

Universidad Jaume I – Departamento de mecánica y construcción

**ANÁLISIS NUMÉRICO-
EXPERIMENTAL DE
DIFERENTES SOLUCIONES
ESTRUCTURALES A BASE DE
PILARES MIXTOS TIPO
CONCRETE-FILLED STEEL TUBE**

Proyecto final de Máster

Por Diego Izquierdo Sánchez

Tutor: David Hernández Figueirido



2016

Índice

| | |
|---|-----------|
| Resumen | 9 |
| 1. Capítulo 1: Pilares mixtos..... | 14 |
| 1.1. Introducción a las estructuras mixtas..... | 14 |
| 1.2. Tipos de pilares mixtos..... | 14 |
| 1.2.1. Pilar a base de secciones abiertas parcial o completamente embebidas en hormigón... 14 | |
| 1.2.2. Pilar a base de secciones huecas de acero rellenas de hormigón..... 15 | |
| 1.3. Ventajas CFTs | 16 |
| 1.4. Inconvenientes CFTs | 16 |
| 1.5. Acción compuesta..... | 17 |
| 1.5.1. Características de los materiales..... 18 | |
| 1.5.1.1. Hormigón | 18 |
| 1.5.1.2. Acero | 22 |
| 1.5.1.3. Conectores | 24 |
| 1.5.2. Confinamiento..... 24 | |
| 1.5.2.1. Confinamiento activo..... 24 | |
| 1.5.2.2. Confinamiento pasivo | 24 |
| 1.5.3. Adherencia | 27 |
| 1.5.4. Ductilidad | 27 |
| 1.5.5. Pandeo Local | 28 |
| Capítulo 2: Memoria descriptiva | 35 |
| 2. Objeto | 35 |
| 3. Alcance..... | 35 |
| 4. Antecedentes y Justificación | 35 |
| 4.1. Antecedentes | 36 |
| 4.2. Justificación | 38 |
| 5. Normativa Europea | 39 |
| 5.1.1. Definición | 40 |
| 5.1.2. Métodos de cálculo | 41 |
| 5.1.3. Método de cálculo simplificado | 41 |
| 5.1.3.1. Limitaciones | 41 |
| 5.1.3.2. Resistencia de la sección transversal | 43 |
| 5.1.3.3. Resistencia a pandeo de una pieza | 44 |
| 5.1.3.4. Resistencia de la sección transversal sometida a axil y momento flector..... 45 | |
| 5.1.3.5. Momentos flectores de segundo orden | 48 |
| 5.1.3.6. La influencia del esfuerzo cortante..... 49 | |
| 5.1.3.7. Resistencia de la pieza sometida a compresión axil y flector en un solo plano | 49 |
| 5.1.3.8. Resistencia de la pieza sometida a compresión axil y flector en dos planos | 50 |
| 6. Programa experimental..... | 52 |
| 6.1. Introducción | 52 |

| | | |
|-------------|--|------------|
| 6.2. | Diseño del experimento | 52 |
| 6.2.1. | Max(b,h)/t | 52 |
| 6.2.2. | Longitud del pilar | 54 |
| 6.2.3. | Resistencia del hormigón, en probeta cilíndrica, fck | 54 |
| 6.2.4. | Excentricidades y Relación de excentricidades r | 55 |
| 6.3. | Resumen/Historial de ensayos | 57 |
| 4.3.1 | Ensayos con perfiles rectangulares y cuadrados: | 57 |
| 4.3.2 | Ensayos con perfiles circulares: | 60 |
| 4.3.3 | Ensayos con perfiles ovalados: | 61 |
| 6.4. | Especímenes de ensayo..... | 61 |
| 6.4.1. | Hormigón | 61 |
| 6.4.2. | Acero | 62 |
| 6.4.3. | Fabricación | 63 |
| 6.5. | Descripción de ensayos | 65 |
| 6.5.1. | Apoyos..... | 65 |
| 6.5.2. | Pórtico de ensayos | 66 |
| 6.5.2.1. | Pórtico Horizontal | 67 |
| 6.5.2.2. | Pórtico para probetas de hormigón..... | 69 |
| 6.6. | Toma de datos | 70 |
| 6.7. | Procedimiento durante el ensayo | 70 |
| 6.7.1. | Marcado de pilares mixtos | 71 |
| 6.7.2. | Colocación en pórtico horizontal | 72 |
| 6.7.3. | Realización del ensayo | 73 |
| 6.8. | Postprocesado de datos experimentales..... | 73 |
| 7. | <i>Estudio a partir de los ensayos experimentales</i> | 74 |
| 7.1. | Introducción | 74 |
| 7.2. | Realización del estudio de los datos experimentales | 74 |
| 7.3. | Resultados obtenidos para un pilar | 84 |
| 7.3.1. | Obtención de diagrama seccional | 84 |
| 7.3.2. | Parámetros comparativos | 88 |
| 7.4. | Comparación con EC4..... | 90 |
| 7.4.1. | Comparación con perfiles Rectangulares y Cuadrados | 90 |
| 7.4.2. | Comparación con perfiles Circulares..... | 98 |
| 7.4.3. | Comparación con perfiles Ovalados..... | 105 |
| 7.5. | Conclusiones..... | 110 |
| 8. | <i>Estudio económico.....</i> | 113 |
| 8.1. | Introducción | 113 |
| 8.2. | Realización del estudio..... | 115 |
| 8.2.1. | Costes asignados a las alternativas | 115 |
| 8.2.1.1. | Costes en el pilar mixto..... | 115 |
| 8.2.1.2. | Costes en los perfiles de acero | 119 |

| | | |
|----------------|---|------------|
| 8.2.2. | Comparación de alternativas | 121 |
| 8.3. | Resultado del estudio | 122 |
| 8.3.1. | CFTs rectangulares y cuadrados | 122 |
| 8.3.2. | CFTs circulares | 122 |
| 8.3.3. | CFTs ovalados | 123 |
| 8.4. | Conclusiones del estudio económico | 124 |
| 9. | <i>Bibliografía</i>..... | 125 |
| ANEJO 1 | | 132 |
| 10. | <i>Registro de gráficas de Diagrama de interacción seccional frente a axiles y momentos ensayados</i>..... | 132 |
| 10.1. | Gráficas con hormigón de 30 MPa | 132 |
| 10.1.1. | Perfiles rectangulares | 132 |
| 10.1.2. | Perfiles circulares | 138 |
| 10.1.3. | Perfiles ovalados | 142 |
| 10.2. | Gráficas con hormigón de 90 MPa..... | 143 |
| 10.2.1. | Perfiles rectangulares | 143 |
| 10.2.2. | Perfiles circulares | 148 |
| 10.2.3. | Perfiles Ovalados | 149 |
| ANEJO 2 | | 154 |
| 11. | <i>Registro de tablas de estudio económico</i> | 154 |
| 11.1. | CFTs rectangulares y cuadrados | 154 |
| 11.1.1. | Precio de HEB | 154 |
| 11.1.2. | Precio pilar mixto y resultado pilar óptimo | 156 |
| 11.2. | CFTs circulares..... | 158 |
| 11.2.1. | Precio HEB | 158 |
| 11.2.2. | Precio pilar mixto y resultado pilar óptimo..... | 159 |
| 11.3. | CFTs ovalados..... | 161 |
| 11.3.1. | Precio HEB | 161 |
| 11.3.2. | Precio pilar mixto y resultado pilar óptimo..... | 161 |
| 12. | <i>Pliego de condiciones</i> | 166 |
| 12.1. | Pliego de condiciones generales | 166 |
| 12.2. | Pliegos de especificaciones técnicas | 167 |
| 12.2.1. | Especificaciones de materiales y equipos | 167 |
| 12.2.2. | Especificaciones de ejecución | 168 |
| 12.3. | Pliego de prescripciones de gestión de los residuos | 169 |

Índice de fotos

| | |
|---|-----|
| <i>Ilustración 1 Estructuras mixtas</i> | 14 |
| <i>Ilustración 2 pilar mixto embebidos en hormigón</i> | 14 |
| <i>Ilustración 3 Ejemplos de estructuras con CFTs</i> | 15 |
| <i>Ilustración 4 Diagrama de tensión deformación uniaxial HAR-CEB</i> | 18 |
| <i>Ilustración 5 Evolución de grietas en el hormigón</i> | 18 |
| <i>Ilustración 6 Proceso de conformado de los perfiles tubulares. Propiedades según la zona de la sección</i> | 22 |
| <i>Ilustración 7 Diferencias en el confinamiento de secciones circulares y cuadradas</i> | 24 |
| <i>Ilustración 8 Tipo de aplicación de la carga al pilar</i> | 25 |
| <i>Ilustración 9 Estado de compresión uniaxial y triaxial</i> | 26 |
| <i>Ilustración 10 Mejora de la respuesta del hormigón por aumento de la presión de confinamiento</i> | 26 |
| <i>Ilustración 11 Mecanismos de adherencia entre el acero y el hormigón</i> | 27 |
| <i>Ilustración 12 Pandeo local en pilares rellenos de hormigón y en pilares vacíos</i> | 28 |
| <i>Ilustración 13 Clasificación de clase del acero</i> | 29 |
| <i>Ilustración 14 Pilar mixto embebidos y confinados</i> | 40 |
| <i>Ilustración 15 Pandeo local en pilares vacíos y rellenos de hormigón</i> | 43 |
| <i>Ilustración 16 Diagrama de interacción seccional a compresión y flexión en un plano</i> | 45 |
| <i>Ilustración 17 Bloque de tensiones en los diferentes puntos del diagrama de interacción</i> | 46 |
| <i>Ilustración 18 Pilar sometido a cargas excéntricas</i> | 48 |
| <i>Ilustración 19 Versión normalizada del diagrama de interacción</i> | 49 |
| <i>Ilustración 20 Resistencia de la sección sometida a compresión y flexión en 2 planos</i> | 51 |
| <i>Ilustración 21 Plástico utilizado para cubrir las probetas para que no pierdan humedad</i> | 62 |
| <i>Ilustración 22 Corte de los perfiles de acero a la longitud de 300 mm</i> | 64 |
| <i>Ilustración 23 Dosificación preparada para la fabricación del hormigón</i> | 64 |
| <i>Ilustración 24 Zona de trabajo 1, Fabricación de hormigón y almacenaje de pilares a ensayar</i> | 65 |
| <i>Ilustración 25 Zoom del pórtico al sistema para ajustar la excentricidad</i> | 66 |
| <i>Ilustración 26 Pórtico horizontal de ensayos</i> | 67 |
| <i>Ilustración 27 Sistema para ajustar el pórtico a la longitud del pilar</i> | 68 |
| <i>Ilustración 28 LVDT</i> | 68 |
| <i>Ilustración 29 Curva Fuerza-Desplazamiento obtenido del sistema de control</i> | 69 |
| <i>Ilustración 30 Sistema para ensayar probetas cilíndricas de hormigón</i> | 70 |
| <i>Ilustración 31 Marcado de pilares 1</i> | 71 |
| <i>Ilustración 32 Marcado de pilares 2</i> | 71 |
| <i>Ilustración 33 Imagen ilustrativa del alzado de una cabeza del pórtico con sus marcas para ajustar los pilares a dicha cabeza con la excentricidad deseada</i> | 72 |
| <i>Ilustración 34 Pórtico con ejes x,y,z para explicar la colocación de los pilares en el pórtico</i> | 73 |
| <i>Ilustración 35 Perfil Elíptico</i> | 77 |
| <i>Ilustración 36 Diferencias en el confinamiento de secciones circulares y cuadradas</i> | 99 |
| <i>Ilustración 37 Pilares mixtos ya ensayados</i> | 112 |
| <i>Ilustración 38 Perfil óptimo de acero a compresión</i> | 114 |

Resumen

El proyecto “Análisis numérico-experimental de diferentes soluciones estructurales a base de pilares mixtos tipo concrete-filled steel tube” se basa en la búsqueda de soluciones óptimas en el campo de los pilares mixtos. Concretamente en los pilares mixtos de tipo sección hueca de acero rellena de hormigón.

En los últimos años el uso de perfiles tubulares de acero rellenos de hormigón se ha incrementado debido a sus siguientes características:

- Buen comportamiento frente al sismo,
- alta resistencia,
- alta ductilidad,
- gran capacidad de absorción de energía,
- incremento en la velocidad del proceso de construcción,
- la posibilidad de estandarización de las uniones
- y una mayor resistencia al fuego.

Por otra parte, es cada vez más habitual el empleo de hormigón de alta resistencia para la fabricación de estructuras. En cambio, en este tipo de pilares compuestos, su comportamiento dista mucho de estar completamente estudiado y establecido.

El proyecto de investigación consistirá en estudiar el comportamiento de diferentes soluciones. Algunas de ellas adoptadas por la Norma vigente en Europa, el Eurocódigo 4 (EC4), y otras de ellas que no están cubiertas por dicho reglamento y se encuentran, a día de hoy, pocos o ningún ensayo de estas soluciones innovadoras.

De manera que el proyecto de investigación constará de una parte experimental y de una parte de estudio a partir de los resultados de la fase experimental.

En la parte experimental se ensayarán perfiles de acero con configuración rectangular rellenos de hormigón (utilizando también hormigón de alta resistencia). Los ensayos se realizarán sobre diferentes perfiles. Además para cada configuración se realizaran ensayos para diferentes excentricidades. Respecto al hormigón se usarán hormigones de diferentes resistencias características a compresión (algunas no contempladas por la norma).

Con los resultados de los ensayos se obtendrán las curvas de interacción seccional (usadas en el EC4) observando cómo se comportan los pilares. De esta manera se obtendrían curvas de interacción de pilares mixtos con hormigón de alta resistencia no contemplado en la norma.

Por otro lado, se realizará un estudio comparativo de los diferentes pilares estudiados y ensayados experimentalmente. Se establecerá un criterio de comparación y se evaluarán todas las soluciones.

Finalmente con los estudios realizados se debe obtener la solución óptima. Los pilares no contemplados podrían presentar mejores soluciones ya que mediante la utilización de hormigones más resistentes se podría reducir las dimensiones (espesor en nuestro caso) del perfil de acero y así reducir costes. Además se obtendrían otras ventajas, como por ejemplo, arquitectónicas y estéticas al reducir las dimensiones del pilar.

Capítulo 1

Pilares mixtos

Índice

| | |
|--|-----------|
| 1. <u>Capítulo 1: Pilares mixtos</u> | 14 |
| 1.1. <u>Introducción a las estructuras mixtas</u> | 14 |
| 1.2. <u>Tipos de pilares mixtos</u> | 14 |
| 1.2.1. <u>Pilar a base de secciones abiertas parcial o completamente embebidas en hormigón</u> ... | 14 |
| 1.2.2. <u>Pilar a base de secciones huecas de acero rellenas de hormigón</u> | 15 |
| 1.3. <u>Ventajas CFTs</u> | 16 |
| 1.4. <u>Inconvenientes CFTs</u> | 16 |
| 1.5. <u>Acción compuesta</u> | 17 |
| 1.5.1. <u>Características de los materiales</u> | 18 |
| 1.5.1.1. <u>Hormigón</u> | 18 |
| 1.5.1.2. <u>Acero</u> | 22 |
| 1.5.1.3. <u>Conectores</u> | 24 |
| 1.5.2. <u>Confinamiento</u> | 24 |
| 1.5.2.1. <u>Confinamiento activo</u> | 24 |
| 1.5.2.2. <u>Confinamiento pasivo</u> | 24 |
| 1.5.3. <u>Adherencia</u> | 27 |
| 1.5.4. <u>Ductilidad</u> | 27 |
| 1.5.5. <u>Pandeo Local</u> | 28 |

1. Capítulo 1: Pilares mixtos

1.1. Introducción a las estructuras mixtas

En el Eurocódigo 4 la estructura mixta se define como elemento estructural compuesto por hormigón y acero estructural o conformado en frío, interconectados, si es necesario, por conectadores para limitar el desplazamiento longitudinal entre el hormigón y acero; y el despegue de un componente del otro.

La diferencia entre otras estructuras de acero y hormigón con las estructuras mixtas radica en que la unión entre el acero y el hormigón de un elemento mixto debe tener la suficiente resistencia y rigidez para permitir que ambos componentes sean calculados como parte de un único elemento estructural (uso de conectores si es necesario). Este tipo de estructuras ofrecen una optimización en el comportamiento de componentes, es decir, el comportamiento conjunto es mayor que la suma de comportamientos por separado.

Con este tipo de estructura se pueden obtener tanto vigas como pilares aunque este trabajo se va a centrar en los pilares mixtos.

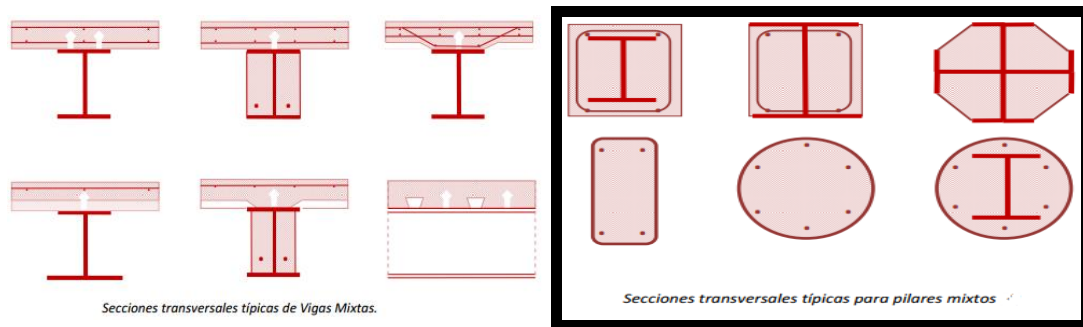


Ilustración 1 Estructuras mixtas

1.2. Tipos de pilares mixtos

Las columnas mixtas o compuestas son una combinación de columnas de hormigón y de acero que reúnen las ventajas de ambos tipos. Son más dúctiles que las de hormigón armado y se pueden construir uniones siguiendo las técnicas propias de las estructuras de acero. El hormigón no sólo proporciona más capacidad de soportar carga sino también mayor resistencia al fuego. Los diferentes tipos son:

1.2.1. Pilar a base de secciones abiertas parcial o completamente embebidas en hormigón.

Pilares parcialmente embebidos se basan en secciones de acero en I o H, con el espacio entre las alas relleno de hormigón. En los pilares completamente embebidos la sección entera de acero se encuentra dentro del hormigón con un recubrimiento mínimo en todo su contorno.

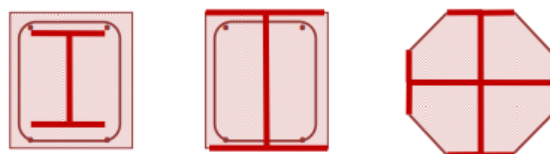


Ilustración 2 pilar mixto embebidos en hormigón

1.2.2. Pilar a base de secciones huecas de acero rellenas de hormigón.

Las secciones huecas rellenas de hormigón pueden ser circulares o rectangulares. El hormigón rellena la sección y su resistencia a compresión se ve incrementada debido a su confinamiento.

En los últimos años la utilización de perfiles tubulares rellenos de hormigón se ha incrementado debido a sus excelentes propiedades resistentes ante acciones sísmicas como la alta resistencia, ductilidad y la absorción de energía.

En la práctica internacional los perfiles tubulares rellenos de hormigón se han utilizado en pórticos de nudos rígidos principalmente en Japón. En Estados Unidos se han utilizado en pórticos arriostrados. Otros posibles usos que se le han dado han sido como refuerzo de estructuras inicialmente huecas y pilotes de cimentación.

Ejemplos de construcciones realizadas con CFT:

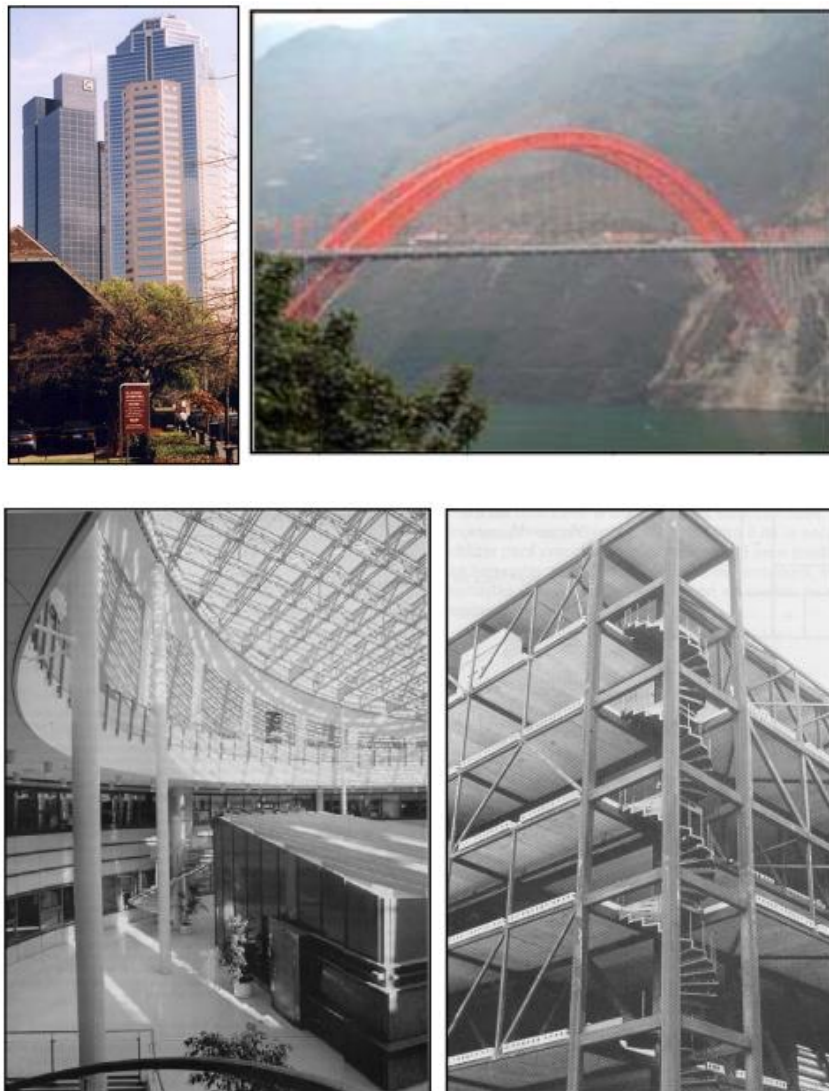


Ilustración 3 Ejemplos de estructuras con CFTs

1.3. Ventajas CFTs

Los perfiles de acero rellenos de hormigón (Steel Concrete Filled Tube, SCFT) ofrecen una serie de ventajas en comparación con el uso independiente de perfiles de acero y sistemas de hormigón. Entre las diferentes ventajas destacan las siguientes:

1. Interacción entre el acero y el hormigón.
 - A. Pandeo local: El núcleo de hormigón aporta estabilidad a las paredes del tubo de acero retrasando e incluso evitando el pandeo local.
 - B. Efecto de confinamiento: La resistencia del hormigón a compresión aumenta debido al confinamiento pasivo que ofrece el tubo exterior (el confinamiento es mayor en los perfiles circulares que en los cuadrados). A su vez se evita la disgregación del hormigón superado su límite resistente, suavizando su pérdida de capacidad (aumenta la ductilidad). Por otro lado, el núcleo da estabilidad a las paredes del tubo de acero retrasando, e incluso evitando, el pandeo local por abolladura de éste.
 - C. Reducción de la sección: Todo esto se traduce en secciones mucho más reducidas para las mismas solicitaciones.
2. El acero, con mayor módulo elástico, se encuentra en la periferia, en la zona más alejada del centroide de la sección, zona en la que puede trabajar a tracción, cuando el hormigón no puede hacerlo. Además mejora la rigidez a flexión del conjunto.
3. Menores costes económicos y de tiempo:
 - Encofrado: El perfil metálico sirve de encofrado para el núcleo.
 - Menores tiempos de ejecución: El tiempo necesario para el ensamble y montaje es reducido y sin esperas.
 - Coste por unidad de resistencia mucho menor: Menor que el de una columna de acero, ya que el hormigón es más económico. Menor que el de una columna de hormigón armado porque para el mismo coste la resistencia de la columna es mayor.
4. Uniones más sencillas y se pueden estandarizar, sobre todo en el caso de perfiles rectangulares.
5. Empleo de Hormigón de Alta Resistencia. Con el hormigón de alta resistencia (HAR) es posible mantener unas secciones reducidas aunque las cargas aumenten. Esto aumenta el espacio útil por planta, lo que es muy ventajoso dado el precio del metro cuadrado de suelo, sobre todo en las primeras plantas de edificios altos.
6. El comportamiento frente al fuego de un pilar relleno de hormigón es especial: Los pilares mixtos rellenos de hormigón pueden calcularse para que tengan una resistencia al fuego de hasta 120 minutos, o más, sin protección externa.

1.4. Inconvenientes CFTs

1. Se debe asegurar el comportamiento conjunto del acero y el hormigón, obligando a una transferencia de tensiones importante en la interfaz del núcleo con el tubo. Se pueden utilizar conectores en el interior de los tubos aunque aumenta el coste. En su ausencia el efecto de la adherencia entre los materiales cobra más importancia.

2. Normativa de aplicación vigente:
 - A. Existen varios métodos de cálculo para columnas mixtas en los diferentes países como Japón, Estados Unidos, Australia Canadá o Europa, pero no son equiparables entre ellos ya que se basan en hipótesis iniciales diferentes. Sería necesaria una homogeneización y estandarización de los diferentes métodos a nivel internacional.
 - B. Al trabajar con secciones más pequeñas, la esbeltez y el pandeo cobran mayor importancia.
 - C. **El Eurocódigo 4 (EC4) no contempla hormigones de resistencia superior a 60 MPa en probeta cilíndrica.**
3. Empleo de Hormigón de Alta Resistencia (desconocido)
 - A. Con HAR se consigue un aumento en la resistencia a compresión (no tanto a tracción). Sin embargo el material es menos dúctil que un hormigón normal lo que dificulta la redistribución de tensiones y por tanto la tensión de cortadura en la interfaz es menos uniforme.
 - B. Cuando el hormigón es de alta resistencia existe un conocimiento limitado de aspectos como propiedades combinadas con el acero, modos de fallo, adherencia, confinamiento, retracción, tensiones residuales o resistencia al fuego.
 - C. **Limitaciones en el estado actual del arte.** La mayor parte de los estudios experimentales se han llevado a cabo a una escala de tamaño reducido, por cuestiones económicas y de limitación de las máquinas de ensayo.

Como se indica, las ventajas de este tipo de pilares son numerosas, sobre todo cuando es necesario soportar grandes cargas que pueden ser debidas por ejemplo por grandes edificios o grandes vanos en puentes. Por otro lado, existen inconvenientes surgidos por las diferentes normativas, donde además algunas no se actualizan desde hace años. Además no existe un gran conocimiento del comportamiento de pilares mixtos de alta resistencia, un aspecto interesante, ya que podría presentar otras ventajas e inconvenientes adicionales. Por este motivo se utilizarán HAR en los pilares ensayados y así estudiar el comportamiento seccional de estos.

1.5. Acción compuesta

El comportamiento mecánico de una estructura mixta tiene su base tanto en el comportamiento de cada uno de sus materiales por separado, (con sus curvas de tensión-deformación) como en la interacción entre estos, lo que da lugar a unas propiedades combinadas. Estas propiedades combinadas optimizan el comportamiento que habría por separado.

La forma de la sección, las dimensiones del elemento, la resistencia de cada uno de los materiales hacen que se produzca un modo de fallo u otro distinto. Aspectos como la adherencia entre el núcleo y el tubo, el confinamiento, las tensiones residuales, la retracción y la fluencia o la exposición al fuego tienen su efecto en la respuesta del CFT ante las sollicitaciones externas.

1.5.1. Características de los materiales

1.5.1.1. Hormigón

El hormigón es un material altamente heterogéneo formado por una mezcla macroscópica de cemento, áridos (en un rango de formas y tamaños determinado) y agua principalmente. Además puede contener una serie de aditivos que modifican sus propiedades. A pesar de esta naturaleza, el hormigón se modela como un material homogéneo y el comportamiento mecánico se expresa en términos de tensión – deformación. La figura siguiente muestra la curva típica del hormigón en compresión.

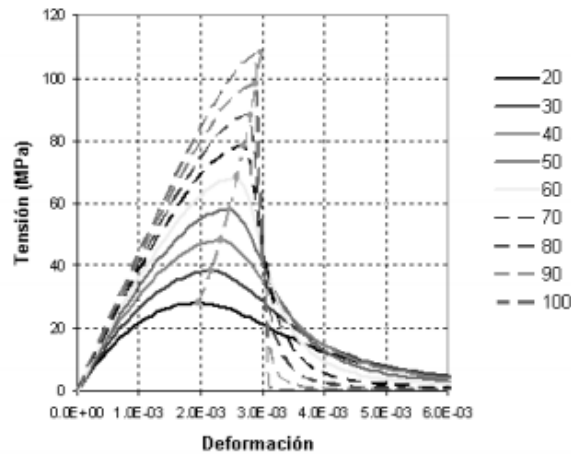


Ilustración 4 Diagrama de tensión deformación uniaxial HAR-CEB

La alta no linealidad de esta curva es el resultado de un mecanismo de fallo que se produce en el interior: inicialmente la matriz de pasta de cemento con inclusiones de áridos tiene una serie de microgrietas alrededor de los áridos ocasionadas por la expansión térmica y la retracción pero que son estables. Con el aumento de la carga de compresión los agregados actúan como concentradores de tensiones por tener un módulo elástico más elevado.

Los primeros signos de no linealidad se observan debido a las diferencias en la deformación lateral, apareciendo tensiones de cortadura y haciendo crecer a las grietas, pero todavía de una forma estable.

Con un 80-90% de la resistencia máxima las grietas comienzan a propagarse en la matriz, principalmente en paralelo o con poca inclinación respecto a la línea de acción de la carga y se unen algunas grietas. Debido a la apertura de grietas la deformación lateral es más rápida, acelerando el proceso. La máxima resistencia se consigue en el momento en el que la deformación volumétrica vale cero. A partir de ahí las grietas son inestables y se propagan con facilidad de forma descontrolada por planos de cortadura.

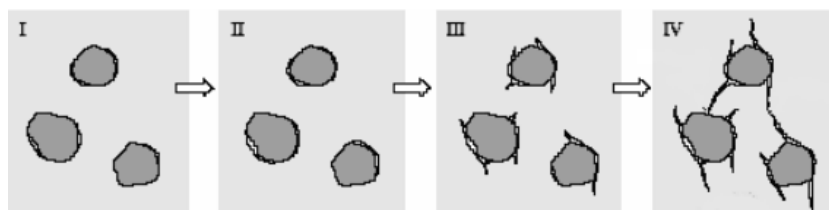


Ilustración 5 Evolución de grietas en el hormigón

En el caso del hormigón de alta resistencia se trata de un material más homogéneo, con menos diferencia en el tamaño de los áridos. Como indica su nombre tiene una resistencia mayor pero una vez alcanzado el máximo las grietas son más inestables que en el hormigón normal ya que no encuentran oposición en el camino que va abriéndose, fallando de una forma frágil y en ocasiones explosiva.

La particularidad que introduce este material en las estructuras mixtas es que, en su deformación, se distinguen componentes dependientes de las cargas exteriores e independientes a estas. A su vez, ambas pueden ser instantáneas o dependientes del tiempo.

Las clases de hormigón especificadas por EC4 se recogen en la tabla siguiente:

| Clase de Hormigón | | | C20/25 | C25/30 | C30/37 | C35/40 | C40/45 | C45/55 | C50/60 |
|-------------------|-----|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| f_{ck} | 12 | 16 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 |
| f_{ctm} | 1.6 | 1.9 | 2.2 | 2.6 | 2.9 | 3.2 | 3.5 | 3.8 | 4.1 |
| $f_{ctk 0.05}$ | 1.1 | 1.3 | 1.5 | 1.8 | 2.0 | 2.2 | 2.5 | 2.7 | 2.9 |
| $f_{ctk 0.95}$ | 2.0 | 2.5 | 2.9 | 3.3 | 3.8 | 4.2 | 4.6 | 4.9 | 5.3 |
| E_{cm} | 26 | 27.5 | 29 | 30.5 | 32 | 33.5 | 35 | 36 | 37 |

| | |
|----------------|--|
| f_{ck} | Resistencia característica a compresión (probeta cilíndrica) en N/mm ² . |
| f_{ctm} | Valor medio de la resistencia a tracción, en N/mm ² . Puede obtenerse mediante la fórmula; $f_{ctm} = 0.30 \cdot \sqrt[3]{(f_{ck}^2)}$. |
| $f_{ctk 0.05}$ | Valor característico (cuantil 0.05) de la resistencia a tracción, en N/mm ² . Puede obtenerse mediante la fórmula; $f_{ctk 0.05} = 0.21 \cdot \sqrt[3]{(f_{ck}^2)}$. |
| $f_{ctk 0.95}$ | Valor característico (cuantil 0.95) de la resistencia a tracción, en N/mm ² . Puede obtenerse mediante la fórmula; $f_{ctk 0.95} = 0.239 \cdot \sqrt[3]{(f_{ck}^2)}$. |
| E_{cm} | Módulo de elasticidad secante medio para cargas instantáneas, en N/mm ² . Puede obtenerse mediante la fórmula; $E_{cm} = 9500 \cdot \sqrt[3]{(f_{ck} + 8)}$. |

Retracción del hormigón

En casos normales, para la deformación por retracción libre a tiempo infinito desde el fraguado ϵ_{cs} pueden adoptarse los valores;

En ambiente seco (dentro o fuera de edificios, excluidos elementos rellenos hormigón);

$$\epsilon_{cs} = 350 \cdot 10^{-6}$$

En otros ambientes y en elementos rellenos;

$$\epsilon_{cs} = 250 \cdot 10^{-6}$$

Fluencia

Para tener en cuenta la fluencia basta con sustituir en el cálculo el área del hormigón A_c por otra equivalente de acero de valor A_c / κ , siendo κ el coeficiente que relaciona los módulos de elasticidad:

$$n = \frac{E_a}{E'_c}$$

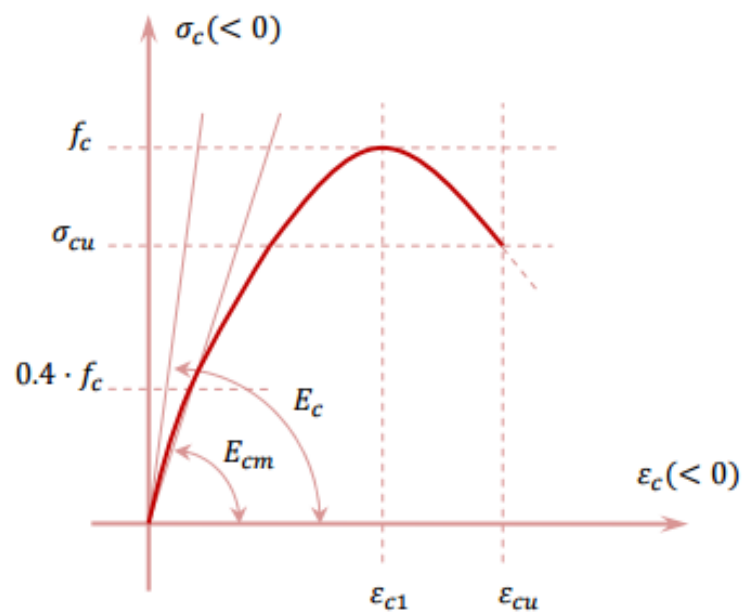
| | |
|--------|--|
| E_a | Módulo de elasticidad del acero estructural, 210000 N/mm ² . |
| E'_c | Módulo "eficaz" del hormigón, que se adopta; en edificios o naves de almacenamiento; $E'_c = E_{cm}$, para efectos instantáneos. $E'_c = E_{cm} / 3$, para efectos diferidos. En los demás casos; $E'_c = E_{cm} / 2$. |

Coefficiente de Poisson

Su valor nominal para deformaciones elásticas se adopta 0.2 y puede suponerse nulo si se admite que el hormigón en tracción se fisura.

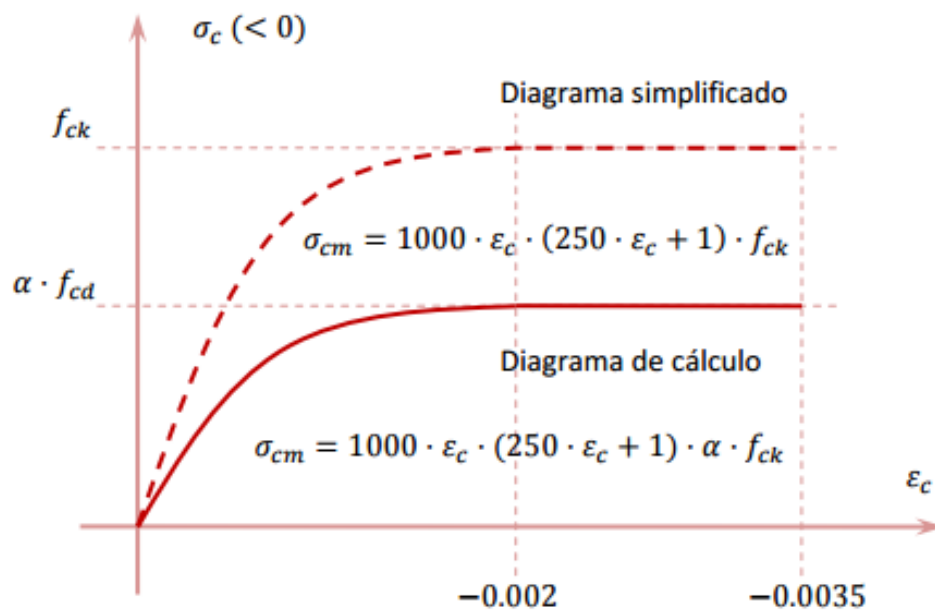
Diagrama de comportamiento

El diagrama tensión deformación por compresión tiene la forma genérica representada en la figura siguiente, cuyas características se determinan por ensayos:



Para análisis de la sección la idealización más usada que es el diagrama parábola rectángulo, cuyo valor máximo ϵ_{cu} toma 3.5 ‰; el diagrama de cálculo se obtiene reduciendo la tensión por un factor α/γ_c , siendo;

| | |
|------------|--|
| γ_c | Coefficiente parcial de seguridad del hormigón. |
| α | Coefficiente que tienen cuenta el cansancio del hormigón por compresión y los efectos desfavorables por la forma de aplicar la carga; generalmente se adopta 0.85 para compresiones permanentes. |



1.5.1.2. Acero

El proceso de fabricación de los tubos, conformados en frío, modifica las propiedades del material base, haciendo que el límite elástico del acero sea diferente según la cara o esquina que se estudie (ver figura).

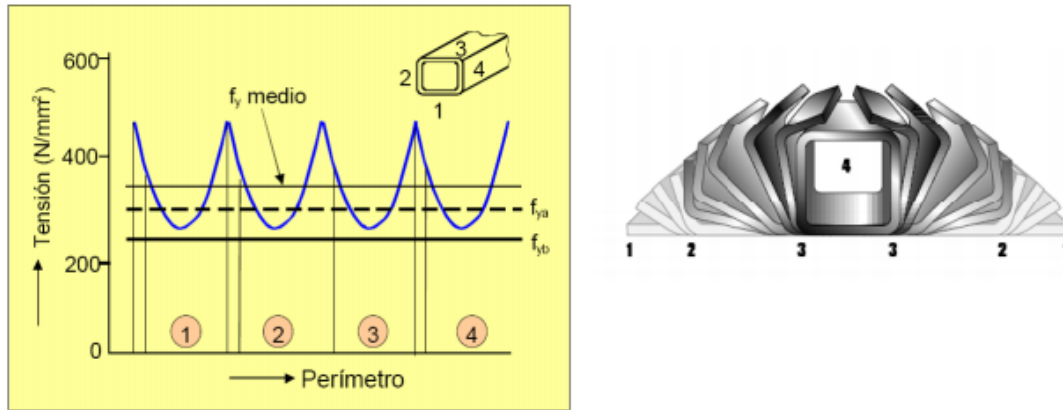


Ilustración 6 Proceso de conformado de los perfiles tubulares. Propiedades según la zona de la sección

Figura 1-8. Proceso de conformado de los perfiles tubulares. Propiedades según la zona de la sección.

El Eurocódigo 4 no considera en el cálculo de pilares mixtos la modificación que produce el proceso de conformado en el límite elástico del acero, empleando el límite elástico del material base. En cambio, otras normativas de cálculo de elementos de acero sí que consideran este efecto.

A continuación se recoge el modelo utilizado en el presente proyecto considerado en el Eurocódigo 3, en el apartado 1 – 3, Perfiles de acero conformados en frío, da una expresión para corregir el efecto de este proceso de fabricación en el material base.

Límite elástico medio, tras el conformado en frío, f_{ya}

$$f_{ya} = f_{yb} + \frac{k \cdot n \cdot t^2}{A} \cdot (f_u - f_{yb})$$

- f_{yb} límite elástico del material base, en MPa
- f_u tensión última de rotura del material base, en MPa
- A sección de acero, en mm²
- k coeficiente que tiene en cuenta el proceso de fabricación, $k = 7$
- n número de ángulos de 90°
- t espesor de la sección, en mm

Todos los criterios del EC4 son aplicables a estructuras mixtas. **No se dan reglas de aplicación para los de alta resistencia.** Las resistencias se recogen en la siguiente tabla:

| Tipo de Acero | Espesor t en mm | | | | Temperatura del Ensayo Charpy |
|---------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|
| | t ≤ 40 mm | | 40 mm < t ≤ 100 mm | | |
| | f _y (N/mm ²) | f _u (N/mm ²) | f _y (N/mm ²) | f _u (N/mm ²) | |
| S 235 JR | 235 | 360 | 215 | 340 | 20 |
| S 235 J0 | | | | | 0 |
| S 235 J2G3 | | | | | -20 |
| S 275 JR | 275 | 430 | 255 | 410 | 20 |
| S 275 J0 | | | | | 0 |
| S 275 J2G3 | | | | | -20 |
| S 355 JR | 355 | 510 | 335 | 490 | 20 |
| S 355 J0 | | | | | 0 |
| S 355 J2G3 | | | | | -20 |

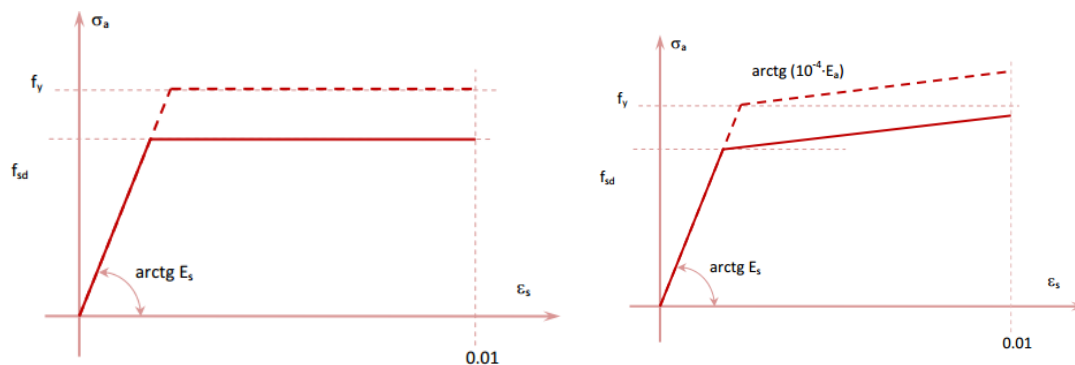
Además, para poder aplicar el cálculo de la resistencia plástica de secciones propuesto por la normativa europea, el acero estructural ha de cumplir:

- El coeficiente entre resistencia tracción y límite elástico especificado (f_u/f_y) ha de ser mayor que 1.2.
- El alargamiento de rotura de una base de medida igual a 5.65 veces la raíz cuadrada de valor inicial de la sección transversal de la probeta, ha de ser igual o superior al 15%.
- El coeficiente entre deformación bajo carga máxima ϵ_u y deformación correspondiente a límite elástico ϵ_y debe ser igual o superior a 20.

Para otras magnitudes de cálculo se pueden adoptar los siguientes valores:

| | |
|-----------------------------------|---|
| Módulo de elasticidad | $E_a = 210000 \text{ N/mm}^2$. |
| Módulo de elasticidad transversal | $G_a = E_a/2(1+\nu_a) = 81000 \text{ N/mm}^2$. |
| Coefficiente de Poisson | $\nu_a = 0.3$. |
| Densidad | $\rho_a = 7850 \text{ Kg/m}^3$. |
| Coefficiente de dilatación | $\alpha_a = 10 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. |

Diagrama de comportamiento



1.5.1.3. Conectores

Estos dispositivos para solidarizar el acero y hormigón en una pieza mixta, son elementos metálicos que suelen ir soldados al perfil por lo que la calidad del material ha de ser adecuada a la técnica de soldadura utilizada, y sus propiedades mecánicas deben verificar las mismas características que el acero estructural para poder aplicar el cálculo de la resistencia plástica de secciones.

1.5.2. Confinamiento

Se entiende por hormigón confinado el que tiene parcialmente coartada la expansión en las direcciones ortogonales a la directriz de la pieza comprimida. Se distinguen dos tipos de confinamiento: confinamiento activo y confinamiento pasivo.

1.5.2.1. Confinamiento activo

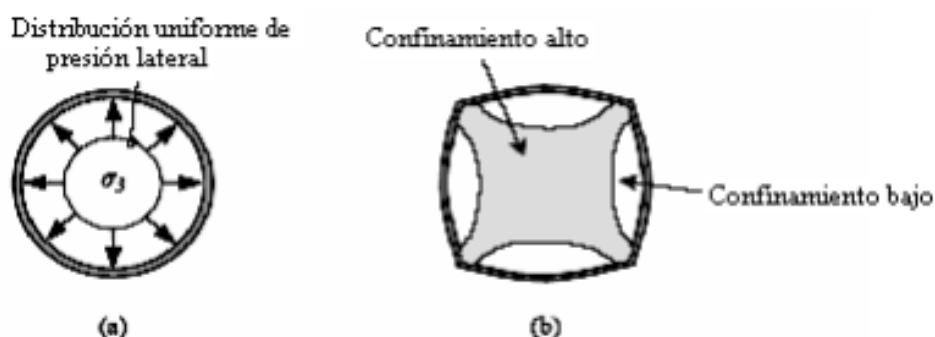
El comportamiento del hormigón en un estado triaxial se estudia por medio de una probeta cilíndrica sometida a una carga axial y a una presión hidrostática lateral proporcionada por un fluido. Dicha presión es activa, es decir es independiente de la carga axial aplicada. Para una presión lateral fijada se obtiene la curva de tensión – deformación uniaxial del hormigón en compresión. Cuando la presión lateral aumenta, impide la expansión lateral, y de esa forma retrasa el crecimiento de grietas.

1.5.2.2. Confinamiento pasivo

El confinamiento pasivo es el que le aporta el perfil de acero al núcleo de hormigón. Este confinamiento depende de la deformación lateral, tanto del acero, como del hormigón. Cuanto mayor es la deformación longitudinal, mayor es la transversal por el efecto de Poisson y, mayor será la presión lateral ejercida sobre el hormigón. Por tanto, el confinamiento pasivo depende del nivel de carga axial al que esté sometido el pilar.

El confinamiento pasivo depende de diversos factores como son:

- Materiales empleados: Hay pocos estudios del confinamiento con hormigón de alta resistencia. Dada la menor dilatación del HAR se observa que el confinamiento no tiene un efecto tan pronunciado.
- Forma de la sección. El confinamiento pasivo es más efectivo en secciones circulares que en rectangulares o cuadradas.



Confinamiento en secciones circulares (a) y cuadradas (b)

Ilustración 7 Diferencias en el confinamiento de secciones circulares y cuadradas

- c) Esbeltez del elemento confinado. A mayor esbeltez del elemento, los efectos de segundo orden también son mayores, resultando menos eficaz el tubo de acero al confinar el núcleo de hormigón, puesto que la deformación de la sección crítica se producirá por flexo-compresión y no por compresión pura, reduciéndose la deformación del núcleo.
- d) Excentricidad aplicada. Al aumentar la excentricidad aplicada implica mayor flexión y por tanto menor zona comprimida. Esto se traduce a una deformación transversal de la sección crítica menor y a reducirse también el confinamiento.
- e) Relación entre excentricidades en los extremos. Cuando las excentricidades en los extremos son iguales (diagrama de momentos de primer orden constante), el confinamiento pasivo es mínimo, puesto que los efectos de segundo orden son mayores. Si las excentricidades son diferentes, la sección crítica se comprimirá más y su deformación transversal aumentará, favoreciendo el confinamiento pasivo.
- f) Aplicación de la carga. A los CFTs se le puede aplicar la carga de tres formas diferentes, que afectan de forma significativa en el confinamiento pasivo. Aplicación de la carga sobre.
- *Únicamente sobre el perfil de acero:* no se produce ningún tipo de confinamiento. Si la carga se aplica únicamente sobre el perfil de acero, no existe confinamiento alguno, y experimentalmente se ha demostrado que la capacidad del pilar es similar a la proporcionada por un perfil tubular vacío, Bergmann.
 - *El núcleo de hormigón:* Confinamiento pasivo constante. Este confinamiento se produce cuando la carga se aplica únicamente sobre el hormigón. La carga axial comprime el núcleo de hormigón expandiéndose de forma transversal. Esta deformación la contiene el perfil de acero, retrasando el fallo del hormigón por tracciones excesivas en su periferia.
 - *Toda la sección, acero y hormigón:* Confinamiento pasivo no constante. El proceso de confinamiento progresivo con el nivel de carga es el siguiente. Inicialmente el coeficiente de Poisson del hormigón es menor que el del tubo de acero y por tanto el tubo no ejerce presión sobre el hormigón. A medida que las deformaciones longitudinales aumentan, la expansión lateral del hormigón también lo hace y en mayor medida que el acero. Esto sucede en el momento en el que aparecen microgrietas en el hormigón, cuando comienza el régimen elasto-plástico, es entonces cuando el hormigón se expande lateralmente más rápidamente que el acero, alcanzando a éste, reanudando el contacto y ejerciendo una presión sobre él. En este momento se desarrollan tensiones triaxiales en el núcleo de hormigón y se consigue el confinamiento pasivo en el pilar.

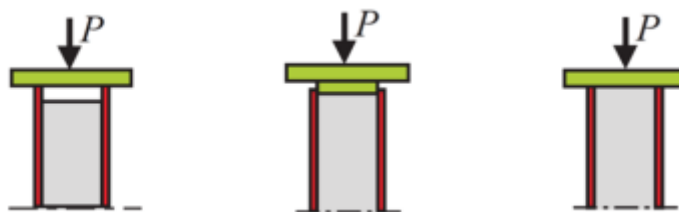
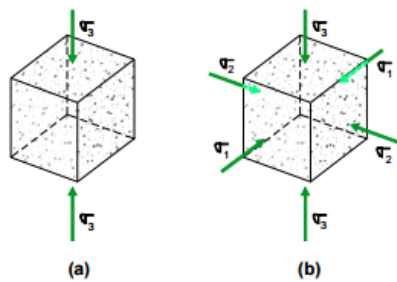


Ilustración 8 Tipo de aplicación de la carga al pilar

En resumen, el núcleo de hormigón en una columna CFT es ideal para resistir cargas de compresión, ya que el tubo de acero exterior mejora su resistencia debido al explicado confinamiento pasivo. Dicho confinamiento, como se ha explicado anteriormente, limita al hormigón al intentar expandirse lateralmente, ya que la sección de acero no se lo permite. Se genera así un estado de tensiones en donde el hormigón trabaja en régimen triaxial, aumentando su resistencia máxima, mientras que el acero trabaja en régimen biaxial, disminuyendo su carga máxima. En conjunto, el balance es positivo, lo que repercute en que la carga máxima global de la columna aumente como consecuencia de este fenómeno denominado confinamiento pasivo. Es decir, En pilares compactos con carga axial centrada la resistencia del elemento es mayor que la de la suma de resistencias de cada uno de los materiales (acero + hormigón).



(a) Estado de compresión uniaxial; (b) Estado de compresión triaxial.

Ilustración 9 Estado de compresión uniaxial y triaxial

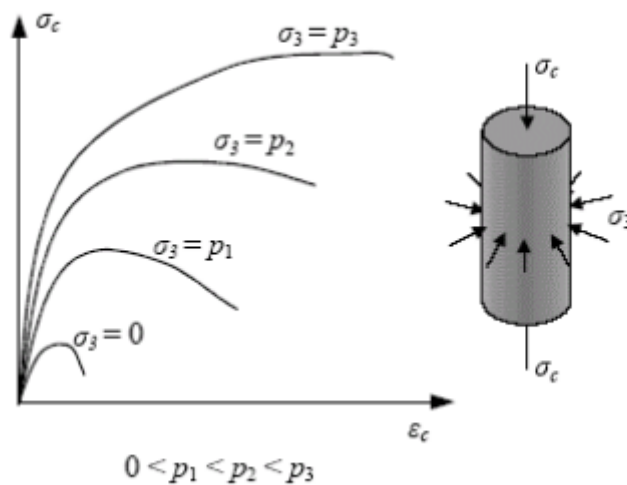


Ilustración 10 Mejora de la respuesta del hormigón por aumento de la presión de confinamiento

1.5.3. Adherencia

La demanda de transferencia de esfuerzos entre el núcleo de hormigón y el tubo de acero es mayor en zonas de discontinuidad geométrica. En ausencia de elementos conectores esta demanda debe ser cubierta por los mecanismos de adherencia:

- Adherencia por reacción química en la interfaz, por la capilaridad durante el proceso de hidratación.
- Microinterferencia debida a la rugosidad
- Fricción por la presión normal de las superficies, y
- Macrointerferencia por el efecto de la curvatura del elemento. Resultando en la compatibilidad de deformaciones.



Ilustración 11 Mecanismos de adherencia entre el acero y el hormigón

Inicialmente, la mejora en las propiedades del HAR debería proporcionar también una mejora en la resistencia del contacto. Sin embargo, el comportamiento del HAR es más frágil que el hormigón de resistencias normales, lo que hace más difícil la distribución uniforme de tensiones en el contacto.

1.5.4. Ductilidad

La ductilidad de un pilar se define como la capacidad para deformarse plásticamente sin producirse el colapso. Esta característica es deseable para los elementos de construcción, dado que en caso de superarse la capacidad portante, la rotura no sería frágil (súbita) sino que sería progresiva y por tanto aporta mayor seguridad.

La ductilidad de los materiales se ve reducida con el aumento de la capacidad resistente de los mismos y por sus características mecánicas: el acero es un material dúctil, mientras que el hormigón es todo lo contrario, frágil.

Los pilares a base de perfiles tubulares rellenos de hormigón presentan una ductilidad muy elevada en comparación con pilares convencionales de hormigón armado, debido al efecto de confinamiento que le proporciona el perfil de acero, que impide la caída brusca de resistencia al alcanzar la carga última. A su vez esta configuración también es más dúctil que la de un perfil tubular de acero vacío, puesto que este pandea localmente al alcanzar el límite elástico del material.

1.5.5. Pandeo Local

Un perfil tubular vacío sometido a cargas de compresión puede colapsar antes de alcanzar el límite elástico, por efecto del pandeo local de alguna de sus caras. La inestabilidad se muestra como una abolladura hacia el interior del tubo, tal y como se muestra en la figura.

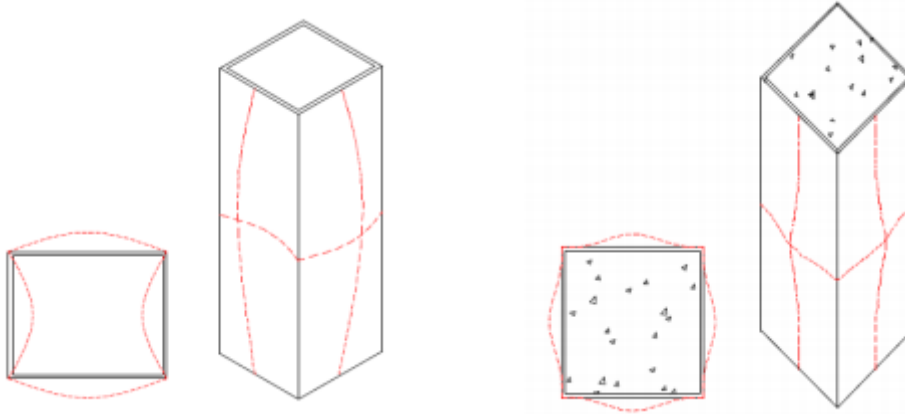


Ilustración 12 Pandeo local en pilares rellenos de hormigón y en pilares vacíos

Los Eurocódigos 3 y 4 introducen el concepto de clasificación de la sección transversal para determinar, si el pandeo local limita o no la capacidad de dicha sección de desarrollar su momento resistente plástico, y las rotaciones necesarias para la redistribución de los momentos internos. Las limitaciones incluidas en el código reconocen el hecho de que parte de la pérdida de la capacidad de rotación debido al pandeo local se compensa por el efecto beneficioso de endurecimiento por deformación.

- Las secciones transversales clase 1 (Plástica) son aquellas que son capaces de desarrollar tanto el momento resistente plástico, como disponer de la capacidad de rotación necesaria, antes de producirse cualquier pandeo local.
- Las secciones transversales clase 2 (Compacta) pueden desarrollar su momento resistente plástico, pero la capacidad de rotación está limitada por el pandeo local. La clasificación de una sección transversal está determinada por la clasificación de los elementos planos que la forman sometidos a compresión que a su vez está determinada por relaciones de anchura a espesor.
- Las secciones transversales clase 3 (Semicompacta o elástica) en las que la tensión en la fibra más comprimida de la pieza puede alcanzar el límite elástico pero en las que la abolladura local puede impedir alcanzar el momento plástico.

- Las secciones transversales clase 4 (Esbelta) en las que para determinar su resistencia a momento flector o a compresión, es necesario tener en cuenta explícitamente los efectos locales de abolladura.

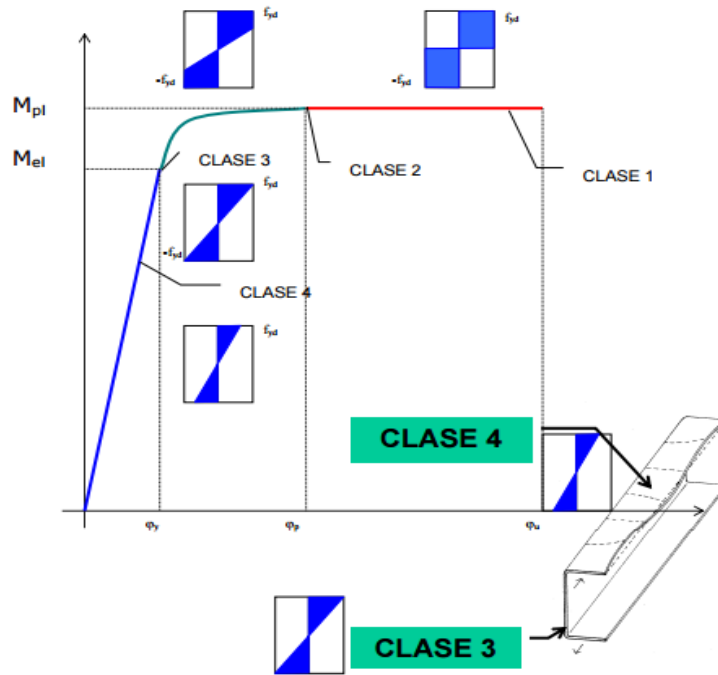


Ilustración 13 Clasificación de clase del acero

En el caso de secciones mixtas formadas por perfiles tubulares rellenos, el núcleo de hormigón imposibilita el pandeo del tubo hacia el interior retrasando el pandeo local de la sección. Esto se traduce en un mejor aprovechamiento de las propiedades del acero, puesto que en muchos casos se consigue alcanzar la plastificación del acero.

