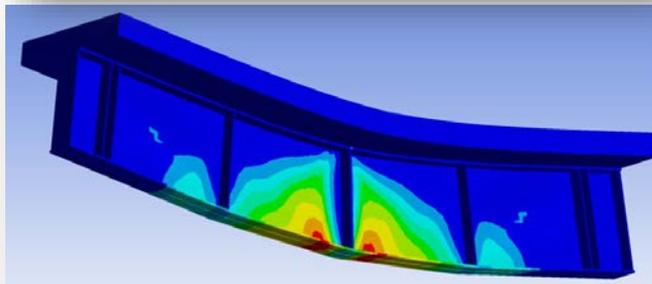
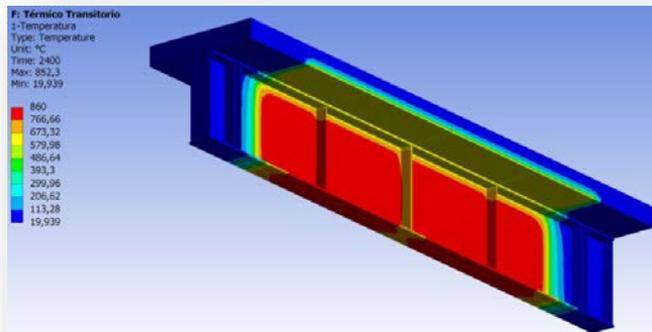
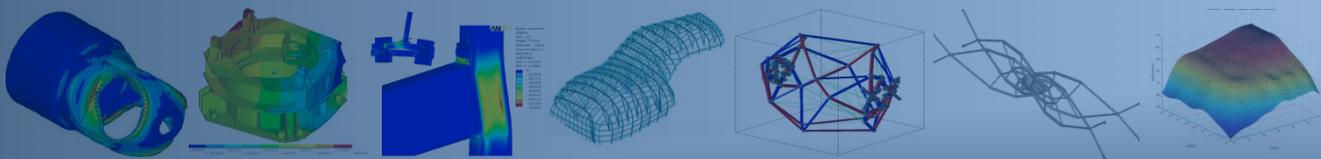


MODELADO Y PREDICCIÓN DE LA RESPUESTA DE VIGAS MIXTAS ACERO-HORMIGÓN FRENTE AL FUEGO



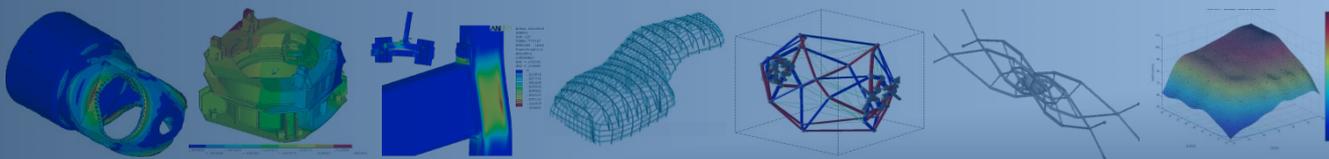
José Muñoz Cámara
Pascual Martí Montrull

Universidad Politécnica de Cartagena
Departamento de Estructuras y Construcción
Grupo de Optimización Estructural



Presentación

- 1 Introducción. Objetivos
- 2 Ensayo de referencia
- 3 Modelos de elementos finitos
- 4 Estudios paramétricos
- 5 Conclusiones
- 6 Trabajos futuros

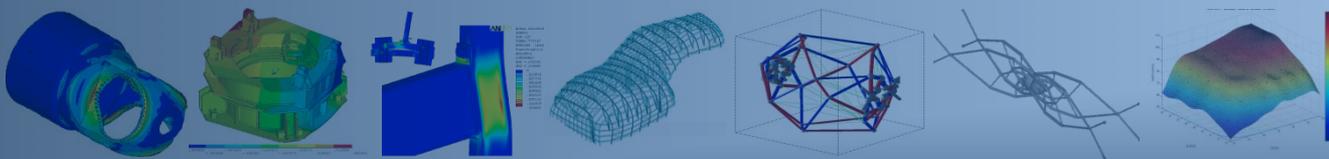


Introducción. Objetivos

- El desarrollo, validación y calibración de dos **modelos numéricos**, con el programa de elementos finitos ANSYS, **para predecir la respuesta transitoria, térmica y estructural, de vigas mixtas acero-hormigón frente al fuego.**

Dentro de este objetivo se distinguen los siguientes objetivos parciales:

- Elaboración de un modelo CAD parametrizado.
 - Desarrollo de un modelo térmico que permita obtener el campo de temperaturas transitorio en la viga mixta en función de una curva de fuego dada.
 - Desarrollo de un modelo estructural que permita recoger los distintos modos de fallo de la viga mixta.
 - Validación de los modelos térmico y estructural.
- La utilización de los dos modelos desarrollados para estudiar los diferentes **modos de fallo** de la viga mixta, en función de las dimensiones de la sección transversal y de la separación de los rigidizadores intermedios del alma.

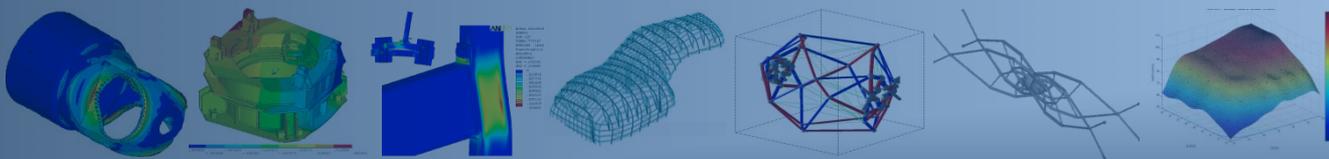


Ensayo de referencia (Asiz et al, 2014)



- Se ensayaron tres vigas.
- Se usa como contraste la viga G3 (armada).

