarrollo del ensayo, había que verificar la estanqueidad de las soldaduras, en caso de que no lo fuesen se volvía a reparar el cordón de soldadura, si esto no resultaba, se procedía a descartar el tubo. Una vez se aseguraba la estanqueidad del pilar se procedía a su llenado con agua y posterior sellado mediante el uso de un tornillo prisionero y cáñamo de fontanería. Por último se esmerilaba la cabeza del tornillo pasante para evitar que esta sobresaliese evitando una correcta aplicación de carga en toda la superficie.

6.3.3 Acero

Los perfiles tubulares utilizados durante el ensayo son de grado S275 y S355, ambos fabricados a partir de chapa laminada en caliente a la que se le aplica un proceso de conformado en frío que concluye con una soldadura longitudinal para cerrar el perfil.

Este proceso de fabricación hace que las zonas de doblado sufran un proceso de endurecimiento por deformación en el cual el acero sufre un aumento local del límite elástico y del módulo de elasticidad a costa de perder ductilidad. Por otra parte las zonas cercanas al cordón de soldadura se verán afectadas por tensiones residuales.

Para la obtención de los perfiles a rellenar se ha partido de tubos de 6 m de longitud de los que se han obtenido tanto los especímenes como las probetas para ensayar.



Figura 29. Proceso de corte de los tubos. Hernandez-Figueirido, 2012 [20]

Para obtener los especímenes de 300 mm de longitud se procedió a cortar los tubos mediante una tronzadora con lubricación para evitar que un calentamiento excesivo mermara las propiedades físicas del acero. Por otro lado se realizó un nivelado de la tronzadora, así como un control del posicionamiento de los tubos para realizar el corte de la manera más perpendicular posible y evitar así que las irregularidades en el corte dificultasen la correcta aplicación de carga en el posterior ensayo.

Por otra parte para poder caracterizar el acero se optó por ensayar a compresión simple centrada pequeños pilares de 50 mm de longitud obteniendo la curva tensión deformación de este.

6.4 DESCRIPCIÓN DE LOS BANCOS DE ENSAYO

6.4.1 Apoyos

Para poder aplicar las excentricidades para los ensayos de carga axial de compresión excéntrica, se tuvieron que diseñar unos apoyos que permitiesen la aplicación de un rango de excentricidades de forma ágil y precisa para cualquier tipo de geometría de la sección, además de asegurar una aplicación de carga homogénea en toda la sección. Se describen los apoyos a continuación.

- Apoyo del pistón

Formado por un carro móvil que permite el desplazamiento en la dirección de carga del apoyo. Sobre este carro van montados un punzón, un portapunzón y una hembra que recibirá la carga del punzón y que sirve de apoyo del pilar repartiéndola a toda la sección.

- Apoyo contrario al pistón

Formado por una hembra o cabeza de punzón donde va apoyado el extremo opuesto del pilar.



Figura 30. Apoyos del banco de ensayos

La existencia del punzón y la hembra permiten que durante la aplicación de carga excéntrica exista una ligera rotación de los apoyos, esta facilita la aplicación de carga de forma paralela al apoyo, aún incluso, cuando el pilar se encuentra flexionado.

Las modificaciones van más allá, ya que el pórtico de ensayos no estaba diseñado para ensayar este tipo de pilares tan cortos, por lo que se tuvo que añadir dos perfiles IPE 500 anclados al carro móvil original del pórtico para permitir su ensayo. Estos perfiles cuentan con cartelas adicionales de rigidez para ser lo suficientemente rígido el apoyo para no influir con deflexiones en los resultados.

Como se ha comentado anteriormente se ha construido un sistema que permite la aplicación de excentricidades. Este consiste en sendas plataformas situadas en cada apoyo sobre las que apoya el pilar, la cual se puede regular hacia arriba o hacia abajo según la excentricidad a aplicar y la geometría de la sección, por medio de dos mecanismos formados por un husillo con una manivela y una tuerca situados en cada apoyo.



Figura 31. Vista del mecanismo de centrado

6.4.2 Pórticos de ensayo

Para el correcto desarrollo de la campaña experimental se ha hecho uso de dos pórticos de ensayos, existentes en las infraestructuras de la Universitat Jaume I, los cuales eran capaces de ejercer las fuerzas necesarias para el desempeño su cometido y de recoger los datos del ensayo.

Pórtico para probetas de hormigón

Este pórtico de la marca Ibertest situado en el taller de Arquitectura Técnica está especialmente diseñado para el ensayo de probetas de hormigón, las cuales han sido explicadas con anterioridad. Este sistema consta de dos cabezas, la superior es fija mientras que la inferior permite la utilización de varios platos de apoyo dependiendo de la geometría, pudiendo realizar hasta 3000 kN de fuerza. Su uso se ha limitado a la obtención de la resistencia característica del hormigón utilizado para rellenar los perfiles mixtos.



Figura 32. Pórtico para probetas de hormigón

Funciona de la siguiente manera, se posiciona una probeta refrentada la cual se va a ensayar sobre un plato de soporte el cual tiene unas marcas que nos ayudaran en su colocación. Posteriormente se programa la fuerza constante de descenso del pistón, se cierra la puerta de protección y se procede a realizar el ensayo. El pistón comienza a descender hasta presionar la probeta, y sigue presionando hasta el colapso de la misma quedando registrada el axil máximo de compresión que ha aguantado la probeta, esta será la resistencia característica del hormigón utilizado para rellenar los pilares mixtos.

En este caso, al tratarse el hormigón de alta resistencia de un material frágil, se dispone de una camisa de goma alrededor de las probetas para evitar la proyección de fragmentos ante el fallo súbito de las probetas debido a su gran cantidad de energía acumulada.

Pórtico horizontal

Se trata de un pórtico de la marca Ibertest, el cual se encuentra situado en el Laboratorio de Estructuras y Construcción. Está formado por un bastidor, un actuador y la losa de carga y cuenta con la capacidad de ejercer 5000 kN de fuerza y la posibilidad de ensayar pilares hasta 4,5 m de longitud. Se trata de un pórtico autoportante por lo que no transmite esfuerzos a la losa de carga más allá de su peso propio.

Este pórtico está formado por una estructura muy rígida que evita que las deflexiones del bastidor influyan en la toma de resultados. Además, se ha diseñado un sistema para que el actuador no reciba esfuerzos cortantes, lo que acortaría su vida útil drásticamente, y con el que se ha conseguido que el carro móvil tenga impedido su giro o torsión, causados por la aplicación de excentricidades en la carga.

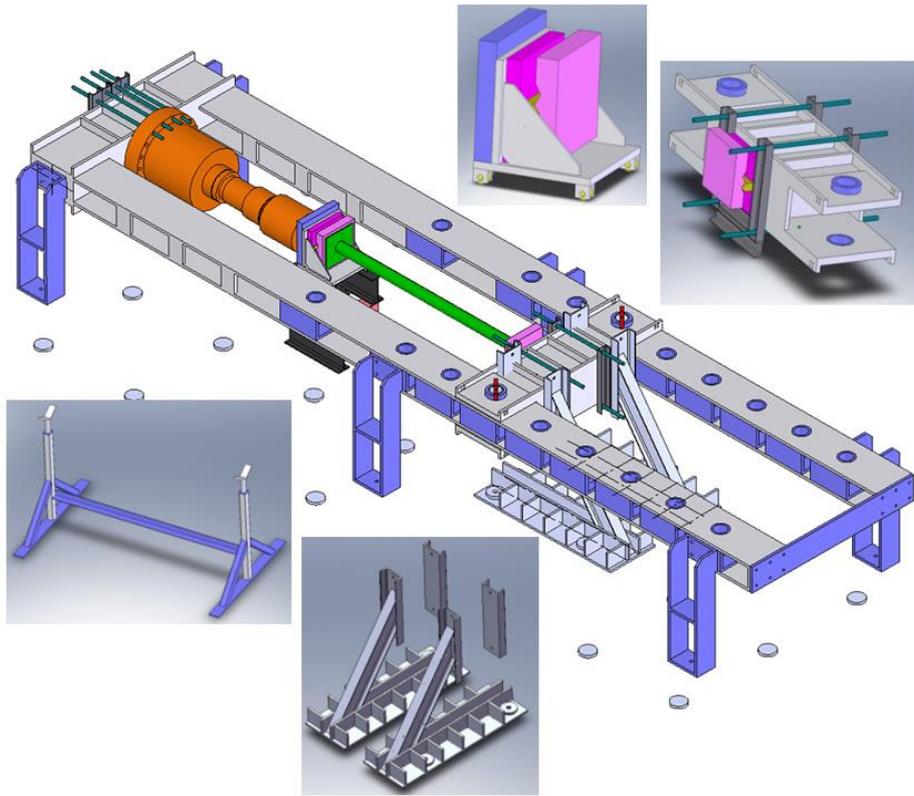


Figura 33. Modelo CAD del pórtico horizontal y sus componentes. Hernández-Figueirido, 2012 [20]

Como se ha comentado en el anterior apartado Apoyos, se realizaron una serie de modificaciones para permitir el ensayo de pilares cortos sin comprometer la rigidez del sistema, que daría lugar a errores de medida por la rotación en los apoyos.



Figura 34. Pórtico horizontal

El pórtico cuenta con la opción de monitorizar la deformación del bastidor mediante 4 galgas extensiométricas situadas en 4 puntos del mismo, así como también la flecha máxima del pilar por medio de un LVDT (Transformador diferencial de variación lineal). Durante nuestra campaña experimental no ha hecho falta hacer uso de estos instrumentos de medida al ser los pilares de poca longitud.

Por otro parte, el actuador del pórtico es accionado por un grupo hidráulico cerrado proporcionado por el mismo fabricante del pórtico de ensayos, Ibertest. El actuador permite la medida de la tensión ejercida y del desplazamiento axial del actuador gracias a una célula de carga y captador de desplazamiento, respectivamente.

El sistema hidráulico está controlado a su vez mediante software informático que nos permitirá establecer el avance del pistón por fuerza aplicada o por desplazamiento axial gracias a los transductores comentados anteriormente.

6.5 CAPTURA DE DATOS

La captura de datos se realizaba con el software de ensayos de Ibertest, dando como resultado del ensayo la gráfica fuerza axial – desplazamiento axial como la que se presenta a continuación.

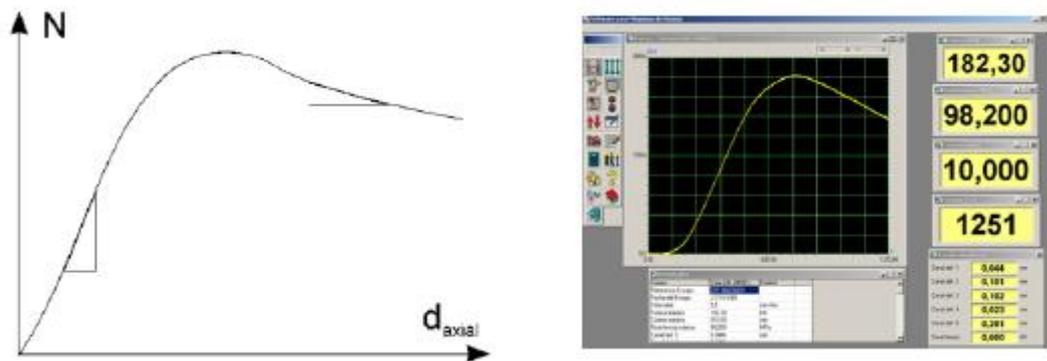


Figura 35. Curva fuerza-desplazamiento obtenida mediante el software de Ibertest. Hernandez-Figueirido, 2012 [20]

Como se puede apreciar en la gráfica aparecen dos zonas de comportamiento distinto. En la primera, tendremos un comportamiento cuasi-lineal del pilar en el que hay que aumentar la tensión aplicada en gran medida para conseguir un desplazamiento significativo. Tras el pico de máxima tensión, se observa un gran incremento del desplazamiento para unas tensiones inferiores a la máxima.

6.6 PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

El procedimiento de ensayo era el siguiente:

En primer lugar, se marcaban los ejes de simetría del pilar en todas sus caras colocándolo sobre un plano de la planta del perfil a escala 1:1 para poder o bien centrarlo, o aplicarle una excentricidad determinada.



Figura 36. Marcado de perfiles

Posteriormente, se colocaba el pilar en el carro de ensayos y se posicionaba alineando las marcas previamente realizadas, con las existentes en los apoyos gracias a unas plataformas regulables.



Figura 37. Alineación de los apoyos según la excentricidad

Como se aprecia en la figura, para poder aplicar las diferentes excentricidades en el ensayo se utilizaban unas líneas marcadas en las placas de apoyo, siendo la de más abajo la correspondiente a la excentricidad 0 mm.

En cada tanda de ensayos, se requería la puesta a punto de la máquina. Por ello, se realizaban varios ciclos de avance-retroceso controlando que no se llegase a comprimir el espécimen antes de su ensayo. Con estos ciclos, se pretendía posicionar el pistón en la posición inicial correcta y la eliminación de posibles burbujas de aire en el circuito hidráulico.

A continuación, se rellenaba la ficha de la columna con las características de la misma en el programa de toma de datos y se fijaba el parámetro de ensayo, en este caso un avance del pistón de 1 mm/min. Antes de proceder al ensayo, se configuraba el programa para mostrar la fuerza realizada por el pistón dependiendo del avance de este. Una vez la resistencia del pilar bajaba del 20% de su valor máximo, se paraba el ensayo y se guardaban los datos del pilar para su posterior tratamiento.

En el caso de los ensayos de pilares rellenos de agua, el procedimiento sólo variaba en el marcado de los ejes de simetría ya que no se disponía de planos de estos, por lo que se marcaban midiendo la posición de los ejes de simetría.

6.7 RESUMEN DE ENSAYOS

A cada uno de los ensayos se le identificó con una denominación diferente siguiendo las siguientes estructuras:

CFST

Pilares de sección rectangular/cuadrada

R-S/a.b.c_d_ee.fff_gg.(h) (i_j) k

Donde

- **R-S** indica la forma de la sección, *R* para secciones rectangulares y *S* para secciones cuadradas
- **a** indica el ancho *b* del perfil en mm
- **b** indica el alto *h* del perfil en mm
- **c** indica el espesor *t* del perfil e mm
- **d** indica la longitud del pilar en mm
- **ee** indica la resistencia del hormigón en MPa o *w* en caso de estar relleno de agua
- **fff** indica el límite elástico nominal del acero en MPa
- **gg** indica la excentricidad aplicada en mm
- **h** indica el número de ensayo bajo estas condiciones, si hubiese repetición de ensayos.
- **i_j** indica el tubo del cual se ha confeccionado el pilar.
- **k** indica el eje de ensayo, *s* para eje fuerte y *w* para eje débil.

Pilares de sección circular

C/a,b_c_dd.eee_ff.(g) (h_i)

Donde

- **C** indica la forma de la de la sección, en este caso circular.
- **a** indica el diámetro externo d del perfil en mm
- **b** indica el espesor t del perfil en mm
- **c** indica la longitud del perfil en mm
- **dd** indica la resistencia del hormigón en MPa o w en caso de estar relleno de agua
- **eee** indica el límite elástico nominal del acero en MPa
- **ff** indica la excentricidad aplicada en mm
- **g** indica el número de ensayo bajo estas condiciones, si hubiese repetición de ensayos.
- **h_i** indica el tubo del cual se ha confeccionado el pilar.

Pilares de sección ovalada

Ov./a.b.c_d_ee.fff_gg.(h) (i_j)

Donde

- **Ov.** indica la forma de la de la sección, en este caso ovalada.
- **a** indica la distancia entre centros de los círculos del perfil ovalado en mm
- **b** indica el diámetro de los círculos del perfil ovalado en mm
- **c** indica el espesor t del perfil e mm
- **d** indica la longitud del pilar en mm
- **ee** indica la resistencia del hormigón en MPa o w en caso de estar relleno de agua
- **fff** indica el límite elástico nominal del acero en MPa
- **gg** indica la excentricidad aplicada en mm
- **h** indica el número de ensayo bajo estas condiciones, si hubiese repetición de ensayos.
- **i_j** indica el tubo del cual se ha confeccionado el pilar.

CFDSST

X-Y-a-bb-cc d

Donde

- **X** indica la forma de la de la sección del tubo exterior , R para secciones rectangulares, S para secciones cuadradas y C para secciones circulares
- **Y** indica la forma de la de la sección del tubo interior , R para secciones rectangulares, S para secciones cuadradas y C para secciones circulares
- **a** indica la serie a la que pertenece, a o b.

- **bb** indica la resistencia del hormigón en MPa
- **cc** indica la excentricidad aplicada en mm
- **d** indica el eje de ensayo, s para eje fuerte y w para eje débil.

A continuación se muestran tanto los ensayos realizados esta campaña como los ensayos de campañas anteriores que han servido para realizar las comparativas.

Tabla 3. Resumen de ensayos de perfiles de sección rectangular/cuadrada

Denominación	Tubo	b (mm)	h (mm)	t (mm)
S125.125.3_300_275.30_00 (119)	119	125	125	3
S125.125.3_300_275.30_05 (119)	119	125	125	3
S125.125.3_300_275.30_10 (119)	119	125	125	3
S125.125.3_300_275.30_20 (119)	119	125	125	3
S125.125.3_300_275.30_50 (119)	119	125	125	3
S125.125.3_300_275.90_00 (119)	119	125	125	3
S125.125.3_300_275.90_05 (119)	119	125	125	3
S125.125.3_300_275.90_10 (119)	119	125	125	3
S125.125.3_300_275.90_20 (119)	119	125	125	3
S125.125.3_300_275.90_20 (119)	119	125	125	3
S125.125.3_300_275.90_50 (119)	119	125	125	3
S125.125.3_300_275.water_00 (119)	119	125	125	3
S125.125.4_300_275.30_00 (121)	121	125	125	4
S125.125.4_300_275.30_05 (120)	120	125	125	4
S125.125.4_300_275.30_10 (120)	120	125	125	4
S125.125.4_300_275.30_20 (120)	120	125	125	4
S125.125.4_300_275.30_25 (120)	120	125	125	4
S125.125.4_300_275.30_50 (120)	120	125	125	4
S125.125.4_300_275.90_00 (121)	121	125	125	4
S125.125.4_300_275.90_05 (122)	122	125	125	4
S125.125.4_300_275.90_10 (122)	122	125	125	4
S125.125.4_300_275.90_20 (121)	121	125	125	4
S125.125.4_300_275.90_25 (124)	124	125	125	4
S125.125.4_300_275.90_50 (124)	124	125	125	4
S125.125.4_300_275.water_00 (121)	121	125	125	4
S100.100.4_300_275.30_00(a) (7)	7	100	100	4
S100.100.4_300_275.30_05(a) (12)	12	100	100	4
S100.100.4_300_275.30_10(a) (4)	4	100	100	4
S100.100.4_300_275.30_20(a) (1)	1	100	100	4
S100.100.4_300_275.30_25(a) (6)	6	100	100	4
S100.100.4_300_275.30_50(a) (12)	12	100	100	4
S100.100.4_300_275.30_00(b) (13)	13	100	100	4
S100.100.4_300_275.30_05(b) (16)	16	100	100	4
S100.100.4_300_275.30_10(b) (16)	16	100	100	4
S100.100.4_300_275.30_20(b) (16)	16	100	100	4
S100.100.4_300_275.30_25(b) (16)	16	100	100	4

Análisis teórico y experimental de pilares mixtos tipo CFST empleando hormigón de alta resistencia y agua como material de relleno

Denominación	Tubo	b (mm)	h (mm)	t (mm)
S100.100.4_300_275.30_50(b) (16)	16	100	100	4
S100.100.4_300_275.90_00 (13)	13	100	100	4
S100.100.4_300_275.90_05 (5)	5	100	100	4
S100.100.4_300_275.90_10 (4)	4	100	100	4
S100.100.4_300_275.90_20 (8)	8	100	100	4
S100.100.4_300_275.90_25 (6)	6	100	100	4
S100.100.4_300_275.90_50 (2)	2	100	100	4
S100.100.4_300_275.w_00 (13)	13	100	100	4
R150.100.4_300_275.30_00 (38) w	38	150	100	4
R150.100.4_300_275.30_05 (39) w	39	150	100	4
R150.100.4_300_275.30_10 (39) w	39	150	100	4
R150.100.4_300_275.30_20 (39) w	39	150	100	4
R150.100.4_300_275.30_25 (39) w	39	150	100	4
R150.100.4_300_275.30_50 (38) w	38	150	100	4
R150.100.4_300_275.90_00 (38) w	38	150	100	4
R150.100.4_300_275.90_05 (20) w	20	150	100	4
R150.100.4_300_275.90_10 (23) w	23	150	100	4
R150.100.4_300_275.90_20 (19) w	19	150	100	4
R150.100.4_300_275.90_25 (24) w	24	150	100	4
R150.100.4_300_275.90_50 (18) w	18	150	100	4
R150.100.4_300_275.w_00 (18) w	38	150	100	4
R150.100.4_300_275.30_05 (93) s	93	100	150	4
R150.100.4_300_275.30_10 (93) s	93	100	150	4
R150.100.4_300_275.30_20 (93) s	93	100	150	4
R150.100.4_300_275.30_25 (93) s	93	100	150	4
R150.100.4_300_275.30_50 (93) s	93	100	150	4
R150.100.4_300_275.90_05 (22) s	22	100	150	4
R150.100.4_300_275.90_10 (40) s	40	100	150	4
R150.100.4_300_275.90_20 (41) s	41	100	150	4
R150.100.4_300_275.90_25 (17) s	17	100	150	4
R150.100.4_300_275.90_50 (21) s	21	100	150	4
R150.100.5_300_275.30_00 (33) w	33	150	100	5
R150.100.5_300_275.30_05 (33) w	33	150	100	5
R150.100.5_300_275.30_10 (37) w	37	150	100	5
R150.100.5_300_275.30_20 (37) w	37	150	100	5
R150.100.5_300_275.30_25 (36) w	36	150	100	5
R150.100.5_300_275.30_50 (36) w	36	150	100	5
R150.100.5_300_275.90_00 (33) w	33	150	100	5
R150.100.5_300_275.90_05 (28) w	28	150	100	5
R150.100.5_300_275.90_10 (31) w	31	150	100	5
R150.100.5_300_275.90_20 (105) w	105	150	100	5
R150.100.5_300_275.90_25 (27) w	27	150	100	5
R150.100.5_300_275.90_50 (32) w	32	150	100	5

Denominación	Tubo	b (mm)	h (mm)	t (mm)
R150.100.5_300_275.w_00 (33) w	33	150	100	5
R150.100.5_300_275.30_05 (34) s	34	100	150	5
R150.100.5_300_275.30_10 (34) s	34	100	150	5
R150.100.5_300_275.30_20 (34) s	34	100	150	5
R150.100.5_300_275.30_25 (34) s	34	100	150	5
R150.100.5_300_275.30_50 (34) s	34	100	150	5
R150.100.5_300_275.90_05 (26) s	26	100	150	5
R150.100.5_300_275.90_10 (35) s	35	100	150	5
R150.100.5_300_275.90_20 (29) s	29	100	150	5
R150.100.5_300_275.90_25 (30) s	30	100	150	5
R150.100.5_300_275.90_50 (25) s	25	100	150	5
R200.120.3_300_275.30_00 (86) w	86	200	120	3
R200.120.3_300_275.90_00 (86) w	86	200	120	3
R200.120.3_300_275.90_05 (86) w	86	200	120	3
R200.120.3_300_275.90_10 (86) w	86	200	120	3
R200.120.3_300_275.90_20 (86) w	86	200	120	3
R200.120.3_300_275.90_25 (86) w	86	200	120	3
R200.120.3_300_275.90_50 (86) w	86	200	120	3
R200.120.3_300_275.90_10 (86) s	86	120	200	3
R200.120.3_300_275.90_50 (86) s	86	120	200	3
R200.120.3_300_275.w_00 (86) s	86	120	200	3

Tabla 4. Resumen de ensayos de pilares de sección circular.

Denominación	Tubo	D (mm)	t (mm)
C168.3,2.8_300_275.30_00 (70)	70	168.30	2.80
C168.3,2.8_300_275.30_05 (70)	70	168.30	2.80
C168.3,2.8_300_275.30_10 (70)	70	168.30	2.80
C168.3,2.8_300_275.30_20 (70)	70	168.30	2.80
C168.3,2.8_300_275.30_25 (70)	70	168.30	2.80
C168.3,2.8_300_275.30_50 (70)	70	168.30	2.80
C168.3,2.8_300_275.90_00 (70)	70	168.30	2.80
C168.3,2.8_300_275.90_05 (70)	70	168.30	2.80
C168.3,2.8_300_275.90_10 (70)	70	168.30	2.80
C168.3,2.8_300_275.90_20 (70)	70	168.30	2.80
C168.3,2.8_300_275.90_25 (70)	70	168.30	2.80
C168.3,2.8_300_275.90_50 (70)	70	168.30	2.80
C168.3,2.8_300_275.w_00 (70)	70	168.30	2.80
C159,3_300_275.30_00 (71)	71	159.00	3.00
C159,3_300_275.30_05 (72)	72	159.00	3.00
C159,3_300_275.30_10 (73)	73	159.00	3.00
C159,3_300_275.30_20 (74)	74	159.00	3.00
C159,3_300_275.30_25 (75)	75	159.00	3.00

Denominación	Tubo	D (mm)	t (mm)
C159,3_300_275.30_50 (76)	76	159.00	3.00
C159,3_300_275.90_00 (71)	71	159.00	3.00
C159,3_300_275.90_05 (72)	72	159.00	3.00
C159,3_300_275.90_10 (73)	73	159.00	3.00
C159,3_300_275.90_20 (74)	74	159.00	3.00
C159,3_300_275.90_25 (75)	75	159.00	3.00
C159,3_300_275.90_50 (76)	76	159.00	3.00
C159,3_300_275.w_00 (77)	77	159.00	3.00
C101.6,2.0_300_275_30_00 (81)	81	101.60	2.00
C101.6,2.0_300_275_30_05 (81)	81	101.60	2.00
C101.6,2.0_300_275_30_10 (81)	81	101.60	2.00
C101.6,2.0_300_275_30_20 (81)	81	101.60	2.00
C101.6,2.0_300_275_30_25 (81)	81	101.60	2.00
C101.6,2.0_300_275_30_50 (81)	81	101.60	2.00
C101.6,2.0_300_275_90_00 (81)	81	101.60	2.00
C101.6,2.0_300_275_90_05 (81)	81	101.60	2.00
C101.6,2.0_300_275_90_10 (81)	81	101.60	2.00
C101.6,2.0_300_275_90_20 (81)	81	101.60	2.00
C101.6,2.0_300_275_90_25 (81)	81	101.60	2.00
C101.6,2.0_300_275_90_50 (81)	81	101.60	2.00
C101.6,2.0_300_275_w_00 (81)	81	101.60	2.00
C108,2_300_355.30_00 (58)	58	108.00	2.00
C108,2_300_355.30_05 (67)	67	108.00	2.00
C108,2_300_355.30_10 (53)	53	108.00	2.00
C108,2_300_355.30_20 (62)	62	108.00	2.00
C108,2_300_355.30_25 (63)	63	108.00	2.00
C108,2_300_355.30_50 (61)	61	108.00	2.00
C108,2_300_355.90_00 (58)	58	108.00	2.00
C108,2_300_355.90_05 (67)	67	108.00	2.00
C108,2_300_355.90_10 (53)	53	108.00	2.00
C108,2_300_355.90_20 (65)	65	108.00	2.00
C108,2_300_355.90_25 (64)	64	108.00	2.00
C108,2_300_355.90_50 (58)	58	108.00	2.00
C108,2_300_355.w_00 (58)	58	108.00	2.00
C120.2,5_300_275.30_00 (83)	83	120.00	2.50
C120.2,5_300_275.30_05 (83)	83	120.00	2.50
C120.2,5_300_275.30_10 (83)	83	120.00	2.50
C120.2,5_300_275.30_20 (83)	83	120.00	2.50
C120.2,5_300_275.30_25 (83)	83	120.00	2.50
C120.2,5_300_275.30_50 (83)	83	120.00	2.50
C120.2,5_300_275.90_00 (83)	83	120.00	2.50
C120.2,5_300_275.90_05 (83)	83	120.00	2.50
C120.2,5_300_275.90_10 (83)	83	120.00	2.50

Denominación	Tubo	D (mm)	t (mm)
C120.2,5_300_275.90_20 (83)	83	120.00	2.50
C120.2,5_300_275.90_25 (83)	83	120.00	2.50
C120.2,5_300_275.90_50 (83)	83	120.00	2.50
C120.2,5_300_275.w_00 (83)	83	120.00	2.50
C100.3_300_275.30_00 (133)	133	100.00	3.00
C100.3_300_275.30_05 (127)	127	100.00	3.00
C100.3_300_275.30_20 (127)	127	100.00	3.00
C100.3_300_275.30_50 (131)	131	100.00	3.00
C100.3_300_275.90_00 (131)	131	100.00	3.00
C100.3_300_275.90_05 (127)	127	100.00	3.00
C100.3_300_275.90_20 (127)	127	100.00	3.00
C100.3_300_275.90_50 (131)	131	100.00	3.00
C100.3_300_275.w_00 (131)	131	100.00	3.00
C101,6.5_300_275.30_00 (132)	132	101.60	5.00
C101,6.5_300_275.30_10 (130)	130	101.60	5.00
C101,6.5_300_275.30_50 (130)	130	101.60	5.00
C101,6.5_300_275.90_00 (132)	132	101.60	5.00
C101,6.5_300_275.90_05 (132)	132	101.60	5.00
C101,6.5_300_275.90_10 (130)	130	101.60	5.00
C101,6.5_300_275.90_50 (130)	130	101.60	5.00
C101,6.5_300_275.w_00 (132)	132	101.60	5.00
C160.6_300_275.30_00 (129)	129	160.00	6.00
C160.6_300_275.90_00 (129)	129	160.00	6.00
C101,6.3_300_275.30_00 (128)	128	101.60	3.00
C101,6.3_300_275.90_00 (128)	128	101.60	3.00

Tabla 5. Resumen de ensayos de perfiles de sección ovalada.

Denominación	Tubo	b (mm)	h (mm)	t (mm)
ov. 120.50.2_300_275.30_00 (126)	126	120	50	2
ov. 120.50.2_300_275.30_20 (126)	126	120	50	2
ov. 120.50.2_300_275.30_50 (126)	126	120	50	2
ov. 120.50.2_300_275.90_00 (126)	126	120	50	2
ov. 120.50.2_300_275.90_05 (126)	126	120	50	2
ov. 120.50.2_300_275.90_10 (126)	126	120	50	2
ov. 120.50.2_300_275.90_20 (126)	126	120	50	2
ov. 120.50.2_300_275.90_25 (126)	126	120	50	2
ov. 120.50.2_300_275.90_50 (126)	126	120	50	2
ov. 120.50.2_300_275.w_00 (126)	126	120	50	2

Tabla 6. Resumen de ensayos de perfiles de sección circular-circular

Denominación	Tubo exterior	Tubo interior	D (mm)	to (mm)	d (mm)	ti (mm)
C-C-a-30-00	49	60	219.1	3	108	2

Análisis teórico y experimental de pilares mixtos tipo CFST empleando hormigón de alta resistencia y agua como material de relleno

Denominación	Tubo exterior	Tubo interior	D (mm)	to (mm)	d (mm)	ti (mm)
C-C-a-30-05	42	59	219.1	3	108	2
C-C-a-30-10	42	59	219.1	3	108	2
C-C-a-30-20	42	59	219.1	3	108	2
C-C-a-30-25	50	59	219.1	3	108	2
C-C-a-30-50	52	59	219.1	3	108	2
C-C-a-90-00	49	60	219.1	3	108	2
C-C-a-90-05	43	57	219.1	3	108	2
C-C-a-90-10	43	57	219.1	3	108	2
C-C-a-90-20	43	57	219.1	3	108	2
C-C-a-90-25	48	57	219.1	3	108	2
C-C-a-90-50	52	62	219.1	3	108	2
C-C-b-30-00	49	82	219.1	3	101.6	2
C-C-b-30-05	52	82	219.1	3	101.6	2
C-C-b-30-10	52	82	219.1	3	101.6	2
C-C-b-30-20	52	82	219.1	3	101.6	2
C-C-b-30-25	52	82	219.1	3	101.6	2
C-C-b-30-50	52	82	219.1	3	101.6	2
C-C-b-90-00	49	82	219.1	3	101.6	2
C-C-b-90-05	52	82	219.1	3	101.6	2
C-C-b-90-10	52	82	219.1	3	101.6	2
C-C-b-90-20	52	82	219.1	3	101.6	2
C-C-b-90-25	52	82	219.1	3	101.6	2
C-C-b-90-50	52	82	219.1	3	101.6	2

Tabla 7. Resumen de ensayos de perfiles de sección circular-rectangular.

Denominación	Tubo exterior	Tubo interior	D (mm)	to (mm)	b (mm)	h (mm)	ti (mm)
C-R-a-30-00 w	49	87	219.1	3	100	80	2
C-R-a-30-05 w	45	87	219.1	3	100	80	2
C-R-a-30-10 w	45	87	219.1	3	100	80	2
C-R-a-30-20 w	45	87	219.1	3	100	80	2
C-R-a-30-25 w	49	87	219.1	3	100	80	2
C-R-a-30-50 w	49	87	219.1	3	100	80	2
C-R-a-90-00 w	49	87	219.1	3	100	80	2
C-R-a-90-05 w	46	87	219.1	3	100	80	2
C-R-a-90-10 w	46	87	219.1	3	100	80	2
C-R-a-90-20 w	46	87	219.1	3	100	80	2
C-R-a-90-25 w	49	87	219.1	3	100	80	2
C-R-a-90-50 w	49	87	219.1	3	100	80	2
C-R-b-30-05 s	50	88	219.1	3	80	100	2

C-R-b-30-10 s	50	88	219.1	3	80	100	2
C-R-b-30-20 s	50	88	219.1	3	80	100	2
C-R-b-30-25 s	50	88	219.1	3	80	100	2
C-R-b-30-50 s	50	88	219.1	3	80	100	2
C-R-b-90-05 s	50	88	219.1	3	80	100	2
C-R-b-90-10 s	50	88	219.1	3	80	100	2
C-R-b-90-20 s	50	88	219.1	3	80	100	2
C-R-b-90-25 s	50	88	219.1	3	80	100	2
C-R-b-90-50 s	50	88	219.1	3	80	100	2

7. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En este apartado se procede a comentar y analizar los resultados obtenidos en varias campañas experimentales de ensayos de pilares mixtos, tanto CFST como CFDSST, realizadas en la UJI. El análisis de los resultados se ha realizado en base a diversos parámetros que se señalaban como influyentes en la bibliografía consultada. Por tanto, el siguiente análisis busca determinar la influencia de estos parámetros en el comportamiento seccional de los pilares.

7.1 INFLUENCIA DE LA EXCENRICIDAD Y EL TIPO DE HORMIGÓN

A continuación, se presentan los resultados de las comparaciones de pilares de las mismas dimensiones al variar la excentricidad con la que se aplica la carga y el tipo de hormigón de relleno.

S125.125.3_300_275

Esta serie de pilares tienen sección cuadrada, con un tubo de 125 mm de lado y 3 mm de espesor. Todos los pilares tienen una longitud de 300 mm y son de acero S275. Como se puede observar, de manera codificada, todos estos datos aparecen en el nombre de la serie.

A continuación, en la siguiente tabla se pueden observar la denominación de los pilares, los axiles máximos para cada espécimen y la resistencia experimental del hormigón de relleno.