El EC4, previene la aparición de efectos de abolladura local de la camisa de acero estableciendo un espesor mínimo que cumpla la siguiente relación:

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:

$$\frac{d}{t} \leq 90 \cdot \varepsilon^2 \text{ (Secciones huecas circulares)}$$

$$\frac{d}{t} \leq 52 \cdot \varepsilon \text{ (Secciones huecas rectangulares)}$$

$$\frac{d}{t_f} \leq 52 \cdot \varepsilon \text{ (Secciones H parcialmente embebidas)}$$

| | |
|--------------------------------------|---|
| d | Diámetro para secciones huecas circulares. Ancho para secciones huecas rectangulares. Ancho del ala para secciones H. |
| t | Espesor de pared |
| t_f | Espesor de paredes de secciones H. |
| $\varepsilon = \sqrt{235 / f_{y,k}}$ | Con $f_{y,k}$ resistencia característica de la sección de acero. |

Capítulo 2

Memoria descriptiva

Índice

| | |
|--|-----------|
| Capítulo 2: Memoria descriptiva | 35 |
| 2. Objeto | 35 |
| 3. Alcance | 35 |
| 4. Antecedentes y Justificación | 35 |
| 4.1. Antecedentes | 36 |
| 4.2. Justificación | 38 |
| 5. Normativa Europea | 39 |
| 5.1.1. Definición | 40 |
| 5.1.2. Métodos de cálculo | 41 |
| 5.1.3. Método de cálculo simplificado | 41 |
| 5.1.3.1. Limitaciones | 41 |
| 5.1.3.2. Resistencia de la sección transversal | 43 |
| 5.1.3.3. Resistencia a pandeo de una pieza | 44 |
| 5.1.3.4. Resistencia de la sección transversal sometida a axil y momento flector | 45 |
| 5.1.3.5. Momentos flectores de segundo orden | 48 |
| 5.1.3.6. La influencia del esfuerzo cortante | 49 |
| 5.1.3.7. Resistencia de la pieza sometida a compresión axil y flector en un solo plano | 49 |
| 5.1.3.8. Resistencia de la pieza sometida a compresión axil y flector en dos planos | 50 |
| 6. Programa experimental | 52 |
| 6.1. Introducción | 52 |
| 6.2. Diseño del experimento | 52 |
| 6.2.1. $\text{Max}(b,h)/t$ | 52 |
| 6.2.2. Longitud del pilar | 54 |
| 6.2.3. Resistencia del hormigón, en probeta cilíndrica, f_{ck} | 54 |
| 6.2.4. Excentricidades y Relación de excentricidades r | 55 |
| 6.3. Resumen/Historial de ensayos | 57 |
| 4.3.1 Ensayos con perfiles rectangulares y cuadrados: | 57 |
| 4.3.2 Ensayos con perfiles circulares: | 60 |
| 4.3.3 Ensayos con perfiles ovalados: | 61 |
| 6.4. Especímenes de ensayo | 61 |
| 6.4.1. Hormigón | 61 |
| 6.4.2. Acero | 62 |
| 6.4.3. Fabricación | 63 |
| 6.5. Descripción de ensayos | 65 |
| 6.5.1. Apoyos | 65 |
| 6.5.2. Pórtico de ensayos | 66 |
| 6.5.2.1. Pórtico Horizontal | 67 |
| 6.5.2.2. Pórtico para probetas de hormigón | 69 |
| 6.6. Toma de datos | 70 |

| | | |
|-------------|--|------------|
| 6.7. | Procedimiento durante el ensayo | 70 |
| 6.7.1. | <u>Marcado de pilares mixtos</u> | 71 |
| 6.7.2. | <u>Colocación en pórtico horizontal</u> | 72 |
| 6.7.3. | <u>Realización del ensayo</u> | 73 |
| 6.8. | Postprocesado de datos experimentales..... | 73 |
| 7. | <u>Estudio a partir de los ensayos experimentales</u> | 74 |
| 7.1. | Introducción | 74 |
| 7.2. | Realización del estudio de los datos experimentales | 74 |
| 7.3. | Resultados obtenidos para un pilar | 84 |
| 7.3.1. | <u>Obtención de diagrama seccional</u> | 84 |
| 7.3.2. | <u>Parámetros comparativos</u> | 88 |
| 7.4. | Comparación con EC4..... | 90 |
| 7.4.1. | <u>Comparación con perfiles Rectangulares y Cuadrados</u> | 90 |
| 7.4.2. | <u>Comparación con perfiles Circulares</u> | 98 |
| 7.4.3. | <u>Comparación con perfiles Ovalados.....</u> | 105 |
| 7.5. | Conclusiones..... | 110 |
| 8. | <u>Estudio económico.....</u> | 113 |
| 8.1. | Introducción | 113 |
| 8.2. | Realización del estudio..... | 115 |
| 8.2.1. | <u>Costes asignados a las alternativas</u> | 115 |
| 8.2.1.1. | <u>Costes en el pilar mixto.....</u> | 115 |
| 8.2.1.2. | <u>Costes en los perfiles de acero</u> | 119 |
| 8.2.2. | <u>Comparación de alternativas</u> | 121 |
| 8.3. | Resultado del estudio | 122 |
| 8.3.1. | <u>CFTs rectangulares y cuadrados.....</u> | 122 |
| 8.3.2. | <u>CFTs circulares.....</u> | 122 |
| 8.3.3. | <u>CFTs ovalados.....</u> | 123 |
| 8.4. | Conclusiones del estudio económico | 124 |
| 9. | <u>Bibliografía.....</u> | 125 |

Capítulo 2: Memoria descriptiva

2. Objeto

El objetivo del proyecto será validar el uso del método simplificado explicado en la normativa para hormigones de resistencia convencional y estudiar si dicho método se puede utilizar para el cálculo de pilares mixtos con hormigones de alta resistencia, concretamente hasta 90 MPa. La norma actualmente limita la resistencia del hormigón a 60 MPa.

Además se realizará un estudio económico donde se debe exponer en términos económicos el pilar óptimo comparando pilares de acero y pilares mixtos. De esta manera se comprobará la tercera ventaja explicada en el apartado “1.3. Ventajas CFTs” donde se expone que los pilares mixtos son más baratos.

3. Alcance

El proyecto realizado es de índole de investigación ya que el uso de hormigones de alta resistencia no se contempla en el EC4.

El proyecto constará de diferentes fases:

La primera fase o etapa se deberá fabricar el hormigón e introducir éste en los perfiles de acero.

En la segunda fase se deberán realizar todos los ensayos correspondientes y recopilar todos los datos necesarios de los ensayos.

En la última etapa se realizará el estudio de los datos obtenidos. Tanto el estudio técnico como económico se finalizan con la obtención de conclusiones.

4. Antecedentes y Justificación

En este capítulo se describen los trabajos e investigaciones más importantes que se han realizado sobre comportamiento seccional de pilares mixtos de tipo perfil tubular de acero relleno de hormigón, sometidos a cargas axiales, con y sin excentricidad.

Los primeros perfiles tubulares rellenos de hormigón surgieron a mediados del siglo XIX. Estas tipologías de pilares emergentes, estaban fuera del ámbito de aplicación de la normativa existente y no había modelos que predijeran el comportamiento de los mismos frente a sollicitaciones externas. Por ello se llevaron a cabo ensayos experimentales sobre estos elementos y se obtuvieron expresiones particulares para cada tipo de pilar empleado, fijando las bases para el resto de investigaciones que han desarrollado la normativa actual.

4.1. Antecedentes

Se muestra a continuación una tabla de los trabajos e investigaciones más importantes que se han realizado de una manera cronológica.

| | Autor | Año | Alta resistencia | Descripción |
|--------------------------------|-------------------------------|------|------------------|---|
| Base | FURLONG | 1967 | NO | Base de normas como la ACI de 1970 y la BS5400 de 1979 |
| | KNOWLES & PARK | 1969 | NO | |
| Validación | SHAKIR-KHALIL | 1989 | NO | Ampliar y mejorar la BS5400-5 |
| | SHAKIR-KHALIL | 1990 | NO | Las ganancias de resistencia respecto a tubo vacío sobre el 45% |
| | SHAKIR-KHALIL | 1990 | NO | Flexo compresión en eje débil infradimensionada en la BS5400 |
| | | | | Flexo compresión en eje fuerte sobredimensionada en la BS5400 |
| | CEDERWALL, ENGSTRON & GRAUERS | 1990 | SI | Primeros ensayos utilizando materiales de alta resistencia (hormigón) |
| | MATSUI | 1995 | NO | Pérdida de capacidad portante conforme aumenta excentricidad y esbeltez |
| Materiales de alta resistencia | UY & PATIL | 1996 | SI | Pilares cortos sometidos a flexocompresión |
| | SHAMS & SAADEGHVAZIRI | 1997 | Estado del arte | Detallan el estado del arte de pilares mixtos |
| | WANG & MOORE | 1997 | NO | Cambio en la norma BS5950: estructuras metálicas --> pilares mixtos |
| | UY | 1998 | SI | Incorporó las tensiones residuales (acero) y la no linealidad (hormigón) |
| | ZHANG & SHAHROOZ | 1999 | SI | Permitir la plastificación total del acero. Interés de añadir mat. De alta R |
| | WANG | 1999 | NO | EC4 y BS5400 resultaron ser conservadores |
| | UY | 2000 | NO | Pandeo local: relación b/t superior a la normativa |
| | HAN | 2002 | SI | Ensayos de pilares compactos |
| | HAN | 2003 | NO | Pilares esbeltos con hormigón convencional: Normas conservadoras |
| | LIU | 2004 | SI | ACI y AISC inseguras, EC4 se ajusta bien con HAR (norma no lo contempla) |
| | LEON, KIM, HAJJAR | 2007 | Base de datos | Actualizar el AISC de 1999. Base de datos para llegar al modelo del AISC 2005 |

ANÁLISIS NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DE DIFERENTES SOLUCIONES ESTRUCTURALES A BASE DE PILARES MIXTOS TIPO CONCRETE-FILLED STEEL TUBE

| | Autor | Año | Alta resistencia | Descripción |
|--------------------------------|--|------|------------------|---|
| Materiales de alta resistencia | LAM,D. TESTO, N | 2007 | NO | investigar el comportamiento de los CFSTs elípticas bajo carga axial |
| | GUO, L. ZHANG, S. KIM, W-J. RANZI, G | 2007 | NO | Investigación en CFT del pandeo local |
| | Portoles, J.M, Romero, M.L, Bonet, J.L, Hernández-Figueirido, D. | 2007 | SI | Realización de estudio numérico y experimental de CFT con HAR. |
| | Yu, Z. -w., Ding, F.-x., Cai-C.S. | 2007 | SI | Estudio experimental de secciones circulares con HAR y hormigón normal |
| | Uy, B. | 2008 | SI | Estudio con aceros de alta resistencia y aceros inoxidable |
| | Oliveira et al. | 2009 | SI | Análisis de ensayos incluyendo HAR |
| | Chitawadagi, Manojkumar V. | 2009 | NO | 99 especímenes de 1 m ensayados a flexión pura |
| | Jianzhu Jiegou | 2009 | SI | Comparación de fórmulas. Ensayos con columnas cortas. Uso de HAR. |
| | Uenaka, Kitoh, sonoda | 2010 | NO | Ensayo de CFTs |
| | Jamaluddin, N. Lam, D. Ye, J. | 2010 | SI | Estudio experimental de CFTs cortos y largos elípticos. |
| | Karmazínová, M. Melcher, J.J. | 2010 | SI | Estudio de CFTs con materiales de alta resistencia (estudia pandeo) |
| | Romero, M.L. Moliner, V. Espinos, A. Ibañez, C. Hospitaler, A. | 2011 | SI | CFTs circulares con hormigones normales, de alta y de muy alta resistencia |
| | Lee, S.-H. Uy, B. Kim, S.-H. Choi, Y.-H. Choi, S.-M. | 2011 | SI | Circulares con carga excéntrica. Hormigón de unos 60 Mpa y acero de 450 Mpa |
| | Xiamuxi, A. Hasegawa, A. | 2011 | SI | Estudio de CFTs con hormigón de alta resistencia (y con armado) |
| | Chen, G., Xu, Z., Yang, Z., Tian, Z. | 2011 | SI | Estudio de CFTs cortos con hormigón de alta y resistencia |
| | Bukovská, P. | 2012 | SI | Influencia del hormigón de alta resistencia |
| | Liew, J.Y., Xiong, D.X. | 2012 | SI | Uso de hormigones de ultra alta resistencia (150-200 Mpa) |
| | Jamaluddin, N., Lam, D., Dai, X.H.,Ye, J. | 2013 | SI | CFTs elípticos con diferentes tamaños, longitudes y resistencias. |
| | Portolés, J.M., Serra, E., Romero, M.L. | 2013 | SI | Continuación del trabajo del 2011. Hormigones de ultra alta resistencia |
| | Kim, C.-S., Park, H.- | 2014 | SI | Ensayos con aceros y hormigón |

| | | | | |
|--|---|------|----|--|
| | G., Chung, K.-S., Choi, I.-R. | | | de alta resistencia con diferentes formas |
| | Lu, Y.-Y., Li, N., Li, S., Liang, H.-J. | 2015 | SI | Estudio experimental de CFTs con hormigón de alta resistencia y fibras |
| | Karmazínová, M. | 2015 | SI | Estudio experimental con CFTs sometidos a compresión con pandeo |

En la tabla solo hay recogidos algunos de los muchos trabajos e investigaciones sobre pilares mixtos que se han realizado.

En dicha tabla se puede observar como los primeros estudios sirvieron de guía y a partir de ahí se creó la base de normas como la ACI de 1970 y la BS5400 de 1979. Estudios posteriores se encargaban de validar y mejorar la norma. Tras la fase de validación se han seguido realizado numerosos estudios que incluían mejoras o aspectos no estudiados.

Los diferentes estudios pueden encontrados van desde realizaciones de estudios numéricos, realización de campaña experimentales compresión, realización de campañas a flexo-compresión, comportamiento de pilares mixtos a pandeo, comportamiento de pilares mixtos seccional, incluir pilares de alta resistencia, recopilación de estado del arte, investigaciones del pandeo local o estudiar el comportamiento frente al fuego, sismo o golpe de los pilares mixtos.

Por lo que hay una gran cantidad de estudios en los últimos años de muy diversos temas. La tabla mostrada recoge solo unos pocos porque muestra los estudios encontrados que guardan relación con nuestro estudio.

4.2. Justificación

Como se puede observar, en los últimos años la mayoría incluye pilares de alta resistencia, pero por otro lado pocos estudian el comportamiento de pilares poco esbeltos donde no influye el pandeo. Esto último es interesante ya que el método propuesto se basa en calcular un diagrama de interacción seccional y más tarde corregirlo con unos coeficientes para tener en cuenta estos efectos de segundo orden. Además la tendencia de estudios sobre la inclusión de hormigones de alta resistencia parece justificada ya que se podrían obtener resistencias mayores con el mismo acero.

Este panorama donde interesa la inclusión de hormigones de alta resistencia y los pocos ensayos con elementos poco esbeltos (esbeltez relativa < 0.4) ha dado pie a la realización de este proyecto, "ANÁLISIS NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DE DIFERENTES SOLUCIONES ESTRUCTURALES A BASE DE PILARES MIXTOS TIPO CONCRETE-FILLED STEEL TUBE".

5. Normativa Europea

La Normativa Europea empleada para pilares mixtos es el **Eurocódigo 4 (2004)**

Se observa que el Eurocódigo 4 lleva más de 10 años sin modificarse. Esto puede dar a una normativa desactualizada, sobre todo si se compara con otras normativas como por ejemplo la americana ACI 318-14 del año 2014 o la brasileña ABNT NBR 14323:2013 de 2013. Aunque otras normativas como la argentina CIRSOC 201-2005 o mexicana NTCRC: 2004 llevan también un tiempo sin actualizarse.

Este proyecto tratará de realizar ensayos que estudien por un lado la verificación y buen funcionamiento de la norma y además, por otro lado, estudiará el uso de los métodos de cálculo del EC4 con hormigones de alta resistencia, lo cual no se contempla.

Se expone en este capítulo además los aspectos significativos del método de cálculo propuesto en la normativa actual en Europa.

Los Eurocódigos estructurales son un conjunto de normas europeas, encargadas por la Comisión Europea al Comité Europeo de Normalización (CEN), y las que se recogen los métodos comunes en todos los Estados Miembro de la Unión Europea para el cálculo y dimensionado de estructuras y de productos prefabricados estructurales.

Como respuesta a este encargo de la Comisión, se creó en el CEN en 1990 un Comité Técnico, el CEN/TC250 "Eurocódigos Estructurales". La vigilancia y seguimiento del desarrollo del programa de los Eurocódigos corresponde al Comité Permanente de la Directiva 89/106/CEE, de Productos de Construcción. El seguimiento de estos trabajos de normalización en el plano nacional, lo realiza el organismo español de normalización miembro del CEN, (AENOR), a través del AEN/CTN140 como Comité paralelo del CEN/TC250.

El Eurocódigo 4 es el documento encargado del cálculo de estructuras mixtas de acero y de hormigón tanto a temperatura normal como frente al fuego. El apartado 6.7 está dedicado al cálculo y comprobación de pilares mixtos, incluyendo las tipologías siguientes:

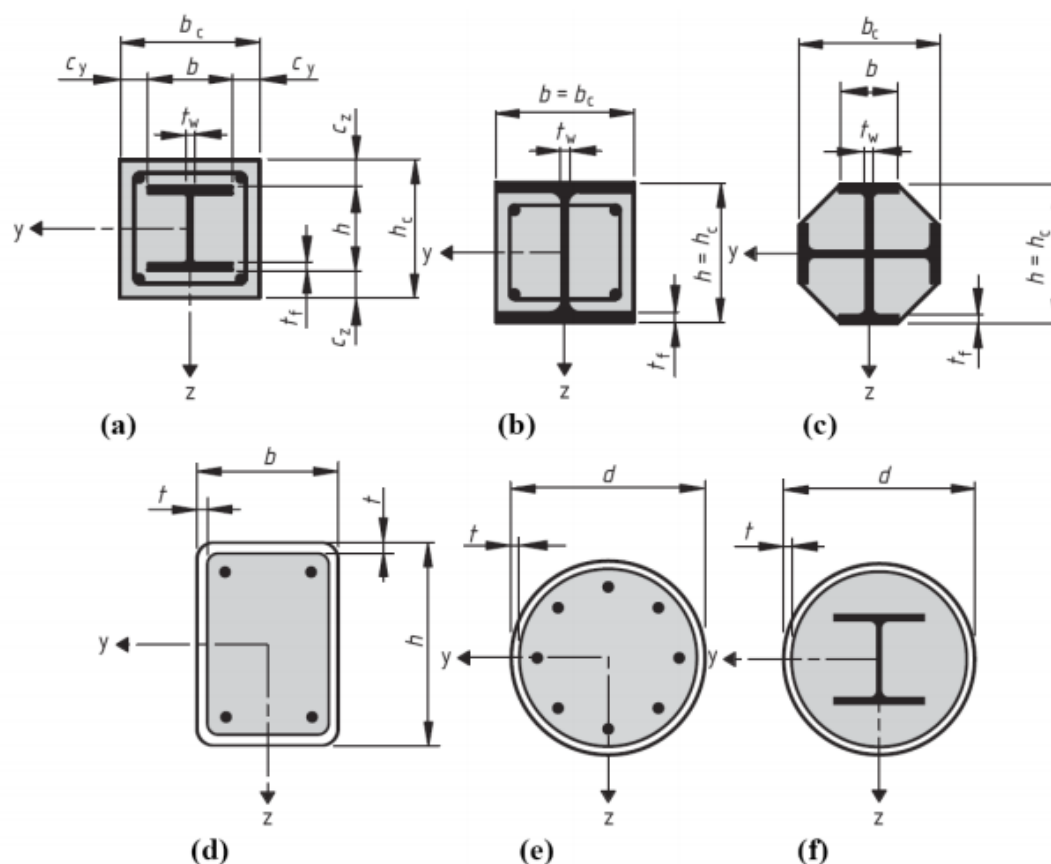


Ilustración 14 Pilar mixto embebidos y confinados

5.1.1. Definición

En el Eurocódigo 4 (EC4) se tiene la definición de Elemento mixto como “elemento estructural compuesto por hormigón y acero estructural o conformado en frío, interconectados por conectadores para limitar el desplazamiento longitudinal entre el hormigón y acero; y el despegue de un componente del otro”.

La idea principal en esta definición es la interconexión entre materiales; esta “interconexión” ya se produce en otros tipos de elementos como el hormigón armado, donde un material está totalmente embebido dentro del otro. La diferencia radica en el modo de conseguir la unión; lo que nos lleva a definir el conector, que según el EC4 es “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 de un único elemento estructural”. Este elemento es el que diferencia a las estructuras de acero y hormigón de las estructuras mixtas.

5.1.2. Métodos de cálculo

El Eurocódigo 4 proporciona dos métodos para el cálculo de resistencia de los pilares mixtos.

El primero es un método general que tiene en cuenta de forma explícita tanto los efectos de segundo orden como las imperfecciones. Este método puede aplicarse en particular a pilares de sección transversal asimétrica así como a pilares cuya sección varía con la altura. Pero requiere el empleo de herramientas numéricas de computación, y puede considerarse solamente en el caso de que se disponga del software adecuado.

El segundo es un método simplificado que hace uso de las curvas Europeas de pandeo para pilares de acero, las cuales tienen en cuenta implícitamente las imperfecciones. Este método tiene limitada su aplicación a pilares mixtos de sección transversal doblemente simétrica constante a lo largo de su altura.

Estos dos métodos se basan en las suposiciones siguientes:

- Hay interacción completa entre las secciones de acero y hormigón hasta que se produce el momento en que se alcanza el fallo;
- Las imperfecciones geométricas y las tensiones residuales son tenidas en cuenta en el cálculo, aunque normalmente esto se hace empleando una falta de rectitud inicial o imperfección en la pieza;
- Las secciones planas permanecen planas mientras el pilar se deforma.

En lo que sigue solamente será considerado el Método simplificado, dado que es más sencillo y resulta aplicable a la mayoría de casos prácticos.

5.1.3. Método de cálculo simplificado

El método simplificado está sometido a las limitaciones siguientes:

5.1.3.1. Limitaciones

- La sección transversal del pilar debe ser prismática y simétrica respecto de ambos ejes a lo largo de toda su altura, con sus relaciones entre las dimensiones de la sección transversal dentro del rango $5,0 > h_c / h_b > 0,2$.
- Limitación en la resistencia máxima de los componentes del pilar mixto. No se contemplan materiales de alta resistencia ni para el acero, ni para el hormigón.
 - Resistencia característica a compresión del hormigón f_{ck} limitada a 50 MPa.
 - Limitado a la serie de aceros S355 con límite elástico f_y igual a 355 MPa.
- La contribución relativa de la sección de acero a la resistencia de cálculo de la sección mixta, dada por $\delta = (A_a \cdot \frac{f_y}{\gamma_a}) / N_{pl,Rd}$ debe de estar entre 0,2 y 0,9;
- La esbeltez relativa $\bar{\lambda}$ del pilar mixto debe ser menor de 2,0:

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

Siendo:

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

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

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

- I_a, I_c son los momentos de inercia de las secciones transversales del acero estructural y del hormigón (con la zona en tracción supuestamente sin fisurar), respectivamente.
- E_a es el módulo de elasticidad del acero estructural.
- E_{cm} el módulo secante del hormigón.
- Para secciones embebidas en hormigón, el área de la armadura de refuerzo debe ser al menos 0,3% del área de hormigón en la sección transversal, y el recubrimiento debe cumplir los límites siguientes (estando b_c y h_c definidos anteriormente):

| | |
|-------------------|---|
| En la dirección y | $40 \text{ mm} \leq c_y \leq 0,4 b_c$. |
| En la dirección z | $40 \text{ mm} \leq c_z \leq 0,3 h_c$. |

- La sección se calcula para que alcance, en su estado límite último, toda su capacidad resistente. Para esto hay que asegurar que sea posible llegar a ese estado sin que se produzca ningún fallo previo por causa de una inestabilidad local de las zonas delgadas de la sección transversal. Esto se puede asegurar limitando la relación entre el canto y el espesor en la sección. Es decir, una de las limitaciones es la explicada en el apartado anterior de pandeo local donde ya se indica que el EC4 limita la esbeltez diferenciando entre los distintos tipos de pilares.
 - Secciones huecas circulares:

$$\frac{d}{t} \leq 90 \cdot \varepsilon^2$$

- Secciones huecas rectangulares:

$$\frac{d}{t} \leq 52 \cdot \varepsilon$$

- Secciones H parcialmente embebidas:

$$\frac{d}{t_f} \leq 52 \cdot \varepsilon$$

Esta restricción tiene en cuenta que el pandeo en las paredes de las secciones rellenas de hormigón sólo es posible hacia el exterior, siendo por lo tanto su comportamiento respecto a la sección sólo de acero, mucho mejor.

Esta limitación se ha tomado considerando los perfiles rellenos de hormigón como **clase 2** (explicado en el capítulo de conocimientos base). Esto significa que los esfuerzos internos se determinan siguiendo un análisis estructural elástico y se comparan con las resistencias plásticas de las secciones, admitiendo que las secciones tienen capacidad rotacional limitada y por tanto no es admisible el análisis estructural plástico.

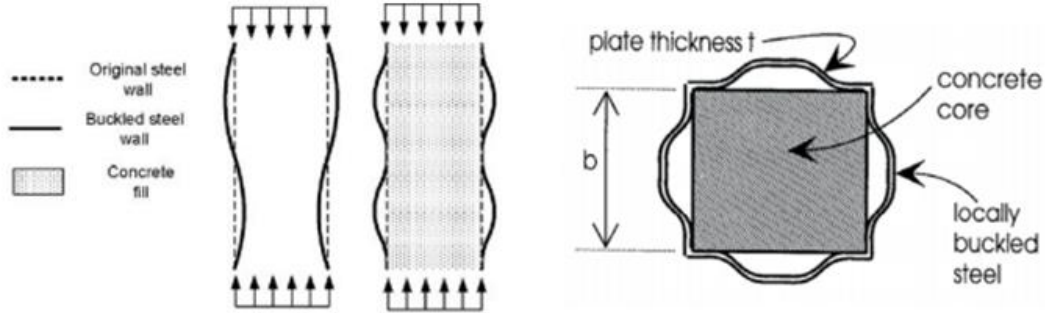


Ilustración 15 Pandeo local en pilares vacíos y rellenos de hormigón

5.1.3.2. Resistencia de la sección transversal

La resistencia a compresión axial de la sección transversal de un pilar mixto es la suma de las resistencias plásticas de compresión de cada uno de sus elementos constituyentes como sigue:

Para secciones de acero total o parcialmente embebidas en hormigón:

$$N_{pl,Rd} = A_a \cdot \frac{f_y}{\gamma_{Ma}} + A_c \cdot 0,85 \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} + A_s \cdot \frac{f_{sk}}{\gamma_s}$$

Para secciones huecas rellenas de hormigón:

$$N_{pl,Rd} = A_a \cdot \frac{f_y}{\gamma_{Ma}} + A_c \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} + A_s \cdot \frac{f_{sk}}{\gamma_s}$$

| | |
|-------|--|
| A_a | Áreas de la sección transversal del perfil de acero. |
| A_c | Área de la sección transversal del hormigón. |
| A_s | Área de la sección transversal de la armadura de refuerzo. |

El aumento de la resistencia del hormigón de $0,85 \cdot f_{ck}$ a f_{ck} para las secciones huecas llenas de hormigón se debe al efecto de confinamiento. En el caso de sección hueca circular rellena de hormigón, se produce un incremento adicional en la resistencia a compresión provocada por el confinamiento que produce la sección de acero. Este efecto solo tiene lugar si el perfil hueco de acero es lo suficientemente rígido como para evitar la expansión lateral del hormigón bajo la carga axial de compresión.

Esta resistencia suplementaria del hormigón puede utilizarse en el cálculo cuando:

$$\bar{\lambda} < 0,5 \text{ y } M_{max,Ed} < 0,1 \cdot N_{Ed} \cdot d$$

| | |
|-----------------|--|
| $\bar{\lambda}$ | Esbeltez relativa de un pilar mixto formado por un tubo de acero circular relleno de hormigón. |
| $M_{max,Ed}$ | Mayor momento flector calculado usando teoría de primer orden. |
| d | Diámetro externo del pilar. |
| N_{Ed} | Esfuerzo de compresión de cálculo aplicado. |

5.1.3.3. Resistencia a pandeo de una pieza

Un pilar mixto presentará suficiente resistencia a pandeo si, para cada uno de los planos de pandeo, la carga axial de cálculo N_{Ed} satisface la desigualdad:

$$N_{Ed} < \chi \cdot N_{pl,Rd}$$

El valor de χ que representa el factor de reducción de la resistencia en el plano de pandeo considerado, es una función de la esbeltez relativa $\bar{\lambda}$ y de la curva de pandeo apropiada. Las curvas de pandeo aplicables a los pilares mixtos se presentan en la siguiente tabla:

| Curva de pandeo | Tipo de sección transversal | Imperfección |
|-----------------------------|---|--------------|
| Curva a ($\alpha = 0,21$) | Secciones huecas rellenas de hormigón con armadura de refuerzo ($A_s/A_c < 3\%$) o sin refuerzo o sin sección I de acero adicional. | L/300 |
| Curva b ($\alpha = 0,34$) | Secciones H total o parcialmente embebidas en hormigón, pandeo en el plano perpendicular al eje fuerte (y-y) de la sección de acero. Secciones huecas rellenas de hormigón bien con refuerzo ($3\% < A_s/A_c < 6\%$) o con sección I de acero adicional. | L/210 |
| Curva c ($\alpha = 0,49$) | Secciones H total o parcialmente embebidas en hormigón, pandeo en el plano perpendicular al eje débil (z-z) de la sección de acero. | L/170 |

Curvas de pandeo e imperfecciones de las piezas

Es posible calcular el valor del factor de reducción de resistencia χ mediante:

$$\chi = \frac{1}{\phi + [\phi^2 + \lambda^2]^{1/2}} \leq 1$$

En donde:

$$\phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2]$$

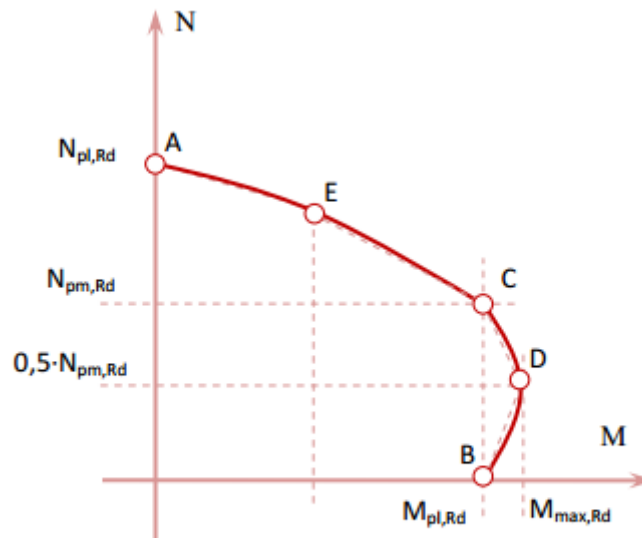
| | |
|----------|---|
| α | Parámetro generalizado de imperfección que tiene en cuenta los efectos desfavorables de la falta de rectitud inicial de la pieza y de las tensiones residuales. |
|----------|---|

En algunos casos, particularmente cuando se consideran pilares esbeltos bajo carga axil y momento, puede resultar apropiado utilizar los valores de imperfecciones dados en la tabla para calcular un flector de primer orden adicional causado por esta excentricidad de la carga axil.

α toma el valor de 0.21 para el caso de la curva “a”, que es la que hay que emplear para perfiles tubulares rellenos de hormigón.

5.1.3.4. Resistencia de la sección transversal sometida a axil y momento flector.

Es necesario satisfacer los requisitos de resistencia en cada uno de los planos principales, teniendo en cuenta la esbeltez, el diagrama de momentos flectores y la resistencia a flexión en el plano considerado. La resistencia de la sección transversal de un pilar mixto sometido a un esfuerzo de compresión axil y momento flector en un solo plano viene dada por una curva de interacción axil momento (M-N) como se indica en la figura.



M-N Curva de interacción para flexión en un solo plano

Ilustración 16 Diagrama de interacción seccional a compresión y flexión en un plano

El punto D sobre esta curva de interacción corresponde al máximo momento resistente $M_{\max, Rd}$ que puede alcanzar la sección. Este es mayor que $M_{pl, Rd}$ dado que el esfuerzo de compresión axil inhibe la fisuración por tracción en el hormigón, aumentando así la resistencia a flexión.

La curva de interacción anterior puede obtenerse punto por punto, considerando diferentes posiciones del eje neutro plástico en el plano principal considerado. Los valores concurrentes de resistencia al axil y al momento se obtienen de las distribuciones de tensiones, junto con las dos ecuaciones de equilibrio de suma de fuerzas axiales y suma de momentos iguales a cero.

La figura ilustra este proceso para el ejemplo de una sección embebida de hormigón, para cuatro posiciones particulares del eje neutro plástico que corresponden respectivamente a los puntos A, B, C, D señalados en el gráfico anterior.

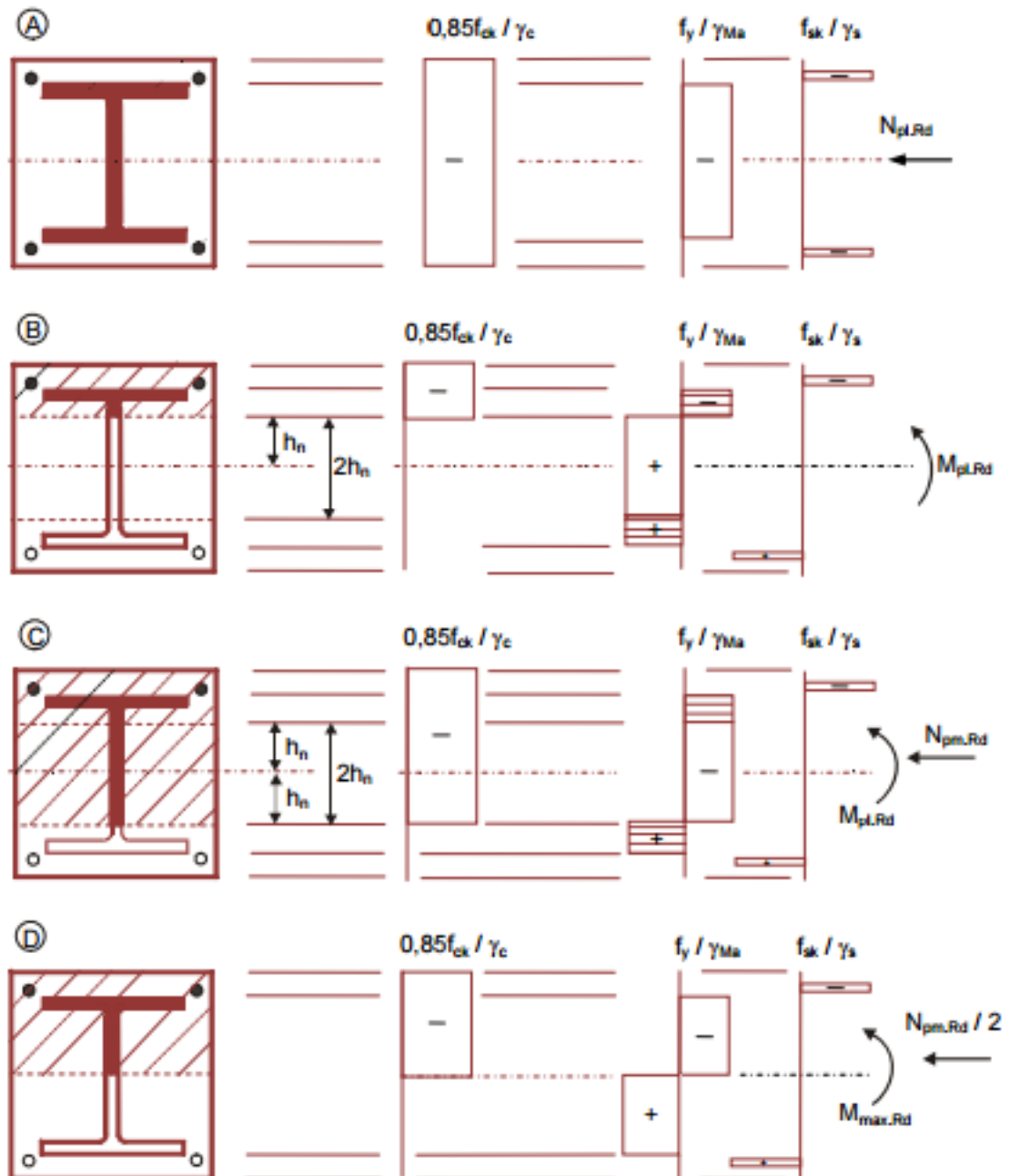


Ilustración 17 Bloque de tensiones en los diferentes puntos del diagrama de interacción

| | | | | | | | | | |
|----------------|---|----------|--|----------|--|----------|--|----------|--|
| <i>Punto A</i> | Resistencia a compresión axil simple: $N_A = N_{pl.Rd} \quad M_A = 0$ | | | | | | | | |
| <i>Punto B</i> | Resistencia a flexión simple en un solo plano: $N_B = 0 \quad M_B = M_{pl.Rd}$ | | | | | | | | |
| <i>Punto C</i> | Resistencia a flexión en un solo, plano idéntica que el punto B, pero con esfuerzo de compresión axil no nulo: $N_C = N_{pm.Rd} = A_c \cdot 0,85 \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (\text{sección embebida en hormigón})$ $= A_c \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (\text{sección hueca rellena de hormigón})$ $M_C = M_{pl.Rd}$ <table border="1" style="width: 100%; margin-top: 10px;"> <tr> <td style="width: 10%; text-align: center;">f_{ck}</td> <td>$[1 + \eta_c \frac{t}{d} \frac{f_y}{f_{ck}}]$ para una sección hueca circular rellena.</td> </tr> </table> | f_{ck} | $[1 + \eta_c \frac{t}{d} \frac{f_y}{f_{ck}}]$ para una sección hueca circular rellena. | | | | | | |
| f_{ck} | $[1 + \eta_c \frac{t}{d} \frac{f_y}{f_{ck}}]$ para una sección hueca circular rellena. | | | | | | | | |
| <i>Punto D</i> | Momento resistente máximo $N_D = \frac{1}{2} N_{pm.Rd} = \frac{1}{2} A_c \cdot 0,85 \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (\text{sección embebida de hormigón})$ $= \frac{1}{2} A_c \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (\text{sección hueca rellena de hormigón})$ <table border="1" style="width: 100%; margin-top: 10px;"> <tr> <td style="width: 10%; text-align: center;">f_{ck}</td> <td>$[1 + \eta_c \frac{t}{d} \frac{f_y}{f_{ck}}]$ para una sección hueca circular rellena.</td> </tr> </table> $M_D = W_{pa} \cdot \frac{f_y}{\gamma_a} + W_{ps} \frac{f_s}{\gamma_s} + \frac{1}{2} W_{pc} \cdot 0,85 \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$ <table border="1" style="width: 100%; margin-top: 10px;"> <tr> <td style="width: 10%; text-align: center;">W_{pa}</td> <td>Módulo resistente plástico de la sección de acero.</td> </tr> <tr> <td style="width: 10%; text-align: center;">W_{ps}</td> <td>Módulo resistente plástico de la armadura de refuerzo.</td> </tr> <tr> <td style="width: 10%; text-align: center;">W_{pc}</td> <td>Módulo resistente plástico del hormigón.</td> </tr> </table> | f_{ck} | $[1 + \eta_c \frac{t}{d} \frac{f_y}{f_{ck}}]$ para una sección hueca circular rellena. | W_{pa} | Módulo resistente plástico de la sección de acero. | W_{ps} | Módulo resistente plástico de la armadura de refuerzo. | W_{pc} | Módulo resistente plástico del hormigón. |
| f_{ck} | $[1 + \eta_c \frac{t}{d} \frac{f_y}{f_{ck}}]$ para una sección hueca circular rellena. | | | | | | | | |
| W_{pa} | Módulo resistente plástico de la sección de acero. | | | | | | | | |
| W_{ps} | Módulo resistente plástico de la armadura de refuerzo. | | | | | | | | |
| W_{pc} | Módulo resistente plástico del hormigón. | | | | | | | | |
| <i>Punto E</i> | Situado a mitad de camino entre A y C. El aumento de resistencia en el punto E es poco mayor que aquel proporcionado por interpolación lineal directa entre A y C, y por tanto puede omitirse su cálculo. | | | | | | | | |

| Acero estructural | Hormigón | Armaduras |
|-------------------|------------------|-------------------|
| $\gamma_a = 1,1$ | $\gamma_c = 1,5$ | $\gamma_s = 1,15$ |

Tabla 1 - Coeficientes parciales de seguridad para las resistencias y las propiedades de los materiales en las combinaciones fundamentales.

Es habitual sustituir la versión linealizada AECDB (o la más simple ACDB) por la curva de interacción más exacta, una vez realizado el cálculo para obtener estos puntos.

5.1.3.5. Momentos flectores de segundo orden

Es necesario considerar la influencia local de los efectos de segundo orden sobre una pieza individual, en particular la amplificación de los momentos de primer orden que existe en un pilar debido a la mayor excentricidad con la que actúa el esfuerzo axial.

Estos pueden no obstante ser ignorados en la comprobación de pilares aislados dentro de pórticos rígidos si se cumple que $N_{Ed}/N_{cr} \leq 0,1$ o si $\bar{\lambda} < 0,2 \cdot (2 - r)$ donde r es la relación de los momentos extremos aplicados sobre los extremos del pilar $-1 \leq r \leq +1$.

Donde $r=e_1/e_2$ y $|e_2| \geq |e_1|$

Los efectos de segundo orden sobre el comportamiento de un pilar aislado que forma parte de un pórtico intraslacional pueden tomarse en consideración de forma aproximada, aplicando un factor de amplificación k al momento flector máximo de primer orden M_{Sd} . El factor k viene dado por:

$$M_{Ed} = k \cdot M_2$$

$$k = \frac{\beta}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr}}} \geq 1,0$$

| | |
|------------------------|---|
| $\beta = 0,66 + 0,44r$ | Para un pilar sometido a momentos en sus extremos; |
| $\beta = 1,0$ | Cuando la flexión es debida a carga lateral sobre el pilar. |

NOTA: Cuando tengamos simultáneamente carga axial y momentos en los extremos, β no debería tomarse nunca menor que 1,0 a no ser que se calcule mediante un método más exacto.

Siendo:

- M_{Ed} → momento actuante considerando efectos de segundo orden
- M_2 → momento de primer orden. $|M_2| \geq |M_1|$
- K → factor amplificador de momentos
- N_{Ed} → axial de cálculo actuante
- $N_{cr,eff}$ → carga crítica de Euler

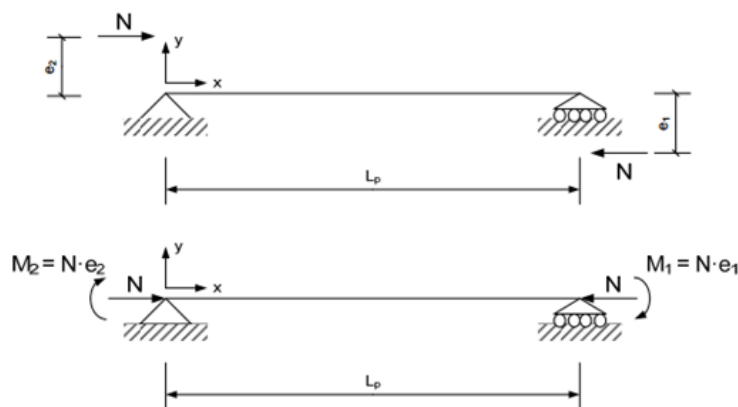


Ilustración 18 Pilar sometido a cargas excéntricas

5.1.3.6. La influencia del esfuerzo cortante

Se permite asumir, por simplicidad, que el esfuerzo cortante transversal de cálculo V_{Ed} lo soporta en su totalidad la sección de acero. Alternativamente es posible distribuirlo entre la sección de acero y el hormigón.

La interacción entre el momento flector y el esfuerzo cortante en la sección de acero puede tenerse en cuenta reduciendo los límites de las tensiones de flexión en las zonas que se encuentran afectadas por esfuerzo cortante significativo. Esta reducción del límite elástico en las zonas con tensiones tangenciales elevadas puede representarse, para un cálculo sencillo, mediante una reducción en el espesor de elemento o elementos de la sección de acero que soporta dichas tensiones tangenciales.

Deberemos de tener en cuenta esta influencia solo si el esfuerzo cortante soportado por la sección de acero supera el 50% de su resistencia plástica a cortante $V_{pl,a,Rd}$ que viene dada por:

$$V_{pl,a,Rd} = A_v \cdot f_{yd} / \sqrt{3}$$

Donde A_v es el área tensionada por cortante de la sección de acero.

5.1.3.7. Resistencia de la pieza sometida a compresión axial y flector en un solo plano

Los principios del método propuesto por el EC4 para el cálculo de la resistencia de una pieza bajo carga axial y momento flector en un plano se demuestra esquemáticamente en la figura, que representa una versión normalizada del diagrama de interacción para la resistencia de las secciones transversales presentado en párrafos anteriores.

Para un axial de compresión de cálculo N_{Ed} la resistencia plástica de la sección $M_{pl,N,Rd}$, se obtiene mediante la curva de interacción.

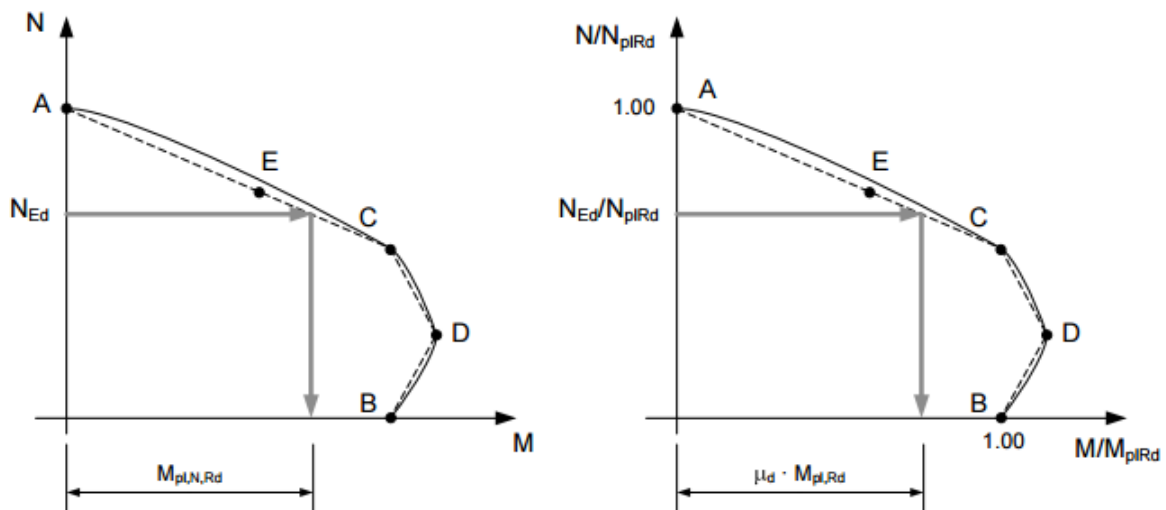


Ilustración 19 Versión normalizada del diagrama de interacción

La reducción del 10%/20% en la resistencia indicada por el factor 0,9 compensa simplificaciones implícitas en el método de cálculo. Por ejemplo, la curva de interacción ha sido establecida sin considerar límites en las deformaciones del hormigón. Por ello, los momentos flectores, incluyendo los efectos de segundo orden, se calculan utilizando la rigidez a flexión eficaz EI_{eff} obtenida teniendo en cuenta el área completa de la sección transversal de hormigón.

De la figura resulta evidente que los valores de μ_d tomados del diagrama de interacción pueden valer como mucho 1,0 en la región del punto D, donde un cierto nivel del axil aumenta la capacidad del momento de la sección.

En la práctica, valores de μ_d por encima de 1,0 no deberían utilizarse a no ser que el momento M_{Ed} sea directamente causado por el esfuerzo axil N_{Ed} , actuando a una excentricidad fija sobre un pilar estáticamente determinado.

5.1.3.8. Resistencia de la pieza sometida a compresión axil y flector en dos planos

Cuando un pilar mixto se somete a compresión axil junto con flexión en dos planos; es preciso, en primer lugar, chequear su resistencia a compresión y flexión uniaxial individualmente para cada plano de flexión. No obstante esto no es suficiente, y es necesario verificar su comportamiento a flexión biaxial.

Cuando se hace esto solo es preciso tener en cuenta las imperfecciones en el plano en el que resulte más probable el fallo (caso a). Para el otro plano de flexión (caso b) se desprecia el efecto de las imperfecciones.

Esto puede ser representado mediante dos condiciones simultáneas:

$$\frac{M_{y,Ed}}{\mu_{dy} \cdot M_{pl,y,Rd}} \leq \alpha_{My}$$

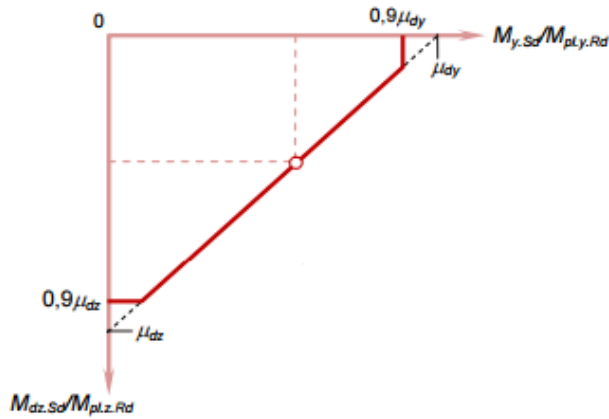
$$\frac{M_{z,Ed}}{\mu_{dz} \cdot M_{pl,z,Rd}} \leq \alpha_{Mz}$$

Si hay alguna duda respecto del plano más probable de fallo, se recomienda al diseñador considerar los efectos de las imperfecciones en ambos planos.

Para tener en cuenta los picos de tensiones provocadas por momentos entre los límites dados por las desigualdades, actuando respecto dos ejes ortogonales, deberá satisfacerse también una fórmula de interacción lineal entre los dos momentos de cálculo. Los momentos de cálculo son de nuevo calculados incluyendo ambas imperfecciones y la amplificación debida a los efectos "P- δ " de segundo orden.

$$\frac{M_{y,Ed}}{\mu_{dy} \cdot M_{pl,y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{\mu_{dz} \cdot M_{pl,z,Rd}} \leq 1,0$$

Estas tres condiciones juntas definen el lugar geométrico de resistencia última en términos de los momentos de cálculo ortogonales para el valor del esfuerzo de compresión axial de cálculo N_{Ed} .



Lugar geométrico de resistencia a flexión biaxial en una sección de un pilar bajo axil N_{Ed} .

Ilustración 20 Resistencia de la sección sometida a compresión y flexión en 2 planos

6. Programa experimental

6.1. Introducción

En este capítulo se describe el programa experimental previsto para investigar el comportamiento de pilares mixtos a base de perfiles tubulares de acero, de sección cuadrada y rectangular, rellenos de hormigón de alta resistencia y resistencia convencional, sometidos a carga axial monótona y excéntrica que provoca simple y doble curvatura, sobre elementos no esbeltos para estudiar así su comportamiento seccional.

6.2. Diseño del experimento

La respuesta de los pilares mixtos, tubulares rellenos de hormigón, está relacionada con los materiales empleados (propiedades mecánicas del acero y del hormigón), geometría de la sección y del elemento y aplicación de la carga.

En concreto se han seleccionado para este programa experimental las variables siguientes:

- Ratio dimensión máxima – espesor del tubo de acero, $\frac{\max(b,h)}{t}$, para evitar pandeo local
- Longitud del elemento
- Resistencia del hormigón, en probeta cilíndrica, f_{ck}
- La excentricidad de la carga axial, e

La quinta variable de diseño hubiera sido la resistencia del acero. El acero estructural de alta resistencia es una opción menos económica y menos común en el mercado, para evitar problemas de suministro y ver reducidas las posibilidades de perfiles tubulares comerciales (diferentes dimensiones de la sección), así como un aumento significativo del coste del proyecto, se decide que el acero no sea una variable más del estudio y se adopta el acero comercial de grado S275 J0H. El límite elástico de la chapa con la que está fabricado el perfil se garantiza que tenga un mínimo de 275 MPa.

Los parámetros de los ensayos experimentales a realizar se indican a continuación. Estos se han seleccionado en base a los decididos por los estudios experimentales realizados por diversos autores para caracterizar el comportamiento de los CFTs.

6.2.1. $\text{Max}(b,h)/t$

En general este parámetro es importante en el comportamiento seccional de las columnas cortas, ya que de él depende el fallo por inestabilidad local de las paredes del perfil tubular.

La selección se realiza de manera que haya tanto perfiles que cumplan como que no cumplan con la limitación propuesta en el EC4 del parámetro $\text{Max}(b,h)/t$ (para el pandeo local). De este modo se comprobará el grado de restrictiva que es la norma para el pandeo local.

Además la selección del rango de esta variable también está limitada por los catálogos de perfiles tubulares que ofrece la multinacional Arcelor Mittal.

Se comprueban las restricciones aconsejadas en el EC4 ya explicadas anteriormente donde se verá el incumplimiento de alguno de los perfiles.

- Secciones huecas circulares:

$$\frac{Diametro}{t} \leq 90 \cdot \varepsilon^2$$

- Secciones huecas rectangulares:

$$\frac{d}{t} \leq 52 \cdot \varepsilon \quad \text{Siendo } d = \text{Max}(b,h)$$

El resultado en nuestros pilares el siguiente:

Rectangulares:

| Nombre | b | h | t | Fy | d/T | 52*ε | CUMPLE |
|-----------|-----|-----|---|-----|-------------|-------------|--------|
| 125.125.3 | 125 | 125 | 3 | 275 | 41,66666667 | 48,06964644 | SI |
| 125.125.4 | 125 | 125 | 4 | 275 | 31,25 | 48,06964644 | SI |
| 100.100.4 | 100 | 100 | 4 | 355 | 25 | 42,3080587 | SI |
| 150.100.4 | 150 | 100 | 4 | 275 | 37,5 | 48,06964644 | SI |
| 100.150.4 | 100 | 150 | 4 | 275 | 37,5 | 48,06964644 | SI |
| 150.100.5 | 150 | 100 | 5 | 275 | 30 | 48,06964644 | SI |
| 100.150.5 | 100 | 150 | 5 | 275 | 30 | 48,06964644 | SI |
| 200.120.3 | 200 | 120 | 3 | 275 | 66,66666667 | 48,06964644 | NO |
| 120.200.3 | 120 | 200 | 3 | 275 | 66,66666667 | 48,06964644 | NO |

Circulares:

| Nombre | D | t | Fy | D/t | 90*ε^2 | CUMPLE |
|-----------|-------|-----|-----|-------------|-------------|--------|
| 168,3.2,8 | 168,3 | 2,8 | 275 | 60,1071429 | 76,90909091 | SI |
| 159,0.3,0 | 159 | 3 | 275 | 53 | 76,90909091 | SI |
| 101,6.2 | 101,6 | 2 | 275 | 50,8 | 76,90909091 | SI |
| 108.2 | 108 | 2 | 355 | 54 | 59,57746479 | SI |
| 120.2,5 | 120 | 2,5 | 275 | 48 | 76,90909091 | SI |
| 100.3 | 100 | 3 | 275 | 33,33333333 | 76,90909091 | SI |
| 101,6.5 | 101,6 | 5 | 275 | 20,32 | 76,90909091 | SI |

Elípticos:

Para el caso especial del perfil ovalado se ha calculado como un rectángulo, despreciando los círculos en los extremos ya que la distancia entre círculos es bastante superior al diámetro de éstos.

| Nombre | b | h | t | Fy | d/T | 52*ε | CUMPLE |
|----------|-----|----|---|-----|-----|-------------|--------|
| 120.50.2 | 120 | 50 | 2 | 275 | 60 | 48,06964644 | NO |

6.2.2. Longitud del pilar

La longitud del pilar se ha tomado de forma que sea posible ensayar el espécimen en la Universitat Jaume I de Castellón. Por otro lado se debe trabajar dentro del rango de comportamiento de columna lo suficientemente no esbelta para que no afecten al ensayo efectos de segundo orden. De esta manera se estudia el comportamiento seccional obteniendo el diagrama de interacción seccional. Por este motivo se han tomado la longitud de 300 mm.

6.2.3. Resistencia del hormigón, en probeta cilíndrica, fck

Se han tomado los siguientes valores de resistencia para el hormigón:

- 30 Mpa
- 90 Mpa

De esta manera se podrá observar el cambio de uso de hormigón de alta resistencia respecto al de resistencia convencional.

Tras la campaña experimental se obtiene las resistencias del hormigón en probeta cilíndrica mostradas en el anexo correspondiente.

Podemos comprobar pues que los hormigones obtenidos tienen una resistencia similar a la necesaria para los ensayos.

