

Modelo de Comportamiento del Contacto entre el Hormigón y el Acero a Altas Temperaturas en Vigas Metálicas Parcialmente Embebidas

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

¹ *Dep. Ingeniería Mecánica. Univ. Salamanca. Avda Requejo 33, 49022. Zamora. España.*

² *Dep. Mecánica Aplicada. I.P.Bragança. Campus Sta Apolonia, 5301. Bragança. Portugal.*

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 a elevadas temperaturas nos lleva a la necesidad de obtener un modelo numérico, validado mediante ensayos, que simule su comportamiento termomecánico.

Este artículo presenta un modelo de elementos finitos con comportamiento no lineal de una viga parcialmente embebida sometida a altas temperaturas cargada mecánicamente. El perfil metálico se genera con elementos cáscara, el hormigón con elementos sólido, el armado del hormigón con elementos barra y el contacto con elementos muelle con comportamiento no lineal. Para la obtención de este modelo se ha procedido a realizar una serie de ensayos push-out a altas temperaturas sobre vigas parcialmente embebidas.

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 $\varnothing 8\text{mm}$ de acero corrugado B-500 y cercos $\varnothing 4\text{mm}$ dispuestos cada 135mm.

1 INTRODUCCIÓN

Las vigas metálicas parcialmente embebidas están formadas por un perfil metálico recubierto lateralmente de hormigón en masa o armado. Se trata de una solución constructiva que mejora la capacidad portante y aumenta la resistencia al fuego del perfil metálico. El Eurocódigo 4 [1] recoge distintas soluciones de diseño para esta sección.

Varios materiales constituyen una sección compuesta cuando trabajan conjuntamente, es decir, cuando existe entre ellos una transferencia de tensión cortante. El hormigón y el acero garantizan la transferencia de tensiones gracias al mecanismo de la adherencia natural. La adherencia natural está constituida por los fenómenos de adhesión, adherencia mecánica y rozamiento. Pueden disponerse conectores a lo largo del perfil para incrementar la tensión cortante última del contacto [1].

El estudio de las vigas metálicas parcialmente embebidas mediante el método de los elementos finitos requiere modelos de comportamiento tanto de los materiales que componen la sección como del contacto existente entre ellos.

2 OBJETIVO DEL ESTUDIO

Este estudio persigue obtener y validar dos modelos numéricos: térmico y mecánico a elevadas temperaturas, que simulen el comportamiento termomecánico del contacto entre el perfil metálico y los refuerzos laterales de hormigón en las vigas parcialmente embebidas con adherencia natural.

El estudio se centra en secciones formadas por un perfil metálico IPE 100 recubierto lateralmente por bloques de hormigón armado. Como se aprecia en la figura 1, el armado está formado por barras corrugadas de 8[mm] de diámetro y cercos de 4[mm] de diámetro dispuestos cada 135[mm].

Los materiales empleados son: aceros B500s y S275 para armaduras y perfil metálico respectivamente, y hormigón C12/15.

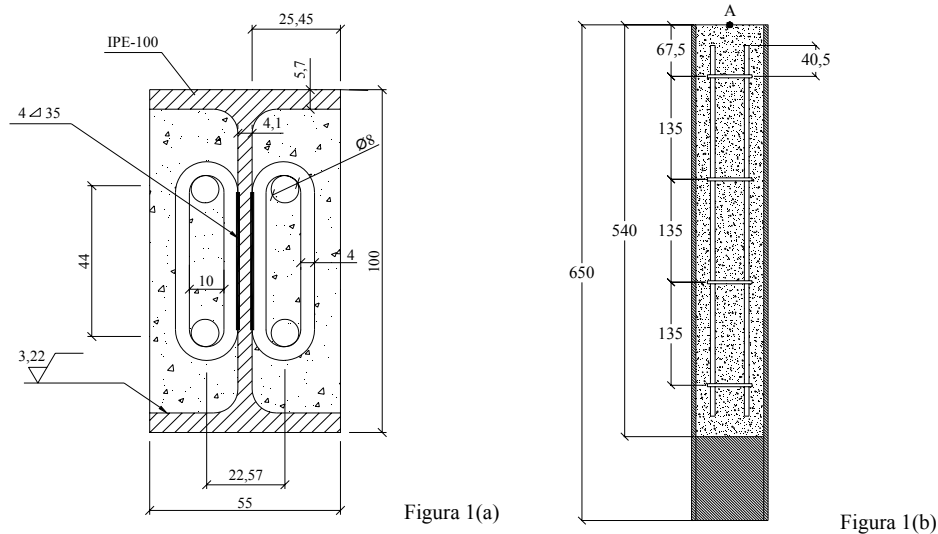


Fig. 1. Probeta con la que se estudia el contacto entre hormigón y perfil metálico (cotas en [mm]). (a) Sección de la viga parcialmente embebida. (b) Diseño longitudinal de la probeta.

El modo de abordar el estudio es distinto en el caso del comportamiento térmico que en el caso del comportamiento mecánico a elevadas temperaturas ya que en el primer caso se cuenta con un estudio previo [2].