Tabla 8. Resultados de la serie S125.125.3_300_275

<i>Denominación</i>	<i>f_{cexp} (MPa)</i>	<i>N_{exp} (kN)</i>
S125.125.3_300_275.30_00	46.67	824.50
S125.125.3_300_275.30_05	46.67	807.00
S125.125.3_300_275.30_10	46.67	808.50
S125.125.3_300_275.30_20	46.67	695.70
S125.125.3_300_275.30_50	46.67	702.70
S125.125.3_300_275.90_00	94.33	1441.20
S125.125.3_300_275.90_05	94.33	1562.20
S125.125.3_300_275.90_10	94.33	1316.80
S125.125.3_300_275.90_20	94.33	1174.20
S125.125.3_300_275.90_20	94.33	1207.30
S125.125.3_300_275.90_50	94.33	1019.20
S125.125.3_300_275.water_00	water	376.16

Hormigón de 30 MPa

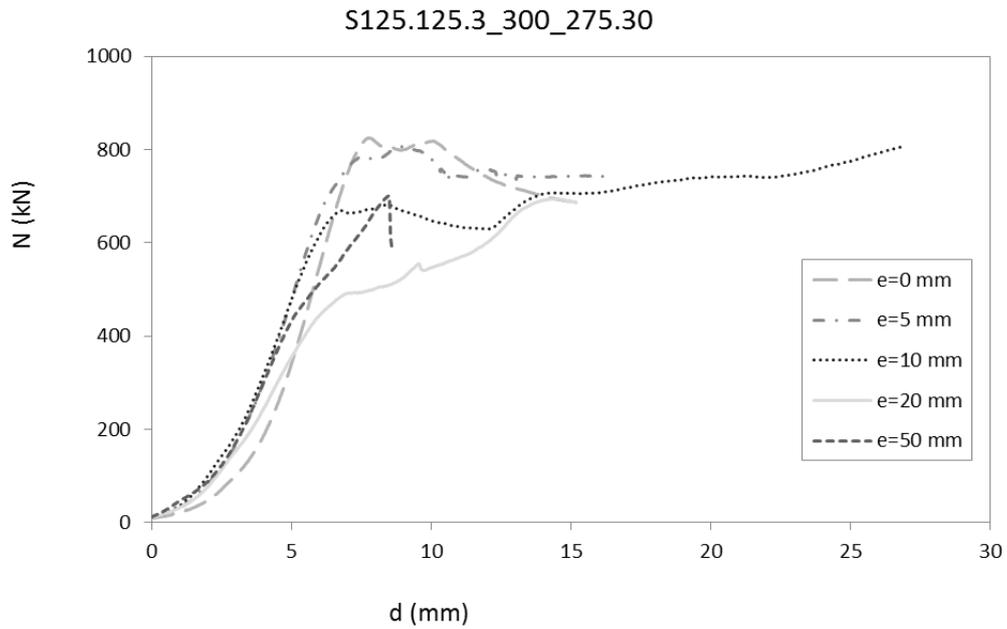


Figura 38. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie S125.125.3_300_275.30

En la *figura 38* se puede ver la comparación del comportamiento de las columnas de la subserie con relleno de hormigón de 30 MPa (S125.125.3_300_275.30) en términos de la variación de la carga axial con el acortamiento del pilar. Cada una de las curvas que se muestran corresponde a una excentricidad de aplicación de la carga diferente. Se puede apreciar un claro descenso de la carga máxima con el aumento de la excentricidad. Cabe reseñar el fallo frágil del espécimen con excentricidad 50 mm.

Hormigón de 90 MPa

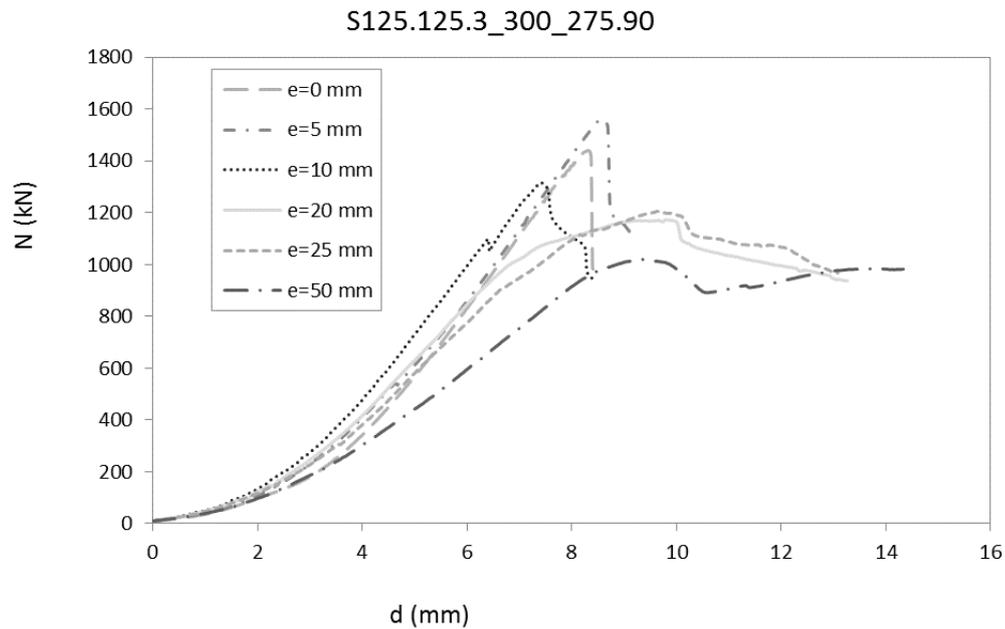


Figura 39. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie S125.125.3_300_275.90

Del mismo modo, se muestra en la *figura 39*, la variación del comportamiento con la excentricidad de la carga para la subserie con hormigón de 90 MPa (S125.125.3_300_275.90). En ella se aprecia un comportamiento frágil en los especímenes rellenos de hormigón de alta resistencia.

Excentricidades

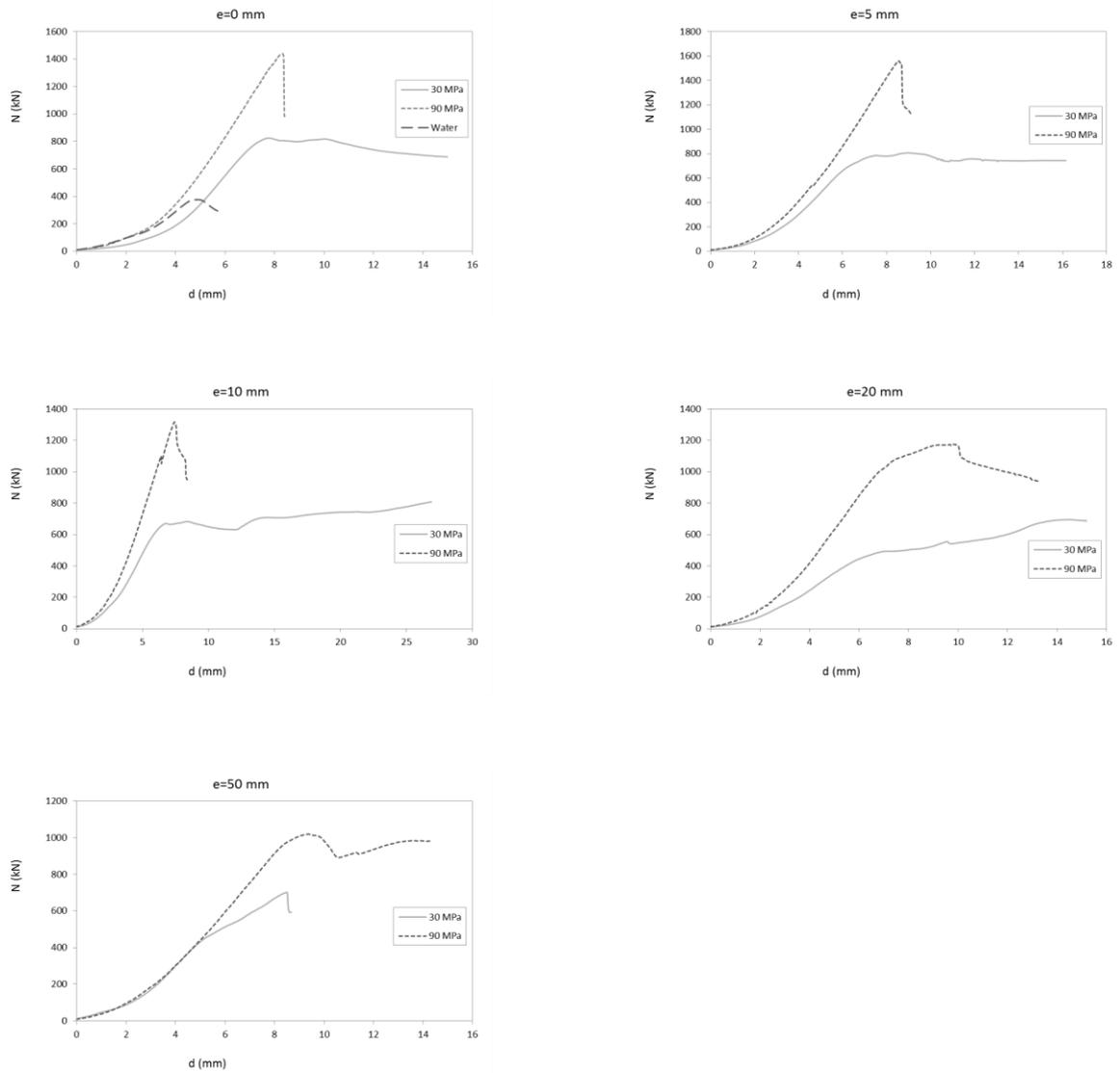


Figura 40. Curvas de carga- acortamiento axial para cada excentricidad. Serie S125.125.3_300_275

En la figura anterior se muestra de manera desglosada la información anterior. Para cada uno de los valores de excentricidad aplicados, se comparan las curvas de comportamiento obtenidas para cada tipo de hormigón de relleno (30MPa y 90MPa). Se puede observar para cada par de curvas, cómo las columnas con hormigón de alta resistencia alcanzan valores más elevados de carga última, pero presentan un comportamiento frágil. También se aprecia que la contribución del hormigón decrece cuando se le aplican excentricidades importantes, por lo que el valor de la carga última queda limitado por este fenómeno.

S125.125.4_300_275

Esta serie de pilares tienen sección cuadrada, con un tubo de 125 mm de lado y 4 mm de espesor.

La siguiente tabla contiene la denominación de los pilares, los axiles máximos para cada espécimen y la resistencia experimental del hormigón de relleno.

Tabla 9. Resultados de la serie S125.125.4_300_275

Denominación	$f_{c_{exp}}$ (MPa)	N_{exp} (kN)
S125.125.4_300_275.30_00	46.67	1159.20
S125.125.4_300_275.30_05	46.67	1012.80
S125.125.4_300_275.30_10	46.67	939.80
S125.125.4_300_275.30_20	46.67	922.70
S125.125.4_300_275.30_25	46.67	1004.70
S125.125.4_300_275.30_50	46.67	780.33
S125.125.4_300_275.90_00	94.33	1882.50
S125.125.4_300_275.90_05	94.33	1734.20
S125.125.4_300_275.90_10	94.33	1667.00
S125.125.4_300_275.90_20	94.33	1507.30
S125.125.4_300_275.90_25	94.33	1603.30
S125.125.4_300_275.90_50	94.33	1465.20
S125.125.4_300_275.water_00	water	584.80

Hormigón de 30 MPa

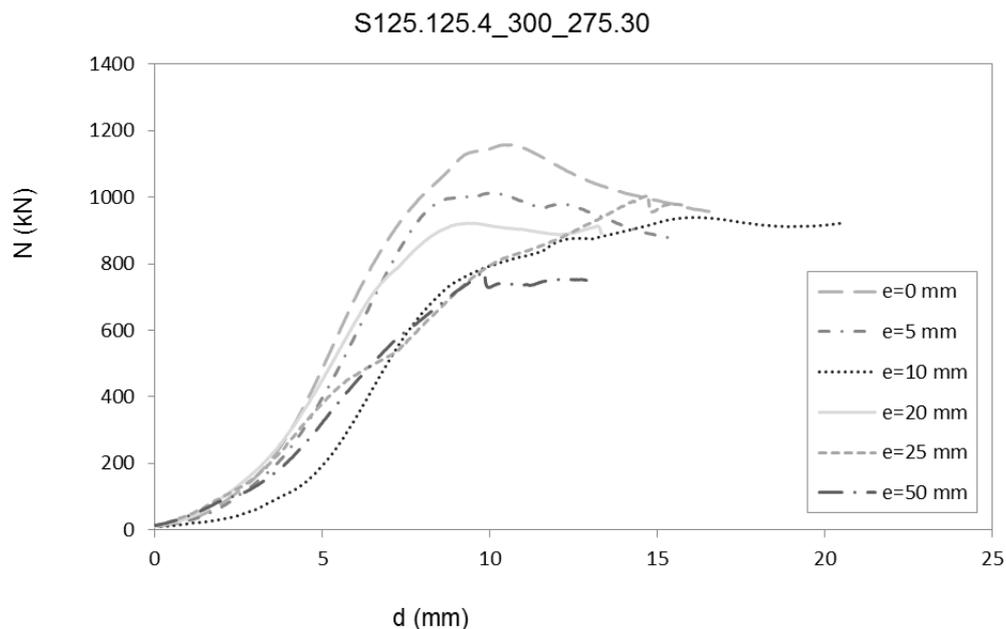


Figura 41. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie S125.125.4_300_275.30

En la figura anterior se observa la disminución de la longitud axial con la carga para la subserie S125.125.4_300_275.30. Cada curva está asociada a una excentricidad de carga diferente. Para estos pilares, se puede apreciar en general el efecto negativo de la excentricidad, que se hace más notable para el valor $e=50\text{mm}$.

Hormigón de 90 MPa

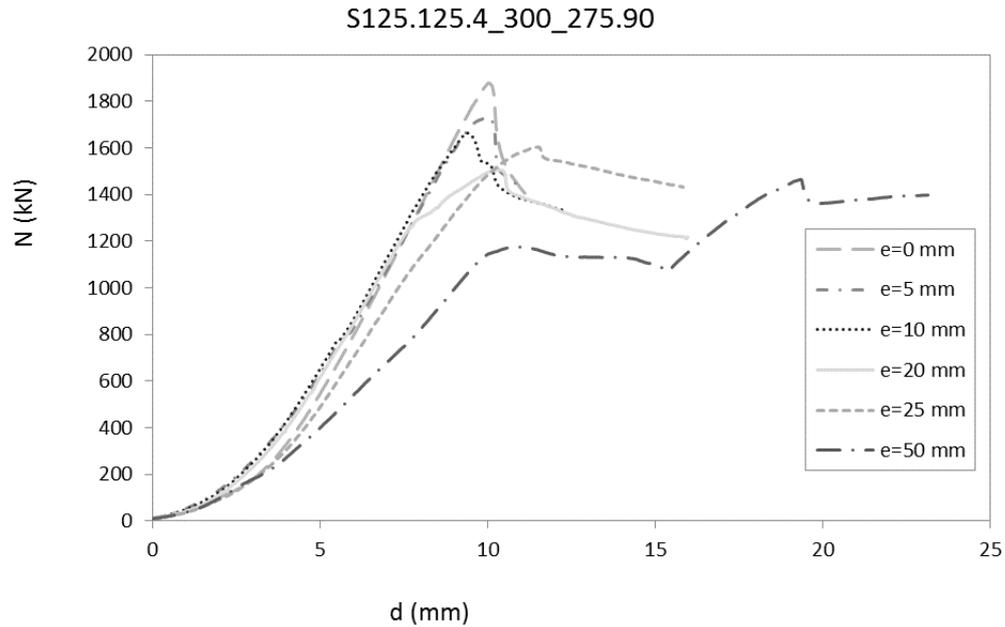


Figura 42. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie S125.125.4_300_275.90

Como en la figura anterior, esta muestra las curvas carga-acortamiento axial para la subserie rellena de hormigón de 90 MPa. Cada espécimen se ha ensayado con una excentricidad de carga diferente. En las curvas, se observa una ligera disminución de la carga máxima ante el aumento de la excentricidad.

Excentricidades

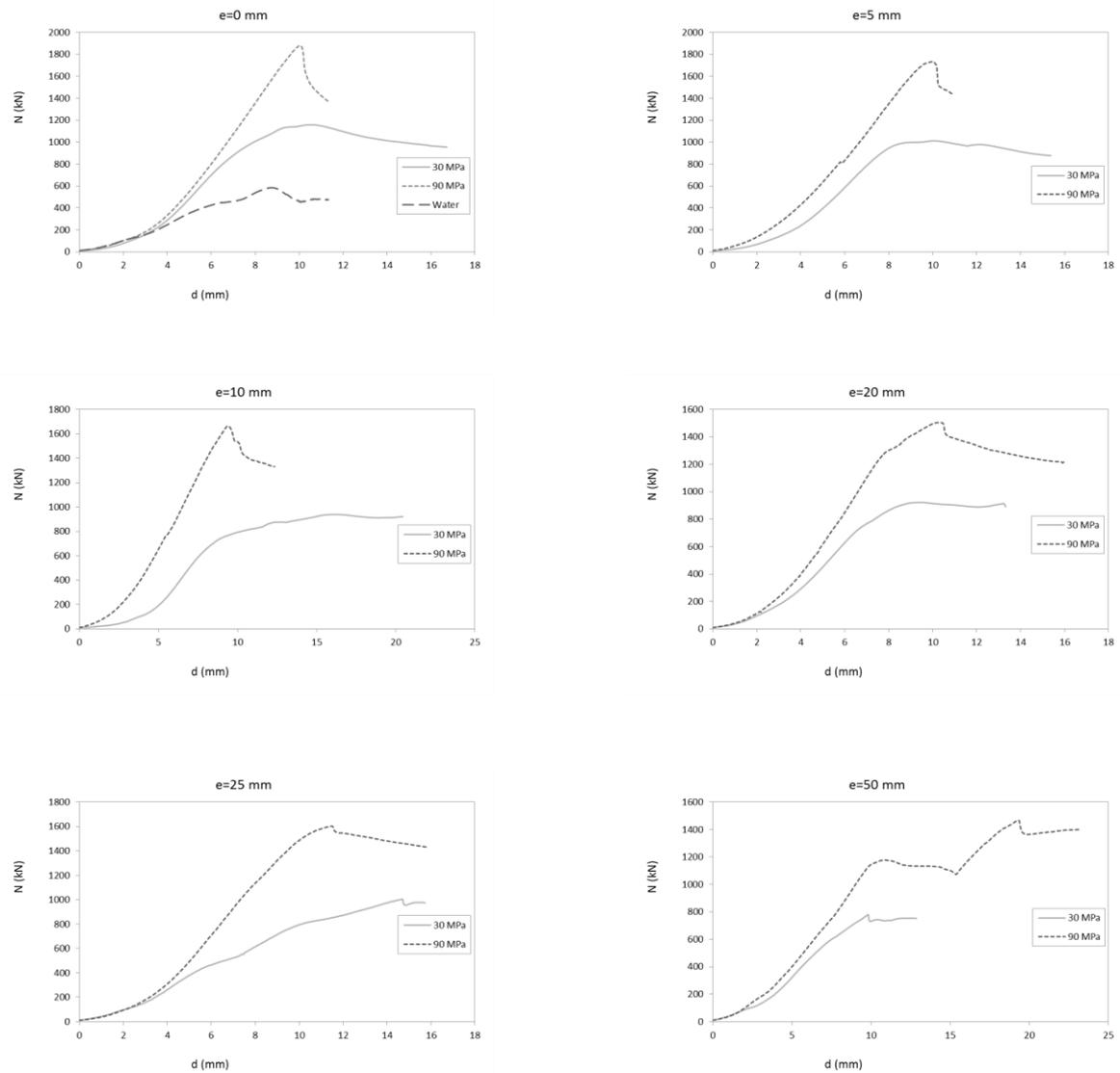


Figura 43. Curvas de carga- acortamiento axial para cada excentricidad. Serie S125.125.4_300_275

En la *figura 43* se muestra la información anterior desglosada para cada valor de la excentricidad. De nuevo, para esta geometría se observa la diferencia de comportamiento para cada tipo de hormigón, así como la disminución de la contribución del hormigón.

A partir de aquí solo se incluirán las gráficas desglosadas que muestren un comportamiento relevante, las demás se verán recogidas en el Anexo I.

S100.100.4_300_275

Esta serie de pilares tienen sección cuadrada, con un tubo de 100 mm de lado y 4 mm de espesor.

Dentro de esta serie se han ensayado dos grupos de pilares rellenos de hormigón de 30 MPa, a y b, para observar la repetitividad de los ensayos.

En la siguiente tabla se muestran los datos de dichos pilares.

Tabla 10. Resultados de la serie S100.100.4_300_275

<i>Denominación</i>	<i>f_{c_{exp}} (MPa)</i>	<i>N_{exp} (kN)</i>
S100.100.4_300_275.30_00(a)	31.35	860.30
S100.100.4_300_275.30_00(b)	39.93	886.00
S100.100.4_300_275.30_05(a)	31.35	868.30
S100.100.4_300_275.30_05(b)	39.93	898.80
S100.100.4_300_275.30_10(a)	31.35	811.00
S100.100.4_300_275.30_10(b)	39.93	919.50
S100.100.4_300_275.30_20(a)	31.35	881.20
S100.100.4_300_275.30_20(b)	39.93	912.00
S100.100.4_300_275.30_25(a)	31.35	853.80
S100.100.4_300_275.30_25(b)	39.93	912.80
S100.100.4_300_275.30_50(a)	31.35	777.50
S100.100.4_300_275.30_50(b)	39.93	796.00
S100.100.4_300_275.90_00	98.84	963.70
S100.100.4_300_275.90_05	98.84	1038.80
S100.100.4_300_275.90_10	98.84	987.50
S100.100.4_300_275.90_20	98.84	1041.80
S100.100.4_300_275.90_25	98.84	1086.70
S100.100.4_300_275.90_50	98.84	1005.30

Hormigón de 30 MPa

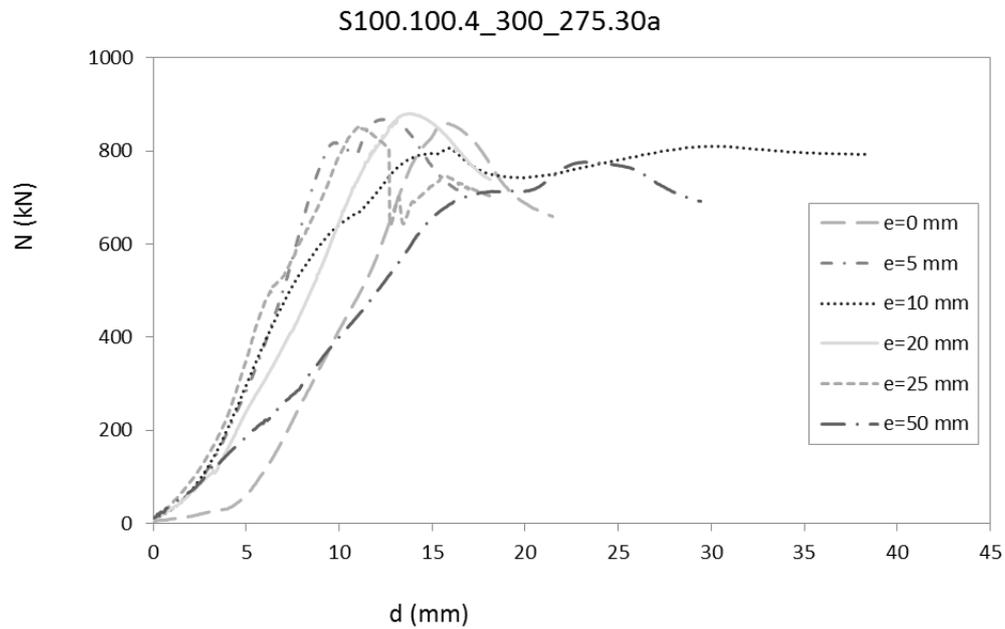


Figura 44. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie S100.100.4_300_275.30(a)

Esta figura se muestra para la subserie S100.100.4_300_275.30 grupo “a” la disminución de la longitud ante el aumento de carga axial. Las curvas representan ensayos con diferentes excentricidades. Como ya ocurría en series anteriores, los especímenes muestran menores cargas últimas a medida que aumenta el valor con el que se aplica la carga. En este caso, la carga máxima se obtiene para $e=20\text{mm}$, lo que podría deberse a un error en el desarrollo del ensayo.

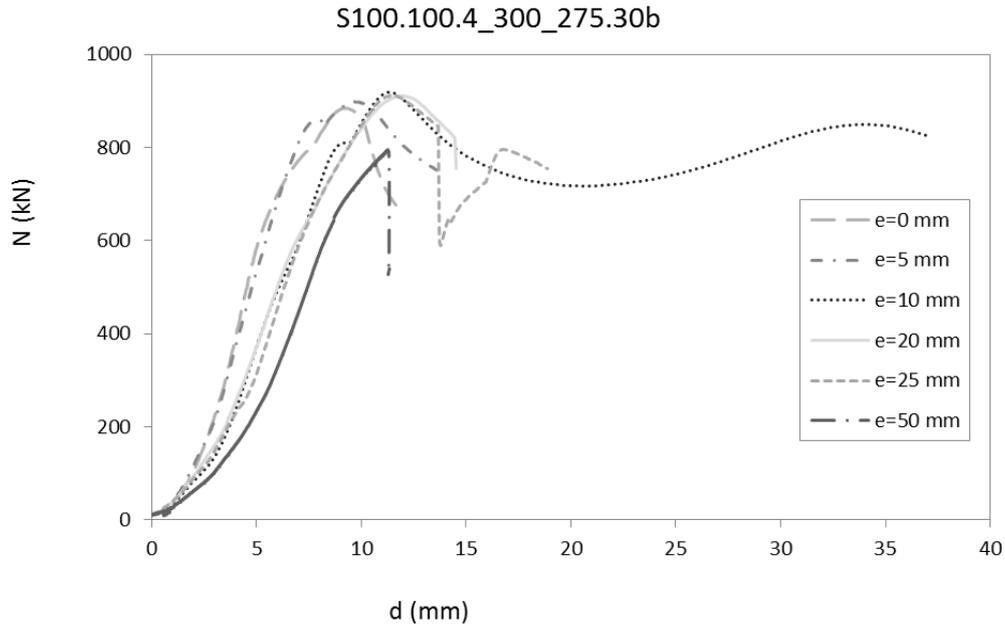


Figura 45. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie S100.100.4_300_275.30(b)

La figura 45 representa la misma comparación, pero en este caso para el grupo “b”. En la figura se observa un comportamiento más estable que en el grupo “a” con el aumento de la excentricidad. Cabe destacar también el fallo frágil del espécimen de excentricidad 50 mm.

Hormigón de 90 MPa

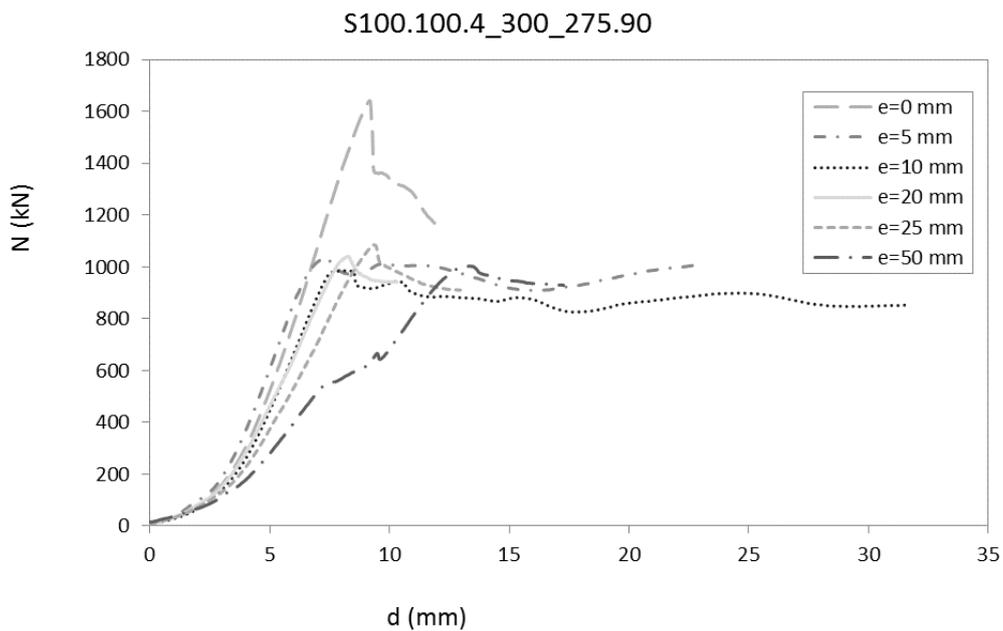


Figura 46. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie S100.100.4_300_275.90

La figura superior ilustra la comparación del comportamiento de las columnas de la subserie con relleno de hormigón de 90 MPa (S100.100.4_300_275.90) en términos de la variación de la carga axial con el acortamiento del pilar. Para este grupo de casos, se observa claramente que la carga última del espécimen con $e=0$ mm es muy superior al del resto, que disminuye con el aumento de excentricidad.

R150.100.4_300_275w

Esta serie de pilares tiene sección rectangular, con un tubo de 150 mm de ancho, 100 mm de alto y 4 mm de espesor.

Esta serie de ensayos se ha llevado a cabo aplicando la excentricidad en el eje débil. Por ello, en la codificación aparece la letra “w” al final, ya que se corresponde con la inicial de la palabra débil en inglés (*weak*).

En la tabla se observan los resultados obtenidos para esta serie.

Tabla 11. Resultados de la serie R150.100.4_300_275.30w

<i>Denominación</i>	<i>$f_{c_{exp}}$ (MPa)</i>	<i>N_{exp} (kN)</i>
R150.100.4_300_275.30_00w	40.41	912.00
R150.100.4_300_275.30_05w	40.41	885.20
R150.100.4_300_275.30_10w	40.41	935.80
R150.100.4_300_275.30_20w	40.41	872.70
R150.100.4_300_275.30_25w	40.41	846.80
R150.100.4_300_275.30_50w	40.41	815.80
R150.100.4_300_275.90_00w	90.58	1188.50
R150.100.4_300_275.90_05w	90.58	1386.50
R150.100.4_300_275.90_10w	90.58	1316.50
R150.100.4_300_275.90_20w	90.58	1383.80
R150.100.4_300_275.90_25w	90.58	1404.70
R150.100.4_300_275.90_50w	90.58	1260.70
R150.100.4_300_275.water_00w	water	561.70

Hormigón de 30 MPa

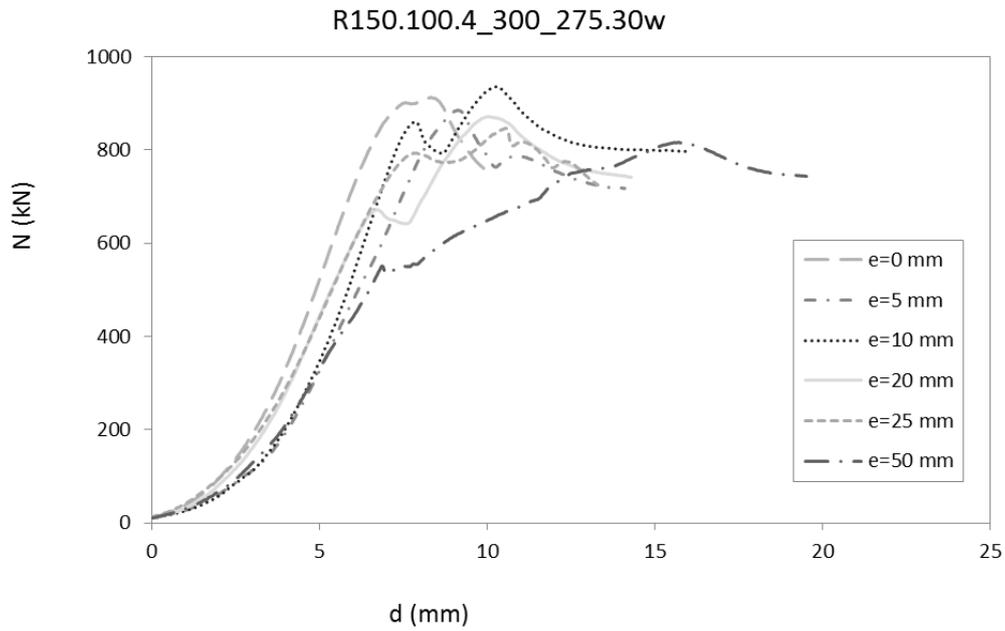


Figura 47. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie R150.100.4_300_275.30w

En la *figura 47* aparecen las curvas de comportamiento de la serie R150.100.4_300_275.30w para la variación de la carga axial con el acortamiento axial. En la figura se puede apreciar un claro descenso de la carga máxima ante el aumento de la excentricidad. Los comportamientos post-pico de los especímenes son similares, con la mayor diferencia en el de excentricidad 50 mm.

Hormigón de 90 MPa

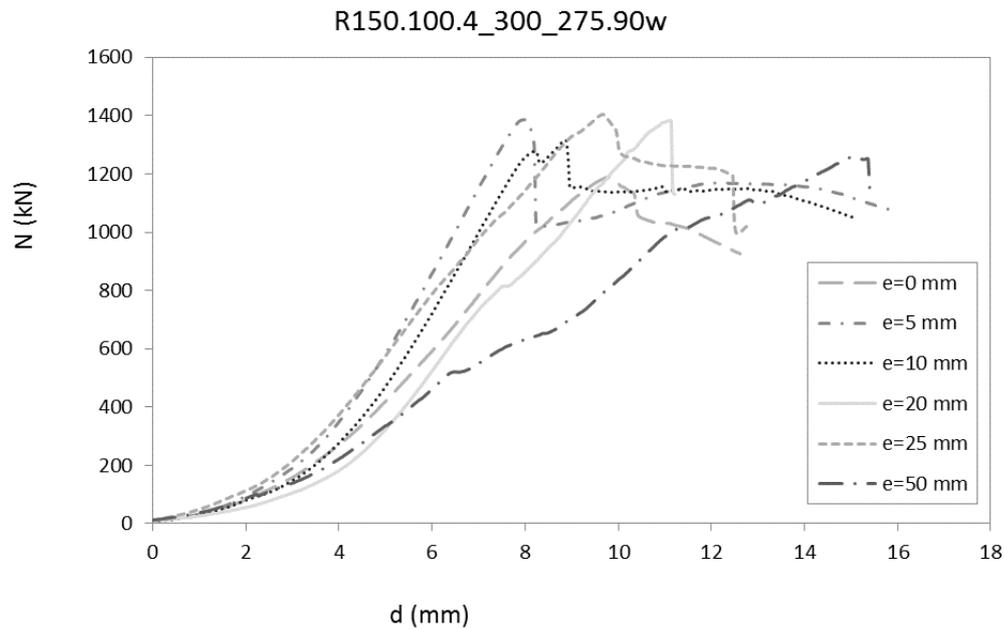


Figura 48. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie R150.100.4_300_275.90w

La figura anterior representa la comparación del comportamiento de las columnas de la subserie con relleno de hormigón de 90 MPa en términos de la variación de la carga axial con el acortamiento del pilar. Destaca la notable diferencia en las pendientes iniciales de las curvas, aunque el comportamiento post-pico es similar en todos los casos, con una bajada repentina de la carga.

R150.100.4_300_275s

Esta serie de pilares tienen sección rectangular, con un tubo de 150 mm de ancho, 100 mm de alto y 4 mm de espesor.

Esta serie de ensayos se ha llevado a cabo aplicando la excentricidad en el eje fuerte. Por tanto, en la codificación aparece la letra "s" al final, ya que se corresponde con la inicial de la palabra fuerte en inglés (*strong*).

Tabla 12. Resultados de la serie R150.100.4_300_275s

Denominación	$f_{c_{exp}}$ (MPa)	N_{exp} (kN)
R150.100.4_300_275.30_05s	37.7	1110.00
R150.100.4_300_275.30_10s	37.7	1053.30
R150.100.4_300_275.30_20s	37.7	994.00
R150.100.4_300_275.30_25s	37.7	880.30
R150.100.4_300_275.30_50s	37.7	826.80
R150.100.4_300_275.90_05s	90.58	1577.70
R150.100.4_300_275.90_10s	90.58	1551.50
R150.100.4_300_275.90_20s	90.58	1045.80
R150.100.4_300_275.90_25s	90.58	1316.00
R150.100.4_300_275.90_50s	90.58	1142.33

Hormigón de 30 MPa

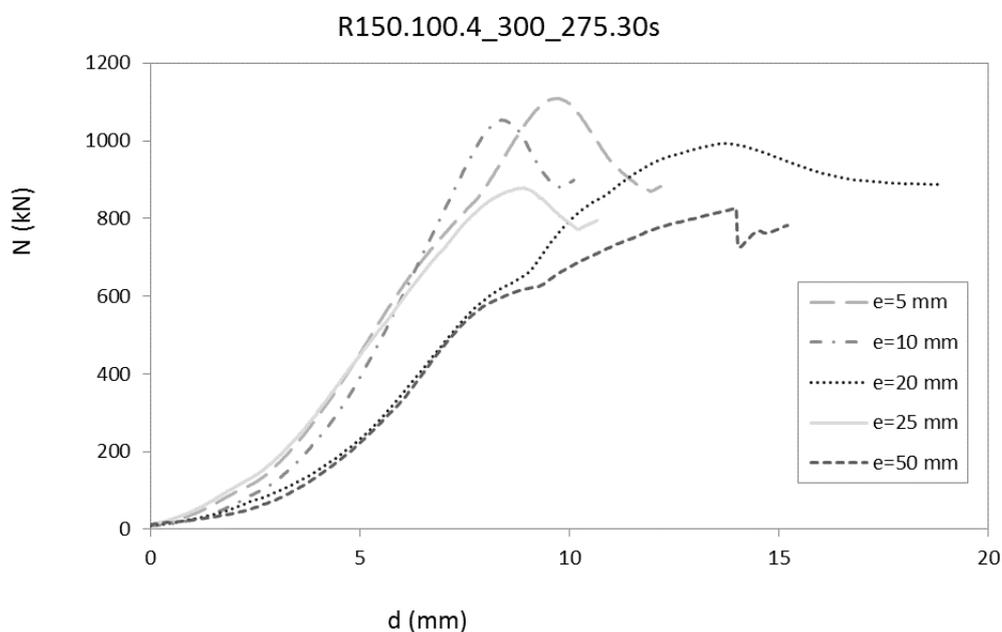


Figura 49. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie R150.100.4_300_275.30s

La figura 49 muestra el acortamiento axial para el aumento de carga de los pilares de la subserie con relleno de hormigón de 30 MPa. Como se ha observado en la figura 47, existe un comportamiento parecido de los especímenes con menor excentricidad.