6.2.4. Excentricidades y Relación de excentricidades r

Se han seleccionado, por lo general, las siguientes excentricidades con relación de excentricidades en los extremos siempre igual a 1:

Excentricidad e (mm)

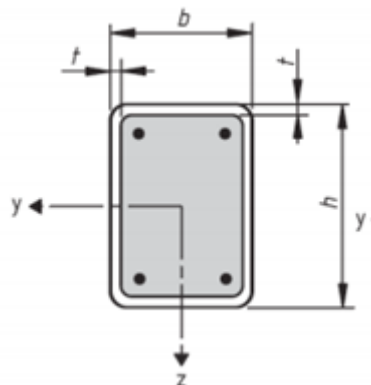
0
5
10
20
25
50

Cada uno de los ensayos se le ha identificado con un nombre con la siguiente estructura:

Para rectangulares y cuadrados:

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

- R-S indica que se trata de una columna de sección Rectangular o cuadrada (S)
- a indica la dimensión b del perfil en mm
- b indica la altura h del perfil en mm
- c indica el espesor t del perfil en mm
- d indica la longitud de la columna en m
- ee indica la resistencia del hormigón en MPa (“agua” en caso de rellenarse con ésta)
- fff indica el límite elástico nominal del acero en MPa
- gg indica la excentricidad en mm
- h indica el número de espécimen bajo estas condiciones, por si hay repetición del ensayo.
- i_j indica del tubo que se ha confeccionado dicho pilar
amarillo lo he cambiado



Para circulares:

C/a.bc_d_ee.fff_gg.(h) (i_j)

- C indica que se trata de una columna de sección circular
- a indica el radio externo R del perfil en mm
- bc indica el espesor t del perfil en mm
- d indica la longitud de la columna en m
- ee indica la resistencia del hormigón en MPa
- fff indica el límite elástico nominal del acero en MPa
- gg indica la excentricidad en mm
- h indica el número de espécimen bajo estas condiciones, por si hay repetición del ensayo.
- i_j indica del tubo que se ha confeccionado dicho pilar
amarillo lo he cambiado

Para ovalados:

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

- E indica que se trata de una columna de sección elíptica
- a indica la longitud entre círculos del perfil elíptico en mm
- b indica el diámetro de los círculos del perfil elíptico en mm
- c indica el espesor t del perfil en mm
- d indica la longitud de la columna en m
- ee indica la resistencia del hormigón en MPa
- fff indica el límite elástico nominal del acero en MPa
- gg indica la excentricidad en mm
- h indica el número de espécimen bajo estas condiciones, por si hay repetición del ensayo.
- i_j indica del tubo que se ha confeccionado dicho pilar

6.3. Resumen/Historial de ensayos

4.3.1 Ensayos con perfiles rectangulares y cuadrados:

| Prepared | Tested | Name | Tube | B (mm) | H (mm) | t (mm) |
|------------|------------|-----------------------------------|------|--------|--------|--------|
| 12-abr | 30/06/2016 | S125.125.3_300_275.30_00 (119) | 119 | 125 | 125 | 3 |
| 12-abr | 14/07/2016 | S125.125.3_300_275.30_05 (119) | 119 | 125 | 125 | 3 |
| 12-abr | 14/07/2016 | S125.125.3_300_275.30_10 (119) | 119 | 125 | 125 | 3 |
| 12-abr | 18/07/2016 | S125.125.3_300_275.30_20 (119) | 119 | 125 | 125 | 3 |
| 12-abr | 20/07/2016 | S125.125.3_300_275.30_50 (119) | 119 | 125 | 125 | 3 |
| 12-abr | | S125.125.4_300_275.30_00 (121) | 121 | 125 | 125 | 4 |
| 12-abr | 14/07/2016 | S125.125.4_300_275.30_05 (120) | 120 | 125 | 125 | 4 |
| 12-abr | 14/07/2016 | S125.125.4_300_275.30_10 (120) | 120 | 125 | 125 | 4 |
| 12-abr | 18/07/2016 | S125.125.4_300_275.30_20 (120) | 120 | 125 | 125 | 4 |
| 12-abr | 21/07/2016 | S125.125.4_300_275.30_25 (120) | 120 | 125 | 125 | 4 |
| 12-abr | 20/07/2016 | S125.125.4_300_275.30_50 (120) | 120 | 125 | 125 | 4 |
| 08/03/2016 | 16/06/2016 | S100.100.4_300_275.30_00 (7) | 7 | 100 | 100 | 4 |
| 08/03/2016 | 06/07/2016 | S100.100.4_300_275.30_05 (12) | 12 | 100 | 100 | 4 |
| 08/03/2016 | 07/07/2016 | S100.100.4_300_275.30_10 (4) | 4 | 100 | 100 | 4 |
| 08/03/2016 | 14/07/2016 | S100.100.4_300_275.30_20 (1) | 1 | 100 | 100 | 4 |
| 08/03/2016 | 20/07/2016 | S100.100.4_300_275.30_25 (6) | 6 | 100 | 100 | 4 |
| 08/03/2016 | 20/07/2016 | S100.100.4_300_275.30_50 (12) | 12 | 100 | 100 | 4 |
| 14/04/2016 | 22/06/2016 | S100.100.4_300_275.30_00 (13) | 13 | 100 | 100 | 4 |
| 14/04/2016 | 06/07/2016 | S100.100.4_300_275.30_05 (16) | 16 | 100 | 100 | 4 |
| 14/04/2016 | 07/07/2016 | S100.100.4_300_275.30_10 (16) | 16 | 100 | 100 | 4 |
| 14/04/2016 | 14/07/2016 | S100.100.4_300_275.30_20 (16) | 16 | 100 | 100 | 4 |
| 14/04/2016 | 20/07/2016 | S100.100.4_300_275.30_25 (16) | 16 | 100 | 100 | 4 |
| 14/04/2016 | | S100.100.4_300_275.30_50 (16) | 16 | 100 | 100 | 4 |
| 17/05/2016 | | S100.100.4_300_275.90_00 (13) | 13 | 100 | 100 | 4 |
| 17/05/2016 | 07/07/2016 | S100.100.4_300_275.90_05 (5) | 5 | 100 | 100 | 4 |
| 17/05/2016 | 07/07/2016 | S100.100.4_300_275.90_10 (4) | 4 | 100 | 100 | 4 |
| 17/05/2016 | 14/07/2016 | S100.100.4_300_275.90_20 (8) | 8 | 100 | 100 | 4 |
| 17/05/2016 | 20/07/2016 | S100.100.4_300_275.90_25 (6) | 6 | 100 | 100 | 4 |
| 17/05/2016 | 19/07/2016 | S100.100.4_300_275.90_50 (2) | 2 | 100 | 100 | 4 |

| Prepared | Tested | Name | Tube | B (mm) | H (mm) | t (mm) |
|------------|------------|---------------------------------|------|--------|--------|--------|
| 20/04/2016 | 22/06/2016 | R150.100.4_300_275.30_00 (38) d | 38 | 150 | 100 | 4 |
| 20/04/2016 | 12/07/2016 | R150.100.4_300_275.30_05 (39) d | 39 | 150 | 100 | 4 |
| 20/04/2016 | 12/07/2016 | R150.100.4_300_275.30_10 (39) d | 39 | 150 | 100 | 4 |
| 20/04/2016 | 14/07/2016 | R150.100.4_300_275.30_20 (39) d | 39 | 150 | 100 | 4 |
| 20/04/2016 | | R150.100.4_300_275.30_25 (39) d | 39 | 150 | 100 | 4 |
| 20/04/2016 | 20/07/2016 | R150.100.4_300_275.30_50 (38) d | 38 | 150 | 100 | 4 |
| 05/05/2016 | | R150.100.4_300_275.90_00 (38) d | 38 | 150 | 100 | 4 |
| 05/05/2016 | 12/07/2016 | R150.100.4_300_275.90_05(20) d | 20 | 150 | 100 | 4 |
| 05/05/2016 | 12/07/2016 | R150.100.4_300_275.90_10 (23) d | 23 | 150 | 100 | 4 |
| 05/05/2016 | 14/07/2016 | R150.100.4_300_275.90_20 (19) d | 19 | 150 | 100 | 4 |
| 05/05/2016 | 20/07/2016 | R150.100.4_300_275.90_25 (24) d | 24 | 150 | 100 | 4 |
| 05/05/2016 | 20/07/2016 | R150.100.4_300_275.90_50 (18) d | 18 | 150 | 100 | 4 |
| 21/04/2016 | 12/07/2016 | R150.100.4_300_275.30_05 (93) f | 93 | 100 | 150 | 4 |
| 21/04/2016 | 13/07/2016 | R150.100.4_300_275.30_10 (93) f | 93 | 100 | 150 | 4 |
| 21/04/2016 | 18/07/2016 | R150.100.4_300_275.30_20 (93) f | 93 | 100 | 150 | 4 |
| 21/04/2016 | 21/07/2016 | R150.100.4_300_275.30_25 (93) f | 93 | 100 | 150 | 4 |
| 21/04/2016 | 21/07/2016 | R150.100.4_300_275.30_50 (93) f | 93 | 100 | 150 | 4 |
| 05/05/2016 | 12/07/2016 | R150.100.4_300_275.90_05 (22) f | 22 | 100 | 150 | 4 |
| 05/05/2016 | 13/07/2016 | R150.100.4_300_275.90_10 (40) f | 40 | 100 | 150 | 4 |
| 05/05/2016 | 18/07/2016 | R150.100.4_300_275.90_20 (41) f | 41 | 100 | 150 | 4 |
| 05/05/2016 | 21/07/2016 | R150.100.4_300_275.90_25 (17) f | 17 | 100 | 150 | 4 |
| 07/04/2016 | 22/06/2016 | R150.100.5_300_275.30_00 (33)d | 33 | 150 | 100 | 5 |
| 07/04/2016 | 12/07/2016 | R150.100.5_300_275.30_05 (33)d | 33 | 150 | 100 | 5 |
| 07/04/2016 | 12/07/2016 | R150.100.5_300_275.30_10 (37)d | 37 | 150 | 100 | 5 |
| 07/04/2016 | 14/07/2016 | R150.100.5_300_275.30_20 (37)d | 37 | 150 | 100 | 5 |
| 07/04/2016 | 20/07/2016 | R150.100.5_300_275.30_25 (36)d | 36 | 150 | 100 | 5 |
| 07/04/2016 | 20/07/2016 | R150.100.5_300_275.30_50 (36)d | 36 | 150 | 100 | 5 |
| 05/05/2016 | | R150.100.5_300_275.90_00 (33)d | 33 | 150 | 100 | 5 |
| 05/05/2016 | 12/07/2016 | R150.100.5_300_275.90_05 (28)d | 28 | 150 | 100 | 5 |
| 05/05/2016 | 12/07/2016 | R150.100.5_300_275.90_10 (31)d | 31 | 150 | 100 | 5 |
| 05/05/2016 | 14/07/2016 | R150.100.5_300_275.90_20 (105)d | 105 | 150 | 100 | 5 |
| 05/05/2016 | 20/07/2016 | R150.100.5_300_275.90_25 (27)d | 27 | 150 | 100 | 5 |
| 05/05/2016 | 20/07/2016 | R150.100.5_300_275.90_50 (32)d | 32 | 150 | 100 | 5 |
| 07/04/2016 | 13/07/2016 | R150.100.5_300_275.30_05 (34)f | 34 | 100 | 150 | 5 |
| 07/04/2016 | 13/07/2016 | R150.100.5_300_275.30_10 (34)f | 34 | 100 | 150 | 5 |
| 07/04/2016 | 18/07/2016 | R150.100.5_300_275.30_20 (34)f | 34 | 100 | 150 | 5 |
| 07/04/2016 | 21/07/2016 | R150.100.5_300_275.30_25 (34)f | 34 | 100 | 150 | 5 |
| 07/04/2016 | 21/07/2016 | R150.100.5_300_275.30_50 (34)f | 34 | 100 | 150 | 5 |
| 05/05/2016 | 13/07/2016 | R150.100.5_300_275.90_05 (26)f | 26 | 100 | 150 | 5 |
| 05/05/2016 | 13/07/2016 | R150.100.5_300_275.90_10 (35)f | 35 | 100 | 150 | 5 |
| 05/05/2016 | 18/07/2016 | R150.100.5_300_275.90_20 (29)f | 29 | 100 | 150 | 5 |
| 05/05/2016 | 21/07/2016 | R150.100.5_300_275.90_25 (30)f | 30 | 100 | 150 | 5 |
| 05/05/2016 | 21/07/2016 | R150.100.5_300_275.90_50 (25)f | 25 | 100 | 150 | 5 |

ANÁLISIS NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DE DIFERENTES SOLUCIONES ESTRUCTURALES A BASE DE PILARES
MIXTOS TIPO CONCRETE-FILLED STEEL TUBE

| Prepared | Tested | Name | Tube | B (mm) | H (mm) | t (mm) |
|------------|------------|--------------------------------|------|--------|--------|--------|
| 14/04/2016 | | R200.120.3_300_275.30_00 (86)d | 86 | 200 | 120 | 3 |
| 15/05/2016 | | R200.120.3_300_275.90_00 (86)d | 86 | 200 | 120 | 3 |
| 17/05/2016 | 18/07/2016 | R200.120.3_300_275.90_05 (86)d | 86 | 200 | 120 | 3 |
| 17/05/2016 | 18/07/2016 | R200.120.3_300_275.90_10 (86)d | 86 | 200 | 120 | 3 |
| 17/05/2016 | 18/07/2016 | R200.120.3_300_275.90_20 (86)d | 86 | 200 | 120 | 3 |
| 17/05/2016 | 18/07/2016 | R200.120.3_300_275.90_25 (86)d | 86 | 200 | 120 | 3 |
| 15/05/2016 | 20/07/2016 | R200.120.3_300_275.90_50 (86)d | 86 | 200 | 120 | 3 |
| 15/05/2016 | 21/07/2016 | R200.120.3_300_275.90_10 (86)f | 86 | 120 | 200 | 3 |
| 15/05/2016 | 21/07/2016 | R200.120.3_300_275.90_50 (86)f | 86 | 120 | 200 | 3 |

4.3.2 Ensayos con perfiles circulares:

| Prepared | Tested | Name | Tube | D (mm) | t (mm) |
|------------|------------|-------------------------------|------|--------|--------|
| 27/04/2016 | 30/06/2016 | C168.3,2.8_300_275.30_00 (70) | 70 | 168,30 | 2,80 |
| 27/04/2016 | 25/07/2016 | C168.3,2.8_300_275.30_05 (70) | 70 | 168,30 | 2,80 |
| 27/04/2016 | 02/08/2016 | C168.3,2.8_300_275.30_10 (70) | 70 | 168,30 | 2,80 |
| 27/04/2016 | 02/08/2016 | C168.3,2.8_300_275.30_20 (70) | 70 | 168,30 | 2,80 |
| 27/04/2016 | 02/08/2016 | C168.3,2.8_300_275.30_25 (70) | 70 | 168,30 | 2,80 |
| 27/04/2016 | 28/07/2016 | C168.3,2.8_300_275.30_50 (70) | 70 | 168,30 | 2,80 |
| 28/04/2016 | 30/06/2016 | C168.3,2.8_300_275.90_00 (70) | 70 | 168,30 | 2,80 |
| 28/04/2016 | 25/07/2016 | C168.3,2.8_300_275.90_05 (70) | 70 | 168,30 | 2,80 |
| 28/04/2016 | 02/08/2016 | C168.3,2.8_300_275.90_10 (70) | 70 | 168,30 | 2,80 |
| 28/04/2016 | 02/08/2016 | C168.3,2.8_300_275.90_20 (70) | 70 | 168,30 | 2,80 |
| 28/04/2016 | 02/08/2016 | C168.3,2.8_300_275.90_25 (70) | 70 | 168,30 | 2,80 |
| 28/04/2016 | 29/07/2016 | C168.3,2.8_300_275.90_50 (70) | 70 | 168,30 | 2,80 |
| 21/06/2016 | 25/07/2016 | C159,3_300_275.30_00 (71) | 71 | 159,00 | 3,00 |
| 21/06/2016 | 02/08/2016 | C159,3_300_275.30_05 (72) | 72 | 159,00 | 3,00 |
| 21/06/2016 | 02/08/2016 | C159,3_300_275.30_10 (73) | 73 | 159,00 | 3,00 |
| 21/06/2016 | 29/07/2016 | C159,3_300_275.30_20 (74) | 74 | 159,00 | 3,00 |
| 21/06/2016 | 29/07/2016 | C159,3_300_275.30_25 (75) | 75 | 159,00 | 3,00 |
| 21/06/2016 | 29/07/2016 | C159,3_300_275.30_50 (76) | 76 | 159,00 | 3,00 |
| 14/06/2016 | 25/07/2016 | C159,3_300_275.90_00 (71) | 71 | 159,00 | 3,00 |
| 14/06/2016 | 02/08/2016 | C159,3_300_275.90_05 (72) | 72 | 159,00 | 3,00 |
| 14/06/2016 | 02/08/2016 | C159,3_300_275.90_10 (73) | 73 | 159,00 | 3,00 |
| 14/06/2016 | 29/07/2016 | C159,3_300_275.90_20 (74) | 74 | 159,00 | 3,00 |
| 14/06/2016 | 29/07/2016 | C159,3_300_275.90_25 (75) | 75 | 159,00 | 3,00 |
| 14/06/2016 | 29/07/2016 | C159,3_300_275.90_50 (76) | 76 | 159,00 | 3,00 |
| 05/04/2016 | 28/06/2016 | C101.6,2.0_300_275_30_00 (81) | 81 | 101,60 | 2,00 |
| 05/04/2016 | 28/07/2016 | C101.6,2.0_300_275_30_05 (81) | 81 | 101,60 | 2,00 |
| 05/04/2016 | 28/07/2016 | C101.6,2.0_300_275_30_10 (81) | 81 | 101,60 | 2,00 |
| 05/04/2016 | 28/07/2016 | C101.6,2.0_300_275_30_20 (81) | 81 | 101,60 | 2,00 |
| 05/04/2016 | 28/07/2016 | C101.6,2.0_300_275_30_25 (81) | 81 | 101,60 | 2,00 |
| 05/04/2016 | 28/07/2016 | C101.6,2.0_300_275_30_50 (81) | 81 | 101,60 | 2,00 |
| 21/06/2016 | 03/08/2016 | C108,2_300_355.30_00 (58) | 58 | 108,00 | 2,00 |
| 21/06/2016 | 03/08/2016 | C108,2_300_355.30_05 (67) | 67 | 108,00 | 2,00 |
| 21/06/2016 | 03/08/2016 | C108,2_300_355.30_10 (53) | 53 | 108,00 | 2,00 |
| 21/06/2016 | 03/08/2016 | C108,2_300_355.30_20 (62) | 62 | 108,00 | 2,00 |
| 21/06/2016 | 03/08/2016 | C108,2_300_355.30_25 (63) | 63 | 108,00 | 2,00 |
| 21/06/2016 | 03/08/2016 | C108,2_300_355.30_50 (61) | 61 | 108,00 | 2,00 |
| 21/06/2016 | 02/08/2016 | C120.2,5_300_275.30_00 (83) | 83 | 120,00 | 2,50 |
| 21/06/2016 | 02/08/2016 | C120.2,5_300_275.30_05 (83) | 83 | 120,00 | 2,50 |
| 21/06/2016 | 02/08/2016 | C120.2,5_300_275.30_10 (83) | 83 | 120,00 | 2,50 |
| 21/06/2016 | 02/08/2016 | C120.2,5_300_275.30_20 (83) | 83 | 120,00 | 2,50 |
| 21/06/2016 | 02/08/2016 | C120.2,5_300_275.30_25 (83) | 83 | 120,00 | 2,50 |
| 21/06/2016 | 02/08/2016 | C120.2,5_300_275.30_50 (83) | 83 | 120,00 | 2,50 |

| Prepared | Tested | Name | Tube | D (mm) | t (mm) |
|------------|------------|------------------------------|------|--------|--------|
| 21/06/2016 | 26/07/2016 | C100.3_300_275.30_00 (133) | 133 | 100,00 | 3,00 |
| 21/06/2016 | 28/07/2016 | C100.3_300_275.30_05 (127) | 127 | 100,00 | 3,00 |
| 21/06/2016 | 28/07/2016 | C100.3_300_275.30_20 (127) | 127 | 100,00 | 3,00 |
| 21/06/2016 | 28/07/2016 | C100.3_300_275.30_50 (131) | 131 | 100,00 | 3,00 |
| 21/06/2016 | 28/07/2016 | C101,6.5_300_275.30_00 (132) | 132 | 101,60 | 5,00 |
| 21/06/2016 | 28/07/2016 | C101,6.5_300_275.30_10 (130) | 130 | 101,60 | 5,00 |
| 21/06/2016 | 28/07/2016 | C101,6.5_300_275.30_50 (130) | 130 | 101,60 | 5,00 |
| 21/06/2016 | 25/07/2016 | C160.6_300_275.30_00 (129) | 129 | 160,00 | 6,00 |
| 21/06/2016 | 28/07/2016 | C101,6.3_300_275.30_00 (128) | 128 | 101,60 | 3,00 |

4.3.3 Ensayos con perfiles ovalados:

| Prepared | Tested | Name | Tube | B (mm) | H (mm) | t (mm) |
|------------|------------|----------------------------------|------|--------|--------|--------|
| 05/04/2016 | 03/08/2016 | ov. 120.50.2_300_275.30_00 (126) | 126 | 120 | 50 | 2 |
| 05/04/2016 | 03/08/2016 | ov. 120.50.2_300_275.30_20 (126) | 126 | 120 | 50 | 2 |
| 05/04/2016 | 03/08/2016 | ov. 120.50.2_300_275.30_50 (126) | 126 | 120 | 50 | 2 |
| 19/05/2016 | 03/08/2016 | ov. 120.50.2_300_275.90_00 (126) | 126 | 120 | 50 | 2 |
| 19/05/2016 | 03/08/2016 | ov. 120.50.2_300_275.90_05 (126) | 126 | 120 | 50 | 2 |
| 19/05/2016 | 03/08/2016 | ov. 120.50.2_300_275.90_10 (126) | 126 | 120 | 50 | 2 |
| 19/05/2016 | 03/08/2016 | ov. 120.50.2_300_275.90_20 (126) | 126 | 120 | 50 | 2 |
| 19/05/2016 | 03/08/2016 | ov. 120.50.2_300_275.90_25 (126) | 126 | 120 | 50 | 2 |
| 19/05/2016 | 03/08/2016 | ov. 120.50.2_300_275.90_50 (126) | 126 | 120 | 50 | 2 |

6.4. Especímenes de ensayo

6.4.1. Hormigón

La construcción y el ensayo de los especímenes de la campaña experimental se llevaron a cabo en el Laboratorio de Estructuras de la Universitat Jaume I de Castellón. La mezcla del hormigón se realizó in situ para lo que se emplearon las dosificaciones de la tabla

| fck objetivo (MPa) | Cantidad (m3) | Cemento (kg) | Arena (kg) | Grava (Kg) | Agua (Its) | Humo de Sílice (Kg) | Fluidificante (Kg) |
|--------------------|---------------|--------------|------------|------------|------------|---------------------|--------------------|
| 90 | 1 | 570 | 705 | 890 | 180 | 50 | 12,3 |
| 30 | 1 | 307 | 1119 | 666 | 220 | | |

El control de las propiedades del hormigón se realizó mediante la toma de probetas cilíndricas de 150 mm x 300 mm. Así mismo se efectuaron probetas para ver la evolución del hormigón efectuando ensayos a 3, 7 y 14 días utilizando probetas prismáticas de 100 mm x 100 mm y 150 mm x 150 mm de lado.

Tres probetas cilíndricas se rellenan por amasada de hormigón empleando un vibrador de aguja para permitir la liberación de aire ocluido. Se puso mucha atención en el acabado de las mismas: la cara superior de la probeta se enrasó perfectamente, nivelándola y dejándola perpendicular a la superficie inferior.

Para conseguir esto, se fabricó una base que se podía nivelar. Este acabado permite el mejor refrentado y resolvió ciertos problemas a la hora de ensayar, como puede ser la rotura inadecuada de la probeta por la falta de planitud o el exceso de mortero de azufre en algunas zonas.

El curado del hormigón para evitar la pérdida de humedad durante el proceso de fraguado y endurecimiento del hormigón de las probetas se realizó de la siguiente manera:

1. Cubrir las probetas con un plástico hasta que se puedan extraer del molde al día siguiente.
2. Conservación de forma normalizada inmersas en un tanque con agua satura de cal hasta el día del ensayo de la columna.



Ilustración 21 Plástico utilizado para cubrir las probetas para que no pierdan humedad

El refrentado de las probetas se ha realizado mediante la técnica del mortero de azufre con una capa de 3 mm de espesor. Se ha seleccionado esta técnica por las conclusiones extraídas de la tesis de Garavito. Estudió diferentes técnicas de ensayo de probetas de hormigón de alta resistencia y resistencia convencional determinando la idoneidad esta técnica frente a otros métodos como el pulido o rectificado, mortero de azufre de alta resistencia y pasta de cemento aluminoso.

6.4.2. Acero

Los tubos de acero estructural son del grado S275 J0H. Estos tubos son fabricados a partir de chapa laminada en caliente de grado S275 y posteriormente conformados en frío para dar la forma al tubo. El proceso finaliza con una soldadura eléctrica longitudinal.

El proceso de conformado en frío produce un estiramiento en el material por la deformación creada que aumenta las propiedades mecánicas del mismo, límite elástico y módulo de elasticidad, a costa de disminuir su capacidad de alargamiento. A su vez, la soldadura introduce tensiones residuales en sus inmediaciones.

Como se ha explicado en el capítulo 1, algunas normas de diseño de perfiles metálicos conformados en frío, contemplan la posibilidad de modificar el límite elástico del material por el efecto del proceso de fabricación. Página | 87 Para esta campaña experimental se ha decidido realizar los siguientes ensayos para caracterizar el material:

- a. Ensayos globales del acero. Para ello se preparan unas rebanadas de 50 mm del tubo estructural y se ensayan a compresión simple, obteniendo la curva tensión-deformación, σ - ϵ , del material del tubo empleado en los pilares mixtos.
- b. Ensayo a tracción del acero. Para la caracterización del material empleado en perfiles tubulares de acero, la norma UNE ISO 377 [4] indica como extraer las probetas testigo, indicando que estas estén lo más alejadas posibles de efectos que hayan modificado sus propiedades: dobleces, soldaduras. En este caso se ha decidido filetear la sección de acero para obtener probetas de todas sus caras y así poder determinar con exactitud el efecto del conformado en frío y la soldadura.

6.4.3. Fabricación

La construcción de los especímenes se realiza en el laboratorio de Estructuras y Construcción de la Universitat Jaume I de Castellón a partir de tubos de 6 metros comprados.

Los tubos de 6 m se cortan para configurar la campaña experimental explicada con anterioridad, es decir, se cortan de manera que se obtengan los perfiles deseados de 300 mm para esta campaña teniendo en cuenta campañas posteriores donde se ensayaran perfiles de 2 y 3 m. Una vez cortados se codifican los tubos nombrando en éste el número de tubo, y resistencia del hormigón que se le introducirá. Finalmente se colocan en el almacén del taller de la UJI quedando ya separados los pilares de 3 m, 2 m y 300mm correctamente nombrados.

Se debe tener la precaución de conservar 250 mm para realizar probetas normalizadas para el ensayo a tracción del acero y alguna pieza de 50 mm para realizar ensayos de compresión para caracterizar el acero de toda la sección.

Los cortes se realizan con una tronadora que cuenta con lubricación para evitar el calentamiento excesivo de la zona cortada y que las propiedades del acero se vean modificadas por el aumento de temperatura. Así mismo se nivela tanto la maquinaria de corte como el elemento para conseguir que la sección cortada sea lo más perpendicular posible, para así facilitar la elaboración del futuro pilar a ensayar y evitar la inclusión de defectos e imperfecciones.



Ilustración 22 Corte de los perfiles de acero a la longitud de 300 mm

Una vez obtenidos los perfiles de acero se colocaban en la base construida que es capaz de nivelarse. Se colocaban junto a las 3 probetas cilíndricas para el ensayo de hormigón. Se realizaba la amasada de hormigón con la dosificación citada anteriormente calculada para el volumen de todos los perfiles y las 3 probetas.



Ilustración 23 Dosificación preparada para la fabricación del hormigón

Tras la producción del hormigón se vertía éste tanto en los perfiles de acero como en las probetas. De igual manera, se vibra el hormigón en sendos lados con el vibrador de aguja para permitir la liberación de aire ocluido. Una vez rellenos los perfiles de 30 cm de largo y las probetas se coloca un plástico en la cara superior que queda expuesta al aire para evitar pérdida de humedad. Al día siguiente se colocan los perfiles en una estantería habilitada para estos, se desmoldan las probetas y se introducen estas últimas en la cámara climática del taller de arquitectura para su curado.

En todas las actividades (desmolde, realización de hormigón, ensayos realizados posteriormente, etc...) se mantiene limpio el espacio de trabajo, respetando además las normas de seguridad del taller y llevando las medidas de seguridad aconsejadas.



Ilustración 24 Zona de trabajo 1, Fabricación de hormigón y almacenaje de pilares a ensayar

6.5. Descripción de ensayos

6.5.1. Apoyos

Para poder realizar el ensayo de columnas bajo carga axial de compresión excéntrica ha sido necesario diseñar y construir unos apoyos específicos que permitan un rango de variación de excentricidades modulable de forma precisa para que los resultados sean fiables. Además, los apoyos deben ser capaces de distribuir la carga homogéneamente a toda la sección.

El apoyo junto al pistón (Apoyo A) está formado por:

- un carro que permite el movimiento longitudinal de todo el apoyo;
- un punzón para aplicar la carga;
- una hembra donde es aplicada la carga del punzón y así repartirla en toda la sección del pilar, además aquí apoya una de las bases del pilar;
- un portapunzón (o cabeza de punzón) donde va colocado el punzón;

El apoyo encontrado en el extremo contrario (Apoyo B) está formado por:

- una hembra (o cabeza de punzón) donde apoya la otra base del pilar;

Además en este extremo del pórtico se ha tenido que diseñar un sistema para adaptar el pórtico a la longitud de los pilares de 300 mm. Esto es debido a que el sistema utilizado para ajustar el pórtico a diferentes longitudes de pilar es un carro móvil y al desplazar este no se ajustaba el pórtico para ensayos con longitud de 300 mm. El sistema se basa en dos perfiles IPE 500 con cartelas adicionales para aumentar su rigidez y así no influir en el ensayo. Se muestra el sistema en el punto 4.5.2.1. Pórtico horizontal.

A sendos apoyos se le ha impedido su capacidad de rotación en ambos ejes.

Ambos apoyos cuentan además con un sistema fabricado para apoyar el lateral del perfil pudiendo nivelar donde se coloca el pilar. De esta manera, manteniendo constante el punzón, modificando la colocación (altura respecto al punzón) del perfil se consiguen las distintas excentricidades. La nivelación se consigue mediante 2 mecanismos tornillo-tuerca (Husillo + tuerca + manivela) en cada apoyo. Es decir, 4 mecanismos en total que desplazarían una pequeña base acoplada dichos mecanismos para apoyar el lateral del perfil. Los tornillos son de métrica M8 con paso de 1,25 mm.

Nótese que para ensayar es necesario el uso de un nivel para comprobar que el pilar se encuentra completamente tumbado sin inclinación alguna.



Ilustración 25 Zoom del pórtico al sistema para ajustar la excentricidad

Dadas las cargas elevadas y la presión que va a sufrir, el punzón se fabricó en acero para herramientas F5212. El portapunzón y la hembra son de acero S500. Estos elementos se fabricaron para la realización de la DEA “Estudio experimental del pandeo de perfiles tubulares rectangulares de acero, rellenos de hormigón de alta resistencia” de David Hernández Figueirido.

Aunque se aprovechen los elementos ya fabricados la configuración es diferente ya que en el caso que nos ocupa se ensayan pilares cortos con excentricidades simétricas en los extremos, a diferencia de la DEA nombrada. Por lo que la configuración de los apoyos, aunque similar, es distinta.

6.5.2. Pórtico de ensayos

Para llevar a cabo la campaña experimental es necesario disponer de un sistema para realizar los ensayos que sea capaz de ejercer la fuerza necesaria para ensayar los pilares previstos y adquirir los datos del ensayo.

El laboratorio de Estructuras y Construcción de la Universitat Jaume I cuenta con dos pórticos de ensayos, compuestos por un bastidor, un actuador y una losa de carga.

Ambos pórticos tienen la suficiente rigidez como para que la deformación axial que sufren durante el ensayo del elemento, no afecte a los resultados obtenidos.

En este proyecto se ha usado el pórtico horizontal para ensayar todos los pilares, cambiando su excentricidad para obtener resultados a flexo-compresión.

Por otro lado, también se utiliza un pórtico vertical del taller de arquitectura. Éste es usado para ensayar las 3 probetas cilíndricas de hormigón y obtener su resistencia característica f_{ck} .

6.5.2.1. Pórtico Horizontal

Este pórtico es autoportante, es decir, no transmite esfuerzos a la losa de carga salvo el peso propio.

La capacidad del actuador hidráulico es de 5000 kN. Al posicionar este pórtico en horizontal contiene una serie de elementos específicos para soportar el peso propio del actuador, los apoyos y el pilar a ensayar sin que afecten al propio ensayo.

A su vez, se ha diseñado un sistema para evitar la acción de esfuerzos cortantes sobre el actuador y que impide el giro o la rotación del carro móvil por efectos de la excentricidad de las cargas.

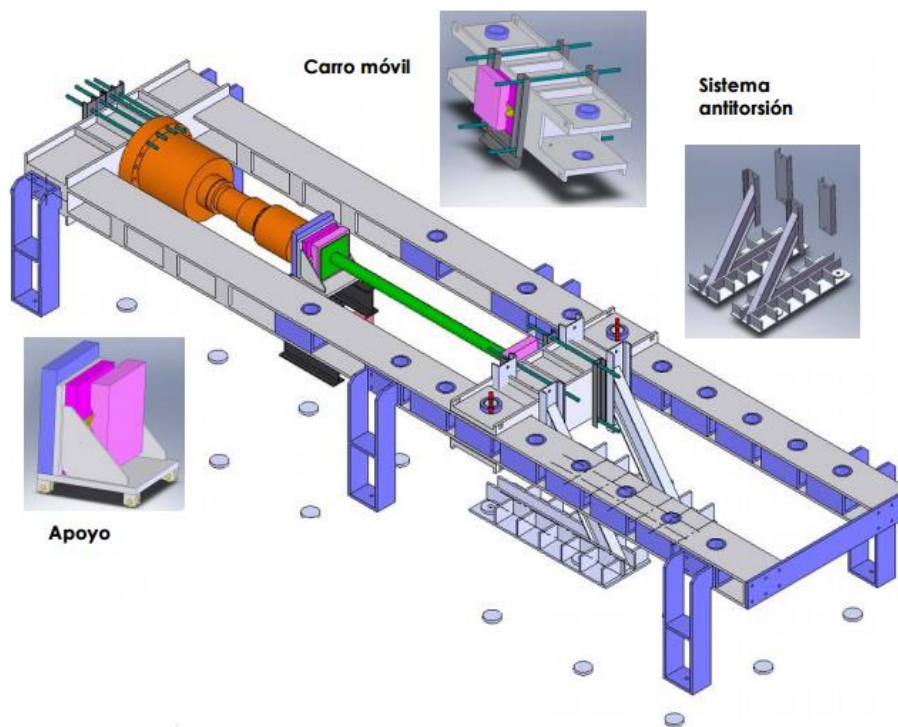


Ilustración 26 Pórtico horizontal de ensayos

Entre el carro móvil y el apoyo se ha colocado el sistema basado en dos perfiles IPE 500 con cartelas para ajustar correctamente el pórtico a la longitud del pilar.

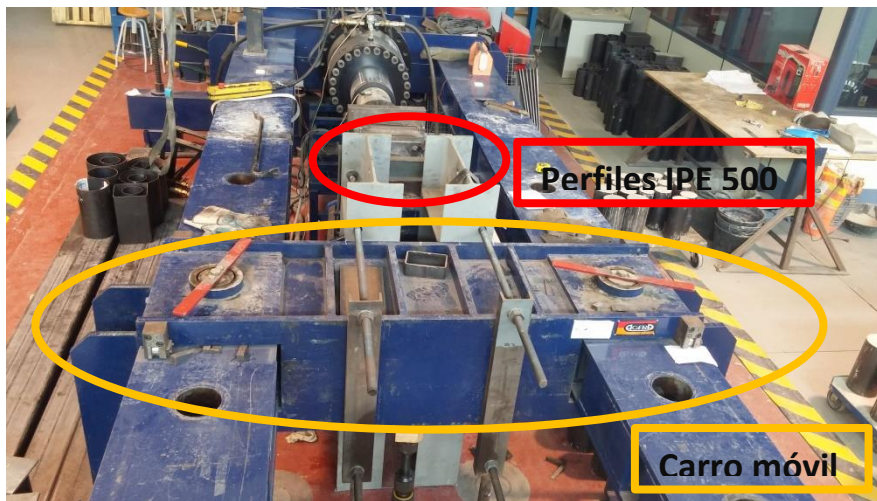
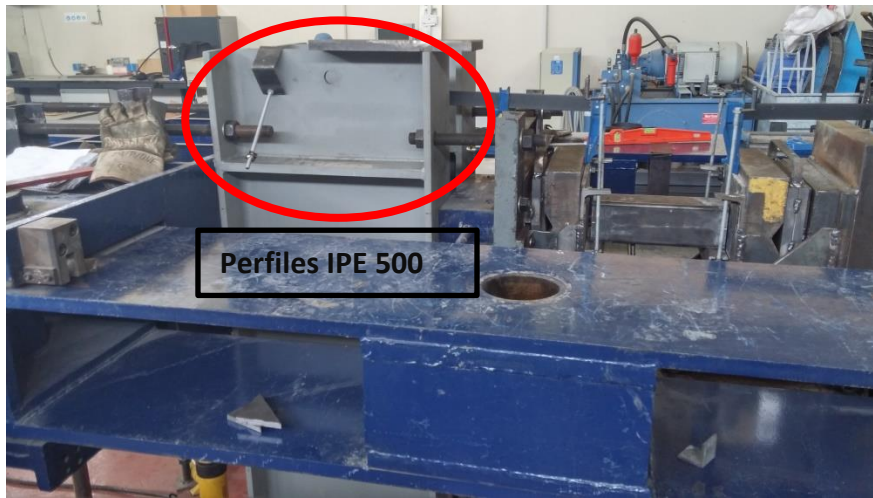


Ilustración 27 Sistema para ajustar el pórtico a la longitud del pilar

Se puede monitorizar la deformación del pórtico en 4 puntos diferentes mediante 4 galgas extensiométricas y la flecha máxima del pilar mediante el uso de un muelle que mide su desplazamiento mediante un LVDT (Transformador diferencial de variación lineal).

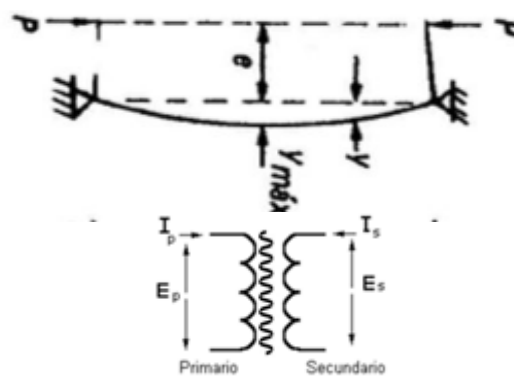


Ilustración 28 LVDT

En nuestro caso no ha sido necesario el uso de las 4 galgas. Se ha monitorizado el ensayo mediante las mediciones del desplazamiento del pistón y la fuerza aplicada por este.

El actuador de 5000kN perteneciente al pórtico horizontal contiene un grupo hidráulico que alimenta los cilindros y sistema de control. Se trata de un sistema ad hoc y por tanto cerrado, proporcionado por la empresa Ibertest. El actuador está instrumentado con una célula de carga que mide la compresión o tensión ejercida, y por un captador de desplazamiento que mide el desplazamiento axial del actuador.

Gracias a estos instrumentos de medida, el control informático puede controlar el avance bien por fuerza o bien por desplazamiento. La curva fuerza axial – desplazamiento axial, que es la respuesta del espécimen que ve el actuador, tiene una rigidez elevada en la zona lineal de ascenso, donde pequeños incrementos de desplazamiento tienen como resultado grandes incrementos de fuerza. Por el contrario una vez se ha superado el máximo de carga, la rigidez es inferior en valor absoluto por lo que hay grandes incrementos de desplazamiento con pequeños incrementos de fuerza. Dado que se quiere obtener la respuesta post-pico y medir la ductilidad se prefirió el control por desplazamiento.

La velocidad de avance fue configurada en función de la duración del experimento y el tiempo en alcanzar la carga máxima resultando en todos los casos avances en torno a 1mm/min.

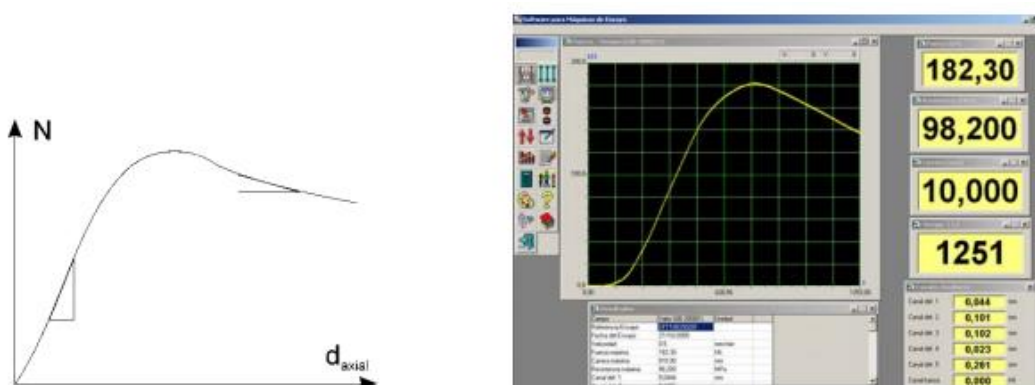


Ilustración 29 Curva Fuerza-Desplazamiento obtenido del sistema de control

6.5.2.2. Pórtico para probetas de hormigón

Como se ha mencionado anteriormente, se dispone en el taller de arquitectura técnica un sistema de ensayos Ibertest. Dicho sistema es vertical y se compone por un pistón capaz de aplicar una fuerza de 3000 KN y dos cabezas, la cabeza superior es fija mientras que la inferior cuenta con una serie de bases que permite ajustarse a diferentes geometrías. Una vez se ajusta el sistema a nuestra longitud de probeta de 300 mm se centra en la base. El centrado es cómodo y rápido ya que la propia base tiene una marca circular dónde colocar la probeta.

Este tipo de ensayo se realiza manteniendo el aumento de la fuerza aplicada a la probeta constante a lo largo del tiempo. Como vemos es diferente a la manera de realizar el ensayo en el pórtico horizontal para los pilares donde lo que se mantenía constante era la velocidad del pistón.

La razón de que el control de los ensayos sea diferente es porque en el caso del ensayo del hormigón nos interesa solamente la resistencia máxima. La deformación ya no es un dato de interés, de hecho en la pantalla se monitoriza la presión aplicada frente al tiempo. En cambio, en los pilares interesa monitorizar tanto la Fuerza como el desplazamiento y se decide el control por desplazamiento por las razones explicadas en el punto anterior (4.5.2.1 Pórtico Horizontal).



Ilustración 30 Sistema para ensayar probetas cilíndricas de hormigón

6.6. Toma de datos

La toma de datos se realiza utilizando el propio sistema de control del pórtico de ensayos. Es decir, se realizan medidas del desplazamiento del pistón y de la fuerza que se está aplicando al pilar. La frecuencia de muestreo se ha escogido de 50 Hz.

No ha sido necesario realizar la toma de datos con las galgas ya que solamente era necesario recoger datos del desplazamiento y fuerza del pistón.

6.7. Procedimiento durante el ensayo

Una vez preparado el espécimen para su ensayo, se le atornillan las hembras de los apoyos, orientándolas de forma que se consiguiese la excentricidad buscada, y se coloca en el pórtico. Las puntas en el pórtico se ajustan de forma que la excentricidad aplicada sea la deseada. Para ello se emplea un nivel laser con una precisión tal que el error introducido sea como máximo de 1 milímetro por cada 10 metros.

Posicionado el elemento se comprueba mediante niveles que el espécimen está perfectamente nivelado a lo largo de toda su longitud y no se introducen excentricidades adicionales, ni curvaturas iniciales. Una vez allí se colocan los captadores de desplazamiento sobre una estructura auxiliar fija y se conecta la instrumentación al sistema de adquisición de datos y al control del mismo. Posteriormente se procede al calibrado y puesta a cero de los instrumentos de medida.

Además se dispone de una cámara de video que permite visualizar y grabar el ensayo. Las ventanas de los sistemas de control y adquisición permiten controlar la evolución de las variables, principalmente a través de la gráfica de fuerza axial – desplazamiento axial. El ensayo se lleva hasta superar el máximo de resistencia y una vez dentro de la rama de descenso, hasta que se alcanzaba el límite de carrera de algún captador de desplazamiento. En algunos casos el ensayo se lleva hasta que la caída de resistencia supere el 85% de la carga última, aunque los captadores de los extremos hayan alcanzado su límite de carrera. En este punto se detenía el avance del actuador, se detenía la grabación de datos por parte del sistema de adquisición y la grabación de video.

6.7.1. Marcado de pilares mixtos

En primer lugar se han de realizar las marcas en el pilar usadas para colocar correctamente el pilar y conseguir la excentricidad deseada. En cada pilar se realizan 8 marcas, 4 por cada extremo. En los pilares rectangulares o cuadrados se marca en el centro de cada cara, y en los circulares una marca cada 90 ° aprovechando la soldadura del pilar como referencia para que coincidan las marcas ambos extremos del pilar. A continuación se explica el procedimiento a seguir.

El marcado se realiza colocando el perfil en planos realizados por AutoCAD para cada perfil donde se especifica el lugar donde realizar la marca.



Ilustración 31 Marcado de pilares 1



Ilustración 32 Marcado de pilares 2

6.7.2. Colocación en pórtico horizontal

Una vez preparado el espécimen para su ensayo, se coloca entre las dos cabezas apoyando el pilar en el sistema que sirve de apoyo y para ajustar la excentricidad. Tras colocar el elemento se centra en la dirección perpendicular a la que se aplica la excentricidad (eje z de la figura). Esto se consigue ajustando las marcas que quedan en la parte superior del pilar con la marca vertical que hay en cada cabeza de ambos apoyos.

Una vez centrado en esta dirección se ajusta la altura a la que colocar el pilar, es decir, la excentricidad (eje y de la figura). Se realiza situando las 4 marcas que quedan en las dos partes laterales del pilar con la línea horizontal correspondiente en las dos hembras.

Las líneas horizontales marcadas en ambas hembras para ajustar la excentricidad son las siguientes:

- La primera horizontal se encuentra en el centro de la hembra para excentricidad cero (azul).
- A 5 mm de la marca del centro para excentricidad 5 mm (cian).
- A 10 mm de la marca del centro para excentricidad 10 mm (verde).
- A 20 mm de la marca del centro para excentricidad 20 mm (magenta).
- A 25 mm de la marca del centro para excentricidad 25 mm (amarillo).
- A 50 mm de la marca del centro para excentricidad 50 mm (rojo).
- La línea vertical en el centro para no introducir excentricidad en dos planos.

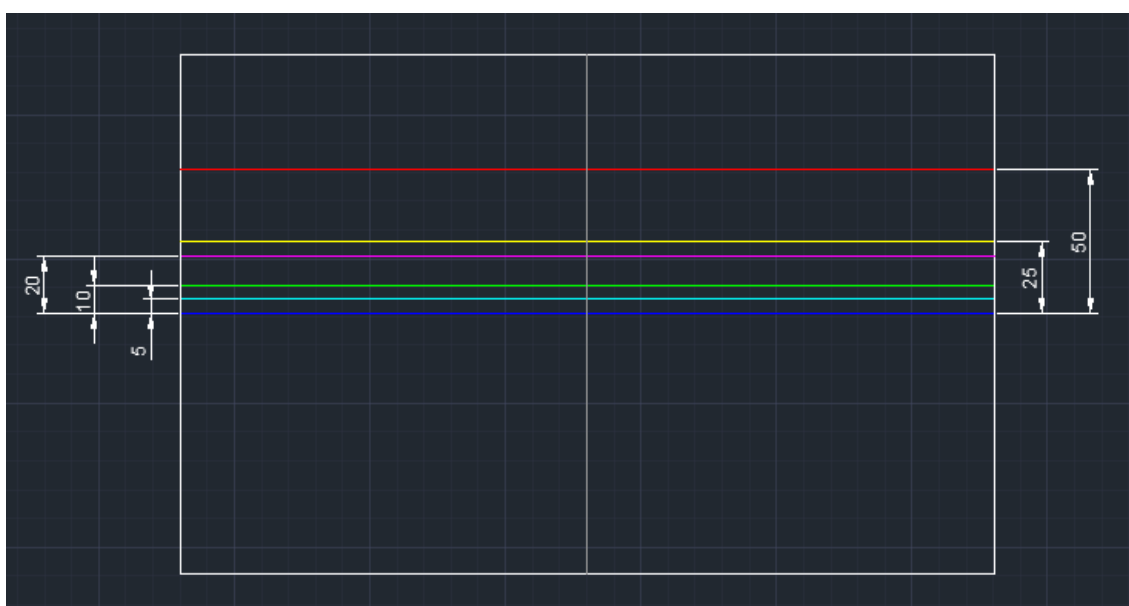


Ilustración 33 Imagen ilustrativa del alzado de una cabeza del pórtico con sus marcas para ajustar los pilares a dicha cabeza con la excentricidad deseada

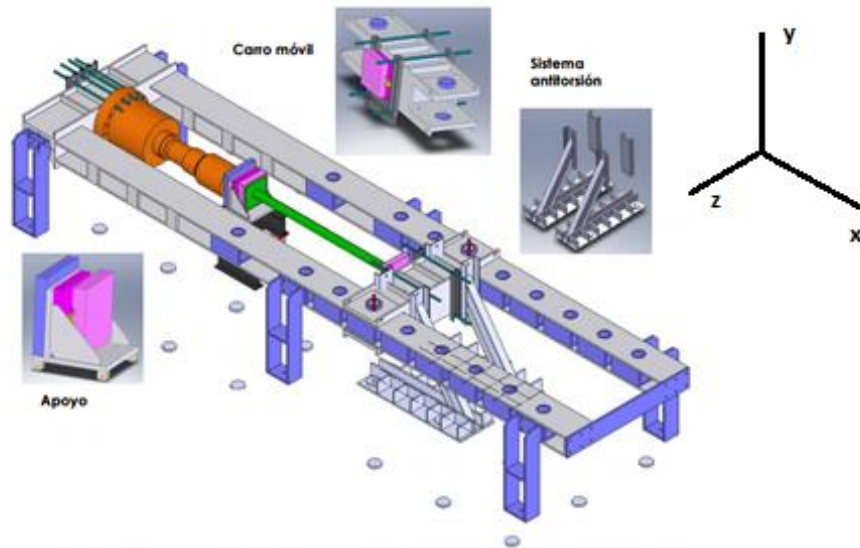


Ilustración 34 Pórtico con ejes x,y,z para explicar la colocación de los pilares en el pórtico

Una vez posicionado el elemento se comprueba mediante niveles que el espécimen está perfectamente nivelado a lo largo de toda su longitud y no se introducen excentricidades adicionales, ni curvaturas iniciales.

6.7.3. Realización del ensayo

Para la realización del ensayo se conecta la instrumentación al sistema de adquisición de datos y al control del mismo. Se comienza el ensayo nombrándolo con la nomenclatura explicada en el apartado correspondiente y con el control por desplazamiento. Se mantiene constante la velocidad del pistón en torno a 1 mm/min. Las ventanas de los sistemas de control y adquisición permiten controlar la evolución de las variables, principalmente a través de la gráfica de fuerza axial – desplazamiento axial.

El ensayo se lleva hasta superar el máximo de resistencia y una vez dentro de la rama de descenso, se mantiene el ensayo hasta que la caída de resistencia supere el 85% de la carga última.

6.8. Postprocesado de datos experimentales

Una vez realizado el ensayo, se procede al postprocesado fuera de línea de los datos experimentales. Esto consiste en una corrección de la pendiente inicial, y el filtrado y adecuación de la frecuencia de muestreo. Los registros de desplazamiento muestran una zona de menor rigidez inicial producida por el ajuste y asentamiento de las piezas que componen el pórtico así como del espécimen dentro de los apoyos.

La corrección se realiza eliminando la deformación inicial del registro de desplazamiento extrapolando los valores de los primeros registros que tienen un comportamiento lineal. Finalmente se filtra la señal y se reduce la frecuencia de muestreo a 1 registro /seg. Considerándose suficiente para el estudio monótono con la velocidad de avance indicada (1 mm/min).

7. Estudio a partir de los ensayos experimentales

7.1. Introducción

En este capítulo se analizan los resultados experimentales de parte de la campaña experimental descrita en el capítulo anterior. Se estudia el efecto de diferentes variables que intervienen en la respuesta de este tipo de pilares mixtos y se comparan los resultados experimentales con el modelo planteado por el Eurocódigo 4.

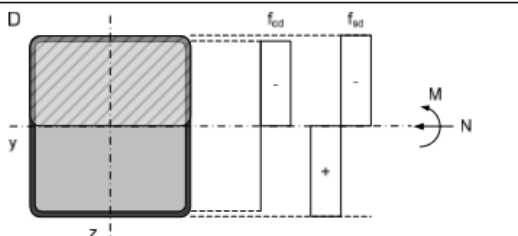
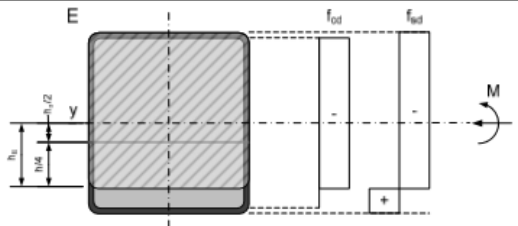
7.2. Realización del estudio de los datos experimentales

Con los datos experimentales obtenidos en los diferentes ensayos del laboratorio se realizará lo siguiente:

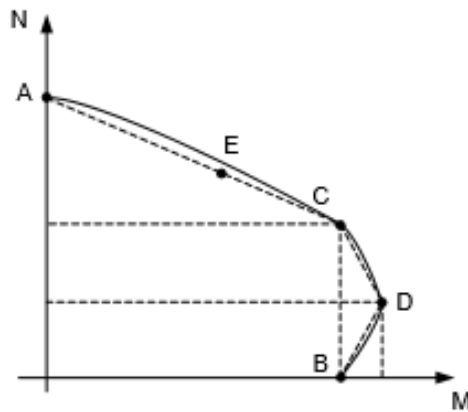
- Validar el método de cálculo para pilares mixtos con resistencia de hormigón convencional.
- Estudiar si dicho método es seguro para el diseño de pilares mixtos con hormigones de alta resistencia.

Para ello se calcula para cada espécimen el diagrama de interacción seccional a partir de los puntos explicados en el apartado donde se explica el eurocódigo 4. Los puntos del diagrama seccional a calcular se resumen en la tabla siguiente.

| | |
|--|---|
| | $N_A = N_{plRd}$ $M_A = 0$ $N_{plRd} = A_o \cdot f_{yd} + A_c \cdot f_{cd}$ |
| | $N_B = 0$ $M_B = M_{plRd}$ $M_{plRd} = f_{yd} \cdot (W_{pa} - W_{pan}) + 0.5 \cdot f_{cd} \cdot (W_{pc} - W_{pcn})$ $h_n = \frac{A_c \cdot f_{cd}}{2 \cdot b \cdot f_{cd} + 4 \cdot t \cdot (2 \cdot f_{yd} - f_{cd})}$ |
| | $N_C = A_c \cdot f_{cd}$ $M_C = M_{plRd}$ |

| | |
|---|--|
|  | $N_D = \frac{A_c \cdot f_{cd}}{2}$ $M_B = M_{max,Rd}$ $M_{max,Rd} = f_{yd} \cdot W_{pa} + 0.5 \cdot f_{cd} \cdot W_{pc}$ |
|  | $N_E = b \cdot (h_E - h_n) f_{cd} + 2 \cdot t \cdot (h_E - h_n) (2 \cdot f_{yd} - f_{cd}) + A_c \cdot f_{cd}$ $M_E = f_{yd} \cdot (W_{pa} - W_{paE}) + 0.5 \cdot f_{cd} \cdot (W_{pc} - W_{pcE})$ $h_E = 0.5 \cdot h_n + 0.25 \cdot h$ |

- W_{pa} , W_{pc} módulos resistentes de la sección de acero y hormigón, respectivamente.
- W_{paE} , W_{pcE} módulo resistente del acero y del hormigón en la sección comprendida por $2 \cdot h_n$
- W_{paE} , W_{pcE} módulo resistente del acero y del hormigón en la sección comprendida por $2 \cdot h_E$



Los módulos plásticos se calculan de la manera mostrada a continuación.

Perfil rectangular

$$W_{pc1} = 2 \cdot (rint \cdot (b - 2 \cdot (t + rint)) \cdot ((h - 2 \cdot t - rint) / 2))$$

$$W_{pc2} = 2 \cdot ((b - 2 \cdot t) \cdot ((h / 2) - t - rint) \cdot ((h - 2 \cdot t - 2 \cdot rint) / 4))$$

$$W_{pc3} = 2 \cdot ((pi / 2) \cdot (rint ^ 2) \cdot ((h / 2) - t - rint + ((4 \cdot rint) / (3 \cdot pi))))$$

$$W_{pa1} = 2 \cdot (r \cdot (b - 2 \cdot r) \cdot ((h / 2) - (r / 2)))$$

$$W_{pa2} = 2 \cdot (b \cdot ((h / 2) - r) \cdot ((h - 2 \cdot r) / 4))$$

$$W_{pa3} = 2 \cdot ((pi / 2) \cdot (r^2) \cdot ((h / 2) - r + ((4 \cdot r) / (3 \cdot pi))))$$

$$W_{pc} = W_{pc1} + W_{pc2} + W_{pc3}$$

$$W_{pa} = W_{pa1} + W_{pa2} + W_{pa3} - W_{pc}$$

Siendo b la base del perfil rectangular, h la altura y t el espesor. Por otro lado el cálculo de los radios de acuerdos usados en las formulas anteriores es.

$$r = 1.25 \cdot t$$

$$r_{int} = t$$

Por otro lado,

$$h_n = (A_c \cdot h_{orm}) / ((2 \cdot b \cdot h_{orm}) + (4 \cdot t \cdot (2 \cdot A_{cero} - h_{orm})))$$

$$W_{pan} = 2 \cdot t \cdot (h_n^2)$$

$$W_{pcn} = (b - 2 \cdot t) \cdot (h_n^2)$$

$$h_e = 0.5 \cdot h_n + 0.25 \cdot h$$

$$W_{pae} = 2 \cdot t \cdot (h_e^2)$$

$$W_{pce} = (b - 2 \cdot t) \cdot (h_e^2)$$

Perfil circular

$$W_{pc} = 4 / 3 \cdot (\text{Radio} - t)^3$$

$$W_{pa} = 4 \cdot (\text{Radio}^2) \cdot t$$

Y por otro lado,

$$h_n = (A_c \cdot h_{orm}) / ((2 \cdot \text{Diametro} \cdot h_{orm}) + (4 \cdot t \cdot (2 \cdot A_{cero} - h_{orm})))$$

$$W_{pan} = 2 \cdot t \cdot (h_n^2)$$

$$W_{pcn} = (\text{Diametro} - 2 \cdot t) \cdot (h_n^2)$$

$$h_e = 0.5 \cdot h_n + 0.25 \cdot \text{Diametro}$$

$$W_{pae} = 2 \cdot t \cdot (h_e^2)$$

$$W_{pce} = (\text{Diametro} - 2 \cdot t) \cdot (h_e^2)$$

Perfil Ovalado

Para calcular este tipo de perfiles se ha utilizado la siguiente equivalencia explicada en el estudio "Test and design of concrete-filled elliptical hollow section stub columns" de X.L.Zhao y J.A.Packer.

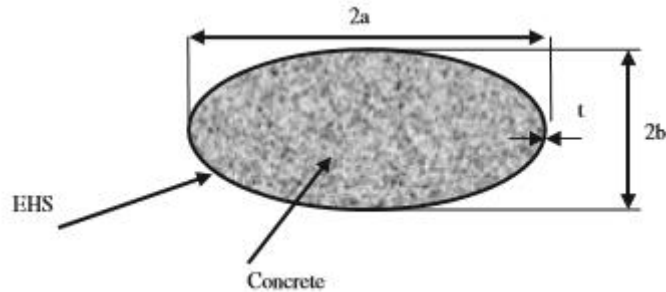


Ilustración 35 Perfil Elíptico

$$D_{e,new} = 2a \cdot \left[1 + f \cdot \left(\frac{a}{b} - 1 \right) \right]$$

$$f = 1 - 2.3 \cdot \left(\frac{t}{2a} \right)^{0.6}$$

Las áreas de acero y hormigón a utilizar en dicha equivalencia son respectivamente:

$$A_s = \pi \cdot [a \cdot b - (a - t) \cdot (b - t)]$$

$$A_c = \pi \cdot (a - t) \cdot (b - t)$$

Por otro lado las inercias necesarias para el cálculo se calculan con los datos de la sección elíptica real (EHS).

Los módulos plásticos se calculan de la siguiente manera

$$W_p = 2 \cdot S_x$$

Por lo que en primer lugar se calcula el centro de gravedad de media sección, tanto del acero, como del hormigón. Por lo que el largo de la media sección sigue siendo la distancia entre círculos pero la altura solo será de la mitad

$$r = altura/2 - t$$

$$R = altura/2$$

$d =$ Largo, distancia entre círculos

$$CDGa = \frac{(R^2 - r^2) \cdot \frac{d}{2} + \frac{2}{3} \cdot (R^3 - r^3)}{\frac{\pi \cdot (R^2 - r^2)}{2} + (R - r) \cdot d}$$

$$CDGc = \frac{r^2 \cdot \frac{d}{2} + \frac{2}{3} \cdot r^3}{\frac{\pi \cdot r^2}{2} + r \cdot d}$$

$$Wpc = 2 \cdot A_{c,ovalado} * CDGc$$

$$Wpa = 2 \cdot A_{a,ovalado} * CDGc$$

Siendo $A_{c,ovalado}$ y $A_{a,ovalado}$ las áreas de hormigón y acero del perfil EHS respectivamente. Es decir, no se calculan con las áreas presentadas en la equivalencia elíptico-circular. Se ha calculado con la sección real ya que los centros de gravedad se han calculado también con las secciones reales, las secciones del perfil ovalado.

Y por otro lado,

$$hn = (Ac \cdot horm) / ((2 \cdot Diametro \cdot horm) + (4 \cdot t \cdot (2 \cdot Acero - horm)))$$

$$Wpan = 2 \cdot t \cdot (hn^2)$$

$$Wpcn = (Diametro - 2 \cdot t) \cdot (hn^2)$$

$$he = 0.5 \cdot hn + 0.25 \cdot Diametro$$

$$Wpae = 2 \cdot t \cdot (he^2)$$

$$Wpce = (Diametro - 2 \cdot t) \cdot (he^2)$$

Para estos últimos cálculos, el Diámetro de las expresiones se refiere al diámetro equivalente planteado anteriormente $D_{e,new}$.

Cabe destacar que, a pesar que la normativa indique que se calculen los puntos con las resistencias f_{yd} y f_{cd} , es decir, minoradas por su coeficiente según el material, nosotros hemos calculado dichos puntos con la resistencias $f_y=275$ Mpa o $f_y = 355$ Mpa y $F_c = 30$ Mpa y $F_c=90$ Mpa. Esto se debe a que al ensayar el acero y el hormigón se comprueba que tanto el límite elástico del acero real como la resistencia característica del hormigón superan dicho valor.

Una vez calculado el diagrama se comprueba el cumplimiento de la norma graficando los diferentes puntos (Punto \rightarrow Momento y axil), es decir graficando el Axil y el Momento obtenido en los ensayos para las diferentes excentricidades. Esto se realizará para todos los especímenes. De esta manera podemos deducir.

- Para hormigones de resistencia convencional. Si los puntos graficados quedan por encima de la curva ABCDE queda validada la normativa EC4. Mientras si quedan por debajo la normativa no estaría del lado de la seguridad ya que habría colapsado antes de lo que indica la normativa.
- Para hormigones de alta resistencia. Si los puntos graficados quedan por encima de su curva ABCDE, el uso de la normativa EC4 para este tipo de hormigones es seguro. Mientras si quedan por debajo estaríamos del lado de la inseguridad, no siendo seguro el uso del EC4 para hormigones de alta resistencia.

Además se realizan las mismas gráficas explicadas pero con los puntos calculados relativos a N_{plRd} y M_{plRd} . De esta manera se tiene en cuenta el posible cambio de resistencia en hormigones y aceros utilizados en los ensayos. El procedimiento de la realización de estas curvas relativas se explica en el siguiente apartado con un ejemplo para que la explicación sea más clara.

Por otro lado se calculan los siguientes parámetros para comparar con lo que indica el EC4:

- Cuantía mecánica ω

$$\omega = \frac{A_s \cdot f_y}{A_c \cdot f_{ck}}$$

- Cuantía geométrica ρ

$$\rho = \frac{A_s}{A_c}$$

- Contribución relativa $\delta \rightarrow$ Debe estar comprendido entre 0,2 y 0,9

$$\delta = \frac{A_s \cdot f_y}{A_c \cdot f_{ck} + A_s \cdot f_y}$$

- Esbeltez relativa $\bar{\lambda} \rightarrow$ Debe ser menor que 2, si es menor que 0,4 se puede considerar esbeltez relativa pequeña

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_c \cdot f_{ck} + A_s \cdot f_y}{\frac{\pi^2 \cdot EI_{eff}}{L^2}}}$$

- Comprobación del pandeo local de los elementos → pandeo local < 1

Pandeo local

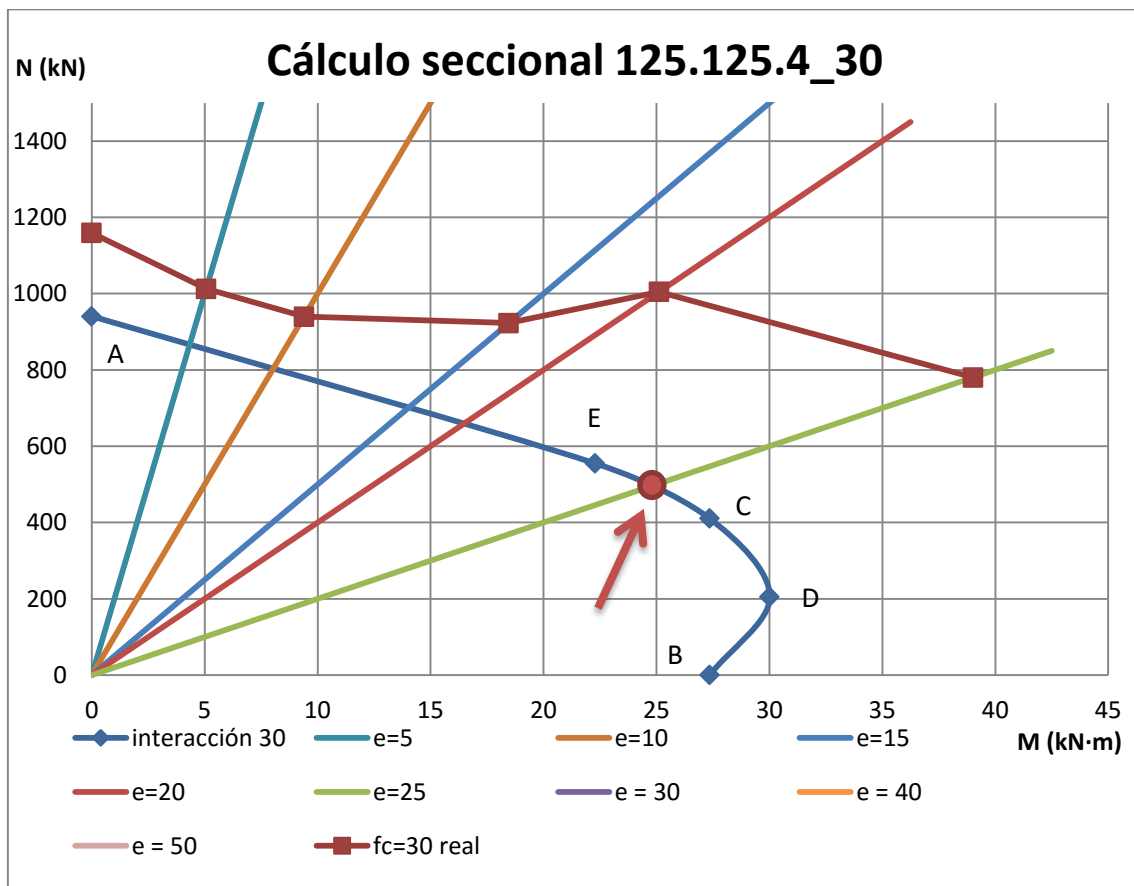
- Secciones huecas circulares y equivalencia elípticos circular:

$$pandeo_{local} = \frac{d}{t} / (90 \cdot \varepsilon^2) \leq 1$$

- Secciones huecas rectangulares:

$$pandeo_{local} = \frac{d}{t} / (52 \cdot \varepsilon) \leq 1$$

Finalmente para cada ensayo, es decir, para cada una de las excentricidades, se calcula también el Axil y Momento flector que la norma indica que aguantaría el pilar con las condiciones del ensayo. Para ello se ha obtenido la intersección entre la curva de interacción seccional y la recta que indica la excentricidad dada.