3 ESTUDIO TÉRMICO DEL CONTACTO ENTRE EL HORMIGÓN Y EL ACERO EN VIGAS METÁLICAS PARCIALMENTE EMBEBIDAS

El estudio térmico pretende validar un modelo de comportamiento térmico del contacto acero-hormigón [2] para el caso de vigas parcialmente embebidas. Los resultados obtenidos en el análisis numérico son comparados con los obtenidos en el análisis experimental.

3.1 Análisis Experimental

3.1.1 Equipo de ensayo

Como se aprecia en la figura 2, las probetas son calentadas en una cámara aislada mediante resistencias electro-cerámicas dispuestas en las alas del perfil metálico y conectadas a un equipo de 70 [kVA].



Figura 2(a)



Figura 2(b)

Fig. 2. (a) Disposición de la probeta y resistencias durante el calentamiento. (b) Equipo de calentamiento.

Para conocer la evolución de las temperaturas en el interior de la probeta se disponen ocho termopares tipo K en puntos tanto del perfil como del hormigón, de los que se tiene un registro continuo. En la figura 3 queda recogida la ubicación de los termopares.

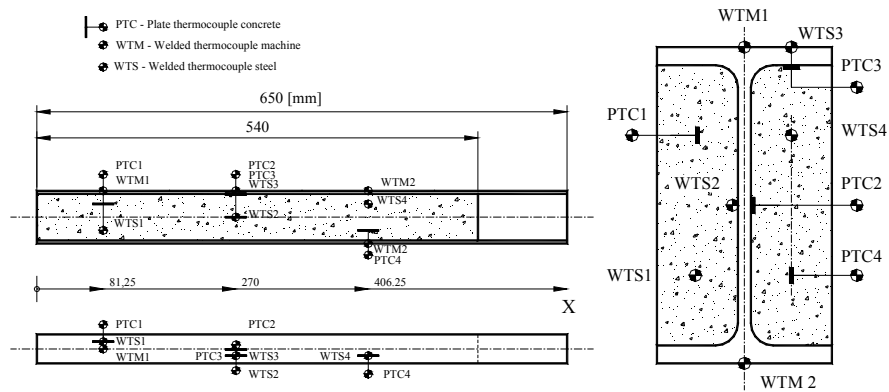


Fig. 3. Ubicación de los termopares en el interior de la probeta.

Además de los indicados anteriormente, se dispone de un termopar adherido a la cara exterior del hormigón de la probeta para controlar la temperatura ambiente en el interior de la cámara, del que se realizan lecturas discontinuas. Este registro, junto con el de la temperatura en la superficie del ala del perfil, es fundamental para comparar los resultados de los estudios numérico y experimental, ya que ambos necesitan contar con las mismas condiciones de contorno.

3.1.2 Curva de calentamiento

Las resistencias cerámicas siguen una curva de calentamiento con pendiente inicial de $400[^\circ\text{C}/\text{h}]$ hasta alcanzar los $400[^\circ\text{C}]$, momento en el que se estabiliza la temperatura [3].

En la figura 4 se muestran un ejemplo de curvas de calentamiento obtenidas en el laboratorio (a) y de curvas simplificadas aplicadas en las alas del perfil metálico y en los laterales de hormigón en el modelo numérico (b).

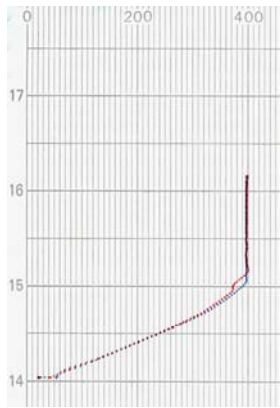


Figura 4(a)

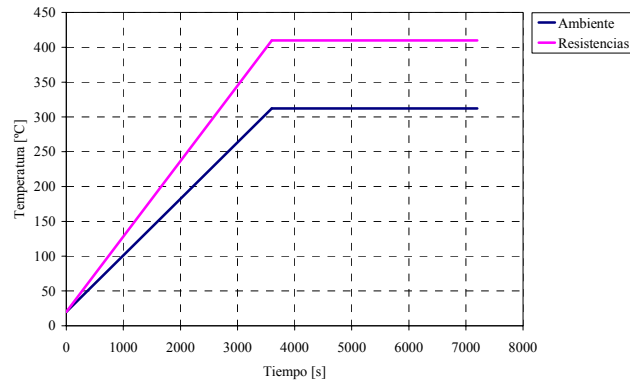


Figura 4(b)

Fig. 4. (a) Curva de calentamiento de las resistencias mecánicas en el ensayo de laboratorio: temperaturas [°C] en ordenadas y tiempo [h] en abscisas. (b) Curvas de calentamiento simplificadas adoptadas para el modelo numérico.

3.2 Análisis Numérico.

El procedimiento para calcular el campo de temperaturas tras el calentamiento de la probeta está basado en un análisis no estacionario y no lineal. Las no linealidades se resuelven como acumulación de cálculos lineales mediante un proceso incremental.

3.2.1 Elementos del modelo

Se genera un modelo numérico tridimensional de la viga de estudio empleando los elementos SOLID70, LINK33, SHELL131 y COMBIN39 de ANSYS. Todos estos elementos pueden ser reemplazados por un elemento equivalente en el análisis estructural para realizar el posterior modelo termomecánico. En la figura 5 se aprecia el modelo tridimensional de la viga.

