

CMNE/CILAMCE 2007
Porto, 13 a 15 de Junho, 2007
© APMTAC, Portugal 2007

ESTUDIO DEL CONTACTO ENTRE PERFIL METÁLICO Y HORMIGÓN EN VIGAS METÁLICAS PARCIALMENTE EMBEBIDAS

Ramos Gavilán, A.B.¹ ; Piloto, P.A.G.² ; Mesquita, L.M.R.²

1: Departamento de Mecánica
Escuela Politécnica Superior de Zamora
Universidad de Salamanca
Avda. Cardenal Cisneros, 34, (49022) Zamora
e-mail: aramos@usal.es, web: <http://www.usal.es>

2: Departamento de Mecânica Aplicada
ESTiG, Instituto Politécnico de Bragança
Campus de Santa Apolónia, Ap. 1134; 5301-857 Bragança
e-mail: {ppiloto, lmesquita}@ipb.pt, web <http://www.ipb.pt>

Palabras clave: Adherencia hormigón acero, Ensayo push-out, Viga parcialmente embebida.

Resumen. *Las vigas formadas por perfiles de acero laminado en caliente parcialmente embebidos en hormigón son elementos estructurales empleados cada vez con mayor incidencia. Los bloques de hormigón que recubren lateralmente el alma aportan al perfil mayor rigidez y resistencia al fuego. La influencia del contacto entre el hormigón y el acero en el comportamiento de este tipo de elementos nos lleva a la necesidad de obtener un modelo numérico, validado mediante ensayos, que simule su comportamiento mecánico. El estudio se realiza en secciones formadas por un IPE100 de acero S275 y dos bloques de hormigón armado de baja resistencia. El armado lo componen barras Ø8mm de acero corrugado B-500 y cercos Ø4mm dispuestos cada 135mm.*

1. INTRODUCCIÓN

Las vigas formadas por perfiles de acero laminado en caliente parcialmente embebidos en hormigón son elementos que mejoran la resistencia al fuego de la estructura.

El perfil de acero y los refuerzos laterales de hormigón constituyen una sección mixta siempre que se garantice la acción conjunta de estos dos materiales, es decir, que exista una transferencia de tensión cortante entre ambos.

Los mecanismos de transferencia de tensiones ente el hormigón y el acero son: la adhesión, la adherencia mecánica y el rozamiento. Estos fenómenos constituyen la denominada adherencia natural. Adicionalmente se pueden emplear elementos que aumenten la conexión entre ambos materiales, capaces de soportar un esfuerzo adicional a cortante.

Este estudio persigue validar un modelo que simule el comportamiento mecánico del contacto entre el perfil IPE y el refuerzo lateral de hormigón tanto en el caso de adherencia natural como en el caso de aumentar ésta con elementos de conexión: cercos soldados al alma del perfil.

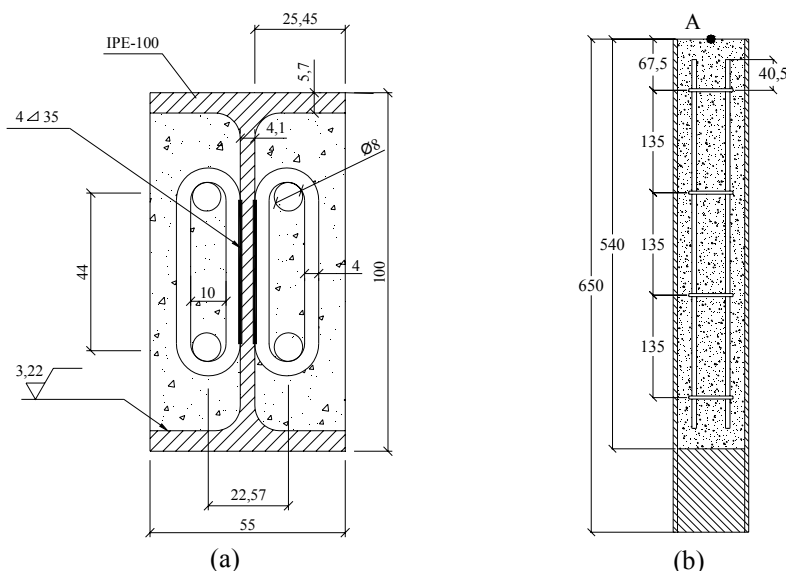


Figura 1. Probeta con la que se estudia el contacto entre hormigón y perfil metálico (cotas en [mm])
 (a) Sección de la viga parcialmente embebida. (b) Diseño longitudinal de la probeta.

2. MODELO NUMÉRICO DEL CONTACTO MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS

2.1. Elementos del Modelo Numérico

Para simular el comportamiento de la adherencia en los perfiles IPE parcialmente embebidos en hormigón se generó un modelo numérico tridimensional empleando los elementos SOLID65, LINK8, SHELL181 Y COMBIN39 de ANSYS.