Por ejemplo para el perfil dado ensayado con hormigón de 30 MPa, para el ensayo con excentricidad = 50 mm. El Axil y Momento que aguantaría el perfil para esa misma excentricidad según el EC4 sería el punto señalado con una flecha y marcado por un redondo rojo, la intersección entre la línea que marca la excentricidad ($e = M/N$) y la curva de interacción.

La curva de interacción seccional se ha tomado como distintas rectas entre los puntos A,B,C, y D. Obteniendo en cada tramo una recta que se puede calcular fácilmente ya que se conocen 2 puntos de la recta.

Es decir se conocerán los siguientes puntos según la excentricidad del ensayo

| Zona de gráfica | N1 | N0 | M1 | M0 |
|---------------------------------|---|-------|-------|-------|
| $e_a = e_{\text{ensayo}}$ | Para este caso es directo, no hace falta calcular curva, $\text{ratio}_N = N_{\text{exp}}/N_{\text{plRd}}$ y $\text{ratio}_M = 1$ ya que no hay momento | | | |
| $e_a < e_{\text{ensayo}} < e_c$ | N_A | N_C | M_A | M_C |
| $e_c < e_{\text{ensayo}} < e_d$ | N_C | N_D | M_C | M_D |
| $e_d < e_{\text{ensayo}} < e_b$ | N_D | N_E | M_D | M_E |

El tramo de recta de interacción seccional se calcula como se describe a continuación.

$$(N1 - N0) = A_{\text{curva } 1} \cdot (M - M0)$$

Donde A entonces vale

$$A_{\text{curva } 1} = (N1 - N0) / (M - M0)$$

Se pasa a la forma de curva tipo $Y=A \cdot X+B$ o en nuestro caso $N=A \cdot M+B$ y se despeja B, dando:

$$B_{\text{curva } 1} = N_i - A_{\text{curva } 1} \cdot M_i$$

Utilizando el axil y el momento de cualquiera de los dos extremos de la recta.

De esta manera se obtiene una expresión matemática de la curva de interacción. Esta es una aproximación ya que se está considerando recta en cada uno de sus puntos.

Para calcular la recta que indica la excentricidad de nuestro ensayo es simple ya que es solamente el cálculo de la pendiente de ésta. $Y=A \cdot Z$ o en el caso que nos ocupa $N=A \cdot M$ siendo la pendiente:

$$A_{\text{curva } 2} = N_{\text{ensayo}} / M_{\text{ensayo}}$$

Quedando las rectas:

$$N = A_{\text{curva } 1} \cdot M + B_{\text{curva } 1}$$

$$N = A_{\text{curva } 2} \cdot M$$

Calculadas las dos rectas se puede pasar a calcular la intersección de ambas dando el Axil y Momento máximos según la norma para la excentricidad dada.

$$M_{ec4} = \frac{B_{\text{curva } 1}}{A_{\text{curva } 2} - A_{\text{curva } 1}}$$

$$N_{ec4} = A_{\text{curva } 2} \cdot M \quad \text{O lo que es lo mismo } N_{ec4} = M / \text{excentricidad}$$

De igual manera que ocurre con representación de las gráficas, el diagrama de interacción seccional se ha calculado con las resistencias teóricas de 275 y 30 o 90 MPa para acero y hormigón respectivamente y en cambio, los axiles y momentos máximos de los ensayos pueden ser mayores ya que la resistencia de tanto el hormigón como la del acero lo pueden ser.

Además como se ha visto antes al realizar los diagramas, en los distintos ensayos realizados para la misma gráfica puede haber tubos diferentes y hormigones de amasadas diferentes, siendo así sus resistencias variables y por lo tanto, obtenido pilares más resistentes que otros. Es decir, cometeremos cierto error al representarlo en la misma gráfica.

Se vuelve a utilizar la solución planteada en el caso de la representación de las gráficas, hacer relativos por un lado los axiles y momentos del diagrama de interacción seccional a los N_{plRd} y M_{plRd} respectivamente (N_{plRd} y M_{plRd} calculado con resistencias teóricas) y por otro lado utilizar los axiles y momentos de los ensayos relativos a $N_{plRd,exp}$ y $M_{plRd,exp}$ ($N_{plRd,exp}$ y $M_{plRd,exp}$ calculado con resistencias de los materiales obtenidas de sus ensayos).

El procedimiento de la relativización de las gráficas queda mejor explicado en el apartado de Resultados obtenidos para un pilar utilizando un ejemplo.

Por lo que los puntos de interés quedarán ahora relativos de la siguiente manera.

$$N_{ec4,rel} = N_{ec4}/N_{plRd}$$

$$M_{ec4,rel} = M_{ec4}/M_{plRd}$$

N_{plRd} y M_{plRd} Calculado con f_y y f_c teóricos ya que la curva también lo está.

$$N_{exp,rel} = N_{exp}/N_{plRd,exp}$$

$$M_{exp,rel} = M_{exp}/M_{plRd,exp}$$

$N_{plRd,exp}$ y $M_{plRd,exp}$ calculados con f_y y f_c experimentales ya que se han obtenido mediante ensayo.

Finalmente, una vez corregidos los puntos (absolutos → relativos) se pasa a calcular el ratio de seguridad/inseguridad en el que se ha quedado el ensayo comparado con la norma.

$$ratio_{axiles} = N_{exp,rel}/N_{ec4,rel}$$

$$ratio_{momentos} = M_{exp,rel}/M_{ec4,rel}$$

Si estos ratios dan por encima de 1 significa que para ese ensayo la norma por el lado de la seguridad ya que el pilar ensayado ha aguantado más de lo que indica la norma, concretamente con un porcentaje de sobre seguridad de $(ratio-1) \cdot 100 \%$. En cambio si los resultados de estos ratios son menores que 1 significa que para dicho ensayo estamos del lado de la inseguridad, concretamente con un porcentaje de infra seguridad de $(1-ratio) \cdot 100 \%$.

Este ratio se comparará más adelante con los diferentes parámetros comparativos en el apartado de comparación con el EC4 para estudiar cómo afectan estos parámetros a la seguridad de los pilares.

7.3. Resultados obtenidos para un pilar

Se escoge un pilar para explicar el procedimiento explicado anteriormente. Se ha escogido el pilar circular con nombre R/150.100.5_300

7.3.1. Obtención de diagrama seccional

El diagrama seccional se calcula como ya se ha dicho con los diferentes puntos A, B, C, D y opcionalmente E. Se calculan dos diagramas seccionales para cada perfil.

Un diagrama con:

- $F_y=275$ o 355 MPa según el límite elástico del perfil de acero.
- $F_c=30$ Mpa

Es decir, R/150.100.5_300_30.275.

Otro con:

- $F_y=275$ o 355 MPa según el límite elástico del perfil de acero.
- $F_c=90$ Mpa

Es decir, R/150.100.5_300_90.275.

En cada diagrama se superponen además los diferentes puntos (Axil y Momento) obtenidos en los ensayos para cada excentricidad.

En la primera gráfica referente al hormigón de 30 Mpa se superpone los ensayos realizados con este tipo de material. Se repite el proceso para el hormigón de 90 Mpa. Los puntos a superponer serán el axil obtenido en el ensayo (eje Y) y el momento (eje x). El momento se calcula multiplicando el axil por la excentricidad aplicada en cada ensayo.

$$M_{ensayo,i}(KNm) = N_{ensayo,i}(KN) \cdot excentricidad_{ensayo,i}(m)$$

En la mayoría de los casos, los axiles se han obtenido de ensayos realizados con excentricidades de 0, 5, 10, 20, 25 y 50 mm. En otros casos se ha decidido prescindir de alguna excentricidad por falta de material o porque no era necesario obtener el axil con excentricidad cero (como es el caso de los ensayos respecto a eje débil y fuerte del mismo perfil, el axil con $e=0$ mm sólo es necesario una vez).

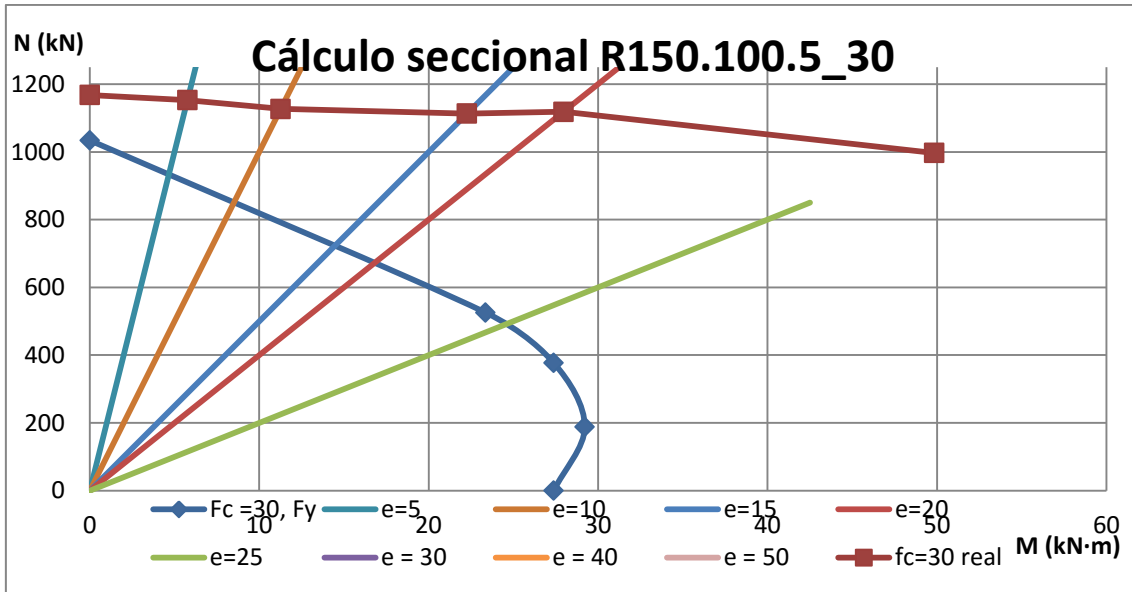
Para nuestro caso particular, los puntos a superponer formados por el axil y el momento obtenidos de sus ensayos serían:

| Nombre | e (mm) | N(KN) | M(KNm) |
|----------------------------------|--------|--------|---------|
| R/150.100.5_300_30.275_0(1)(33) | 0 | 1168 | 0 |
| R/150.100.5_300_30.275_5(1)(33) | 5 | 1152,8 | 5,764 |
| R/150.100.5_300_30.275_10(1)(37) | 10 | 1126,8 | 11,268 |
| R/150.100.5_300_30.275_20(1)(37) | 20 | 1113 | 22,26 |
| R/150.100.5_300_30.275_25(1)(36) | 25 | 1118,5 | 27,9625 |
| R/150.100.5_300_30.275_50(1)(36) | 50 | 996,8 | 49,84 |
| R/150.100.5_300_90.275_0(1)(33) | 0 | 1641,8 | 0 |

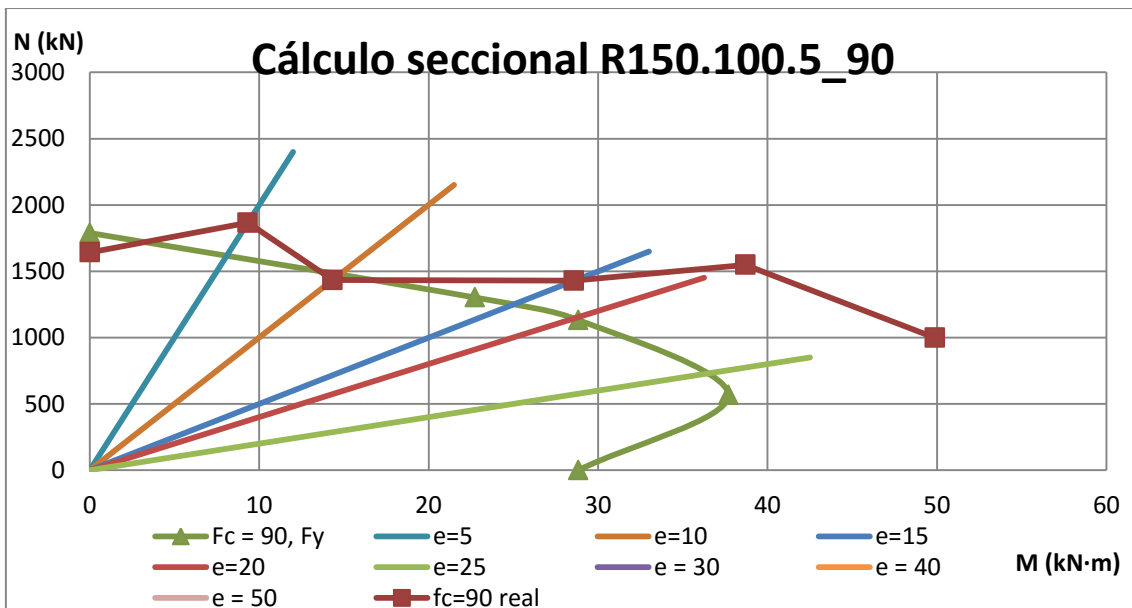
| Nombre | e (mm) | N(KN) | M(KNm) |
|-----------------------------------|--------|--------|---------|
| R/150.100.5_300_90.275_5(1)(28) | 5 | 1865,3 | 9,3265 |
| R/150.100.5_300_90.275_10(1)(31) | 10 | 1433,7 | 14,337 |
| R/150.100.5_300_90.275_20(1)(105) | 20 | 1428,2 | 28,564 |
| R/150.100.5_300_90.275_25(1)(27) | 25 | 1547,7 | 38,6925 |
| R/150.100.5_300_90.275_50(1)(32) | 50 | 997,8 | 49,89 |

El resultado de la superposición de las curvas teórica del EC4 explicada en el punto 5.2 "Realización del estudio de los datos experimentales" y las curvas con los datos experimentales queda.

Con hormigón de 30 MPa:



Con hormigón de 90 MPa:



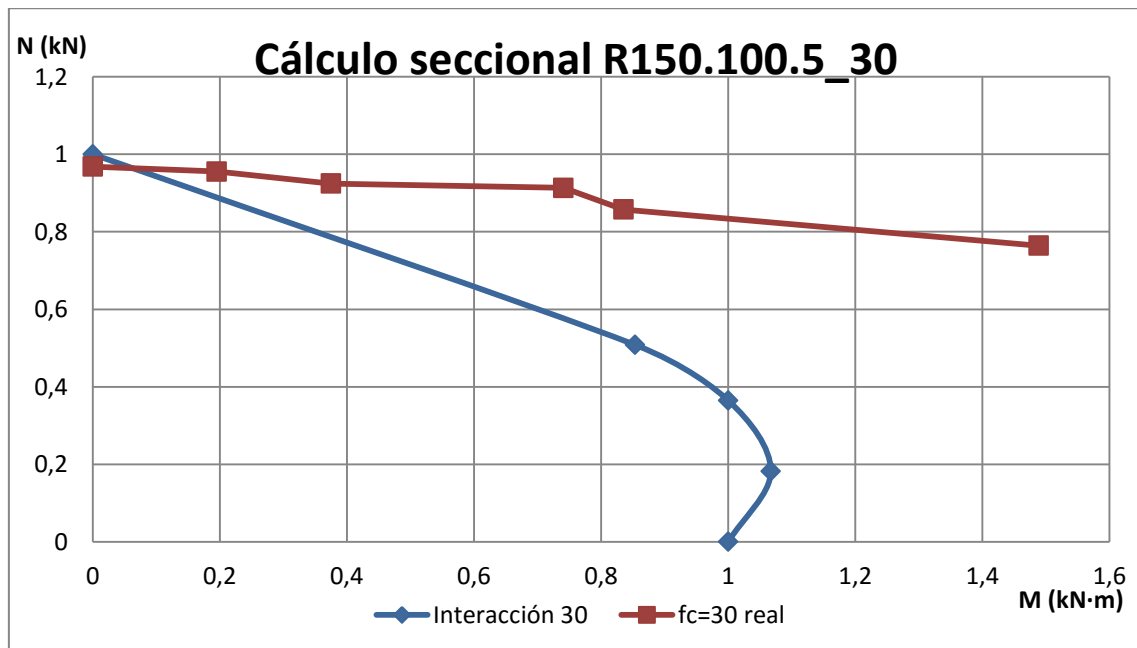
Cabe destacar que se han realizado ensayos para el mismo tipo de perfil, es decir, misma geometría (y misma gráfica), donde ha sido necesario el uso de tubos de acero diferentes o de amasadas de hormigón diferentes, lo que significa que el límite elástico del acero o la resistencia característica del hormigón pueda ser diferente. Por ello se decide representar las gráficas no solo en términos absolutos (Axil en kN y momento en kNm), sino también en términos relativos.

Para realizar estos diagramas relativos, primero en los puntos A, B, C, D, E se divide por un lado sus axiles correspondientes por el axil N_{plRd} equivalente a la resistencia de la sección a compresión (N_A, N_B, N_C, N_D y N_E se dividen entre N_{plRd}); y por otro lado, sus momentos M_A, M_B, M_C, M_D y M_E se dividen por M_{plRd} . Tanto N_{plRd} como M_{plRd} para relativizar la curva ABCDE se calculan con resistencias f_y y f_c teóricas ya que la curva absoluta de la que se está obteniendo la relativa usa también estas resistencias. De esta manera queda una curva teórica relativa a 1 donde el axil máximo es 1 y el momento máximo M_D / M_{plRd} es mayor que 1 porque el esfuerzo de compresión axil en D inhibe la fisuración por tracción en el hormigón, aumentando así la resistencia a flexión.

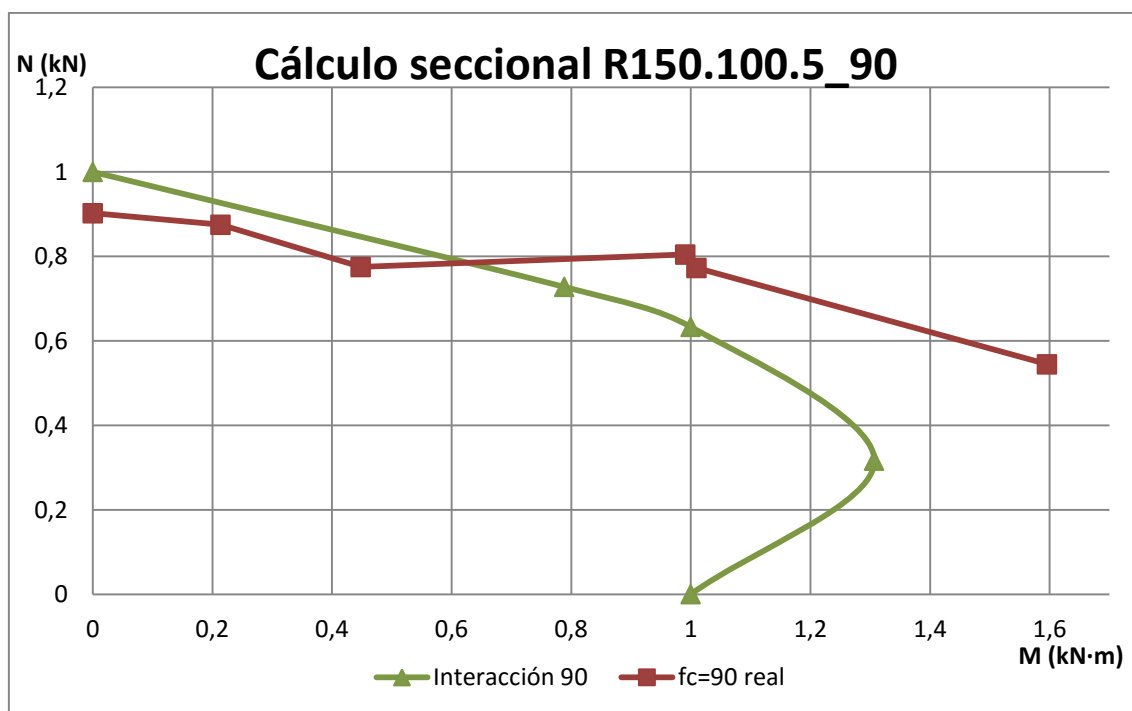
Finalmente, de igual manera que se hace con la curva teórica, se convierte en relativa la curva experimental. Esto se consigue dividiendo cada axil y momento obtenido para las diferentes excentricidades por su $N_{plRd,exp}$ y $M_{plRd,exp}$ respectivamente. Ahora bien, la curva en términos absolutos no se ha calculado, sino que se ha obtenido ensayando el material y llegando a su carga máxima, por este motivo $N_{plRd,exp}$ y $M_{plRd,exp}$ se calculan ahora usando la resistencia real de los materiales f_y y f_c obtenidas también mediante ensayos. En los casos que no haya sido posible realizar un ensayo a los materiales se usará el límite elástico de 275 MPa, el cual es un mínimo de resistencia asegurado por nuestro proveedor.

Las gráficas para el mismo perfil pero ahora relativas quedan.

Relativa y con hormigón de 30 MPa:



Relativa y con hormigón de 90 MPa:



En estas gráficas concretas se puede observar que para hormigón de 30 los axiles y momentos últimos de los ensayos son mayores que los correspondientes al diagrama seccional, estando en el lado de la seguridad. Por otro lado, en la gráfica del mismo perfil relleno con hormigón de 90 MPa, los axiles y momentos últimos de los ensayos quedan en parte también del lado de la seguridad. Los puntos que quedan por debajo del diagrama de interacción seccional son puntos poco por debajo del diagrama. Se puede concluir pues que para este perfil, para hormigones de 30 se está del lado de la seguridad. .

Esto quiere decir que este perfil aporta peso a la validación de la norma para hormigones de resistencia convencional y al posible uso del método de cálculo simplificado para hormigones de resistencia de hasta 90 MPa incluyendo algún coeficiente que minore un poco las cargas máximas ya que hay varios puntos del lado de la inseguridad.

El hormigón de alta resistencia no lo contempla la norma (la norma contempla hasta hormigones de 60 MPa).

Ahora bien, es necesario estudiar esto para todos los perfiles y obtener conclusiones del estudio con una visión amplia, además no todos los ensayos darán del lado de la seguridad (como se verá más adelante).

Comparando las gráficas relativas y absolutas se observa como son muy parecidas como es de esperar. Destacar que en ambas gráficas desciende un poco la curva experimental respecto a la teórica ya que los N_{plRd} y M_{plRd} para los puntos de la curva teórica son mayores ya que se calculan con las resistencias reales.

7.3.2. Parámetros comparativos

Para poder comparar los resultados con el Euro-código 4 se van a calcular para cada ensayo ciertos índices comparativos. Estos parámetros se compararán de manera global en el siguiente apartado 7.4 "Comparación con EC4".

Se han seleccionado parámetros explicados en la normativa para ver cómo afecta la varianza de estos en los resultados obtenidos. Al estar explicados en el EC4 se puede observar además si se está cumpliendo los requisitos que impone el EC4 para poder diseñar pilares mixtos con el método simplificado.

Los parámetros, que ya se han explicado anteriormente son:

- Cuantía mecánica ω
- Cuantía geométrica ρ
- Contribución relativa $\delta \rightarrow$ Debe estar comprendido entre 0,2 y 0,9
- Esbeltez relativa $\bar{\lambda} \rightarrow$ Debe ser menor que 2, si es menor que 0,4 se puede considerar esbeltez relativa pequeña
- Comprobación del pandeo local de los elementos \rightarrow pandeo local < 1

Resultados para el pilar seleccionado como ejemplo

| Name | $\rho=As/Ac$ | δ | ω | λ | $D/(t \cdot \epsilon)$ |
|---------------------------------|--------------|----------|----------|-----------|------------------------|
| R150.100.5_300_275.30_00 (33)d | 0,190 | 0,581 | 1,387 | 0,112 | 0,645 |
| R150.100.5_300_275.30_05 (33)d | 0,190 | 0,581 | 1,387 | 0,112 | 0,645 |
| R150.100.5_300_275.30_10 (37)d | 0,190 | 0,585 | 1,411 | 0,113 | 0,650 |
| R150.100.5_300_275.30_20 (37)d | 0,190 | 0,585 | 1,411 | 0,113 | 0,650 |
| R150.100.5_300_275.30_25 (36)d | 0,190 | 0,612 | 1,581 | 0,117 | 0,688 |
| R150.100.5_300_275.30_50 (36)d | 0,190 | 0,612 | 1,581 | 0,117 | 0,688 |
| R150.100.5_300_275.90_00 (33)d | 0,190 | 0,385 | 0,627 | 0,138 | 0,645 |
| R150.100.5_300_275.90_05 (28)d | 0,190 | 0,475 | 0,906 | 0,150 | 0,775 |
| R150.100.5_300_275.90_10 (31)d | 0,190 | 0,395 | 0,654 | 0,139 | 0,659 |
| R150.100.5_300_275.90_20 (105)d | 0,190 | 0,370 | 0,587 | 0,136 | 0,624 |
| R150.100.5_300_275.90_25 (27)d | 0,190 | 0,442 | 0,791 | 0,145 | 0,724 |
| R150.100.5_300_275.90_50 (32)d | 0,190 | 0,390 | 0,639 | 0,139 | 0,651 |

Se observa la cuantía geométrica es muy pequeña dado que casi todo la sección la aporta el hormigón.

La contribución relativa supera el mínimo de 0,2 para el caso de hormigón de 30 MPa pero para hormigón de 90 MPa queda un poco por debajo. En comparación, para el mismo perfil la contribución relativa siempre será más pequeña usando hormigones de más resistencia ya que esta aumenta el valor del denominador.

Como es normal, la cuantía mecánica es más pequeña cuanto más resistencia aporte el hormigón en comparación con el acero, ya sea porque el perfil tenga más área de hormigón o porque su resistencia característica f_{ck} sea mayor.

Por último indicar que tanto el requisito impuesto por el EC4 para la esbeltez relativa como para el pandeo local se cumplen en este perfil. Además indicar que en este y todos los casos nos da una esbeltez relativa menor de 0,4 para pilares de pequeña esbeltez. Esto se debe a que los pilares ensayados son pilares cortos de 300 mm de largo. Es un buen indicativo ya que el experimento se diseñó para precisamente obtener el comportamiento seccional de los pilares.

Todos los parámetros se calculan con el límite elástico del acero, cuando ha sido posible, y la resistencia característica del hormigón experimentales. Aunque el resultado no cambiase prácticamente de esta manera estamos teniendo en cuenta las resistencias de los materiales reales.

7.4. Comparación con EC4

Se ha decidido hacer una distinción en el estudio por tipo de perfiles para poder observar de qué manera afectan los parámetros comparativos ya explicados a cada uno de éstos perfiles. Además se decide comparar diferenciando entre pilares mixtos rellenos con hormigón de 30 y rellenos con hormigón de 90 MPa.

7.4.1. Comparación con perfiles Rectangulares y Cuadrados

Tabla de resultados:

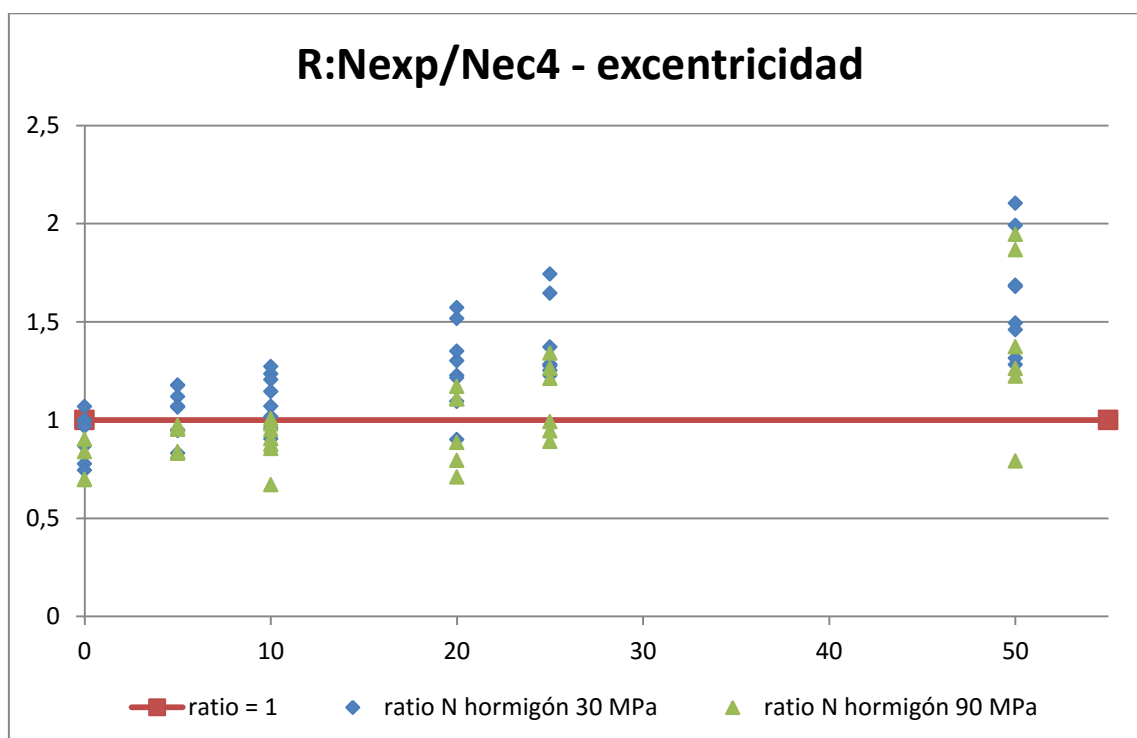
| Code | Fc (MPa) | e (mm) | Ratio N | Ratio M | ω | $\bar{\lambda}$ | δ | Pandeo local <1 cumple |
|-----------|----------|--------|---------|---------|----------|-----------------|----------|------------------------|
| 119-30-0 | 30 | 0 | 0,776 | 1,000 | 0,608 | 0,112 | 0,378 | 0,867 |
| 119-30-5 | 30 | 5 | 0,831 | 1,038 | 0,608 | 0,112 | 0,378 | 0,867 |
| 119-30-10 | 30 | 10 | 0,904 | 1,129 | 0,608 | 0,112 | 0,378 | 0,867 |
| 119-30-20 | 30 | 20 | 0,901 | 1,126 | 0,608 | 0,112 | 0,378 | 0,867 |
| 119-30-50 | 30 | 50 | 1,283 | 1,602 | 0,608 | 0,112 | 0,378 | 0,867 |
| 121-30-0 | 30 | 0 | 0,992 | 1,000 | 0,831 | 0,103 | 0,454 | 0,650 |
| 120-30-5 | 30 | 5 | 0,951 | 1,147 | 0,831 | 0,103 | 0,454 | 0,650 |
| 120-30-10 | 30 | 10 | 0,960 | 1,158 | 0,831 | 0,103 | 0,454 | 0,650 |
| 120-30-20 | 30 | 20 | 1,096 | 1,321 | 0,831 | 0,103 | 0,454 | 0,650 |
| 120-30-25 | 30 | 25 | 1,276 | 1,539 | 0,831 | 0,103 | 0,454 | 0,650 |
| 120-30-50 | 30 | 50 | 1,315 | 1,586 | 0,831 | 0,103 | 0,454 | 0,650 |
| 7-30-0 | 30 | 0 | 1,069 | 1,000 | 2,038 | 0,120 | 0,671 | 0,589 |
| 12-30-5 | 30 | 5 | 1,177 | 1,096 | 2,130 | 0,122 | 0,681 | 0,603 |
| 4-30-10 | 30 | 10 | 1,235 | 1,155 | 2,096 | 0,121 | 0,677 | 0,598 |
| 1-30-20 | 30 | 20 | 1,573 | 1,458 | 2,168 | 0,122 | 0,684 | 0,608 |
| 6-30-25 | 30 | 25 | 1,744 | 1,652 | 1,998 | 0,119 | 0,666 | 0,584 |
| 12-30-50 | 30 | 50 | 2,104 | 1,960 | 2,130 | 0,122 | 0,681 | 0,603 |
| 13-30-0 | 30 | 0 | 1,000 | 1,000 | 1,625 | 0,126 | 0,619 | 0,594 |
| 16-30-5 | 30 | 5 | 1,119 | 1,197 | 1,682 | 0,127 | 0,627 | 0,604 |
| 16-30-10 | 30 | 10 | 1,273 | 1,362 | 1,682 | 0,127 | 0,627 | 0,604 |
| 16-30-20 | 30 | 20 | 1,518 | 1,624 | 1,682 | 0,127 | 0,627 | 0,604 |
| 16-30-25 | 30 | 25 | 1,646 | 1,762 | 1,682 | 0,127 | 0,627 | 0,604 |
| 16-30-50 | 30 | 50 | 1,992 | 2,132 | 1,682 | 0,127 | 0,627 | 0,604 |
| 13-90-0 | 90 | 0 | 0,697 | 1,000 | 0,656 | 0,157 | 0,396 | 0,594 |
| 5-90-5 | 90 | 5 | 0,840 | 0,878 | 0,656 | 0,157 | 0,396 | 0,594 |
| 4-90-10 | 90 | 10 | 0,877 | 0,911 | 0,665 | 0,158 | 0,399 | 0,598 |
| 8-90-20 | 90 | 20 | 1,108 | 1,159 | 0,656 | 0,157 | 0,396 | 0,594 |
| 6-90-25 | 90 | 25 | 1,265 | 1,348 | 0,634 | 0,156 | 0,388 | 0,584 |
| 2-90-50 | 90 | 50 | 1,945 | 2,283 | 0,536 | 0,151 | 0,349 | 0,537 |
| 38-30-0 | 30 | 0 | 0,869 | 1,000 | 0,990 | 0,117 | 0,498 | 0,774 |
| 39-30-5 | 30 | 5 | 0,947 | 1,082 | 0,981 | 0,116 | 0,495 | 0,770 |
| 39-30-10 | 30 | 10 | 1,017 | 1,163 | 0,981 | 0,116 | 0,495 | 0,770 |
| 39-30-20 | 30 | 20 | 1,227 | 1,402 | 0,981 | 0,116 | 0,495 | 0,770 |
| 39-30-25 | 30 | 25 | 1,285 | 1,469 | 0,981 | 0,116 | 0,495 | 0,770 |

ANÁLISIS NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DE DIFERENTES SOLUCIONES ESTRUCTURALES A BASE DE PILARES MIXTOS TIPO CONCRETE-FILLED STEEL TUBE

| Code | F _c (MPa) | e (mm) | Ratio N | Ratio M | ω | $\bar{\lambda}$ | δ | Pandeo local <1 cumple |
|-----------|-------------------------|-----------|---------|---------|----------|-----------------|----------|---------------------------|
| 38-30-50 | 30 | 50 | 1,687 | 1,919 | 0,990 | 0,117 | 0,498 | 0,774 |
| 38-90-0 | 90 | 0 | 0,697 | 1,000 | 0,442 | 0,149 | 0,306 | 0,774 |
| 20-90-5 | 90 | 5 | 0,837 | 0,733 | 0,558 | 0,154 | 0,358 | 0,870 |
| 23-90-10 | 90 | 10 | 0,906 | 0,845 | 0,503 | 0,152 | 0,335 | 0,826 |
| 19-90-20 | 90 | 20 | 1,108 | 1,004 | 0,527 | 0,153 | 0,345 | 0,846 |
| 24-90-25 | 90 | 25 | 1,341 | 1,346 | 0,449 | 0,149 | 0,310 | 0,780 |
| 18-90-50 | 90 | 50 | 1,868 | 1,780 | 0,487 | 0,151 | 0,327 | 0,813 |
| 93-30-5f | 30 | 5 | 1,178 | 1,281 | 1,078 | 0,084 | 0,519 | 0,780 |
| 93-30-10f | 30 | 10 | 1,205 | 1,311 | 1,078 | 0,084 | 0,519 | 0,780 |
| 93-30-20f | 30 | 20 | 1,302 | 1,417 | 1,078 | 0,084 | 0,519 | 0,780 |
| 93-30-25f | 30 | 25 | 1,226 | 1,334 | 1,078 | 0,084 | 0,519 | 0,780 |
| 93-30-50f | 30 | 50 | 1,495 | 1,626 | 1,078 | 0,084 | 0,519 | 0,780 |
| 22-90-5f | 90 | 5 | 0,953 | 0,886 | 0,509 | 0,111 | 0,338 | 0,831 |
| 40-90-10f | 90 | 10 | 1,007 | 0,942 | 0,505 | 0,111 | 0,336 | 0,828 |
| 41-90-20f | 90 | 20 | 0,796 | 0,791 | 0,456 | 0,109 | 0,313 | 0,787 |
| 17-90-25f | 90 | 25 | 0,992 | 0,876 | 0,558 | 0,113 | 0,358 | 0,870 |
| 21-90-50f | 90 | 50 | 0,000 | 0,000 | 0,592 | 0,114 | 0,372 | 0,000 |
| 33-30-0 | 30 | 0 | 0,968 | 1,000 | 1,387 | 0,112 | 0,581 | 0,645 |
| 33-30-5 | 30 | 5 | 1,070 | 1,156 | 1,387 | 0,112 | 0,581 | 0,645 |
| 37-30-10 | 30 | 10 | 1,146 | 1,231 | 1,411 | 0,113 | 0,585 | 0,650 |
| 37-30-20 | 30 | 20 | 1,351 | 1,451 | 1,411 | 0,113 | 0,585 | 0,650 |
| 36-30-25 | 30 | 25 | 1,372 | 1,415 | 1,581 | 0,117 | 0,612 | 0,688 |
| 36-30-50 | 30 | 50 | 1,681 | 1,734 | 1,581 | 0,117 | 0,612 | 0,688 |
| 33-90-0 | 90 | 0 | 0,902 | 1,000 | 0,627 | 0,138 | 0,385 | 0,645 |
| 28-90-5 | 90 | 5 | 0,974 | 0,767 | 0,906 | 0,150 | 0,475 | 0,775 |
| 31-90-10 | 90 | 10 | 0,951 | 0,888 | 0,654 | 0,139 | 0,395 | 0,659 |
| 105-90-20 | 90 | 20 | 1,171 | 1,163 | 0,587 | 0,136 | 0,370 | 0,624 |
| 27-90-25 | 90 | 25 | 1,213 | 1,022 | 0,791 | 0,145 | 0,442 | 0,724 |
| 32-90-50 | 90 | 50 | 1,373 | 1,298 | 0,639 | 0,139 | 0,390 | 0,651 |
| 34-30-5f | 30 | 5 | 1,065 | 1,129 | 1,438 | 0,083 | 0,590 | 0,657 |
| 34-30-10f | 30 | 10 | 1,070 | 1,135 | 1,438 | 0,083 | 0,590 | 0,657 |
| 34-30-20f | 30 | 20 | 1,215 | 1,288 | 1,438 | 0,083 | 0,590 | 0,657 |
| 34-30-25f | 30 | 25 | 1,253 | 1,329 | 1,438 | 0,083 | 0,590 | 0,657 |
| 34-30-50f | 30 | 50 | 1,461 | 1,549 | 1,438 | 0,083 | 0,590 | 0,657 |
| 26-90-5f | 90 | 5 | 0,959 | 0,742 | 0,982 | 0,112 | 0,495 | 0,807 |
| 35-90-10f | 90 | 10 | 0,981 | 0,876 | 0,718 | 0,104 | 0,418 | 0,690 |
| 29-90-20f | 90 | 20 | 0,887 | 0,733 | 0,845 | 0,108 | 0,458 | 0,749 |
| 30-90-25f | 90 | 25 | 0,892 | 0,801 | 0,711 | 0,104 | 0,416 | 0,687 |
| 25-90-50f | 90 | 50 | 1,262 | 1,079 | 0,786 | 0,106 | 0,440 | 0,722 |
| 86-30-0 | 30 | 0 | 0,744 | 1,000 | 0,586 | 0,112 | 0,369 | 1,387 |
| 86-90-0 | 90 | 0 | 0,839 | 1,000 | 0,262 | 0,149 | 0,207 | 1,387 |
| 86-90-5 | 90 | 5 | 0,832 | 0,895 | 0,237 | 0,155 | 0,191 | 1,387 |

| Code | Fc (MPa) | e (mm) | Ratio N | Ratio M | ω | $\bar{\lambda}$ | δ | Pandeo local <1 cumple |
|-----------|----------|--------|---------|---------|----------|-----------------|----------|------------------------|
| 86-90-10 | 90 | 10 | 0,671 | 0,721 | 0,237 | 0,155 | 0,191 | 1,387 |
| 86-90-20 | 90 | 20 | 0,710 | 0,764 | 0,237 | 0,155 | 0,191 | 1,387 |
| 86-90-25 | 90 | 25 | 0,946 | 1,017 | 0,237 | 0,155 | 0,191 | 1,387 |
| 86-90-50 | 90 | 50 | 1,223 | 1,217 | 0,262 | 0,149 | 0,207 | 1,387 |
| 86-90-10f | 90 | 10 | 0,856 | 0,852 | 0,262 | 0,101 | 0,207 | 1,387 |
| 86-90-50f | 90 | 50 | 0,791 | 0,787 | 0,262 | 0,101 | 0,207 | 1,387 |

En esta primera gráfica representaremos el ratio de seguridad de axil frente a la excentricidad aplicada en cada caso.



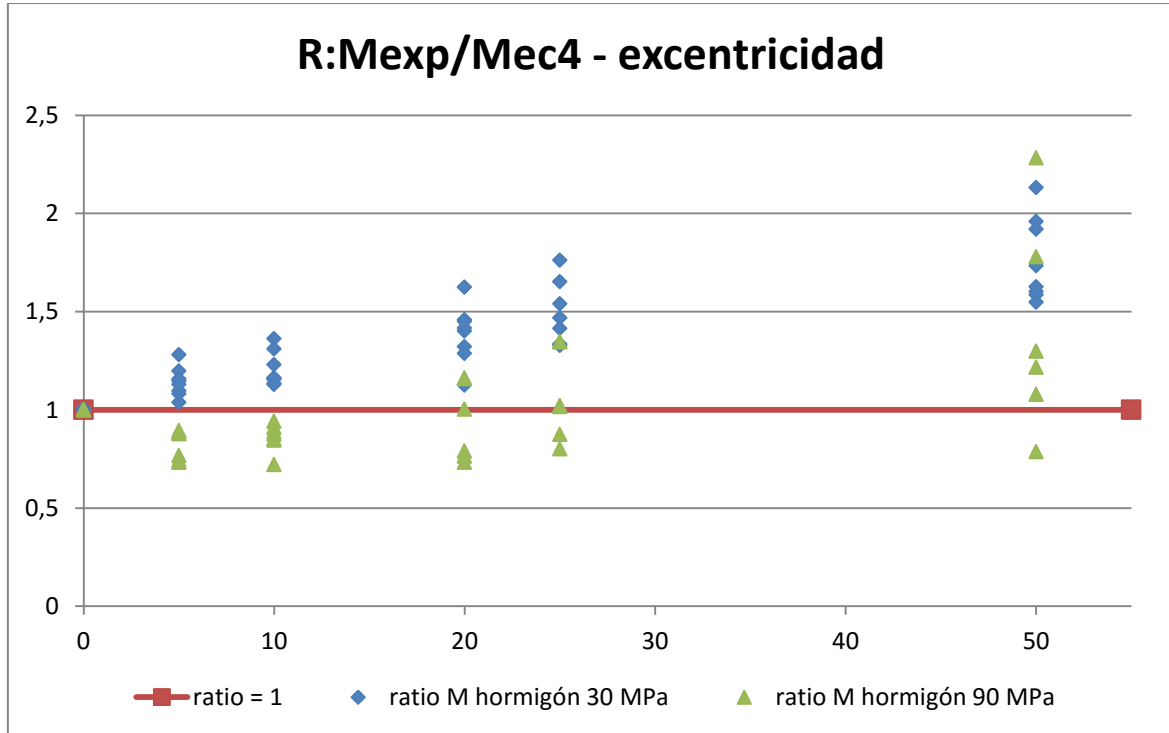
Observamos un cumplimiento mayor en hormigones de 30 MPa que para hormigones de 90 MPa.

Con hormigón de 30 MPa deberían cumplir la gran mayoría ya que los pilares mixtos con este tipo de hormigón sí los plantea el EC4. **Así para perfiles rectangulares y cuadrados podemos concluir que la norma para hormigones de 30 MPa es válida ya que se está por el lado de la seguridad en la gran parte de los ensayos exceptuando casos aislados.**

Para hormigones de 90 MPa estamos en numerosos ensayos por debajo de la seguridad, sobretodo con excentricidades pequeñas. Por lo que en perfiles rectangulares, según este estudio, no sería seguro el diseño de pilares mixtos de hormigón de alta resistencia con el método simplificado del EC4.

Además el gráfico indica una mayor seguridad en ensayos mayores excentricidades aplicadas. Esto ocurre tanto para hormigones de 30 Mpa, como para de 90 MPa, llegando a ser seguros incluso los pilares con HAR.

Se repite la gráfica pero esta vez indicando el ratio de Momentos en lugar del de Axiles. Las gráficas, como era de esperar, son muy parecidas.



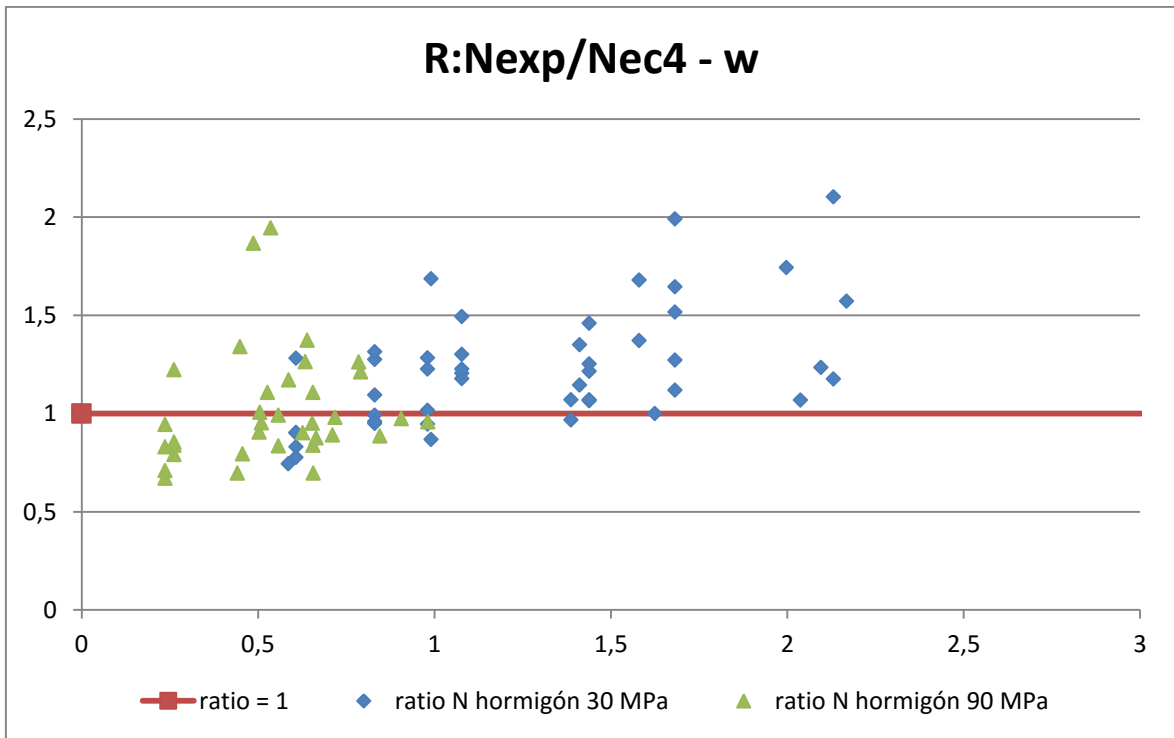
Para finalizar con estas dos gráficas se muestra a continuación ciertos resultados de interés.

| | |
|--|---------|
| Mínimo ratio de seguridad para axiles con hormigones de 30 MPa: | 0,74 |
| Mínimo ratio de seguridad para axiles con hormigones de 90 MPa: | 0,67 |
| Promedio del ratio de seguridad para axiles con hormigones de 30 MPa: | 1,23 |
| Promedio del ratio de seguridad para axiles con hormigones de 90 MPa: | 1,02 |
| Mínimo ratio de seguridad para momentos con hormigones de 30 MPa: | 1 (e=0) |
| Mínimo ratio de seguridad para momentos con hormigones de 90 MPa: | 0,72 |
| Promedio del ratio de seguridad para momentos con hormigones de 30 MPa: | 1,34 |
| Promedio del ratio de seguridad para momentos con hormigones de 90 MPa: | 1,01 |

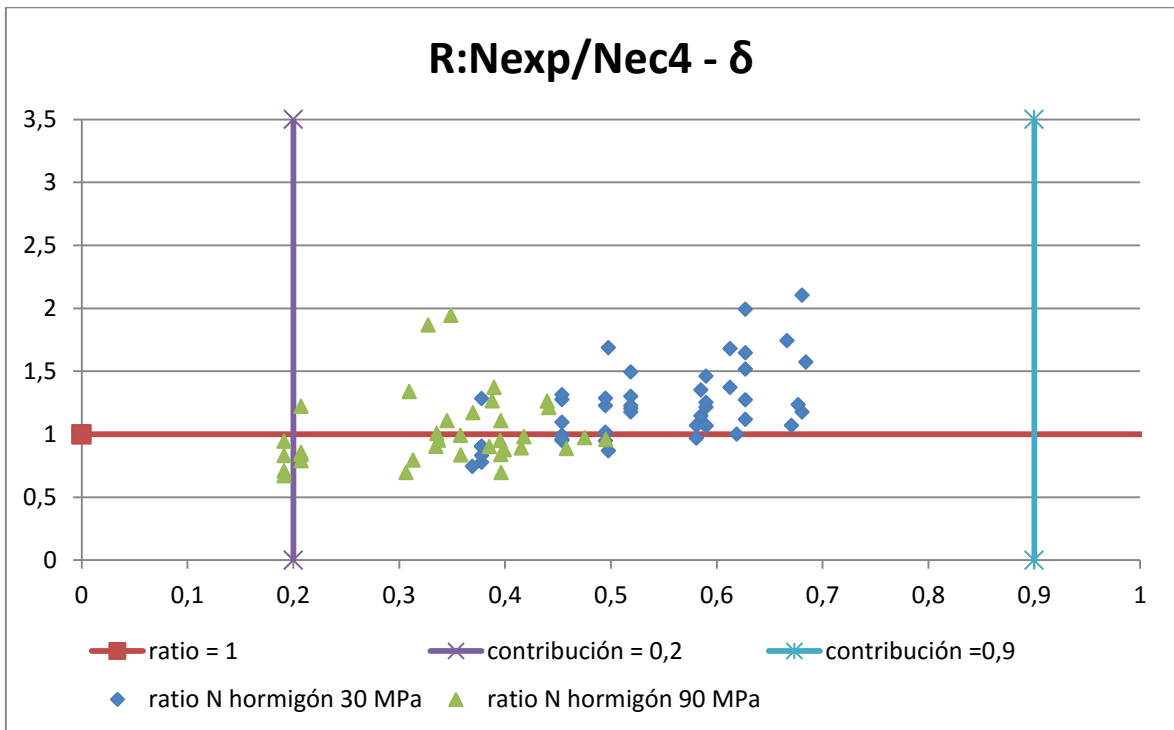
En la tabla observamos como a pesar de que el mínimo ratio de seguridad par axiles con hormigón de 30 MPa sea 0,74 es algo aislado ya que su promedio es mucho más elevado, 1,23. Esto es ya que la gran mayoría de puntos sí están del lado de seguridad en este caso pudiendo dejar invalidado ese punto (ese ensayo de 0,74).

Además vemos como para hormigones de 90 MPa el mínimo ratio es de unos 0,7. Además el promedio se eleva hasta 1. **Esto quiere decir que se podría estudiar utilizar un coeficiente que minore la carga última del pilar mixto para así poder utilizar el método simplificado con este tipo de hormigones. Este coeficiente reductor, según dicho estudio, valdría alrededor de 0,7.** Incluso podría estudiarse el uso de diferentes coeficientes para diferentes excentricidades. Aunque como se observa en la gráfica **C:Nexp/Nec4 - excentricidad**, a pesar de exista una tendencia a estar del lado de seguridad con excentricidades mayores, el menor ratio de seguridad para cada excentricidad se parecen más. Por esto último parece mejor el uso de un coeficiente general de 0,7 para todas las excentricidades.

Se grafica también estos ratios de seguridad frente a los siguientes parámetros.



Se puede observar una tendencia a obtener mayor seguridad cuanto más cuantía mecánica presenta el ensayo.

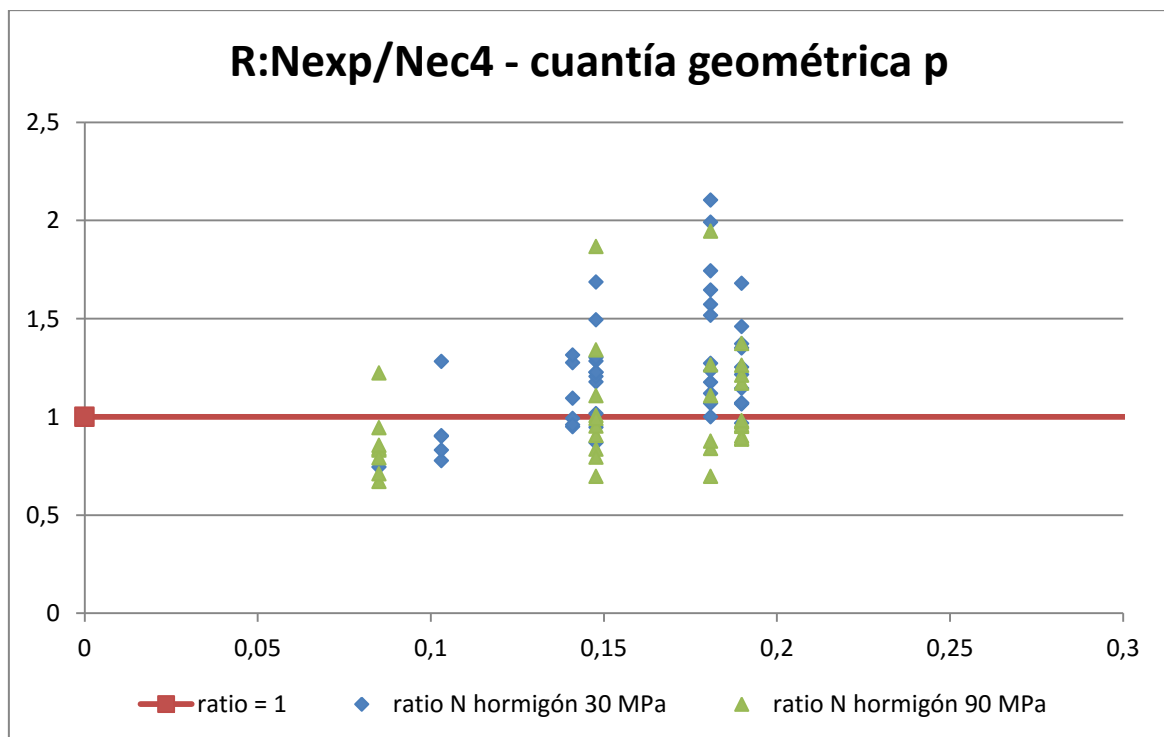


Tanto δ como w son menores con hormigones de 90 MPa como es lógico por su fórmula, La resistencia característica del hormigón f_{ck} se encuentra en el denominador en ambas expresiones para calcular δ y w .

Además ocurre lo mismo con la contribución relativa, cuanto mayor sea ésta, mayores son las cargas máximas obtenidas. Esto se ve con mayor claridad en los hormigones de 30 MPa. De todas maneras no hay que dejar que el acero aporte la gran parte de la resistencia ya que esto podría dar a contribuciones relativas mayores que 0,9 ya que no se estaría cumpliendo la limitación planteada en el EC4 y la ventaja de añadir hormigón al pilar sería mínima. Aunque para que esto sea posible se ha de hablar de un hormigón de muy baja resistencia aportando muy poca sección de hormigón).

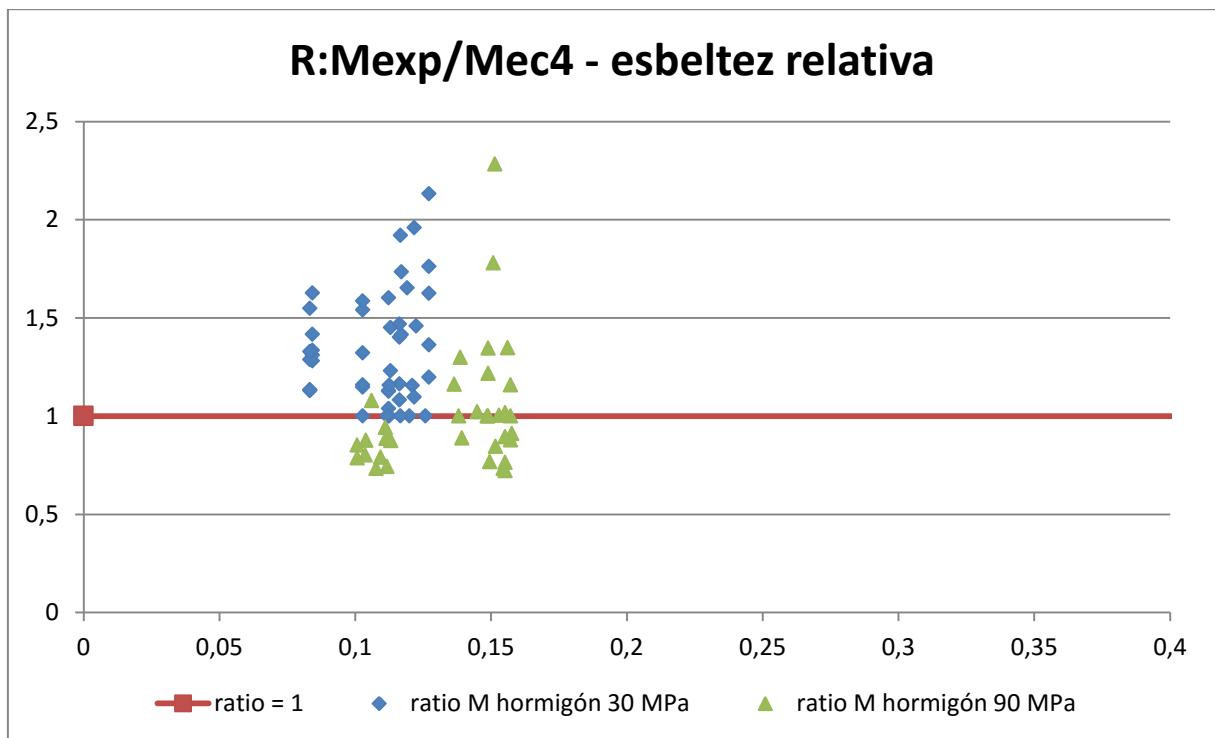
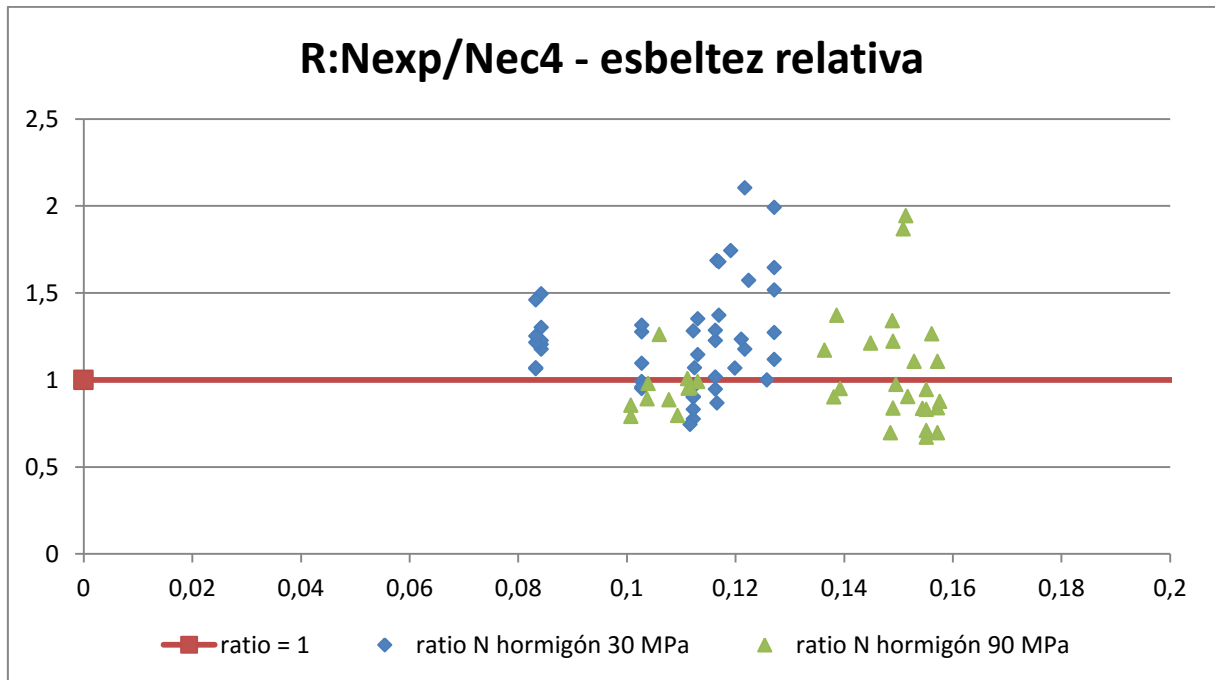
Por otro lado, los pilares que no han cumplido la limitación impuesta por el EC4 de que la contribución sea mayor de 0,2 han fallado todos. **Se verifica pues dicha limitación.**

De las dos gráficas anteriores ($C:N_{exp}/N_{ec4} - w$ y $C:N_{exp}/N_{ec4} - \delta$) se puede concluir que **el pilar mixto se comporta mejor con mayores cuantía mecánicas y contribuciones relativas, es decir cuanto más resistencia aporte el acero al pilar mixto**, ya sea con secciones mayores o límites elásticos mayores. En nuestro caso en concreto se refiere en mayor medida a secciones mayores ya que la mayoría de ensayos han sido realizados con tubos comprados con límites elásticos de 275 MPa. Además se puede observar también una tendencia a mayores grados de seguridad cuanto más cuantía geométrica, la cual solo compara las secciones, $\rho = A_s/A_c$.