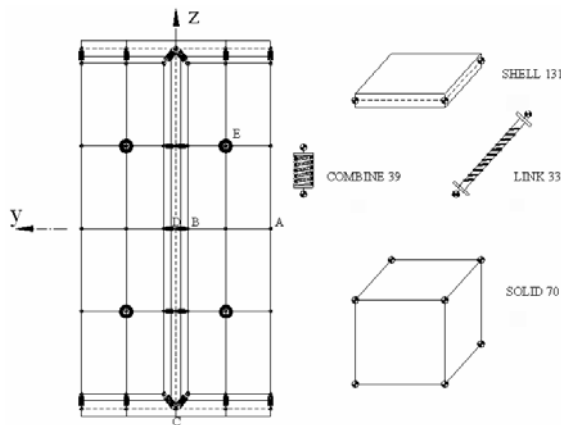


Figura 4(a)

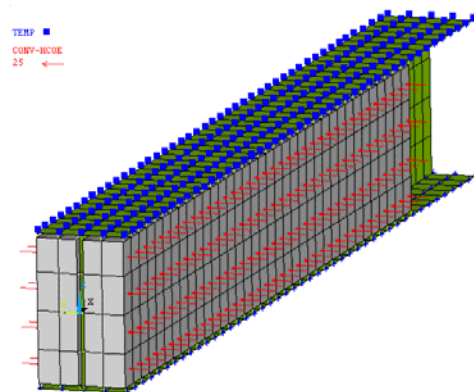


Figura 4(b)

Fig. 5. Modelo térmico tridimensional de la viga realizada con elementos de ANSYS. (a) Elementos empleados en el modelo numérico. (b) Modelo numérico.

Para simular el comportamiento térmico del perfil metálico se emplea el elemento de cáscara SHELL131. Se trata de un elemento tridimensional de cuatro nodos, con capacidad de conducción térmica tanto en el plano como a través del espesor. Las funciones de forma del elemento son lineales en el plano con esquema de integración 2x2, mientras que en el espesor estas funciones son constantes con un único punto de integración ya que se asume que a temperatura es constante en el espesor. Permite un análisis térmico no estacionario.

Para crear los recubrimientos de hormigón armado del modelo se emplean los elementos SOLID70 y LINK33: el primero para el hormigón y el segundo para el armado longitudinal. El hormigón y el refuerzo no solo comparten los mismos nodos sino que además el hormigón ocupa el mismo área que el refuerzo. Se opta por emplear este modelo por dos motivos: por un lado el área del refuerzo es reducida, considerándose escasa su afección a la sección en el modelo térmico. El segundo motivo está relacionado con la consideración de deslizamiento nulo entre el refuerzo y el hormigón en el modelo mecánico que posteriormente empleará el campo de temperaturas resultante.

El elemento SOLID70 es un elemento sólido tridimensional de ocho nodos, y un grado de libertad en cada uno de ellos (la temperatura). Tiene capacidad de conducción térmica en las tres direcciones. Es empleado para simular el comportamiento del hormigón en un análisis térmico no estacionario. Las funciones de forma son lineales con esquema de integración 2x2x2.

El elemento barra LINK33 cuenta con dos nodos y un grado de libertad en cada uno de ellos (la temperatura). Tiene capacidad de conducción entre los nodos. Las funciones de forma de los elementos son lineales con integración exacta de los mismos. Este elemento permite realizar un análisis térmico no estacionario.

COMBIN39 es el elemento empleado para simular el contacto entre el hormigón y el perfil metálico. Se trata de un elemento unidireccional sin masa de dos nodos, regido por una curva variación de temperatura entre nodos vs flujo de calor. Un nodo del elemento pertenece al perfil metálico y el otro al hormigón, de modo que acero y hormigón se conectan nodo a nodo. El comportamiento del contacto considerado es la que se recoge en el artículo de Jamil Ghojel [2], estimando un valor de conductancia de 100 [W/m²K].

3.2.2 Caracterización del material

Las propiedades térmicas adoptadas del acero, tanto del perfil como del armado longitudinal, son las recogidas en el Eurocódigo3 [4]. La densidad se asume constante de valor 8750[kg/m³], mientras que la conductividad térmica y el calor específico sufren variación con la temperatura como se recoge en figura 6.

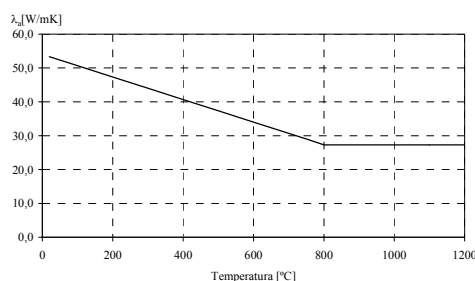


Fig 6(a)

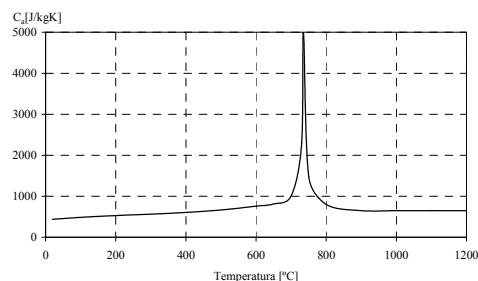


Fig 6(b)

Fig. 6 – Propiedades térmicas del acero. (a) Conductividad térmica. (b) Calor específico.