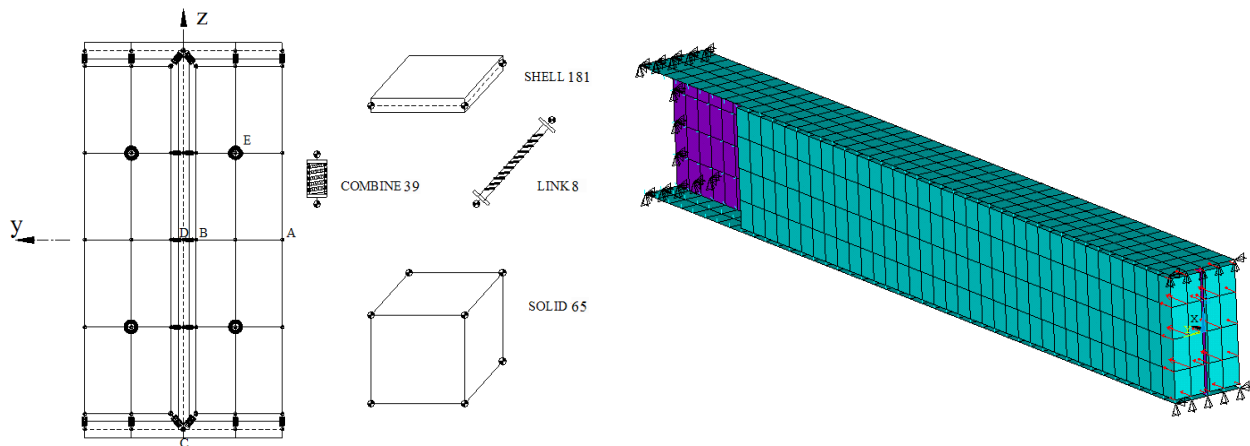


Figura 2. Modelo tridimensional de la viga realizada con elementos de ANSYS

2.1.1. Perfil metálico

Para simular el comportamiento del perfil metálico se emplea el elemento SHELL181, adecuado para analizar piezas de pequeño y moderado espesor. Se trata de un elemento de cuatro nodos con seis grados de libertad en cada uno de ellos: los desplazamientos en las tres direcciones del espacio x , y , z , y las rotaciones entorno a esos mismos ejes. Se adopta la integración completa de los elementos, con funciones de forma bilineales. Este elemento es capaz de simular el comportamiento elástico lineal así como el comportamiento elastoplástico. Se adopta el criterio de plastificación de von Mises, con endurecimiento isotrópico multilineal.

2.1.2. Refuerzos laterales de hormigón armado

Para crear los recubrimientos de hormigón armado del modelo se emplearon los elementos SOLID65 y LINK8. El armado del hormigón en el modelo numérico es discreto: los elementos barra se conectan en los nodos de la malla de hormigón. El hormigón y el refuerzo no solo comparten los mismos nodos sino que además el hormigón ocupa el mismo área que ocupa el refuerzo. Con este modelo no se puede considerar el deslizamiento que pudiera suceder entre ambos. El deslizamiento que se registra en el ensayo push-out, objeto del modelo numérico, es el que sucede entre los recubrimientos de hormigón y el perfil de acero, pudiendo suponer nulo el movimiento relativo entre el hormigón y las barras corrugadas del refuerzo.

SOLID65 es un elemento sólido de ocho nodos capaz de simular el comportamiento del hormigón. Tiene tres grados de libertad en cada nodo: los desplazamientos en las tres direcciones del espacio, y es capaz de sufrir deformación plástica, de fisurarse en tres direcciones ortogonales y de romper por aplastamiento. Este elemento presenta funciones de forma lineales, con esquema de integración $2 \times 2 \times 2$. El programa ANSYS asume que el límite elástico coincide con el límite de proporcionalidad del material. La opción elegida para

describir el comportamiento plástico del hormigón es la MISO (Multilinear Isotropic Hardening): la curva de endurecimiento queda definida mediante varios tramos rectos. Esta curva es muy recomendable para análisis con grandes deformaciones. El criterio de rotura adoptado para los elementos SOLID65 es el de William y Warnke. Este criterio tiene en cuenta la rotura del hormigón por fisuración a tracción y por aplastamiento a compresión, así como el incremento de la capacidad portante del material debido al confinamiento triaxial. Tras la fisuración, el módulo de elasticidad del elemento en la dirección paralela a la de la tensión principal de tracción se transformará en cero. La rotura por aplastamiento del hormigón convierte en cero el módulo de elasticidad en todas las direcciones, desapareciendo la eficacia del elemento.

El elemento LINK8 es capaz de simular el comportamiento de las barras de acero corrugado. Este elemento queda definido por dos nodos y en cada uno de ellos tiene tres grados de libertad: los desplazamientos en las tres direcciones del espacio. El elemento es capaz de deformarse plásticamente y de sufrir grandes desplazamientos. Se adopta el criterio de plastificación de von Mises, con endurecimiento isotrópico multilinear. Este elemento emplea funciones de forma lineales con esquema de integración exacta.

2.1.3. Adherencia entre los elementos

El contacto entre el perfil metálico y los refuerzos laterales de hormigón armado queda definido mediante elementos muelle con respuesta no lineal: COMBIN39 de ANSYS. Se trata de elementos de dos nodos con capacidad de sufrir grandes desplazamientos, respondiendo éstos a una curva fuerza-desplazamiento no lineal. Los elementos del contacto se encuentran conectados por un extremo a la malla del perfil metálico y por el otro a la del hormigón.

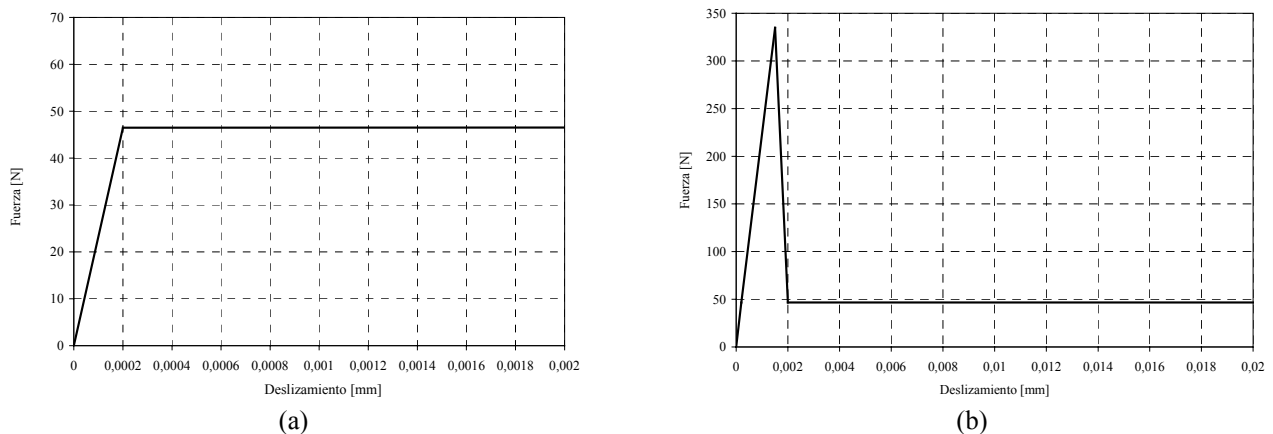


Figura 3. Curvas fuerza-desplazamiento para los elementos de contacto.

(a) contacto por adherencia natural, sin conectores. (b) contacto con conectores soldados al alma del perfil.