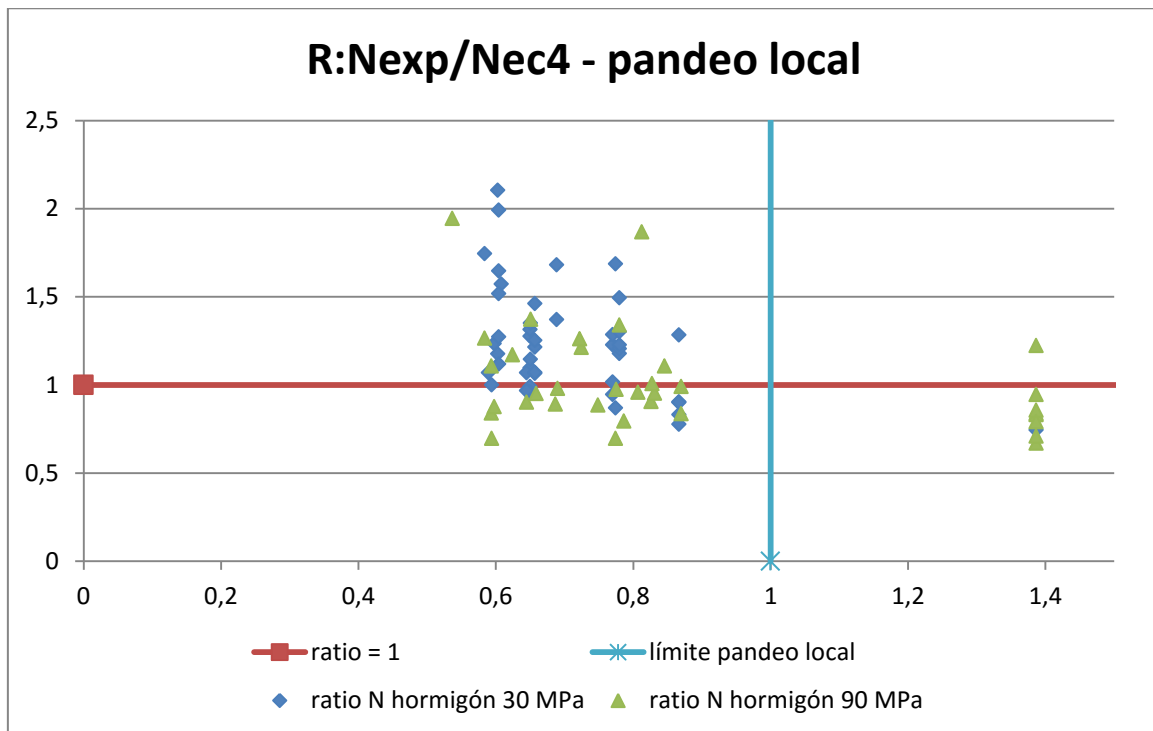
Además aquí se puede observar cómo afecta el aumento de la sección de acero comparando con los distintos perfiles ya que todos los ensayos de cada perfil tienen una cuantía mecánica igual. **Se observa bien pues que a mayores secciones de acero (mayor cuantía mecánica) se acaban consiguiendo más puntos del lado de la seguridad.**

En cambio, representando la esbeltez relativa frente a los ratios:



No se acaba de visualizar algún patrón común o tendencia en la gráfica. Siempre se cumple la limitación de que la esbeltez ha de ser menor de 2 ya que el estudio se diseñó para esbelteces pequeñas (estudio seccional) menores a 0,4

Finalmente representamos también el grado de cumplimiento de la limitación por pandeo local frente al ratios de seguridad para axiles de nuevo. No se grafica el de momentos por los grandes parecidos que muestran ambos dos.



De la gráfica podemos concluir que **con perfiles rectangulares y cuadrados rellenos de hormigón de 30 MPa existe una pequeña tendencia al fallo al acercarse a la limitación del pandeo local impuesto por el Eurocódigo 4**. En cambio **para hormigones de 90 MPa no se observa esta tendencia**. Esto podría justificarse ya que el hormigón de 30 MPa es menos resistente dejando pandear más fácilmente al acero y así podría verse más afectado por esta limitación. En cambio para hormigones de 90 MPa el hormigón con mayor resistencia obligaría al acero en mayor medida a pandear localmente (abollar) hacia fuera lo que requiere de mayores solicitaciones.

De todas maneras, **para perfiles rectangulares y cuadrados cuando no se ha cumplido la limitación de pandeo local la tendencia ha sido claramente hacia el fallo del pilar antes de lo que indica el EC4**.

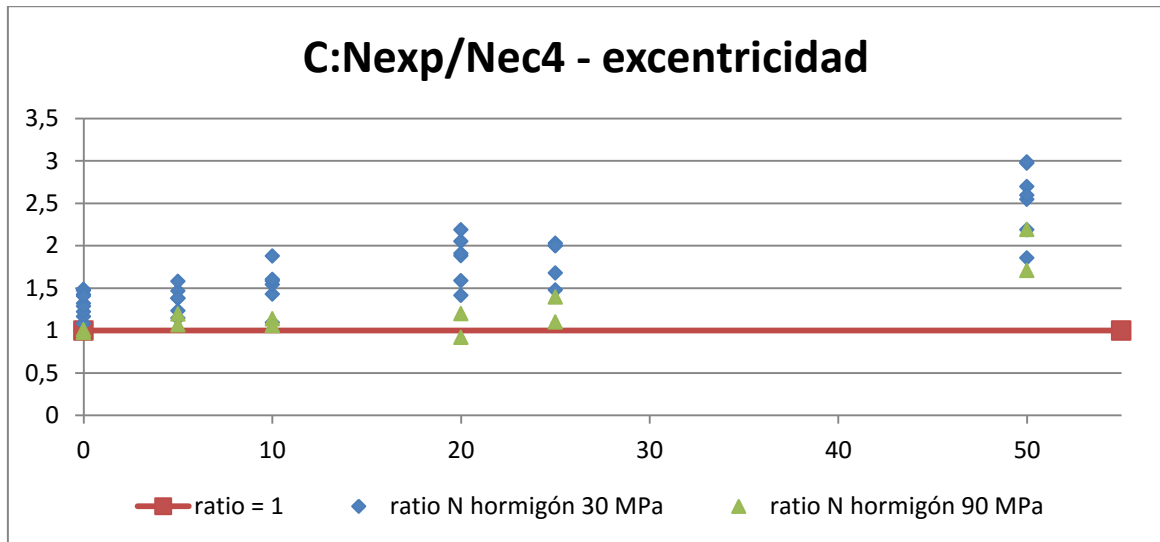
7.4.2. Comparación con perfiles Circulares

Tabla de resultados:

| Code | fc (MPa) | e (mm) | ratio N | ratio M | cuantía mecánica w | λ | δ | pandeo local |
|----------|----------|--------|---------|---------|--------------------|-----------|----------|--------------|
| 70-30-0 | 30 | 0 | 1,083 | 1,000 | 0,511 | 0,102 | 0,338 | 0,782 |
| 70-30-5 | 30 | 5 | 1,147 | 1,300 | 0,511 | 0,102 | 0,338 | 0,782 |
| 70-30-10 | 30 | 10 | 1,092 | 1,238 | 0,511 | 0,102 | 0,338 | 0,782 |
| 70-30-20 | 30 | 20 | 1,414 | 1,603 | 0,511 | 0,102 | 0,338 | 0,782 |
| 70-30-25 | 30 | 25 | 1,479 | 1,676 | 0,511 | 0,102 | 0,338 | 0,782 |
| 70-30-50 | 30 | 50 | 1,857 | 2,105 | 0,511 | 0,102 | 0,338 | 0,782 |
| 70-90-0 | 90 | 0 | 1,011 | 1,000 | 0,205 | 0,143 | 0,170 | 0,782 |
| 70-90-5 | 90 | 5 | 1,067 | 1,099 | 0,205 | 0,143 | 0,170 | 0,782 |
| 70-90-10 | 90 | 10 | 1,138 | 1,171 | 0,205 | 0,143 | 0,170 | 0,782 |
| 70-90-20 | 90 | 20 | 0,918 | 0,945 | 0,205 | 0,143 | 0,170 | 0,782 |
| 70-90-25 | 90 | 25 | 1,101 | 1,133 | 0,205 | 0,143 | 0,170 | 0,782 |
| 70-90-50 | 90 | 50 | 1,706 | 1,757 | 0,205 | 0,143 | 0,170 | 0,782 |
| 71-30-0 | 30 | 0 | 1,165 | 1,000 | 0,659 | 0,099 | 0,397 | 0,689 |
| 72-30-5 | 30 | 5 | 1,234 | 1,302 | 0,659 | 0,099 | 0,397 | 0,689 |
| 73-30-10 | 30 | 10 | 1,427 | 1,506 | 0,659 | 0,099 | 0,397 | 0,689 |
| 74-30-20 | 30 | 20 | 1,586 | 1,674 | 0,659 | 0,099 | 0,397 | 0,689 |
| 75-30-25 | 30 | 25 | 1,676 | 1,769 | 0,659 | 0,099 | 0,397 | 0,689 |
| 76-30-50 | 30 | 50 | 2,186 | 2,307 | 0,659 | 0,099 | 0,397 | 0,689 |
| 71-90-0 | 90 | 0 | 0,975 | 1,000 | 0,242 | 0,142 | 0,195 | 0,689 |
| 72-90-5 | 90 | 5 | 1,196 | 1,204 | 0,242 | 0,142 | 0,195 | 0,689 |
| 73-90-10 | 90 | 10 | 1,058 | 1,065 | 0,242 | 0,142 | 0,195 | 0,689 |
| 74-90-20 | 90 | 20 | 1,199 | 1,207 | 0,242 | 0,142 | 0,195 | 0,689 |
| 75-90-25 | 90 | 25 | 1,396 | 1,405 | 0,242 | 0,142 | 0,195 | 0,689 |
| 76-90-50 | 90 | 50 | 2,192 | 2,206 | 0,242 | 0,142 | 0,195 | 0,689 |
| 81-30-0 | 30 | 0 | 1,221 | 1,000 | 0,564 | 0,163 | 0,361 | 0,661 |
| 81-30-5 | 30 | 5 | 1,381 | 1,619 | 0,564 | 0,163 | 0,361 | 0,661 |
| 81-30-10 | 30 | 10 | 1,543 | 1,809 | 0,564 | 0,163 | 0,361 | 0,661 |
| 81-30-20 | 30 | 20 | 1,882 | 2,207 | 0,564 | 0,163 | 0,361 | 0,661 |
| 81-30-25 | 30 | 25 | 1,999 | 2,344 | 0,564 | 0,163 | 0,361 | 0,661 |
| 81-30-50 | 30 | 50 | 2,546 | 2,985 | 0,564 | 0,163 | 0,361 | 0,661 |
| 58-30-0 | 30 | 0 | 1,321 | 1,000 | 0,818 | 0,156 | 0,450 | 0,906 |
| 67-30-5 | 30 | 5 | 1,467 | 1,554 | 0,818 | 0,156 | 0,450 | 0,906 |
| 53-30-10 | 30 | 10 | 1,584 | 1,677 | 0,818 | 0,156 | 0,450 | 0,906 |
| 62-30-20 | 30 | 20 | 2,050 | 2,171 | 0,818 | 0,156 | 0,450 | 0,906 |
| 63-30-25 | 30 | 25 | 2,030 | 2,149 | 0,818 | 0,156 | 0,450 | 0,906 |
| 61-30-50 | 30 | 50 | 2,973 | 3,147 | 0,818 | 0,156 | 0,450 | 0,906 |
| 83-30-0 | 30 | 0 | 1,285 | 1,000 | 0,590 | 0,137 | 0,371 | 0,624 |
| 83-30-5 | 30 | 5 | 1,379 | 1,624 | 0,590 | 0,137 | 0,371 | 0,624 |
| 83-30-10 | 30 | 10 | 1,602 | 1,886 | 0,590 | 0,137 | 0,371 | 0,624 |
| 83-30-20 | 30 | 20 | 1,909 | 2,247 | 0,590 | 0,137 | 0,371 | 0,624 |

| Code | fc (MPa) | e (mm) | ratio N | ratio M | cuantía mecánica w | λ | δ | pandeo local |
|-----------|----------|--------|---------|---------|--------------------|-----------|----------|--------------|
| 83-30-25 | 30 | 25 | 2,001 | 2,356 | 0,590 | 0,137 | 0,371 | 0,624 |
| 83-30-50 | 30 | 50 | 2,987 | 3,517 | 0,590 | 0,137 | 0,371 | 0,624 |
| 133-30-0 | 30 | 0 | 1,485 | 1,000 | 1,064 | 0,140 | 0,516 | 0,433 |
| 127-30-5 | 30 | 5 | 1,579 | 1,660 | 1,064 | 0,140 | 0,516 | 0,433 |
| 127-30-20 | 30 | 20 | 2,187 | 2,299 | 1,064 | 0,140 | 0,516 | 0,433 |
| 131-30-50 | 30 | 50 | 2,699 | 2,836 | 1,064 | 0,140 | 0,516 | 0,433 |
| 132-30-0 | 30 | 0 | 1,469 | 1,000 | 1,860 | 0,125 | 0,650 | 0,264 |
| 130-30-10 | 30 | 10 | 1,879 | 1,945 | 1,860 | 0,125 | 0,650 | 0,264 |
| 130-30-50 | 30 | 50 | 2,594 | 2,685 | 1,860 | 0,125 | 0,650 | 0,264 |
| 129-30-0 | 30 | 0 | 1,426 | 1,000 | 1,120 | 0,087 | 0,528 | 0,347 |
| 128-30-0 | 30 | 0 | 1,407 | 1,000 | 1,046 | 0,139 | 0,511 | 0,440 |

En esta primera gráfica representaremos el ratio de seguridad de axil frente a la excentricidad aplicada en cada caso.



De la gráfica se puede concluir que **el método simplificado para perfiles circulares y hormigón de 30 MPa queda verificado para nuestro proyecto**. Además **para perfiles circulares el uso del método simplificado para hormigones con 90 MPa parece seguro con los ensayos realizados en nuestro proyecto**. Esto da pie a estudiar el método simplificado como método en perfiles circulares con HAR. **La diferencia respecto a perfiles rectangulares** que hace que el método en este casi sí este del lado de seguridad **puede deberse al mejor confinamiento que conceden los perfiles circulares**.

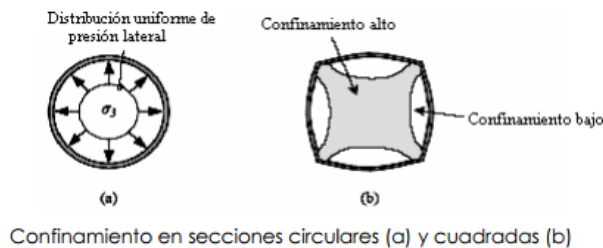
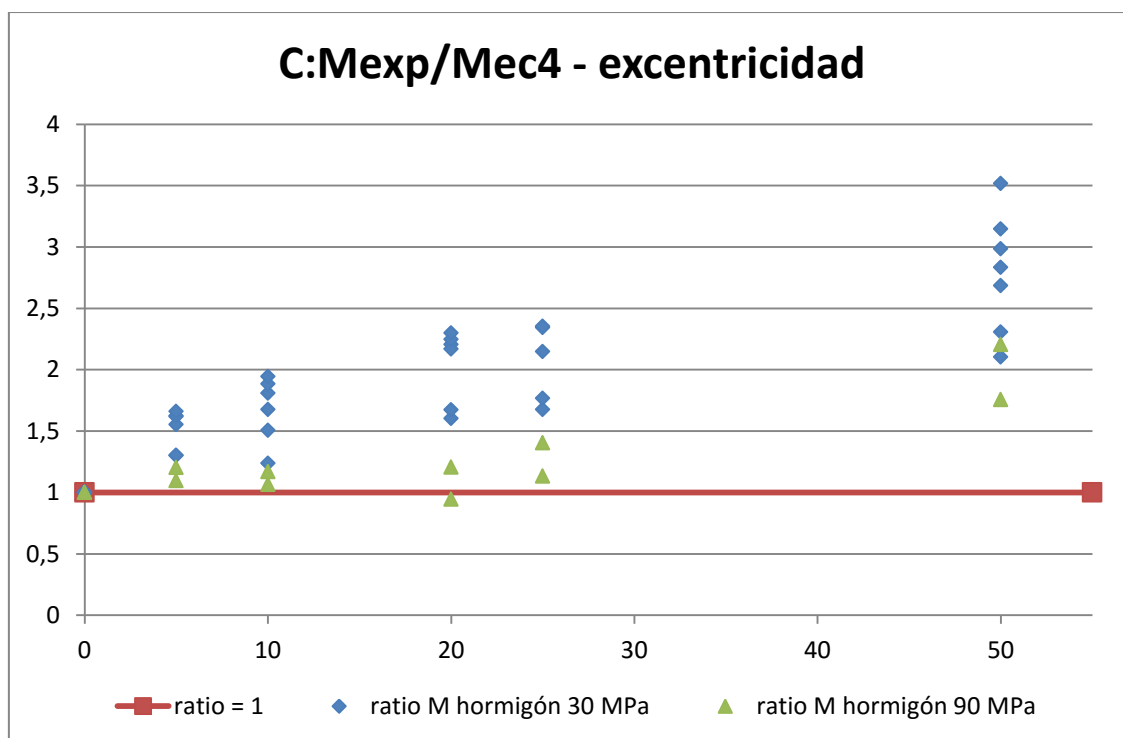


Ilustración 36 Diferencias en el confinamiento de secciones circulares y cuadradas

Representaremos de igual manera el ratio de seguridad de los momentos frente a la excentricidad aplicada en cada caso.



Los dos gráficos anteriores indican una mayor seguridad en ensayos mayores excentricidades aplicadas tanto para hormigones de 30 como de 90 MPa.

Cabe destacar que en los cálculos de los perfiles circulares para hacer relativos el axil y los momentos experimentales se ha hecho lo siguiente. El cálculo de $N_{plRd,exp}$ y $M_{plRd,exp}$ se ha tenido que realizar con el límite elástico f_y teórica, es decir 275 o 355 MPa. No se ha podido realizar el cálculo con los límites elásticos experimentales (como en el caso de rectangulares) ya que no se tienen datos de los ensayos de los tubos de acero. En cambio sí se dispone de la resistencia característica del hormigón experimental $f_{ck,exp}$.

Al dividir los axiles y momentos experimentales por $N_{plRd,exp}$ y $M_{plRd,exp}$ calculados con los límites elásticos del acero teóricos no se está teniendo en cuenta la resistencia real que aporta el acero, siendo ésta posiblemente algo mayor que los 275 o 355 MPa según el tubo. De esta manera sabemos que realmente los ratios deberían ser algo menores que los dados, siendo un error pequeño (más pequeño cuanto más se asemeje el límite elástico del acero teórico al real). Además sabemos que dicha reducción del ratio será menor con hormigones de 90 MPa ya que la contribución del acero en estos casos es menor.

De esta manera podemos concluir nuevamente que para hormigones de 30 MPa quedaríamos del lado de la seguridad aunque con menor grado; y que para hormigones de 90 MPa parece bastante seguro utilizar el método simplificado con ningún o con algún coeficiente que minore las cargas últimas propuestas por el método. Este coeficiente minorará la resistencia en menor medida que el coeficiente para rectangulares.

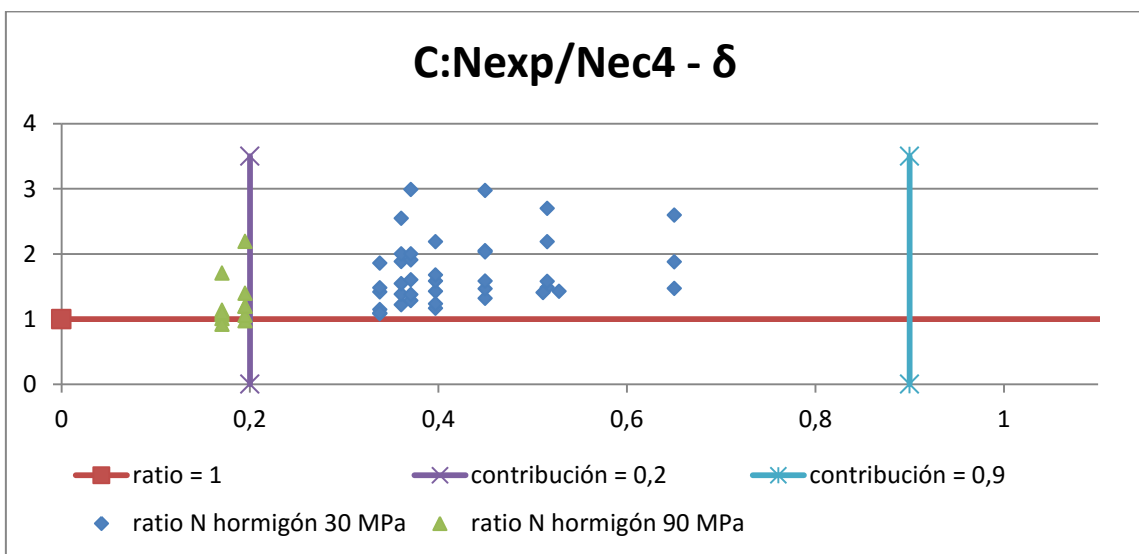
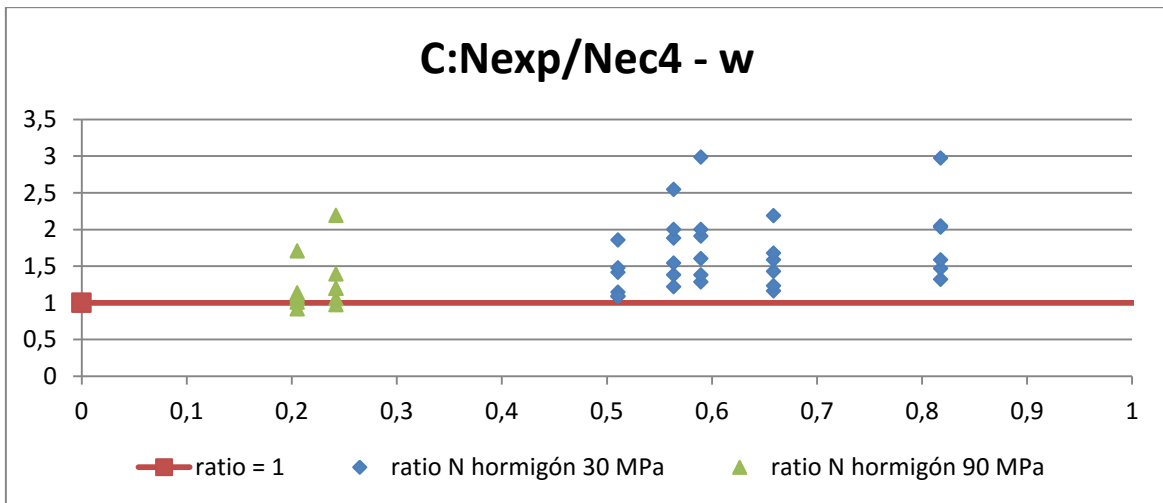
Para corroborar lo anterior nos ayudamos de la siguiente tabla donde mostramos algunos datos de interés.

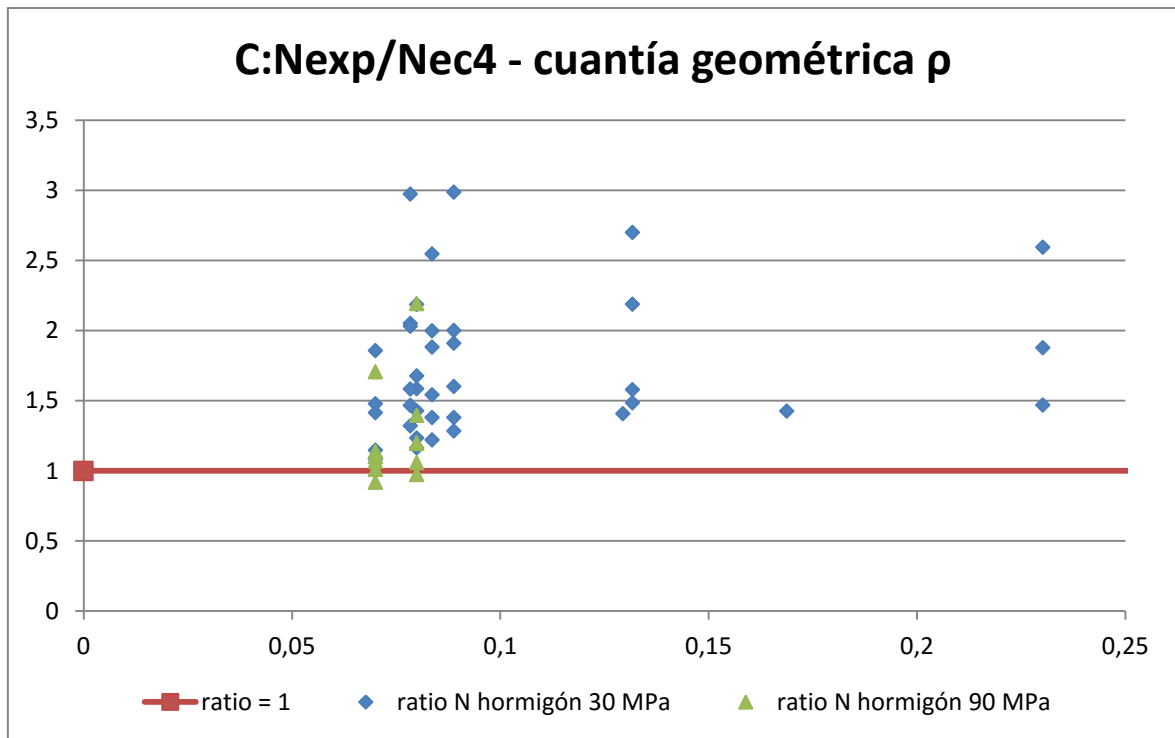
| | |
|---|------|
| Mínimo ratio de seguridad para axiles con hormigones de 30 MPa: | 1,08 |
| Mínimo ratio de seguridad para axiles con hormigones de 90 MPa: | 0,92 |
| Promedio del ratio de seguridad para axiles con hormigones de 30 MPa: | 1,72 |
| Promedio del ratio de seguridad para axiles con hormigones de 90 MPa: | 1,25 |

| | |
|---|---------|
| Mínimo ratio de seguridad para momentos con hormigones de 30 MPa: | 1 (e=0) |
| Mínimo ratio de seguridad para momentos con hormigones de 90 MPa: | 0,95 |
| Promedio del ratio de seguridad para momentos con hormigones de 30 MPa: | 1,8 |
| Promedio del ratio de seguridad para momentos con hormigones de 90 MPa: | 1,27 |

Comparando tanto el ratio de axiles como de momentos se puede ver como el mínimo ratio cumple o casi cumple con un promedio mayor que la unidad, evidenciando así que la mayoría de ensayos sí cumple y los pocos que no cumplen (para hormigones de 90 MPa) presentan un ratio muy cercano a la unidad.

Se grafica también estos ratios de seguridad frente a los siguientes parámetros.

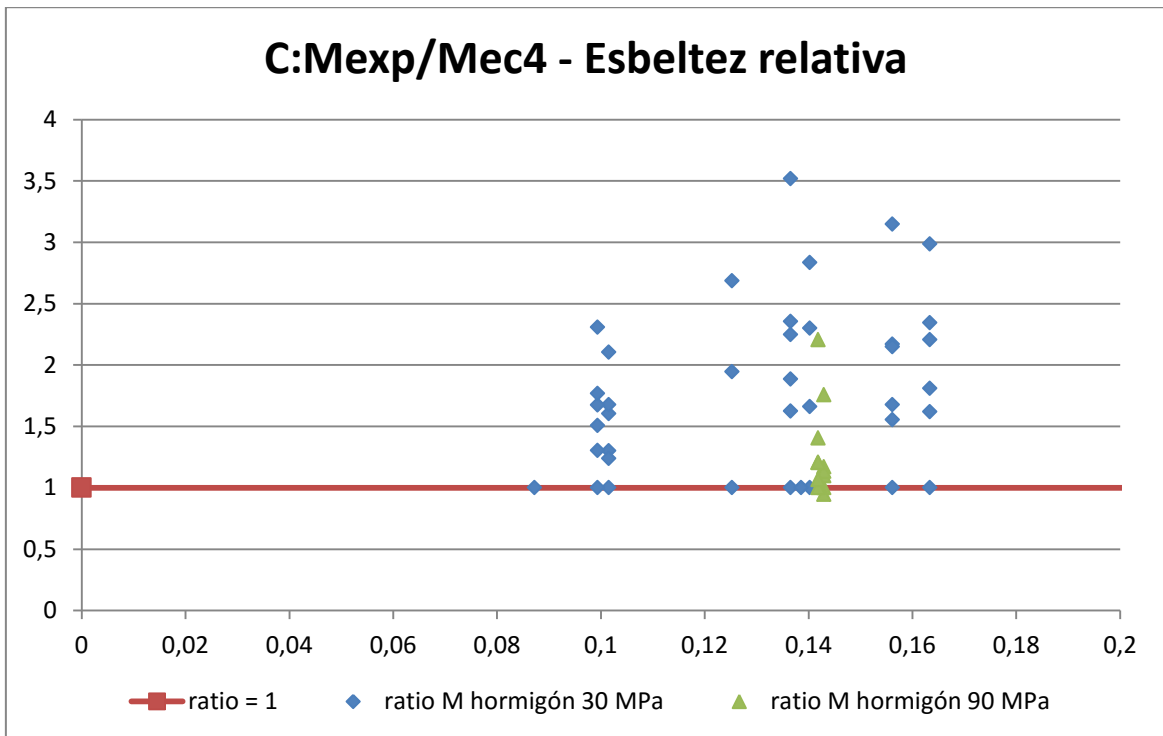
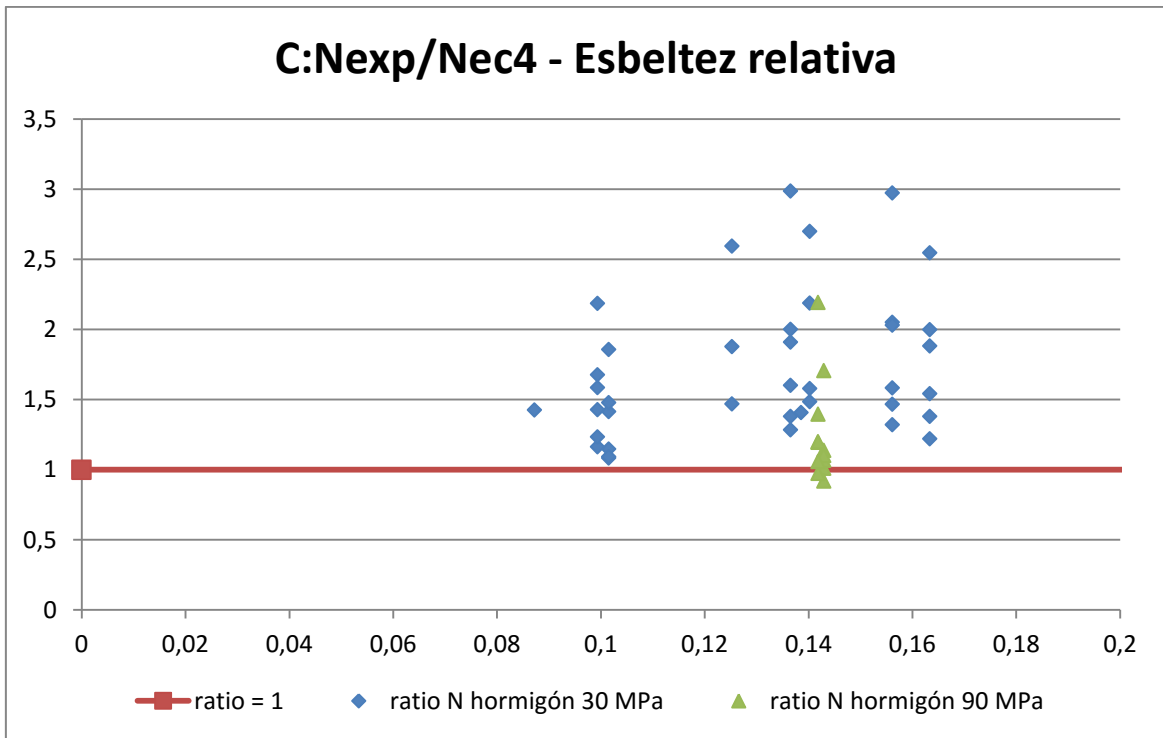




Como ya se ha visto, para perfiles circulares con excentricidades elevadas se tiene un ratio de seguridad elevado, la norma es más restrictiva con excentricidades altas. En cambio, con excentricidades pequeñas, aun cumpliendo en la mayoría de los casos, se tienen ratios más cercanos a la unidad.

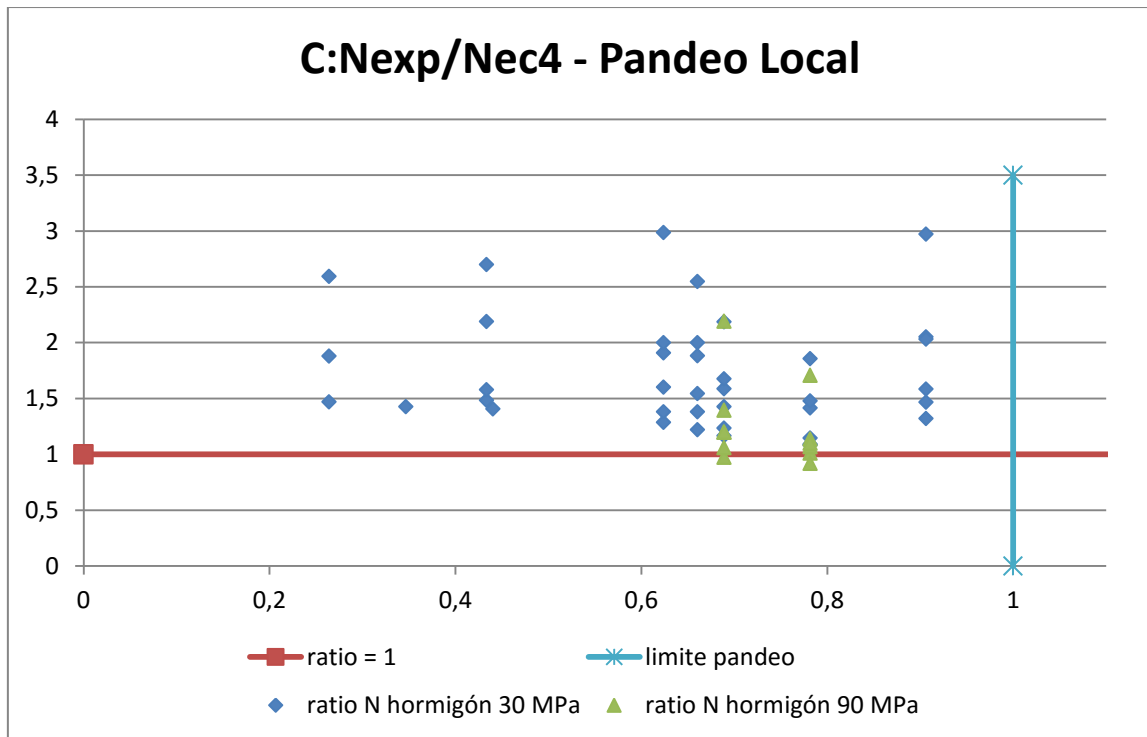
En los perfiles rectangulares y cuadrados parece que haya una leve tendencia a tener mayor seguridad cuanto mayor sea la aportación del acero. Esta vez, ocurre la misma tendencia en los puntos con excentricidades bajas. **Es interesante pues observar como a mayores cuantías geométricas, mecánicas y contribuciones relativas se tiene mayor seguridad precisamente en estos puntos donde no se va tan holgado respecto al límite seguro (ratios cercanos a la unidad).**

En cambio, representando la esbeltez relativa frente a los ratios:



No se acaba de visualizar algún patrón común o tendencia en la gráfica. Siempre se cumple la limitación de que la esbeltez ha de ser menor de 2 ya que el estudio se diseñó para esbelteces pequeñas (estudio seccional) menores a 0,4

Finalmente representamos también el grado de cumplimiento de la limitación por pandeo local frente al ratios de seguridad para axiles de nuevo.



No se observa tendencia general de presentar mayores ratios de seguridad por alejarse de la limitación del pandeo local presentada en el EC4. No se han ensayado perfiles circulares que cumplan dicha limitación por lo que no se puede estudiar la consecuencia de no cumplirla.

Aunque no se presente una tendencia en todos los datos, de igual manera que con la aportación del acero a la resistencia (ρ , δ , ω), sí se puede observar lo siguiente. Al alejarse de la limitación para el pandeo local los puntos con excentricidades pequeñas sí presentan mayores ratios de seguridad. Lo cual vuelve a ser interesante ya que se ha visto que son los puntos que menos seguros han resultado.

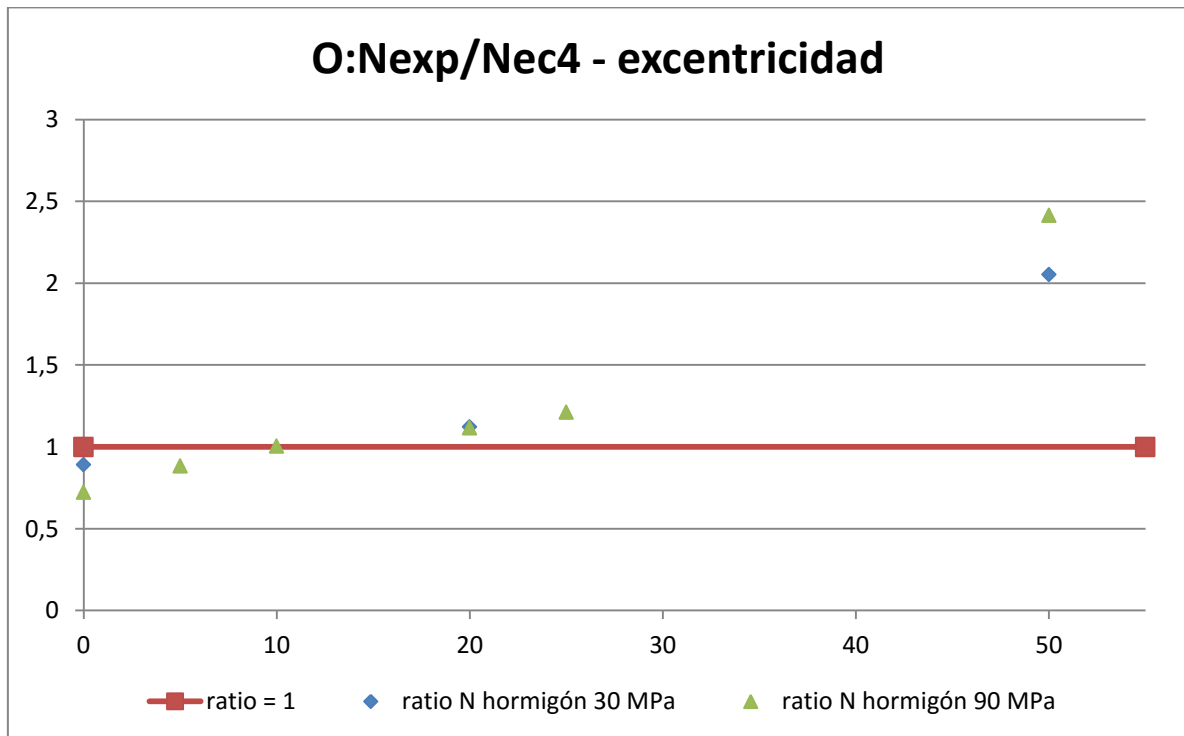
7.4.3. Comparación con perfiles Ovalados

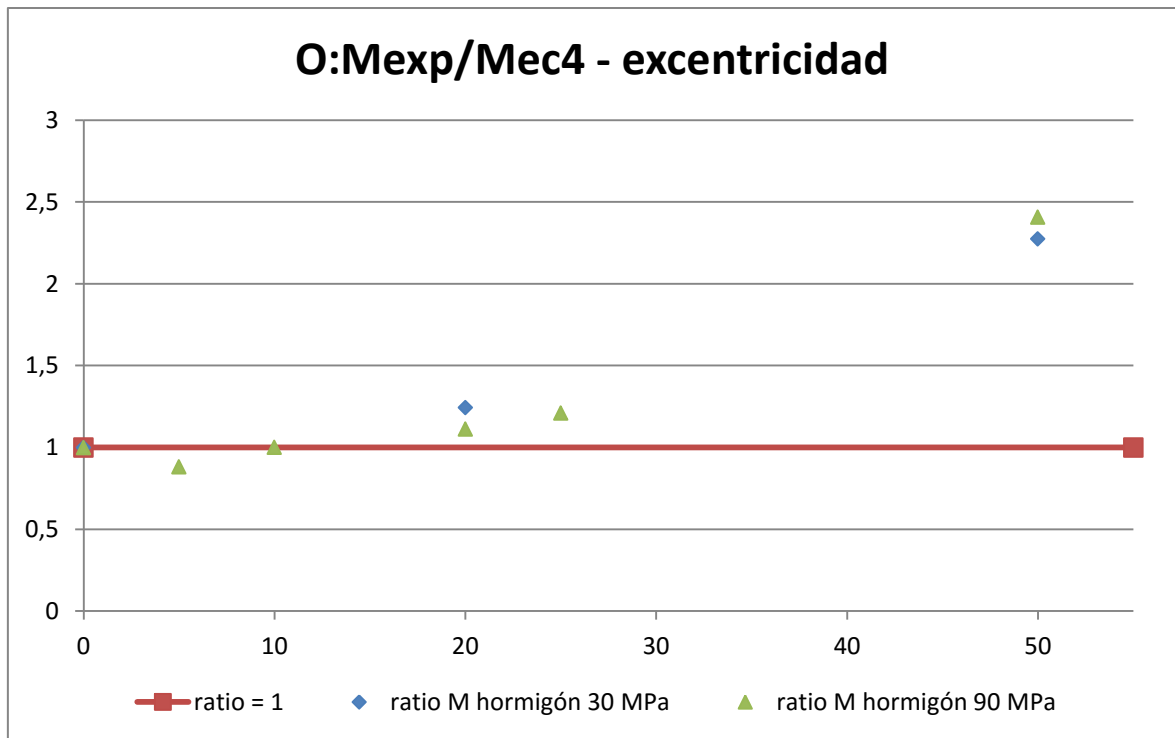
Tabla de resultados:

| Code | fc (MPa) | e (mm) | ratio N | ratio M | cuantía mecánica w | λ | δ | pandeo local |
|-----------|----------|--------|---------|---------|--------------------|-----------|----------|--------------|
| 126-30-0 | 30 | 0 | 0,892 | 1,000 | 0,763 | 0,227 | 0,433 | 1,248 |
| 126-30-20 | 30 | 20 | 1,123 | 1,244 | 0,763 | 0,227 | 0,433 | 1,248 |
| 126-30-50 | 30 | 50 | 2,054 | 2,275 | 0,763 | 0,227 | 0,433 | 1,248 |
| 126-90-0 | 90 | 0 | 0,723 | 1,000 | 0,348 | 0,294 | 0,258 | 1,248 |
| 126-90-5 | 90 | 5 | 0,884 | 0,882 | 0,348 | 0,294 | 0,258 | 1,248 |
| 126-90-10 | 90 | 10 | 1,004 | 1,002 | 0,348 | 0,294 | 0,258 | 1,248 |
| 126-90-20 | 90 | 20 | 1,116 | 1,113 | 0,348 | 0,294 | 0,258 | 1,248 |
| 126-90-25 | 90 | 25 | 1,213 | 1,210 | 0,348 | 0,294 | 0,258 | 1,248 |
| 126-90-50 | 90 | 50 | 2,414 | 2,408 | 0,348 | 0,294 | 0,258 | 1,248 |

Solamente se han ensayado un perfil con sus respectivos rellenos de hormigón de 30 y 90 MPa para diferentes excentricidades. Esto quiere decir que el estudio para este tipo de perfiles no es lo suficientemente amplio como para sacar conclusiones estrictas y bien fundamentadas en los ensayos. De todas maneras se muestran los resultados obtenidos para nuestro perfil.

En esta primera gráfica representaremos el ratio de seguridad de axil frente a la excentricidad aplicada en cada caso.





Sigue la misma tendencia que en perfiles rectangulares, cuadrados y circulares, es decir, el EC4 es más restrictivo con mayor relación M/N o excentricidad. Esto se observa ya que el ratio de seguridad de axil y de momento es mayor para excentricidades elevadas que para excentricidades pequeñas.

En la siguiente tabla mostramos algunos datos de interés obtenidos del estudio.

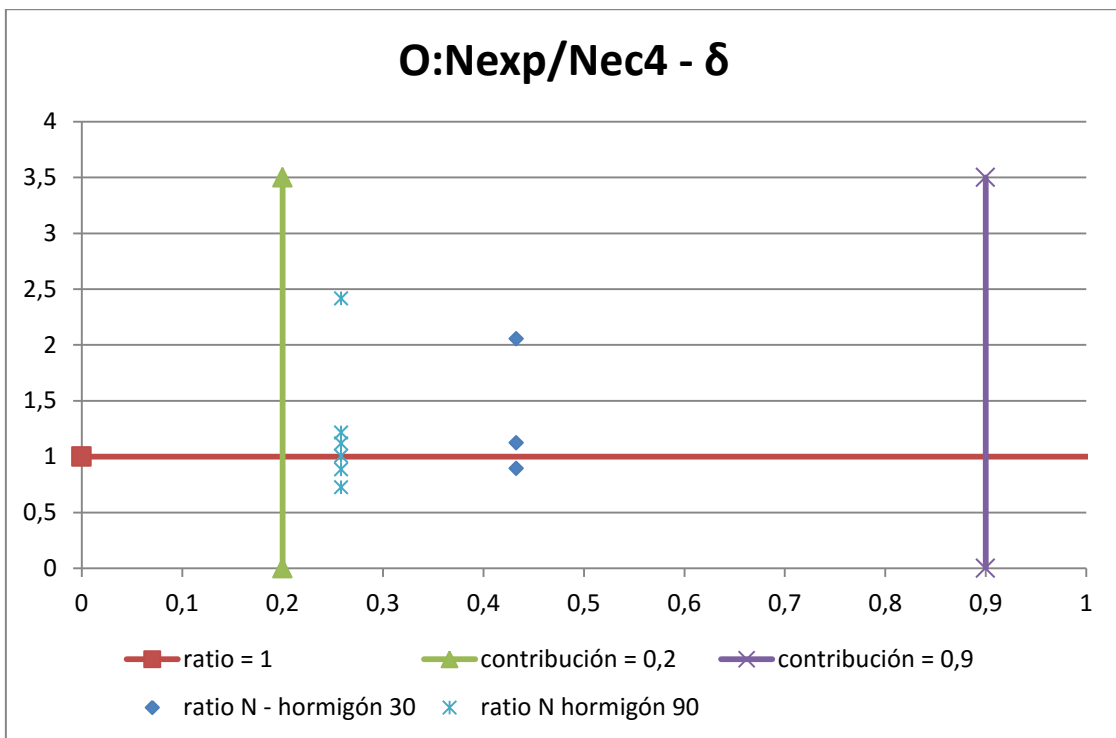
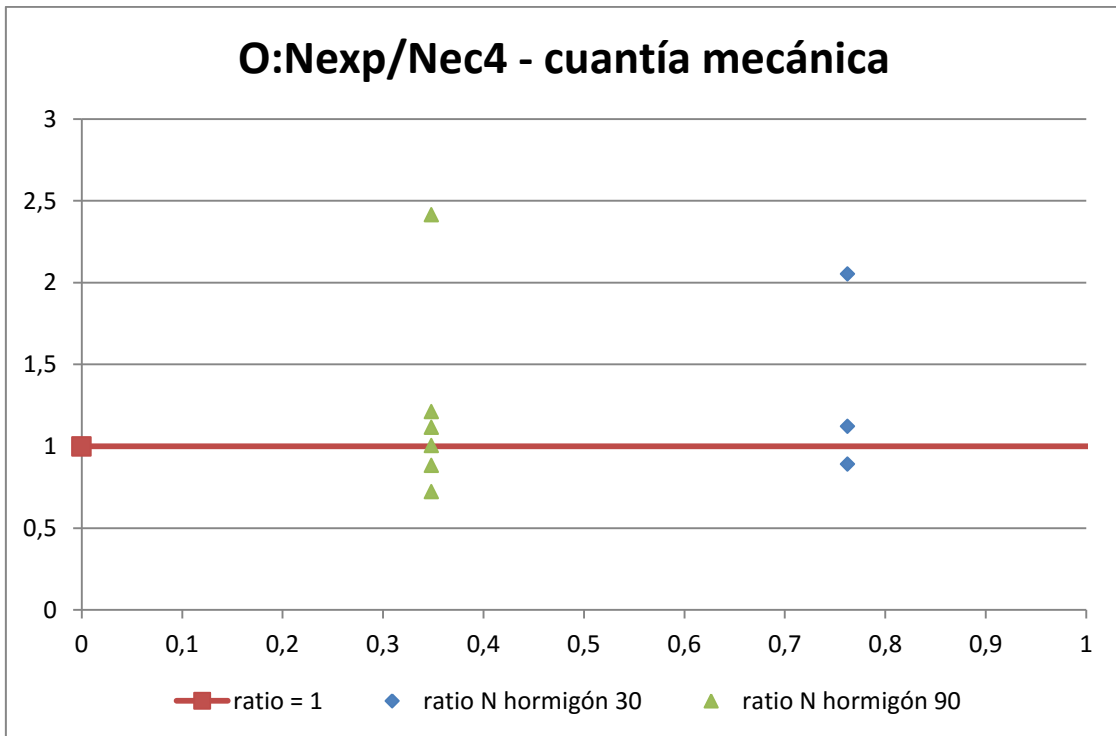
| | |
|---|------|
| Mínimo ratio de seguridad para axiles con hormigones de 30 MPa: | 0,89 |
| Mínimo ratio de seguridad para axiles con hormigones de 90 MPa: | 0,72 |
| Promedio del ratio de seguridad para axiles con hormigones de 30 MPa: | 1,36 |
| Promedio del ratio de seguridad para axiles con hormigones de 90 MPa: | 1,23 |

| | |
|---|---------|
| Mínimo ratio de seguridad para momentos con hormigones de 30 MPa: | 1 (e=0) |
| Mínimo ratio de seguridad para momentos con hormigones de 90 MPa: | 0,88 |
| Promedio del ratio de seguridad para momentos con hormigones de 30 MPa: | 1,51 |
| Promedio del ratio de seguridad para momentos con hormigones de 90 MPa: | 1,27 |

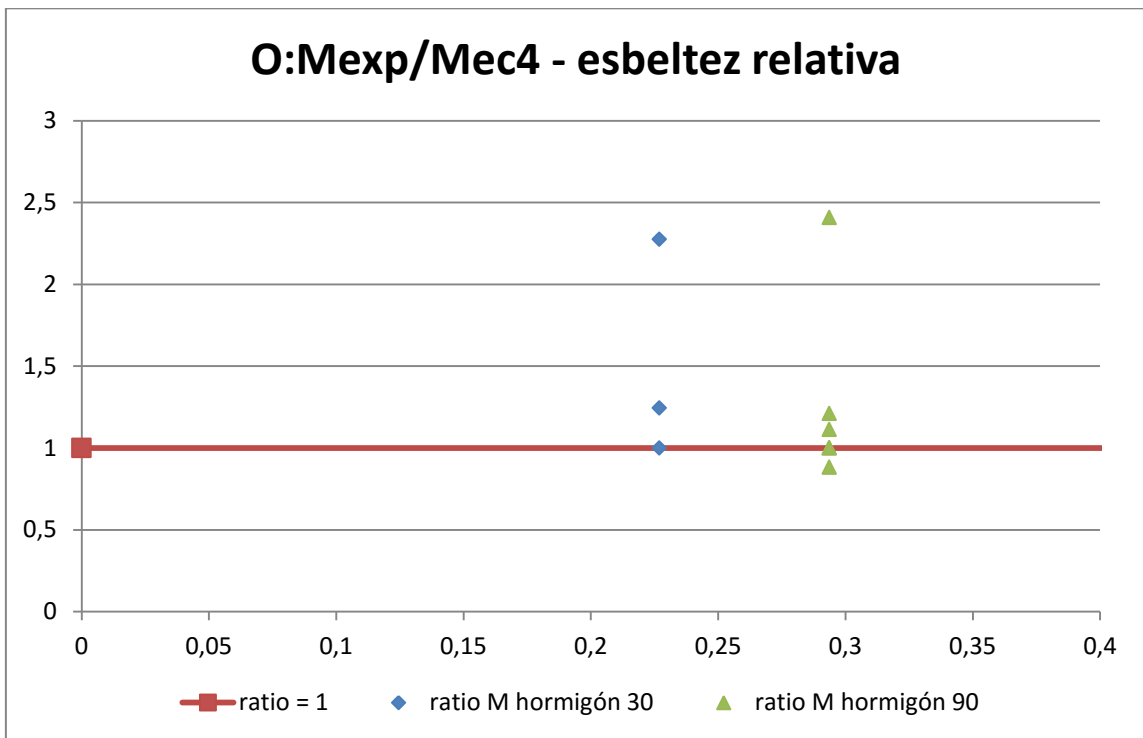
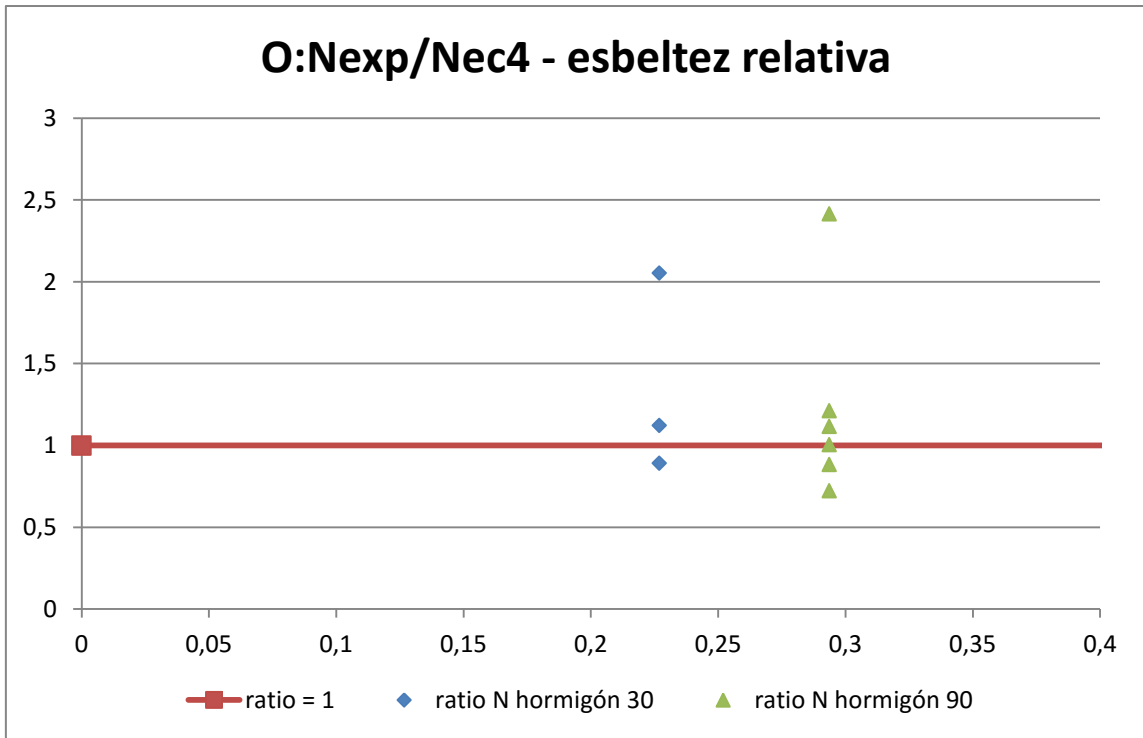
Como se ha dicho, no se pueden sacar conclusiones bien fundamentadas por el poco número de ensayos. De todas maneras se puede observar que para nuestros ensayos el método simplificado para hormigones de 30 MPa estaría muy cercano a ser seguro (Obsérvese gráfica).

Por otro lado, para hormigones de 90 MPa, aunque en la gráfica parece que el resultado sea bastante seguro el ensayo con $e=5$ mm ha dado con una infraseguridad del 28 %. Por lo que sería necesario el uso de un coeficiente para minorar las cargas últimas cuyo valor fuera alrededor de 0,7.

Se grafica también dichos ratios de seguridad frente a los siguientes parámetros.

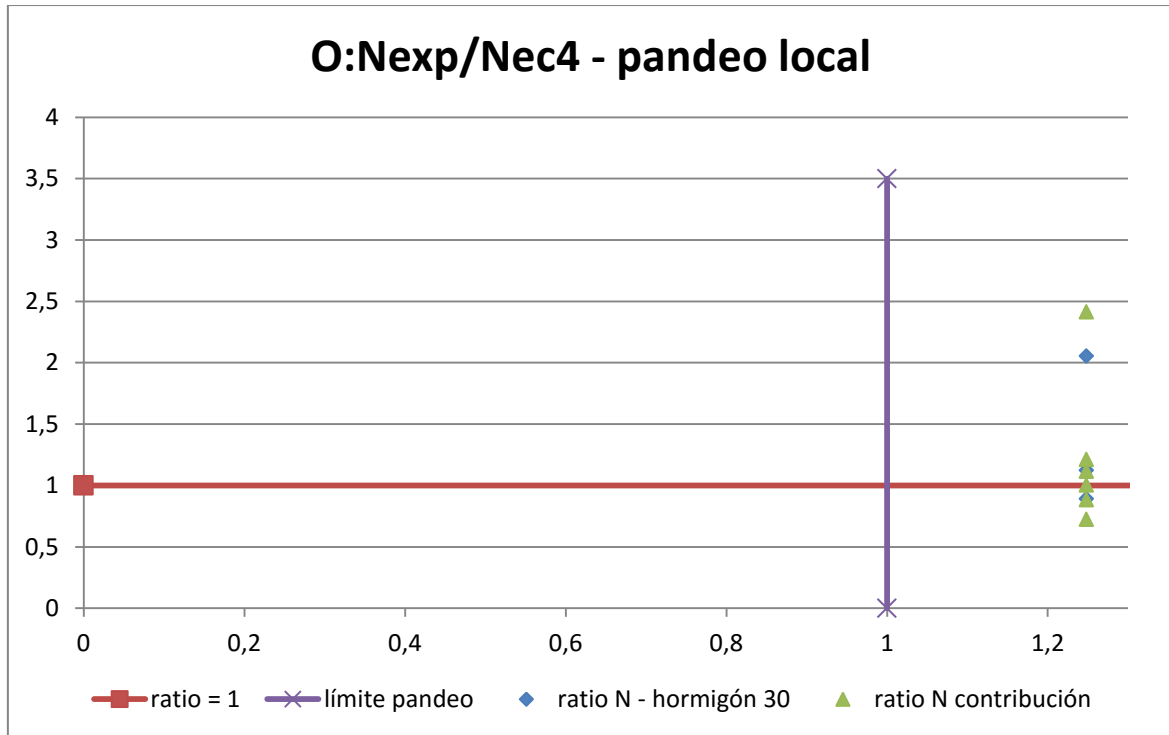


El perfil cumple con la limitación de contribución relativa entre 0,2 y 0,9 para hormigón de 30 y 90 MPa. Se observa como es de esperar que tanto ω , como δ sean menores con hormigones de alta resistencia ya que el acero aunque aportará la misma resistencia al total, aportará en menor grado en términos relativos a la resistencia total porque el hormigón aportará en mayor grado ahora.



Por otro lado como ya se conocía se cumple la limitación de que la esbeltez ha de ser menor de 2 ya que el estudio se diseñó para esbelteces pequeñas (estudio seccional) menores a 0,4.

Finalmente se observa como el perfil ovalado estudiado no cumple la limitación al pandeo local.