La conductividad térmica, el calor específico y la densidad del hormigón para los distintos estados de temperatura se obtienen según lo indicado en el Eurocódigo 2 [5]. Para ello se

considera un hormigón de peso normal, seco (humedad 0%) y compuesto por árido silíceo. En la figura 7 se recogen los modelos de comportamiento térmico del hormigón adoptados.

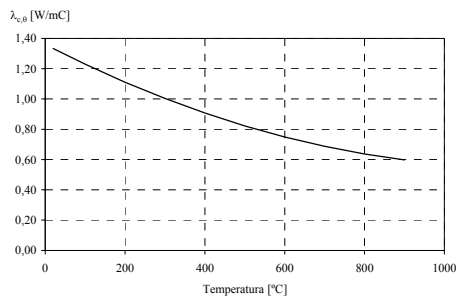


Fig. 7(a)

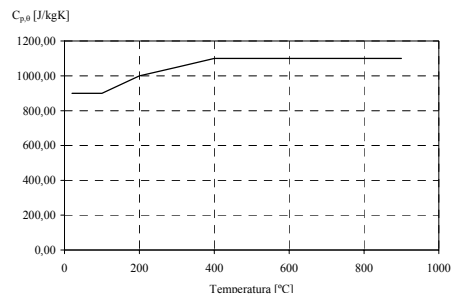


Fig. 7(b)

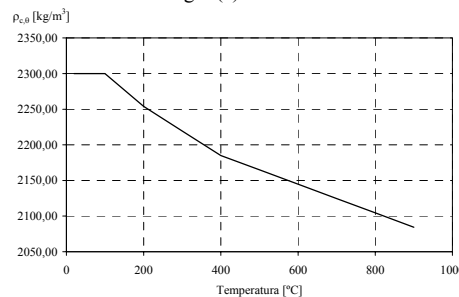


Fig. 7(c)

Fig. 7 – Propiedades térmicas del hormigón. (a) Conductividad térmica. (b) Calor específico. (c) Densidad

3.2.3 Condiciones de contorno aplicadas

Las condiciones de contorno aplicadas en el modelo numérico deben ser similares a las generadas en el análisis experimental: resistencias cerámicas aplicadas en las alas del perfil y calentamiento de la probeta por aumento de la temperatura ambiente en el interior de la cámara.

Para simular el calentamiento de la probeta mediante resistencias cerámicas, se aplica en los nodos de la malla de las alas la curva tiempo-temperatura registrada en la superficie del ala del perfil en el ensayo experimental.

En las superficies exteriores de los elementos de hormigón se aplica un flujo de calor por convección. El calentamiento del entorno en el modelo corresponde a la curva tiempo-temperatura del ambiente en el interior de la cámara aislada registrada por el termopar de la superficie del hormigón en el ensayo experimental. El coeficiente de convección y de emisividad adoptado es 25 [W/m²K] y 0,7 respectivamente.

3.2.4 Resultados del modelo numérico

Se presentan a continuación los resultados que arroja el análisis numérico del modelo. En la figura 8 se aprecia el campo de temperaturas en la sección al finalizar el análisis. La superficie de contacto entre el hormigón y el acero ha alcanzado temperaturas comprendidas entre los 390 [°C] y los 410 [°C], por lo que puede considerarse prácticamente uniforme tras dos horas de calentamiento.

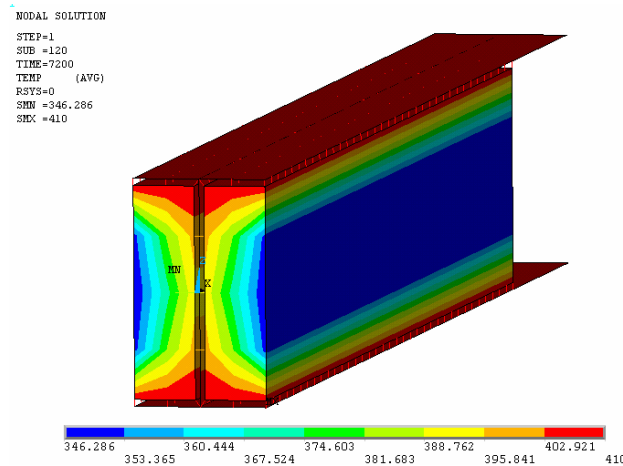


Fig. 8. Resultado del modelo numérico del campo de temperaturas en la probeta al finalizar el calentamiento

En la figura 9 se aprecia la evolución de la temperatura a lo largo del tiempo en distintos nodos del modelo numérico. Este tipo de curvas nos permite comparar los resultados del análisis numérico con los del ensayo experimental en aquellos puntos en los que dispusieron termopares.