Hormigón de 90 MPa

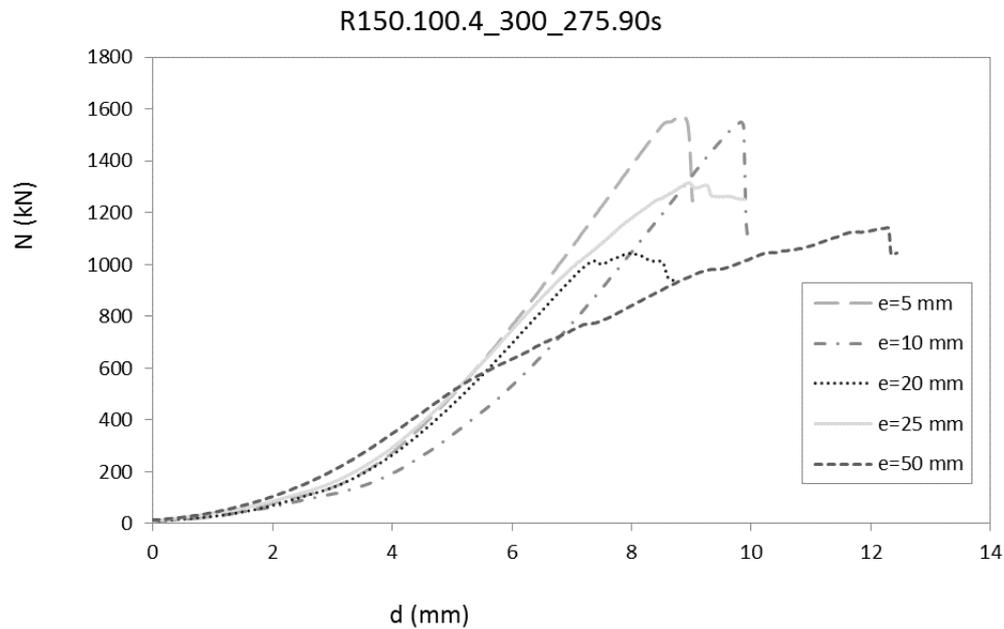


Figura 50. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie R150.100.4_300_275.90s

En la figura superior se observa una gráfica con la comparación del comportamiento de las columnas de la subserie con relleno de hormigón de 90 MPa (R150.100.4_300_275.90w) en términos de la variación de la carga axial con el acortamiento del pilar. De nuevo destaca el descenso de la carga máxima con la excentricidad.

R150.100.5_300_275w

Esta serie de pilares tienen sección rectangular, con un tubo de 150 mm de ancho, 100 mm de alto y 5 mm de espesor.

Esta serie de ensayos se ha llevado a cabo aplicando la excentricidad en el eje débil, por lo que la denominación incluye la "w" comentada anteriormente.

En la siguiente tabla se muestran los resultados de esta serie.

Tabla 13. Resultados de la serie R150.100.5_300_275

Denominación	f_{cexp} (MPa)	N_{exp} (kN)
R150.100.5_300_275.30_00w	40.19	1168.00
R150.100.5_300_275.30_05w	40.19	1152.80
R150.100.5_300_275.30_10w	40.19	1126.80
R150.100.5_300_275.30_20w	40.19	1113.00
R150.100.5_300_275.30_25w	40.19	1118.50
R150.100.5_300_275.30_50w	40.19	996.80
R150.100.5_300_275.90_00w	88.92	1641.80
R150.100.5_300_275.90_05w	88.92	1865.30
R150.100.5_300_275.90_10w	88.92	1433.70
R150.100.5_300_275.90_20w	88.92	1428.20
R150.100.5_300_275.90_25w	88.92	1547.70
R150.100.5_300_275.90_50w	88.92	997.80

Hormigón de 30 MPa

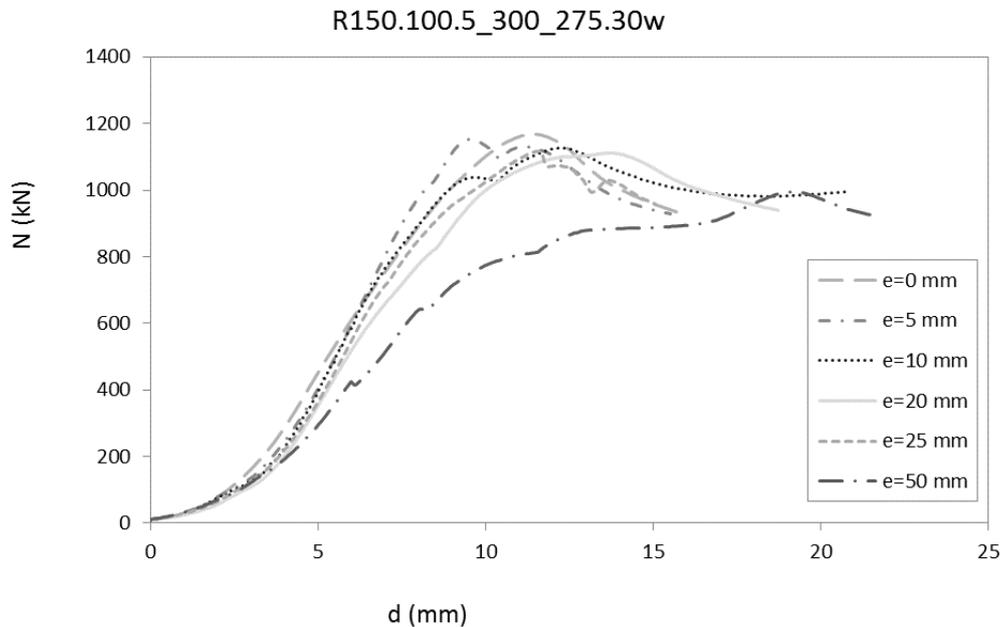


Figura 51. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie R150.100.5_300_275.30w

En la figura anterior se observa la disminución de la longitud axial con la carga para la subserie con hormigón de 30 MPa. Se aprecia un comportamiento muy similar entre los diferentes especímenes con muy poca diferencia entre los valores de carga máxima, excepto para el caso con e=50mm.

Hormigón de 90 MPa

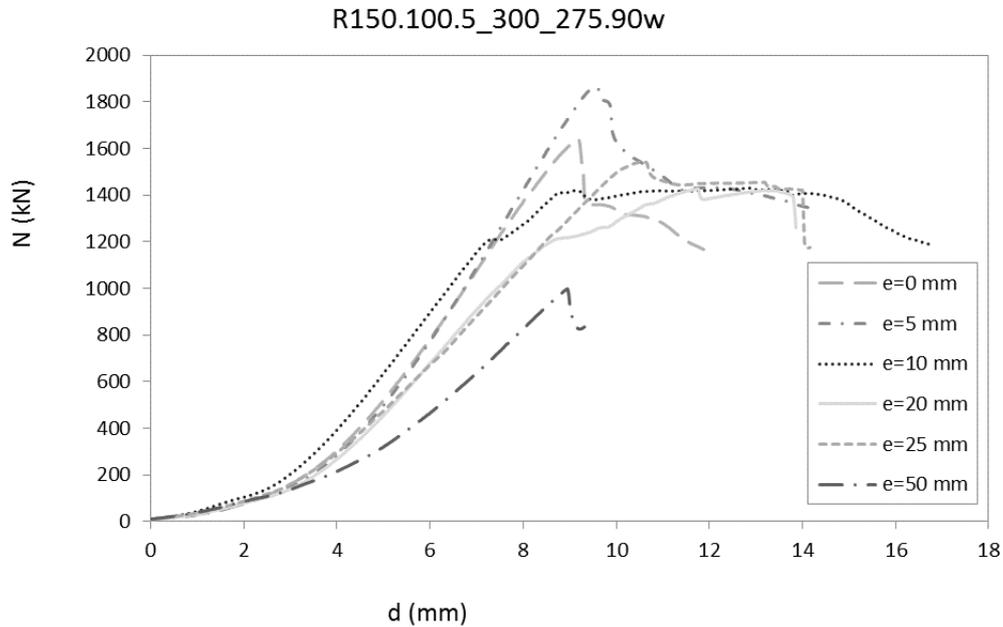


Figura 52. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie R150.100.5_300_275.90w

La figura 52 muestra el acortamiento axial con la variación de carga para las columnas de la subserie con relleno de hormigón de 90 MPa (R150.100.5_300_275.90w). Se observa un comportamiento estable ante la variación de la excentricidad para todos los especímenes con excepción del de excentricidad 50 mm, donde la diferencia de carga máxima es notable.

R150.100.5_300_275s

Esta serie de pilares tienen sección rectangular, con un tubo de 150 mm de ancho, 100 mm de alto y 5 mm de espesor.

Esta serie de ensayos se ha llevado a cabo aplicando la excentricidad en el eje fuerte, como así lo indica la "s" de la denominación.

A continuación en la siguiente tabla se pueden observar los resultados experimentales de los ensayos de esta serie.

Tabla 14. Resultados de la serie R150.100.5_300_27s

Denominación	$f_{c_{exp}}$ (MPa)	N_{exp} (kN)
R150.100.5_300_275.30_05s	40.19	1207.30
R150.100.5_300_275.30_10s	40.19	1123.20
R150.100.5_300_275.30_20s	40.19	1109.80
R150.100.5_300_275.30_25s	40.19	1075.20
R150.100.5_300_275.30_50s	40.19	960.80
R150.100.5_300_275.90_05s	88.92	1968.30
R150.100.5_300_275.90_10s	88.92	1624.80
R150.100.5_300_275.90_20s	88.92	1387.50
R150.100.5_300_275.90_25s	88.92	1219.70
R150.100.5_300_275.90_50s	88.92	1287.80

Hormigón de 30 MPa

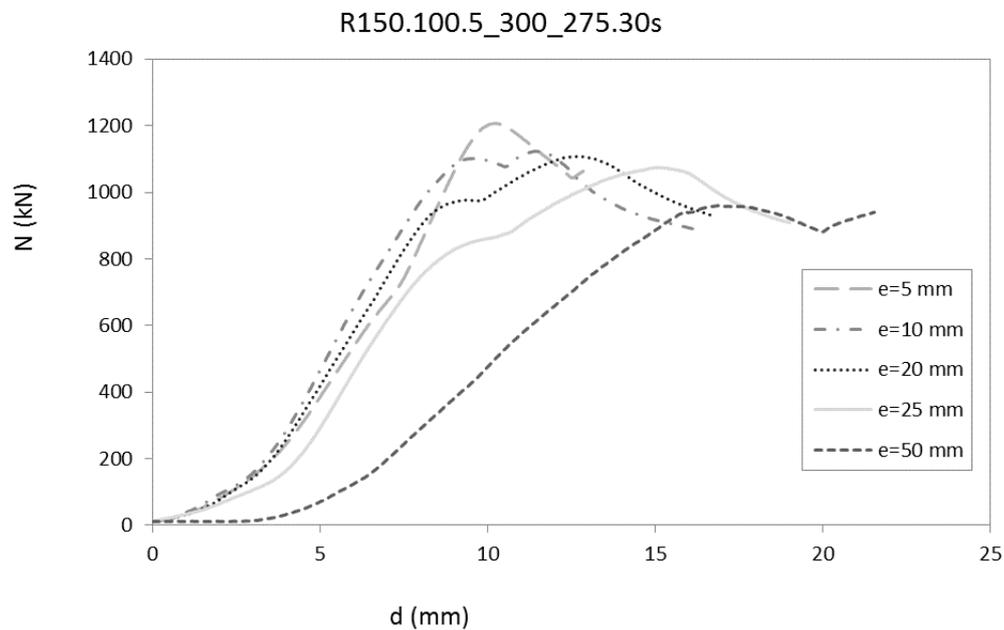


Figura 53. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie R150.100.5_300_275.30s

Esta figura muestra para la subserie R150.100.5_300_275.30 la disminución de la longitud ante el aumento de carga axial. Para esta serie de curvas, se detecta una ligera disminución de la carga última a medida que aumenta la excentricidad de aplicación de la carga. Las curvas de comportamiento de los pilares con menor excentricidad de carga son similares entre sí.

Hormigón de 90 MPa

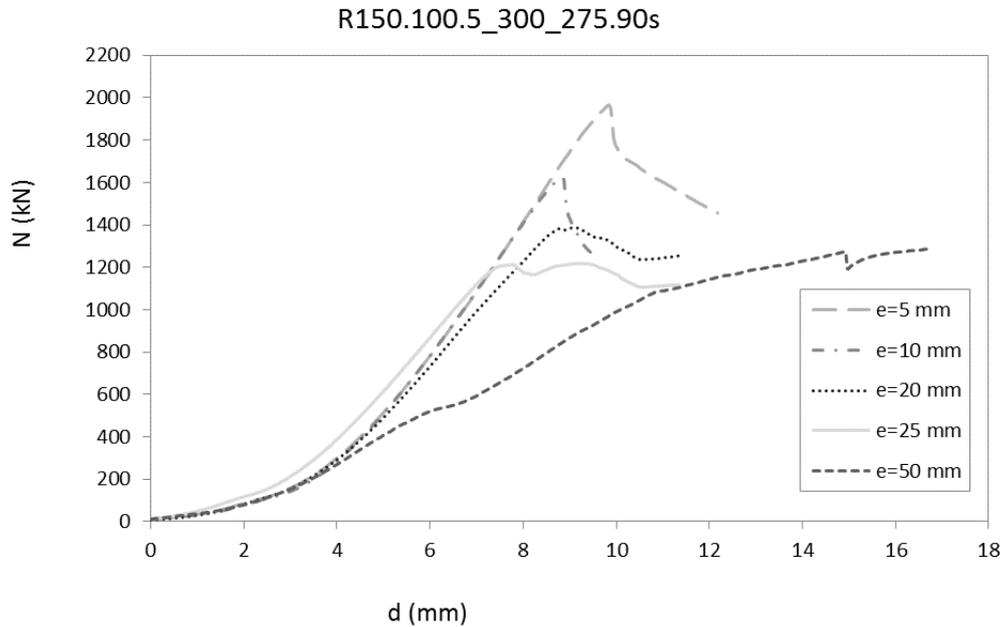


Figura 54. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie R150.100.5_300_275.90w

Como en la figura anterior, esta muestra las curvas carga-acortamiento axial para la subserie rellena de hormigón de 90 MPa. En el caso de estos pilares, el efecto del relleno de 90MPa queda patente en el comportamiento frágil exhibido, claramente diferenciado de aquel mostrado por los pilares con hormigón de 30MPa. Por otra parte, se observa que a medida que aumenta la excentricidad el pilar se comporta con mayor ductilidad. Este aumento de la ductilidad puede ser debido a la reducción de la zona comprimida, que hará que el tubo de acero soporte mayores cargas tanto de tracción como de compresión, incrementado así la contribución del tubo de acero en el comportamiento seccional.

R200.120.3_300_275w

Esta serie de pilares tienen sección rectangular, con un tubo de 200 mm de ancho, 120 mm de alto y 3 mm de espesor.

Esta serie de ensayos se ha llevado a cabo aplicando la excentricidad en el eje débil (w).

La siguiente tabla contiene la denominación de los pilares, los axiles máximos para cada espécimen y la resistencia experimental del hormigón de relleno.

Tabla 15. Resultados de la serie R200.120.3_300_275w

Denominación	$f_{c_{exp}}$ (MPa)	N_{exp} (kN)
R200.120.3_300_275.30_00w	39.93	1042.00
R200.120.3_300_275.90_00w	89.36	2091.30
R200.120.3_300_275.90_05w	98.84	2064.20
R200.120.3_300_275.90_10w	98.84	1538.70
R200.120.3_300_275.90_20w	98.84	1336.80
R200.120.3_300_275.90_25w	98.84	1598.70
R200.120.3_300_275.90_50w	89.36	1262.70

Hormigón de 90 MPa

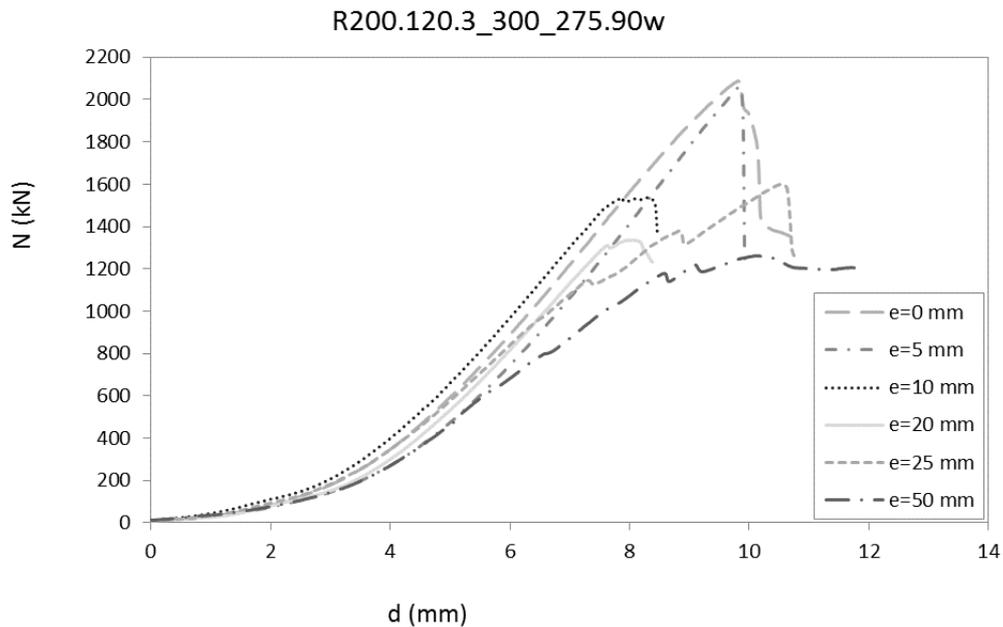


Figura 55. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie R200.120.3_300_275.90w

La figura anterior representa la comparación del comportamiento de las columnas de la subserie con relleno de hormigón de 90 MPa en términos de la variación de la carga axial con el acortamiento del pilar. El fallo frágil característico del relleno de hormigón de 90MPa queda de nuevo plasmado al comparar el comportamiento de estos especímenes.

Excentricidades

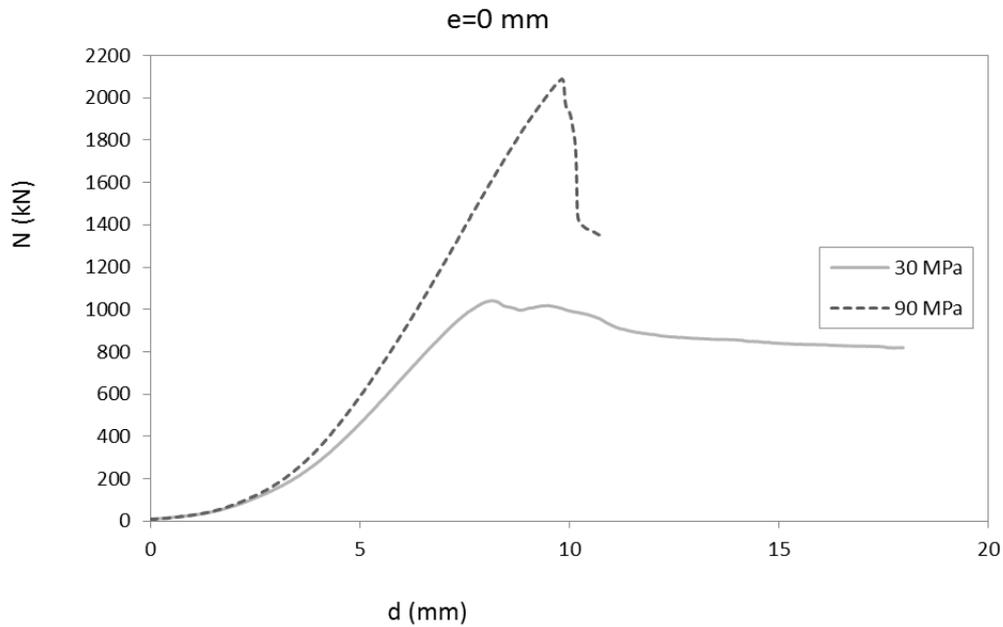


Figura 56. Curvas de carga-acortamiento axial para e=0 mm. Serie R200.120.3_300_275

En la figura anterior se muestra para la excentricidad nula las curvas de comportamiento obtenidas para cada tipo de hormigón de relleno (30MPa y 90MPa). Se puede destacar la diferencia de comportamientos ante el uso de los diferentes hormigones y la gran contribución del hormigón de alta resistencia en la carga máxima, que es casi el doble alcanzada con hormigón convencional.

R200.120.3_300_275s

Esta serie de pilares tienen sección rectangular, con un tubo de 200 mm de ancho, 120 mm de alto y 3 mm de espesor.

Esta serie de ensayos se ha llevado a cabo aplicando la excentricidad en el eje fuerte (s).

En la tabla se observan los resultados obtenidos para esta serie.

Tabla 16. Resultados de la serie R200.120.3_300_275s

Denominación	$f_{c_{exp}}$ (MPa)	N_{exp} (kN)
R200.120.3_300_275.90_10s	89.36	1920.70
R200.120.3_300_275.90_50s	89.36	1085.70
R200.120.3_300_275.water_00s	water	448.33

Hormigón de 90 MPa

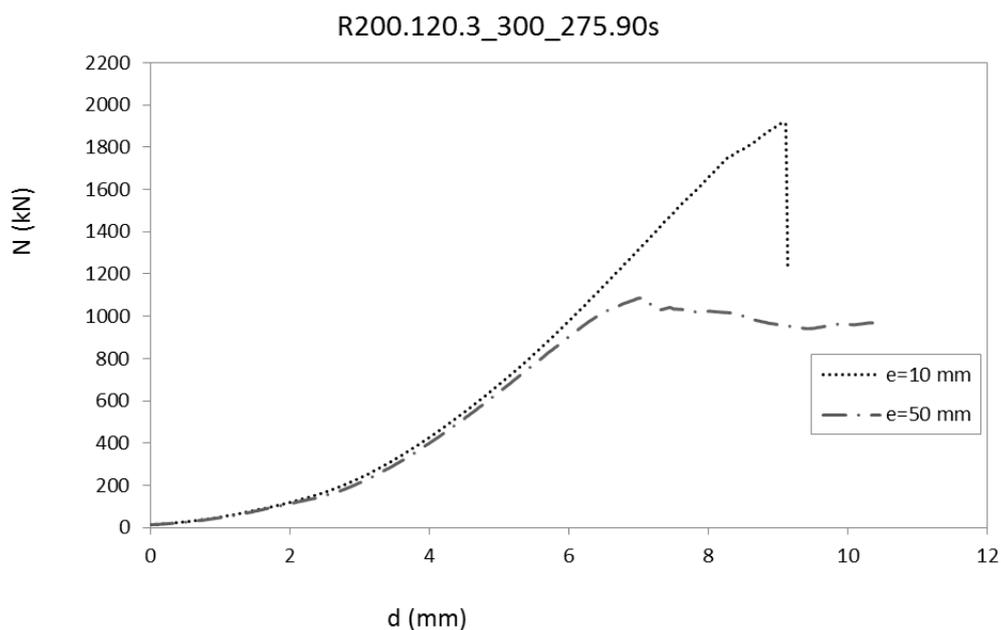


Figura 57. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie R200.120.3_300_275.90s

En la figura anterior se observa la disminución de la longitud axial con la carga para la subserie S125.125.4_300_275.30. Se aprecia una gran diferencia en el comportamiento de los especímenes. El espécimen con excentricidad 10 mm falla frágilmente, mientras que el de más excentricidad tiene un fallo dúctil.

C168.3,2.8_300_275

Esta serie de pilares tienen sección circular, con un tubo de 168.3 mm de diámetro y 2.8 mm de espesor.

La tabla siguiente muestra los resultados obtenidos.

Tabla 17. Resultados de la serie C168.3,2.8_300_275

Denominación	$f_{c_{exp}}$ (MPa)	N_{exp} (kN)
C168.3,2.8_300_275.30_00	37.71	1282.50
C168.3,2.8_300_275.30_05	37.71	1262.50
C168.3,2.8_300_275.30_10	37.71	1123.50
C168.3,2.8_300_275.30_20	37.71	1286.00
C168.3,2.8_300_275.30_25	37.71	1270.70
C168.3,2.8_300_275.30_50	37.71	1193.80
C168.3,2.8_300_275.90_00	93.74	2375.70
C168.3,2.8_300_275.90_05	93.74	2347.50
C168.3,2.8_300_275.90_10	93.74	2352.80
C168.3,2.8_300_275.90_20	93.74	1613.20
C168.3,2.8_300_275.90_25	93.74	1745.50
C168.3,2.8_300_275.90_50	93.74	1820.50
C168.3,2.8_300_275.water_00	water	473.70

Hormigón de 30 MPa

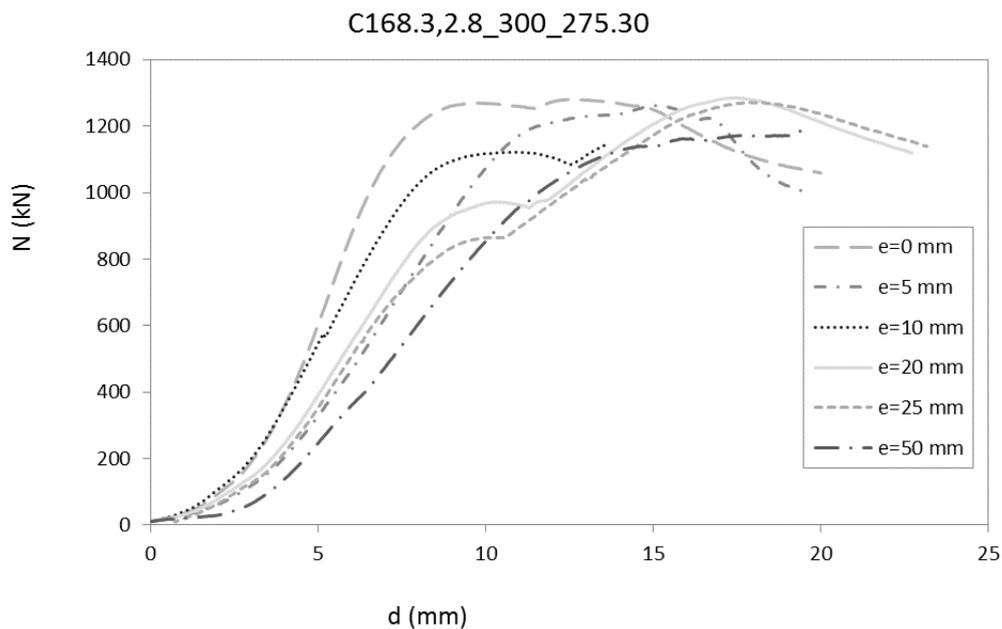


Figura 58. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie C168.3,2.8_300_275.30

En la figura 58 se puede ver una gráfica con la comparación del comportamiento de las columnas de la subserie C168.3,2.8_300_275.30 en términos de la variación de la carga axial con el acortamiento del pilar. Se aprecia, como en resultados anteriores, unas curvas comportamiento similares ante el aumento de la excentricidad, con valores de carga máxima muy cercanos entre sí. Este hecho puede estar relacionado con una mayor contribución del acero en el comportamiento.

Hormigón de 90 MPa

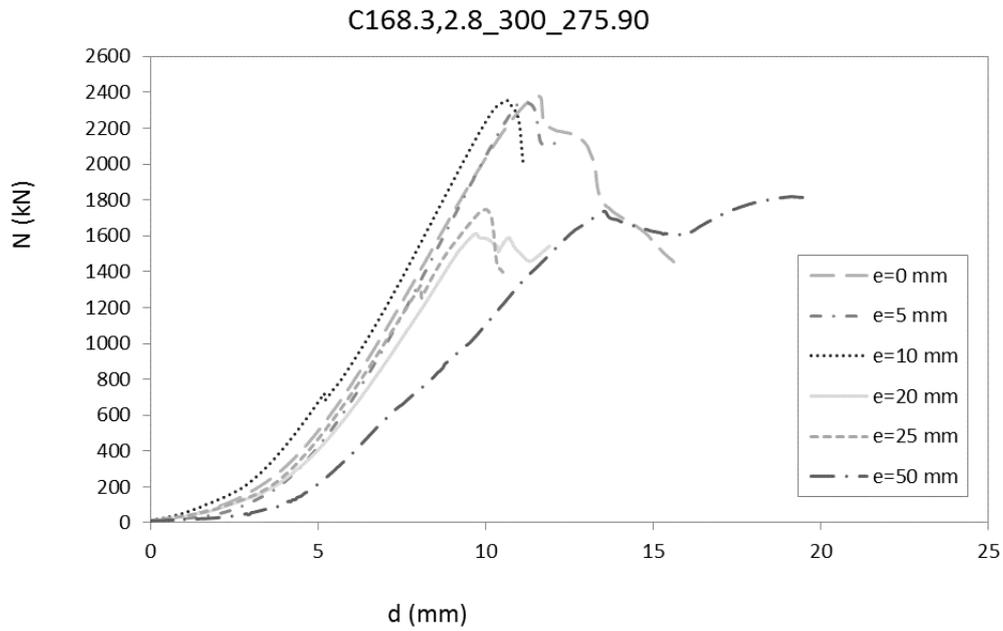


Figura 59. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie C168.3,2.8_300_275.90

Como en la figura anterior, esta muestra las curvas carga-acortamiento axial para la subserie rellena de hormigón de 90 MPa. Destaca la disminución de la carga máxima al aumentar la excentricidad, con un comportamiento frágil en todos los especímenes.

C159,3_300_275

Esta serie de pilares tienen sección circular, con un tubo de 159 mm de diámetro y 3 mm de espesor.

A continuación, en la siguiente tabla se observan los resultados de esta serie de ensayos.

Tabla 18. Resultados de la serie C159,3_300_275

Denominación	$f_{c_{exp}}$ (MPa)	N_{exp} (kN)
C159,3_300_275.30_00	33.39	1185.70
C159,3_300_275.30_05	33.39	1162.20
C159,3_300_275.30_10	33.39	1250.70
C159,3_300_275.30_20	33.39	1219.70
C159,3_300_275.30_25	33.39	1215.00
C159,3_300_275.30_50	33.39	1195.00
C159,3_300_275.90_00	90.85	2021.70
C159,3_300_275.90_05	90.85	2311.80
C159,3_300_275.90_10	90.85	1915.20
C159,3_300_275.90_20	90.85	1851.50
C159,3_300_275.90_25	90.85	1935.70
C159,3_300_275.90_50	90.85	2016.30
C159,3_300_275.water_00	water	486.30

Hormigón de 30 MPa

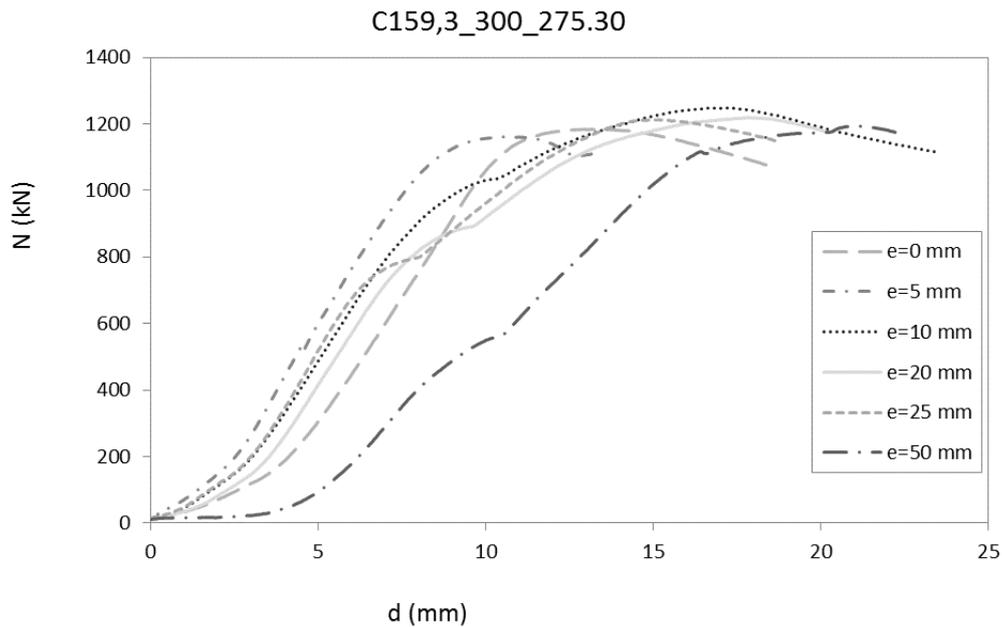


Figura 60. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie C159,3_300_275.30

En la figura anterior se aprecia las curvas de comportamiento para la reducción de la longitud axial del pilar con el aumento de la carga para la subserie con relleno de hormigón de 30 MPa. Como en la *figura 58*, las curvas de comportamiento son muy similares.

Hormigón de 90 MPa

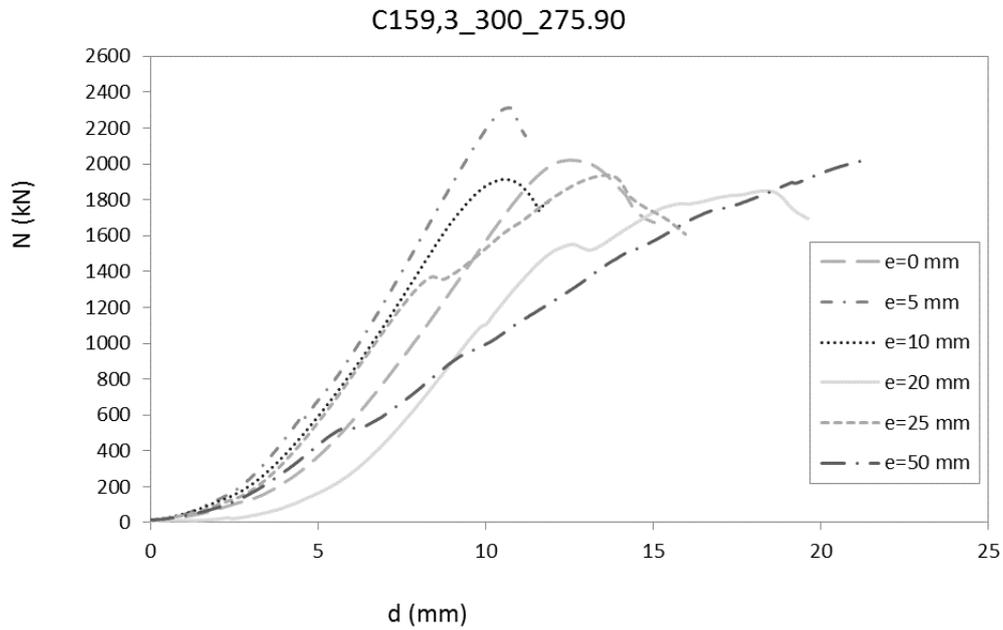


Figura 61. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie C159,3_300_275.90

La figura superior ilustra la comparación del comportamiento de las columnas de la subserie con relleno de hormigón de 90 MPa (C159,3_300_275.90) en términos de la variación de la carga axial con el acortamiento del pilar. Como se ha observado en la *figura 54*, existe un aumento del comportamiento dúctil con los especímenes con mayor excentricidad.