7.5. Conclusiones

Tras el estudio realizado y comparado este con el Eurocódigo podemos llegar a las siguientes conclusiones:

- 1) El Método simplificado es más restrictivo, más seguro para mayores excentricidades.
- 2) Según los datos del estudio, queda validado el método simplificado para hormigones de 30 MPa. Tanto en circulares, como en rectangulares.

(En rectangulares se pueden descartar los dos datos con un ratio de unos 0.75, un 25 % de inseguridad ya que el resto de datos quedan por el lado de la seguridad).

| Etiquetas de fila | Mín. de ratio N |
|--------------------------|----------------------------|
| 119-30-0 | 0,77641058 |
| 119-30-10 | 0,904316485 |
| 119-30-20 | 0,901173949 |
| 119-30-5 | 0,831285059 |
| 119-30-50 | 1,283031464 |
| 120-30-10 | 0,960181653 |
| 120-30-20 | 1,095776677 |
| 120-30-25 | 1,276492238 |
| 120-30-5 | 0,950758576 |
| 120-30-50 | 1,315046072 |
| 121-30-0 | 0,99204123 |
| 12-30-5 | 1,177315474 |
| 12-30-50 | 2,104244709 |
| 1-30-20 | 1,572752357 |
| 13-30-0 | 1,000491261 |
| 16-30-10 | 1,273026228 |
| 16-30-20 | 1,517553926 |
| 16-30-25 | 1,646452427 |
| 16-30-5 | 1,118756652 |
| 16-30-50 | 1,991996646 |
| 33-30-0 | 0,968064249 |
| 33-30-5 | 1,070059419 |
| 34-30-10f | 1,070468307 |
| 34-30-20f | 1,215091825 |
| 34-30-25f | 1,253452778 |
| 34-30-50f | 1,460743904 |
| 34-30-5f | 1,065008998 |
| 36-30-25 | 1,371526718 |
| 36-30-50 | 1,68050015 |
| 37-30-10 | 1,146206021 |
| 37-30-20 | 1,351200938 |
| 38-30-0 | 0,868890107 |
| 38-30-50 | 1,686562419 |

| | |
|-----------|-------------|
| 39-30-10 | 1,017449379 |
| 39-30-20 | 1,226540923 |
| 39-30-25 | 1,284990788 |
| 39-30-5 | 0,946651161 |
| 4-30-10 | 1,235068679 |
| 6-30-25 | 1,744128704 |
| 7-30-0 | 1,069030404 |
| 86-30-0 | 0,744451523 |
| 93-30-10f | 1,205219626 |
| 93-30-20f | 1,302387834 |
| 93-30-25f | 1,226485014 |
| 93-30-50f | 1,495103121 |
| 93-30-5f | 1,177958012 |

- 3) Para hormigones de alta resistencia con perfiles rectangulares se podría utilizar un coeficiente para minorar la carga de alrededor de 0,7 (ratio mínimo encontrado en nuestro estudio). Es decir, el método simplificado sin añadir algún coeficiente no es seguro para hormigones de alta resistencia con perfil rectangulares.
- 4) Para hormigones de alta resistencia con perfiles circulares el método simplificado es prácticamente seguro. Véase los resultados en la tabla siguiente:

| Etiquetas de fila | Promedio de ratio N |
|-------------------|---------------------|
| 70-90-0 | 1,011283398 |
| 70-90-10 | 1,137825251 |
| 70-90-20 | 0,918288112 |
| 70-90-25 | 1,100681305 |
| 70-90-5 | 1,067270637 |
| 70-90-50 | 1,706397057 |
| 71-90-0 | 0,974508405 |
| 72-90-5 | 1,195757508 |
| 73-90-10 | 1,058066607 |
| 74-90-20 | 1,199411392 |
| 75-90-25 | 1,395700336 |
| 76-90-50 | 2,192044258 |

Se podría con nuestros ensayos proponer un coeficiente para minorar menor que en el caso de los rectangulares de alrededor de 0,9 (ensayo 70-90-20 con ratio de 0,92).

- 5) Sin llegar a tener una contribución del hormigón muy baja, el aumento de la contribución del acero afecta de manera positiva al comportamiento de los pilares. En perfiles rectangulares y cuadrados se observaba una tendencia a ratios de seguridad mayores. En cambio para perfiles circulares esta tendencia solo se evidencia con ensayos con excentricidades pequeñas, lo que se traduce en un mejor comportamiento ya que son estos puntos (e bajas) los que tendían en mayor medida a la inseguridad.

- 6) El incumplimiento de algunos perfiles de acero a la limitación impuesta en el EC4 referente al pandeo local se ha traducido en una tendencia a la inseguridad para dichos perfiles. Se ha observado esto en los perfiles rectangulares y cuadrados, en los circulares no se han ensayado especímenes con esta limitación incumplida.
- 7) Además para hormigones de 30 MPa se ha podido observar una leve tendencia a ratios de seguridad mayores cuanto más se alejaban los perfiles de la limitación de pandeo. Para perfiles circulares dicha tendencia solo se observaba con excentricidades bajas, lo que es igual interesante ya que, como se ha visto, son los puntos más problemáticos.



Ilustración 37 Pilares mixtos ya ensayados

8. Estudio económico

8.1. Introducción

En el capítulo que nos ocupa se analizan, desde una perspectiva económica, el uso de los pilares mixtos ensayados. Se estudia el pilar óptimo en cada ensayo de entre las perspectivas siguientes:

- Pilar mixto
- Perfil HEB con acero S235
- Perfil HEB con acero S275
- Perfil HEB con acero S355

Para ello para cada ensayo por separado se calcula el precio en €/kg de cada alternativa anterior para así poder escoger el pilar "óptimo". Además se calcula, también para cada ensayo, el ratio de ahorro que se conseguiría utilizando un pilar mixto respecto al uso de perfil de acero más económico. Es decir:

$$\text{Precio pilar mixto}$$

$$\text{Min}(\text{Precio perfil S235}, \text{Precio perfil S275}, \text{Precio perfil S355})$$

Siendo menor que 1 cuando se consigue un ahorro mediante el uso del pilar mixto;

y mayor que 1 cuando el pilar mixto no sería la solución más rentable.

Se ha seleccionado el perfil HEB como alternativa ya que es el perfil más usado y con mejor comportamiento como pilar. La justificación del mejor comportamiento del perfil HEB frente al resto se describe a continuación

Se entiende por concentración de la masa C de un perfil a la relación adimensional entre el área de su sección A y el radio de giro mínimo al cuadrado i^2 . π

$$C = A/i^2$$

Por otro lado,

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}}$$

$$I = i^2 \cdot A$$

Sabemos que a compresión la carga crítica es:

$$P_{crit} = \pi^2 \cdot \frac{E \cdot I}{l^2} = \pi^2 \cdot \frac{E \cdot i^2 \cdot A}{l^2}$$

$$\sigma_{crit} = \frac{P_{crit}}{A} = \pi^2 \cdot \frac{E \cdot A}{l^2} \cdot \frac{i^2}{A} = \pi^2 \cdot \frac{E \cdot A}{l^2} \cdot \frac{1}{C}$$

Se observa pues que a mayor concentración C se tiene un peor comportamiento a compresión.

En la siguiente grafica se muestra la concentración de distintos perfiles para sus diferentes dimensiones.

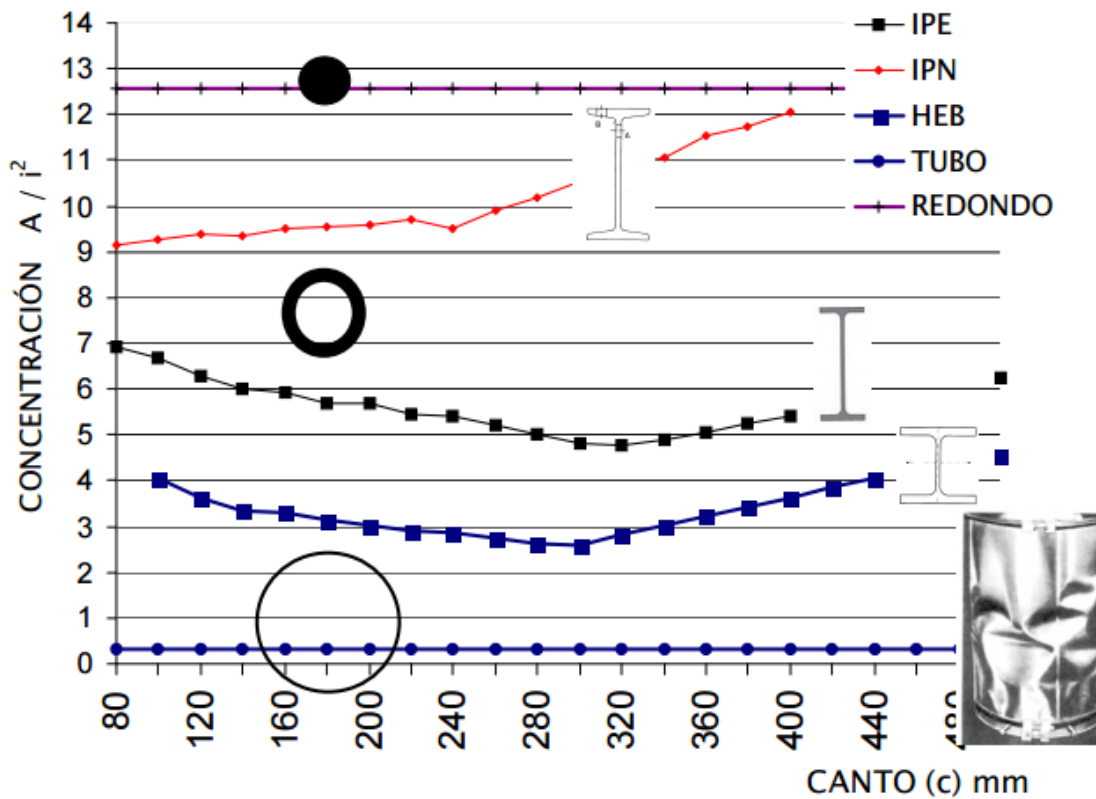


Ilustración 38 Perfil óptimo de acero a compresión

De la gráfica se puede concluir que el mejor perfil sería el tubular hueco, realmente esto no es así ya que acaba fallando antes por el pandeo local o abolladura que presenta este tipo de perfil hueco (aspecto que además se mejora en los pilares mixtos). Por lo que el siguiente perfil óptimo es ya el perfil HEB. Esta es la justificación de que sea el más usado para pilares a compresión y que sea el elegido como alternativa para nuestro estudio.

8.2. Realización del estudio

Para la realización del estudio se deben conocer todos los precios y costes en cualquiera de las alternativas planteadas. Por otro lado, debe calcularse para cada alternativa de perfil de acero que tipo de perfil HEB cumpliría con las especificaciones “demandadas” al pilar mixto. Sendos puntos se tratan a continuación.

8.2.1. Costes asignados a las alternativas

8.2.1.1. Costes en el pilar mixto

Coste hormigón

Para conocer los costes a asignar al pilar mixto, el pilar objeto de dicho estudio, se debe conocer en primer lugar la dosificación para fabricarlo. Esta dosificación, como ya se ha explicado anteriormente en el punto 4.4.1 Hormigón, será la siguiente:

| fck objetivo (MPa) | Cantidad (m3) | Cemento (kg) | Arena (kg) | Grava (Kg) | Agua (Its) | Humo de Sílice (Kg) | Fluidificante (Kg) |
|--------------------|---------------|--------------|------------|------------|------------|---------------------|--------------------|
| 90 | 1 | 570 | 705 | 890 | 180 | 50 | 12,3 |
| 30 | 1 | 307 | 1119 | 666 | 220 | | |

Con la dosificación ya sabemos la composición X_i de cada componente en Kg por m³ de hormigón.

Por otro lado debe conocerse el precio de cada uno de los componentes para así calcular el coste total por m³ de hormigón.

Precio Cemento = 0.18 '€/Kg

Tanto el precio de la arena, como el de la grava se ha calculado conociendo el coste de la compra de 2 toneladas de grava y 2 toneladas de arena en el laboratorio para la fabricación del hormigón. Las 2 toneladas, tanto de grava como de arena, costaron 20 €.

Precio Arena = 20 / 2000 = 0.01 '€/Kg

Precio Grava = 20 / 2000 = 0.01 '€/Kg

Se puede conocer el precio del m³ de agua urbana por comunidades autónomas. (www.iagua.es)

En la página se muestra una gráfica en la que el precio del metro cúbico en Valencia depende del consumo. Para casi todos los consumos el precio está en torno a los 1,5 €/metro cúbicos,

Precio Agua = 1.0547 / 1000 '€/l

El humo de Sílice usado en el laboratorio es el aditivo sikaFume. El precio de ha obtenido de la página web www.materialesdeconstrucciónmadrid.com

Precio Humo de Sílice = 0.88 '€/Kg

El fluidificante que hemos usado en el laboratorio para la fabricación de los hormigones de alta resistencia ha sido el aditivo de la marca SIKA Sika ViscoCrete3425 cuyo precio se ha obtenido de la tarifas proporcionadas por el propio fabricante.

| 1.1 | Superplastificantes | | | | | | | | | | |
|-------|----------------------------------|---|--------------------|--------|-----------------|-------------|-----------------|------|------|---------------|---|
| 1.1.1 | Sikament FF (1) (2) | Superplastificante para hormigón. Consumo: Entre 0,5 y 0,7 % del peso de cemento. | Incoloro | 51997 | Contenedor (m³) | | Contenedor (m³) | 2,37 | kilo | ----- | A |
| 1.1.2 | Sikament-200 R (1) | Superplastificante de efecto prolongado. Consumo: Entre el 1 y 1,5 % del peso del cemento. | Marrón | 168366 | Garrafa (25 kg) | 26 Garrafas | Garrafa (25 kg) | 1,56 | kilo | 8436039588790 | A |
| 1.1.3 | Sika ViscoCrete-20 HE (1) | Superplastificante de alto rendimiento para hormigones. Consumo: Entre 0,5 y 1,5 % del peso de conglomerante dependiendo de que se emplee como superplastificante o reductor de agua. | Marrón | 75471 | Contenedor (m³) | | Contenedor (m³) | 4,36 | kilo | ----- | A |
| 1.1.4 | Sika ViscoCrete-80 (1) | Superplastificante de altas prestaciones de tercera generación para todo tipo de hormigones. Consumo: Consultar hoja de producto. | Verde azulado | 407970 | Contenedor (m³) | | Contenedor (m³) | 4,49 | kilo | ----- | B |
| 1.1.5 | Sika ViscoCrete-3425 (1) | Superplastificante alto rendimiento. Consumo: Para media trabajabilidad: 0,2-0,8 % del peso del cemento. Para una alta trabajabilidad, con baja relación agua/cemento y para hormigón autocompactable: 1,0-1,5 % del peso del cemento. | Líquido incoloro | 119652 | Contenedor (m³) | | Contenedor (m³) | 4,17 | kilo | ----- | A |
| 1.1.6 | Sika ViscoCrete-3500 (1) | Superplastificante polivalente de alto rendimiento para hormigones. Consumo: Entre 0,5 y 1,5 % del peso de conglomerante dependiendo de que se emplee como superplastificante o gran reductor de agua. | Marrón amarillento | 118697 | Contenedor (m³) | | Contenedor (m³) | 4,04 | kilo | ----- | B |

Precio Fluidificante = 4.17 '€/Kg

Por otro lado se asignan los precios de mano de obra y del agente filmógeno. Gracias al generador de precios de cype que proporciona un desglose los costes se ha podido conseguir dichos costes por metros cúbicos de hormigón.

Coste Oficial estructurista = 6.23 '€/m3

Coste Ayudante estructurista = 23.5 '€/m3

Coste Agente Filmógeno = 8.24 '€/m3

Coste directo complementario = 5.04 €/m3

EHS016 m³ Pilar circular de hormigón visto. 258,85€
Pilar de sección circular de hormigón visto, de 30 cm de diámetro medio, realizado con hormigón HAF-30/CR/F/20/IIa, con un contenido de fibras de refuerzo Sikafiber M-12 "SIKA" de 0,1 kg/m³ y vertido con cubilote, y acero UNE-EN 10080 B 500 S, cuantía 120 kg/m³.

| Código | Unidad | Descripción | Rendimiento | Precio unitario | Importe | |
|---|--------|--|-------------|-----------------|---------------------------------|---------------|
| 1 Materiales | | | | | | |
| mt07aco020b | Ud | Separador homologado para pilares. | 12,000 | 0,08 | 0,72 | |
| mt07aco010c | kg | Ferralla elaborada en taller industrial con acero en barras corrugadas, UNE-EN 10080 B 500 S, diámetros varios. | 120,000 | 0,81 | 97,20 | |
| mt08var050 | kg | Alambre galvanizado para atar, de 1,30 mm de diámetro. | 0,800 | 1,10 | 0,88 | |
| mt10ha010ma | m³ | Hormigón HA-30/F/20/IIa, fabricado en central. | 1,050 | 88,95 | 90,98 | |
| mt08fs010 | kg | Fibras de polipropileno monofilamento, Sikafiber M-12 "SIKA", de 12 mm de longitud y 31 micras de diámetro, para el refuerzo de hormigones y morteros. | 0,100 | 4,50 | 0,45 | |
| mt08cur010a | l | Agente filmógeno para curado de hormigones con acabado visto. | 2,000 | 4,12 | 8,24 | |
| Subtotal materiales: | | | | | 198,25 | |
| 2 Mano de obra | | | | | | |
| mo043 | h | Oficial 1º ferrallista. | 0,680 | 18,10 | 12,31 | |
| mo080 | h | Ayudante ferrallista. | 0,680 | 18,94 | 11,52 | |
| mo045 | h | Oficial 1º estructurista, en trabajos de puesta en obra del hormigón. | 0,344 | 18,10 | 6,23 | |
| mo092 | h | Ayudante estructurista, en trabajos de puesta en obra del hormigón. | 1,387 | 18,94 | 23,50 | |
| Subtotal mano de obra: | | | | | 53,56 | |
| 3 Costes directos complementarios | | | | | | |
| % | | Costes directos complementarios | 2,000 | 251,81 | 5,04 | |
| Coste de mantenimiento decenal: 20,55€ en los primeros 10 años. | | | | | Costes directos (1+2+3): | 258,85 |

Una vez conocidos todos los precios de los componentes para la fabricación del hormigón y los costes de manos de obra y agente filmógeno se puede calcular el coste total por metro cúbico de hormigón.

$$\text{Coste dosificación} \left(\frac{\text{€}}{\text{m}^3 \text{ de hormigón}} \right) = \sum \left(X_i \left(\frac{\text{Kg componente}}{\text{m}^3 \text{ de hormigón}} \right) \cdot \text{Precio}_i \left(\frac{\text{€}}{\text{Kg componente}} \right) \right)$$

$$\text{Coste obra y filmógeno} \left(\frac{\text{€}}{\text{m}^3 \text{ de hormigón}} \right) = \text{Coste Oficial} + \text{Coste Ayudante} + \text{Coste Filmógeno}$$

$$\text{Coste total hormigón} = \text{Coste dosificación} + \text{Coste obra y filmógeno} + \text{Coste directo complementario}$$

Se calcula finalmente el coste en €/m del pilar para cada uno de los ensayos realizados.

Basta con multiplicar el coste calculado anteriormente por el Área de hormigón en cada pilar.

$$\text{Coste hormigón} \left(\frac{\text{€}}{\text{m de hormigón}} \right) = \text{Coste total hormigón} \left(\frac{\text{€}}{\text{m}^3 \text{ de hormigón}} \right) \cdot \text{Area hormigón} (\text{m}^2)$$

Coste Perfil de acero exterior

En primer lugar también se utiliza el generador de precios Cype consiguiendo los siguientes precios:

Precio Perfil S235 = 2.18 €/Kg

Precio Perfil S275 = 2.21 €/Kg

Precio Perfil S355 = 2.25 €/Kg

A continuación mostramos el desglose de todos ellos.

| Código | Unidad | Descripción | Rendimiento | Precio unitario | Importe |
|--|--------|---|----------------------------|-----------------|---------|
| S235 | | | | | |
| EAS010 | kg | Acero en pilares. | | | |
| Acero S235JR en pilares, con piezas simples de perfiles laminados en caliente de las series IPN, IPE, UPN, HEA, HEB o HEM | | | | | |
| 1 | | | | | |
| Materiales | | | | | |
| mt07ala01 | kg | Acero laminado UNE-EN 10025 S235JR, en perfiles laminados en caliente, piezas simples, para aplicaciones estructurales. | 1,050 | 0,96 | 1,01 |
| mt27pfi010 | l | Imprimación de secado rápido, formulada con resinas alquídicas modificadas y fosfato de zinc. | 0,050 | 4,80 | 0,24 |
| Subtotal materiales: | | | | | 1,25 |
| 2 | | | | | |
| Equipo y maquinaria | | | | | |
| mq08sol02 | h | Equipo y elementos auxiliares para soldadura eléctrica. | 0,017 | 3,10 | 0,05 |
| Subtotal equipo y | | | | | 0,05 |
| 3 | | | | | |
| Mano de obra | | | | | |
| mo047 | h | Oficial 1ª montador de estructura metálica. | 0,024 | 18,10 | 0,43 |
| mo094 | h | Ayudante montador de estructura metálica. | 0,024 | 16,94 | 0,41 |
| Subtotal mano de obra: | | | | | 0,84 |
| 4 | | | | | |
| Costes directos complementarios | | | | | |
| | % | Costes directos complementarios | 2,000 | 2,14 | 0,04 |
| Coste de mantenimiento decenal: 0,07€ en los primeros 10 años. | | | Costes directos (1+2+3+4): | | |
| | | | 2,18 | | |

| S275 | | | | | | | | | |
|---|--------|---|--|--|----------------------------|-----------------|---------|--|--|
| EAS010 | kg | Acero en pilares. | | | | | | | |
| Acero S275JR en pilares, con piezas simples de perfiles laminados en caliente de las series IPN, IPE, UPN, HEA, HEB o HEM | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| Código | Unidad | Descripción | | | Rendimiento | Precio unitario | Importe | | |
| 1 | | Materiales | | | | | | | |
| mt07ala01 | kg | Acero laminado UNE-EN 10025 S275JR, en perfiles laminados en caliente, piezas simples, para aplicaciones estructurales. | | | 1,050 | 0,99 | 1,04 | | |
| 0h | | | | | | | | | |
| mt27pfi010 | l | Imprimación de secado rápido, formulada con resinas alquídicas modificadas y fosfato de zinc. | | | 0,050 | 4,80 | 0,24 | | |
| | | | | | Subtotal materiales: | | 1,28 | | |
| 2 | | Equipo y maquinaria | | | | | | | |
| mq08sol02 | h | Equipo y elementos auxiliares para soldadura eléctrica. | | | 0,017 | 3,10 | 0,05 | | |
| | | | | | Subtotal equipo y | | 0,05 | | |
| 3 | | Mano de obra | | | | | | | |
| mo047 | h | Oficial 1ª montador de estructura metálica. | | | 0,024 | 18,10 | 0,43 | | |
| mo094 | h | Ayudante montador de estructura metálica. | | | 0,024 | 16,94 | 0,41 | | |
| | | | | | Subtotal mano de obra: | | 0,84 | | |
| 4 | | Costes directos complementarios | | | | | | | |
| | % | Costes directos complementarios | | | 2,000 | 2,17 | 0,04 | | |
| Coste de mantenimiento decenal: 0,07€ en los primeros 10 años. | | | | | Costes directos (1+2+3+4): | | 2,21 | | |

| S355 | | | | | | | | | |
|---|--------|---|--|--|----------------------------|-----------------|---------|--|--|
| EAS010 | kg | Acero en pilares. | | | | | | | |
| Acero S355JR en pilares, con piezas simples de perfiles laminados en caliente de las series IPN, IPE, UPN, HEA, HEB o HEM | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| Código | Unidad | Descripción | | | Rendimiento | Precio unitario | Importe | | |
| 1 | | Materiales | | | | | | | |
| mt07ala01 | kg | Acero laminado UNE-EN 10025 S355JR, en perfiles laminados en caliente, piezas simples, para aplicaciones estructurales. | | | 1,050 | 1,03 | 1,08 | | |
| 0o | | | | | | | | | |
| mt27pfi010 | l | Imprimación de secado rápido, formulada con resinas alquídicas modificadas y fosfato de zinc. | | | 0,050 | 4,80 | 0,24 | | |
| | | | | | Subtotal materiales: | | 1,32 | | |
| 2 | | Equipo y maquinaria | | | | | | | |
| mq08sol02 | h | Equipo y elementos auxiliares para soldadura eléctrica. | | | 0,017 | 3,10 | 0,05 | | |
| | | | | | Subtotal equipo y | | 0,05 | | |
| 3 | | Mano de obra | | | | | | | |
| mo047 | h | Oficial 1ª montador de estructura metálica. | | | 0,024 | 18,10 | 0,43 | | |
| mo094 | h | Ayudante montador de estructura metálica. | | | 0,024 | 16,94 | 0,41 | | |
| | | | | | Subtotal mano de obra: | | 0,84 | | |
| 4 | | Costes directos complementarios | | | | | | | |
| | % | Costes directos complementarios | | | 2,000 | 2,21 | 0,04 | | |
| Coste de mantenimiento decenal: 0,07€ en los primeros 10 años. | | | | | Costes directos (1+2+3+4): | | 2,25 | | |

Conociendo la densidad del acero (7850 Kg/m³) se puede calcular el coste del acero para el pilar mixto en €/m³.

$$\text{Coste acero} \left(\frac{\text{€}}{\text{m}^3 \text{ de acero}} \right) = \text{Coste acero} \left(\frac{\text{€}}{\text{Kg acero}} \right) \cdot \text{densidad acero} \left(\frac{\text{Kg acero}}{\text{m}^3 \text{ de acero}} \right)$$

De igual manera, multiplicando este coste por el Área de acero se obtiene el coste gastado en acero por metro. Sumando el coste de hormigón y de acero por metro se obtiene finalmente el coste total por metro de pilar mixto en cada ensayo.

$$\text{Coste pilar mixto} \left(\frac{\text{€}}{\text{m}} \right) = \text{Coste acero} \left(\frac{\text{€}}{\text{m}} \right) + \text{Coste hormigón} \left(\frac{\text{€}}{\text{m}} \right)$$

8.2.1.2. Costes en los perfiles de acero

Para poder comparar el coste del pilar mixto y el coste del pilar fabricado con perfil de acero se ha de escoger el perfil con el que poder comparar. Se ha seleccionado el tipo de perfil HEB ya que tienen un óptimo comportamiento a compresión (como es el caso que nos ocupa en un pilar). Se dispone del siguiente catálogo de perfiles HEB:

| Perfil | Dimensiones | | | | | | | Términos de sección | | | | | | | | Agujeros | | | Peso | | | |
|---------|-------------|---------|---------|----------------------|----------------------|----------------------|---------|----------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------|----------------------|---------|-----------|---|
| | h mm | b mm | e mm | e ₁ mm | r ₁ mm | h ₁ mm | u mm | A cm ² | S _x cm ³ | I _x cm ⁴ | W _x cm ³ | i _x cm | I _y cm ⁴ | W _y cm ³ | i _y cm | I _x cm ⁴ | I _y cm ⁴ | w mm | w ₁ mm | a mm | p kp/m | |
| HEB 100 | 100 | 100 | 6,0 | 10,0 | 12 | 56 | 567 | 26,0 | 52,1 | 450 | 90 | 4,16 | 167 | 33 | 2,53 | 9,34 | 3.375 | 55 | — | 13 | 20,4 | P |
| HEB 120 | 120 | 120 | 6,5 | 11,0 | 12 | 74 | 686 | 34,0 | 82,6 | 664 | 144 | 5,04 | 318 | 53 | 3,06 | 14,90 | 9.410 | 65 | — | 17 | 26,7 | P |
| HEB 140 | 140 | 140 | 7,0 | 12,0 | 12 | 92 | 805 | 43,0 | 123,0 | 1.509 | 216 | 5,93 | 550 | 79 | 3,58 | 22,50 | 22.480 | 75 | — | 21 | 33,7 | P |
| HEB 160 | 160 | 160 | 8,0 | 13,0 | 15 | 104 | 918 | 54,3 | 177,0 | 2.492 | 311 | 6,78 | 889 | 111 | 4,05 | 33,20 | 47.940 | 85 | — | 23 | 42,6 | P |
| HEB 180 | 180 | 180 | 8,5 | 14,0 | 15 | 122 | 1.040 | 65,3 | 241,0 | 3.831 | 426 | 7,66 | 1.363 | 151 | 4,57 | 46,50 | 93.750 | 100 | — | 25 | 51,2 | P |
| HEB 200 | 200 | 200 | 9,0 | 15,0 | 18 | 134 | 1.150 | 78,1 | 321,0 | 5.696 | 570 | 8,54 | 2.003 | 200 | 5,07 | 63,40 | 171.100 | 110 | — | 25 | 61,3 | P |
| HEB 220 | 220 | 220 | 9,5 | 16,0 | 18 | 152 | 1.270 | 91,0 | 414,0 | 8.091 | 736 | 9,43 | 2.843 | 258 | 5,59 | 84,40 | 295.400 | 120 | — | 25 | 71,5 | P |
| HEB 240 | 240 | 240 | 10,0 | 17,0 | 21 | 164 | 1.380 | 106,0 | 527,0 | 11.259 | 938 | 10,30 | 3.923 | 327 | 6,08 | 110,00 | 486.900 | 90 | 35 | 25 | 83,2 | P |
| HEB 260 | 260 | 260 | 10,0 | 17,5 | 24 | 177 | 1.500 | 118,4 | 641,0 | 14.919 | 1.150 | 11,20 | 5.135 | 395 | 6,58 | 130,00 | 753.700 | 100 | 40 | 25 | 93,0 | P |
| HEB 280 | 280 | 280 | 10,5 | 18,0 | 24 | 196 | 1.620 | 131,4 | 767,0 | 19.270 | 1.380 | 12,10 | 6.595 | 471 | 7,09 | 153,00 | 1.130.000 | 110 | 45 | 25 | 103,0 | P |
| HEB 300 | 300 | 300 | 11,0 | 19,0 | 27 | 208 | 1.730 | 149,1 | 934,0 | 25.166 | 1.680 | 13,00 | 8.563 | 571 | 7,58 | 192,00 | 1.688.000 | 120 | 50 | 25 | 117,0 | P |
| HEB 320 | 320 | 300 | 11,5 | 20,5 | 27 | 225 | 1.770 | 161,3 | 1.070,0 | 30.823 | 1.930 | 13,80 | 9.239 | 616 | 7,57 | 241,00 | 2.069.000 | 120 | 50 | 25 | 127,0 | P |
| HEB 340 | 340 | 300 | 12,0 | 21,5 | 27 | 243 | 1.810 | 170,9 | 1.200,0 | 36.656 | 2.160 | 14,60 | 9.690 | 646 | 7,53 | 278,00 | 2.454.000 | 120 | 50 | 25 | 134,0 | P |
| HEB 360 | 300 | 300 | 12,5 | 22,5 | 27 | 261 | 1.850 | 180,6 | 1.340,0 | 43.193 | 2.400 | 15,50 | 10.140 | 676 | 7,49 | 320,00 | 2.883.000 | 120 | 50 | 25 | 142,0 | P |
| HEB 400 | 400 | 300 | 13,5 | 24,0 | 27 | 298 | 1.930 | 197,8 | 1.620,0 | 57.680 | 2.880 | 17,10 | 10.819 | 721 | 7,40 | 394,00 | 3.817.000 | 120 | 50 | 25 | 155,0 | P |
| HEB 450 | 450 | 300 | 14,0 | 26,0 | 27 | 344 | 2.030 | 218,0 | 1.990,0 | 79.887 | 3.550 | 19,10 | 11.721 | 781 | 7,33 | 500,00 | 5.258.000 | 120 | 50 | 25 | 171,0 | P |
| HEB 500 | 500 | 300 | 14,5 | 28,0 | 27 | 390 | 2.120 | 238,6 | 2.410,0 | 107.176 | 4.290 | 21,20 | 12.624 | 842 | 7,27 | 625,00 | 7.018.000 | 120 | 45 | 28 | 187,0 | C |
| HEB 550 | 550 | 300 | 15,0 | 29,0 | 27 | 438 | 2.220 | 254,1 | 2.800,0 | 136.691 | 4.970 | 23,20 | 13.077 | 872 | 7,17 | 701,00 | 8.856.000 | 120 | 45 | 28 | 199,0 | C |
| HEB 600 | 600 | 300 | 15,5 | 30,0 | 27 | 486 | 2.320 | 270,0 | 3.210,0 | 171.041 | 5.700 | 25,20 | 13.530 | 902 | 7,08 | 783,00 | 10.965.000 | 120 | 45 | 28 | 212,0 | C |

Como se puede apreciar, con los datos proporcionados se puede calcular si los diferentes perfiles HEB cumplirían seccionalmente con unas necesidades de axil y momento dadas con la comprobación siguiente:

$$\frac{N}{A \cdot f_{yd}} + \frac{M}{W \cdot f_{yd}} < 1$$

N: Axil que debe soportar el pilar

M: Momento que debe soportar el pilar

A: Área de acero del perfil HEB

f_{yd}: Límite de elasticidad del acero

W: Módulo plástico del acero en la sección respecto al eje fuerte

Es decir, sabemos que para cada ensayo del pilar mixto se obtienen un axil y un momento máximo que aguanta la sección de dicho pilar mixto.

Con estas acciones se calcula que perfil HEB que sería el primero en cumplir con los requerimientos. En otras palabras, por qué perfil de acero se pudiese sustituir el pilar mixto sin que colapsara éste.

Se calcula con la comprobación de ELU (Estado límite último) como sección y no como elemento donde se tendrían que tener en cuenta efectos de segundo orden (Pandeo) ya que tanto el axil como el momento obtenidos de los ensayos no se han visto influido por estos efectos. Esto último se debe a que lo perfiles ensayados en laboratorio son solamente de 300 mm, y por lo tanto, lo suficientemente poco esbeltos para no verse influenciados por el pandeo.

El siguiente paso a realizar, una vez ya se ha calculado el perfil HEB necesario, será calcular el coste de este. Se vuelven a utilizar datos del catálogo de perfiles HEB mencionado anteriormente y del generador de precios de cype.

Como ya se ha mencionado en la parte de cálculo de costes del acero del pilar mixto, se conocen los precios para los diferentes aceros.

Precio Perfil S235 = 2.18 €/Kg

Precio Perfil S275 = 2.21 €/Kg

Precio Perfil S355 = 2.25 €/Kg

Por otro lado en el catálogo, la última columna especifica el peso (Kg/m) para cada perfil. Por lo que multiplicando el precio y el peso obtendríamos el precio (€/m) para cada perfil y para cada tipo de acero en las mismas unidades que el precio del pilar mixto. Por lo que se podrían comparar precios para deducir en cada caso cuál sería el pilar óptimo.

| HEB | peso(Kg/m) | Precio S235 (€/m) | Precio S275 (€/m) | Precio S355 (€/m) |
|---------|------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| HEB 100 | 20,4 | 44,47 | 45,08 | 45,90 |
| HEB 120 | 26,7 | 58,21 | 59,01 | 60,08 |
| HEB 140 | 33,7 | 73,47 | 74,48 | 75,83 |
| HEB 160 | 42,6 | 92,87 | 94,15 | 95,85 |
| HEB 180 | 51,2 | 111,62 | 113,15 | 115,20 |
| HEB 200 | 61,3 | 133,63 | 135,47 | 137,93 |
| HEB 220 | 71,5 | 155,87 | 158,02 | 160,88 |
| HEB 240 | 83,2 | 181,38 | 183,87 | 187,20 |
| HEB 260 | 93 | 202,74 | 205,53 | 209,25 |
| HEB 280 | 103 | 224,54 | 227,63 | 231,75 |
| HEB 300 | 117 | 255,06 | 258,57 | 263,25 |
| HEB 320 | 127 | 276,86 | 280,67 | 285,75 |
| HEB 340 | 134 | 292,12 | 296,14 | 301,50 |
| HEB 360 | 142 | 309,56 | 313,82 | 319,50 |
| HEB 400 | 155 | 337,90 | 342,55 | 348,75 |
| HEB 450 | 171 | 372,78 | 377,91 | 384,75 |
| HEB 500 | 187 | 407,66 | 413,27 | 420,75 |
| HEB 550 | 199 | 433,82 | 439,79 | 447,75 |
| HEB 600 | 212 | 462,16 | 468,52 | 477,00 |

Además se calcula el peso del acero (Kg/m) como se había hecho en el acero de pilares mixtos, multiplicando la densidad del acero (7850 Kg/m³) por el Área de acero del perfil y se comprueba que son prácticamente iguales a las proporcionadas por el catálogo. De esta manera se comprueba que el precio del acero se ha calculado de la misma manera para los pilares mixto que para los pilares de acero con perfiles HEB.

| HEB | peso(Kg/m) | pacero*A |
|---------|------------|----------|
| HEB 100 | 20,4 | 20,41 |
| HEB 120 | 26,7 | 26,69 |
| HEB 140 | 33,7 | 33,755 |
| HEB 160 | 42,6 | 42,6255 |
| HEB 180 | 51,2 | 51,2605 |
| HEB 200 | 61,3 | 61,3085 |
| HEB 220 | 71,5 | 71,435 |
| HEB 240 | 83,2 | 83,21 |
| HEB 260 | 93 | 92,944 |
| HEB 280 | 103 | 103,149 |
| HEB 300 | 117 | 117,0435 |
| HEB 320 | 127 | 126,6205 |
| HEB 340 | 134 | 134,1565 |
| HEB 360 | 142 | 141,771 |
| HEB 400 | 155 | 155,273 |
| HEB 450 | 171 | 171,13 |
| HEB 500 | 187 | 187,301 |
| HEB 550 | 199 | 199,4685 |
| HEB 600 | 212 | 211,95 |

8.2.2. Comparación de alternativas

Calculados todos los costes de las diferentes alternativas se pueden ya comparar directamente y estudiar cual será óptima o la más económica. Se decide comparar el precio del pilar mixto (objeto del estudio) con el mínimo de los precios de las alternativas usando un perfil HEB.

Es decir:

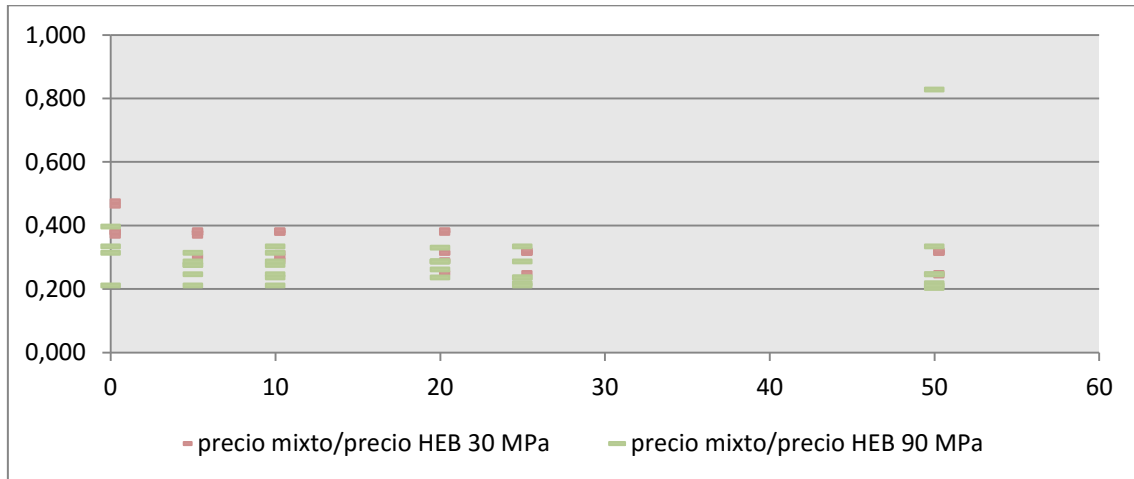
- Por un lado, la alternativa más económica de entre las siguientes: Usar un Perfil HEB con acero S235, un perfil HEB con acero S275 o un perfil HEB con acero S355.
- Por otro lado, la alternativa de usar el pilar mixto ensayado.

Finalmente se calcula un ratio de mejora entre las ya citadas dos alternativas. Para cada ensayo se divide el precio del pilar mixto (€/m) por el precio de la alternativa de perfil HEB más económica (€/m). Cuando este ratio esté por debajo de 1 significará que el pilar mixto será la solución óptima desde un punto de vista económico. Mientras que si se obtiene un valor superior a 1 significará que la solución óptima no será el pilar mixto, si no el uso de un perfil HEB.

8.3. Resultado del estudio

Todas las tablas necesarias con los resultados se muestran en su correspondiente Anejo, en este caso, el ANEJO 2 Registro de tablas de estudio económico. Para mostrar el resultado de una manera breve se ha graficado el ratio de mejora económica, es decir la relación entre el precio del pilar mixto y el precio del pilar usando el perfil HEB más económico.

8.3.1. CFTs rectangulares y cuadrados



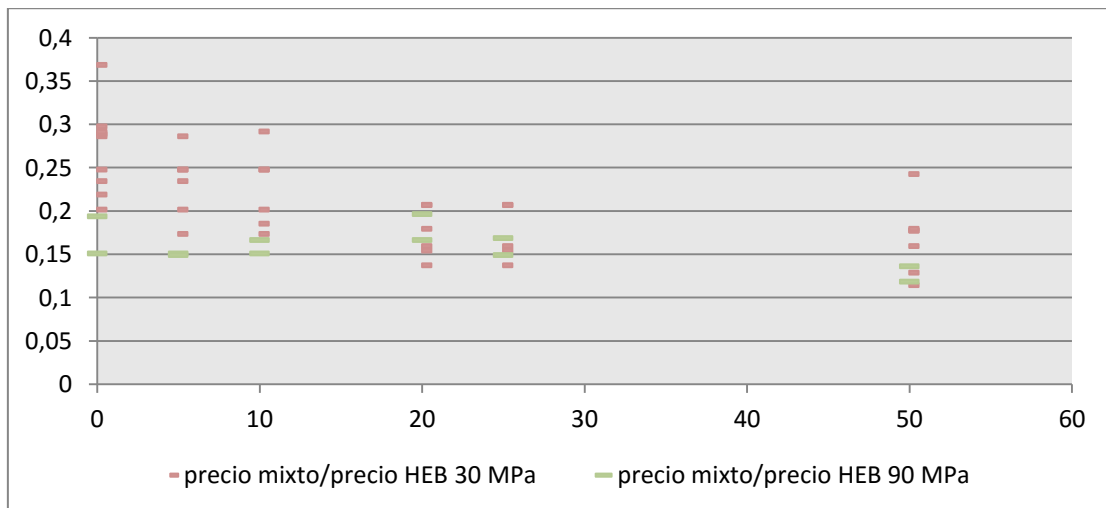
R/promedio 30 0,341

R/promedio 90 0,285

R/promedio 0,31

En todos los ensayos de perfiles rectangulares y cuadrados la alternativa óptima es el pilar mixto.

8.3.2. CFTs circulares



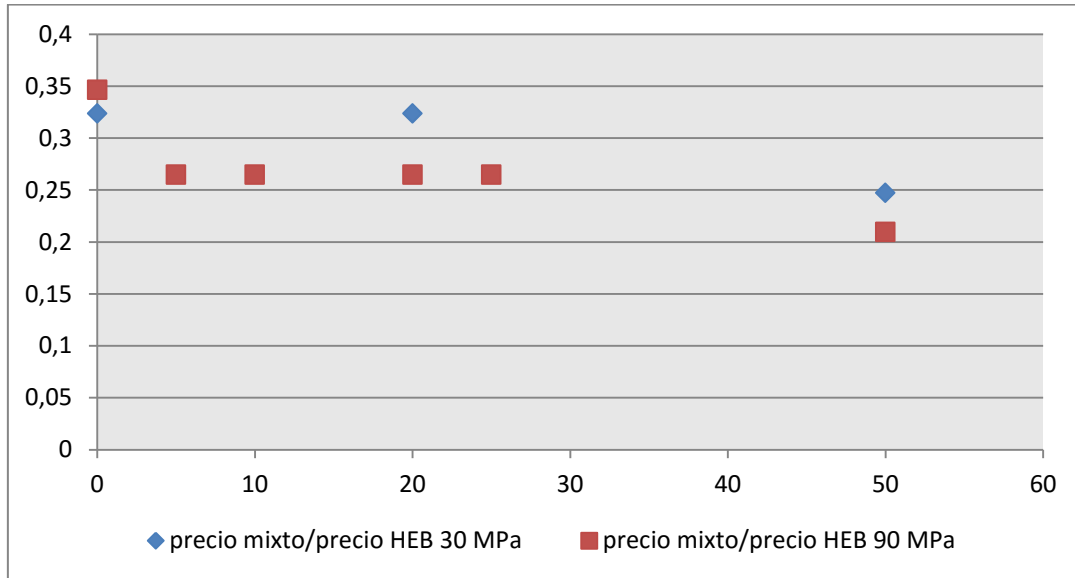
C/promedio 30 0,211

C/promedio 90 0,158

C/promedio 0,20

En todos los ensayos de perfiles circulares la alternativa óptima es el pilar mixto.

8.3.3. CFTs ovalados



O/promedio 30 0,298

O/promedio 90 0,269

O/promedio 0,28

En todos los ensayos de perfiles ovalados la alternativa óptima es el pilar mixto.

8.4. Conclusiones del estudio económico

En el estudio económico realizado, el precio del pilar mixto está totalmente ajustado ya que se calcula a partir de lo empleado en la fabricación del mismo. En cambio, el precio del perfil HEB no está ajustado ya que se toma como solicitaciones externas precisamente las cargas máximas del pilar mixto, y con estas solicitaciones se observa que perfil HEB cumple. Por lo que la carga máxima capaz de aguantar el pilar fabricado con ese perfil HEB será mayor que las solicitaciones descritas. Es decir, el precio de los HEB se calculan sin estar aprovechando el perfil HEB al máximo y el precio del pilar mixto sí se calcula aprovechando su carga al máximo. Esto se traduce en que los pilares mixtos parten con una ventaja frente a los perfiles HEB en la realización del estudio.

Esta ventaja podría suponer un problema a la hora de llegar a conclusiones claras, pero como se ha observado los porcentajes de ahorro obtenidos son muy grandes. Todos los porcentajes de ahorro llegan a más del 50 %, por lo que a pesar de la ventaja competitiva con la que parten los pilares mixtos, estos serían igual nuestros pilares óptimos para cualquiera de los casos.

Tras realizar el estudio pues se puede concluir que los pilares mixtos son mucho más económicos que los pilares fabricados solamente con perfil de acero. Además con hormigón de 90 MPa se tienen ratios menores que con hormigones resistencia de 30 MPa. Es decir, a mayores resistencias del hormigón se obtienen ratios menores, o lo que es lo mismo, porcentajes de ahorro mayores.

| | |
|----------------------|-------|
| R/promedio 30 | 0,341 |
| R/promedio 90 | 0,285 |
| R/promedio | 0,31 |
| C/promedio 30 | 0,211 |
| C/promedio 90 | 0,158 |
| C/promedio | 0,20 |
| O/promedio 30 | 0,298 |
| O/promedio 90 | 0,269 |
| O/promedio | 0,28 |

Concretamente para nuestros ensayos, el mayor porcentaje de ahorro ha sido obtenido en perfiles circulares, con un promedio de 80 % de ahorro. Para perfiles rectangulares y cuadrados se ha obtenido un ahorro del 69 % y para ovalados del 72 %.

| Tipo de perfil | Promedio ratio | Promedio ahorro |
|---------------------------|----------------|-----------------|
| Rectangulares y cuadrados | 0,31 | 69% |
| Circulares | 0,20 | 80 % |
| Ovalados | 0,28 | 72% |

9. Bibliografía

1. Hernández Figueirido David. "Estudio experimental del pandeo de perfiles tubulares rectangulares de acero, rellenos de hormigón de alta resistencia. Revisión del estado del arte y ensayos experimentales." Comunidad Valenciana, España.2010.
2. Asociación Española de Normalización y Certificación, UNE-EN 10002-1:2002, 2002. "Materiales metálicos. Ensayos de tracción. Parte 1: Método de ensayo a temperatura ambiente."
3. Asociación Española de Normalización y Certificación, UNE-EN ISO 377, 1998. "Acero y productos de acero. Localización y preparación de muestras y probetas para ensayos mecánicos."
4. Asociación Española de Normalización y Certificación, UNE-EN 12390-3, 2003. "Ensayos de
5. European convention for constructional steelwork. ECCS – Joint Committee on Composite Structures. Model code for composite structures, 1981.
6. European Committee of Standardization., EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2 Design of concrete structures. Part 1-1. General rules. 2004.
7. European Committee of Standardization., EN 1993-1-1:2005 Eurocode 3 Design of steel structures. Part 1-1. General rules. 2005.
8. European Committee of Standardization., EN 1994-1-1:2004 Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures Part 1-1: General rules and rules for buildings, 1994.
9. European Committee of Standardization., EN 1994-1-1:2004 Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures Part 1-1: General rules and rules for buildings, 2004.
10. Furlong, R.W. "Strength of Steel-Encased Concrete Beam Columns," Journal of the Structural Division, ASCE, vol. 93, 1968, pp. 113-124.
11. Goode, C.D. "Composite column design using various codes," Composite and Hybrid Structures, Vols 1 and 2. Proceedings of 6th ASCCS International Conference on Steel-Concrete Composite Structures, Los Angeles, CA, Mar 22, 2000-MAR 24, 2002, Y. Xiao y S.A. Mahin, eds., 3620 S Vermont Ave, KAP 210, Los Angeles, CA 90089-2531 USA: Univ. Southern California. School Engn, Dept. civil Engn., 2000, pp. 1199-1206.
12. Goode, C.D. "A review and analysis of over one thousand tests on concrete filled steel tube columns," 8th International Conference on Steel-Concrete Composite and Hybrid Structures, Proceedings, 2006, págs. 17–23.
13. Goode, C.D. "ASCCS Database of Concrete-filled Steel Tube Columns" Available: <http://web.ukonline.co.uk/asccs2/>.
14. Gourley, B., Tort, C., Denavit, M., Schiller, P., y Hajjar, J. "A Synopsis of Studies of the Monotonic and Cyclic Behavior of Concrete-Filled Steel Tube Beam-Columns", Urbana, Illinois: Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2008.
15. Goode, C.D., Kuranovas, A., y Kvedaras, A.K. "Experimental data analysis of concrete-filled steel columns," Proceedings of the 9th International Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques. vol.1-3, M.J. Skibniewski, P. Vainiunas, y E.K. Zavadskas, eds., Vilnius, LITHUANIA: Vilnius Gediminas Technical Univ. Press, Technika, 2007, pp. 546-553.

16. Kuranovas, A., Goode D., A.K. Kvedaras, y S. Zhong, "Load-bearing capacity of concrete-filled steel columns," *Journal of Civil Engineering and Management*, vol. 15, Mar. 2009, pp. 21-33.
17. Han, L.-H. (2000). "Tests on Concrete Filled Steel Tubular Columns with High Slenderness Ratio," *Advances in Structural Engineering*, Vol. 3, No. 4, pp. 337-344.
18. Han, L.-H. (2002). "Tests on Stub Columns of Concrete-Filled RHS Sections," *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 58, pp. 353-372.
19. Han, L.-H. and Yao, G.-H., (2003). "Influence of Concrete Compaction on the Strength of Concrete-Filled Steel RHS Columns," *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 59, pp. 751- 767.
20. Knowles, R. y Park, R. "Strength of Concrete Filled Steel Tubular Column," *Journal of the Structural Division, ASCE*, vol. 95, 1969, pp. 2565-2587.
21. Kwon S.H., Kim J.K. Long-Term behaviour under axial service loads of circular columns made from concrete filled steel tubes. *Magazine of Concrete Research* 57, 2005. Pp. 87-99.
22. Leon, R. T., Kim, D. K., and Hajjar, J. F. (2007). "Limit State Response of Composite Columns and Beam-Columns: Formulation of Design Provisions for the 2005 AISC Specification," *Engineering Journal, AISC*, Vol. 44, No. 4, Fourth Quarter, pp. 341-358.
23. Leon, R. T. and Hajjar, J. F. (2007). "Limit State Response of Composite Columns and BeamColumns: Application of Design Provisions for the 2005 AISC Specification," *Engineering Journal, AISC*, Vol. 45, No. 1, First Quarter.
24. Han L-H, Lu Hui, Yao G-H, Liao F-Y. Further study on flexural behaviour of concrete-filled steel tubes. *Journal of Constructional Steel Research* 62 ,2006. pp.554-565
25. Liu, D. (2004). "Behaviour of High Strength Rectangular Concrete-Filled Steel Hollow Section Columns under Eccentric Loading," *Thin-Walled Structures*, Vol. 42, pp. 1631-1644.
26. Matsui, C., Mitani, I., Kawano, A., and Tsuda, K. (1997). "AIJ Design Method for Concrete Filled Steel Tubular Structures." *Concrete Filled Steel Tubes: A Comparison of International Codes and Practices*, Seminar by the Association for International Cooperation and Research in SteelConcrete Composite Structures, Innsbruck, Austria, 18 September 1997, ASCCS, Japan, pp. 93- 116.
27. Mursi, M. and Uy, B. (2004). "Strength of Slender Concrete Filled High Strength Steel Box Columns," *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 60, pp. 1825-1848.
28. Neogi, P.K., Sen, H.K., y Chapman, J.C. "Concrete-Filled Tubular Steel Columns under Eccentric Loading," *The Structural Engineer*, vol. 47, 1969, pp. 187-195.
29. Picard, A. and Beaulieu, D. (1997). "Resistance of Concrete-Filled Hollow Structural Sections," *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 24, No. 5, October, pp. 785-789.
30. Romero, M.L., Bonet, J.L., y Ivorra, S. "A review of Nonlinear analysis models for concrete filled tubular columns," *Innovation in Civil and Structural Engineering Computing. 10th Int Conf on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing (Civil-Comp 2005)/8th Int Conf on the Application of Artificial Intelligence to Civil, Structural and Environmental Engineering (AICivil-Comp 2005)*, Rome, ITALY, AUG 30-SEP 02, 2005, B.H.V. Topping, ed., 10 Saxe-Coburg Place, Edinburgh EH3 5BR, Scotland: Saxe-Coburg Publications, 2005, pp. 119-142.

31. Romero, M.L., Bonet, J.L., Ivorra, S., y Hospitaler, A. "Estudio numérico de perfiles tubulares de acero rellenos de hormigón de alta resistencia.," Congreso Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería 2005, Granada, Spain: 2005.
32. Saw H.S., y Liew, J.Y.R. "Assessment of current methods for the design of composite columns in buildings," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 53, Feb. 2000, pp. 121-147.
33. Shams M., y Saadeghvaziri, M.A. "State of the art of concrete-filled steel tubular columns," *ACI Structural Journal*, vol. 94, Oct. 1997, pp. 558-571.
34. Shakir-Kalil, H. "Test on Concrete-Filled Hollow Sections," *Proc. 3rd International Conference on Steel-Concrete Composite Structures*, Fukuoka, Japan: Wakabayasy, M. (ed.), Association for International Cooperation and Research in Steel- Concrete Composite Structures, 1991, pp. 89- 94.
35. Shakir-Khalil, H. and Zeghiche, Z. (1989). "Experimental Behavior of Concrete-Filled Rolled Rectangular Hollow-Section Columns," *The Structural Engineer*, Vol. 67, No. 19, pp. 345-353.
36. Shakir-Khalil, H. and Mouli, M. (1990). "Further Tests on Concrete-Filled Rectangular HollowSection Columns," *The Structural Engineer*, Vol. 68, No. 20, pp. 405-413.
37. Shakir-Khalil, H. (1991). "Tests on Concrete-Filled Hollow Section Columns," *Proceedings of the Third International Conference on Steel-Concrete Composite Structures*, Wakabayashi, M. (ed.), Fukuoka, Japan, September 26-29, 1991, Association for International Cooperation and Research in Steel-Concrete Composite Structures, pp. 89-94.
38. Shakir-Khalil, H. (1994). "Experimental Study of Concrete-Filled Rectangular Hollow Section Columns," *Structural Engineering Review*, Vol. 6, No. 2, pp. 85-96.
39. Shakir-Khalil, H. and Al-Rawdan, A. (1997). "Experimental Behavior and Numerical Modelling of Concrete-filled Rectangular Hollow Section Tubular Columns," *Composite Construction in Steel and Concrete III*, Buckner, C. D. and Shahrooz, B. M. (eds.), *Proceedings of the Engineering Foundation Conference*, Irsee, Germany, June 9-14, 1996, American Society of Civil Engineers, New York, New York, pp. 222-235.
40. Spacone E., y S. El-Tawil, "Nonlinear analysis of steel-concrete composite structures: State of the art," *Journal of Structural Engineering - ASCE*, vol. 130, Feb. 2004, pp. 159-168.
41. Uy, B. and Patil, S. B. (1996). "Concrete Filled High Strength Steel Box Columns for Tall Buildings: Behaviour and Design," *Structural Design of Tall Buildings*, Vol. 5, No. 2, pp. 75-94.
42. Uy, B. (1998). "Ductility, Strength and Stability of Concrete-Filled Fabricated Steel Box Columns for Tall Buildings," *Structural Design of Tall Buildings*, Vol. 7, No. 2, June, pp. 113-133.
43. Uy, B. "Strength of Concrete Filled Steel Box Columns Incorporating Local Buckling," *Journal of Structural Engineering*, vol. 126, 2000, pp. 341-352.
44. Varma, A.H., J.M. Ricles, R. Sause, y L. Lu, "Experimental Behavior of High Strength Square Concrete-Filled Steel Tube Beam-Columns," *Journal of Structural Engineering*, vol. 128, 2002, pp. 309-318.

45. Viridi, K. y Dowling, P. "A unified design method for composite columns.," International Association for Bridge and Structural Engineering. Mémoires, Zurich, Switzerland: 1976.
46. Wang, Y. C., Moore, D. B. (1997). "A design method for concrete-filled, hollow section, composite columns," The Structural Engineer, Vol. 75, No. 21, November, pp. 368-373.
47. Wang, Y. C. (1999). "Tests on Slender Composite Columns," Journal of Constructional Steel Research, Vol. 49, No. 1, January, pp. 25-41.
48. Zhang W., y Shahrooz, B. "Strength of Short and Long Concrete-Filled Tubular Columns," ACI Structural Journal, vol. 96, Mar. 1999, pp. 230 - 238.