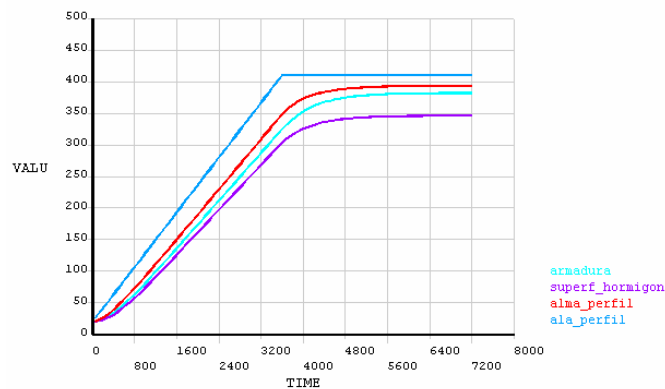


Fig. 9. Evolución de las temperaturas a lo largo del tiempo de la sección inicial de la probeta, estimadas por el modelo numérico, en el ala y alma del perfil, en la superficie del hormigón y en la armadura longitudinal

3.3 Comparación de los Resultados Experimentales y Numéricos

Para validar el modelo es necesario comparar los resultados numéricos con los obtenidos experimentalmente. La variación de la curva real de calentamiento en cada uno de las probetas obligó elaborar un análisis numérico para cada uno de los ensayos, adecuando las condiciones de contorno en cada uno de los casos.

En la figura 10 se comparan la evolución de la temperatura en tres puntos en los que existía un termopar en el estudio experimental. Los puntos analizados son el alma y el ala del perfil en la sección central de la probeta y la armadura longitudinal en el primer cuarto de la misma. La similitud de las curvas registradas en todos los puntos nos lleva a validar el elemento COMBIN39 con un valor de conductancia de 100 [W/m²K] para simular el comportamiento térmico del contacto hormigón-acero en las vigas metálicas parcialmente embebidas.

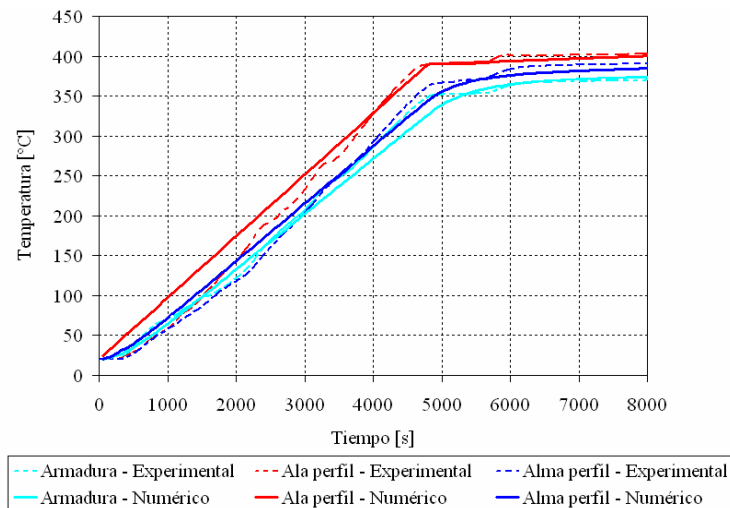


Fig. 10. Comparación de la evolución de la temperatura en la sección realizando análisis numérico y experimental

4 ESTUDIO TERMO-MECÁNICO DEL CONTACTO ENTRE EL HORMIGÓN Y EL ACERO EN VIGAS METÁLICAS PARCIALMENTE EMBEBIDAS EN HORMIGÓN

El estudio termomecánico pretende obtener un modelo numérico del comportamiento mecánico del contacto a elevadas temperaturas mediante análisis experimental y posterior análisis numérico.

4.1 Análisis Experimental

El análisis experimental se basa en ensayos push-out a elevadas temperaturas (400 [°C]). Este tipo de ensayo persigue la obtención de la curva carga-desplazamiento relativo hormigón-acero que caracteriza el comportamiento mecánico del contacto. Para ello se calienta la probeta hasta que el contacto alcance la temperatura de 400 [°C] y posteriormente 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.

4.1.1 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 (sobre el punto A de la figura 1b), registrándose los movimientos de deslizamiento entre ambos materiales mediante transductores de desplazamiento [6]. El equipo queda descrito en la figura 11.



Fig. 11. Equipo de ensayo para registrar la curva fuerza-deslizamiento a elevadas temperaturas.

4.1.2 Resultados obtenidos

En la figura 12(a) se presentan los resultados de los tres ensayos push-out realizados sobre probetas a 400 [°C] con adherencia natural [3].

El primer tramo responde a los fenómenos de adhesión y adherencia mecánica. Alcanzada la tensión última se rompe dejando paso al rozamiento entre las superficies que garantiza la transmisión de esfuerzos entre hormigón y acero.

El valor medio de la máxima tensión cortante alcanzada a 400 [°C] es de 0,357 [MPa].