Excentricidades

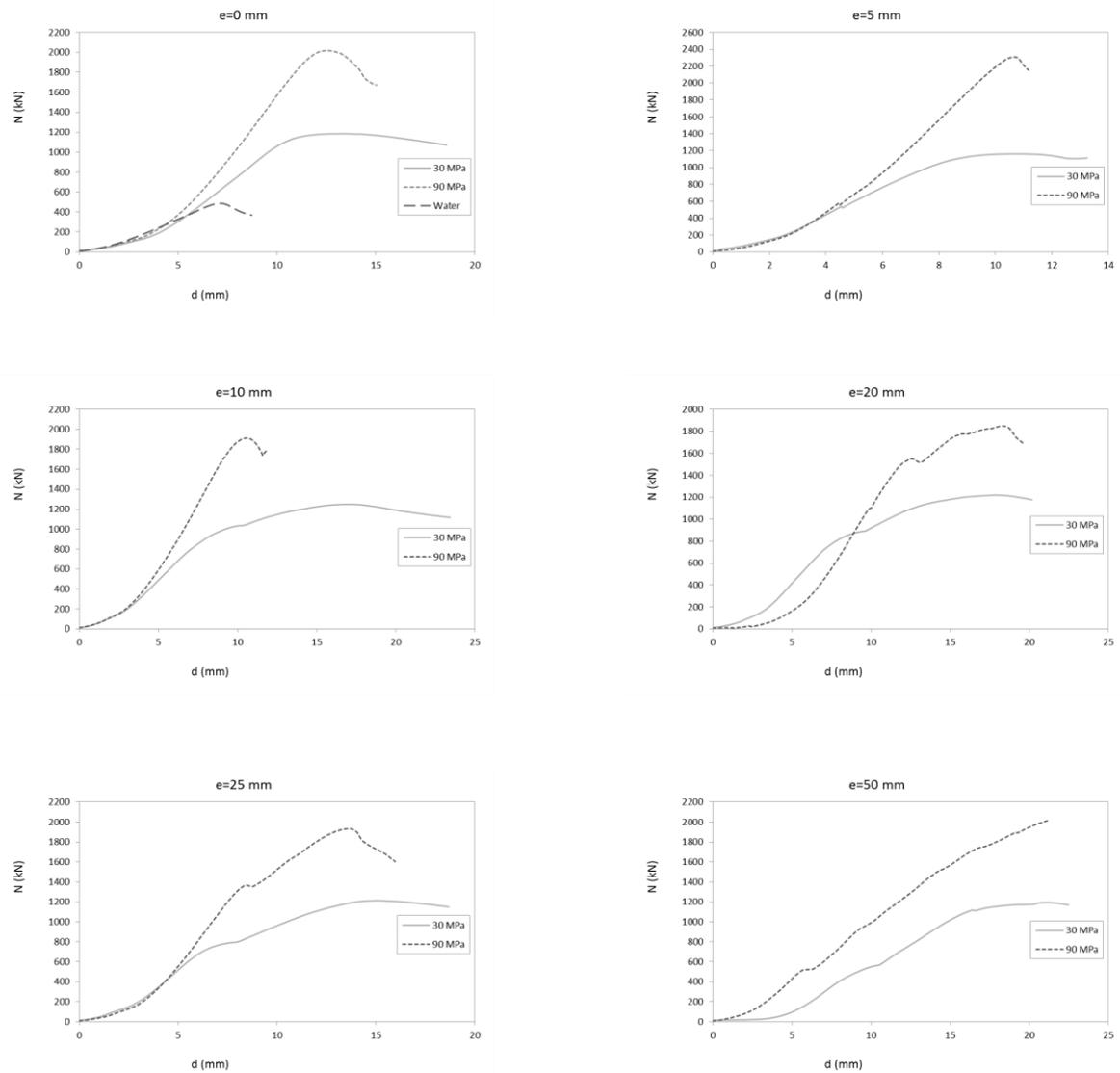


Figura 62. Curvas de carga- acortamiento axial para cada excentricidad. Serie C159,3_300_275.30

En la figura anterior se muestra de manera desglosada la información anterior. Para cada uno de los valores de excentricidad aplicados, se comparan las curvas de comportamiento obtenidas para cada tipo de hormigón de relleno (30MPa y 90MPa). Se puede destacar la menor diferencia de cargas máximas al aumentar la excentricidad, lo que puede estar causado por una menor contribución del hormigón.

C101.6,2_300_275

Esta serie de pilares tienen sección circular, con un tubo de 101.6 mm de diámetro y 2 mm de espesor.

En la siguiente tabla se muestran los datos de dichos pilares.

Tabla 19. Resultados de la serie C101.6,2.0_300_275

Denominación	$f_{c_{exp}}$ (MPa)	N_{exp} (kN)
C101.6,2.0_300_275.30_00	40.8	582.70
C101.6,2.0_300_275.30_05	40.8	585.00
C101.6,2.0_300_275.30_10	40.8	587.30
C101.6,2.0_300_275.30_20	40.8	595.80
C101.6,2.0_300_275.30_25	40.8	583.50
C101.6,2.0_300_275.30_50	40.8	464.20
C101.6,2.0_300_275.90_00	93.51	935.70
C101.6,2.0_300_275.90_05	93.51	920.30
C101.6,2.0_300_275.90_10	94.68	894.30
C101.6,2.0_300_275.90_20	93.51	889.20
C101.6,2.0_300_275.90_25	93.51	916.80
C101.6,2.0_300_275.90_50	94.68	876.70
C101.6,2.0_300_275.water_00	water	250.20

Hormigón de 30 MPa

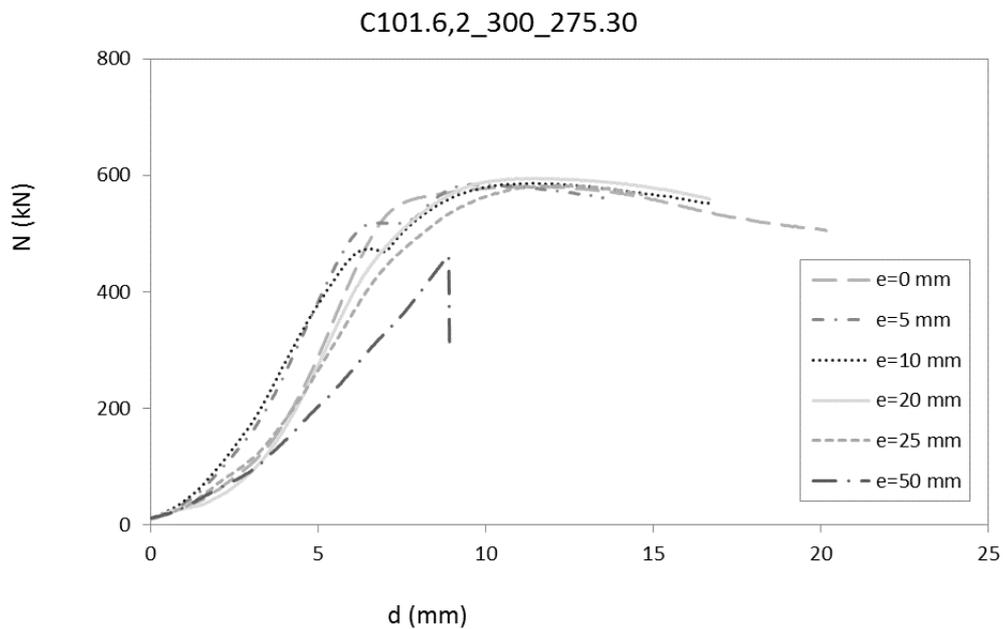


Figura 63. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie C101.6_300_275.30

En la figura superior se observa una gráfica con la comparación del comportamiento de las columnas de la subserie con relleno de hormigón de 30 MPa (C101.6_300_275.30) en términos de la variación de la carga axial con el acortamiento del pilar. En ella, se vuelve a apreciar un comportamiento similar de los especímenes ante el aumento de la excentricidad. Es destacable el comportamiento del espécimen de excentricidad 50 mm, el cual falla frágilmente.

Hormigón de 90 MPa

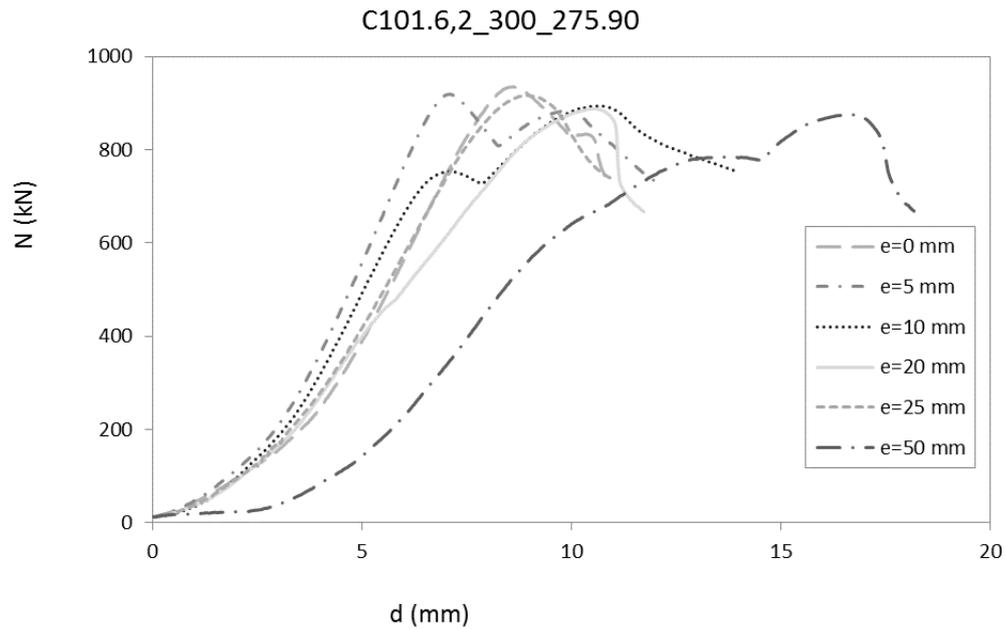


Figura 64. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie C101.6_300_275.90

En esta figura se puede ver la representación del comportamiento de los pilares de la subserie rellena de hormigón de 90 MPa para la variación de la carga axial con el acortamiento del pilar. Destaca el comportamiento similar de todos los especímenes, con valores máximos próximos entre sí, independientemente de su excentricidad.

C108,2_300_355

Esta serie de pilares tienen sección circular, con un tubo de 108 mm de diámetro y 2 mm de espesor.

Tabla 20. Resultados de la serie C108,2_300_355

Denominación	$f_{c_{exp}}$ (MPa)	N_{exp} (kN)
C108,2_300_355.30_00	34.04	694.20
C108,2_300_355.30_05	34.04	687.70
C108,2_300_355.30_10	34.04	669.80
C108,2_300_355.30_20	34.04	725.20
C108,2_300_355.30_25	34.04	663.70
C108,2_300_355.30_50	34.04	686.00
C108,2_300_355.90_00	93.51	1203.70
C108,2_300_355.90_05	93.51	999.00
C108,2_300_355.90_10	93.51	988.33
C108,2_300_355.90_20	93.51	1072.20
C108,2_300_355.90_25	93.51	1066.00
C108,2_300_355.90_50	93.51	983.60
C108,2_300_355.water_00	water	284.00

Hormigón de 30 MPa

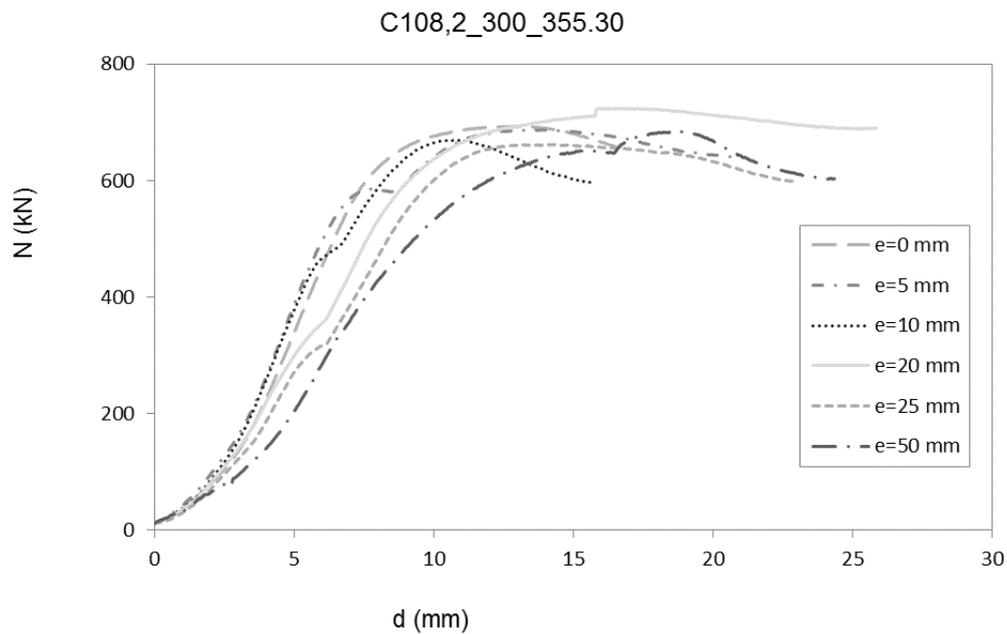


Figura 65. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie C108,2_300_355.30

La *figura 65* muestra el acortamiento axial para el aumento de carga de los pilares de la subserie con relleno de hormigón de 30 MPa. En ella se vuelve a apreciar un comportamiento similar ante el aumento de la excentricidad.

Hormigón de 90 MPa

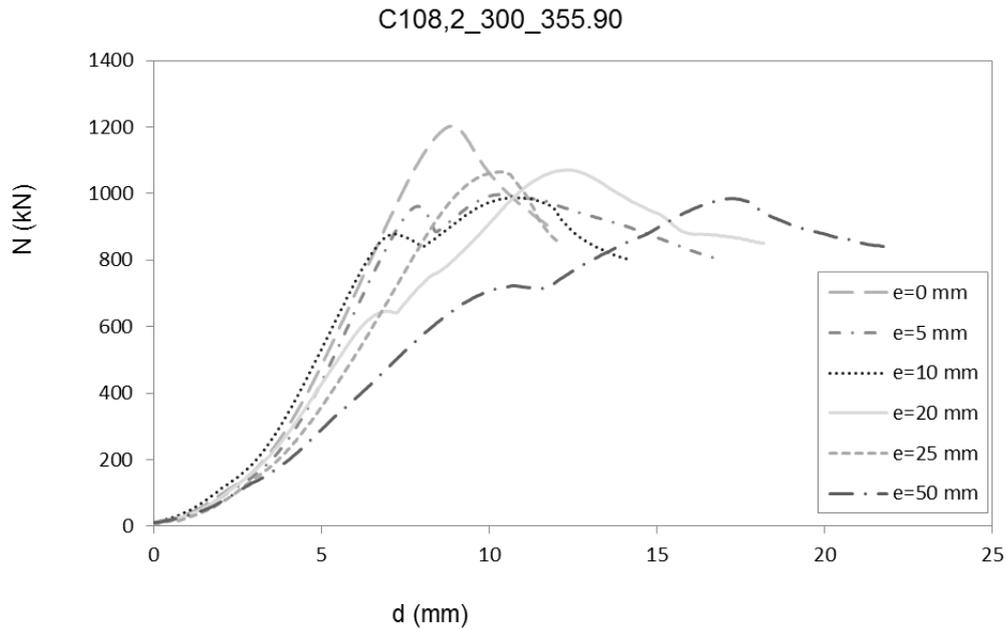


Figura 66. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie C108,2_300_355.90

En la figura superior se observa una gráfica con la comparación del comportamiento de las columnas de la subserie con relleno de hormigón de 90 MPa (R150.100.4_300_275.90w) en términos de la variación de la carga axial con el acortamiento del pilar. Como en resultados anteriores, destaca la estabilidad de los valores de carga máxima en todos los especímenes, aunque se observe un aumento del comportamiento dúctil con la excentricidad.

C120,2.5_300_275

Esta serie de pilares tienen sección circular, con un tubo de 120 mm de diámetro y 2.5 mm de espesor.

Tabla 21. Resultados de la serie C120.2,5_300_275

Denominación	$f_{c_{exp}}$ (MPa)	N_{exp} (kN)
C120.2,5_300_275.30_00	41.44	879.20
C120.2,5_300_275.30_05	41.44	851.80
C120.2,5_300_275.30_10	41.44	901.20
C120.2,5_300_275.30_20	41.44	911.80
C120.2,5_300_275.30_25	41.44	888.70
C120.2,5_300_275.30_50	41.44	904.80
C120.2,5_300_275.90_00	94.68	1417.20
C120.2,5_300_275.90_05	94.68	1467.50
C120.2,5_300_275.90_10	94.68	1365.70
C120.2,5_300_275.90_20	94.68	1370.30
C120.2,5_300_275.90_25	94.68	1299.30
C120.2,5_300_275.90_50	94.68	1272.20
C120.2,5_300_275.water_00	water	415.20

Hormigón de 30 MPa

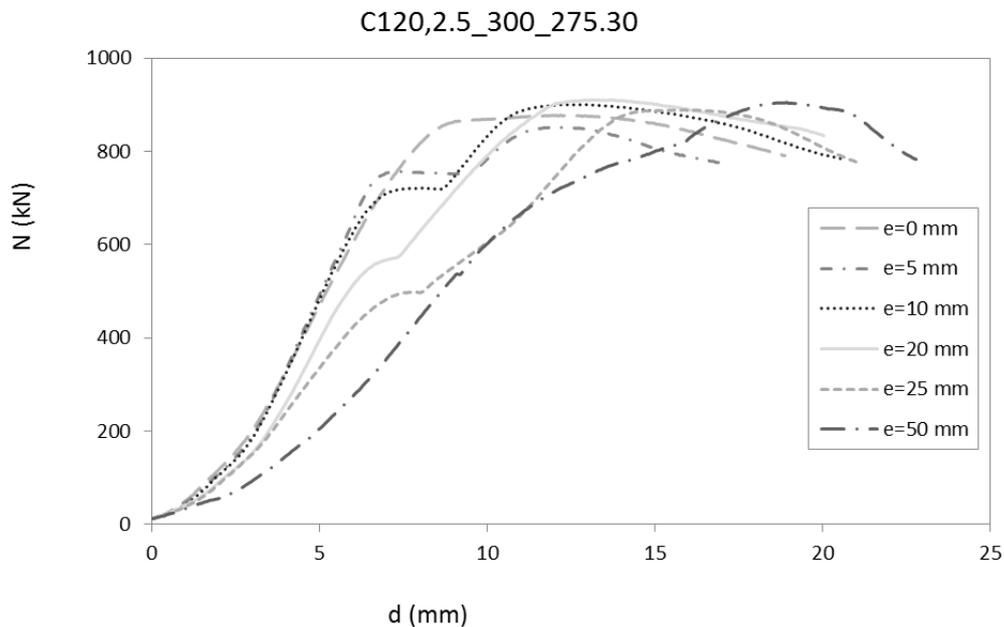


Figura 67. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie C120.2,5_300_275.30

Como en la serie anterior, esta figura muestra las curvas carga-acortamiento axial para la subserie rellena de hormigón de 30 MPa. En ella, como se ha señalado anteriormente, se puede apreciar que a medida que aumenta la excentricidad el pilar se comporta con mayor ductilidad.

Hormigón de 90 MPa

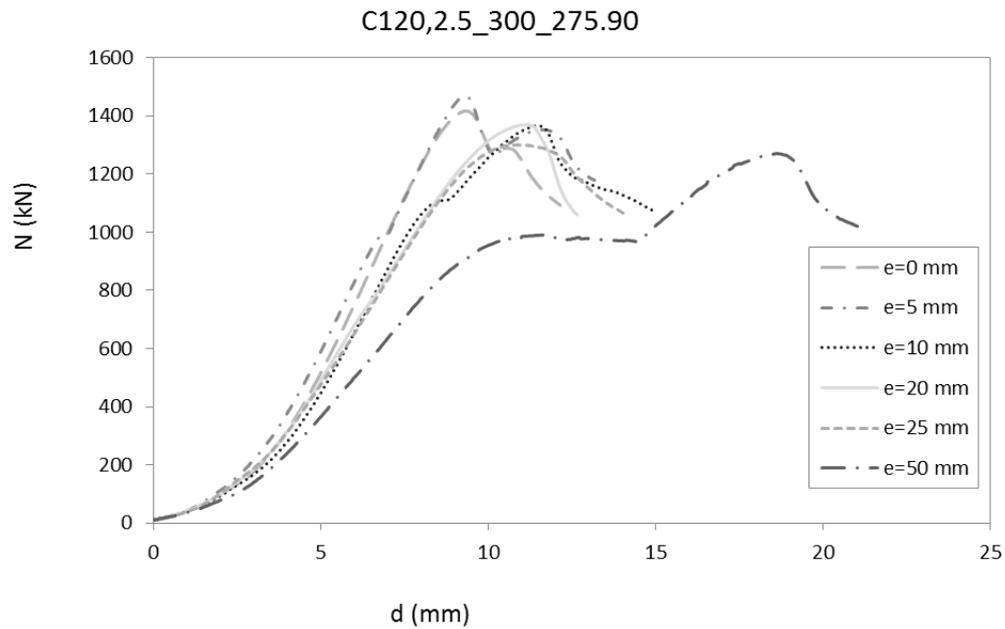


Figura 68. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie C120,2,5_300_275.90

La *figura 68* representa la comparación del comportamiento de las columnas de la subserie C120,2.5_300_275.90 en términos de la variación de la carga axial con el acortamiento del pilar. Como ya se ha constatado en anteriores ensayos, se observa una disminución de la carga máxima con el aumento de la excentricidad.

C100,3_300_275

Esta serie de pilares tienen sección circular, con un tubo de 100 mm de diámetro y 3 mm de espesor.

La tabla siguiente muestra los resultados obtenidos.

Tabla 22. Resultados de la serie C100.3_300_275

Denominación	$f_{c_{exp}}$ (MPa)	N_{exp} (kN)
C100.3_300_275.30_00	34.04	724.00
C100.3_300_275.30_05	34.04	679.70
C100.3_300_275.30_20	34.04	696.00
C100.3_300_275.30_50	34.04	548.70
C100.3_300_275.90_00	93.51	1141.30
C100.3_300_275.90_05	93.51	1128.80
C100.3_300_275.90_20	93.51	1047.30
C100.3_300_275.90_50	93.51	995.30
C100.3_300_275.water_00	water	396.20

Hormigón de 30 MPa

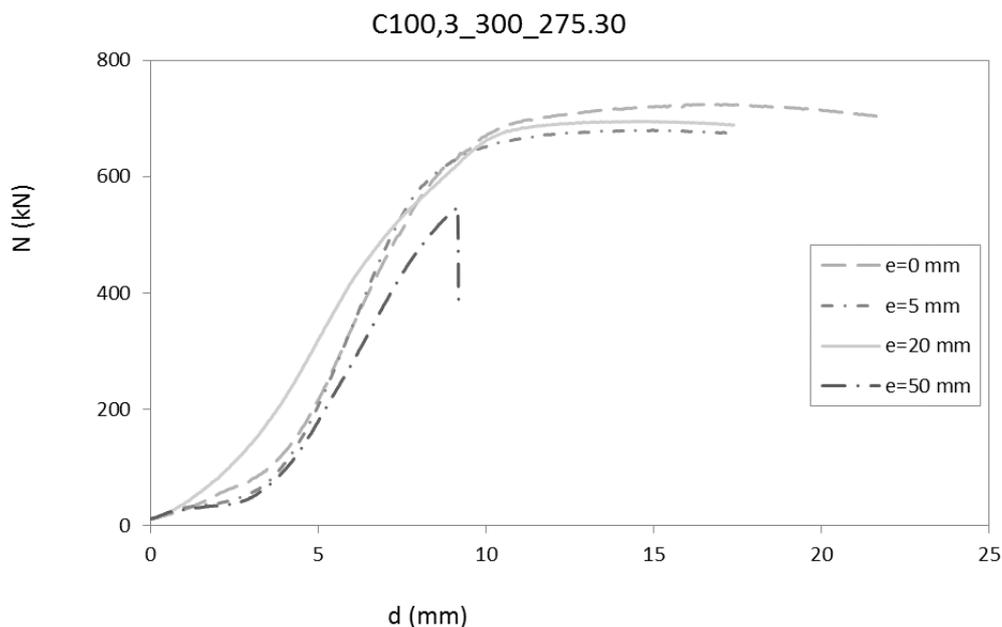


Figura 69. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie C100,3_300_275.30

En la *figura 69* se puede ver una gráfica con la comparación del comportamiento de las columnas de la subserie con relleno de hormigón de 30 MPa (C100,3_300_275.30) en términos de la variación de la carga axial con el acortamiento del pilar. Cada una de las curvas que se muestran corresponde a una excentricidad de aplicación de la carga diferente. Se puede apreciar el comportamiento similar de todos los especímenes, excepto aquel con excentricidad 50 mm, el cual presenta fallo frágil.

Hormigón de 90 MPa

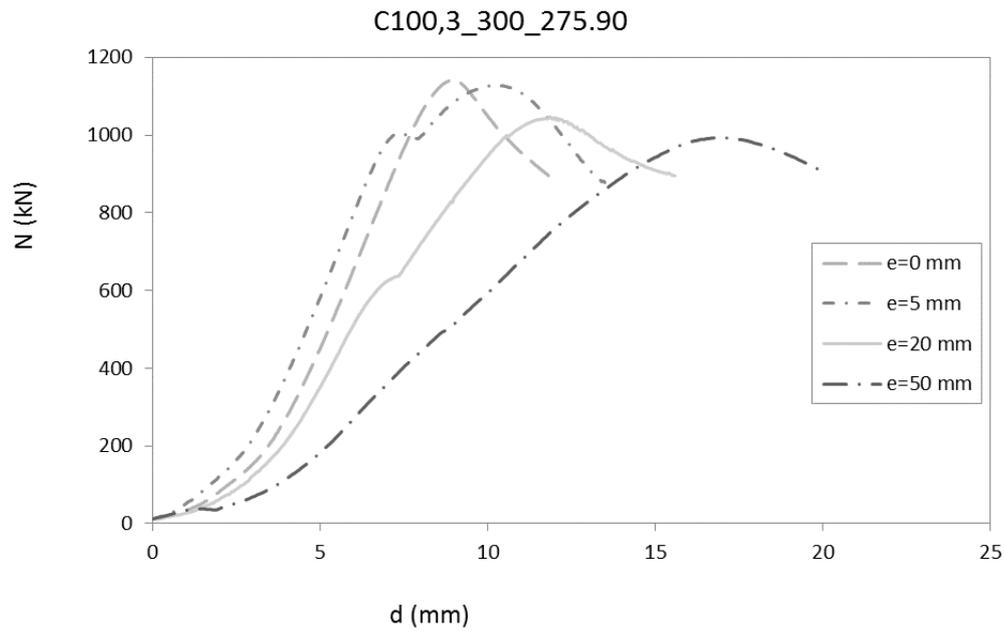


Figura 70. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie C100,3_300_275.90

En la figura anterior se observa la disminución de la longitud axial con la carga para la subserie con relleno de hormigón de 90 MPa. En ella se observa como hay una disminución de la carga máxima con el aumento de la excentricidad, como era de esperar.

C101.6,5_300_275

Esta serie de pilares tienen sección circular, con un tubo de 101.6 mm de diámetro y 5 mm de espesor.

Tabla 23. Resultados de la serie C101,6,5_300_275

Denominación	$f_{c_{exp}}$ (MPa)	N_{exp} (kN)
C101,6,5_300_275.30_00	34.04	942.20
C101,6,5_300_275.30_10	34.04	950.00
C101,6,5_300_275.30_50	34.04	710.00
C101,6,5_300_275.90_00	93.51	1311.00
C101,6,5_300_275.90_05	93.51	1294.70
C101,6,5_300_275.90_10	93.51	1324.20
C101,6,5_300_275.90_50	93.51	1209.50
C101,6,5_300_275.water_00	water	672.50

Hormigón de 30 MPa

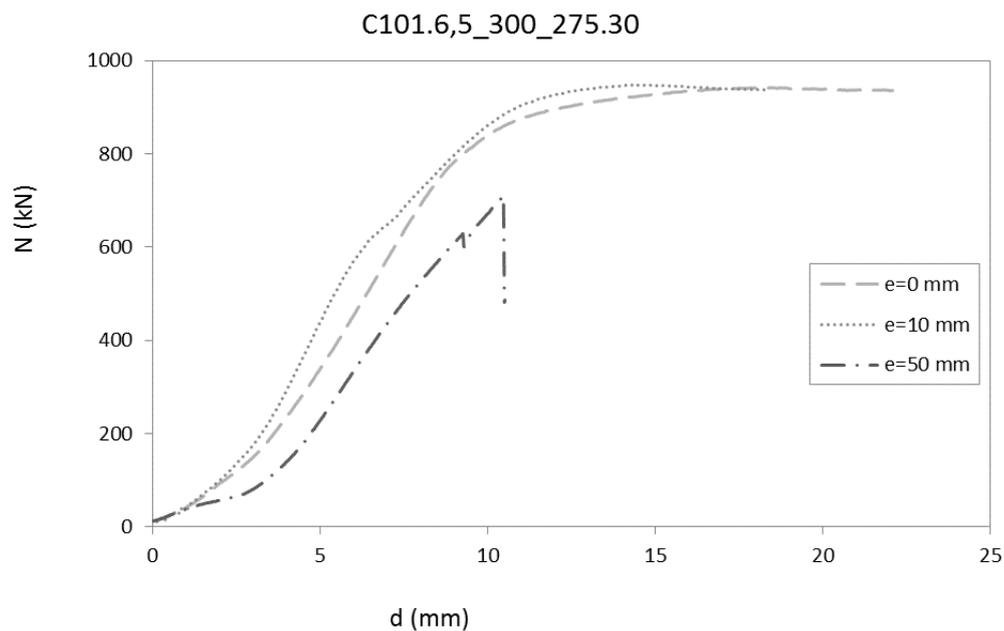


Figura 71. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie C101.6,5_300_275.30

En la figura anterior se observa la disminución de la longitud axial con la carga para la subserie C101.6,5_300_275.30. Una vez más se puede apreciar un comportamiento similar de los especímenes, con la excepción del espécimen con excentricidad 50 mm, que se sufrirá un fallo repentino.

Hormigón de 90 MPa

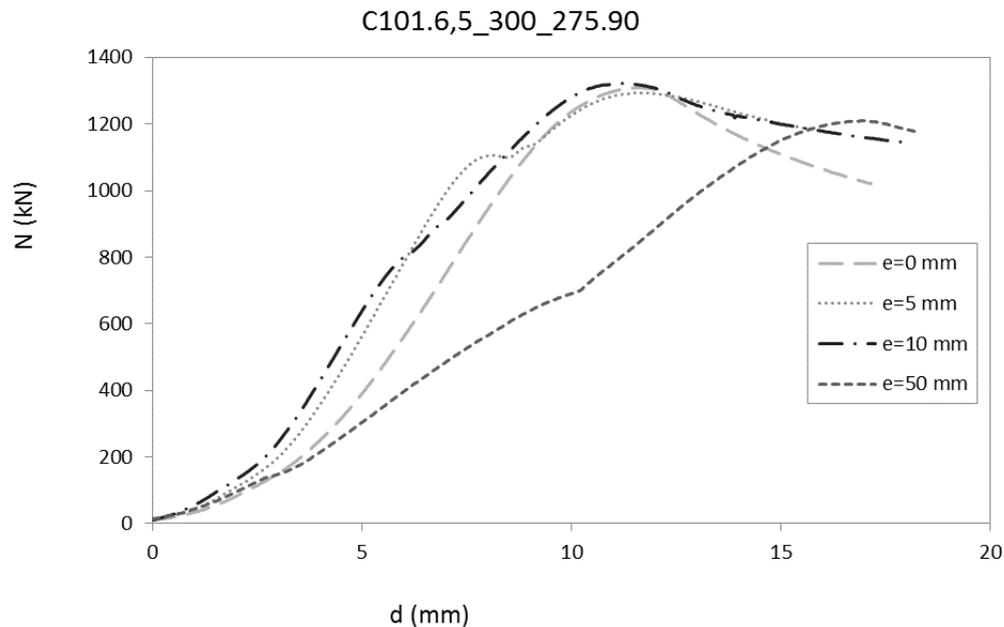


Figura 72. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie C101.6,5_300_275.90

La figura 72, como la anterior, representa el acortamiento axial con la carga de las columnas de la subserie con relleno de hormigón de 90 MPa. Se observa un comportamiento similar de los especímenes con el aumento de la excentricidad, como en comparaciones anteriores.

Ov.120.50.2_300_275

Esta serie de pilares tienen sección ovalada, con un tubo con 120 mm de distancia entre centros, 50 mm de diámetro de los círculos y 2 mm de espesor

Tabla 24. Resultados de la serie ov. 120.50.2_300_275

Denominación	$f_{c_{exp}}$ (MPa)	N_{exp} (kN)
ov. 120.50.2_300_275.30_00	40.8	384.70
ov. 120.50.2_300_275.30_20	40.8	286.30
ov. 120.50.2_300_275.30_50	40.8	269.50
ov. 120.50.2_300_275.90_00	89.36	522.70
ov. 120.50.2_300_275.90_05	89.36	566.30
ov. 120.50.2_300_275.90_10	89.36	577.30
ov. 120.50.2_300_275.90_20	89.36	427.30
ov. 120.50.2_300_275.90_25	89.36	381.00
ov. 120.50.2_300_275.90_50	89.36	369.70
ov. 120.50.2_300_275.water_00	water	179.80

Hormigón de 30 MPa

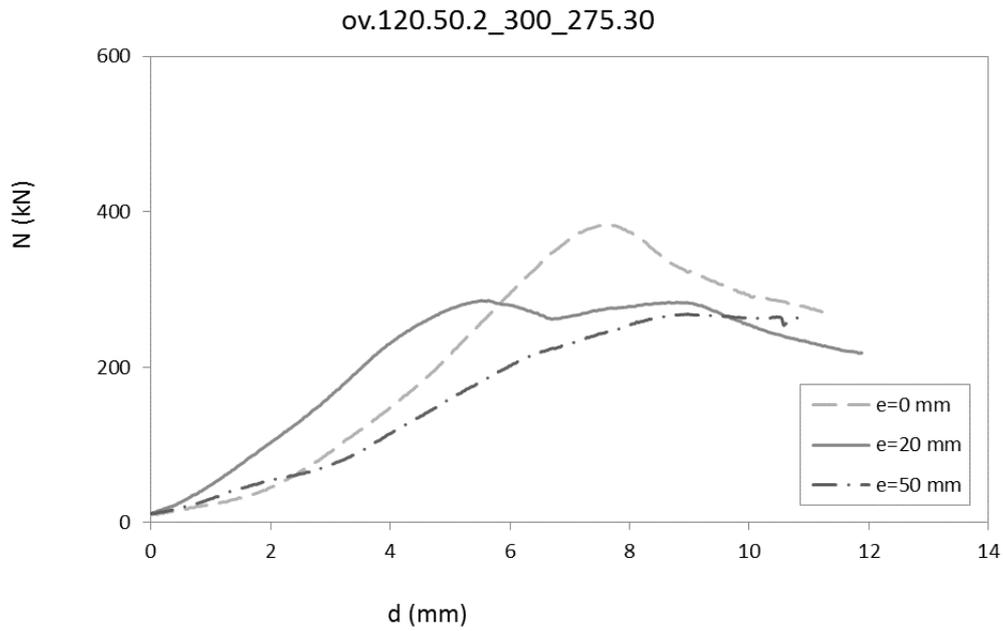


Figura 73. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie Ov.120.50.2_300_275.30

En la figura anterior se aprecia las curvas de comportamiento para la reducción de la longitud axial del pilar con el aumento de la carga para la subserie con relleno de hormigón de 30 MPa. En la figura se vuelve a constatar una ligera disminución de la carga máxima con el aumento de la excentricidad.