| LONGITUDES | |
|--|--------------|
| Distancia entre apoyos (mm) | 3658 |
| Longitud total de la viga (mm) | 4167 |
| Longitud expuesta a fuego (mm) | 3000 |
| SECCIÓN | |
| Panel de las alas ($b_f \times t_f$) (mm) | 177,8 x 12,7 |
| Panel del alma ($D \times t_w$) (mm) | 587,4 x 4,8 |
| Losa de hormigón ($b_{eff} \times t_s$) (mm) | 813 x 140 |
| RIGIDIZADORES | |
| Rigidizadores a media luz ($w \times t_{stf}$) (mm) | 76,2 x 15,87 |
| Rigidizadores en apoyos ($w \times t_{stf}$) (mm) | 76,2 x 9,5 |
| Rigidizadores intermedios ($w \times t_{stf}$) (mm) | 76,2 x 9,5 |
| Relación distancia entre paneles entre el canto del alma (a/D) | 1,5 |



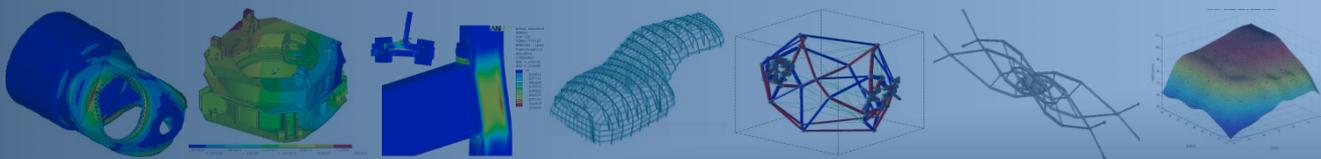
Ensayo de referencia (Asiz et al, 2014)

- Se midieron las propiedades del acero a temperatura ambiente:

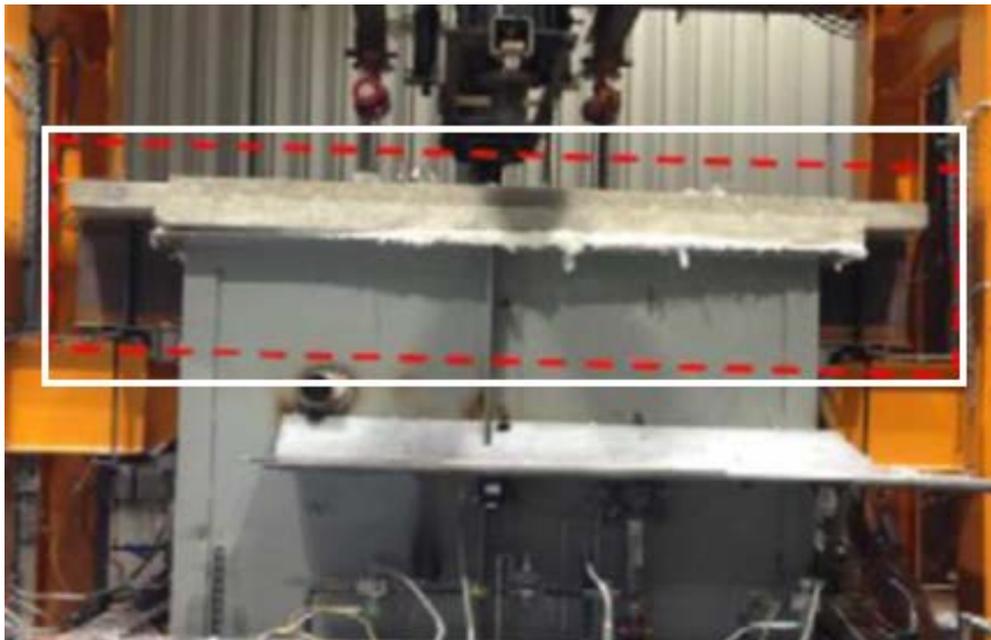
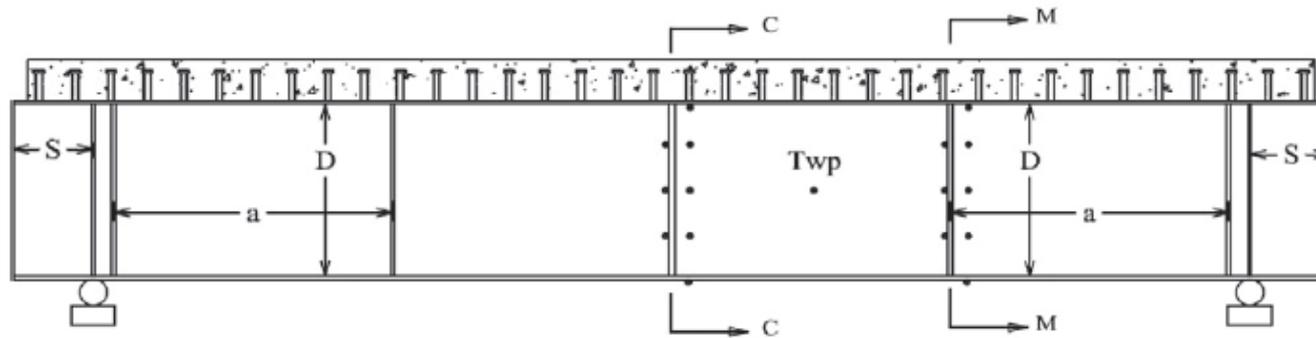
| Probeta | $f_{y,0,2}$ (MPa) | f_u (MPa) | Deformación para f_u | Deformación a la rotura | Módulo elástico (MPa) |
|---------|-------------------|-------------|------------------------|-------------------------|-----------------------|
| 1 | 436,5 | 498 | 0,0589 | 0,0893 | 218250 |
| 2 | 503,1 | 570 | 0,0544 | 0,0759 | 251550 |
| 3 | 501,4 | 566 | 0,0563 | 0,0814 | 250700 |

- Se midieron las propiedades del hormigón a temperatura ambiente:

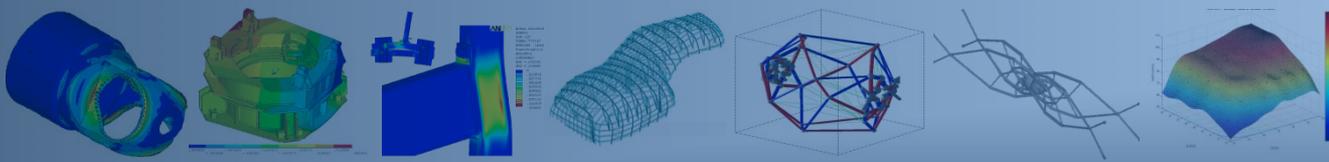
| Tiempo (días) | Resistencia a compresión, f_c (MPa) | Resistencia a tracción indirecta, f_t (MPa) | Resistencia a flexión f_{cr} (MPa) |
|--------------------|---------------------------------------|---|--------------------------------------|
| 14 | 50 | 4,0 | 4,9 |
| 28 | 54 | 3,8 | 5,6 |
| 210 (día del test) | 66 | 3,5 | 5,9 |



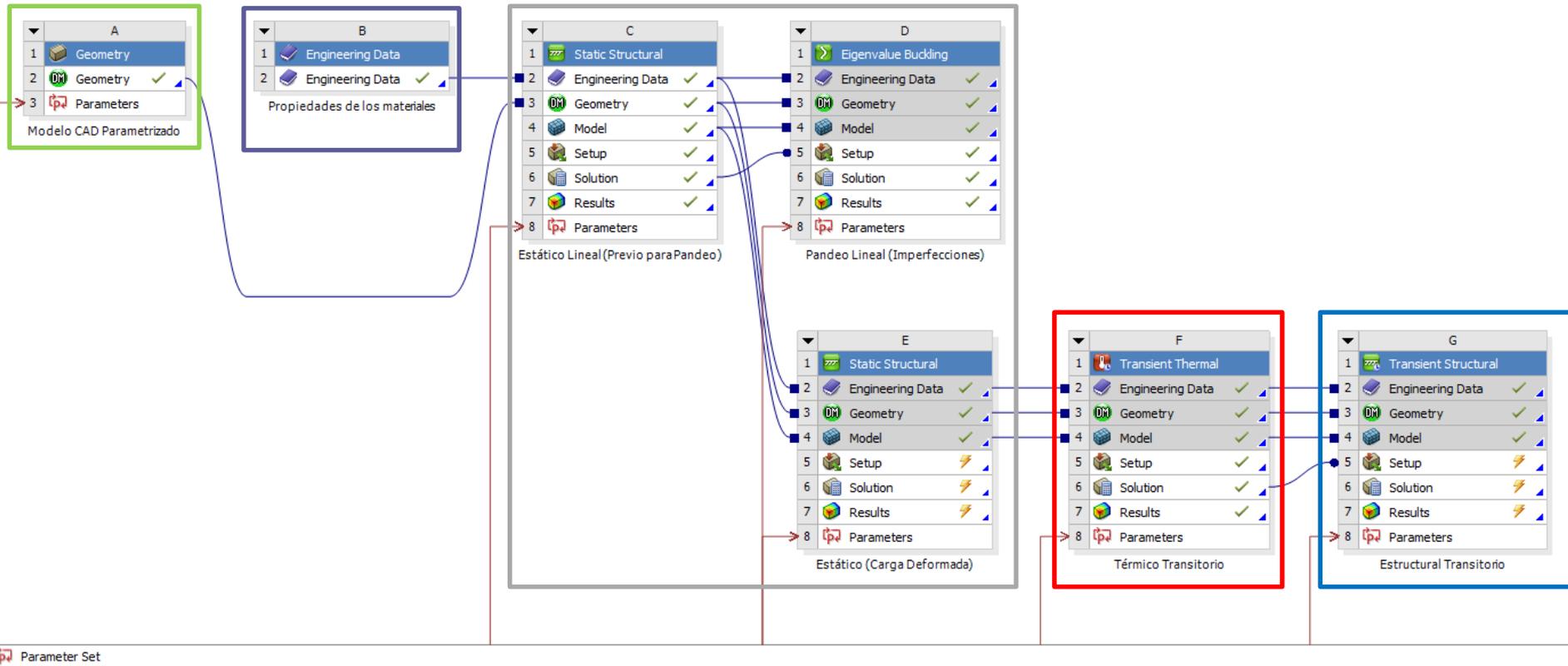
Ensayo de referencia (Asiz et al, 2014)

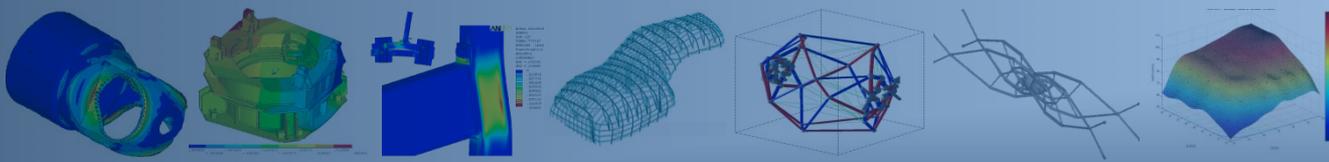


- **Viga simplemente apoyada.**
- **Calentamiento** de la zona central de la viga (3 metros), siguiendo la curva de fuego estándar.
- **Se midieron las temperaturas** en varios puntos de la sección transversal, así como el desplazamiento vertical a lo largo de todo el ensayo.
- Se aplicó una **carga constante** a lo largo de todo el ensayo (448 kN para G3).