Este estudio pretende validar las curvas fuerza-desplazamiento que se muestran en la figura 3 mediante ensayos push-out. Estas curvas están basadas en valores del eurocódigo 4 [1] y representan el comportamiento del contacto entre el perfil metálico y los refuerzos laterales de

hormigón armado.

El ensayo diseñado solo registra la curva fuerza-deslizamiento en la dirección axial, por lo que el elemento muelle solo ha de tener libre el desplazamiento en x . Los desplazamientos en y y z entre los nodos del perfil y los del recubrimiento de hormigón quedan restringidos mediante otros dos elementos muelle de elevada rigidez.

Para generar el modelo de la viga parcialmente embebida en la que los cercos de la armadura del refuerzo no están soldados al perfil, los elementos de contacto han de simular la adherencia natural entre el acero y el hormigón (figura 3a). La curva para este caso cuenta con dos tramos: el primero corresponde al mecanismo de transferencia de tensiones mediante la adhesión entre ambos materiales. Una vez rota la adhesión, el mecanismo de transferencia será el simple rozamiento entre ambas superficies, que se refleja con el segundo tramo de la curva. En este modelo de adherencia natural no se ha tenido en cuenta la adherencia mecánica entre perfil y refuerzo. El valor máximo de fuerza que los elementos son capaces de admitir son calculados multiplicando la tensión tangencial que el eurocódigo 4 [1] estima por el área efectiva de cada elemento muelle.

La curva de la figura 3b corresponde al comportamiento de los elementos de contacto en el caso de que los cercos de la armadura del refuerzo estén soldados al perfil. La única diferencia que existe entre ésta y la anteriormente descrita es la incorporación de la adherencia mecánica, que aumenta considerablemente la capacidad de carga de los elementos de contacto. La pérdida de esta adherencia mecánica provoca un tramo descendente en la curva hasta alcanzar el rozamiento entre ambas superficies. La fuerza necesaria para romper la adherencia mecánica es calculada siguiendo el eurocódigo 4 [1].

2.2. Caracterización del Material

2.2.1. Acero al carbono en perfiles laminados

El acero de los perfiles metálicos fue recibido de fábrica bajo la designación S275 JR.

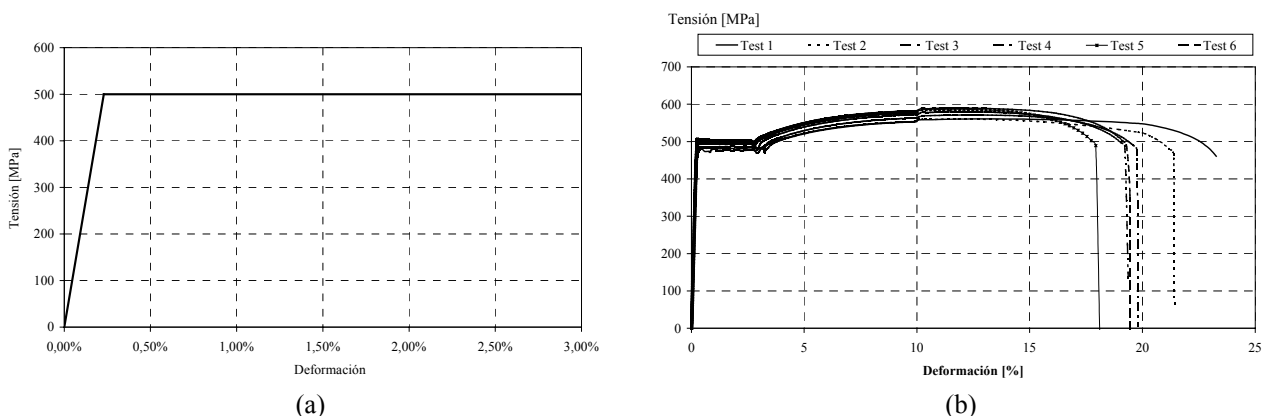


Figura 4. Curvas tensión-deformación del acero de los perfiles.

(a) comportamiento elasto-plástico adoptado en el modelo (b) obtenida experimentalmente.

Mediante una serie de ensayos se caracterizó experimentalmente al material, obteniéndose un valor del límite elástico de 500 [MPa] (figura 4b).

El comportamiento del material admitido en el modelo es el elastoplástico perfecto, con un valor de límite elástico de 500 [MPa] (figura 4a). El módulo de elasticidad del material, siguiendo lo establecido en el eurocódigo 3 [4] es $2,1 \cdot 10^5$ [MPa].

2.2.2. Hormigón

El hormigón es un material cuasifrágil con diferente comportamiento a tracción que a compresión.

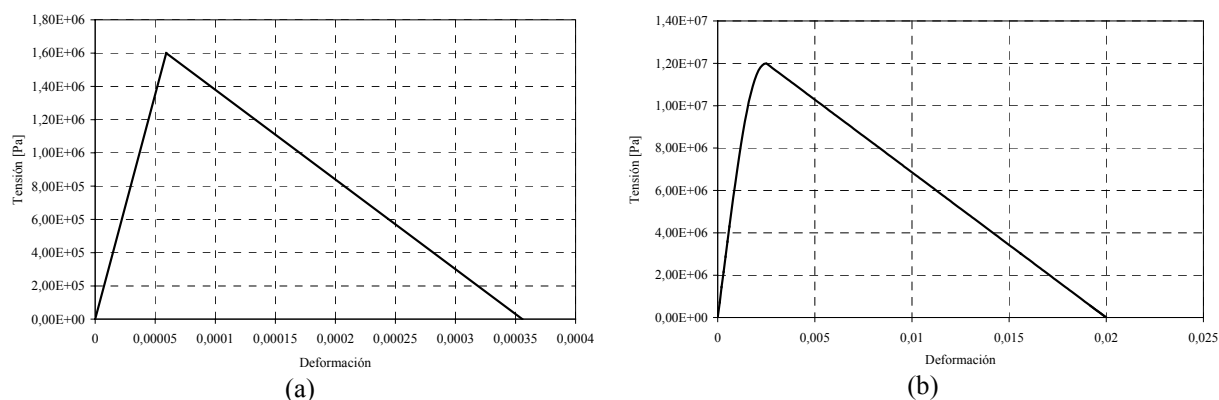


Figura 5. Curva tensión-deformación del hormigón. (a) Tracción (b) Compresión.