Hormigón de 90 MPa

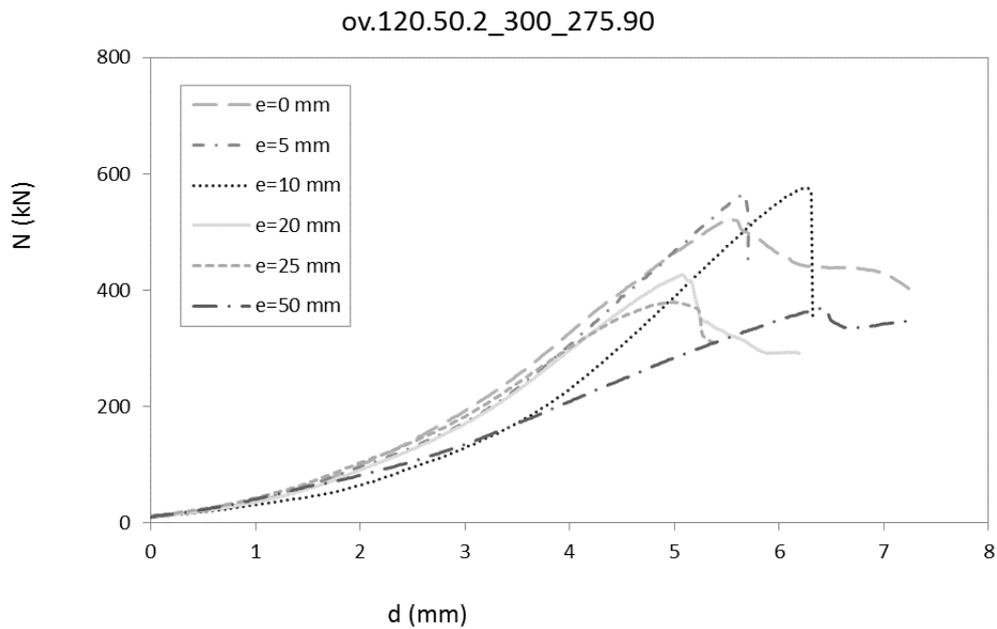


Figura 74. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie Ov.120.50.2_300_275.90

Como en la figura anterior, la *figura 74*, muestra las curvas de comportamiento para la reducción de la longitud axial del pilar con el aumento de la carga para la subserie ov.120.50.2_300_275.90. Se observa, tal y como con los especímenes de hormigón de 30 MPa, un descenso de la carga máxima con la excentricidad.

C-C-a

Esta serie de pilares está formada por una sección circular exterior, con un tubo de 219.1 mm de diámetro y 3 mm de espesor, y una sección circular interior, con un tubo de 108 mm de diámetro y 2 mm de espesor.

Tabla 25. Resultados de la serie C-C-a

<i>Denominación</i>	<i>f_{cexp} (MPa)</i>	<i>N_{exp} (kN)</i>
C-C-a-30-00	38.19	1965.70
C-C-a-30-05	38.19	1852.50
C-C-a-30-10	38.19	1790.20
C-C-a-30-20	38.19	1733.00
C-C-a-30-25	38.19	1919.80
C-C-a-30-50	38.19	1735.70
C-C-a-90-00	94.65	2875.70
C-C-a-90-05	94.65	2792.30
C-C-a-90-10	94.65	2610.50
C-C-a-90-20	94.65	2185.30
C-C-a-90-25	94.65	2185.00
C-C-a-90-50	94.65	1747.30

Hormigón de 30 MPa

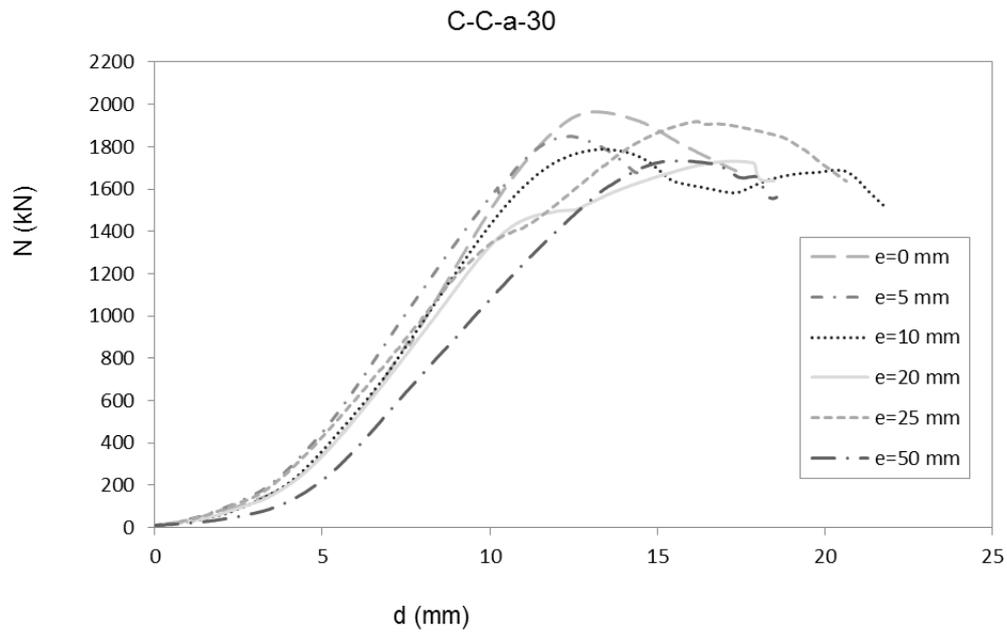


Figura 75. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie C-C-a-30

La figura 75 muestra el acortamiento axial para el aumento de carga de los pilares de la subserie con relleno de hormigón de 30 MPa. Otra vez se aprecia una leve disminución de la carga máxima con el aumento de la excentricidad.

Hormigón de 90 MPa

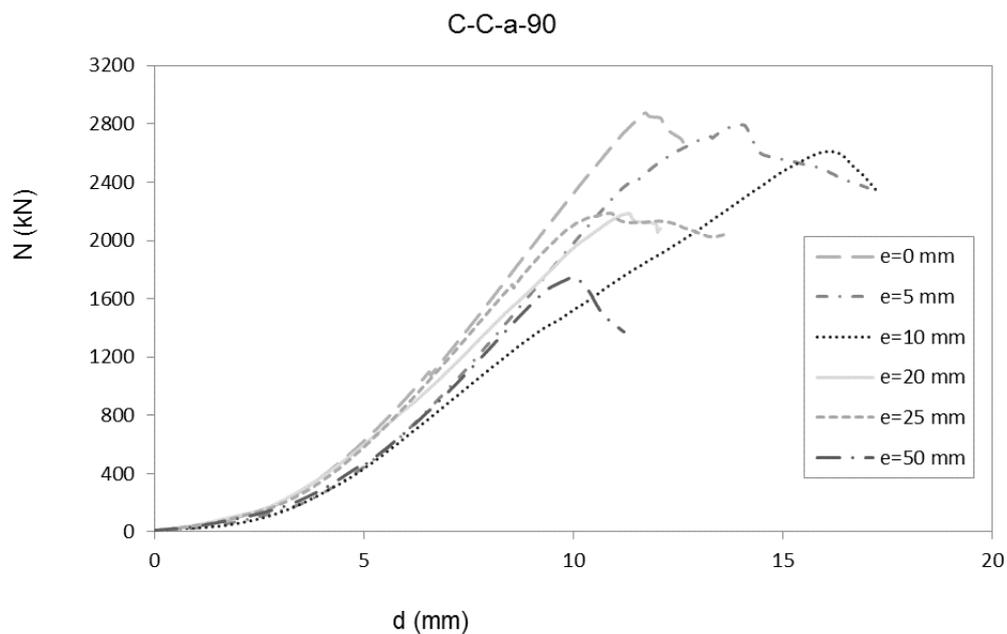


Figura 76. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie C-C-a-90

La *figura 76* ilustra la comparación del comportamiento de las columnas de la subserie con relleno de hormigón de 90 MPa por medio de la variación de la carga axial con el acortamiento del pilar. Se observa, al igual que en la figura anterior, un descenso de la carga máxima con la excentricidad con un comportamiento similar en todos los especímenes.

Excentricidades

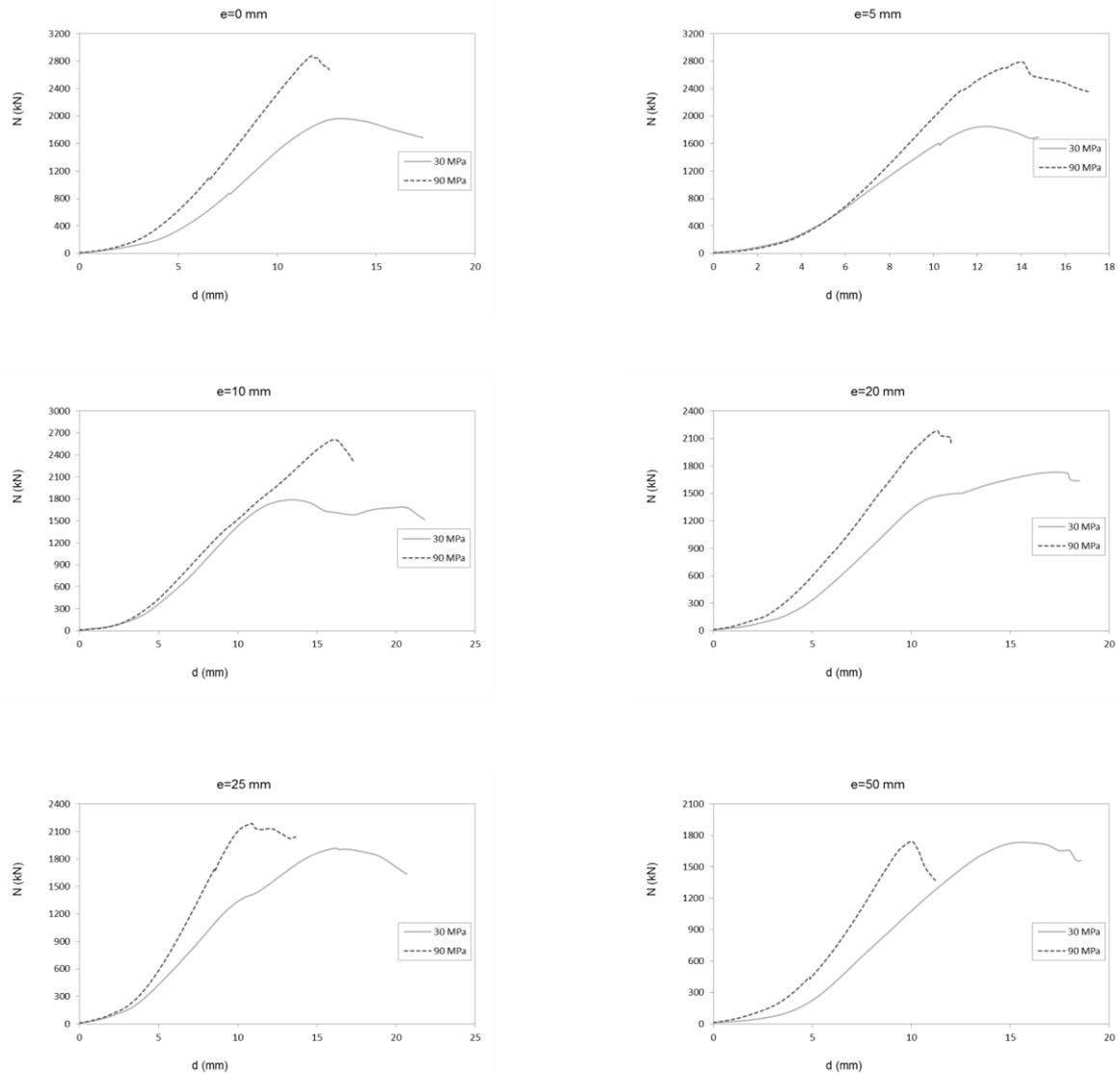


Figura 77. Figura 78. Curvas de carga- acortamiento axial para cada excentricidad. Serie C-C-a

Así como en los CFST, en la *figura 77* se muestra para cada uno de los valores de excentricidad aplicados, las curvas de comportamiento obtenidas según el tipo de hormigón de relleno. En la gráfica se puede observar las diferencias de comportamiento según el hormigón de relleno. Como se ha comentado anteriormente, la contribución del hormigón disminuye notablemente ante el aumento de la excentricidad, así pues, en el caso de los especímenes de mayor excentricidad los valores de carga máxima son muy similares.

C-C-b

Esta serie de pilares está formada por una sección circular exterior, con un tubo de 219.1 mm de diámetro y 3 mm de espesor, y una sección circular interior, con un tubo de 101.6 mm de diámetro y 2 mm de espesor.

Tabla 26. Resultados de la serie C-C-b

Denominación	$f_{c_{exp}}$ (MPa)	N_{exp} (kN)
C-C-b-30-00	44.29	1994.70
C-C-b-30-05	44.29	2085.20
C-C-b-30-10	44.29	1987.20
C-C-b-30-20	44.29	2012.00
C-C-b-30-25	44.29	2015.80
C-C-b-30-50	44.29	1623.30
C-C-b-90-00	96.73	2987.50
C-C-b-90-05	96.73	3150.50
C-C-b-90-10	96.73	3108.50
C-C-b-90-20	96.73	2503.80
C-C-b-90-25	96.73	2626.50
C-C-b-90-50	96.73	1429.80

Hormigón de 30 MPa

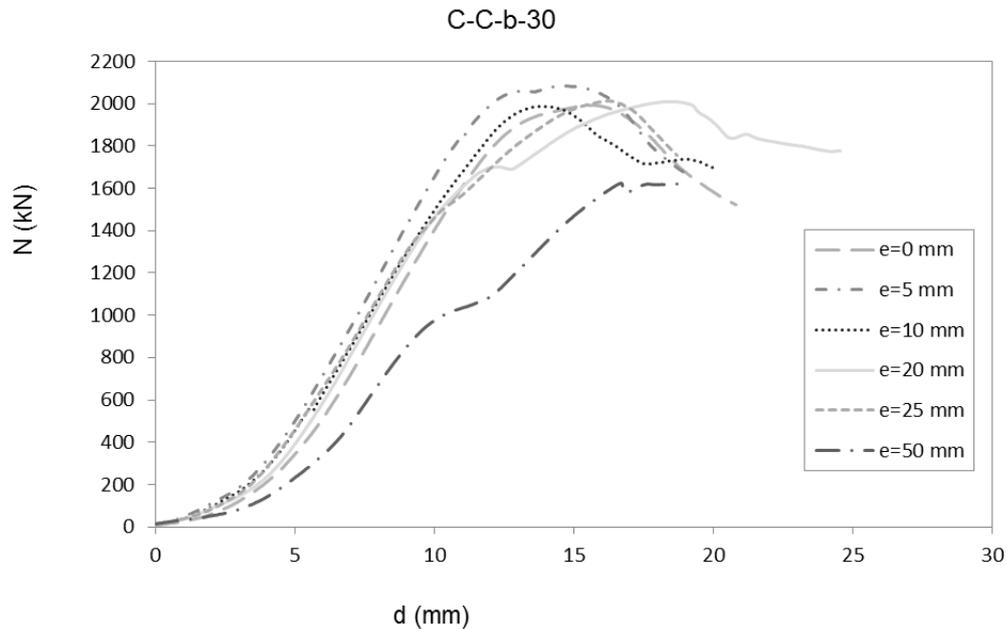


Figura 79. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie C-C-b-30

En la figura anterior se observa la disminución de la longitud axial con la carga para la subserie C-C-b-30. El comportamiento representado es muy similar al obtenido con los CFST de sección circular, con un comportamiento similar de los especímenes, pero alcanzando cargas máximas mayores como es de esperar en los CFDSST.

Hormigón de 90 MPa

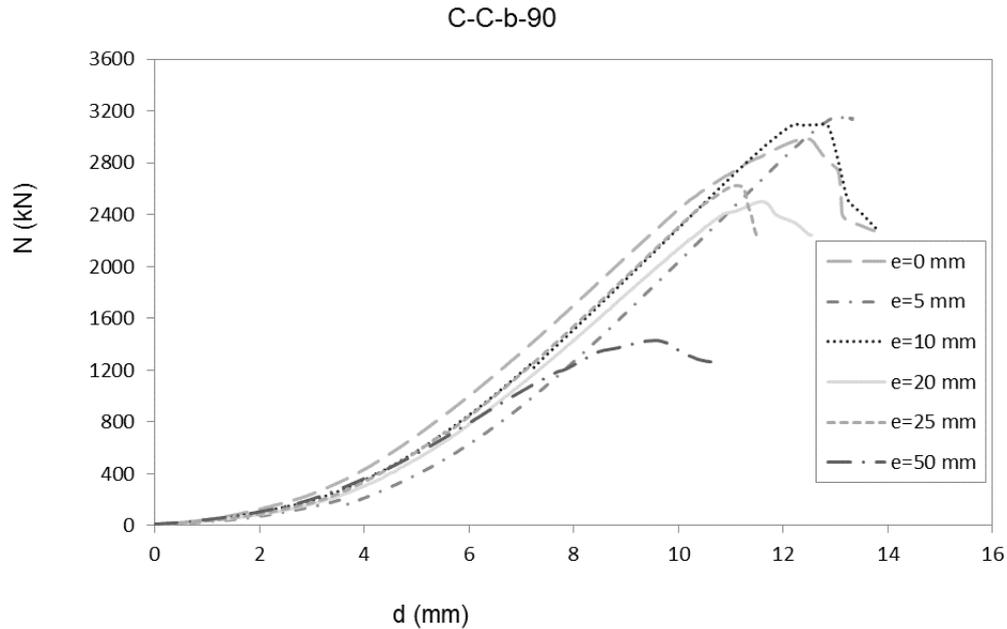


Figura 80. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie C-C-b-90

La figura anterior representa la comparación del comportamiento de las columnas de la subserie con relleno de hormigón de 90 MPa en términos de la variación de la carga axial con el acortamiento del pilar. Se observan unos resultados de comportamiento similares a los descritos en los especímenes con hormigón de 30 MPa.

C-R-a

Esta serie de pilares está formada por una sección circular exterior, con un tubo de 219.1 mm de diámetro y 3 mm de espesor, y una sección rectangular interior, con un tubo de 100 mm de ancho, 80 mm de alto y 2 mm de espesor.

Esta serie de ensayos se ha llevado a cabo aplicando la excentricidad en la dirección del eje débil del tubo interior.

Tabla 27. Resultados de la serie C-R-a

Denominación	$f_{c_{exp}}$ (MPa)	N_{exp} (kN)
C-R-a-30-00	35.27	1834.70
C-R-a-30-05	35.27	1679.00
C-R-a-30-10	35.27	1729.00
C-R-a-30-20	35.27	1300.80
C-R-a-30-25	35.27	1183.00
C-R-a-30-50	35.27	845.00
C-R-a-90-00	94.61	2326.00
C-R-a-90-05	94.61	2696.00
C-R-a-90-10	94.61	2511.80
C-R-a-90-20	94.61	2373.80
C-R-a-90-25	94.61	1940.50
C-R-a-90-50	94.61	1705.00

Hormigón de 30 MPa

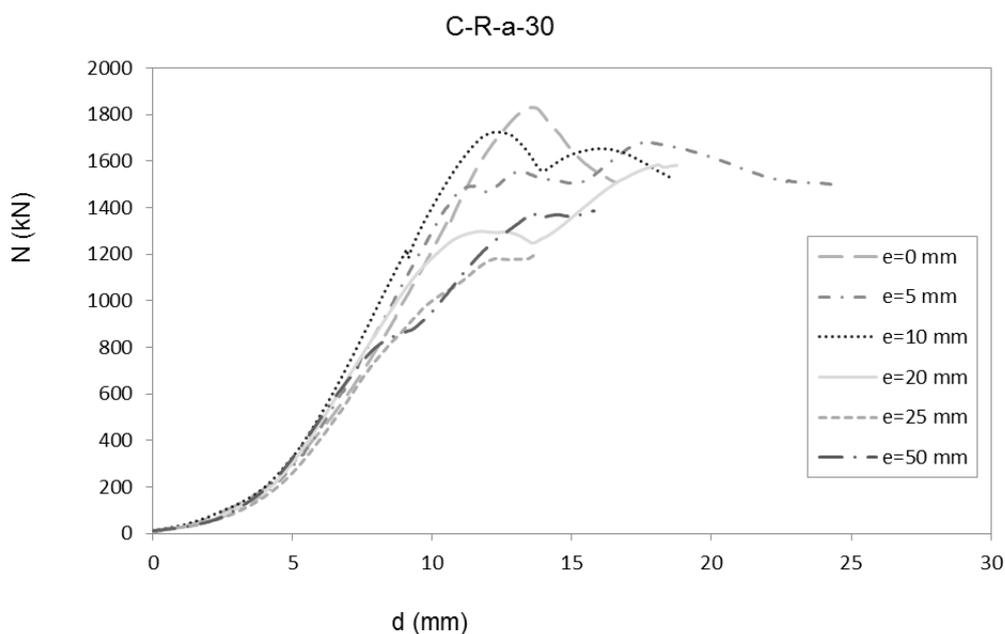


Figura 81. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie C-R-a-30

En la figura anterior se aprecia las curvas de comportamiento para la reducción de la longitud axial del pilar con el aumento de la carga para la subserie C-R-a-30. También para los CFDSST con esta sección, se aprecia una reducción de los valores de carga máxima con el aumento de la excentricidad.

Hormigón de 90 MPa

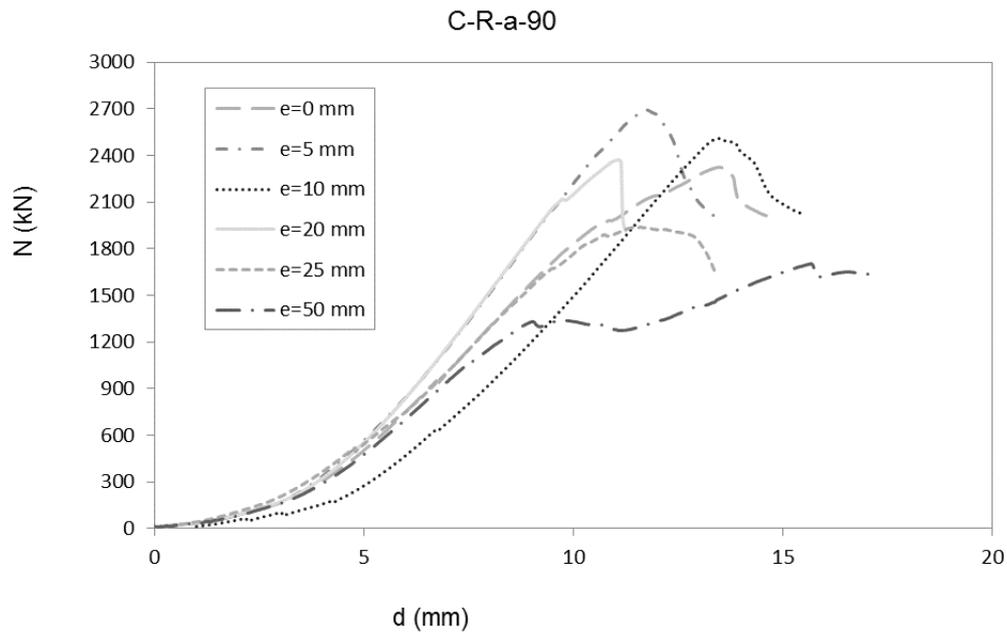


Figura 82. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie C-R-a-90

La *figura 82* muestra el acortamiento axial con la variación de carga para las columnas de la subserie con relleno de hormigón de 90 MPa (C-R-a-90). En esta figura se pueden observar unas curvas de comportamiento bastante similares con el aumento de la excentricidad.

C-R-b

Esta serie de pilares está formada por una sección circular exterior, con un tubo de 219.1 mm de diámetro y 3 mm de espesor, y una sección rectangular interior, con un tubo de 100 mm de ancho, 80 mm de alto y 2 mm de espesor.

Esta serie de ensayos se ha llevado a cabo aplicando la excentricidad en la dirección del eje fuerte del tubo interior

Tabla 28. Resultados de la serie C-R-b

Denominación	$f_{c_{exp}}$ (MPa)	N_{exp} (kN)
C-R-b-30-05	38.46	1778.50
C-R-b-30-10	38.46	1703.20
C-R-b-30-20	38.46	1662.50
C-R-b-30-25	38.46	1482.50
C-R-b-30-50	38.46	1405.50
C-R-b-90-05	90.56	3018.80
C-R-b-90-10	90.56	2575.20
C-R-b-90-20	90.56	2102.30
C-R-b-90-25	90.56	2185.50
C-R-b-90-50	90.56	1786.70

Hormigón de 30 MPa

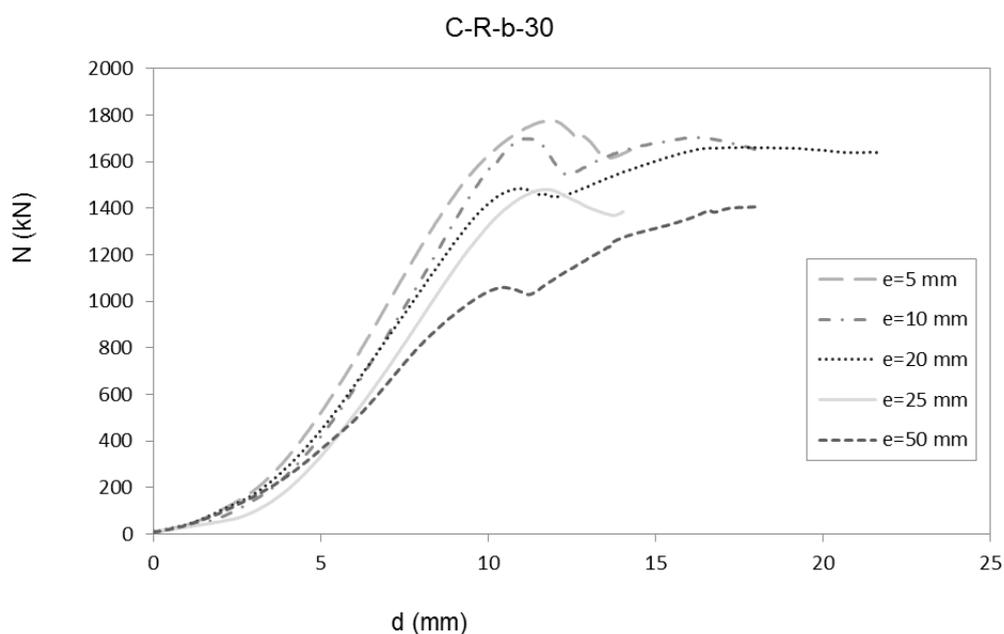


Figura 83. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie C-R-b-30

La figura 83 muestra el acortamiento axial para el aumento de carga de los pilares de la subserie C-R-b. Se aprecia unos menores valores de carga máxima al aumentar de la excentricidad como en muchas otras series.

Hormigón de 90 MPa

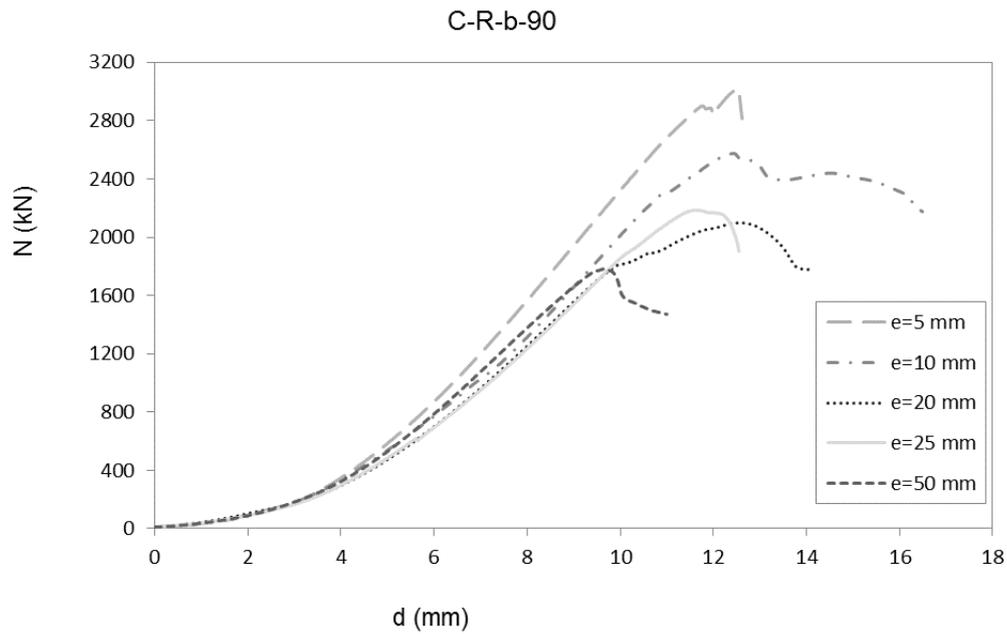


Figura 84. Curvas de carga-acortamiento axial de la subserie C-R-b-90

La figura anterior representa la comparación del comportamiento de las columnas de la subserie con relleno de hormigón de 90 MPa en términos de la variación de la carga axial con el acortamiento del pilar. Es notable el descenso de la carga máxima al aumentar la excentricidad como se viene comentando.

7.2 INFLUENCIA DE LA GEOMETRÍA

Para tener en cuenta la influencia de la geometría de la sección se han comparado pilares con semejante área transversal, en los que se han comparado tanto variando su excentricidad como el hormigón de relleno.

Grupo 1

El grupo 1 está formado por las siguientes series de especímenes:

- C168.3,2.8_300_275

Esta serie de pilares están formados por un tubo circular con un diámetro de 168.3 mm y un espesor de 2.8 mm. Esta sección tiene un área de 1455,81 mm².

- C159,3_300_275

Esta serie de pilares están formados por un tubo circular con un diámetro de 159 mm y un espesor de 3 mm. Esta sección tiene un área de 1470,27 mm².

- S125.125.3_300_275

Esta serie de pilares están formados por un tubo cuadrado de 125 mm de lado y 3 mm de espesor. Esta sección tiene un área de 1464 mm².

Análisis teórico y experimental de pilares mixtos tipo CFST empleando hormigón de alta resistencia y agua como material de relleno

Hormigón de 30 MPa

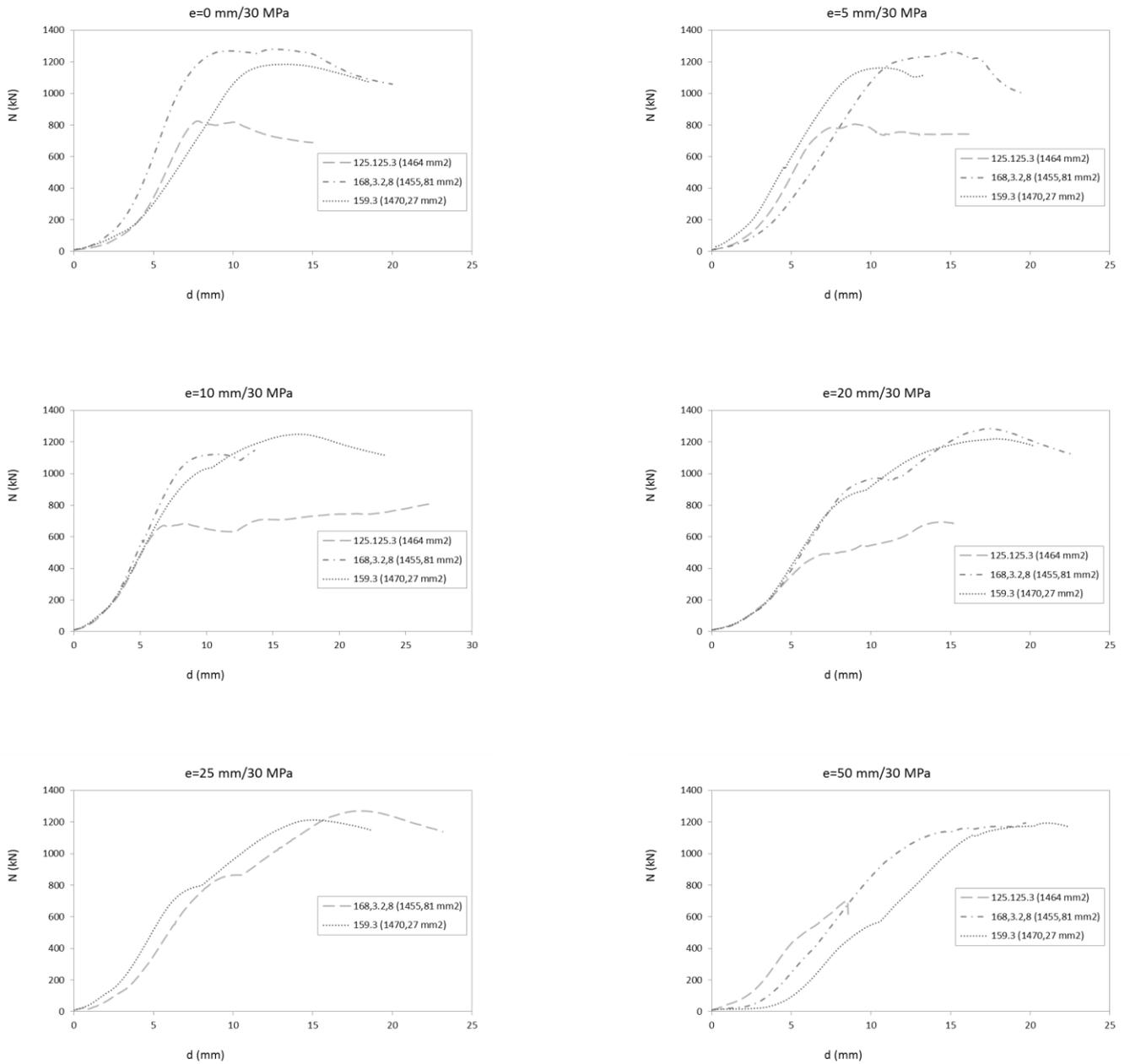


Figura 85. Curvas carga-acortamiento axial de especímenes con igual excentricidad y hormigón de relleno de 30 MPa. Grupo 1

Hormigón de 90 MPa

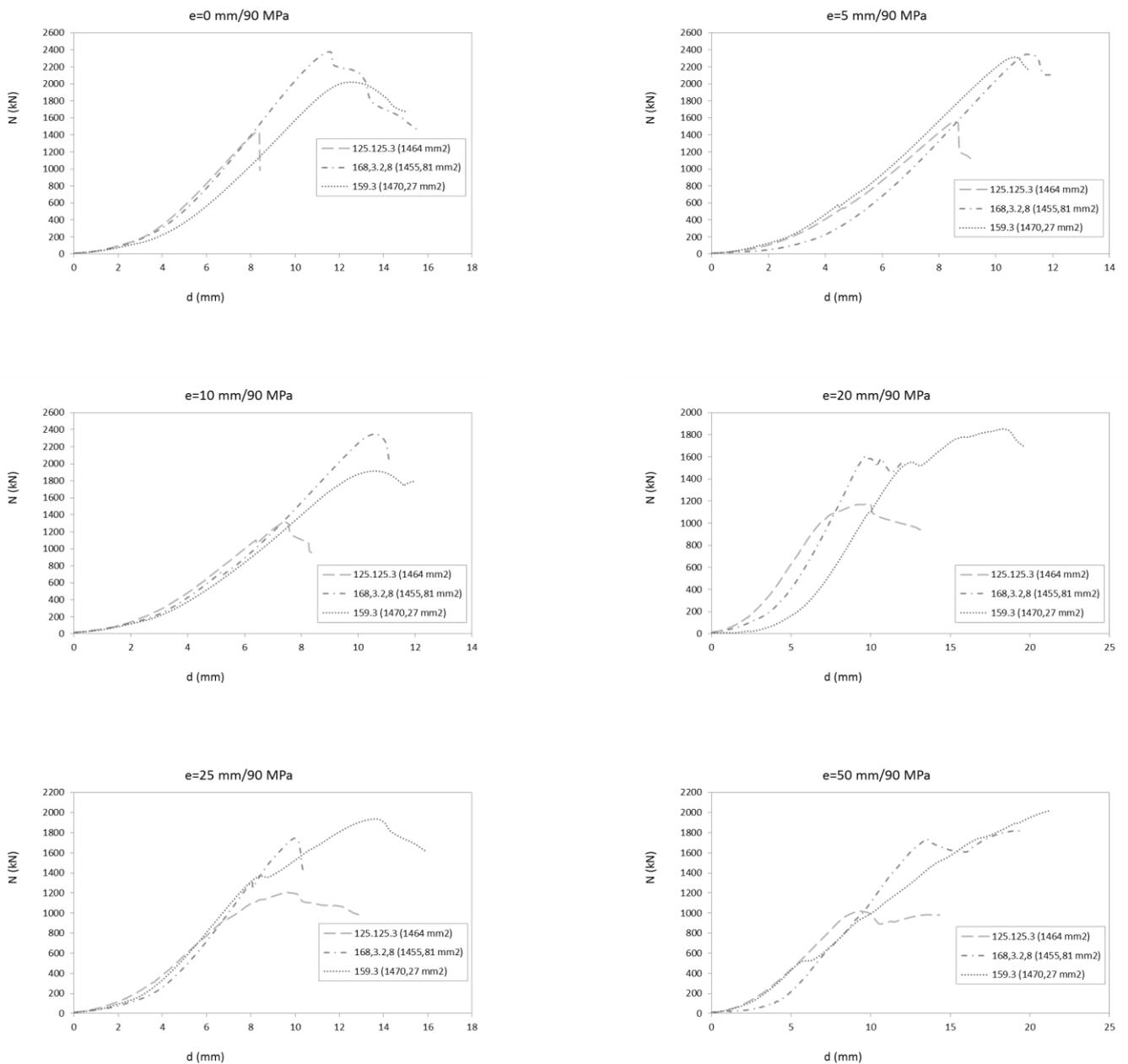


Figura 86. Curvas carga-acortamiento axial de especímenes con igual excentricidad y hormigón de relleno de 90 MPa. Grupo 1

Las figuras 85 y 86 muestran las curvas de comportamiento de los diferentes especímenes con área equivalente (C168.3,2.8_300_275, C159,3_300_275 y S125.125.3_300_275) cuando se emplea el mismo hormigón de relleno y la misma excentricidad. Se puede observar la influencia de la forma de la sección, siendo las secciones circulares aquellas que alcanzan una carga máxima hasta aproximadamente dos veces la de la sección cuadrada como se muestra en la figura siguiente. La forma, como ya se ha explicado anteriormente, influye en el grado de confinamiento que experimenta el núcleo de hormigón, siendo en perfil cuadrado menor que en los circulares.