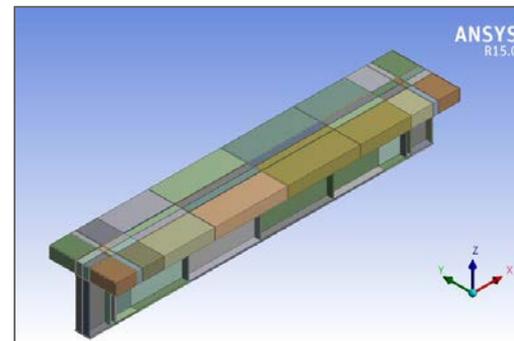
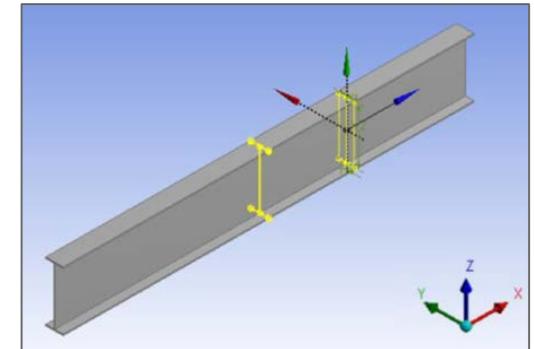
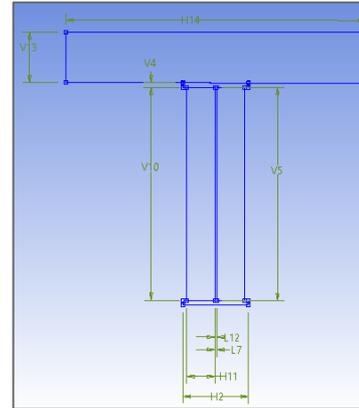
Modelos de elementos finitos

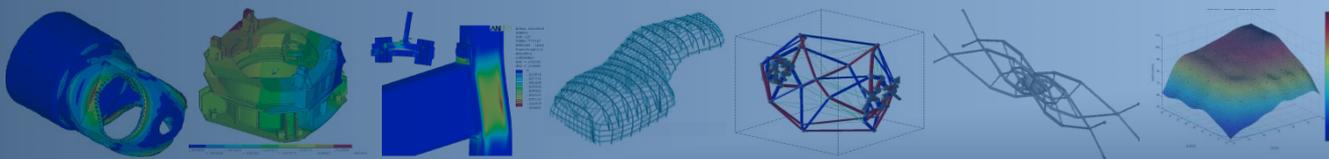




Modelo CAD parametrizado

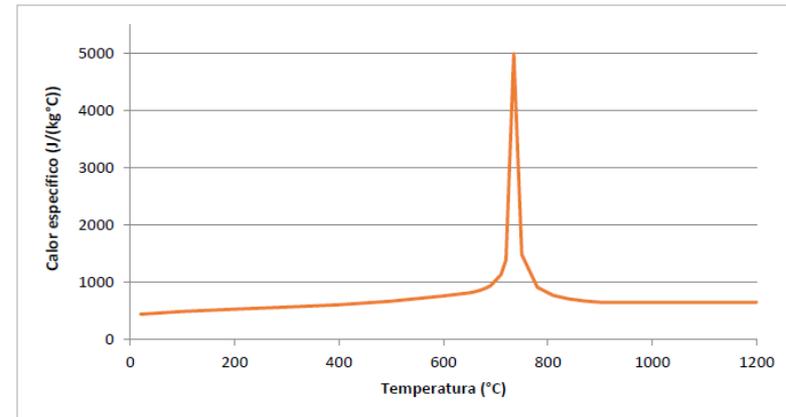
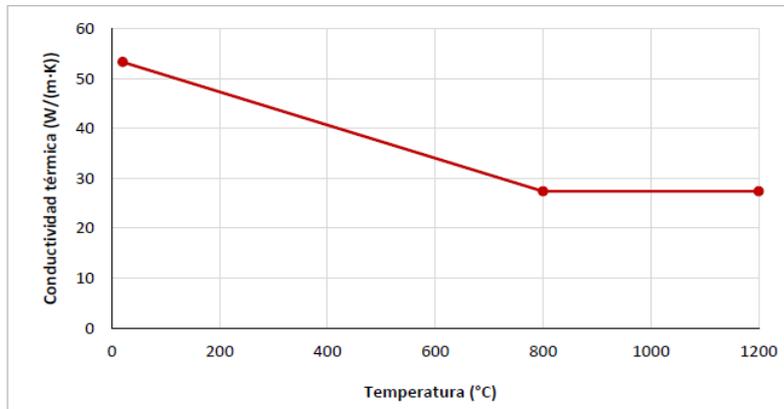
- *Sketchs* de la viga y la losa parametrizados.
- Extrusión de las secciones transversales.
- Cortes para facilitar la aplicación de las condiciones de contorno y de las cargas, y obtener una malla estructurada.



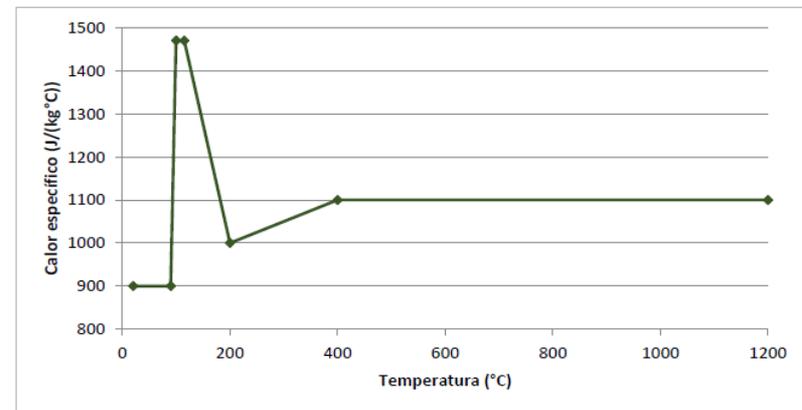
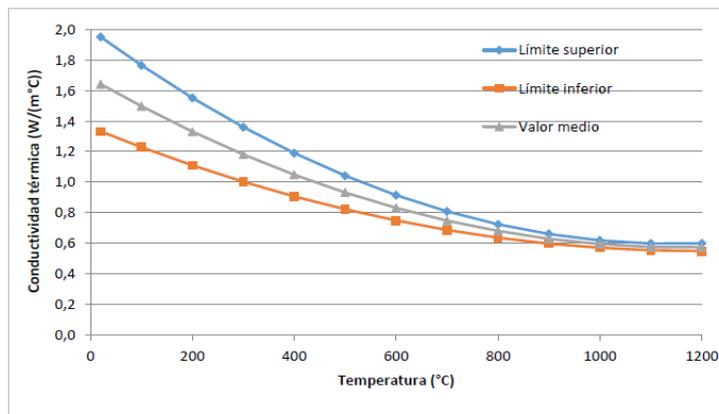