La curva tensión-deformación en compresión que se adopta corresponde a la indicada en el eurocódigo 2 [2] para la temperatura de 20°C (figura 5b). Ésta cuenta con tres tramos diferenciados: el primero es recto y corresponde al comportamiento elástico lineal del material. Sobrepasado el límite de proporcionalidad del material, la tensión aumenta gradualmente hasta que se alcanza la máxima tensión de compresión. A partir de este punto la curva tiene un tramo descendente hasta que se la deformación máxima, produciéndose la rotura por aplastamiento del hormigón.

En tracción (figura 5a), la curva tensión deformación del hormigón es aproximadamente elástica lineal hasta alcanzar la tensión máxima en tracción. El valor de tensión adoptado es el que se estima en el eurocódigo 2 [3]. Superado este punto, el hormigón se fisura y la tensión decrece gradualmente hasta hacerse cero. Esta relajación de la tensión del material tras la rotura por tracción facilita la convergencia del modelo numérico.

| | |
|--|--------------------------------------|
| Módulo elástico (EX) | $2,7 \cdot 10^{10}$ N/m ² |
| Tensión última de compresión bajo sollicitación uniaxial | $1,2 \cdot 10^7$ N/m ² |
| Tensión última a tracción bajo sollicitación uniaxial | $1,6 \cdot 10^6$ N/m ² |
| Módulo de Poisson | 0,2 |
| Coefficiente de transferencia de cortante con apertura de fisura | 0,25 |
| Coefficiente de transferencia de cortante con cierre de fisura | 0,9 |

Tabla 1. Parámetros del hormigón.

Además de la curva tensión-deformación bajo sollicitación en compresión uniaxial (curva MISO), con la que se describe el comportamiento plástico, ANSYS requiere los datos del material que se indican en la tabla 1.

2.2.3. Acero en barras corrugadas

El acero que conforma el refuerzo del hormigón armado corresponde a la categoría B500. Experimentalmente se obtuvo un valor del límite elástico de 500 [MPa] (figura 6b).

El modelo de comportamiento adoptado para este tipo de acero es el elastoplástico (figura 6a), siguiendo el modelo recogido en el eurocódigo 2 [3]. El valor del límite elástico adoptado en el modelo es de 500 [MPa] y el del módulo de elasticidad 200 [GPa] como recoge el eurocódigo 2 [3].

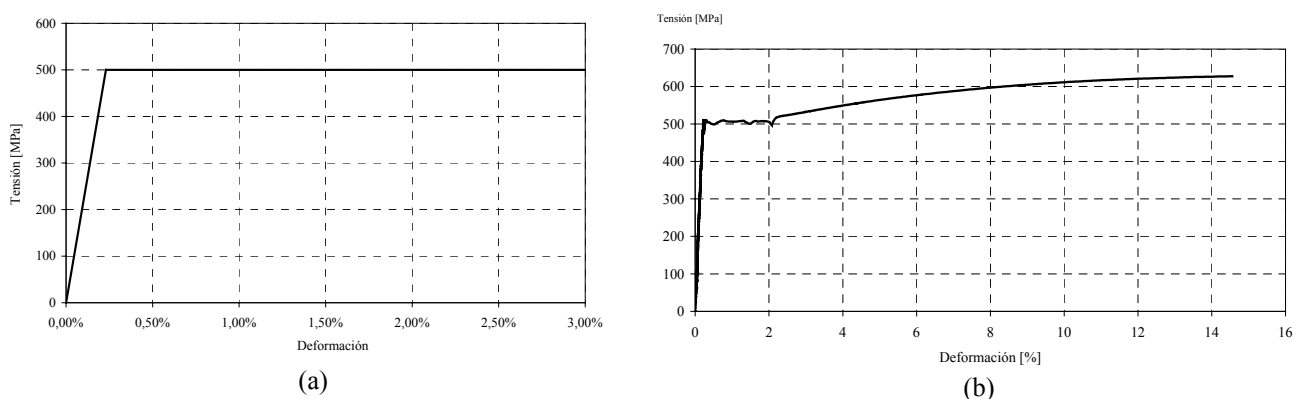


Figura 6. Curvas tensión-deformación del acero de las barras corrugadas.
(a) comportamiento elastoplástico adoptado en el modelo (b) obtenida experimentalmente.

2.3. Análisis del modelo numérico

Para sollicitar al modelo se disponen cargas puntuales de componente x en los nodos de los elementos de hormigón contenidos en la superficie de carga. Estas cargas aumentarán lentamente debido a las no linealidades presentes en el modelo, tanto geométricas como del material.

En el MEF las no linealidades son resueltas como acumulación de cálculos lineales mediante un proceso incremental. La carga aplicada al modelo se divide en incrementos de carga con un valor máximo de 80 [N] y mínimo de 0,008 [N]. Tras completar cada solución incremental, la matriz de rigidez del modelo se ajusta para reflejar los cambios no lineales en la rigidez de la estructura antes de aplicar el siguiente incremento de carga. La convergencia del sistema se estableció en términos de desplazamiento y es evaluada con el algoritmo de Newton-Raphson, con un error admisible de 0,05.

3. ENSAYOS PUSH-OUT PARA EL ESTUDIO DEL CONTACTO ENTRE EL PERFIL METÁLICO Y EL HORMIGÓN

3.1. Ensayo Push-out

El ensayo push-out persigue la obtención de la curva carga-desplazamiento del hormigón, que caracteriza el comportamiento mecánico del contacto entre el perfil metálico y el refuerzo lateral de hormigón armado. Para ello se aplican cargas crecientes en la dirección axial sobre los bloques de hormigón hasta romper la adherencia que éstos tienen con las alas y con el alma del perfil (figura 7a).