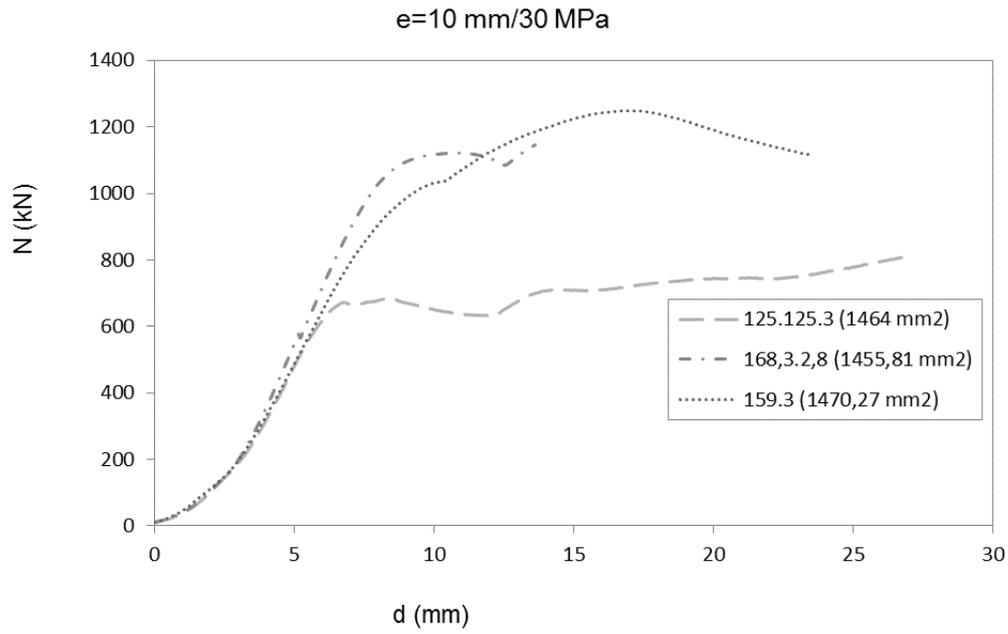


Figura 87. Curvas carga-acortamiento axial de especímenes con $e=10$ mm y hormigón de relleno de 30 MPa. Grupo 1

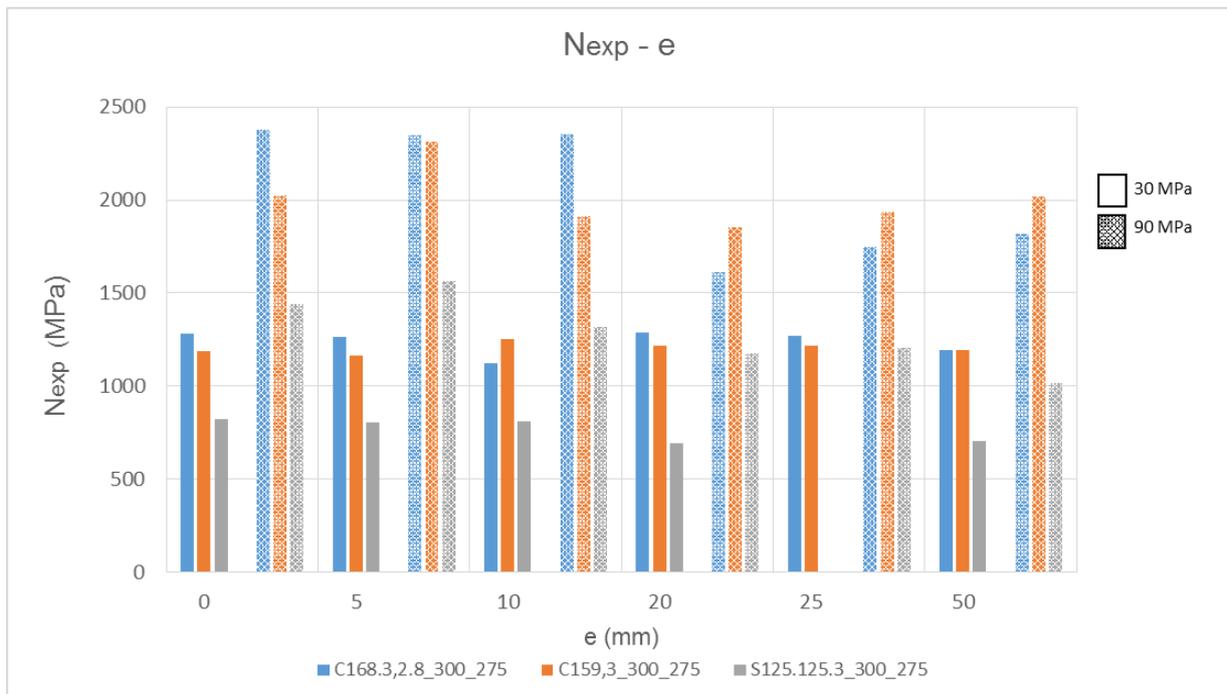


Figura 88. Comparación axial máxima-excentricidad para especímenes con área equivalente. Grupo 1

En la *figura 88* se puede ver una gráfica con la comparación del axil máximo de cada espécimen con área equivalente ante la variación de la excentricidad y el hormigón de relleno. Una vez más se puede apreciar en esta figura cómo disminuye la contribución del hormigón con el aumento de la excentricidad. También se vuelve a observar el mejor comportamiento de las secciones circulares frente a la de sección cuadrada. Esto es debido a que las secciones circulares logran un mejor confinamiento del núcleo y poseen una mayor concentración ($C=A/i^2$).

Grupo 2

El grupo 2 está formado por las siguientes series de especímenes:

- R150.100.4_300_275

Esta serie de pilares están formados por un tubo rectangular con una base de 150 mm, un ancho de 100 mm y un espesor de 4 mm. Esta sección tiene un área de 1936 mm² y se comparan los resultados de aplicar la excentricidad en ambos ejes de inercia ("w" y "s").

- S125.125.4_300_275

Esta serie de pilares están formados por un tubo cuadrado con un lado de 125 mm y un espesor de 4 mm. Esta sección tiene un área de 1936 mm².

- R200.120.3_300_275

Esta serie de pilares están formados por un tubo rectangular con una base de 200 mm, un ancho de 120 mm y un espesor de 3 mm. Esta sección tiene un área de 1884 mm² y se comparan los resultados de aplicar la excentricidad en ambos ejes de inercia ("w" y "s").

Análisis teórico y experimental de pilares mixtos tipo CFST empleando hormigón de alta resistencia y agua como material de relleno

Hormigón de 30 MPa

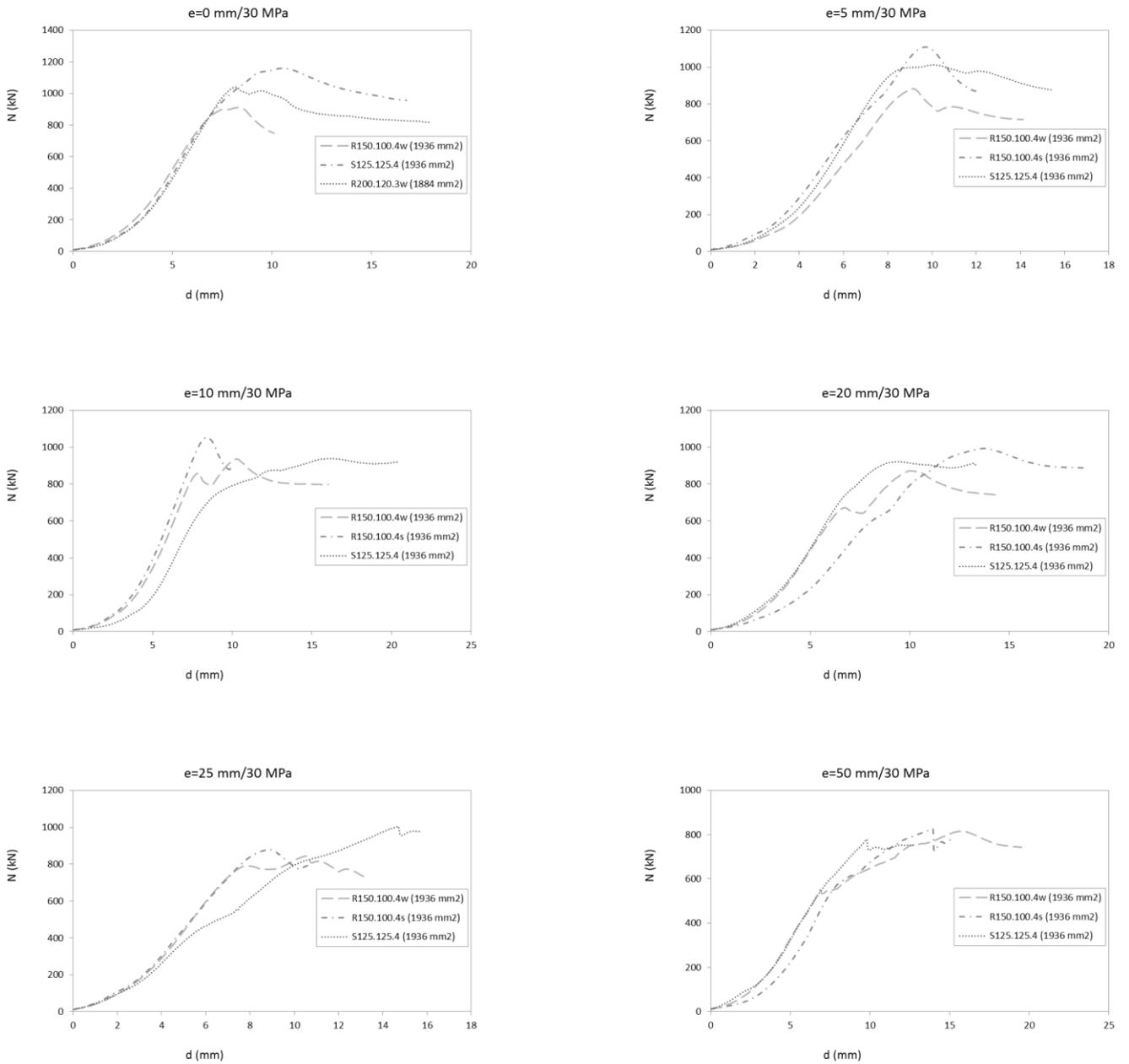


Figura 89. Curvas carga-acortamiento axial de especímenes con igual excentricidad y hormigón de relleno de 30 MPa. Grupo 2

Hormigón de 90 MPa

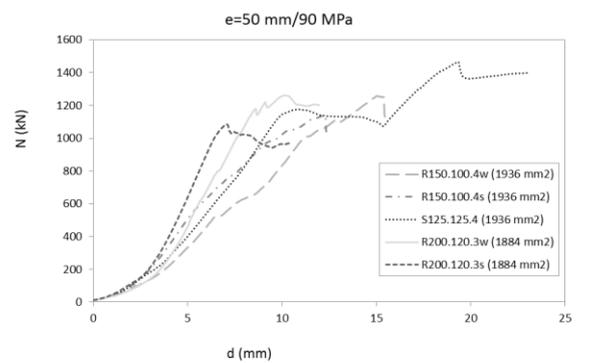
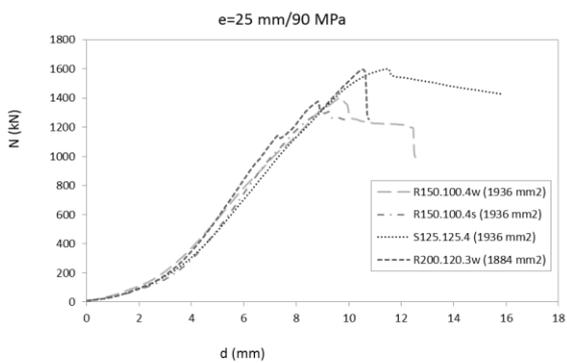
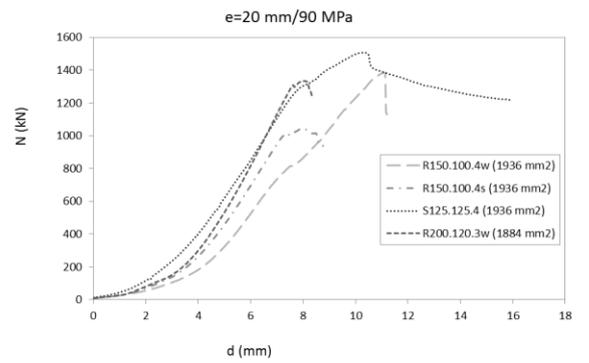
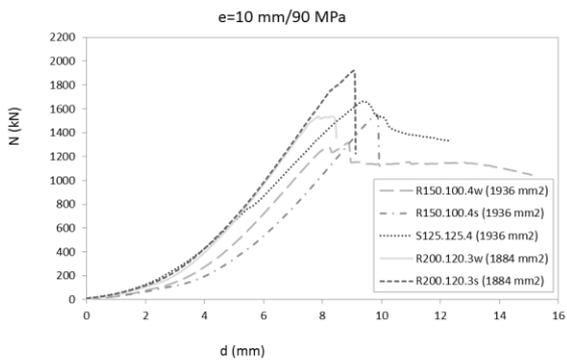
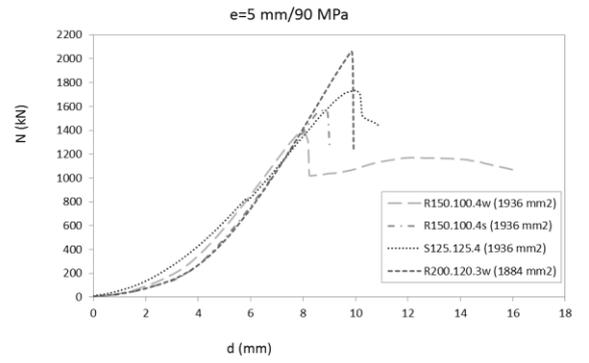
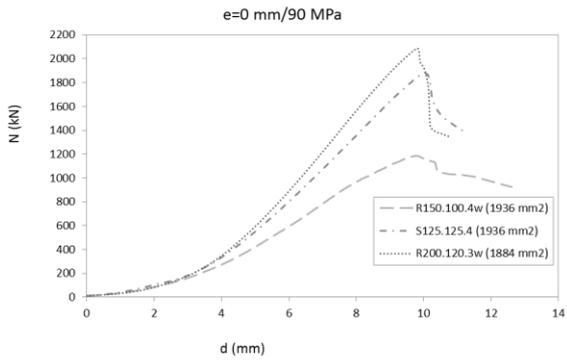


Figura 90. Curvas carga-acortamiento axial de especímenes con igual excentricidad y hormigón de relleno de 90 MPa. Grupo 2

En las *figuras 89 y 90*, como en el anterior grupo, se muestran las curvas de comportamiento, para el mismo hormigón de relleno y la misma excentricidad, de los diferentes especímenes con área equivalente (R150.100.4_300_275, S125.125.4_275 y R200.120.3_300_275). En los especímenes con hormigón de 30 MPa se observa claramente la influencia en la carga última del eje de ensayo, y por tanto de la inercia respecto a ese eje. Los especímenes rectangulares ensayados en su eje fuerte alcanzan, por norma general, el valor de carga máxima más alto, seguidos de los de sección cuadrada y los rectangulares ensayados en el eje débil. Este efecto no es tan notable en los especímenes con hormigón de 90 MPa.

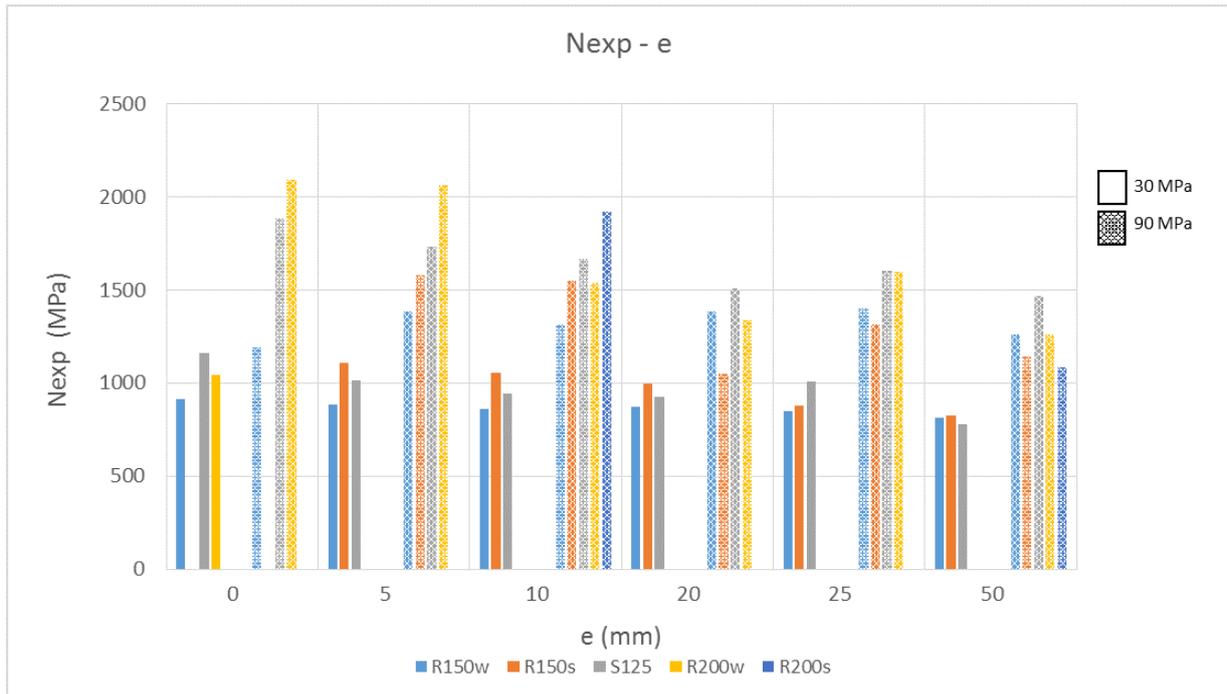


Figura 91. Comparación axil máxima-excentricidad para especímenes con área equivalente. Grupo 2

De nuevo en la *figura 91*, se ilustra la comparación del axil máximo de cada espécimen con área equivalente ante la variación de la excentricidad y el hormigón de relleno. Una vez más se puede apreciar cómo disminuye la contribución del hormigón con el aumento de la excentricidad. También se observa que la influencia del eje de ensayo es menor en los especímenes con hormigón de 90 MPa.

7.3 INFLUENCIA DEL ESPESOR DEL TUBO

Para considerar el efecto del espesor del tubo se han comparado series de tubos con las mismas dimensiones pero con diferentes espesores de tubo.

S125.125

Este grupo está formado por las series S125.125.3_300_275 y S125.125.4_300_275, las cuales tienen las mismas dimensiones de 125 mm de lado, pero con diferente espesor de tubo, 3 y 4 mm, respectivamente. Estas series se han comparado tanto variando su excentricidad como el hormigón de relleno.

Hormigón de 30 MPa

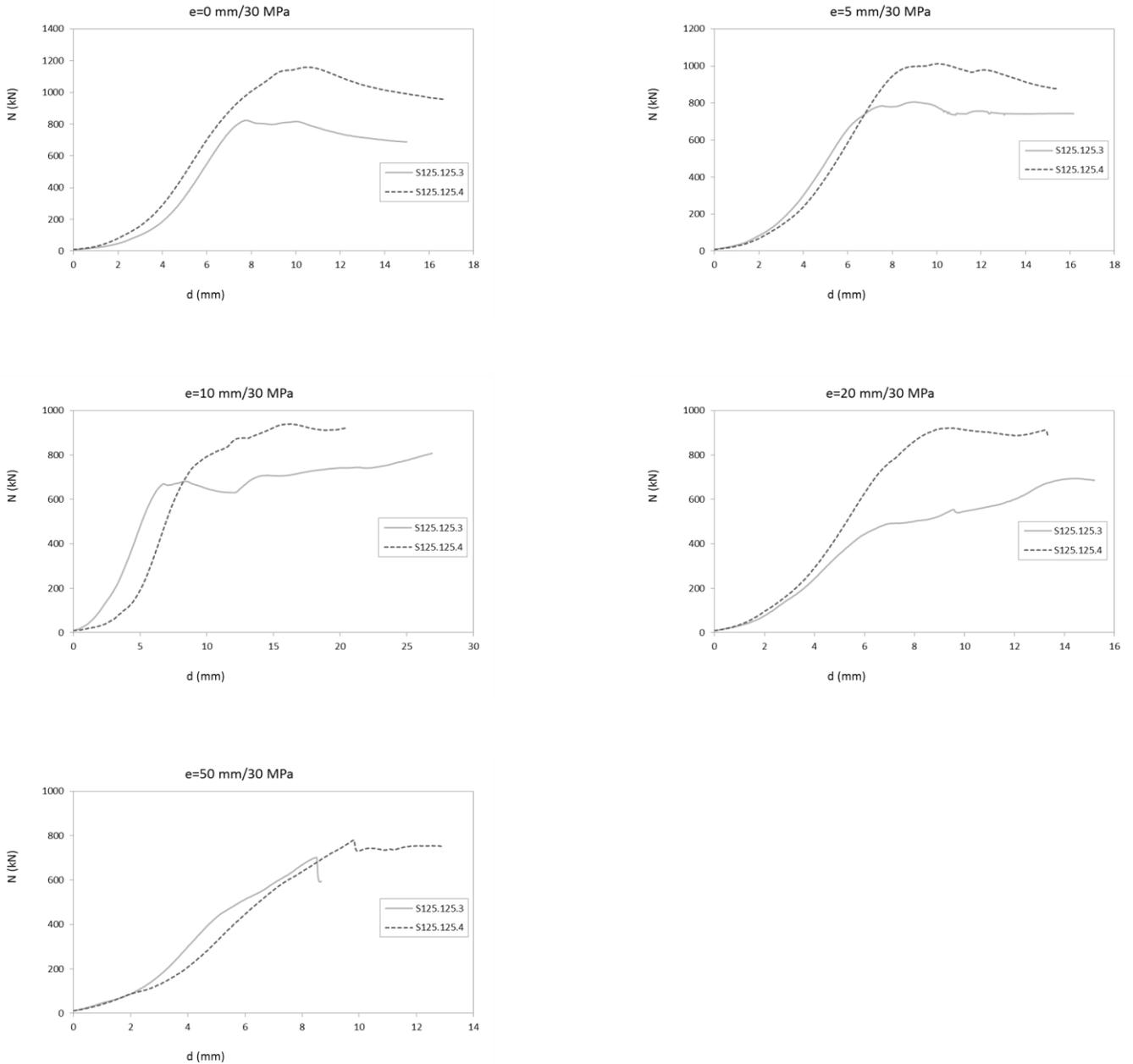


Figura 92. Curvas carga-acortamiento axial de especímenes con igual excentricidad y hormigón de relleno de 30 MPa. Grupo S125.125

Análisis teórico y experimental de pilares mixtos tipo CFST empleando hormigón de alta resistencia y agua como material de relleno

Hormigón de 90 MPa

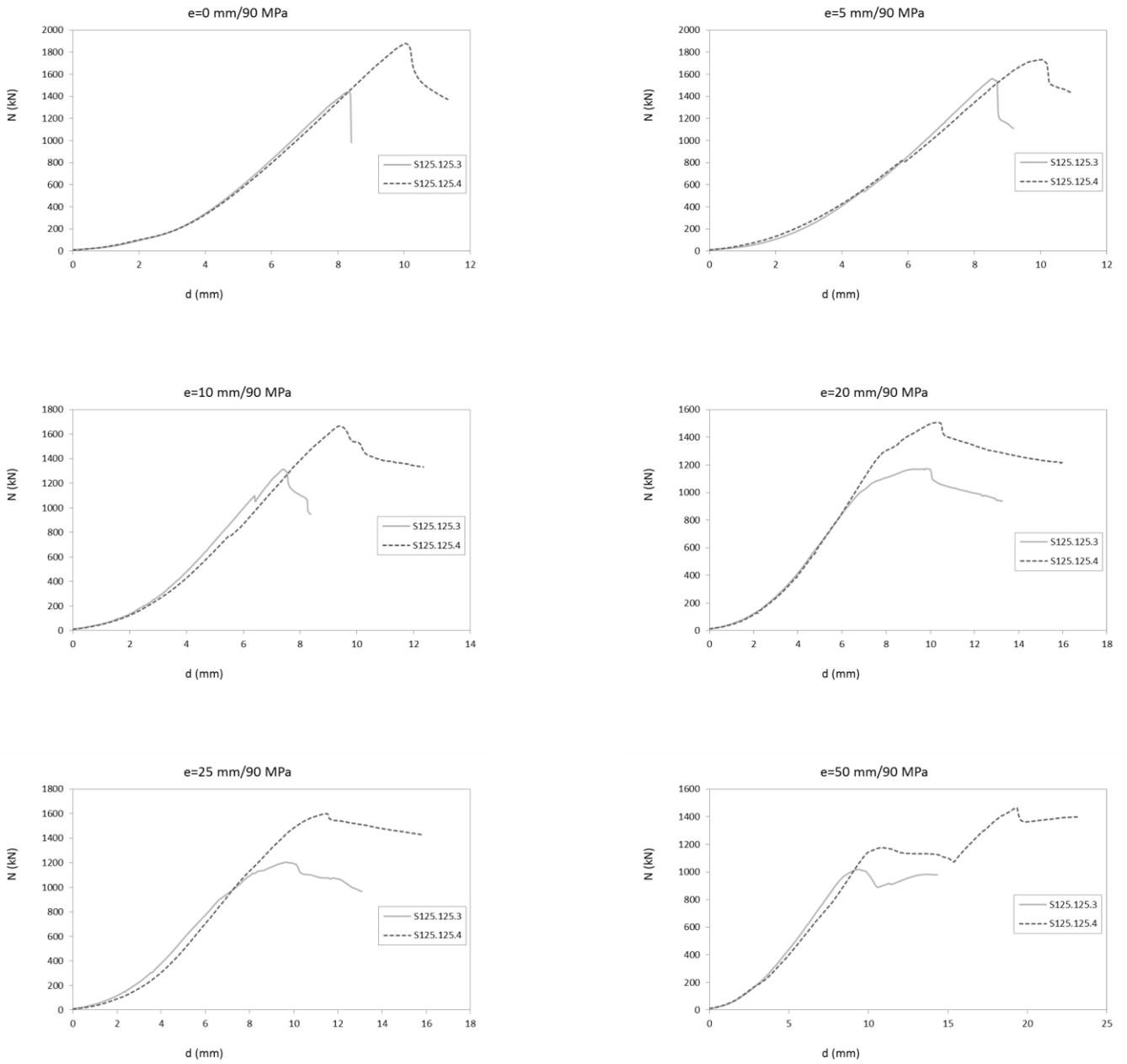


Figura 93. Curvas carga-acortamiento axial de especímenes con igual excentricidad y hormigón de relleno de 90 MPa. Grupo S125.125

En la *figuras 92 y 93* están representadas las curvas de acortamiento axial con la carga de los diferentes especímenes con mismas dimensiones pero diferente espesor (S125.125.3_300_275 y S125.125.4_300_275). Los especímenes están rellenos con el mismo hormigón y han sido ensayados bajo la misma excentricidad de carga. En las figuras, se aprecia un comportamiento muy similar entre los dos especímenes, como cabría esperar. En cuanto a las cargas máximas, por lo general, las del espécimen con mayor espesor de tubo serán superiores lo que puede estar relacionado con el mayor confinamiento que se consigue con este.

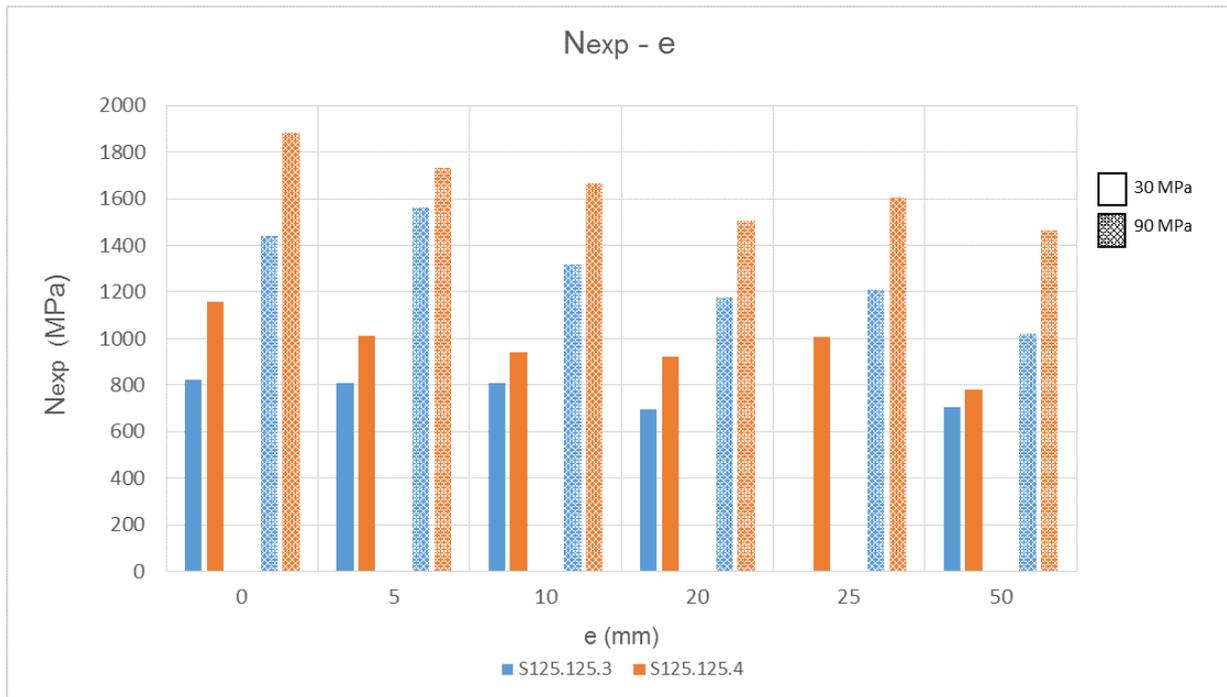


Figura 94. Comparación axil máxima-excentricidad para especímenes con área equivalente. Grupo S125.125

En la gráfica anterior se representa la comparación del axil máximo de cada espécimen con mismas dimensiones pero diferente espesor de tubo ante la variación de la excentricidad y el hormigón de relleno. En la figura se puede apreciar una menor diferencia de cargas máximas entre los especímenes de hormigón de 30 MPa cuando aumenta la excentricidad, como era previsible.

R150.100w

Este grupo está formado por las series R150.100.4_300_275w y R150.100.5_300_275w, las cuales tienen las mismas dimensiones de 150 mm de ancho por 100 mm de alto, pero con diferente espesor de tubo, 4 y 5 mm, respectivamente. Para estas series, ensayadas en el eje débil ("w"), se ha realizado una comparación variando su excentricidad y el hormigón de relleno.