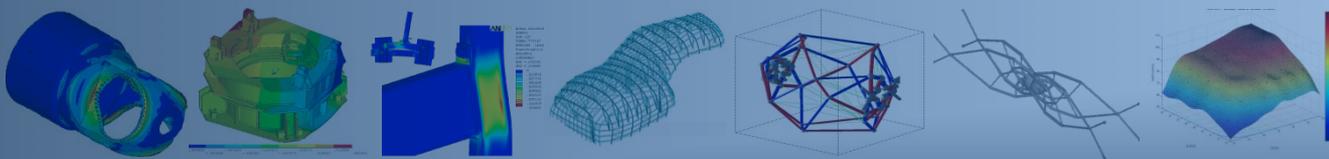
Propiedades de los materiales. Propiedades térmicas

- Conductividad térmica (k) y calor específico (c) del **acero**:



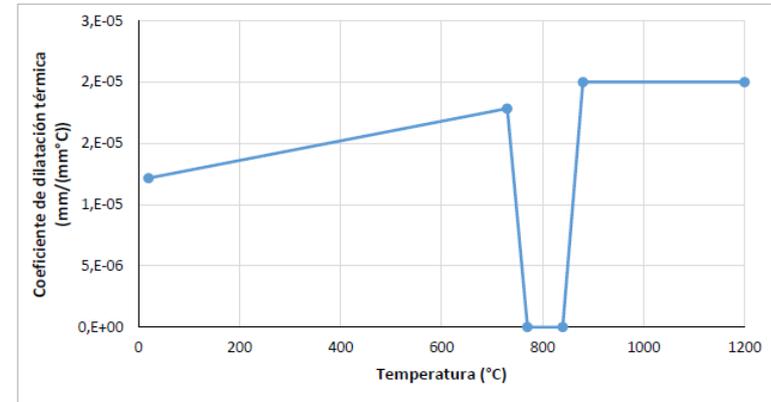
- Conductividad térmica (k) y calor específico (c) del **hormigón**:



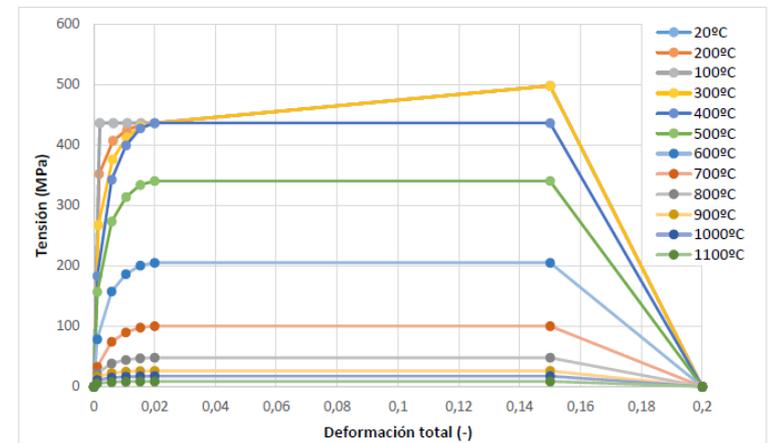


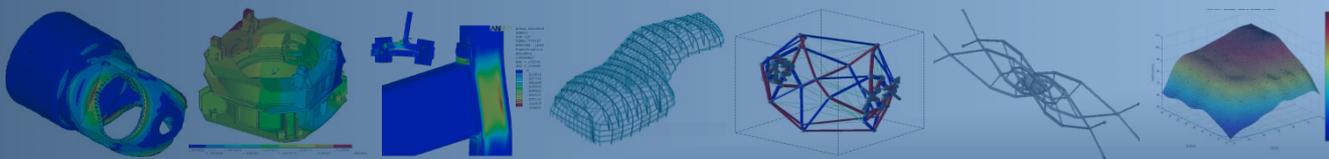
Propiedades de los materiales. Propiedades mecánicas acero

- Coeficientes de dilatación térmica (α):



- Ley de comportamiento (ϵ - σ) del acero:
 - Ajuste de las curvas del EC3 con los límites elásticos de alas y alma obtenidos experimentalmente.
 - Transformación de las tensiones y deformaciones de los ensayos a reales.
 - Descomposición en zona elástica (E y ν) y plástica (datos tabulados).

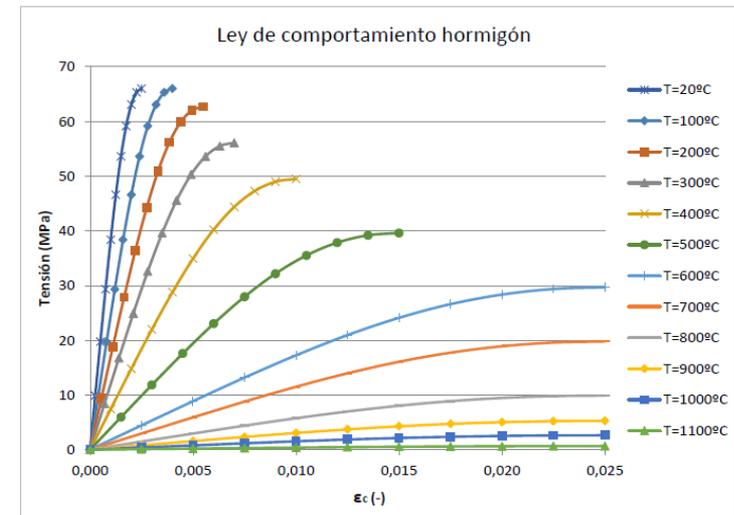


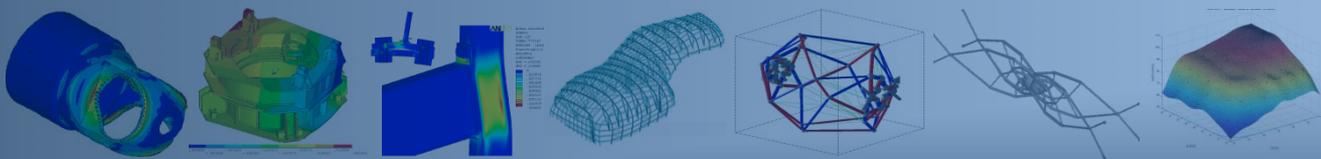


Propiedades de los materiales. Propiedades mecánicas hormigón

- Coeficientes de dilatación térmica ($\alpha=10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$).