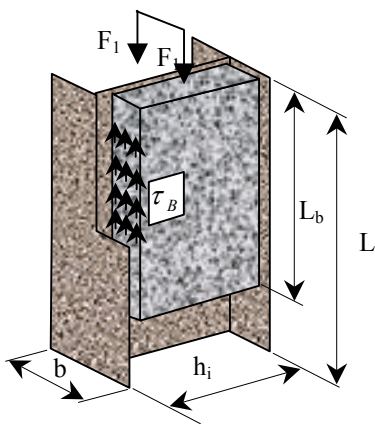


Figura 7a. Principio del ensayo push-out

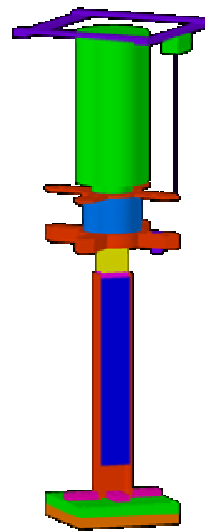


Figura 7b. Equipo para medir la curva carga-desplazamiento entre el perfil y el refuerzo.

3.2. Equipo de ensayo

Para llevar a cabo los ensayos se prepara un sistema de carga axial formado por un gato hidráulico conectado a una célula de carga. El hidráulico carga progresivamente sobre un elemento auxiliar dispuesto entre éste y el hormigón, registrándose los movimientos de deslizamiento entre ambos materiales mediante transductores de desplazamiento. El equipo queda descrito en la figura 7b.

Durante el ensayo también se miden las deformaciones tanto del hormigón como del acero con el fin de detectar la transferencia de tensiones a lo largo de la probeta. El contacto entre las barras corrugadas y el hormigón puede considerarse perfecto, por lo que las mediciones de las deformaciones en el hormigón se han realizado sobre el armado longitudinal de éste. Estas mediciones se realizan mediante extensómetros (LY11-3mm, de HBM) localizados a la misma altura tanto en el perfil metálico como en la armadura (figura 8).

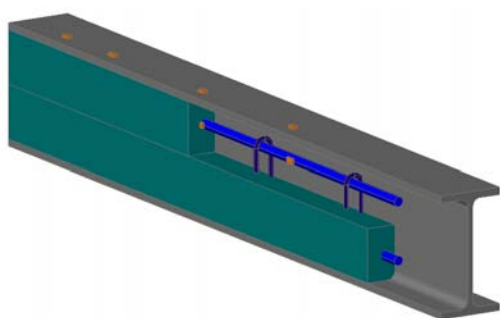


Figura 8. Posición de las galgas extensométricas



Figura 9. Protección de las galgas extensométricas

Para proteger a las galgas extensométricas de la humedad del hormigón fresco se emplea una pasta impermeabilizante (AK22 de HBM) como se muestra en la figura 9.

3.3. Elaboración de las probetas

Las galgas extensométricas se encolaron después de preparar, limpiar y pulir la superficie del acero. En el caso de las barras corrugadas fue preciso retirar las corrugas mediante pulido mecánico.

En tres probetas se soldaron las armaduras al alma mediante soldadura por arco eléctrico, usando el sistema MAG (CO₂).

Una vez colocada la soldadura se rellenaron los laterales con hormigón de baja resistencia. La compactación se realizó manualmente mediante picado y vibrado exterior. El curado se realizó en cámara húmeda durante 28 días.



Figura 10. Proceso de elaboración de las probetas.

4. RESULTADOS DEL MODELO NUMÉRICO

4.1. Desplazamientos de los bloques de hormigón

En las figuras 11 y 12 se muestran los resultados del desplazamiento axial de los bloques de hormigón armado obtenidos en el análisis numérico. El registro del desplazamiento se realizó en la superficie de carga (punto A de la figura 1b).

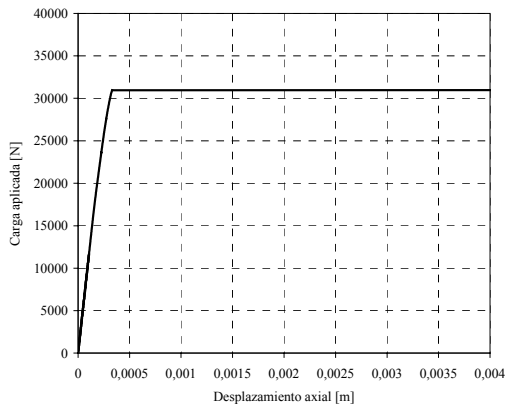


Figura 11. Desplazamiento del bloque de hormigón con adherencia natural

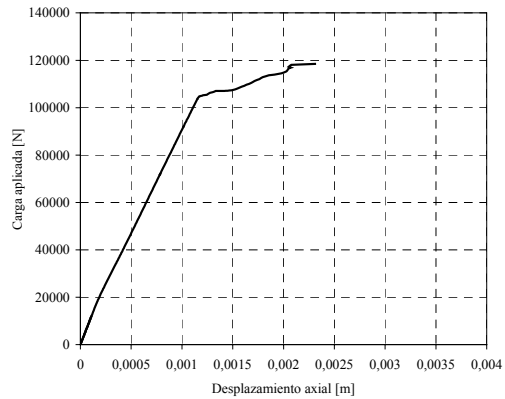
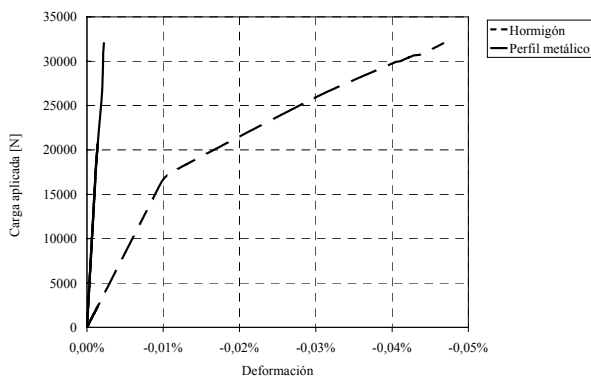


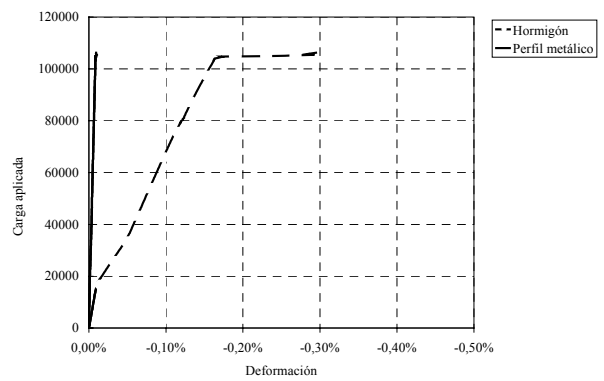
Figura 12. Desplazamiento del bloque de hormigón con cercos soldados al alma

4.2. Deformaciones en el hormigón y el perfil a lo largo de la probeta

En las figuras 13, 14, 15 y 16 se observa la deformación del hormigón y del perfil metálico en distintas secciones de la probeta.