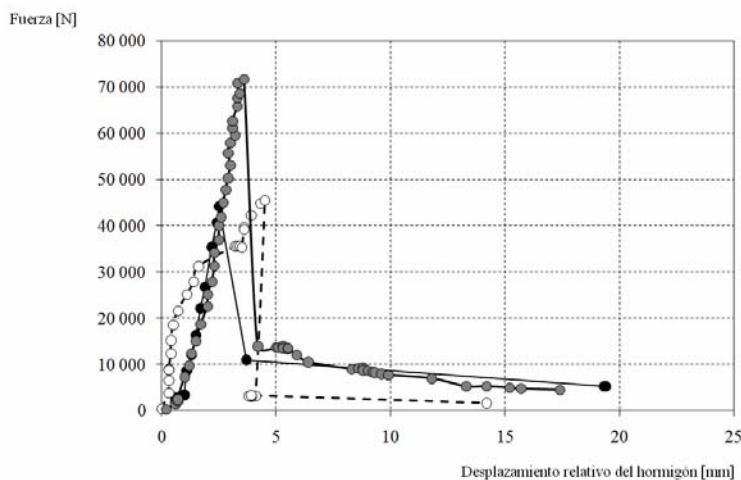


Figura 12(a)



Figura 12(b)

Fig. 12. Resultados del ensayo push-out a 400[°C]. (a)Curvas fuerza-desplazamiento. (b) Deslizamiento del bloque de hormigón respecto al perfil metálico.

4.2 Análisis Numérico

Para realizar el análisis termo-mecánico de la viga se precisan dos modelos: uno térmico y otro mecánico. Los resultados de uno han de poder emplearse en el otro, por lo que la malla ha de ser igual en ambos y los elementos empleados compatibles.

Las temperaturas obtenidas en los nodos del modelo térmico, que corresponde al campo de temperaturas de la probeta calentada, son aplicadas junto a las acciones mecánicas en el modelo mecánico.

Se restringen los desplazamientos de en los extremos del perfil metálico y se aplican desplazamientos en los nodos del hormigón de la sección inicial que simulan el desplazamiento que provoca el pistón.

Las no linealidades del modelo son resueltas como acumulación de cálculos lineales mediante un proceso incremental. Los desplazamientos del pistón sobre los bloques de hormigón son aplicados en escalones con un valor máximo de 0,12 [mm]. 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.

4.2.1 Elementos del modelo

Se generó un modelo numérico tridimensional de la viga empleando los elementos SOLID65, LINK8, SHELL181 Y COMBIN39 de ANSYS. Estos elementos estructurales pueden incorporar el campo de temperaturas generado por el modelo térmico descrito en el apartado 3.2.1. En la figura 13 se aprecian los elementos y las solicitaciones del modelo.

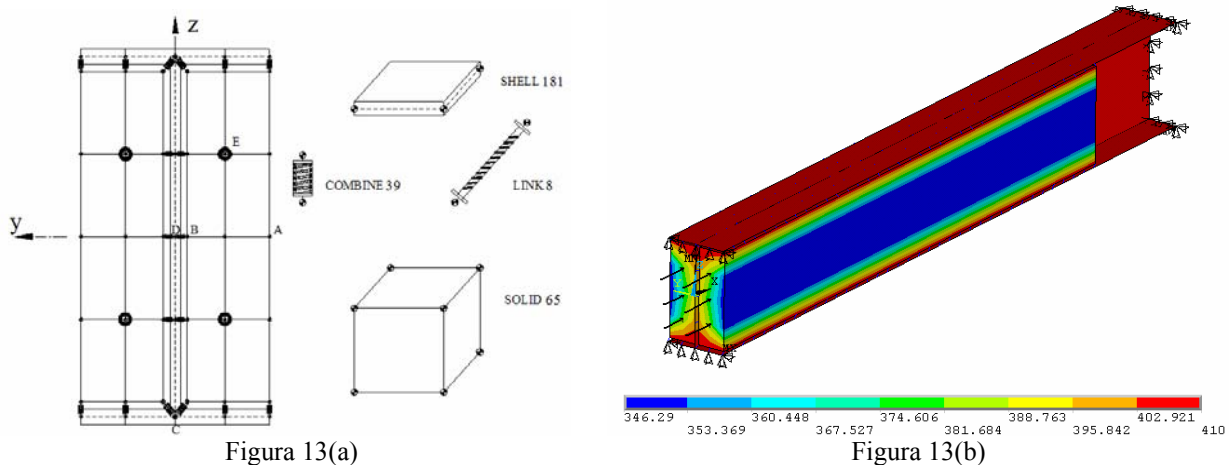


Fig. 13. Modelo termo-mecánico tridimensional de la viga realizada con elementos de ANSYS. (a) Elementos empleados en el modelo numérico. (b) Modelo numérico..

El perfil metálico se emplea el elemento SHELL181. 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 multilinear.

Los recubrimientos de hormigón armado del modelo emplean los elementos SOLID65 y LINK8. Como se indicó en el modelo térmico, el hormigón y el refuerzo no solo comparten los mismos nodos sino que además el hormigón ocupa el mismo área que 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 2x2x2. 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. El criterio de rotura adoptado es el de William y Warnke.

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 multilineal. Este elemento emplea funciones de forma lineales con esquema de integración exacta.

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.