Hormigón de 30 MPa

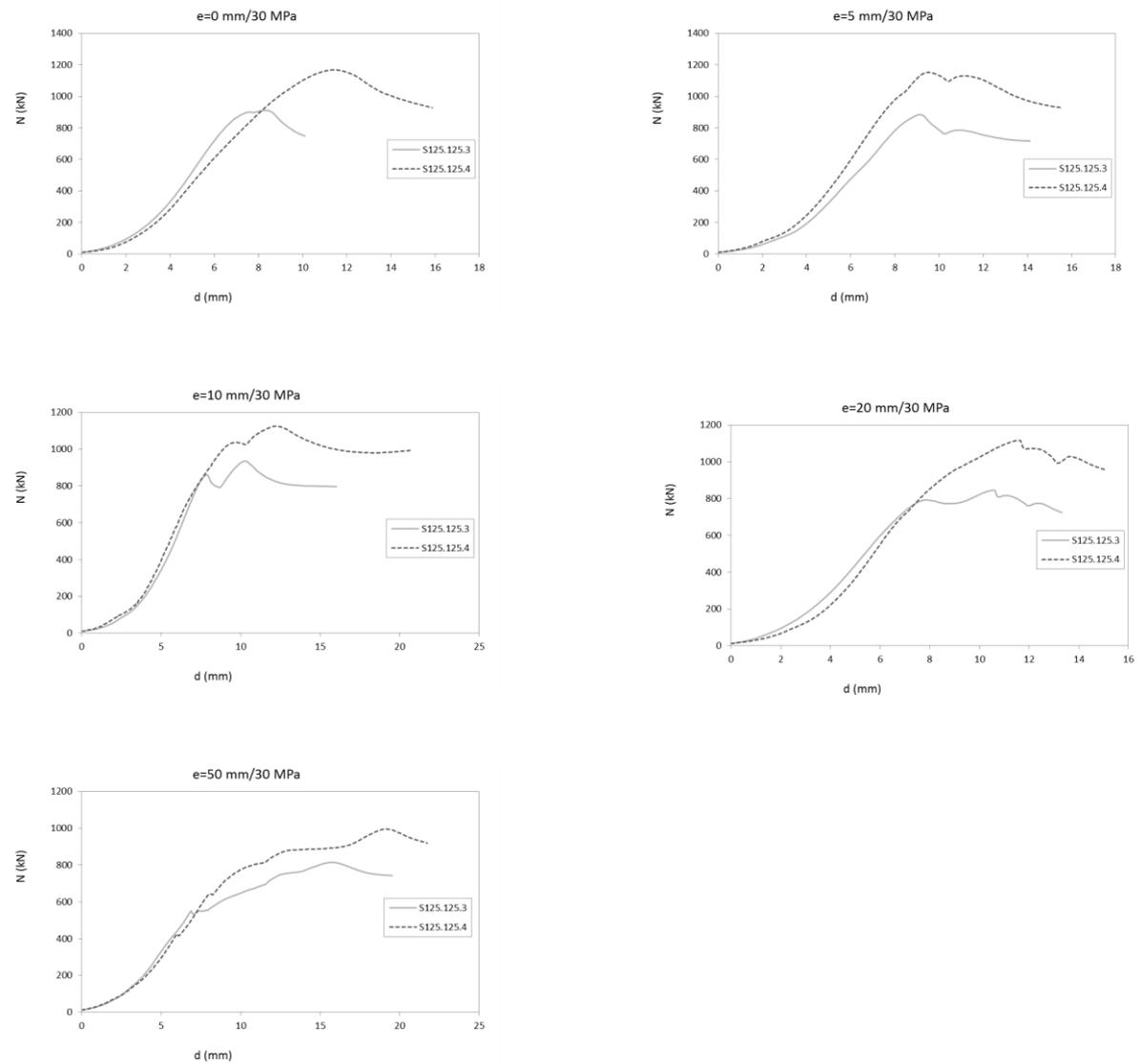


Figura 95. Curvas carga-acortamiento axial de especímenes con igual excentricidad y hormigón de relleno de 30 MPa. Grupo R150.100w

Hormigón de 90 MPa

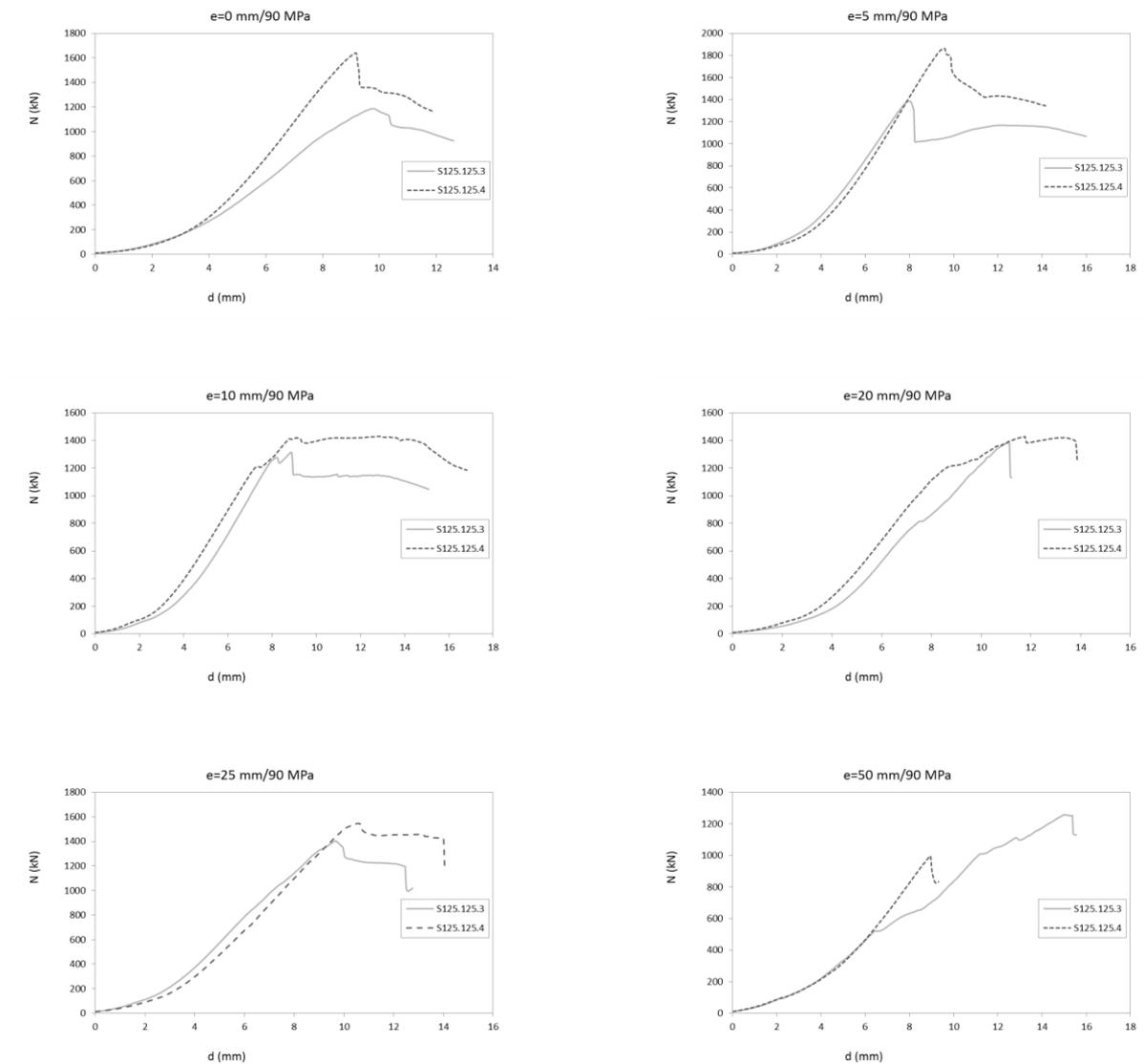


Figura 96. Curvas carga-acortamiento axial de especímenes con igual excentricidad y hormigón de relleno de 90 MPa. Grupo R150.100w

Las *figuras 95* y *96* ilustran los resultados de los diferentes especímenes con mismas dimensiones pero diferente espesor (R150.100.4_300_275w y R150.100.5_300_275w) cuando se emplea el mismo hormigón de relleno y la misma excentricidad en términos de la variación de la carga axial con el acortamiento del pilar. Se puede observar un comportamiento muy similar entre los dos especímenes. En cuanto a las cargas máximas, por lo general, las del espécimen con mayor espesor de tubo serán superiores lo que puede ser debido al mayor confinamiento. Este comportamiento ya se ha descrito en la serie S125.125.

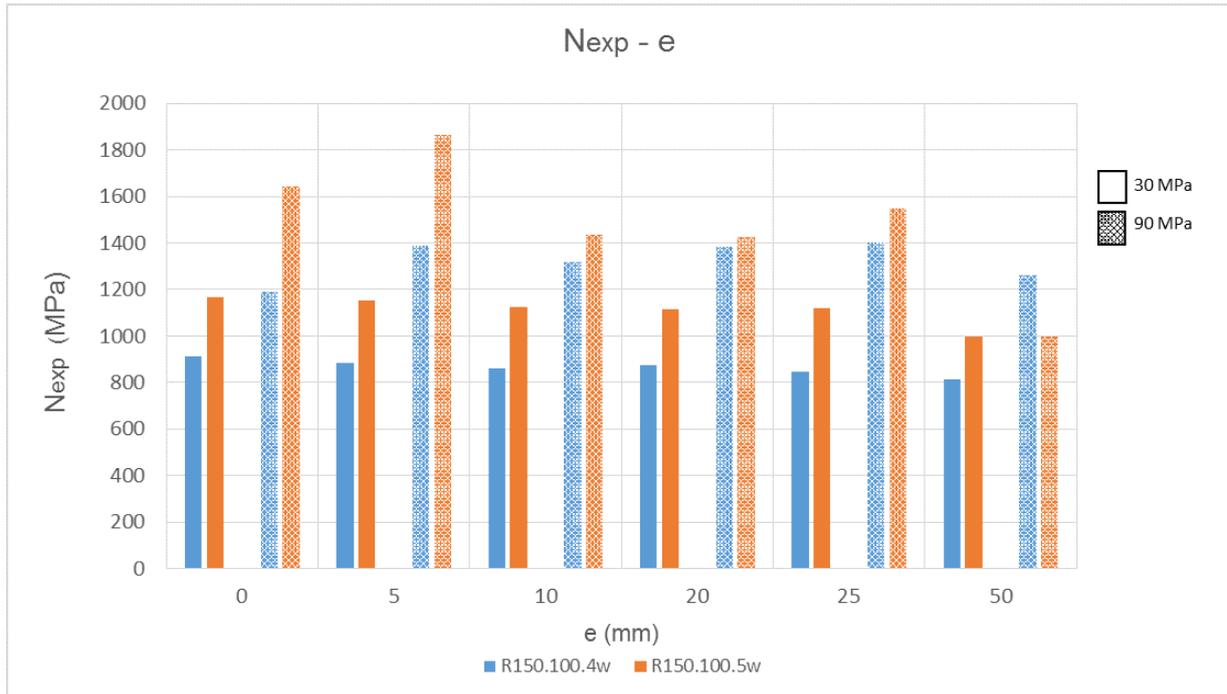


Figura 97. Comparación axil máxima-excentricidad para especímenes con área equivalente. Grupo R150.100w

En la *figura 97* se ilustra la comparación del axil máximo de cada espécimen con mismas dimensiones, pero diferente espesor de tubo ante la variación de la excentricidad y el hormigón de relleno. No se aprecia una clara tendencia ante el aumento de la excentricidad al variar el tubo más allá de la ya descrita disminución de las cargas máximas.

R150.100s

Este grupo está formado por las series R150.100.4_300_275s y R150.100.5_300_275s, las cuales tienen las mismas dimensiones de 150 mm de ancho por 100 mm de alto, pero con diferente espesor de tubo, 4 y 5 mm, respectivamente. Los resultados de los especímenes ensayados en el eje fuerte (“s”), se han comparado tanto variando su excentricidad como el hormigón de relleno.

Hormigón de 30 MPa

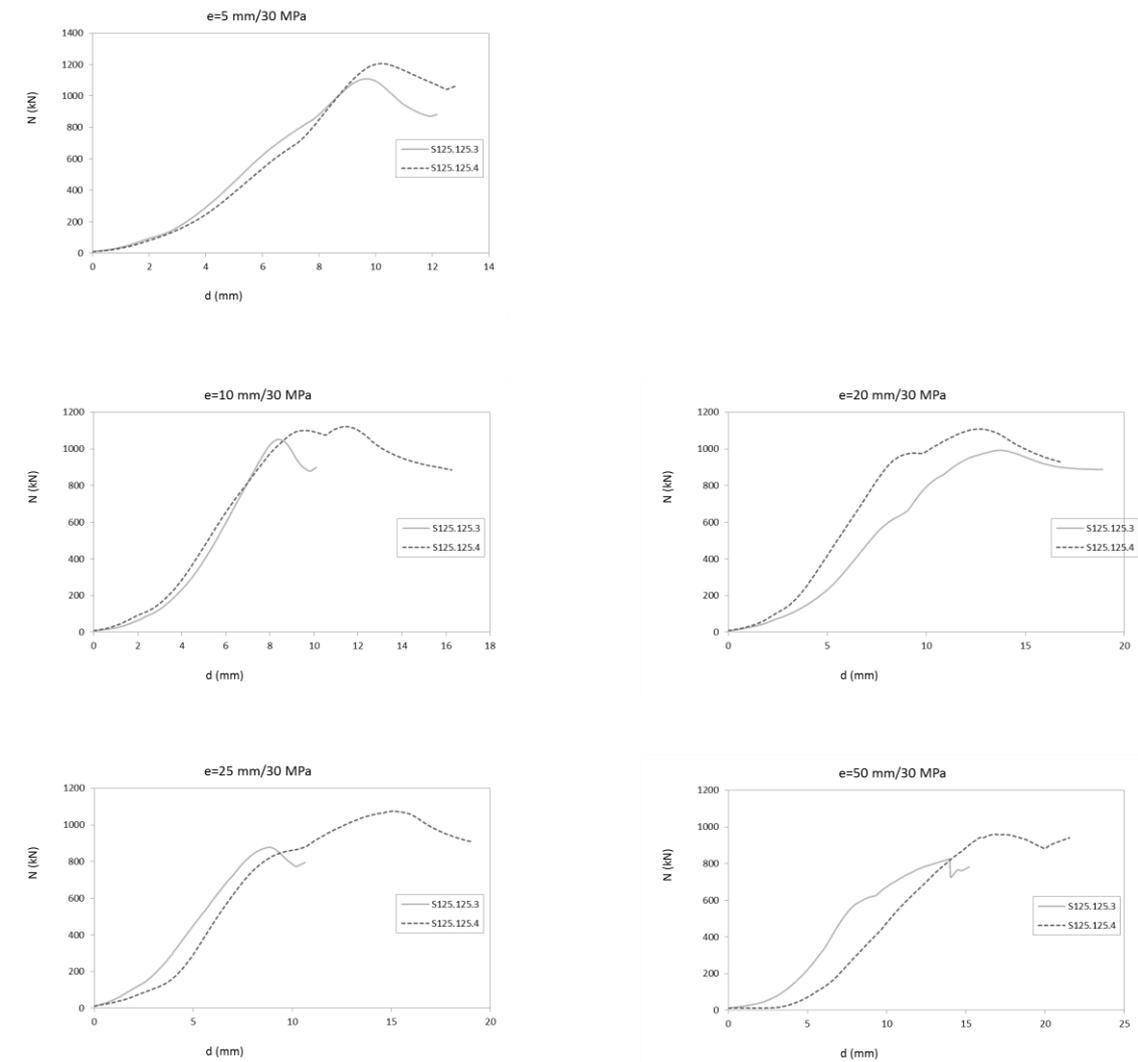


Figura 98. Curvas carga-acortamiento axial de especímenes con igual excentricidad y hormigón de relleno de 30 MPa. Grupo R150.100s

Hormigón de 90 MPa

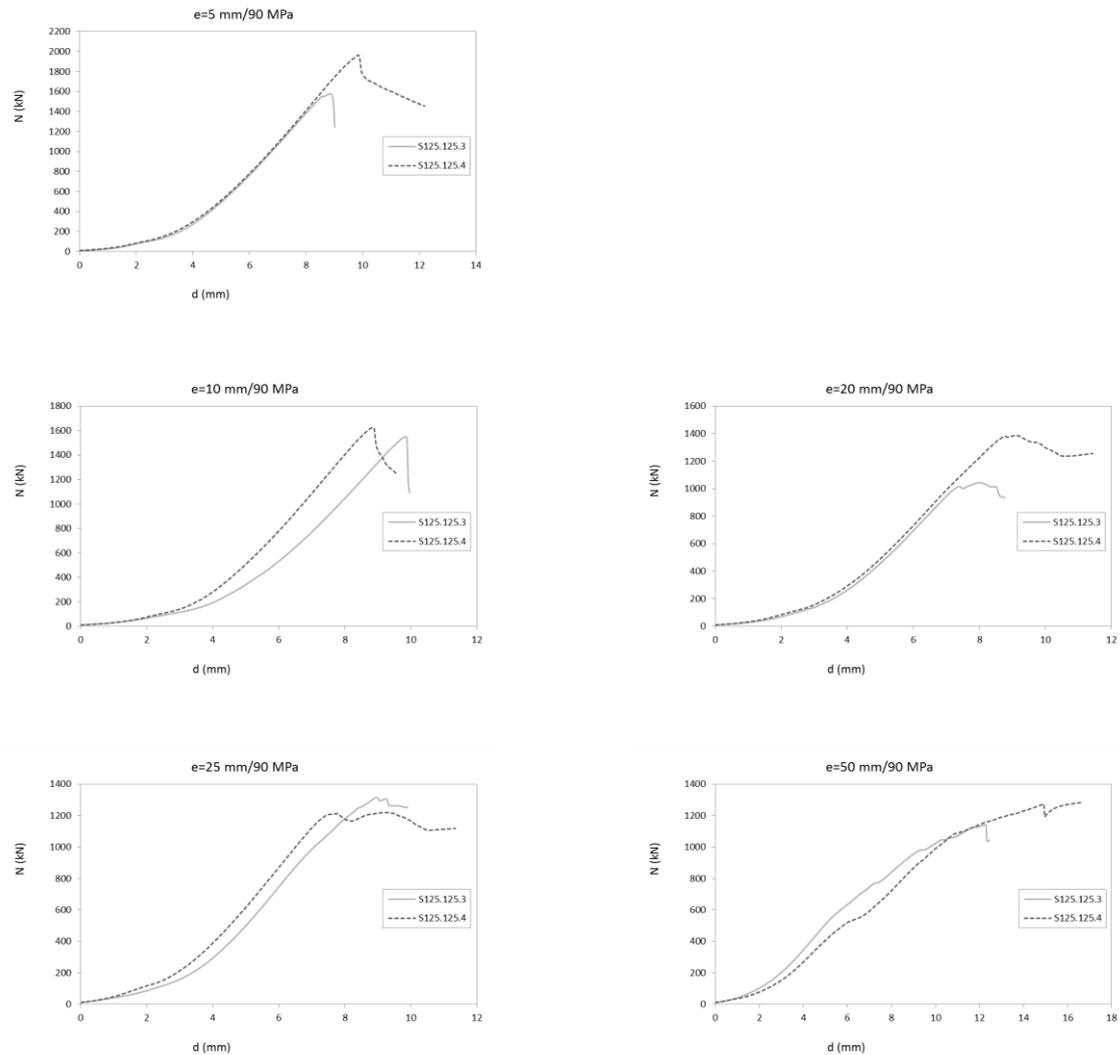


Figura 99. Curvas carga-acortamiento axial de especímenes con igual excentricidad y hormigón de relleno de 90 MPa. Grupo R150.100s

Estas dos figuras anteriores representan las curvas de comportamiento de los diferentes especímenes con mismas dimensiones pero diferente espesor (R150.100.4_300_275s y R150.100.5_300_275s, respectivamente) cuando se emplea el mismo hormigón de relleno y la misma excentricidad. Se puede observar un comportamiento muy similar entre los dos especímenes, aunque no tanto como en los dos casos anteriores. Respecto a las cargas observamos que generalmente las del espécimen con mayor espesor de tubo serán superiores, como ya se ha visto en el grupo anterior.

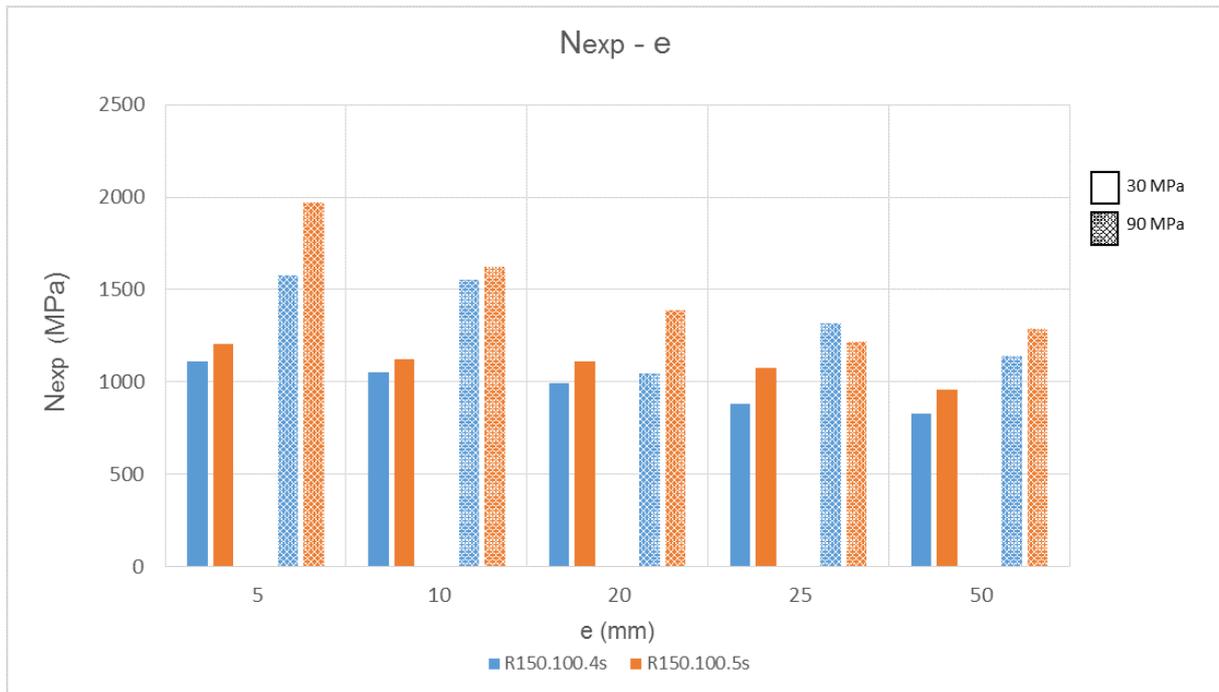


Figura 100. Comparación axil máxima-excentricidad para especímenes con área equivalente. Grupo R150.100s

La *figura 100* ilustra la comparación del axil máximo de cada espécimen ante la variación de la excentricidad y el hormigón de relleno. Tal y como sucedía en el anterior grupo, no se aprecia una clara tendencia ante el aumento de la excentricidad al variar el tubo.

8. CONCLUSIONES

Las conclusiones que extraemos del análisis de los resultados son las siguientes:

- Previsiblemente se ha observado un descenso de las cargas máximas de los pilares al aumentar la excentricidad, independientemente del hormigón de relleno utilizado. Este descenso parece ser menor en los especímenes CFST de sección circular, por lo que la causa más probable puede ser el mayor confinamiento que se consigue con estos. Este comportamiento no se ha observado para los pilares CFDSST, aunque también es cierto que se han analizado poco especímenes de esta tipología y por tanto este comportamiento puede estar enmascarado por la variabilidad de los ensayos.
- Los resultados han demostrado que existe un aumento del comportamiento dúctil con el incremento de la excentricidad de carga. La explicación de esta característica puede estar en la disminución de la contribución del núcleo de hormigón en el comportamiento seccional. Esta menor contribución del hormigón estaría causada por la reducción de la zona comprimida. Esta reducción de la zona comprimida obliga al tubo de acero a soportar mayores cargas, incrementado así la contribución del tubo de acero, con su mayor ductilidad, en el comportamiento seccional.
- El análisis de la influencia de la geometría ha constatado geometría ha constatado el mejor comportamiento de los especímenes de sección circular frente a las demás geometrías debido a su mayor confinamiento. Por otro lado, este análisis ha demostrado la gran influencia del eje de ensayo en los pilares de sección rectangular, como también se ha observado en las series C-R-a y C-R-b.
- En cuanto al análisis del espesor del tubo, los resultados obtenidos muestran un mejor comportamiento de los especímenes con mayor ratio D/t debido a su mayor confinamiento. Este efecto no es tan influyente a grandes excentricidades ya que la reducción de la zona a compresión conlleva una disminución del confinamiento.
- Finalmente, y debido a las grandes ventajas que incorporan este tipo de pilares, se insta a investigar más en este campo para poder aumentar la comprensión y regularización de los estés tipologías de pilares con tanta proyección.

9. REFERENCIAS

- [1] AISC. 2010. 360-10: Specification for Structural Steel Buildings, Chicago, Illinois: American Institute of Steel Construction.
- [2] American Concrete Institute. 2014. Building code requirements for structural concrete (ACI 318-14) and commentary on building code requirements for structural concrete (ACI 318R-14). Michigan: American Concrete Institute.
- [3] Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2013. NBR 14323: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [4] Bazant ZP. 1988. Mathematical model of creep and shrinkage of concrete. Ed. Z. P. Bazant, John Wiley & Sons Ltd.
- [5] CEN. 2004. EN 1992-1-1, Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1-1: General rules. Brussels, Belgium: Comité Européen de Normalisation.
- [6] CEN. 2004. EN 1994-1-1, Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels, Belgium: Comité Européen de Normalisation.
- [7] CEN. 2005. EN 1993-1-1, Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-1. General rules. Brussels, Belgium: Comité Européen de Normalisation.
- [8] Ding F, Fu L, Yu Z, Li G. 2015. Mechanical performances of concrete-filled steel tubular stub columns with round ends under axial loading. *Thin-Walled Structures* 97: 22-34.
- [9] Ekmekyapar T, AL-Eliwi BJM. 2016. Experimental behaviour of circular concrete filled steel tube columns and design specifications. *Thin-Walled Structures* 105: 220-230.
- [10] Ekmekyapar T, AL-Eliwi BJM. 2017. Concrete filled double circular steel tube (CFDCST) stub columns. *Engineering Structures* 135: 68-80.
- [11] Elchalakani M, Zhao X-L, Grzebieta R. 2002. Tests on concrete filled double-skin (CHS outer and SHS inner) composite short columns under axial compression. *Thin-Walled Structures* 40 (5): 415-441.
- [12] Essopjee Y, Dundu M. 2015. Performance of concrete-filled double-skin circular tubes in compression. *Composite Structures* 133: 1276-1283.
- [13] Fa-xing D, Lei F, Zhi-wu Y. 2017. Behaviors of axially loaded square concrete-filled steel tube (CFST) Stub columns with notch in steel tube. *Thin-Walled Structures* 115: 196-204.
- [14] Garavito CP, Calavera Ruiz J. 2005. Influencia del tipo de refrentado y de la clase de probeta, cúbica o cilíndrica, en la medida de la resistencia del hormigón. Cuaderno de INTEMAC 57.

- [15] Giakoumelis G, Lam D. 2004. Axial capacity of circular concrete-filled tube columns. *Journal of Constructional Steel Research* 60(7): 1049-1068.
- [16] Haas TN, Koen A. 2014. Eccentric loading of CFDST columns. *International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering* 8(12):1262-1266.
- [17] Han L-H, Li W, Bjorhovde R. 2014. Developments and advanced applications of concrete-filled steel tubular (CFST) structures: Members. *Journal of Constructional Steel Research* 100: 211-228.
- [18] Han L-H, Tao Z, Huang H, Zhao X-L. 2004. Concrete-filled double skin (SHS outer and CHS inner) steel tubular beam-columns. *Thin-Walled Structures* 42(9): 1329-1355.
- [19] Hassanein MF, Kharoob OF, Gardner L. 2015. Behaviour and design of square concrete-filled double skin tubular columns with inner circular tubes. *Engineering Structures* 100: 410-424.
- [20] Hernández-Figueirido D. 2012. Estudio experimental del pandeo de perfiles tubulares rectangulares de acero, rellenos de hormigón de alta resistencia, bajo carga axial y diagrama de momentos variable. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de Ingeniería Civil. UPV.
- [21] Ho JCM, Lam JYK, Kwan AKH. 2012. Flexural ductility and deformability of concrete beams incorporating high-performance materials. *Struct. Design Tall Spec. Build.* 21: 114–132.
- [22] Johansson M. 2002. Composite action and confinement effects in tubular steel concrete columns. Thesis for the degree of doctor of philosophy. Department of Structural Engineering, Concrete Structures. Chalmers University of technology.
- [23] Khan M, Uy B, Tao Z, Mashiri F. 2017. Concentrically loaded slender square hollow and composite columns incorporating high strength properties. *Engineering Structures* 131: 69-89.
- [24] Kuranovas A, Goode D, Kvedaras AK, Zhong S. 2009. Load-bearing capacity of concrete-filled steel columns. *Journal of Civil Engineering and Management* 15(1): 21-33.
- [25] Lee S-H, Uy B, Kim S-H, Choi Y-H, Choi S-M. 2001. Behavior of high-strength circular concrete-filled steel tubular (CFST) column under eccentric loading. *Journal of Constructional Steel Research* 67 (1): 1-13.
- [26] Matsui C. 1993. Local buckling of concrete filled steel square tubular columns. Symposium papers, International Association for Bridge and Structural Engineering Conference, Luxembourg: 269–76.
- [27] Mecapedia-Coeficiente de Poisson [Internet]. Mecapedia.uji.es. 2017 [citado el 25 de Mayo de 2017]. Disponible en: http://www.mecapedia.uji.es/coeficiente_de_Poisson.htm
- [28] Neville AM. 2002. Properties of concrete, 4th edition. Pearson Prentice Hall.

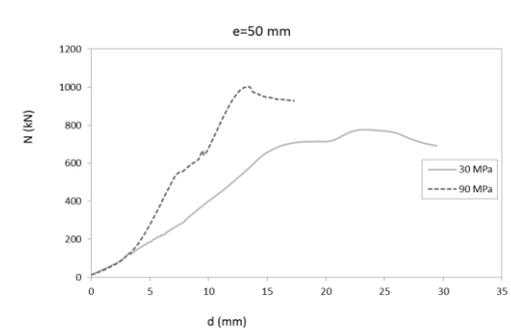
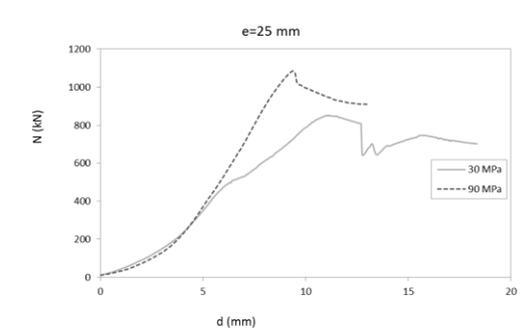
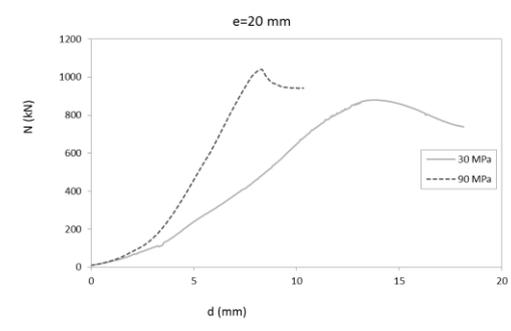
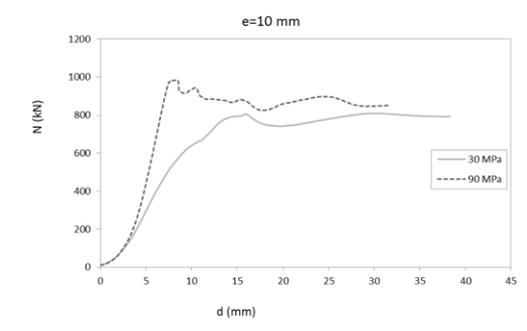
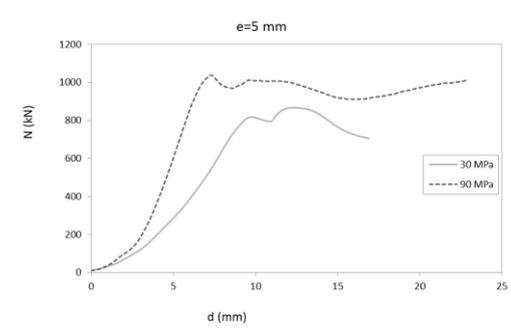
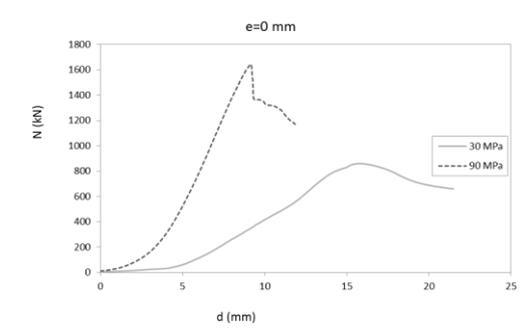
- [29] Oehlers D, Bradford M. 2004. Composite steel and concrete structural members, Elsevier.
- [30] Oliveira WLA, De Nardin S , El Debs ALHC, El Debs MK. 2009. Influence of concrete strength and length/diameter on the axial capacity of CFT columns. *Journal of Constructional Steel Research* 65 (12): 2103-2110.
- [31] Qu X, Chen Z, Sun G. 2013. Experimental study of rectangular CFST columns subjected to eccentric loading. *Thin-Walled Structures* 64: 83-93.
- [32] Tao Z, Han L-H, Zhao X-L. 2004. Behaviour of concrete-filled double skin (CHS inner and CHS outer) steel tubular stub columns and beam-columns. *Journal of Constructional Steel Research* 60 (8): 1129-1158.
- [33] Uenaka K, Kitoh H, Sonoda K. 2010. Concrete filled double skin circular stub columns under compression. *Thin-Walled Structures* 48(1): 19-24.
- [34] Umamaheswari N, Arul Jayachandran S. 2014. Influence of Concrete Confinement on Axial Load Capacity of Concrete-filled Steel Tubes. *Journal of Civil Engineering Research* 4 (2A): 12-16.
- [35] Wang Z-B, Tao Z, Han L-H, Uy B, Lam D, Kang W-H. 2017. Strength, stiffness and ductility of concrete-filled steel columns under axial compression. *Engineering Structures* 135: 209-221.
- [36] Wardenier J. 2002. *Perfiles Tubulares en Aplicaciones Estructurales*, 1ª Edición. CIDECT - ICT (Instituto de Construcción Tubular).
- [37] Zhao X-, Han L-H. 2006. Double skin composite construction. *Prog. Struct. Engng Mater.* 8: 93–102.
- [38] Zhao X-L, Grzebieta R. 2002. Strength and ductility of concrete filled double skin (SHS inner and SHS outer) tubes. *Thin-Walled Structures* 40 (2): 199-213.

ANEXO I

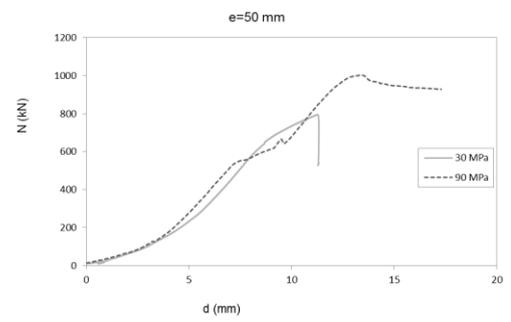
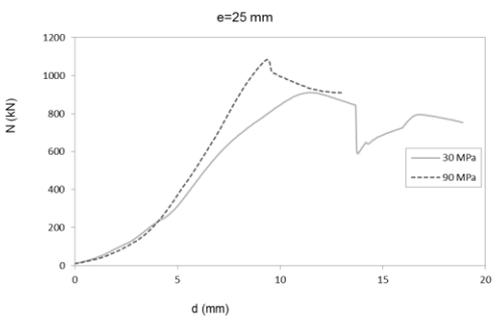
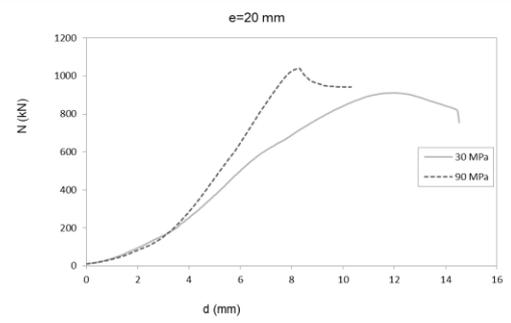
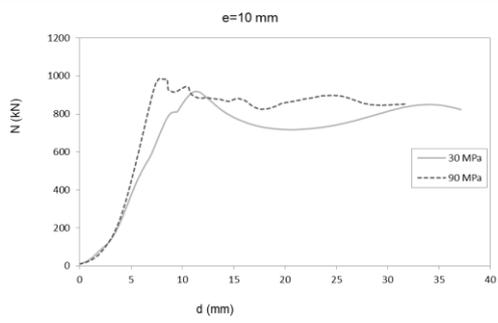
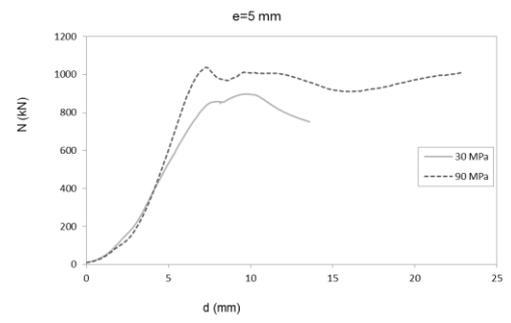
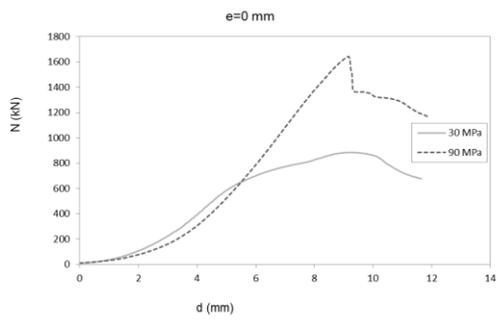
Este anexo muestra las gráficas carga-acortamiento axial desglosadas según la excentricidad de carga no recogidas en el apartado Análisis de los resultados. Cada gráfica compara el comportamiento según el hormigón de relleno utilizado.