- Ley de comportamiento ($\epsilon-\sigma$) del hormigón:
 - Ajuste de las curvas del EC2 con la resistencia a compresión medida.
 - Descomposición en zona elástica (E y ν) y plástica (datos tabulados).
 - Por la naturaleza del ensayo a compresión, no es necesario transformar a valores reales.

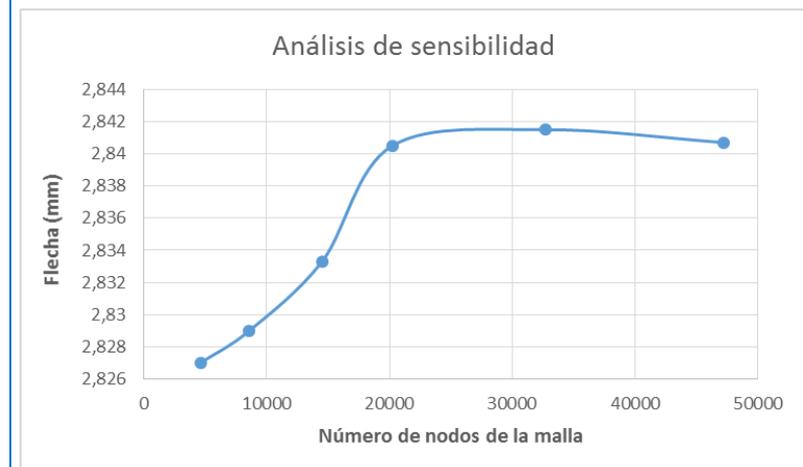
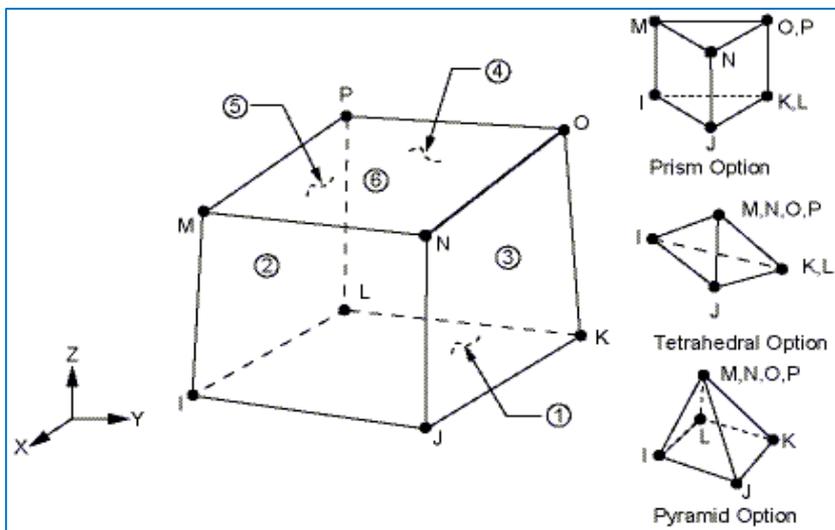


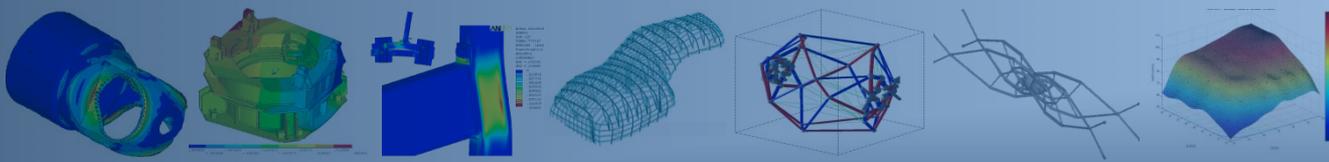


Mallado

Los **elementos** seleccionados deben ser **coherentes** dado que se realiza un **problema térmico y estructural 'encadenado'**.

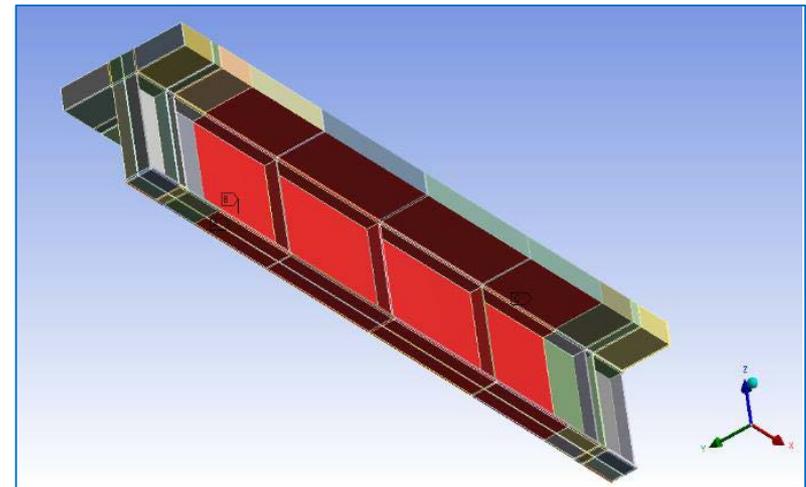
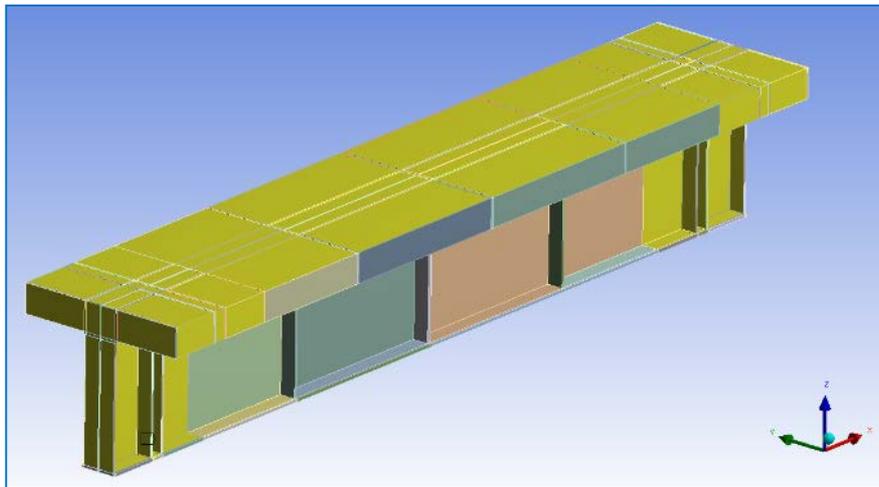
- Elemento análisis térmico: **SOLID70**, con 8 nodos y 1 GDL por nodo (temperatura).
- Elemento análisis estructural: **SOLID185**, con 8 nodos y 3 GDL por nodo (desplazamientos en X, Y y Z).
- Se realiza un **análisis de sensibilidad** para determinar el tamaño de los elementos de la malla con **mejor relación precisión/coste**.