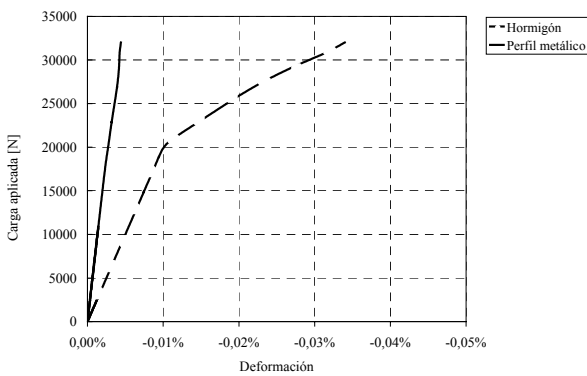


(a) probeta con adherencia natural

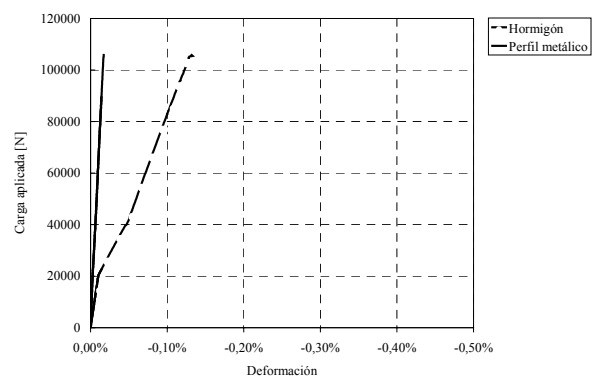


(b) probeta con cercos soldados al alma

Figura 13. Deformación en el hormigón y en el perfil a 67 [mm] de la sección de carga

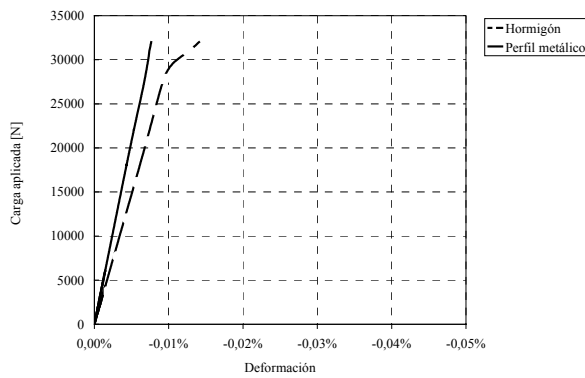


(a) probeta con adherencia natural

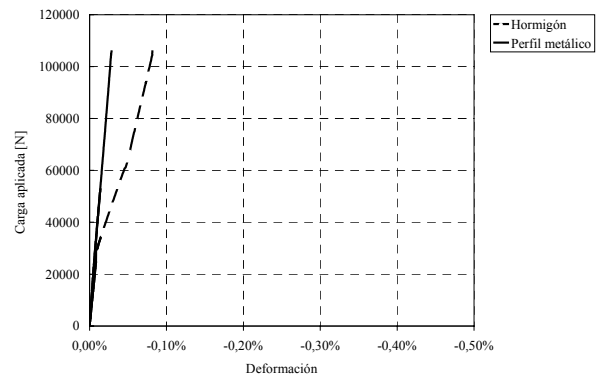


(b) probeta con cercos soldados al alma

Figura 14. Deformación en el hormigón y en el perfil a 135 [mm] de la sección de carga

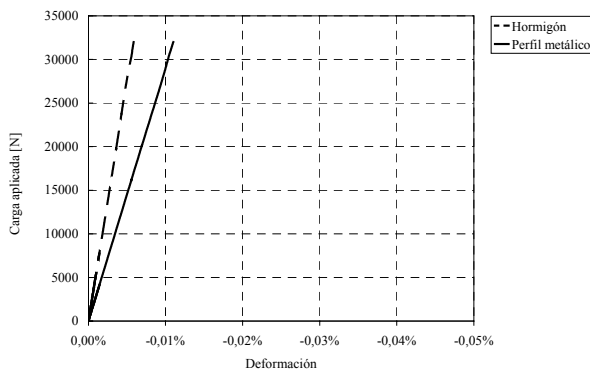


(a) probeta con adherencia natural

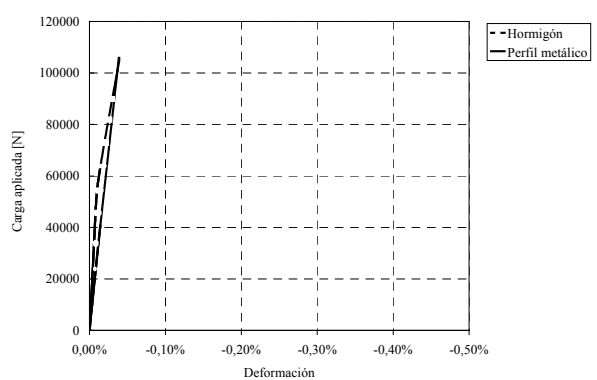


(b) probeta con cercos soldados al alma

Figura 15. Deformación en el hormigón y en el perfil a 270 [mm] de la sección de carga



(a) probeta con adherencia natural.



(b) probeta con cercos soldados al alma

Figura 16. Deformación en el hormigón y en el perfil a 405 [mm] de la sección de carga

En las secciones más próximas a la superficie de carga, tanto en el caso de refuerzos con adherencia natural como con refuerzos con cercos soldados al alma del perfil, existe mayor diferencia entre las deformaciones registradas en cada uno de los materiales. Esta diferencia se suaviza conforme nos alejamos de ésta.

Así mismo se aprecia un mayor desfase entre los valores de deformación del acero y del hormigón en el caso de la probeta con adherencia natural. La existencia de elementos de conexión (cercos soldados al alma) favorece la compatibilidad de deformaciones.