S100.100.4_300_275

Grupo "a"

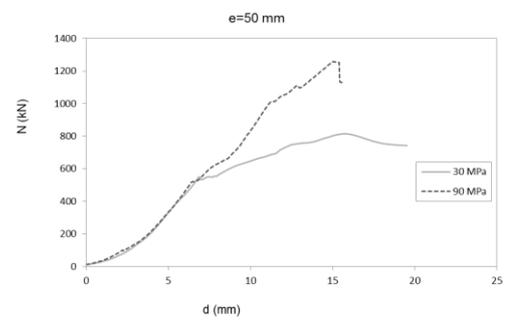
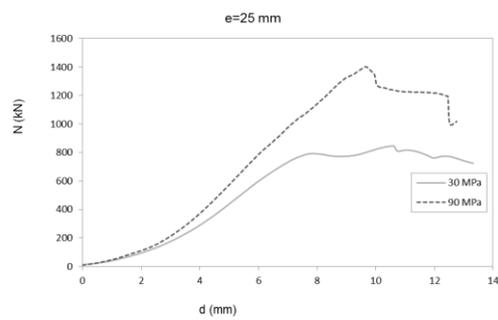
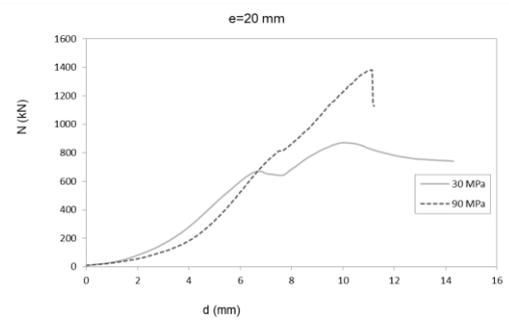
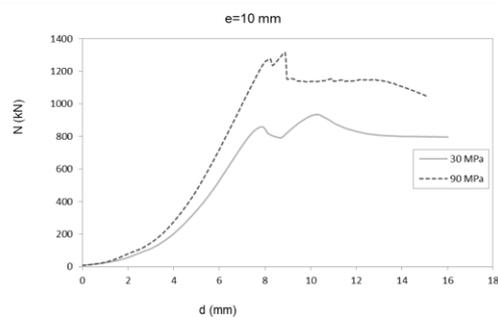
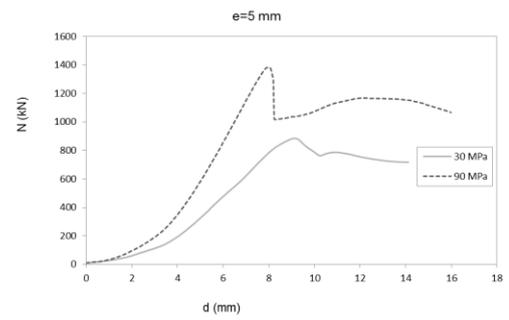
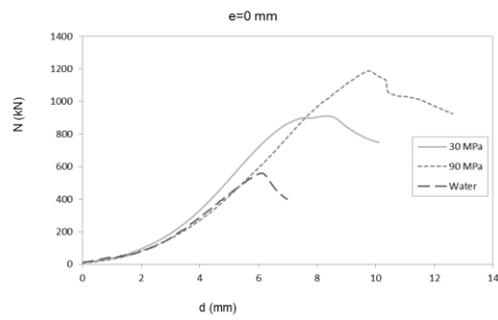


Grupo "b"

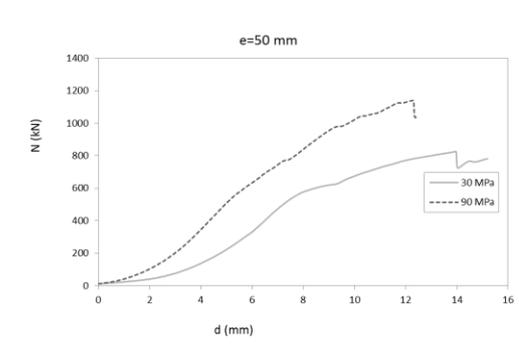
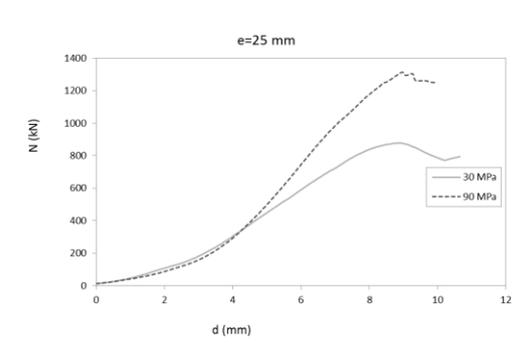
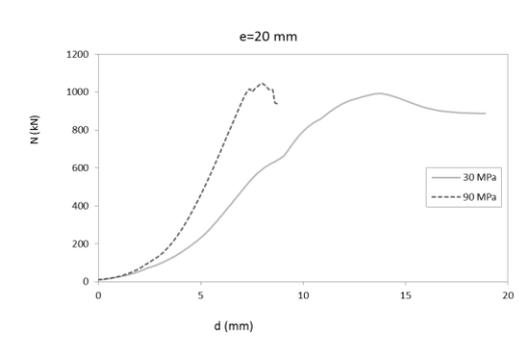
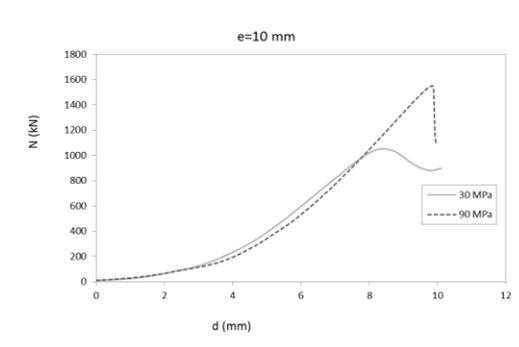
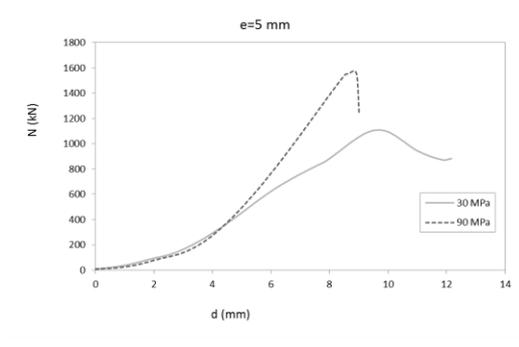


Análisis teórico y experimental de pilares mixtos tipo CFST empleando hormigón de alta resistencia y agua como material de relleno

R150.100.4_300_275w

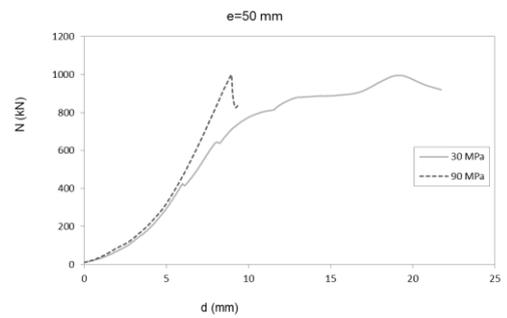
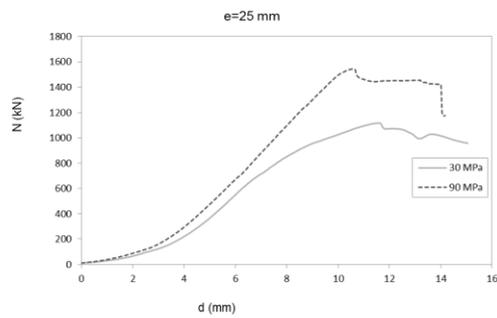
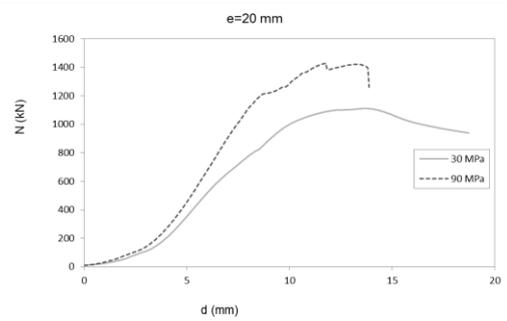
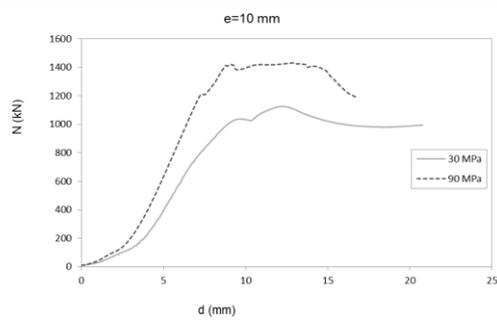
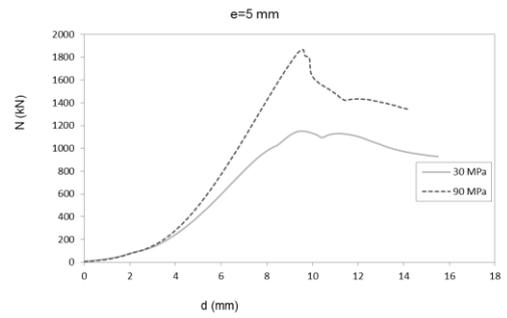
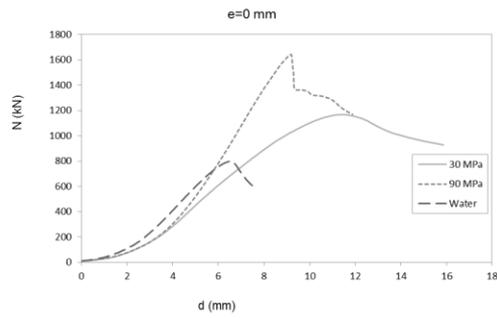


R150.100.4_300_275s

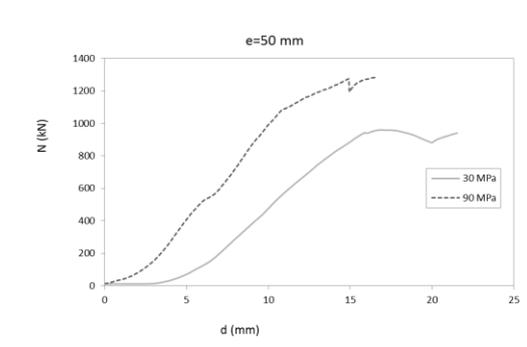
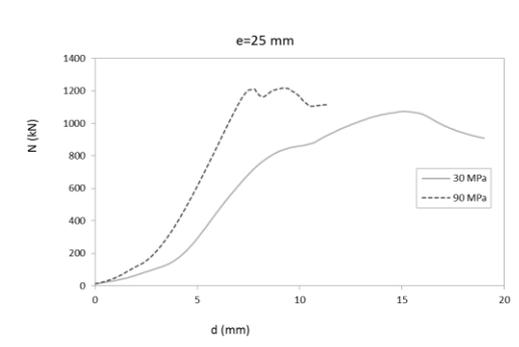
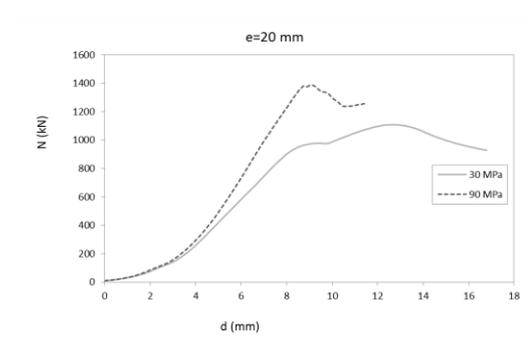
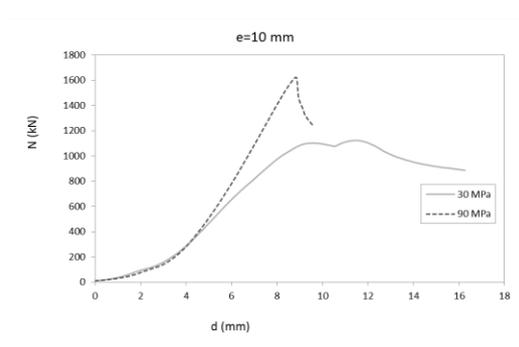
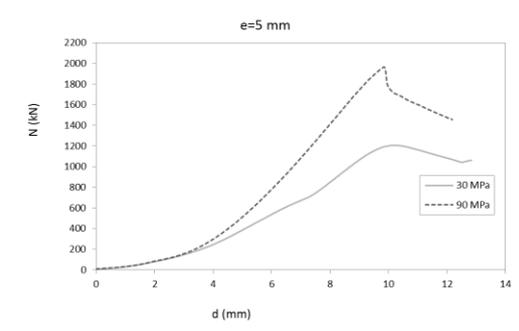


Análisis teórico y experimental de pilares mixtos tipo CFST empleando hormigón de alta resistencia y agua como material de relleno

R150.100.5_300_275w

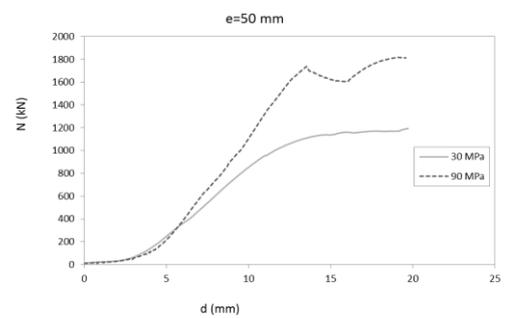
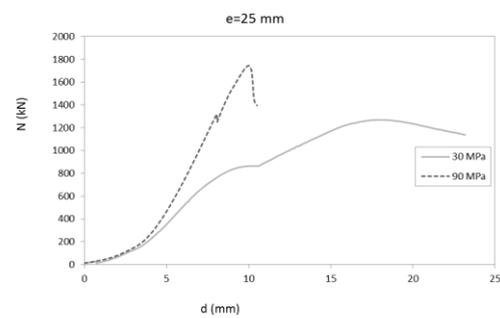
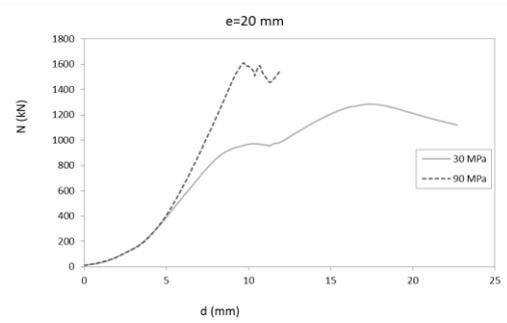
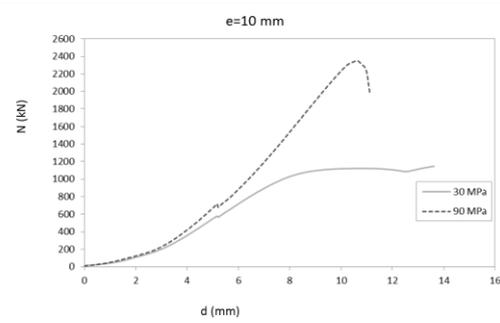
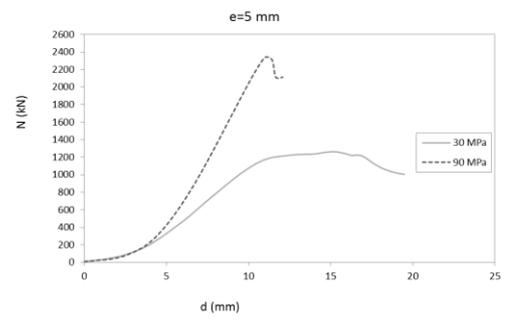
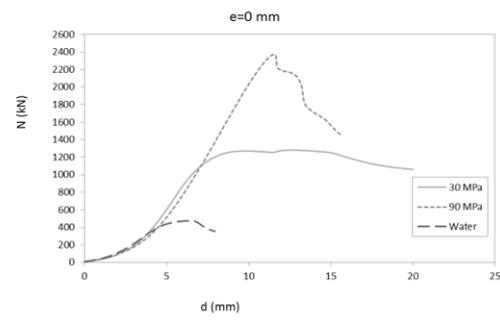


R150.100.5_300_275s

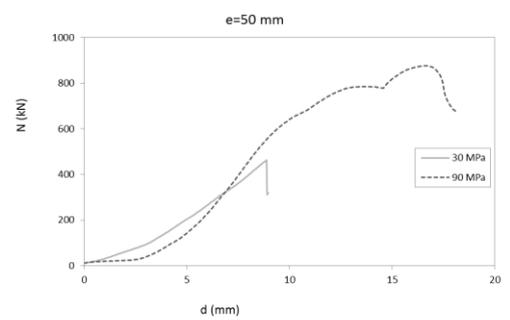
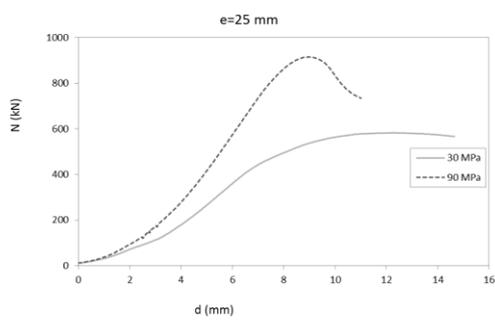
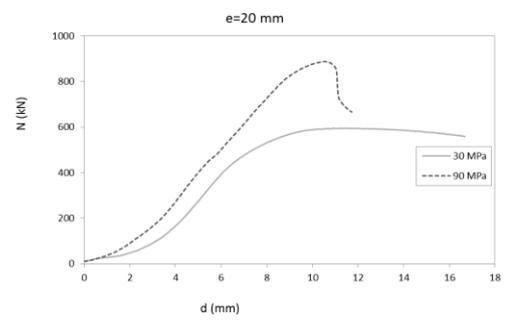
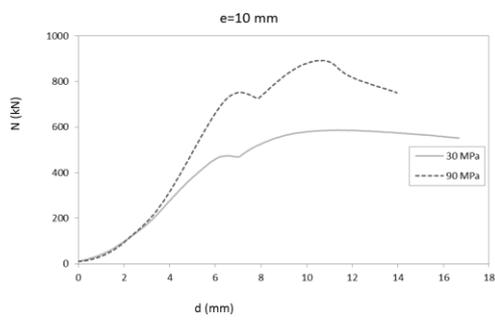
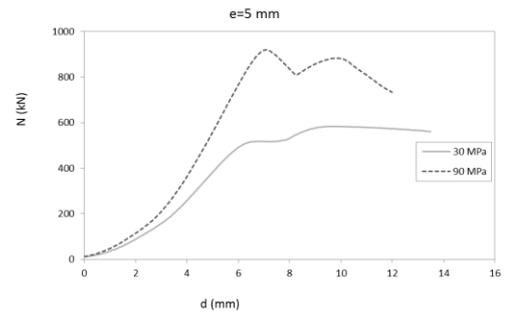
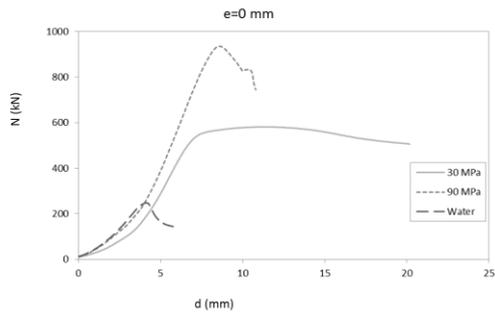


Análisis teórico y experimental de pilares mixtos tipo CFST empleando hormigón de alta resistencia y agua como material de relleno

C168.3,2.8_300_275

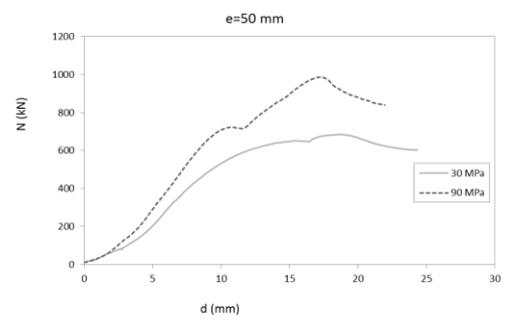
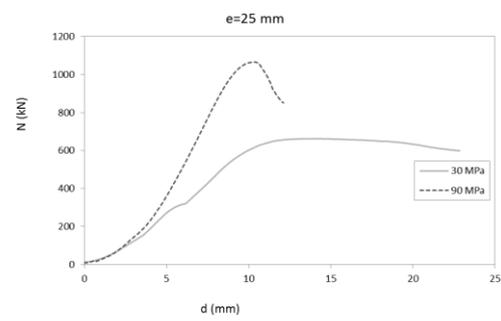
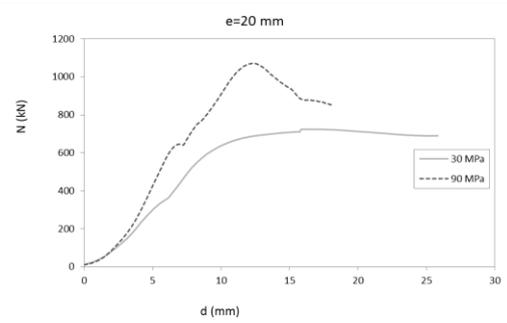
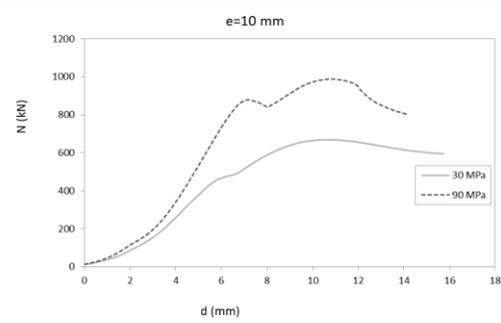
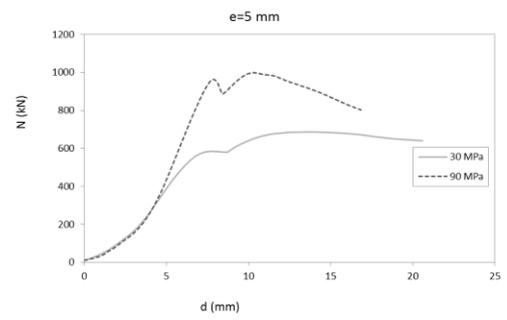
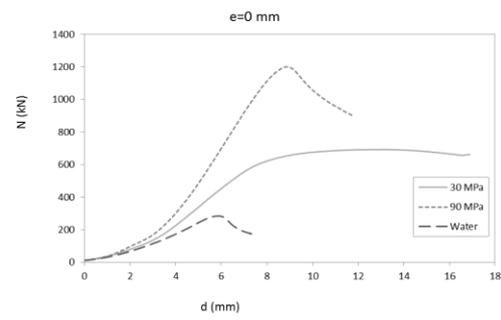


C101.6,2_300_275

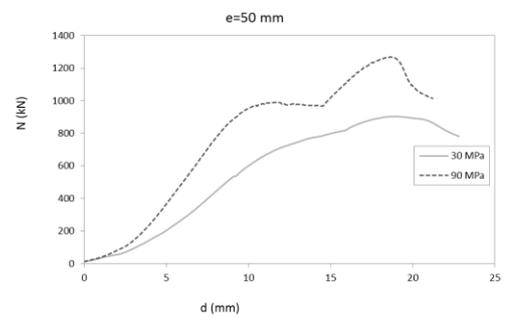
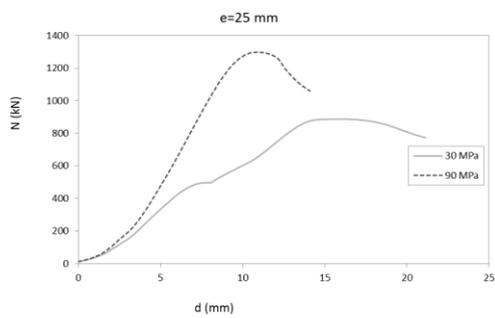
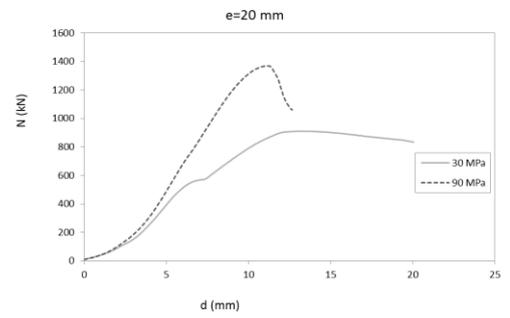
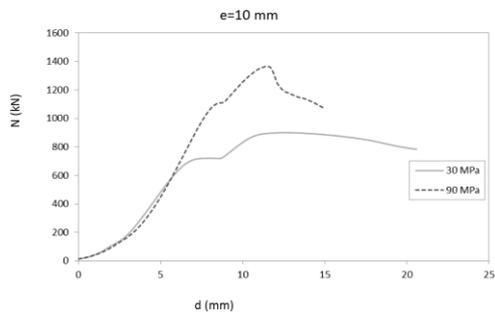
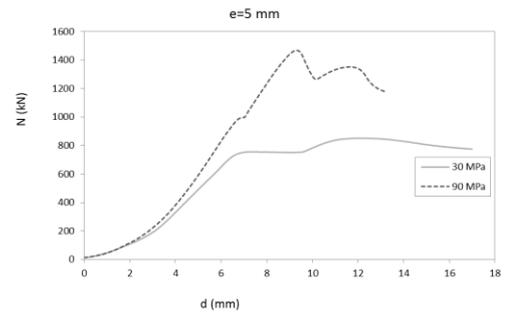
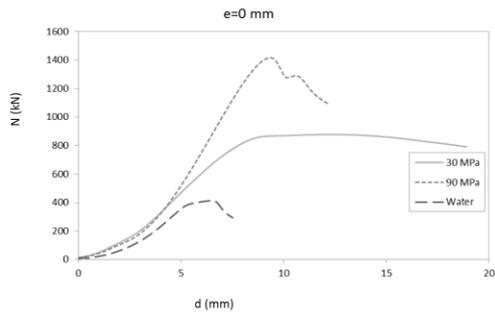


Análisis teórico y experimental de pilares mixtos tipo CFST empleando hormigón de alta resistencia y agua como material de relleno

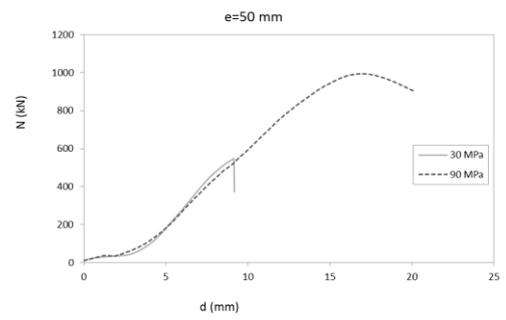
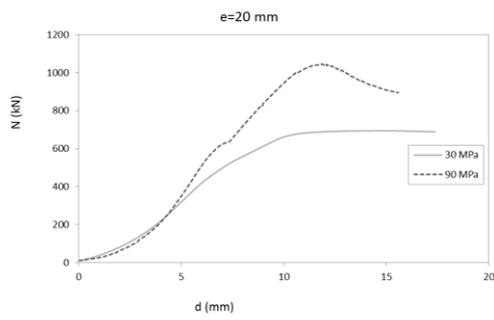
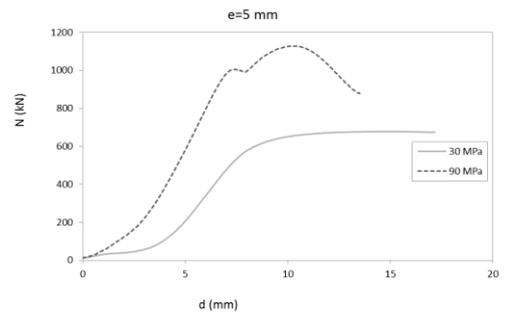
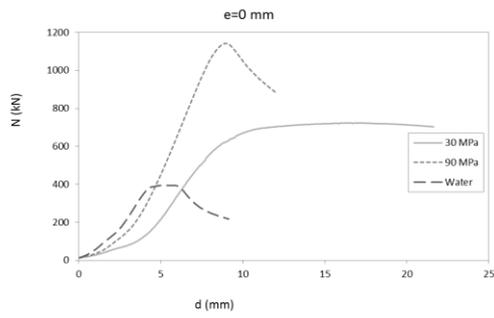
C108,2_300_355



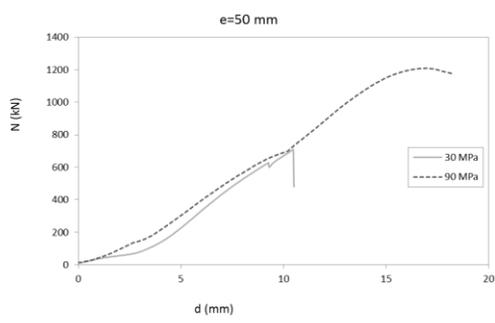
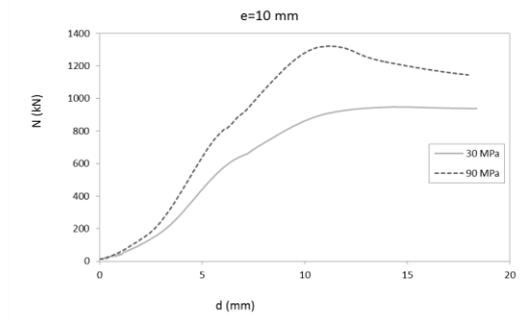
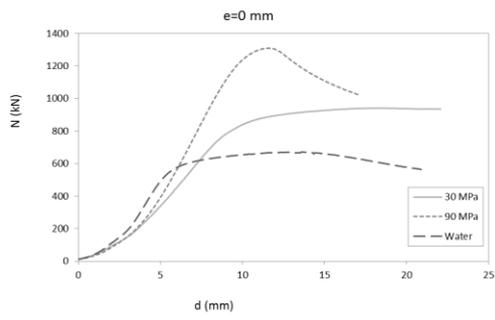
C120,2.5_300_275



C100,3_300_275

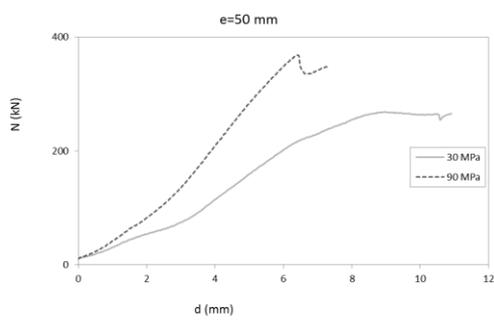
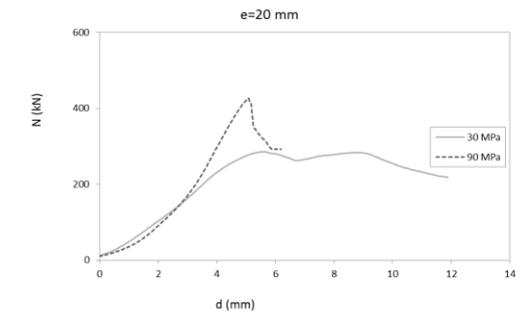
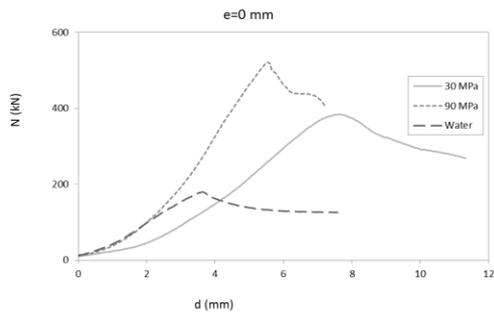


C101.6,5_300_275

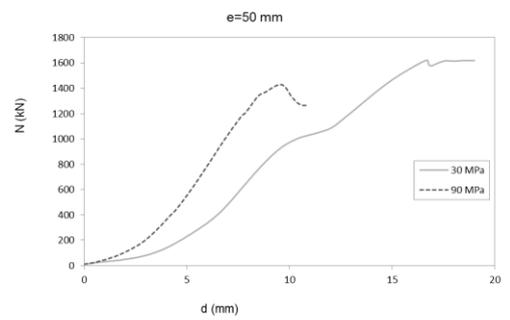
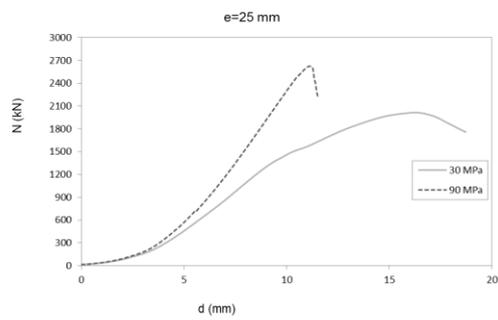
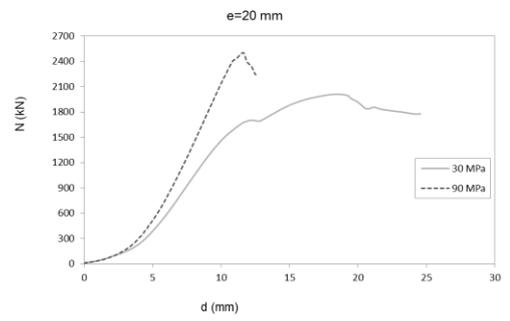
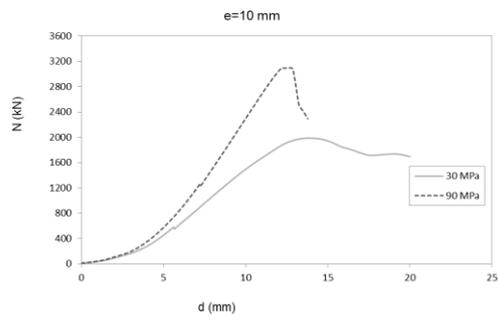
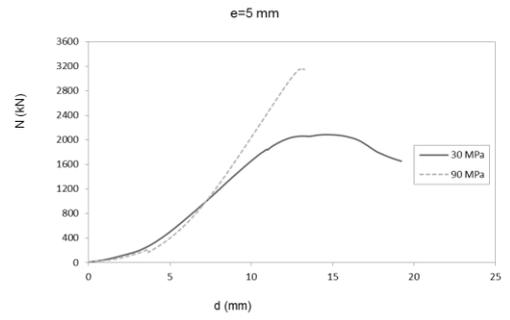
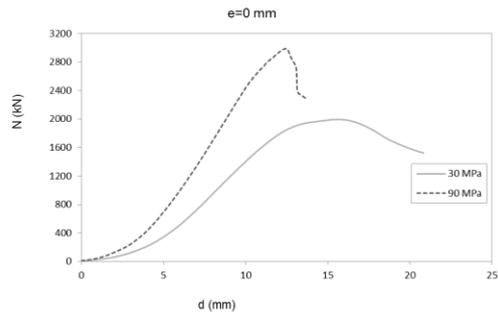


Análisis teórico y experimental de pilares mixtos tipo CFST empleando hormigón de alta resistencia y agua como material de relleno

Ov.120.50.2_300_275

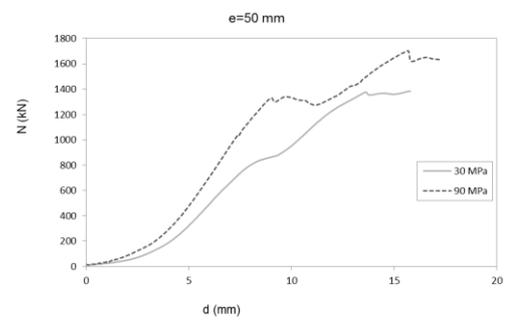
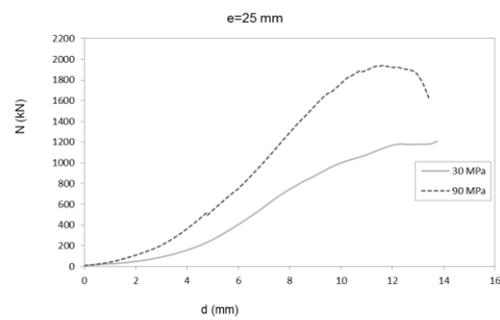
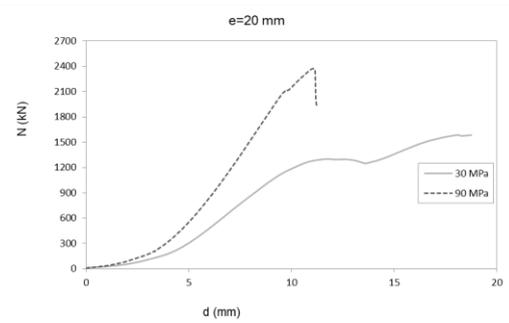
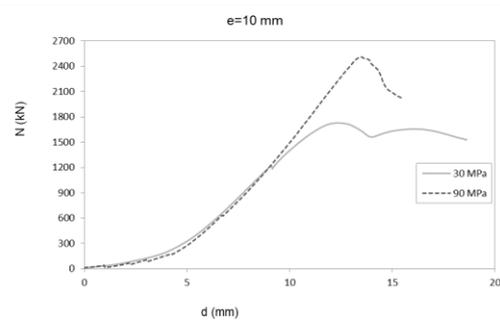
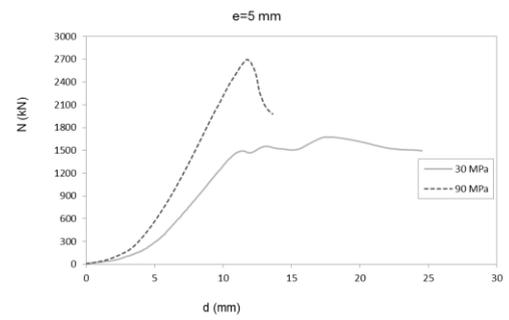
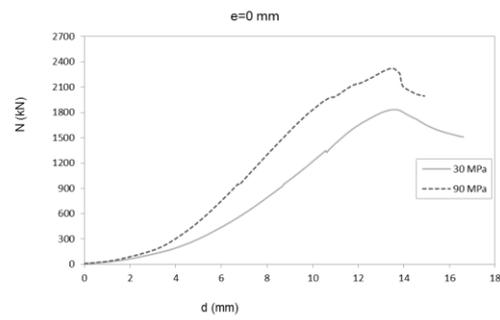


C-C-B



Análisis teórico y experimental de pilares mixtos tipo CFST empleando hormigón de alta resistencia y agua como material de relleno

C-R-A



C-R-B