Con el resultado de la tensión cortante máxima y las curvas fuerza-desplazamiento obtenidas en el análisis experimental de las vigas parcialmente embebidas sometidas a la temperatura de 400[°C], se construye la curva fuerza-desplazamiento de los elementos COMBIN39 para que éstos simulen el comportamiento del contacto. En la figura 14 se refleja la curva de comportamiento mecánico del contacto empleada en el análisis numérico.

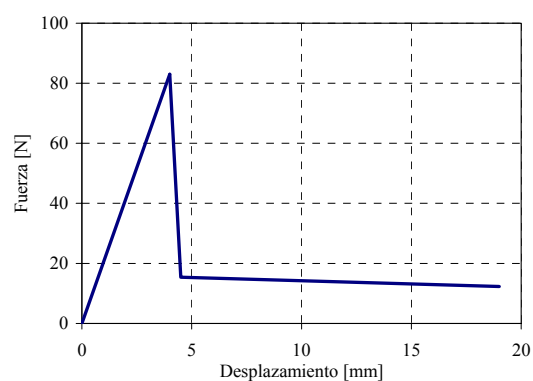


Fig. 14. Curva fuerza desplazamiento que simula el comportamiento de los elementos de contacto.

El ensayo diseñado solo registró 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.

4.2.2 Caracterización del material

La relación tensión-deformación del acero se basa en un modelo elástico-elíptico-plástico [4], ver figura 15(a). El límite elástico a temperatura ambiente es el valor característico del acero S275. El módulo de elasticidad varía con la temperatura como se recoge en la figura 15(b).

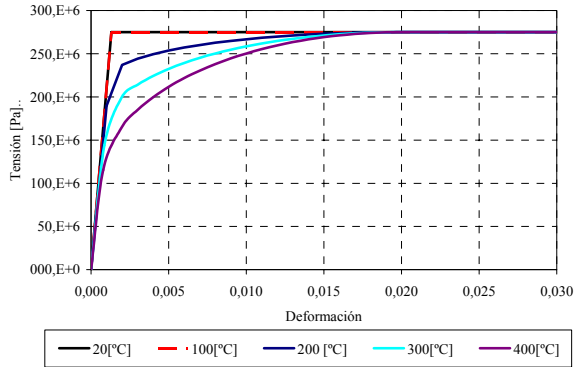


Figura 15(a)

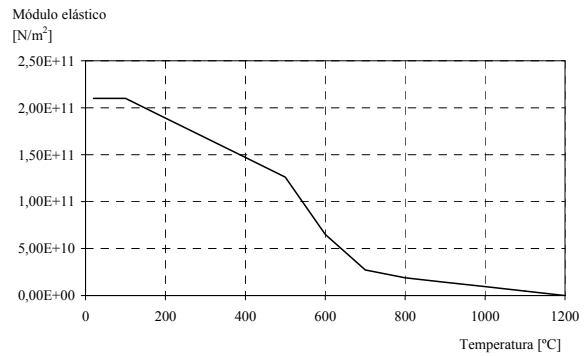


Figura 15(b)

Fig. 15 – Comportamiento mecánico del acero S275. (a) variación de las curvas tensión deformación con la temperatura. (b) Variación del módulo de elasticidad con la temperatura

El hormigón es un material cuasifrágil con diferente comportamiento a tracción que a compresión. Las curvas tensión-deformación en compresión que se adoptan son las indicadas en el Eurocódigo 2 [5], ver figura 16(b). Éstas cuentan 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 alcanza la deformación máxima, produciéndose la rotura por aplastamiento del hormigón. En tracción, la curva tensión deformación del hormigón es aproximadamente elástica lineal hasta alcanzar la tensión máxima en tracción. Los valores de tensión adoptados son los que se estiman en el Eurocódigo 2 [5], ver figura 16(b). 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

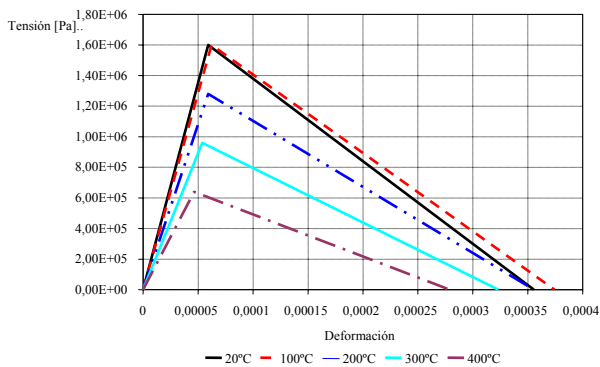


Figura 16(a)

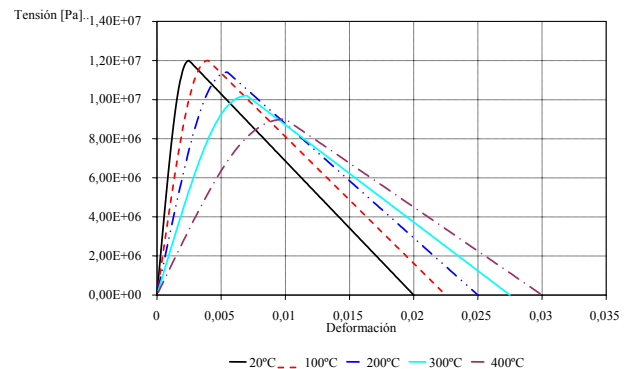


Figura 16(b)

Fig. 16 – Curvas tensión-deformación del hormigón a distintas temperaturas. (a) tracción (b) compresión

4.2.3 Resultados del modelo numérico

Se presentan a continuación los resultados que arroja el análisis numérico del modelo. Los resultados que interesan son aquellos que pueden compararse con el ensayo experimental: movimiento relativo entre hormigón y acero, y la curva fuerza aplicada-deslizamiento del hormigón.