4.3. Fisuración de la probeta

4.3.1. Probeta con adherencia natural

En el caso de la probeta en la que los refuerzos laterales de hormigón están unidos al perfil gracias a la adherencia natural, la fisuración que se produce en los escalones finales de carga suceden en el interior del bloque, por lo que esta fisuración no es apreciable en superficie. En la figura 17 se aprecia la fisuración interior del modelo.

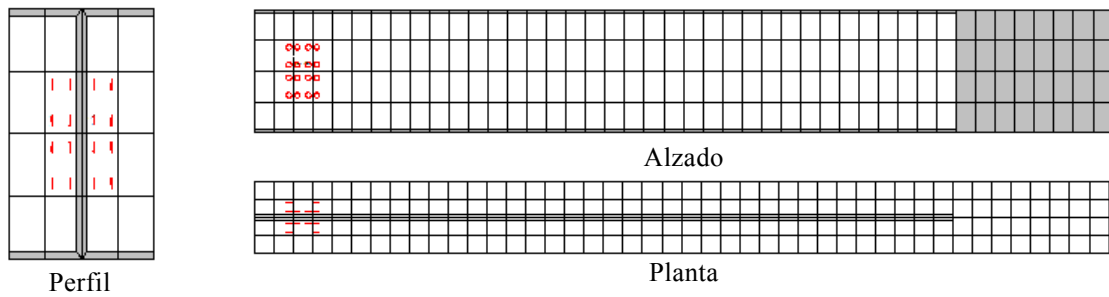


Figura 17. Fisuración del hormigón en la probeta con adherencia natural en el escalón de carga 31 [kN]

4.3.1. Probeta con cercos soldados al alma

Para esta probeta el modelo numérico predice una fisuración en tracción y aplastamiento en compresión que afectaran a la mayor parte de los refuerzos en los tramos finales de carga. El fallo del hormigón sucede previo al fallo de la adherencia entre éste y el perfil metálico. En la figura 18 se aprecia el fallo generalizado del interior del hormigón.

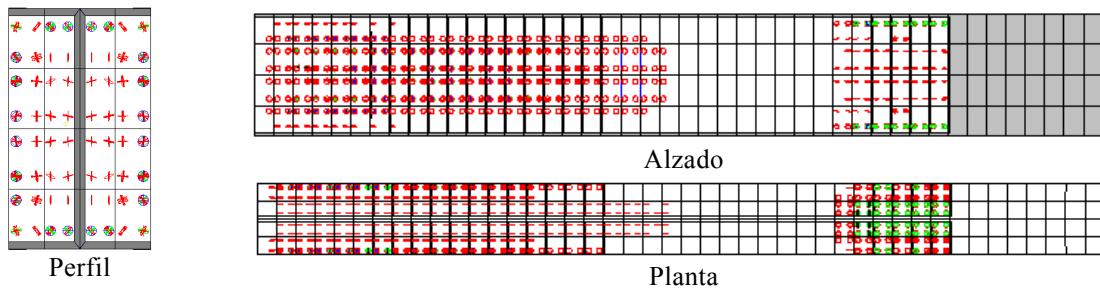


Figura 18. Fisuración y aplastamiento generalizado del hormigón en la probeta con cercos soldados al alma del perfil en el escalón de carga 80,5 [kN]

En los escalones iniciales de carga se aprecia fisuración en la superficie del refuerzo, siguiendo la tendencia que se aprecia en las figura 19.

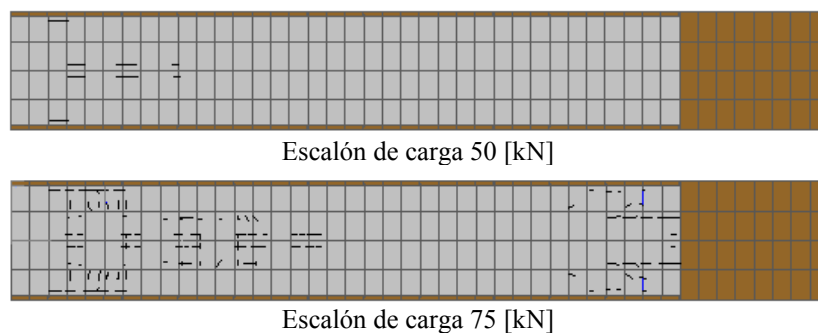


Figura 19. Fisuración en superficie de la probeta con cercos soldados al alma del perfil.

5. RESULTADOS DEL ENSAYO

El ensayo push-out realizado en el laboratorio arrojó un resultado diferente al obtenido en el modelo numérico.



Figura 20. Desarrollo del ensayo.

Las probetas con adherencia natural llegaron a soportar unos niveles de carga en el ensayo experimental superiores al doble del valor estimado. La rotura final no sucede por pérdida de la adherencia entre el hormigón y el acero, sino por rotura por aplastamiento del hormigón, con pérdidas parciales en las inmediaciones de la superficie de carga. Los resultados obtenidos experimentalmente de las deformaciones en el hormigón y en el acero en las probetas de adherencia natural indican que las deformaciones en ambos materiales son similares.

Las probetas con cercos soldados al alma tienen un comportamiento frente a la rotura similar a las de adherencia natural, no apreciándose claras diferencias entre los distintos tipos de contacto. El modelo numérico aproximó mejor el desarrollo del ensayo para este tipo de contacto.

5.1. Desplazamientos de los bloques de hormigón

Los ensayos realizados no permitieron realizar el registro de la curva carga-desplazamiento debido a que en ninguna de las probetas se produjo la rotura de la adhesión entre el hormigón y el acero.

El único desplazamiento que se registró tiene como origen la rotura por compresión del hormigón y sucede en los últimos escalones de carga.

5.2. Deformaciones

5.2.1. Deformaciones registradas en probetas con adherencia natural.

Como se refleja en las figuras 21(a) y 21 (b), las deformaciones en el hormigón son, en todo caso, similares a las que se registran en el perfil metálico. Tan solo difieren cuando el hormigón alcanza valores de deformación superiores al -3% , pero siguiendo ambos registros la misma trayectoria.