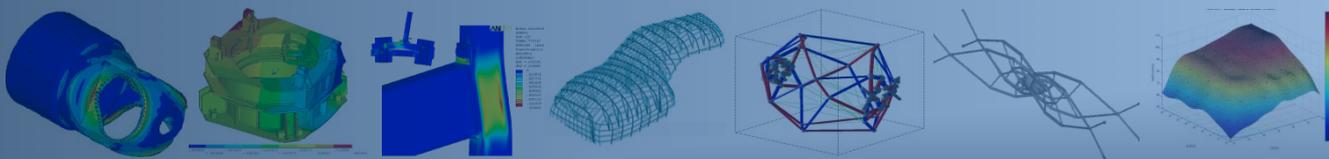




Modelo térmico. Condiciones de contorno (1)

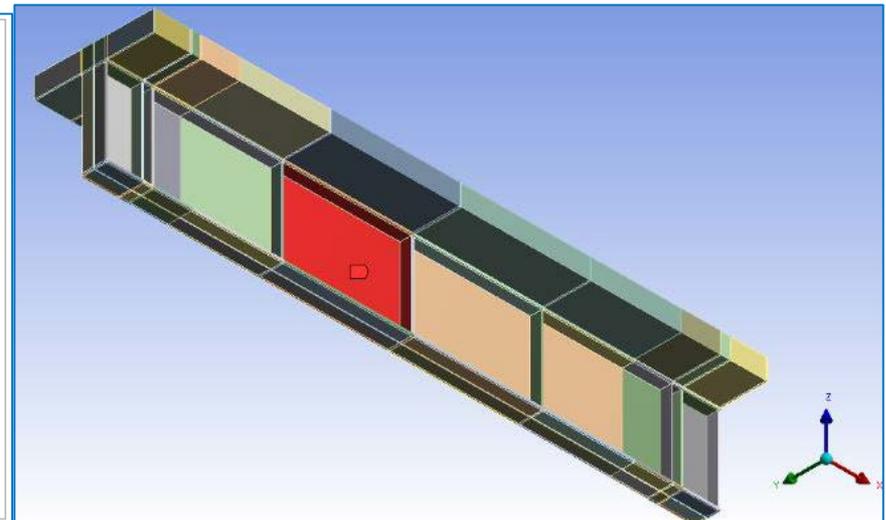
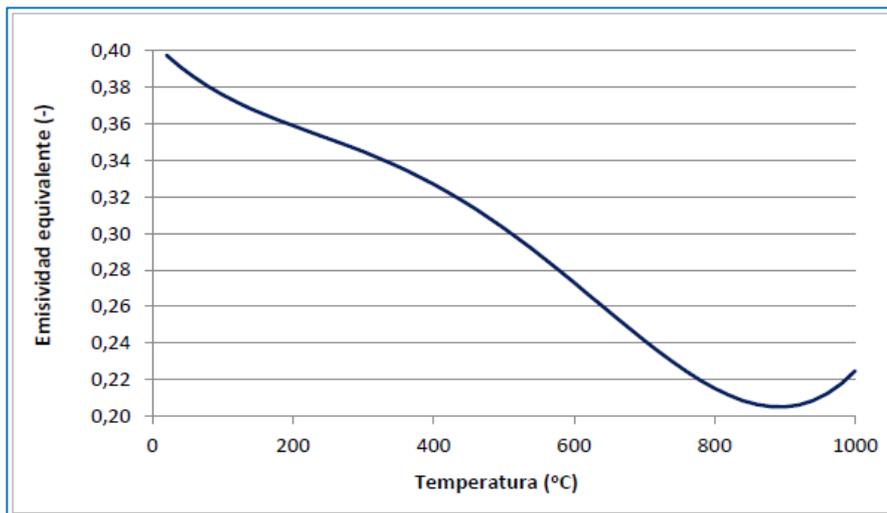
- Convección y radiación con el ambiente: EC3 $\alpha = 9 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, incluye convección + radiación.
- Convección con los gases del horno. EC3 $\alpha = 25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.
- Superficies aisladas. Contactos losa con paredes del horno.