ANEJO 1 Registro de gráficas de diagramas de interacción seccional

Índice

| | |
|--|------------|
| <u>ANEJO 1</u> | 132 |
| <u>10. Registro de gráficas de Diagrama de interacción seccional frente a axiles y momentos ensayados</u> | 132 |
| <u>10.1. Gráficas con hormigón de 30 MPa</u> | 132 |
| <u>10.1.1. Perfiles rectangulares</u> | 132 |
| <u>10.1.2. Perfiles circulares</u> | 138 |
| <u>10.1.3. Perfiles ovalados</u> | 142 |
| <u>10.2. Gráficas con hormigón de 90 MPa</u> | 143 |
| <u>10.2.1. Perfiles rectangulares</u> | 143 |
| <u>10.2.2. Perfiles circulares</u> | 148 |
| <u>10.2.3. Perfiles Ovalados</u> | 149 |

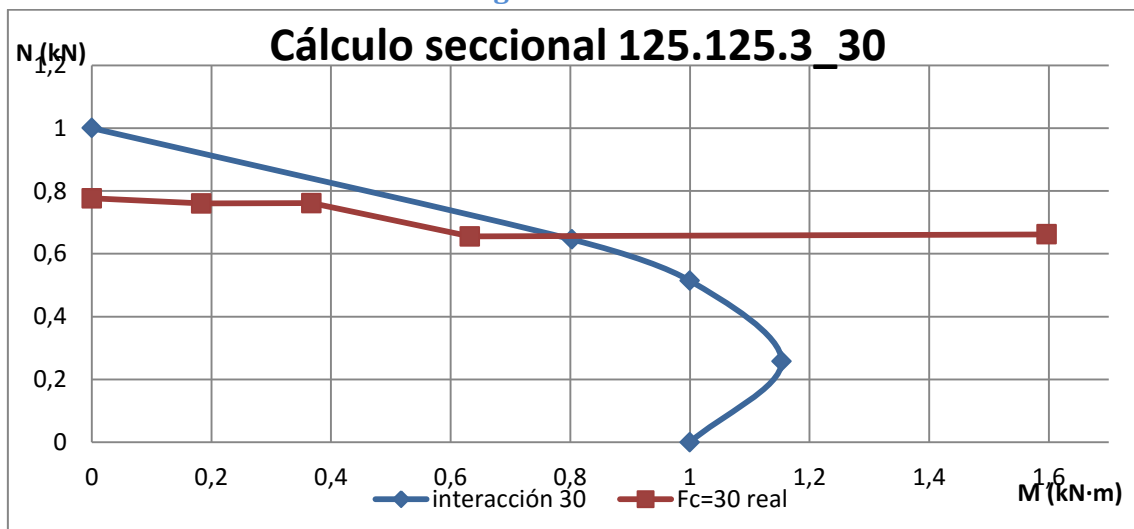
ANEJO 1

10. Registro de gráficas de Diagrama de interacción seccional frente a axiles y momentos ensayados

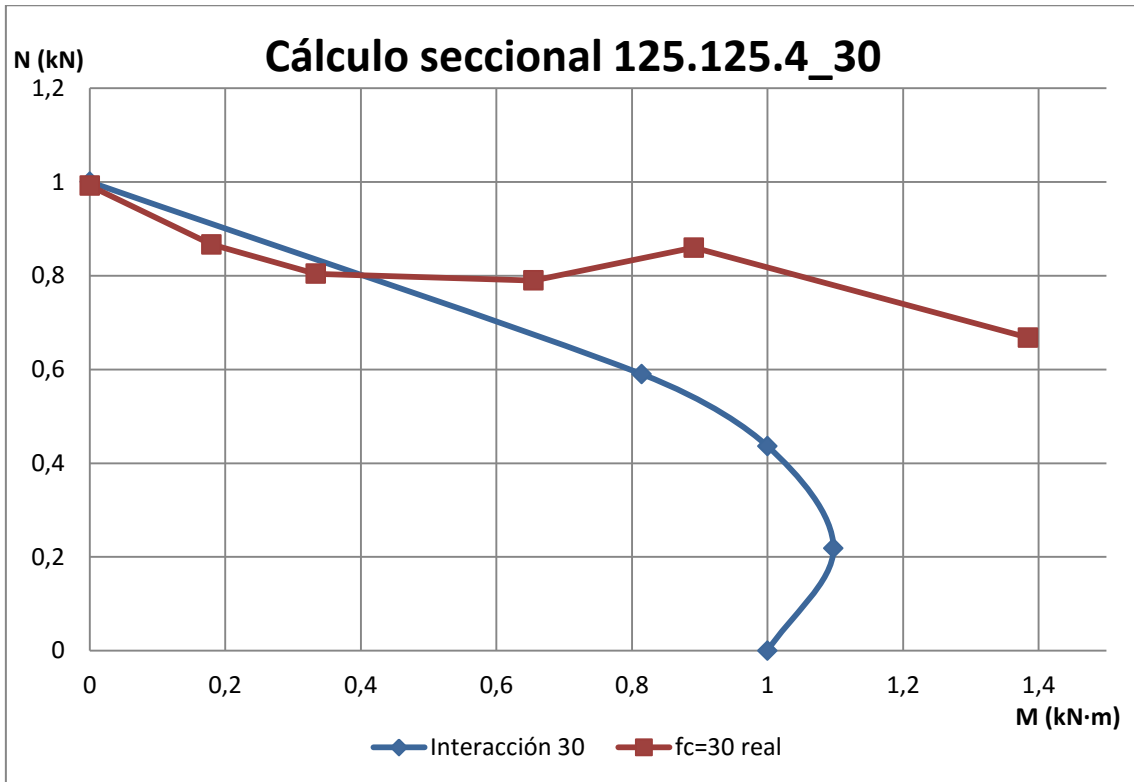
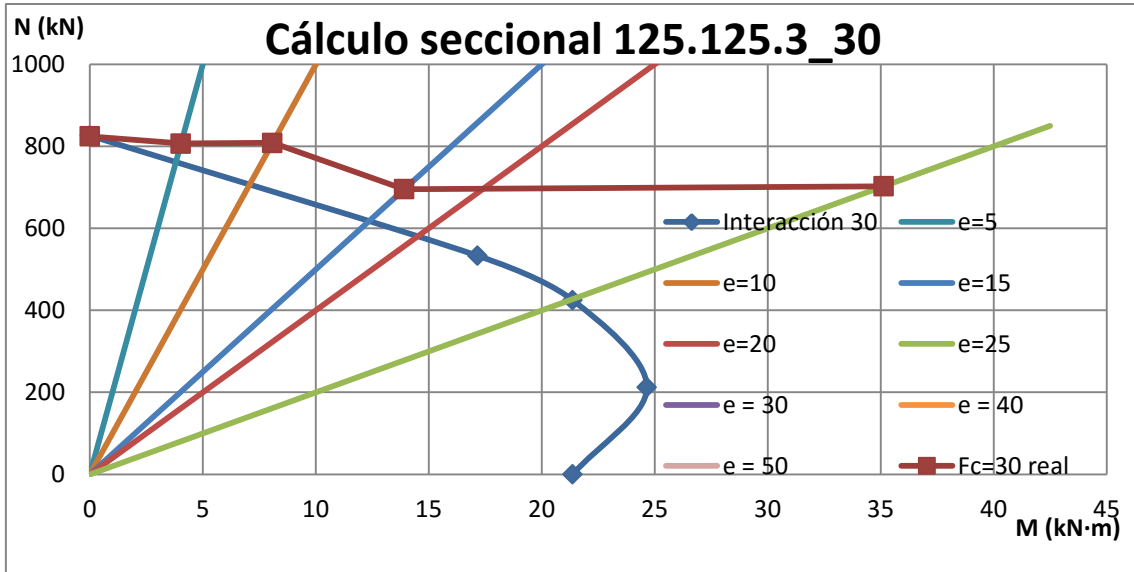
Se decide mostrar las gráficas relativas ya que tienen en cuenta las resistencias reales de los materiales en los puntos de los ensayos y los posibles cambios de estas por el uso de varios tubos o hormigones de diferentes amasadas. De todas maneras se muestran cuando es necesario sendas gráficas para así además explicar el uso de la gráfica en términos relativos frente la gráfica normal.

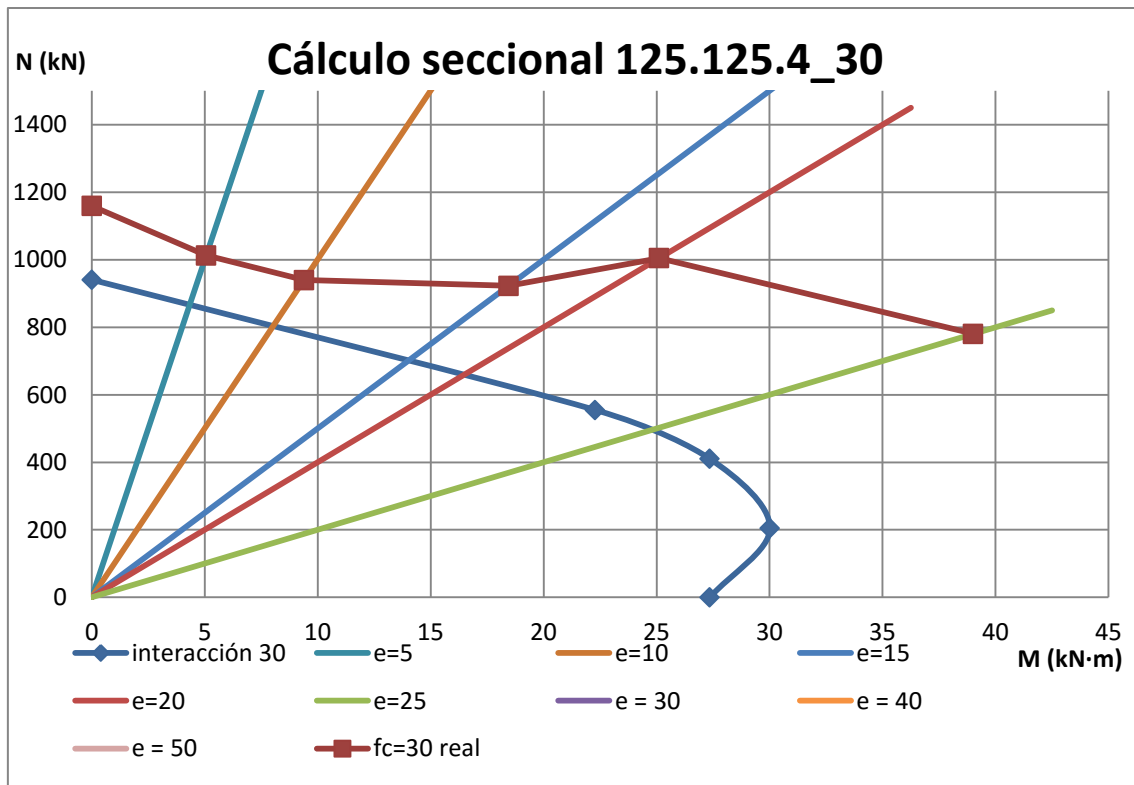
10.1. Gráficas con hormigón de 30 MPa

10.1.1. Perfiles rectangulares

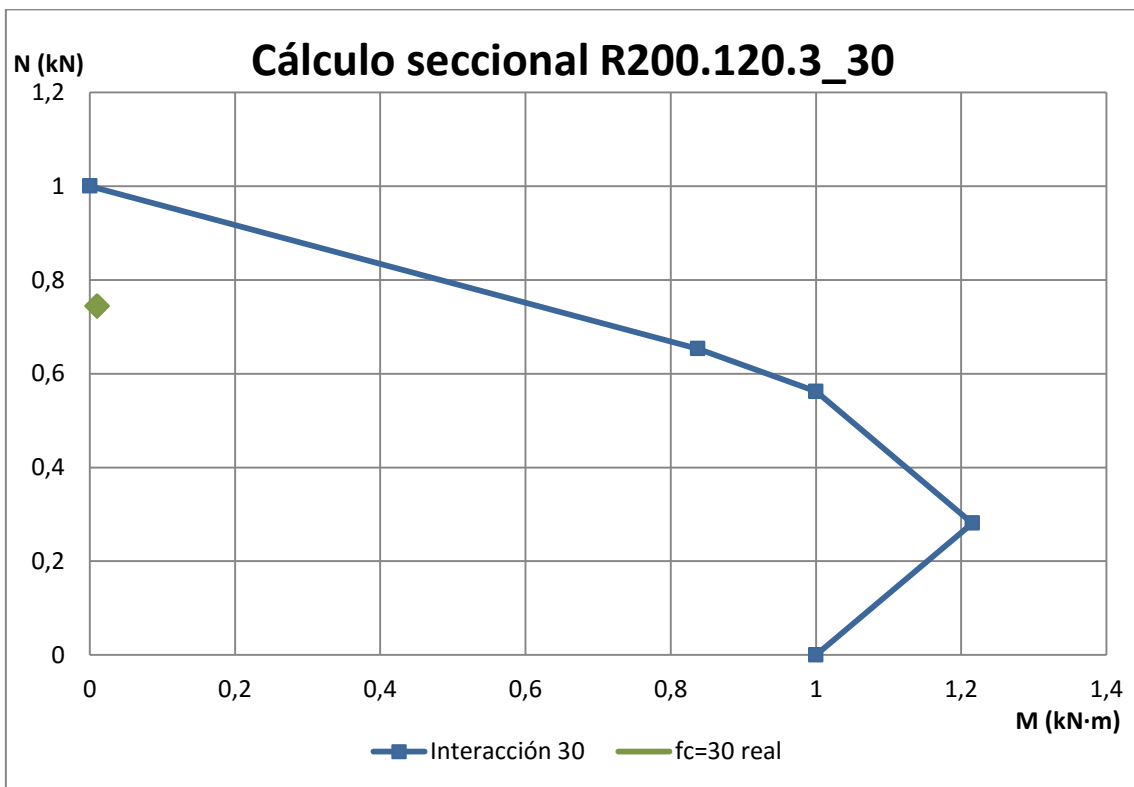
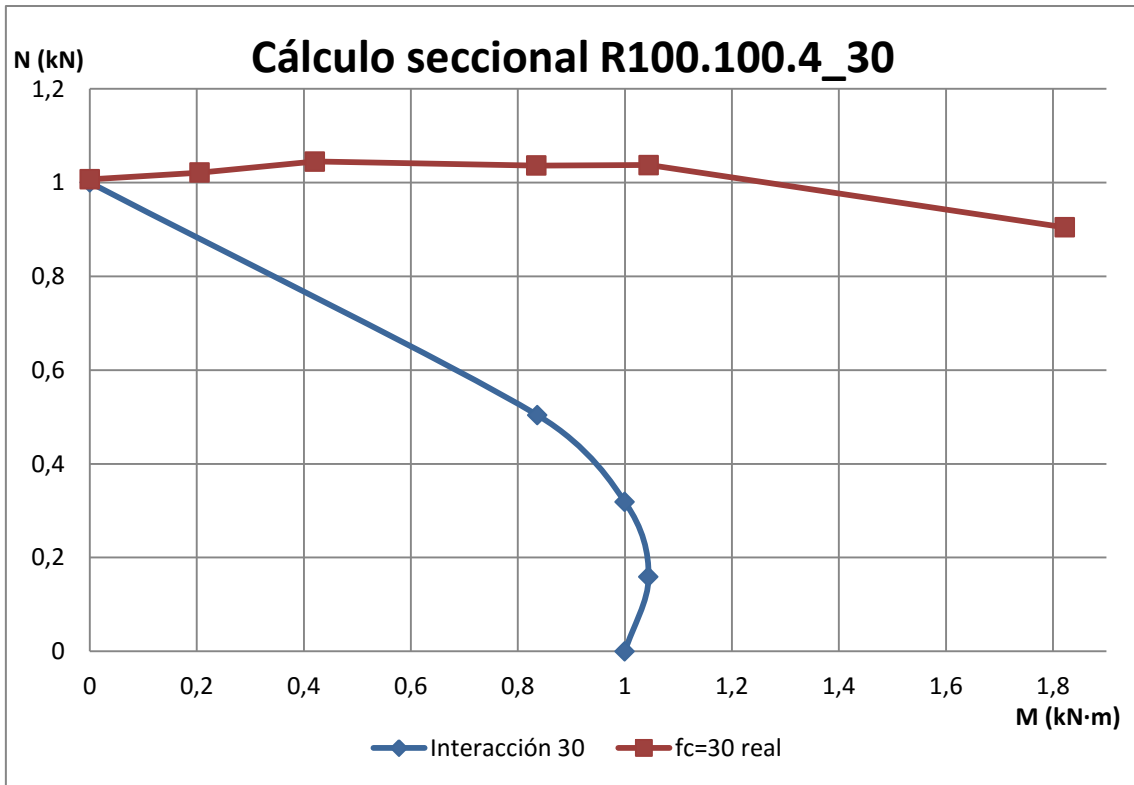


Para este caso particular mostramos la gráfica absoluta ya que en la absoluta sí cumple. Esto se debe a que la resistencia real del hormigón es de 46,67 MPa, bastante mayor a los 30 MPa con la que se calcula la curva ABCDE. Por este motivo en la gráfica absoluta está del lado de la seguridad pero en la relativa, que sí se tiene en cuenta las resistencias reales en los ensayos, no lo está.

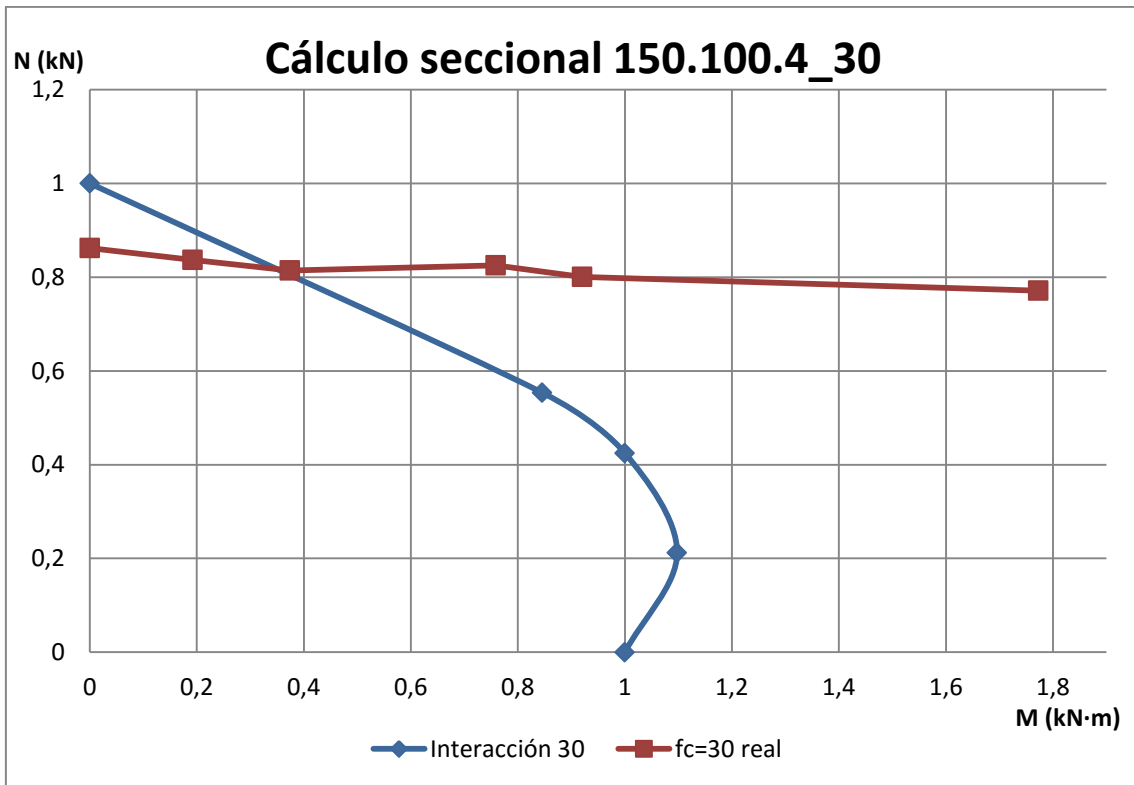




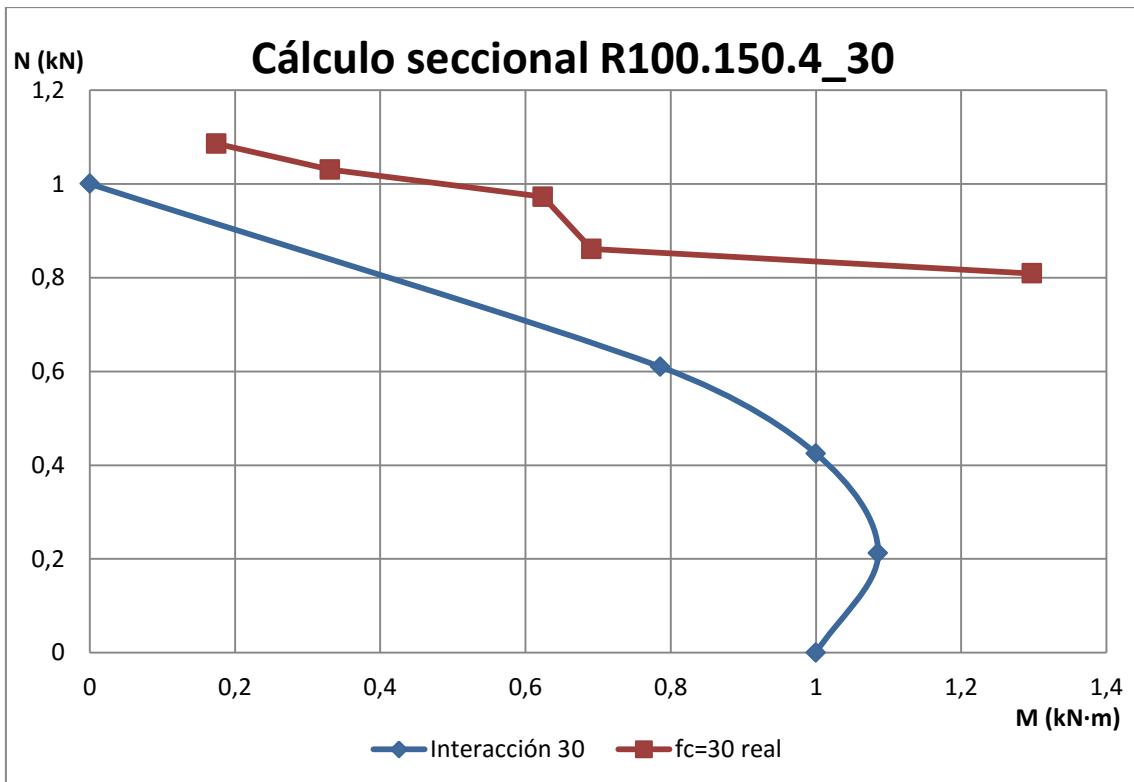
Se grafica también en términos absolutos por el mismo motivo. La resistencia característica del hormigón vuelve a ser 46,67 MPa.



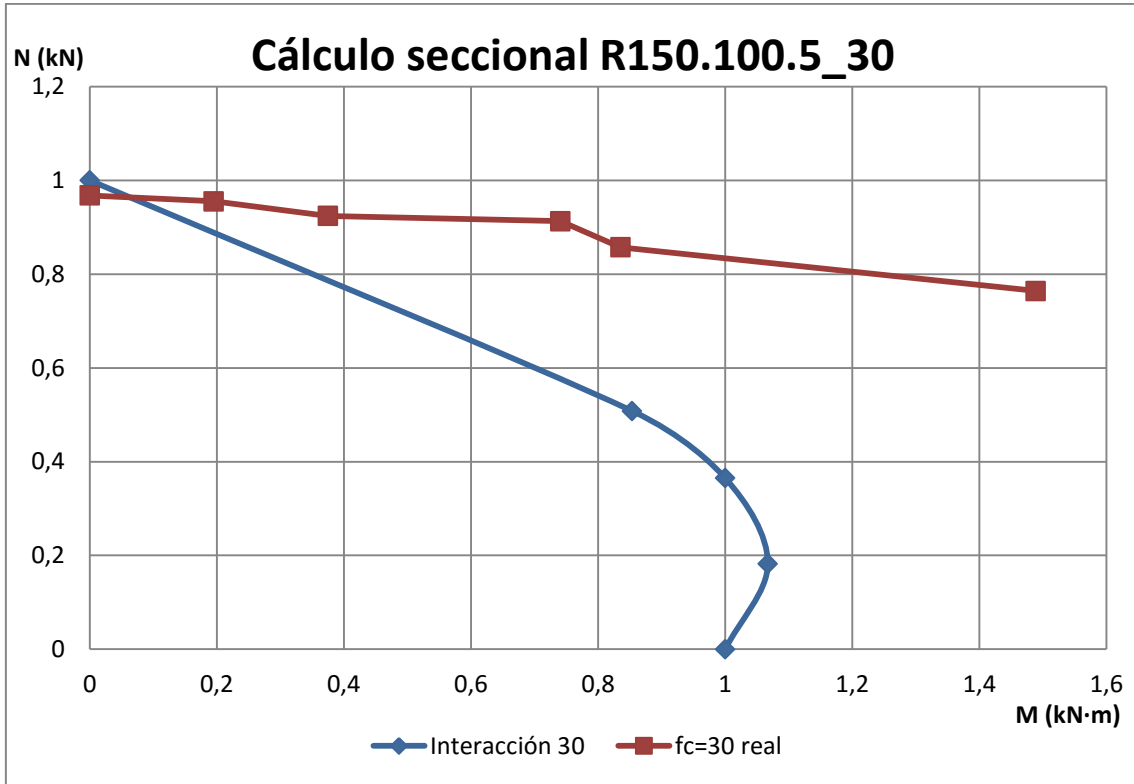
Eje débil



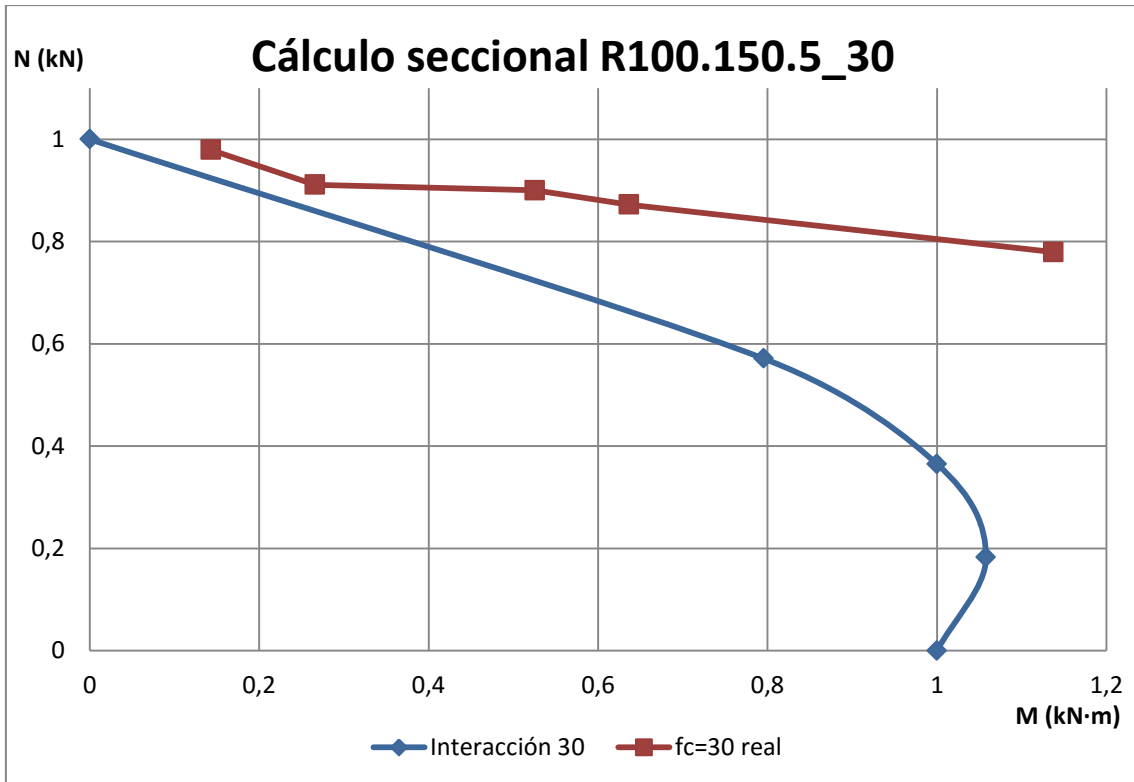
Eje fuerte



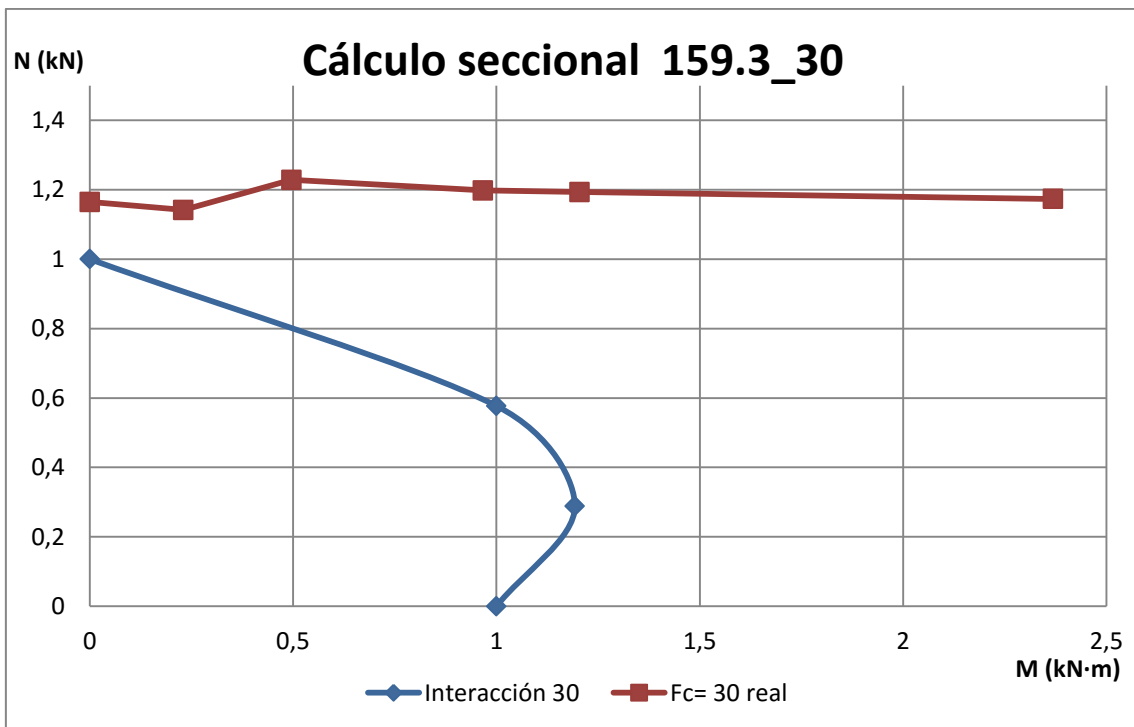
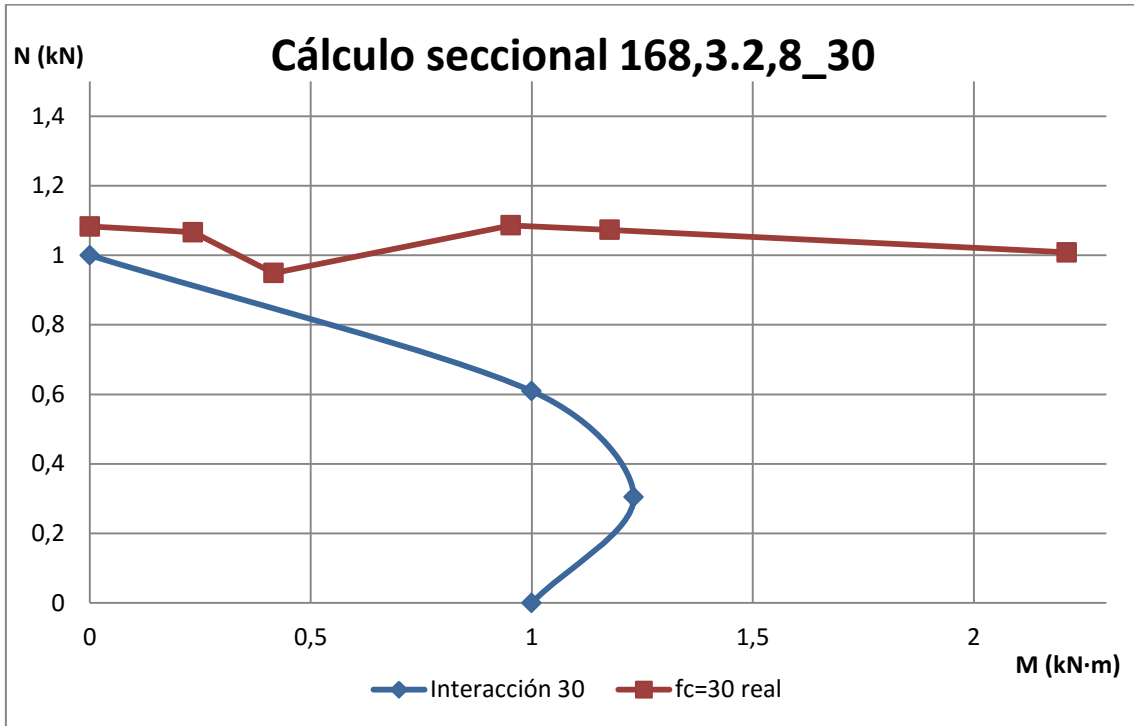
Eje débil

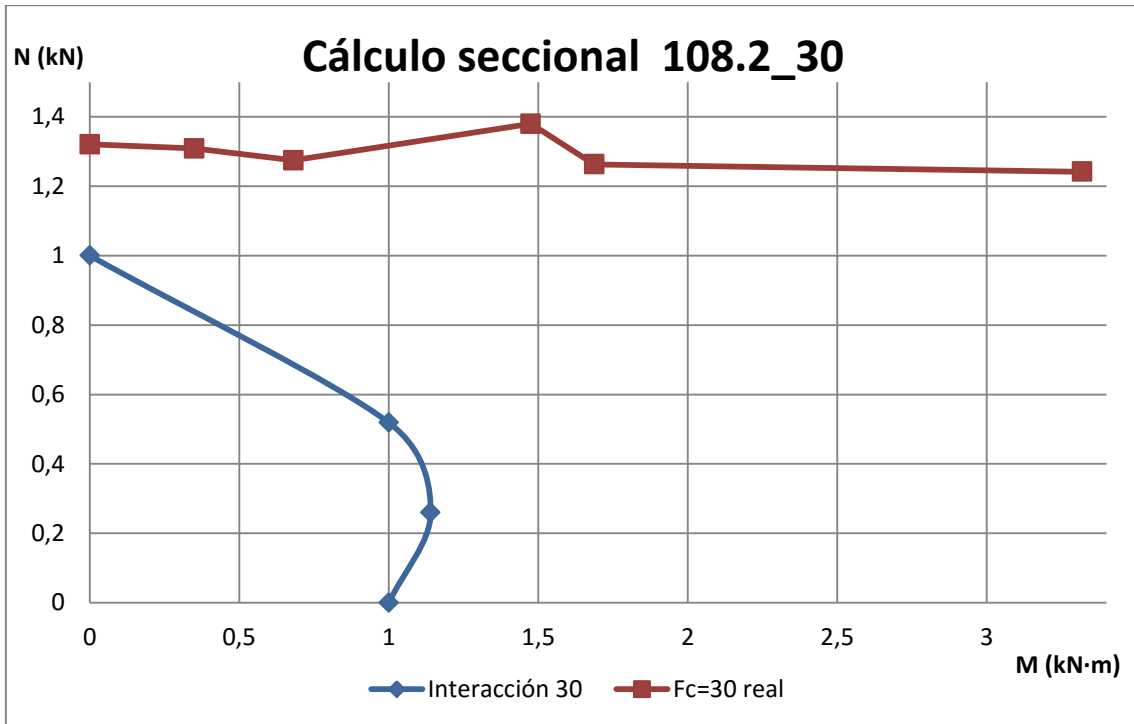
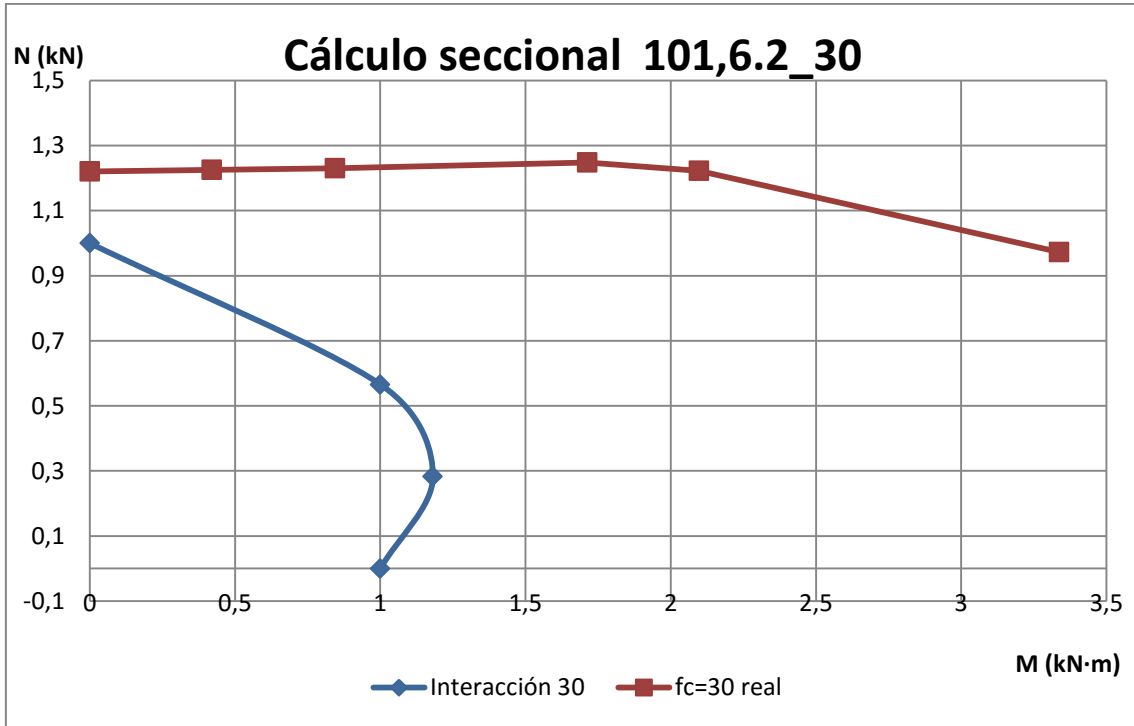


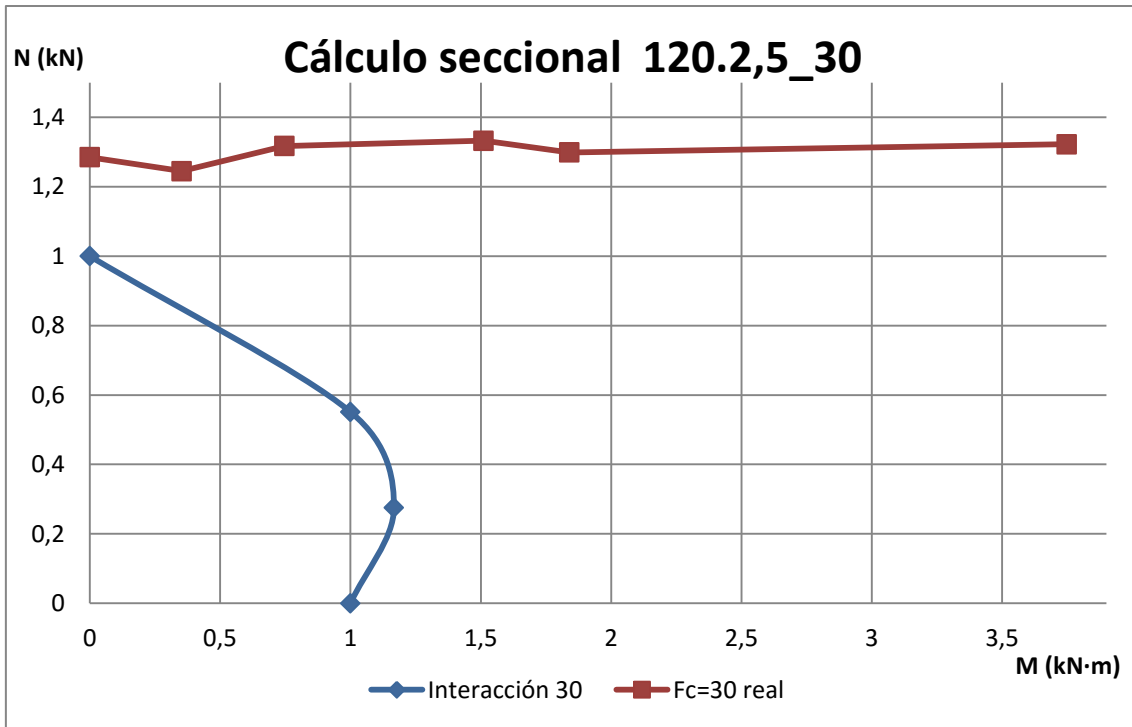
Eje fuerte



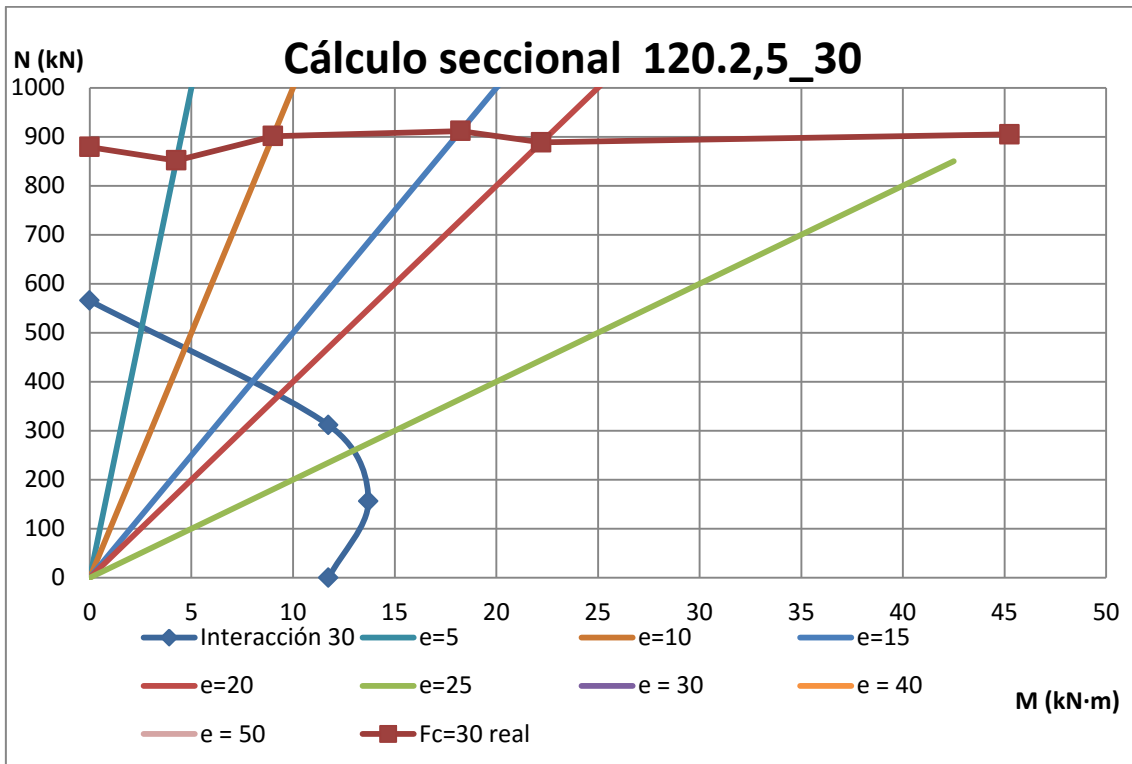
10.1.2. Perfiles circulares

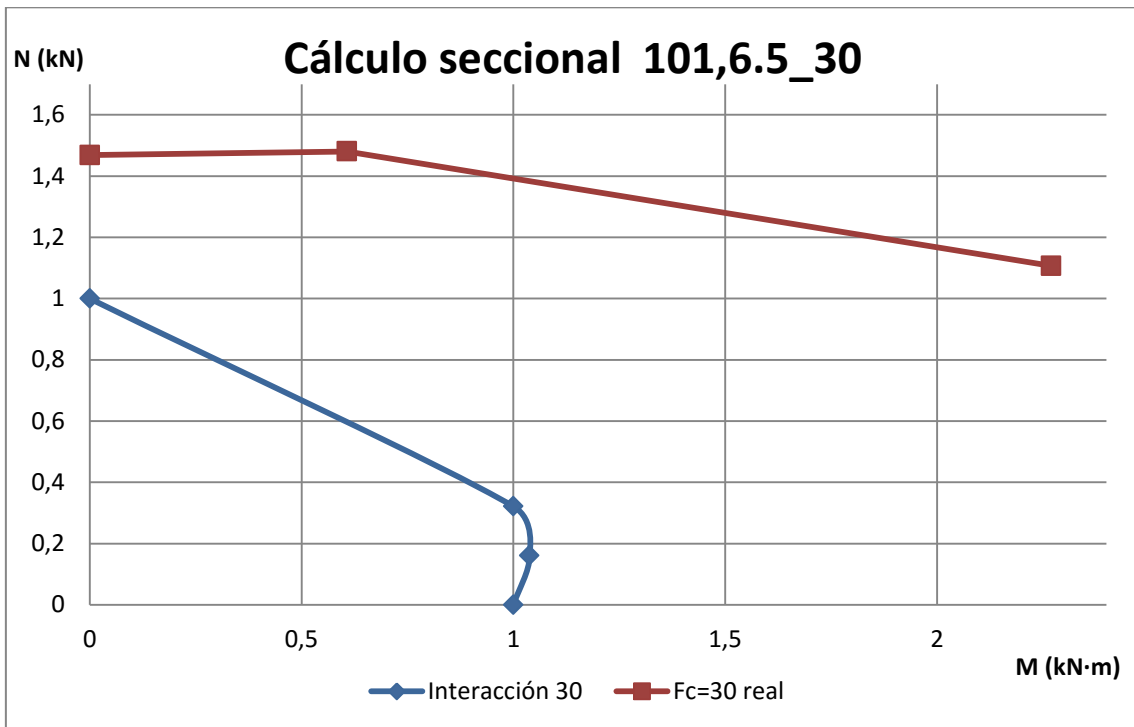
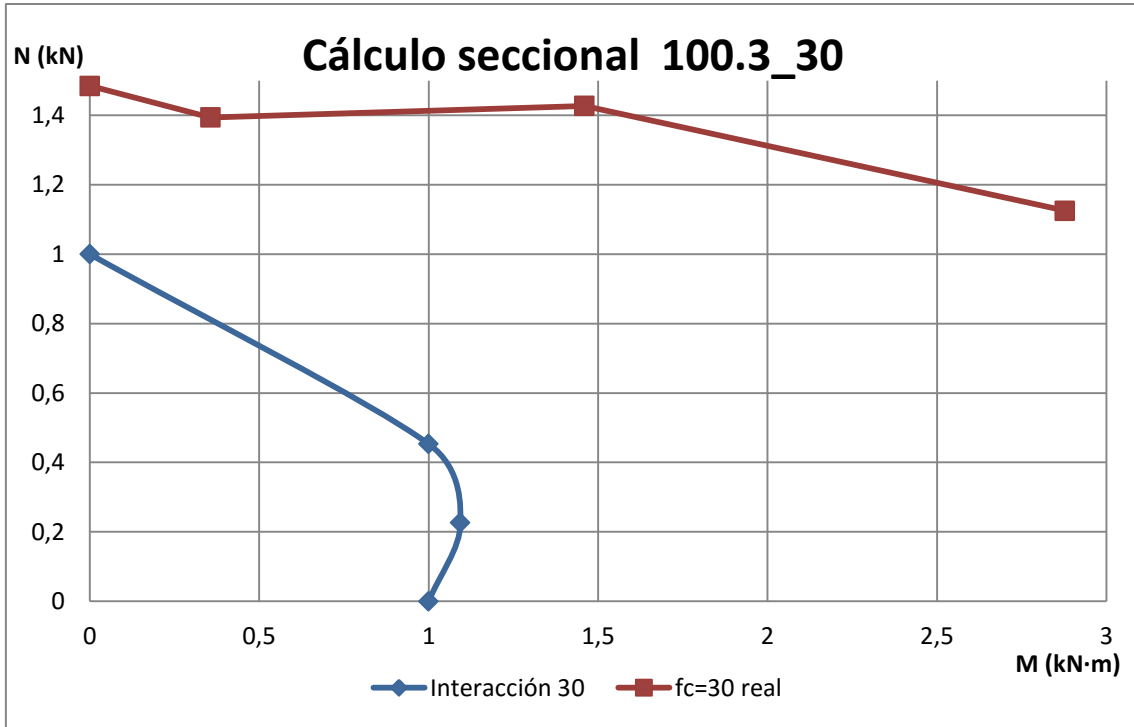




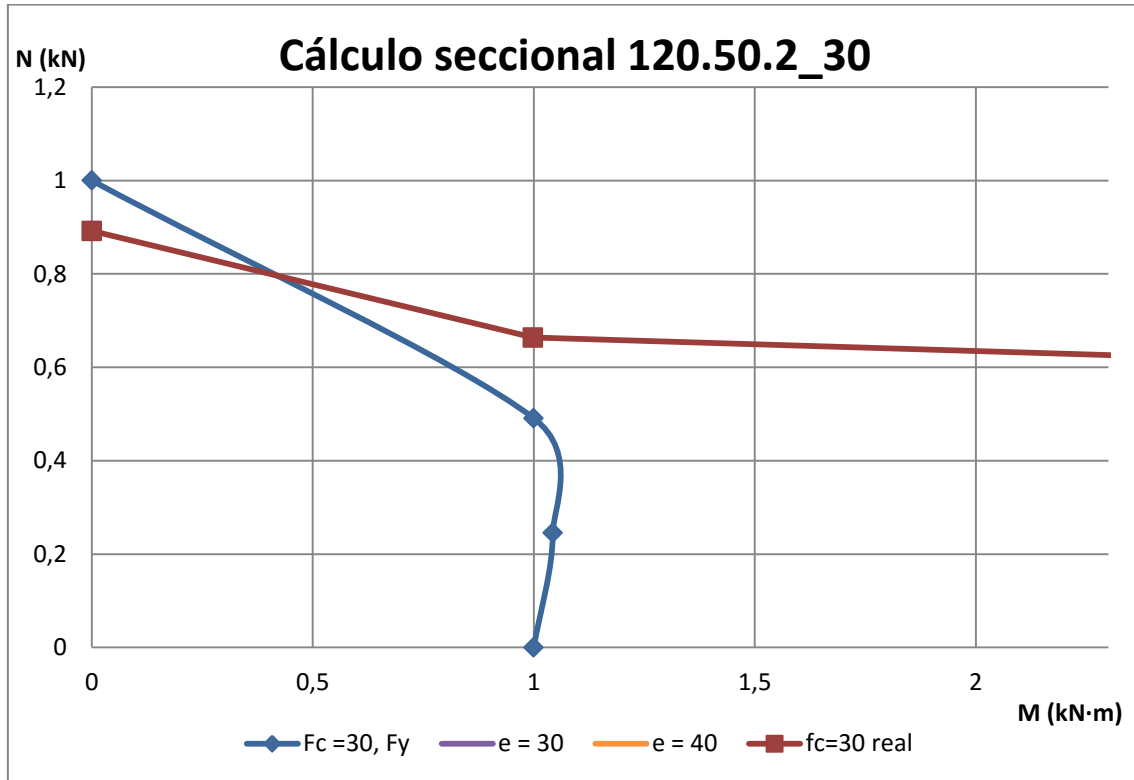


Para estos ensayos mostramos también la gráfica absoluta ya que el hormigón introducido en los perfiles alcanzó una resistencia característica de 41,44 MPa. Como se ve a continuación en la gráfica absoluta hay una mayor diferencia respecto a la curva de interacción seccional al no tener en cuenta la “corrección” por dicha sobre resistencia.



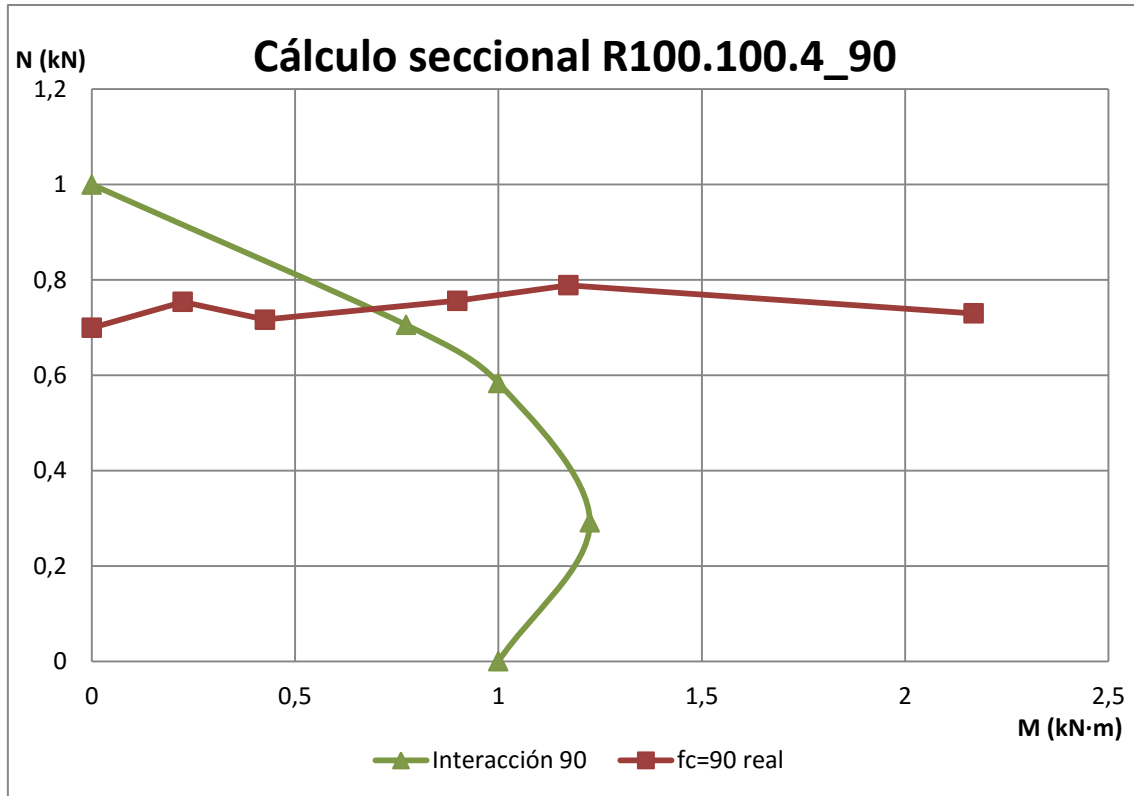


10.1.3. Perfiles ovalados

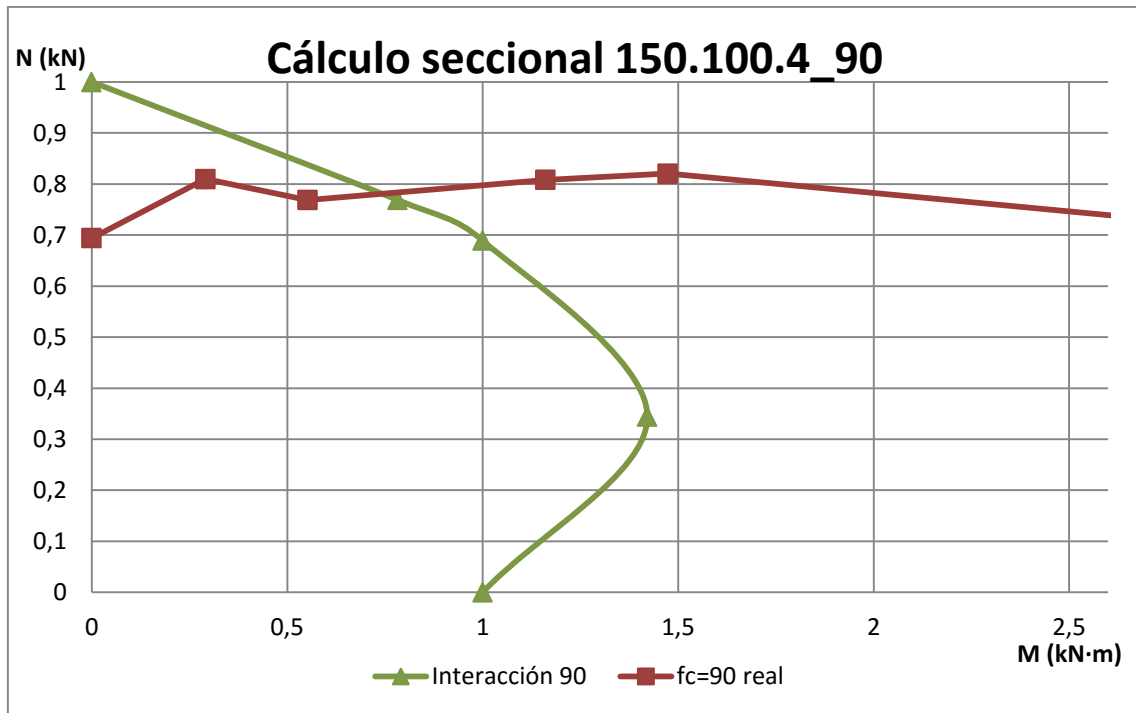


10.2. Gráficas con hormigón de 90 MPa

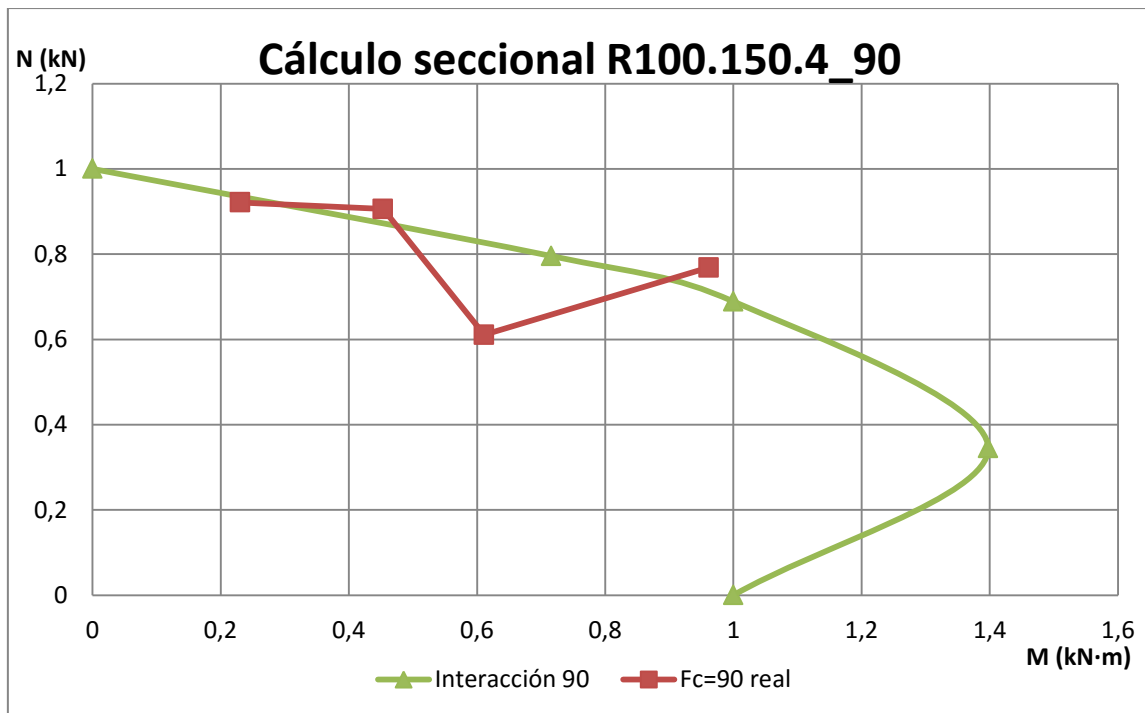
10.2.1. Perfiles rectangulares



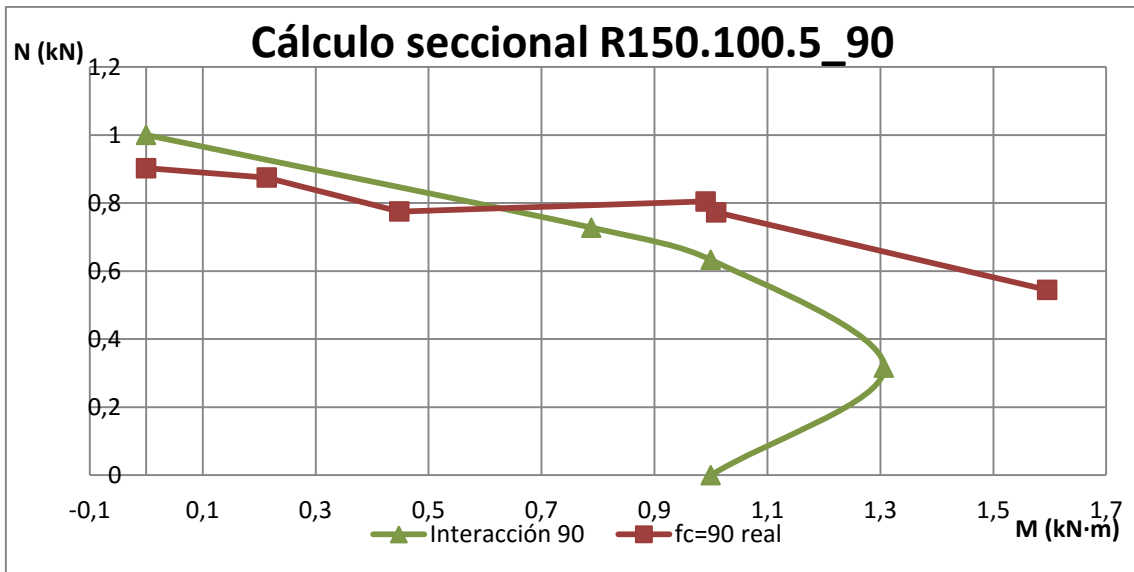
Eje débil



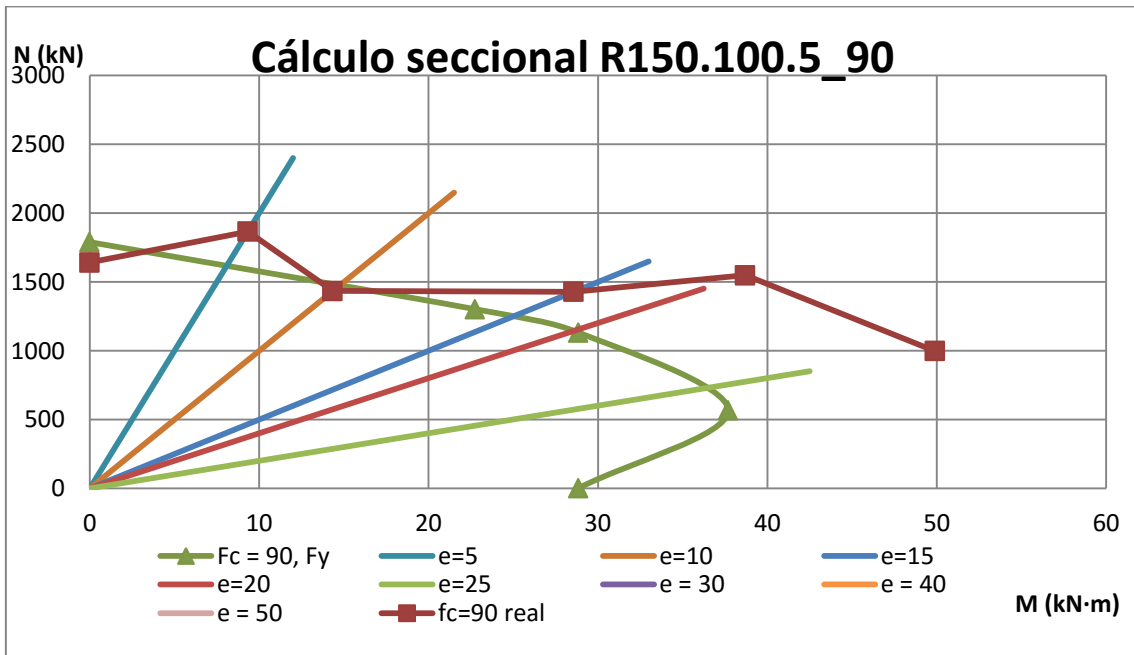
Eje fuerte



Eje débil



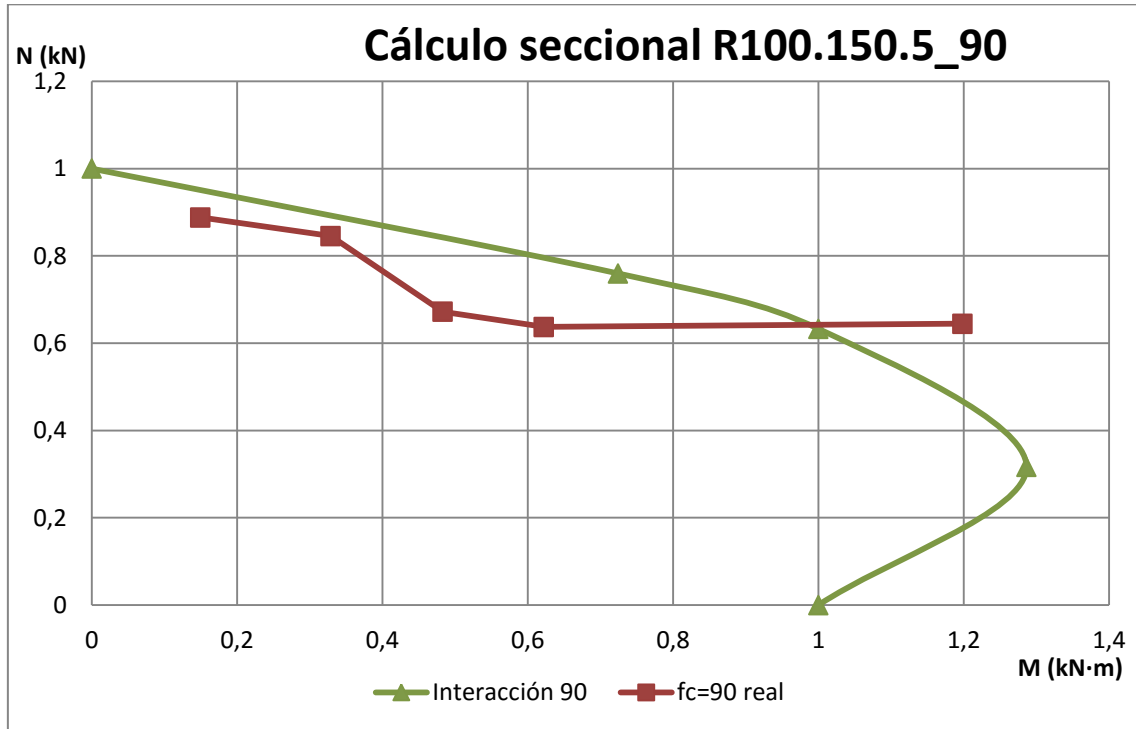
En este caso se muestra también la gráfica absoluta para ver como la curva cambia para este caso. Esto es debido a que el acero usado para los ensayos es de distintos tubos y por tanto con distintos límites elásticos.