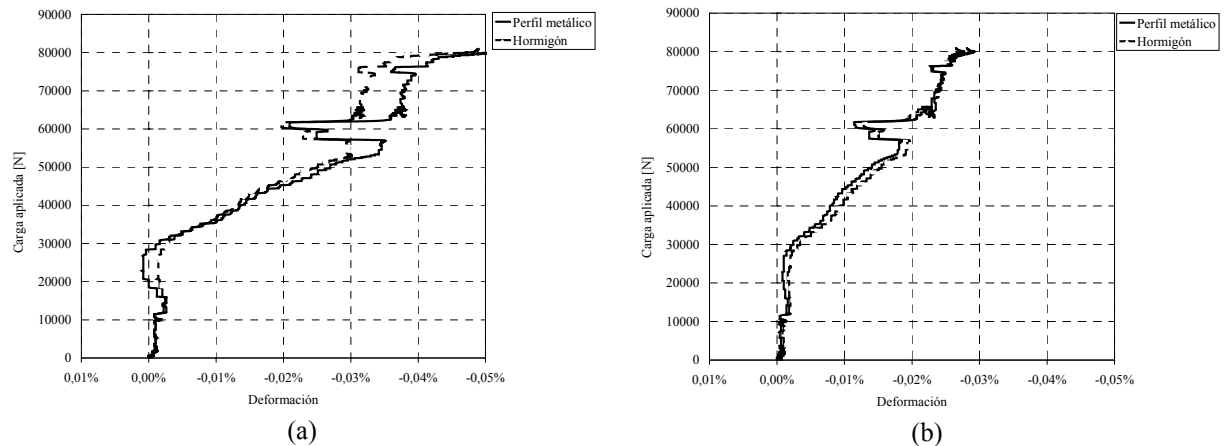


Figura 21. Deformaciones registradas en la probeta con adherencia natural en el hormigón y en el perfil.
 (a) a 67 [mm] de la sección de carga (b) a 135 [mm] de la sección de carga

Las secciones más alejadas de la superficie de carga registran menores deformaciones.

5.2.2. Deformaciones registradas en probetas con cercos soldados al alma

Las deformaciones registradas en el perfil metálico a lo largo de la probeta se aproximan al resultado obtenido para este tipo de probeta en el modelo numérico (ver figura 22).

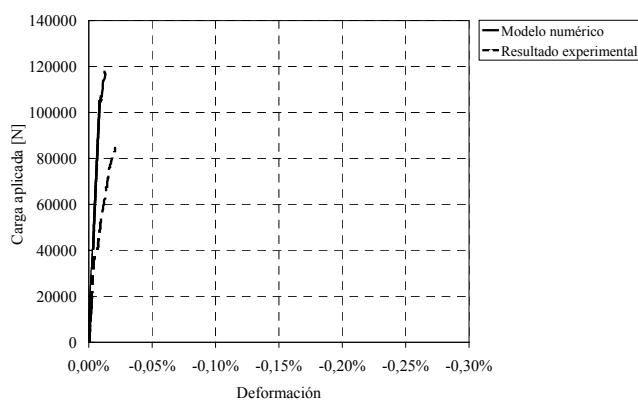


Figura 22. Resultados, experimentales y numéricos, de las deformaciones del perfil a 67 [mm] de la sección de carga.

Los resultados experimentales registran la evolución de las deformaciones a lo largo del perfil metálico: aumentan cuando nos alejamos de la sección de carga hasta que la primera soldadura, a partir de la cual los valores se unifican para todas las secciones (ver figura 23). Esta evolución es similar a la que predice el modelo numérico.

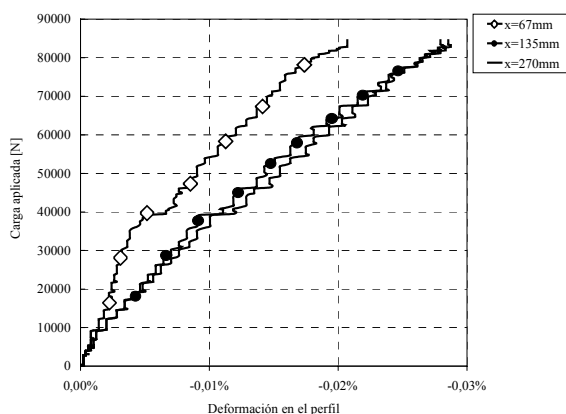


Figura 23. Resultados experimentales de las deformaciones del perfil metálico a distintas distancias de la sección de carga.

5.3. Fisuración

Tanto en el caso de cercos soldados al alma como en el caso de adherencia natural, el fallo de la probeta sucede por rotura por aplastamiento del hormigón en la región cercana a la superficie de carga. En la figura 24 se puede apreciar como para los últimos escalones de carga, próximos a la rotura, aparecen pequeñas fisuras que provocan el desprendimiento súbito de un bloque de hormigón.



Figura 24. Proceso de rotura de la probeta.

No se aprecian fisuras con origen la zona de contacto entre el hormigón y el perfil de acero. Tampoco se aprecia fisura alguna a lo largo de la probeta.

6. CONCLUSIONES

- El eurocódigo 4, [1], estima un valor de tensión de adherencia de diseño entre el perfil metálico y los refuerzos laterales de hormigón, en el caso de vigas parcialmente embebidas, muy inferior al obtenido en el ensayo.
- No se registran en ninguno de los ensayos experimentales deslizamientos de los bloques de hormigón, siendo la rotura del hormigón por compresión limitante en ambos casos. Este hecho marca la necesidad de realizar probetas con menor superficie de adherencia.
- La curva fuerza deslizamiento que simula el comportamiento del contacto entre los materiales en el modelo de elementos finitos debe ser transformada en ambos casos.
- Las deformaciones que se registraron en los ensayos fueron superiores a los obtenidos en el modelo numérico. Este hecho debería ser tenido en cuenta en los siguientes estudios.
- La geometría de la sección del perfil metálico podría condicionar el valor del resultado debido al efecto local en los encuentros del alma con las alas. Sería interesante estudiar cómo afecta la dimensión del perfil al comportamiento del contacto.

REFERENCIAS

- [1] CEN; EN1994-1-1, “Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures - Part 1-1: General rules and rules of buildings”; December 2004.
- [2] CEN; EN 1992-1-2, “Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design”; December 2004.
- [3] CEN; EN 1992-1-1, “Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules of buildings”; December 2004.
- [4] CEN; EN 1993-1-1, “Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules of buildings; May 2005.