Como se aprecia en la figura 17, el modelo numérico predice el desplazamiento de los bloques de hormigón respecto al perfil metálico.

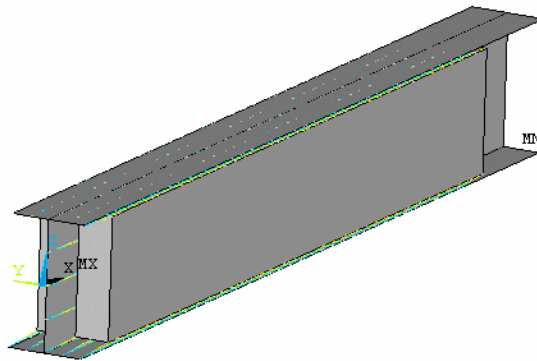


Fig. 17. Simulación del deslizamiento relativo entre los bloques laterales de hormigón y el perfil metálico.

El valor de la fuerza aplicada sobre los bloques de hormigón debida al desplazamiento impuesto se obtiene como resultado de la reacción en la dirección axial en el extremo inferior del perfil metálico. En la figura 18 se recoge la curva que resulta del análisis numérico.

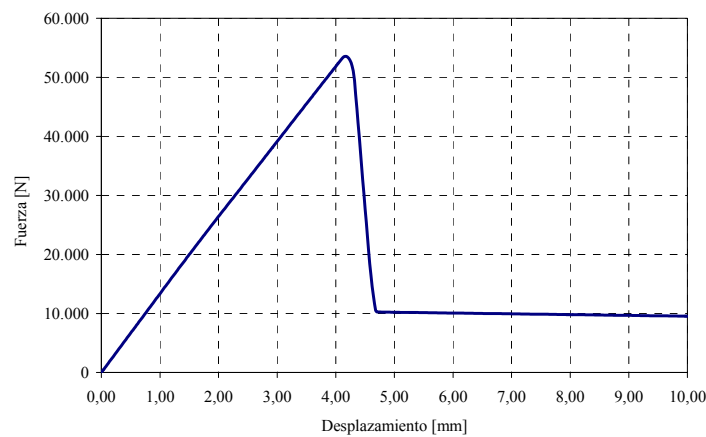


Fig. 18. Curva fuerza- deslizamiento obtenida en el análisis termo-mecánico numérico..

4.3 Comparación de los Resultados Numéricos con los del Ensayo Push-out.

Si se compara la curva registrada en la figura 18 con las de la figura 12(a) y la figura 17 con la figura 12(b), se aprecia que el modelo numérico simula perfectamente tanto la curva fuerza-deslizamiento como el desplazamiento de los bloques de hormigón.

5. CONCLUSIONES

Se ha presentado un modelo numérico que simula correctamente el comportamiento térmico de las vigas metálicas parcialmente embebidas.

Mediante ensayos push-out a elevadas temperaturas se ha generado un modelo de comportamiento mecánico del contacto entre el hormigón y el acero en este tipo de secciones.

Se ha presentado un modelo numérico que, empleando el modelo mecánico del contacto a alta temperaturas, simula correctamente el comportamiento termomecánico de vigas metálicas parcialmente embebidas.

El contacto ente el hormigón y el acero en el modelo se materializa mediante elementos muelle respondiendo a distintas curvas en función de la temperatura en la interfase.

La geometría de la sección del perfil metálico podría condicionar el valor del resultado debido al efecto de confinamiento.

REFERENCIAS

1. CEN; EN 1994-1-1; Eurocode 4, Design of composite steel and concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings.
2. Ghojel, J, Experimental and analytical technique for estimating interface thermal conductance in composite structural elements under simulated fire conditions, *Experimental Thermal and Fluid Science*, No. 28, 2004, pp. 347-354.
3. Piloto, P.A.G; Ramos, A.B.; Mesquita, L.M.R., Push-out test for partially encased beams at elevated temperatures, Proceedings of FIB workshop Fire Design of Concrete Structures, from material modelling to structural performance, 8-9 November 2007, Coimbra, in print.
4. CEN; EN 1993-1-2; Eurocode 3, Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design, April 2005.
5. CEN; EN 1992-1-2, “Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design”; December.
6. Ramos, A.B.; Piloto, P.A.G; Mesquita, L.M.R. Estudio del contacto entre el perfil metálico y hormigón en vigas metálicas parcialmente embebidas. Proceedings of CMNE/CILAMCE workshop Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia, 13-15 Junho 2007, Porto.