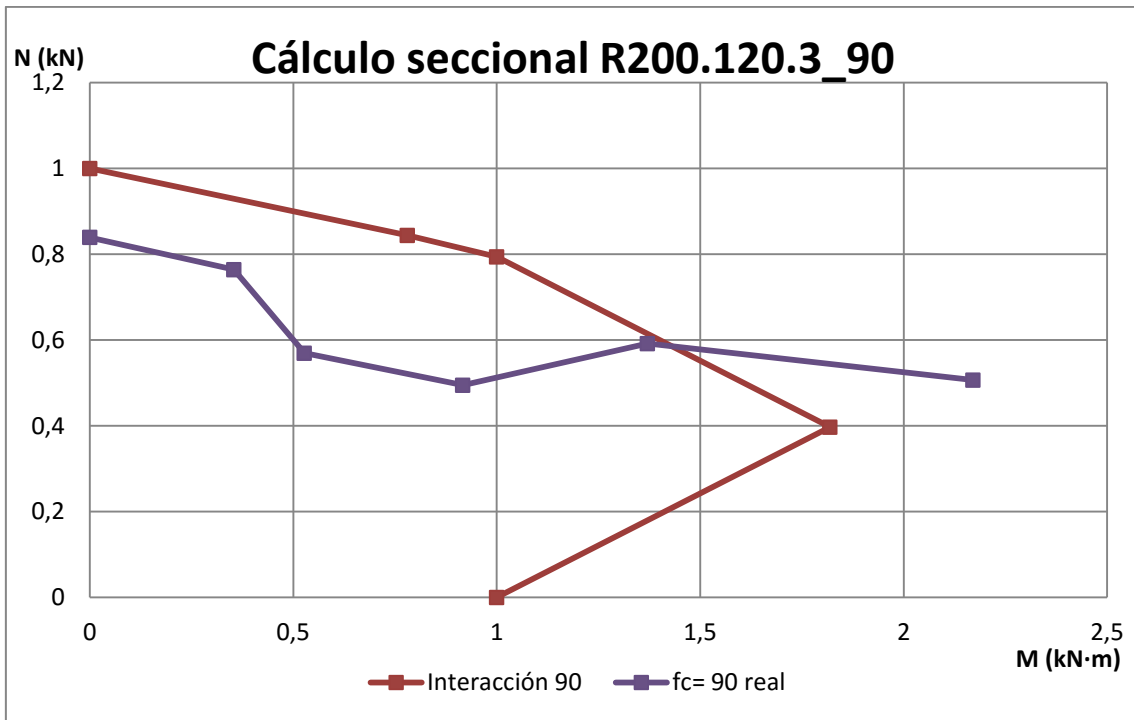
| e(mm) | Fy exp(MPa) |
|-------|-------------|
| 0 | 293,56 |
| 5 | 424,5 |
| 10 | 306,38 |
| 20 | 275 |
| 25 | 370,39 |
| 50 | 299,285 |

Se observa como los puntos con mayor cambio son lo de excentricidad 5 y 25 mm ya que su límite elástico es muy superior a los 275 MPa. En esta gráfica se describe muy bien la necesidad de relativizar las curvas para poder comparar todos los puntos de una manera correcta.

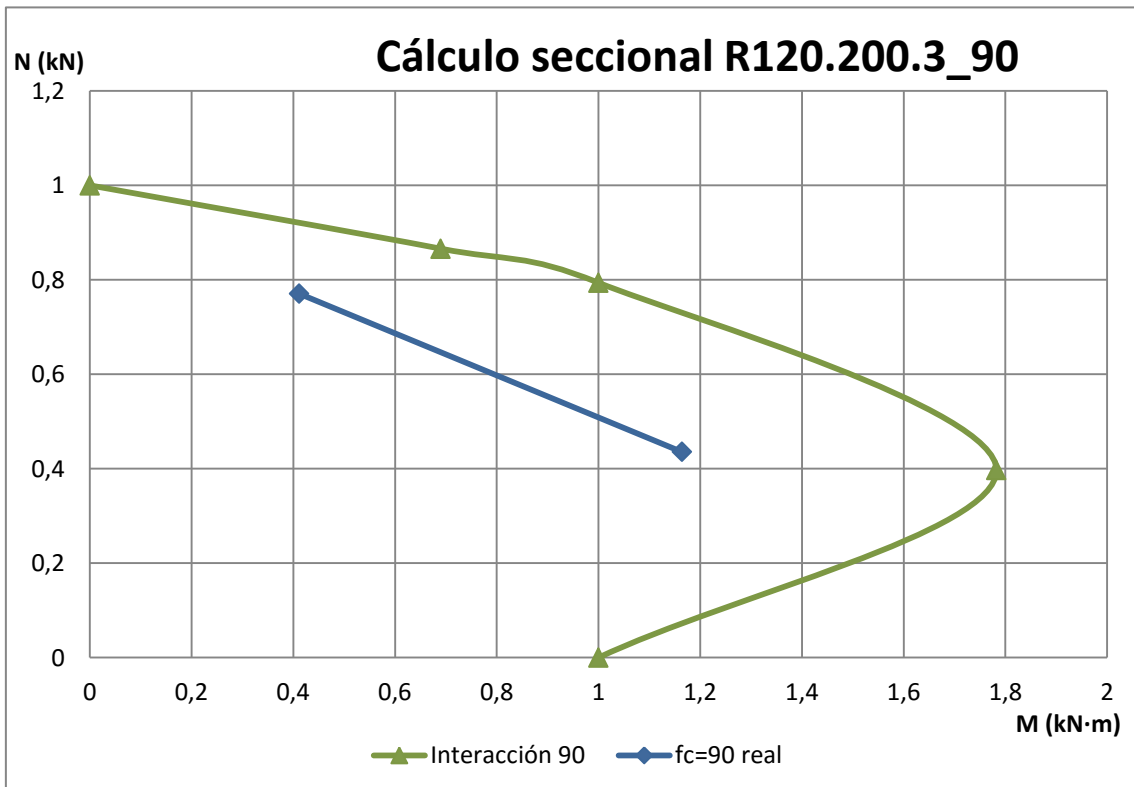
Eje fuerte



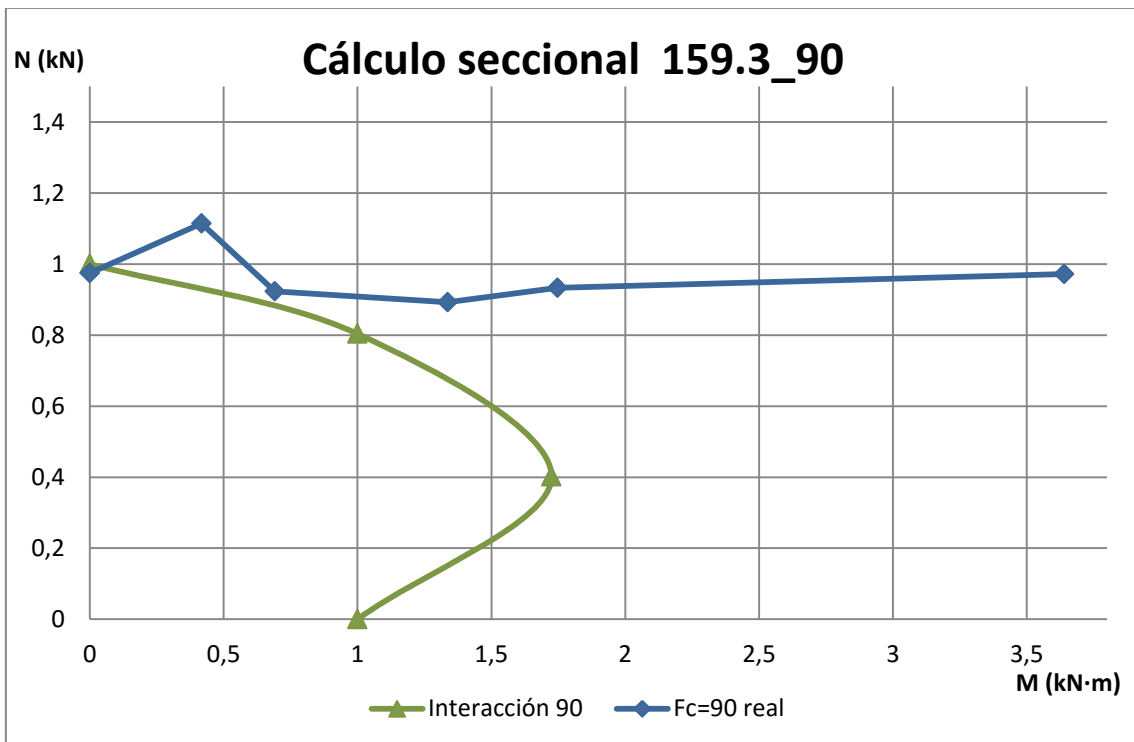
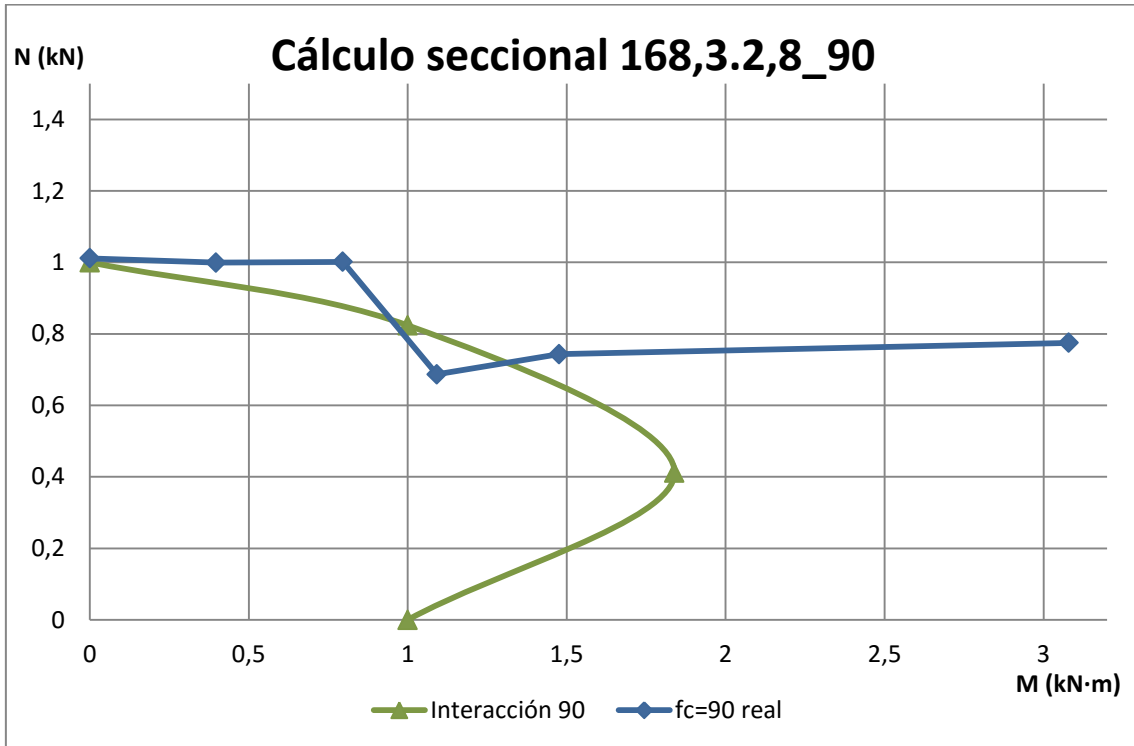
Eje débil



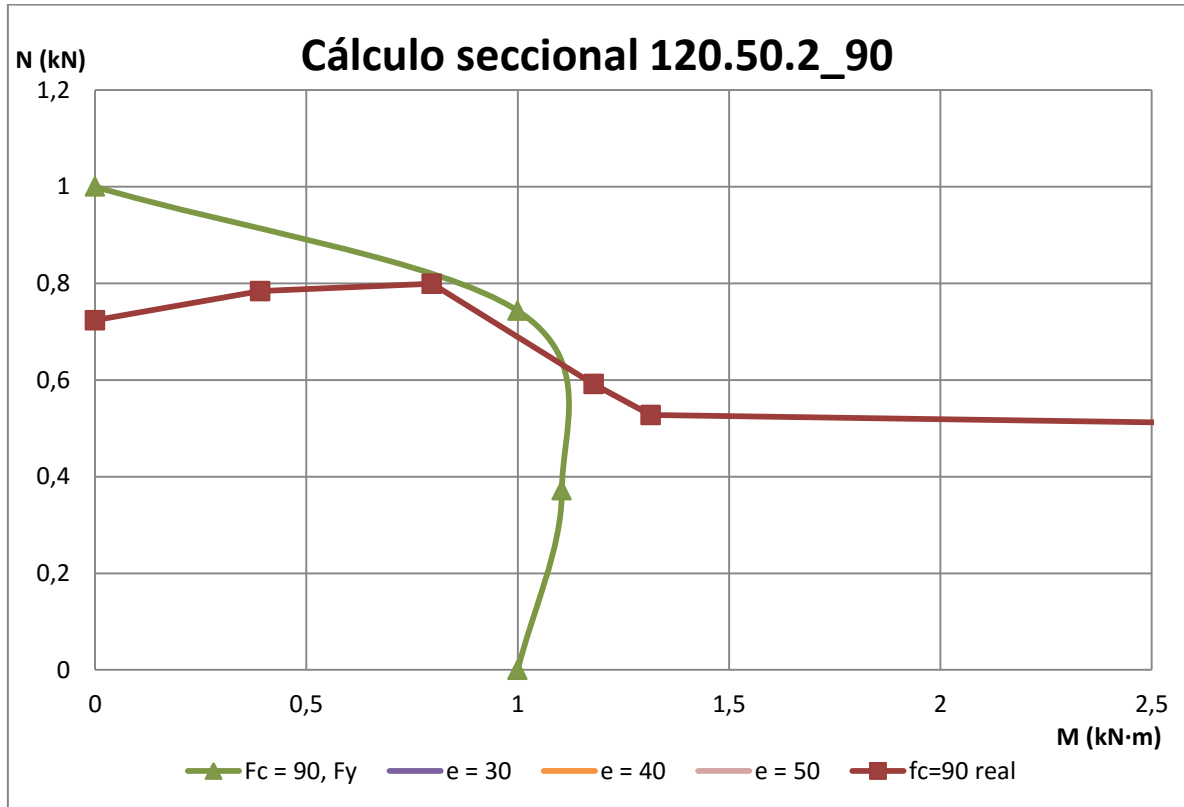
Eje fuerte (Solamente con e = 10 y 50 mm)



10.2.2. Perfiles circulares



10.2.3. Perfiles Ovalados



ANEJO 2 Registro de tablas de estudio económico

Índice

10. ANEJO 2: Registro de tablas de estudio económico ¡Error! Marcador no definido.

10.1. CFTs rectangulares y cuadrados ¡Error! Marcador no definido.

10.1.1. Precio de HEB ¡Error! Marcador no definido.

10.1.2. Precio pilar mixto y resultado pilar óptimo..... ¡Error! Marcador no definido.

10.2. CFTs circulares..... ¡Error! Marcador no definido.

10.2.1. Precio HEB ¡Error! Marcador no definido.

10.2.2. Precio pilar mixto y resultado pilar óptimo..... ¡Error! Marcador no definido.

10.3. CFTs ovalados..... ¡Error! Marcador no definido.

10.3.1. Precio HEB ¡Error! Marcador no definido.

10.3.2. Precio pilar mixto y resultado pilar óptimo..... ¡Error! Marcador no definido.

ANEJO 2

11. Registro de tablas de estudio económico

En el Anejo presente se mostraran las tablas donde se muestran los resultados de los precios de las alternativas planteadas en el estudio económico.

11.1. CFTs rectangulares y cuadrados

11.1.1. Precio de HEB

| Name | perfil HEB S235 | precio HEB S235 | perfil HEB S275 | precio HEB S275 | perfil HEB S355 | precio HEB S355 |
|-----------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| S/125.125.3_300_30.275_0(1)(119) | HEB 140 | 73,47 | HEB 140 | 74,48 | HEB 140 | 75,83 |
| S/125.125.3_300_30.275_5(1)(119) | HEB 140 | 73,47 | HEB 140 | 74,48 | HEB 140 | 75,83 |
| S/125.125.3_300_30.275_10(1)(119) | HEB 160 | 92,87 | HEB 160 | 94,15 | HEB 160 | 95,85 |
| S/125.125.3_300_30.275_20(1)(119) | HEB 160 | 92,87 | HEB 160 | 94,15 | HEB 160 | 95,85 |
| S/125.125.3_300_30.275_50(1)(119) | HEB 180 | 111,62 | HEB 180 | 113,15 | HEB 180 | 115,20 |
| S/125.125.4_300_30.275_0(1)(120) | HEB 160 | 92,87 | HEB 160 | 94,15 | HEB 160 | 95,85 |
| S/125.125.4_300_30.275_5(1)(120) | HEB 160 | 92,87 | HEB 160 | 94,15 | HEB 160 | 95,85 |
| S/125.125.4_300_30.275_10(1)(121) | HEB 160 | 92,87 | HEB 160 | 94,15 | HEB 160 | 95,85 |
| S/125.125.4_300_30.275_20(1)(122) | HEB 180 | 111,62 | HEB 180 | 113,15 | HEB 180 | 115,20 |
| S/125.125.4_300_30.275_25(1)(124) | HEB 180 | 111,62 | HEB 180 | 113,15 | HEB 180 | 115,20 |
| S/125.125.4_300_30.275_50(1)(124) | HEB 180 | 111,62 | HEB 180 | 113,15 | HEB 180 | 115,20 |
| S/100.100.4_300_30.355_0(1)(16) | HEB 140 | 73,47 | HEB 140 | 74,48 | HEB 140 | 75,83 |
| S/100.100.4_300_30.355_5(1)(16) | HEB 160 | 92,87 | HEB 160 | 94,15 | HEB 160 | 95,85 |
| S/100.100.4_300_30.355_10(1)(16) | HEB 160 | 92,87 | HEB 160 | 94,15 | HEB 160 | 95,85 |
| S/100.100.4_300_30.355_20(1)(16) | HEB 180 | 111,62 | HEB 180 | 113,15 | HEB 180 | 115,20 |
| S/100.100.4_300_30.355_25(1)(16) | HEB 180 | 111,62 | HEB 180 | 113,15 | HEB 180 | 115,20 |
| S/100.100.4_300_30.355_50(1)(16) | HEB 180 | 111,62 | HEB 180 | 113,15 | HEB 180 | 115,20 |
| S/100.100.4_300_90.355_0(1)(12) | HEB 160 | 92,87 | HEB 160 | 94,15 | HEB 160 | 95,85 |
| S/100.100.4_300_90.355_5(1)(5) | HEB 160 | 92,87 | HEB 160 | 94,15 | HEB 160 | 95,85 |
| S/100.100.4_300_90.355_10(1)(4) | HEB 160 | 92,87 | HEB 160 | 94,15 | HEB 160 | 95,85 |
| S/100.100.4_300_90.355_20(1)(8) | HEB 180 | 111,62 | HEB 180 | 113,15 | HEB 180 | 115,20 |
| S/100.100.4_300_90.355_25(1)(6) | HEB 200 | 133,63 | HEB 200 | 135,47 | HEB 200 | 137,93 |
| S/100.100.4_300_90.355_50(1)(2) | HEB 200 | 133,63 | HEB 200 | 135,47 | HEB 200 | 137,93 |
| R/150.100.4_300_30.275_0(1)(38) | HEB 140 | 73,47 | HEB 140 | 74,48 | HEB 140 | 75,83 |
| R/150.100.4_300_30.275_5(1)(39) | HEB 160 | 92,87 | HEB 160 | 94,15 | HEB 160 | 95,85 |
| R/150.100.4_300_30.275_10(1)(39) | HEB 160 | 92,87 | HEB 160 | 94,15 | HEB 160 | 95,85 |
| R/150.100.4_300_30.275_20(1)(39) | HEB 160 | 92,87 | HEB 160 | 94,15 | HEB 160 | 95,85 |
| R/150.100.4_300_30.275_25(1)(39) | HEB 180 | 111,62 | HEB 180 | 113,15 | HEB 180 | 115,20 |
| R/150.100.4_300_30.275_50(1)(38) | HEB 180 | 111,62 | HEB 180 | 113,15 | HEB 180 | 115,20 |
| R/150.100.4_300_90.275_0(1)(38) | HEB 160 | 92,87 | HEB 160 | 94,15 | HEB 160 | 95,85 |
| R/150.100.4_300_90.275_5(1)(20) | HEB 200 | 133,63 | HEB 200 | 135,47 | HEB 200 | 137,93 |
| R/150.100.4_300_90.275_10(1)(23) | HEB 200 | 133,63 | HEB 200 | 135,47 | HEB 200 | 137,93 |
| R/150.100.4_300_90.275_20(1)(19) | HEB 220 | 155,87 | HEB 220 | 158,02 | HEB 220 | 160,88 |

ANÁLISIS NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DE DIFERENTES SOLUCIONES ESTRUCTURALES A BASE DE PILARES MIXTOS TIPO CONCRETE-FILLED STEEL TUBE

| | | | | | | |
|-----------------------------------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|
| R/150.100.4_300_90.275_25(1)(24) | HEB 220 | 155,87 | HEB 220 | 158,02 | HEB 220 | 160,88 |
| R/150.100.4_300_90.275_50(1)(18) | HEB 240 | 181,38 | HEB 240 | 183,87 | HEB 240 | 187,20 |
| R/100.150.4_300_30.275_5(1)(93) | HEB 160 | 92,87 | HEB 160 | 94,15 | HEB 160 | 95,85 |
| R/100.150.4_300_30.275_10(1)(93) | HEB 180 | 111,62 | HEB 180 | 113,15 | HEB 180 | 115,20 |
| R/100.150.4_300_30.275_20(1)(93) | HEB 180 | 111,62 | HEB 180 | 113,15 | HEB 180 | 115,20 |
| R/100.150.4_300_30.275_25(1)(93) | HEB 180 | 111,62 | HEB 180 | 113,15 | HEB 180 | 115,20 |
| R/100.150.4_300_30.275_50(1)(93) | HEB 180 | 111,62 | HEB 180 | 113,15 | HEB 180 | 115,20 |
| R/100.150.4_300_90.275_5(1)(22) | HEB 200 | 133,63 | HEB 200 | 135,47 | HEB 200 | 137,93 |
| R/100.150.4_300_90.275_10(1)(40) | HEB 220 | 155,87 | HEB 220 | 158,02 | HEB 220 | 160,88 |
| R/100.150.4_300_90.275_20(1)(41) | HEB 180 | 111,62 | HEB 180 | 113,15 | HEB 180 | 115,20 |
| R/100.150.4_300_90.275_25(1)(17) | HEB 220 | 155,87 | HEB 220 | 158,02 | HEB 220 | 160,88 |
| R/150.100.5_300_30.275_0(1)(33) | HEB 160 | 92,87 | HEB 160 | 94,15 | HEB 160 | 95,85 |
| R/150.100.5_300_30.275_5(1)(33) | HEB 180 | 111,62 | HEB 180 | 113,15 | HEB 180 | 115,20 |
| R/150.100.5_300_30.275_10(1)(37) | HEB 180 | 111,62 | HEB 180 | 113,15 | HEB 180 | 115,20 |
| R/150.100.5_300_30.275_20(1)(37) | HEB 180 | 111,62 | HEB 180 | 113,15 | HEB 180 | 115,20 |
| R/150.100.5_300_30.275_25(1)(36) | HEB 200 | 133,63 | HEB 200 | 135,47 | HEB 200 | 137,93 |
| R/150.100.5_300_30.275_50(1)(36) | HEB 200 | 133,63 | HEB 200 | 135,47 | HEB 200 | 137,93 |
| R/150.100.5_300_90.275_0(1)(33) | HEB 200 | 133,63 | HEB 200 | 135,47 | HEB 200 | 137,93 |
| R/150.100.5_300_90.275_5(1)(28) | HEB 220 | 155,87 | HEB 220 | 158,02 | HEB 220 | 160,88 |
| R/150.100.5_300_90.275_10(1)(31) | HEB 200 | 133,63 | HEB 200 | 135,47 | HEB 200 | 137,93 |
| R/150.100.5_300_90.275_20(1)(105) | HEB 220 | 155,87 | HEB 220 | 158,02 | HEB 220 | 160,88 |
| R/150.100.5_300_90.275_25(1)(27) | HEB 220 | 155,87 | HEB 220 | 158,02 | HEB 220 | 160,88 |
| R/150.100.5_300_90.275_50(1)(32) | HEB 200 | 133,63 | HEB 200 | 135,47 | HEB 200 | 137,93 |
| R/100.150.5_300_30.275_5(1)(34) | HEB 180 | 111,62 | HEB 180 | 113,15 | HEB 180 | 115,20 |
| R/100.150.5_300_30.275_10(1)(34) | HEB 180 | 111,62 | HEB 180 | 113,15 | HEB 180 | 115,20 |
| R/100.150.5_300_30.275_20(1)(34) | HEB 180 | 111,62 | HEB 180 | 113,15 | HEB 180 | 115,20 |
| R/100.150.5_300_30.275_25(1)(34) | HEB 200 | 133,63 | HEB 200 | 135,47 | HEB 200 | 137,93 |
| R/100.150.5_300_30.275_50(1)(34) | HEB 200 | 133,63 | HEB 200 | 135,47 | HEB 200 | 137,93 |
| R/100.150.5_300_90.275_5(1)(26) | HEB 240 | 181,38 | HEB 240 | 183,87 | HEB 240 | 187,20 |
| R/100.150.5_300_90.275_10(1)(35) | HEB 220 | 155,87 | HEB 220 | 158,02 | HEB 220 | 160,88 |
| R/100.150.5_300_90.275_20(1)(29) | HEB 220 | 155,87 | HEB 220 | 158,02 | HEB 220 | 160,88 |
| R/100.150.5_300_90.275_25(1)(30) | HEB 200 | 133,63 | HEB 200 | 135,47 | HEB 200 | 137,93 |
| R/100.150.5_300_90.275_50(1)(25) | HEB 240 | 181,38 | HEB 240 | 183,87 | HEB 240 | 187,20 |
| R/200.120.3_300_30.275_0(1)(86) | HEB 160 | 92,87 | HEB 160 | 94,15 | HEB 160 | 95,85 |
| R/200.120.3_300_90.275_0(1)(86) | HEB 240 | 181,38 | HEB 240 | 183,87 | HEB 240 | 187,20 |
| R/200.120.3_300_90.275_5(1)(86) | HEB 240 | 181,38 | HEB 240 | 183,87 | HEB 240 | 187,20 |
| R/200.120.3_300_90.275_10(1)(86) | HEB 220 | 155,87 | HEB 220 | 158,02 | HEB 220 | 160,88 |
| R/200.120.3_300_90.275_20(1)(86) | HEB 200 | 133,63 | HEB 200 | 135,47 | HEB 200 | 137,93 |
| R/200.120.3_300_90.275_25(1)(86) | HEB 240 | 181,38 | HEB 240 | 183,87 | HEB 240 | 187,20 |
| R/200.120.3_300_90.275_50(1)(86) | HEB 240 | 181,38 | HEB 240 | 183,87 | HEB 240 | 187,20 |
| R/120.200.3_300_90.275_10(1)(86) | HEB 240 | 181,38 | HEB 240 | 183,87 | HEB 240 | 187,20 |
| R/120.200.3_300_90.275_50(1)(86) | HEB 220 | 155,87 | HEB 220 | 158,02 | HEB 220 | 160,88 |

11.1.2. Precio pilar mixto y resultado pilar óptimo

| Name | precio mixto | perfil óptimo | ratio mejora |
|-----------------------------------|--------------|---------------|--------------|
| S/125.125.3_300_30.275_0(1)(119) | 26,97 | pilar mixto | 0,37 |
| S/125.125.3_300_30.275_5(1)(119) | 26,97 | pilar mixto | 0,37 |
| S/125.125.3_300_30.275_10(1)(119) | 26,97 | pilar mixto | 0,29 |
| S/125.125.3_300_30.275_20(1)(119) | 26,97 | pilar mixto | 0,29 |
| S/125.125.3_300_30.275_50(1)(119) | 26,97 | pilar mixto | 0,24 |
| S/125.125.4_300_30.275_0(1)(120) | 35,04 | pilar mixto | 0,38 |
| S/125.125.4_300_30.275_5(1)(120) | 35,04 | pilar mixto | 0,38 |
| S/125.125.4_300_30.275_10(1)(121) | 35,04 | pilar mixto | 0,38 |
| S/125.125.4_300_30.275_20(1)(122) | 35,04 | pilar mixto | 0,31 |
| S/125.125.4_300_30.275_25(1)(124) | 35,04 | pilar mixto | 0,31 |
| S/125.125.4_300_30.275_50(1)(124) | 35,04 | pilar mixto | 0,31 |
| S/100.100.4_300_30.355_0(1)(16) | 27,98 | pilar mixto | 0,38 |
| S/100.100.4_300_30.355_5(1)(16) | 27,98 | pilar mixto | 0,30 |
| S/100.100.4_300_30.355_10(1)(16) | 27,98 | pilar mixto | 0,30 |
| S/100.100.4_300_30.355_20(1)(16) | 27,98 | pilar mixto | 0,25 |
| S/100.100.4_300_30.355_25(1)(16) | 27,98 | pilar mixto | 0,25 |
| S/100.100.4_300_30.355_50(1)(16) | 27,98 | pilar mixto | 0,25 |
| S/100.100.4_300_90.355_0(1)(12) | 29,17 | pilar mixto | 0,31 |
| S/100.100.4_300_90.355_5(1)(5) | 29,17 | pilar mixto | 0,31 |
| S/100.100.4_300_90.355_10(1)(4) | 29,17 | pilar mixto | 0,31 |
| S/100.100.4_300_90.355_20(1)(8) | 29,17 | pilar mixto | 0,26 |
| S/100.100.4_300_90.355_25(1)(6) | 29,17 | pilar mixto | 0,22 |
| S/100.100.4_300_90.355_50(1)(2) | 29,17 | pilar mixto | 0,22 |
| R/150.100.4_300_30.275_0(1)(38) | 34,97 | pilar mixto | 0,48 |
| R/150.100.4_300_30.275_5(1)(39) | 34,97 | pilar mixto | 0,38 |
| R/150.100.4_300_30.275_10(1)(39) | 34,97 | pilar mixto | 0,38 |
| R/150.100.4_300_30.275_20(1)(39) | 34,97 | pilar mixto | 0,38 |
| R/150.100.4_300_30.275_25(1)(39) | 34,97 | pilar mixto | 0,31 |
| R/150.100.4_300_30.275_50(1)(38) | 34,97 | pilar mixto | 0,31 |
| R/150.100.4_300_90.275_0(1)(38) | 36,81 | pilar mixto | 0,40 |
| R/150.100.4_300_90.275_5(1)(20) | 36,81 | pilar mixto | 0,28 |
| R/150.100.4_300_90.275_10(1)(23) | 36,81 | pilar mixto | 0,28 |
| R/150.100.4_300_90.275_20(1)(19) | 36,81 | pilar mixto | 0,24 |
| R/150.100.4_300_90.275_25(1)(24) | 36,81 | pilar mixto | 0,24 |
| R/150.100.4_300_90.275_50(1)(18) | 36,81 | pilar mixto | 0,20 |
| R/100.150.4_300_30.275_5(1)(93) | 34,97 | pilar mixto | 0,38 |
| R/100.150.4_300_30.275_10(1)(93) | 34,97 | pilar mixto | 0,31 |
| R/100.150.4_300_30.275_20(1)(93) | 34,97 | pilar mixto | 0,31 |
| R/100.150.4_300_30.275_25(1)(93) | 34,97 | pilar mixto | 0,31 |
| R/100.150.4_300_30.275_50(1)(93) | 34,97 | pilar mixto | 0,31 |
| R/100.150.4_300_90.275_5(1)(22) | 36,81 | pilar mixto | 0,28 |
| R/100.150.4_300_90.275_10(1)(40) | 36,81 | pilar mixto | 0,24 |

ANÁLISIS NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DE DIFERENTES SOLUCIONES ESTRUCTURALES A BASE DE PILARES MIXTOS TIPO CONCRETE-FILLED STEEL TUBE

| | | | |
|-----------------------------------|-------|-------------|------|
| R/100.150.4_300_90.275_20(1)(41) | 36,81 | pilar mixto | 0,33 |
| R/100.150.4_300_90.275_25(1)(17) | 36,81 | pilar mixto | 0,24 |
| R/150.100.5_300_30.275_0(1)(33) | 42,89 | pilar mixto | 0,46 |
| R/150.100.5_300_30.275_5(1)(33) | 42,89 | pilar mixto | 0,38 |
| R/150.100.5_300_30.275_10(1)(37) | 42,89 | pilar mixto | 0,38 |
| R/150.100.5_300_30.275_20(1)(37) | 42,89 | pilar mixto | 0,38 |
| R/150.100.5_300_30.275_25(1)(36) | 42,89 | pilar mixto | 0,32 |
| R/150.100.5_300_30.275_50(1)(36) | 42,89 | pilar mixto | 0,32 |
| R/150.100.5_300_90.275_0(1)(33) | 44,66 | pilar mixto | 0,33 |
| R/150.100.5_300_90.275_5(1)(28) | 44,66 | pilar mixto | 0,29 |
| R/150.100.5_300_90.275_10(1)(31) | 44,66 | pilar mixto | 0,33 |
| R/150.100.5_300_90.275_20(1)(105) | 44,66 | pilar mixto | 0,29 |
| R/150.100.5_300_90.275_25(1)(27) | 44,66 | pilar mixto | 0,29 |
| R/150.100.5_300_90.275_50(1)(32) | 44,66 | pilar mixto | 0,33 |
| R/100.150.5_300_30.275_5(1)(34) | 42,89 | pilar mixto | 0,38 |
| R/100.150.5_300_30.275_10(1)(34) | 42,89 | pilar mixto | 0,38 |
| R/100.150.5_300_30.275_20(1)(34) | 42,89 | pilar mixto | 0,38 |
| R/100.150.5_300_30.275_25(1)(34) | 42,89 | pilar mixto | 0,32 |
| R/100.150.5_300_30.275_50(1)(34) | 42,89 | pilar mixto | 0,32 |
| R/100.150.5_300_90.275_5(1)(26) | 44,66 | pilar mixto | 0,25 |
| R/100.150.5_300_90.275_10(1)(35) | 44,66 | pilar mixto | 0,29 |
| R/100.150.5_300_90.275_20(1)(29) | 44,66 | pilar mixto | 0,29 |
| R/100.150.5_300_90.275_25(1)(30) | 44,66 | pilar mixto | 0,33 |
| R/100.150.5_300_90.275_50(1)(25) | 44,66 | pilar mixto | 0,25 |
| R/200.120.3_300_30.275_0(1)(86) | 35,18 | pilar mixto | 0,38 |
| R/200.120.3_300_90.275_0(1)(86) | 38,29 | pilar mixto | 0,21 |
| R/200.120.3_300_90.275_5(1)(86) | 38,29 | pilar mixto | 0,21 |
| R/200.120.3_300_90.275_10(1)(86) | 38,29 | pilar mixto | 0,25 |
| R/200.120.3_300_90.275_20(1)(86) | 38,29 | pilar mixto | 0,29 |
| R/200.120.3_300_90.275_25(1)(86) | 38,29 | pilar mixto | 0,21 |
| R/200.120.3_300_90.275_50(1)(86) | 38,29 | pilar mixto | 0,21 |
| R/120.200.3_300_90.275_10(1)(86) | 38,29 | pilar mixto | 0,21 |
| R/120.200.3_300_90.275_50(1)(86) | 38,29 | pilar mixto | 0,25 |

El pilar más económico es siempre el pilar mixto.

11.2. CFTs circulares

11.2.1. Precio HEB

| Name | perfil HEB S235 | precio HEB S235 | perfil HEB S275 | precio HEB S275 | perfil HEB S355 | precio HEB S355 |
|----------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| C/168,3.2,8_300_30.275_0(1)(70) | HEB 180 | 111,616 | HEB 180 | 113,152 | HEB 180 | 115,2 |
| C/168,3.2,8_300_30.275_5(1)(70) | HEB 180 | 111,616 | HEB 180 | 113,152 | HEB 180 | 115,2 |
| C/168,3.2,8_300_30.275_10(1)(70) | HEB 180 | 111,616 | HEB 180 | 113,152 | HEB 180 | 115,2 |
| C/168,3.2,8_300_30.275_20(1)(70) | HEB 200 | 133,634 | HEB 200 | 135,473 | HEB 200 | 137,925 |
| C/168,3.2,8_300_30.275_25(1)(70) | HEB 200 | 133,634 | HEB 200 | 135,473 | HEB 200 | 137,925 |
| C/168,3.2,8_300_30.275_50(1)(70) | HEB 220 | 155,87 | HEB 220 | 158,015 | HEB 220 | 160,875 |
| C/168,3.2,8_300_90.275_0(1)(70) | HEB 260 | 202,74 | HEB 260 | 205,53 | HEB 260 | 209,25 |
| C/168,3.2,8_300_90.275_5(1)(70) | HEB 260 | 202,74 | HEB 260 | 205,53 | HEB 260 | 209,25 |
| C/168,3.2,8_300_90.275_10(1)(70) | HEB 260 | 202,74 | HEB 260 | 205,53 | HEB 260 | 209,25 |
| C/168,3.2,8_300_90.275_20(1)(70) | HEB 220 | 155,87 | HEB 220 | 158,015 | HEB 220 | 160,875 |
| C/168,3.2,8_300_90.275_25(1)(70) | HEB 240 | 181,376 | HEB 240 | 183,872 | HEB 240 | 187,2 |
| C/168,3.2,8_300_90.275_50(1)(70) | HEB 280 | 224,54 | HEB 280 | 227,63 | HEB 280 | 231,75 |
| C/159,0.3,0_300_30.275_0(1)(71) | HEB 160 | 92,868 | HEB 160 | 94,146 | HEB 160 | 95,85 |
| C/159,0.3,0_300_30.275_5(1)(71) | HEB 180 | 111,616 | HEB 180 | 113,152 | HEB 180 | 115,2 |
| C/159,0.3,0_300_30.275_10(1)(71) | HEB 180 | 111,616 | HEB 180 | 113,152 | HEB 180 | 115,2 |
| C/159,0.3,0_300_30.275_20(1)(71) | HEB 200 | 133,634 | HEB 200 | 135,473 | HEB 200 | 137,925 |
| C/159,0.3,0_300_30.275_25(1)(71) | HEB 200 | 133,634 | HEB 200 | 135,473 | HEB 200 | 137,925 |
| C/159,0.3,0_300_30.275_50(1)(71) | HEB 220 | 155,87 | HEB 220 | 158,015 | HEB 220 | 160,875 |
| C/159,0.3,0_300_90.275_0(1)(71) | HEB 220 | 155,87 | HEB 220 | 158,015 | HEB 220 | 160,875 |
| C/159,0.3,0_300_90.275_5(1)(71) | HEB 260 | 202,74 | HEB 260 | 205,53 | HEB 260 | 209,25 |
| C/159,0.3,0_300_90.275_10(1)(71) | HEB 240 | 181,376 | HEB 240 | 183,872 | HEB 240 | 187,2 |
| C/159,0.3,0_300_90.275_20(1)(71) | HEB 240 | 181,376 | HEB 240 | 183,872 | HEB 240 | 187,2 |
| C/159,0.3,0_300_90.275_25(1)(71) | HEB 260 | 202,74 | HEB 260 | 205,53 | HEB 260 | 209,25 |
| C/159,0.3,0_300_90.275_50(1)(71) | HEB 300 | 255,06 | HEB 300 | 258,57 | HEB 300 | 263,25 |
| C/101.6,2.0_300_275_30_00 (81) | HEB 120 | 58,206 | HEB 120 | 59,007 | HEB 120 | 60,075 |
| C/101.6,2.0_300_275_30_05 (81) | HEB 120 | 58,206 | HEB 120 | 59,007 | HEB 120 | 60,075 |
| C/101.6,2.0_300_275_30_10 (81) | HEB 120 | 58,206 | HEB 120 | 59,007 | HEB 120 | 60,075 |
| C/101.6,2.0_300_275_30_20 (81) | HEB 140 | 73,466 | HEB 140 | 74,477 | HEB 140 | 75,825 |
| C/101.6,2.0_300_275_30_25 (81) | HEB 140 | 73,466 | HEB 140 | 74,477 | HEB 140 | 75,825 |
| C/101.6,2.0_300_275_30_50 (81) | HEB 140 | 73,466 | HEB 140 | 74,477 | HEB 140 | 75,825 |
| C/108,2_300_355.30_00 (58) | HEB 120 | 58,206 | HEB 120 | 59,007 | HEB 120 | 60,075 |
| C/108,2_300_355.30_05 (67) | HEB 140 | 73,466 | HEB 140 | 74,477 | HEB 140 | 75,825 |
| C/108,2_300_355.30_10 (53) | HEB 140 | 73,466 | HEB 140 | 74,477 | HEB 140 | 75,825 |
| C/108,2_300_355.30_20 (62) | HEB 160 | 92,868 | HEB 160 | 94,146 | HEB 160 | 95,85 |
| C/108,2_300_355.30_25 (63) | HEB 160 | 92,868 | HEB 160 | 94,146 | HEB 160 | 95,85 |
| C/108,2_300_355.30_50 (61) | HEB 180 | 111,616 | HEB 180 | 113,152 | HEB 180 | 115,2 |
| C/120.2,5_300_275.30_00 (83) | HEB 140 | 73,466 | HEB 140 | 74,477 | HEB 140 | 75,825 |
| C/120.2,5_300_275.30_05 (83) | HEB 140 | 73,466 | HEB 140 | 74,477 | HEB 140 | 75,825 |
| C/120.2,5_300_275.30_10 (83) | HEB 160 | 92,868 | HEB 160 | 94,146 | HEB 160 | 95,85 |

ANÁLISIS NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DE DIFERENTES SOLUCIONES ESTRUCTURALES A BASE DE PILARES MIXTOS TIPO CONCRETE-FILLED STEEL TUBE

| | | | | | | |
|-------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| C/120.2,5_300_275.30_20 (83) | HEB 180 | 111,616 | HEB 180 | 113,152 | HEB 180 | 115,2 |
| C/120.2,5_300_275.30_25 (83) | HEB 180 | 111,616 | HEB 180 | 113,152 | HEB 180 | 115,2 |
| C/120.2,5_300_275.30_50 (83) | HEB 200 | 133,634 | HEB 200 | 135,473 | HEB 200 | 137,925 |
| C/100.3_300_275.30_00 (133) | HEB 120 | 58,206 | HEB 120 | 59,007 | HEB 120 | 60,075 |
| C/100.3_300_275.30_05 (127) | HEB 120 | 58,206 | HEB 120 | 59,007 | HEB 120 | 60,075 |
| C/100.3_300_275.30_20 (127) | HEB 160 | 92,868 | HEB 160 | 94,146 | HEB 160 | 95,85 |
| C/100.3_300_275.30_50 (131) | HEB 160 | 92,868 | HEB 160 | 94,146 | HEB 160 | 95,85 |
| C/101.6,5_300_275.30_00 (132) | HEB 140 | 73,466 | HEB 140 | 74,477 | HEB 140 | 75,825 |
| C/101.6,5_300_275.30_10 (130) | HEB 160 | 92,868 | HEB 160 | 94,146 | HEB 160 | 95,85 |
| C/101.6,5_300_275.30_50 (130) | HEB 180 | 111,616 | HEB 180 | 113,152 | HEB 180 | 115,2 |
| C/160.6_300_275.30_00 (129) | HEB 240 | 181,376 | HEB 240 | 183,872 | HEB 240 | 187,2 |
| C/101.6,3_300_275.30_00 (128) | HEB 120 | 58,206 | HEB 120 | 59,007 | HEB 120 | 60,075 |

11.2.2. Precio pilar mixto y resultado pilar óptimo

| Name | precio mixto | perfil óptimo | ratio mejora |
|----------------------------------|--------------|---------------|--------------|
| C/168,3.2,8_300_30.275_0(1)(70) | 27,67 | pilar mixto | 0,248 |
| C/168,3.2,8_300_30.275_5(1)(70) | 27,67 | pilar mixto | 0,248 |
| C/168,3.2,8_300_30.275_10(1)(70) | 27,67 | pilar mixto | 0,248 |
| C/168,3.2,8_300_30.275_20(1)(70) | 27,67 | pilar mixto | 0,207 |
| C/168,3.2,8_300_30.275_25(1)(70) | 27,67 | pilar mixto | 0,207 |
| C/168,3.2,8_300_30.275_50(1)(70) | 27,67 | pilar mixto | 0,178 |
| C/168,3.2,8_300_90.275_0(1)(70) | 30,60 | pilar mixto | 0,151 |
| C/168,3.2,8_300_90.275_5(1)(70) | 30,60 | pilar mixto | 0,151 |
| C/168,3.2,8_300_90.275_10(1)(70) | 30,60 | pilar mixto | 0,151 |
| C/168,3.2,8_300_90.275_20(1)(70) | 30,60 | pilar mixto | 0,196 |
| C/168,3.2,8_300_90.275_25(1)(70) | 30,60 | pilar mixto | 0,169 |
| C/168,3.2,8_300_90.275_50(1)(70) | 30,60 | pilar mixto | 0,136 |
| C/159,0.3,0_300_30.275_0(1)(71) | 27,65 | pilar mixto | 0,298 |
| C/159,0.3,0_300_30.275_5(1)(71) | 27,65 | pilar mixto | 0,248 |
| C/159,0.3,0_300_30.275_10(1)(71) | 27,65 | pilar mixto | 0,248 |
| C/159,0.3,0_300_30.275_20(1)(71) | 27,65 | pilar mixto | 0,207 |
| C/159,0.3,0_300_30.275_25(1)(71) | 27,65 | pilar mixto | 0,207 |
| C/159,0.3,0_300_30.275_50(1)(71) | 27,65 | pilar mixto | 0,177 |
| C/159,0.3,0_300_90.275_0(1)(71) | 30,23 | pilar mixto | 0,194 |
| C/159,0.3,0_300_90.275_5(1)(71) | 30,23 | pilar mixto | 0,149 |
| C/159,0.3,0_300_90.275_10(1)(71) | 30,23 | pilar mixto | 0,167 |
| C/159,0.3,0_300_90.275_20(1)(71) | 30,23 | pilar mixto | 0,167 |
| C/159,0.3,0_300_90.275_25(1)(71) | 30,23 | pilar mixto | 0,149 |
| C/159,0.3,0_300_90.275_50(1)(71) | 30,23 | pilar mixto | 0,119 |
| C/101.6,2.0_300_275_30_00 (81) | 11,73 | pilar mixto | 0,201 |
| C/101.6,2.0_300_275_30_05 (81) | 11,73 | pilar mixto | 0,201 |
| C/101.6,2.0_300_275_30_10 (81) | 11,73 | pilar mixto | 0,201 |
| C/101.6,2.0_300_275_30_20 (81) | 11,73 | pilar mixto | 0,160 |
| C/101.6,2.0_300_275_30_25 (81) | 11,73 | pilar mixto | 0,160 |

| | | | |
|--------------------------------|-------|-------------|-------|
| C/101.6,2.0_300_275.30_50 (81) | 11,73 | pilar mixto | 0,160 |
| C/108,2_300_355.30_00 (58) | 12,75 | pilar mixto | 0,219 |
| C/108,2_300_355.30_05 (67) | 12,75 | pilar mixto | 0,174 |
| C/108,2_300_355.30_10 (53) | 12,75 | pilar mixto | 0,174 |
| C/108,2_300_355.30_20 (62) | 12,75 | pilar mixto | 0,137 |
| C/108,2_300_355.30_25 (63) | 12,75 | pilar mixto | 0,137 |
| C/108,2_300_355.30_50 (61) | 12,75 | pilar mixto | 0,114 |
| C/120.2,5_300_275.30_00 (83) | 17,22 | pilar mixto | 0,234 |
| C/120.2,5_300_275.30_05 (83) | 17,22 | pilar mixto | 0,234 |
| C/120.2,5_300_275.30_10 (83) | 17,22 | pilar mixto | 0,185 |
| C/120.2,5_300_275.30_20 (83) | 17,22 | pilar mixto | 0,154 |
| C/120.2,5_300_275.30_25 (83) | 17,22 | pilar mixto | 0,154 |
| C/120.2,5_300_275.30_50 (83) | 17,22 | pilar mixto | 0,129 |
| C/100.3_300_275.30_00 (133) | 16,67 | pilar mixto | 0,286 |
| C/100.3_300_275.30_05 (127) | 16,67 | pilar mixto | 0,286 |
| C/100.3_300_275.30_20 (127) | 16,67 | pilar mixto | 0,179 |
| C/100.3_300_275.30_50 (131) | 16,67 | pilar mixto | 0,179 |
| C/101,6.5_300_275.30_00 (132) | 27,09 | pilar mixto | 0,369 |
| C/101,6.5_300_275.30_10 (130) | 27,09 | pilar mixto | 0,292 |
| C/101,6.5_300_275.30_50 (130) | 27,09 | pilar mixto | 0,243 |
| C/160.6_300_275.30_00 (129) | 52,36 | pilar mixto | 0,289 |
| C/101,6.3_300_275.30_00 (128) | 16,96 | pilar mixto | 0,291 |

El pilar más económico es siempre el pilar mixto.

11.3. CFTs ovalados

11.3.1. Precio HEB

| Name | perfil HEB S235 | precio HEB S235 | perfil HEB S275 | precio HEB S275 | perfil HEB S355 | precio HEB S355 |
|----------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| E/120.50.2_300_30.275_0(1)(126) | HEB 100 | 44,472 | HEB 100 | 45,084 | HEB 100 | 45,9 |
| E/120.50.2_300_30.275_20(1)(126) | HEB 100 | 44,472 | HEB 100 | 45,084 | HEB 100 | 45,9 |
| E/120.50.2_300_30.275_50(1)(126) | HEB 120 | 58,206 | HEB 120 | 59,007 | HEB 120 | 60,075 |
| E/120.50.2_300_90.275_0(1)(126) | HEB 100 | 44,472 | HEB 100 | 45,084 | HEB 100 | 45,9 |
| E/120.50.2_300_90.275_5(1)(126) | HEB 120 | 58,206 | HEB 120 | 59,007 | HEB 120 | 60,075 |
| E/120.50.2_300_90.275_10(1)(126) | HEB 120 | 58,206 | HEB 120 | 59,007 | HEB 120 | 60,075 |
| E/120.50.2_300_90.275_20(1)(126) | HEB 120 | 58,206 | HEB 120 | 59,007 | HEB 120 | 60,075 |
| E/120.50.2_300_90.275_25(1)(126) | HEB 120 | 58,206 | HEB 120 | 59,007 | HEB 120 | 60,075 |
| E/120.50.2_300_90.275_50(1)(126) | HEB 140 | 73,466 | HEB 140 | 74,477 | HEB 140 | 75,825 |

11.3.2. Precio pilar mixto y resultado pilar óptimo

| Name | precio mixto | perfil óptimo | ratio mejora |
|----------------------------------|--------------|---------------|--------------|
| E/120.50.2_300_30.275_0(1)(126) | 14,39 | pilar mixto | 0,32 |
| E/120.50.2_300_30.275_20(1)(126) | 14,39 | pilar mixto | 0,32 |
| E/120.50.2_300_30.275_50(1)(126) | 14,39 | pilar mixto | 0,25 |
| E/120.50.2_300_90.275_0(1)(126) | 15,41 | pilar mixto | 0,35 |
| E/120.50.2_300_90.275_5(1)(126) | 15,41 | pilar mixto | 0,26 |
| E/120.50.2_300_90.275_10(1)(126) | 15,41 | pilar mixto | 0,26 |
| E/120.50.2_300_90.275_20(1)(126) | 15,41 | pilar mixto | 0,26 |
| E/120.50.2_300_90.275_25(1)(126) | 15,41 | pilar mixto | 0,26 |
| E/120.50.2_300_90.275_50(1)(126) | 15,41 | pilar mixto | 0,21 |

El pilar más económico es siempre el pilar mixto.

Pliego de condiciones

Índice

| | | |
|-----------------------|---|------------|
| <u>12.</u> | <u>Pliego de condiciones</u> | 166 |
| <u>12.1.</u> | <u>Pliego de condiciones generales</u> | 166 |
| <u>12.2.</u> | <u>Pliegos de especificaciones técnicas</u> | 167 |
| <u>12.2.1.</u> | <u>Especificaciones de materiales y equipos</u> | 167 |
| <u>12.2.2.</u> | <u>Especificaciones de ejecución</u> | 168 |
| <u>12.3.</u> | <u>Pliego de prescripciones de gestión de los residuos</u> | 169 |

12. Pliego de condiciones

12.1. Pliego de condiciones generales

En el proyecto en cuestión, “Análisis numérico experimental de diferentes soluciones estructurales a base de pilares mixtos tipo concrete-filled Steel tube” se ensayaran diferentes perfiles rellenos de hormigón de distintas resistencias características.

Los perfiles de acero a utilizar deberán ser circulares, rectangulares, cuadrados y ovalados. Además se utilizaran aceros con límite elástico de 275 MPa y 355 MPa.

Con los ensayos realizados se realizará un estudio donde se compararán los resultados con la norma vigente en aplicación, el Eurocódigo 4.

El objetivo del proyecto será el validar el uso del método simplificado explicado en la normativa para hormigones de resistencia convencional y estudiar si dicho método se puede utilizar para el cálculo de pilares mixtos con hormigones de alta resistencia, concretamente hasta 90 MPa. La norma actualmente limita la resistencia del hormigón a 60 MPa.

Además se realizará un estudio económico donde se debe exponer en términos económicos el pilar óptimo comparando pilares de acero y pilares mixtos.

El proyecto constará pues de diferentes fases. La primera fase o etapa se deberá fabricar el hormigón e introducir éste en los perfiles de acero. En la segunda fase se deberán realizar todos los ensayos correspondientes y recopilar todos los datos necesarios de los ensayos. En la última etapa se realizará el estudio de los datos obtenidos que cumpla con los objetivos especificados. La primera y la segunda fase se realizaran en los talleres/laboratorios de la Universitat Jaume I donde se encuentren los equipos e instalaciones necesarios para llevar a cabo la realización del proyecto.

12.2. Pliegos de especificaciones técnicas

12.2.1. Especificaciones de materiales y equipos

Materiales utilizados

En dicho proyecto se utilizarán los materiales descritos a continuación

- Perfiles de acero para ser rellenos con hormigón. Citados en el punto “4.3. Historial de ensayos”. La nomenclatura a utilizar es la descrita en el mismo punto 4.3. Los perfiles se compraran a Arcelor Mittal.
 - Perfiles de acero Rectangulares y cuadrados
 - Perfiles de acero Circulares
 - Perfiles de acero Ovalados
- Los materiales a utilizar para la fabricación del hormigón serán:
 - Árido fino

Las arenas serán de naturaleza silíceas, de ríos o canteras, y no excederán en sustancias perjudiciales de los porcentajes (referidos a peso seco), que a continuación se especifican, determinados según métodos de ensayo UNE:

- Terrenos de arcilla (UNE-7133): 1'00 %.
 - Finos que pasan por el tamiz 0'080 (UNE-7850, UNE-7135): 5'00 %.
 - Material retenido por el tamiz 0'063 (UNE-7850): 0'50 %.
 - Árido grueso o grava
 - El árido grueso estará exento de cualquier sustancia que pueda reaccionar perjudicialmente con los álcalis que contenga el cemento.
 - Las gravas estarán exentas de materia orgánica
 - Cemento
 - Se utilizará cemento Portland gris
 - Agua.
 - El agua procederá de la red general de agua potable existente en las instalaciones y se utilizará para el amasado del hormigón
 - Toda agua potable podrá ser utilizada sin ensayos previos.
 - Humo de sílice.
 - Se utilizará el humo de sílice sikaFume
 - Fluidificante.
 - Se utilizará el Fluidificante Sika ViscoCrete3425
- Materiales de obra en taller:
 - Las diferentes palas para recoger áridos y aditivos
 - Se dispondrá de plásticos para recubrir el hormigón fabricado durante el primer día para que no pierda humedad durante el endurecimiento.
 - Moldes de hormigón para probeta de hormigón de 15x30 cm.
 - Desencofrante que evitará/facilitará el desmolde del hormigón.

- Material de seguridad:
 - Guante de protección mecánica UNE EN 388:2004. El guante como mínimo protegerá contra abrasión con un nivel de prestación 2 (Número de ciclos: 500).
 - Calzado de seguridad: Deberá garantizar una protección suficiente frente al impacto, con una energía equivalente de 200 J en el momento del choque, y frente a la compresión estática bajo una carga de 15 KN.
 - Protector auditivo tipo orejera.

Equipos utilizados

- Hormigonera con Volumen suficiente para cubrir nuestras necesidades
- Pórtico horizontal con actuador de 5000 KN. Contiene un grupo hidráulico que alimenta los cilindros y sistema de control. Se trata de un sistema ad hoc y por tanto cerrado, proporcionado por la empresa Ibertest.
- Pórtico vertical con un pistón capaz de aplicar una fuerza de 3000 KN. Se utilizará para ensayar las probetas cilíndricas de hormigón.
- Sistema de adquisición de datos para cada pórtico proporcionado por Ibertest.
- Tronzadora para ajustar la longitud de los tubos a la longitud de 300 mm.
- Báscula para pesar la dosificación dada para cada amasada de hormigón. La báscula debe poder tararse. Para el fluidificante deberá disponerse de una báscula con precisión de micras por su pequeña dosificación, en caso de tener que ser una báscula diferente se dispondrá de ambas básculas.

12.2.2. Especificaciones de ejecución

- Antes del pesado de las distintas dosificaciones para la fabricación del hormigón deberá siempre tararse la báscula para la obtención de una medida correcta.
- Se intentará siempre que sea posible utilizar el mismo tubo de acero y misma amasada de hormigón para la obtención de los ensayos del mismo perfil con distintas excentricidades.
- El Volumen de las amasadas de hormigón se calculará para rellenar los perfiles de acero y rellenar tres probetas cilíndricas de 15x30 cm para obtener mediante ensayo la resistencia característica del hormigón.
- Tras la fabricación del hormigón se dejará endurecer y fraguar el hormigón durante 28 días. Las probetas cilíndricas se introducirán en una cámara climática para su curado.
- Para la colocación y retirada de los especímenes de ensayo en el pórtico horizontal debe estar siempre el pistón desarmado.
- No se ejecutará el ensayo hasta que todos los miembros en el taller se encuentren fuera de la zona de dicho pórtico.
- Toda ejecución, fabricación o ensayo se realizará teniendo en cuenta las exigencias mínimas relativas a la elección y utilización de los EPI. Ésta se fijan en el Real Decreto 773/1997, de 30 de mayo (transposición de la Directiva 89/656/CEE, de 30 de noviembre).

Se utilizarán por tanto los EPIs en las condiciones siguientes:

- Los guantes de protección y calzado de seguridad siempre que se esté en taller.
- Orejera cuando se utilice la tronzadora, hormigonera, durante la realización del ensayo del pilar mixto y durante el ensayo de probetas de hormigón de 90 MPa.

12.3. Pliego de prescripciones de gestión de los residuos

Los residuos generados en dicho proyecto serán los pilares mixtos y probetas de hormigón ya ensayadas. La Universitat Jaume I dispone de contenedores para estos tipos de residuos.

Una vez ensayados los pilares y probetas estas deberán obligatoriamente introducirse en su contenedor correspondiente. Una vez introducidos en los contenedores la gestión de los residuos deberá hacerla la propia Universidad.