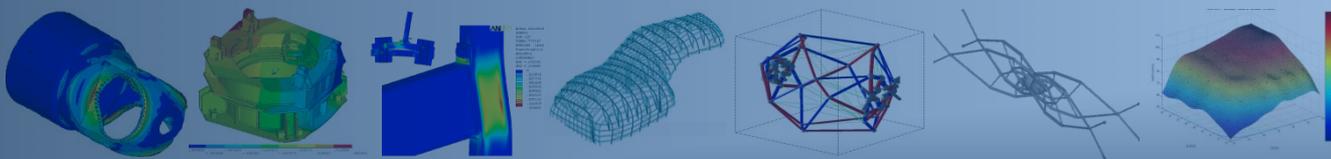




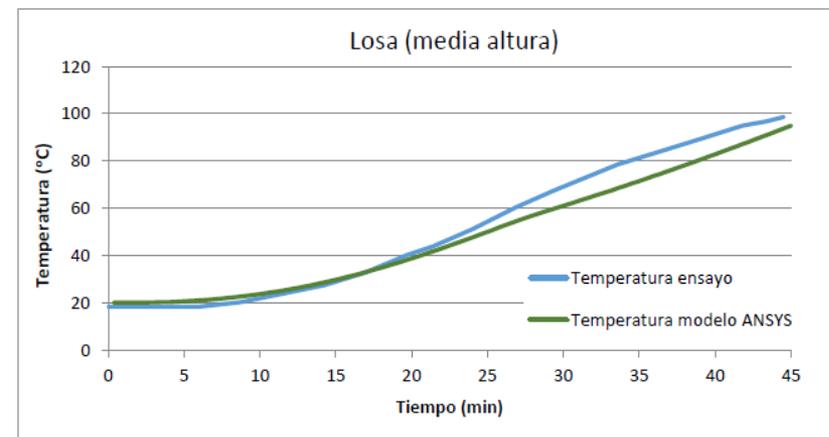
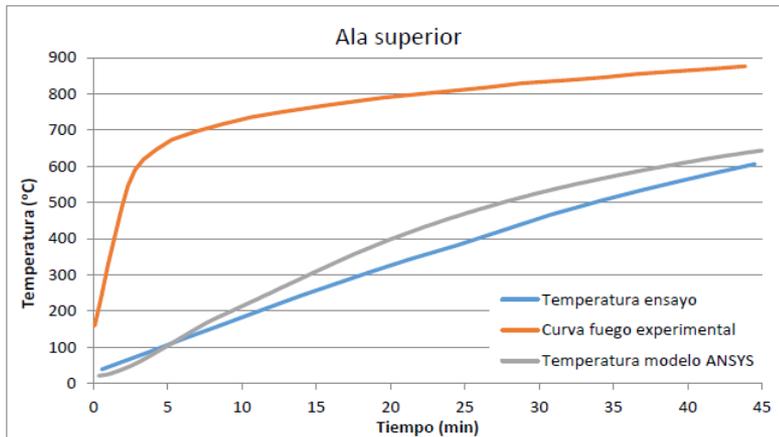
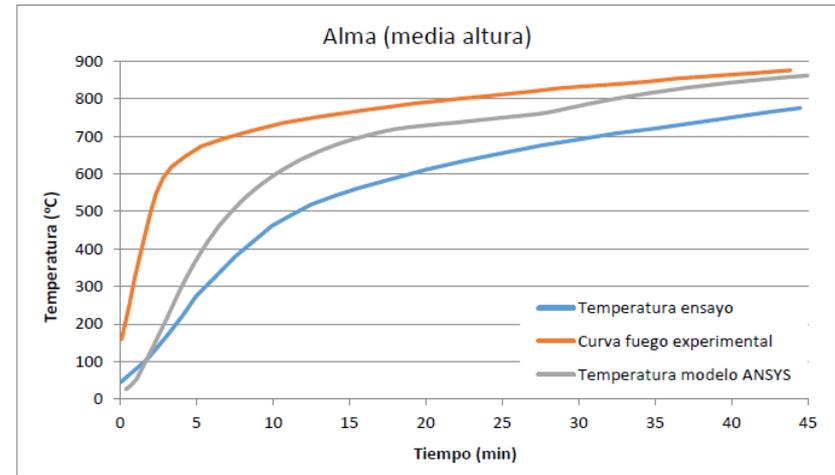
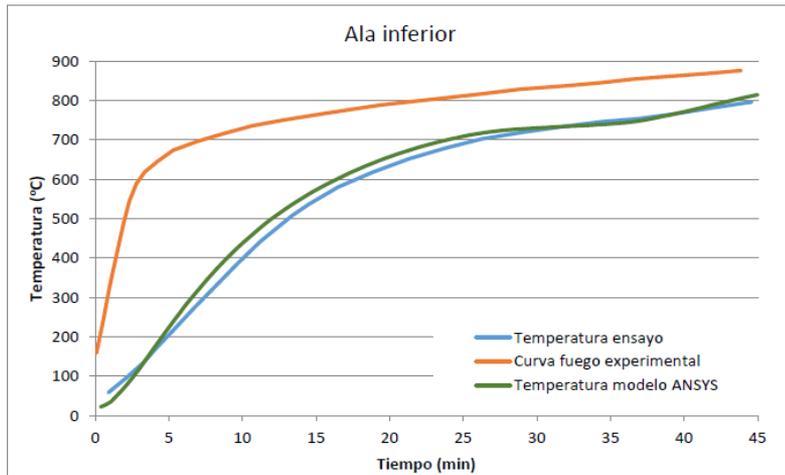
Modelo térmico. Condiciones de contorno (2)

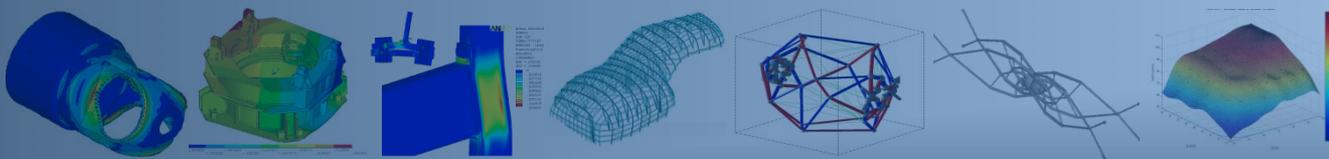
- La **emisividad** proporcionada por los **ECs** para el acero y el hormigón ($\epsilon=0,7$) es excesivamente **conservadora**, por lo que la radiación se modela según la propuesta de **Ghojel and Wong**.
- El modelo simplificado consiste en una **emisividad equivalente** en función de la temperatura de la superficie del material.
- En ANSYS se modela mediante distintos **recintos** que intercambian calor por radiación con el “ambiente” a la temperatura del horno.
- Se considera el **efecto sombra** ($\phi = 0,7$) indicado en el EC4.





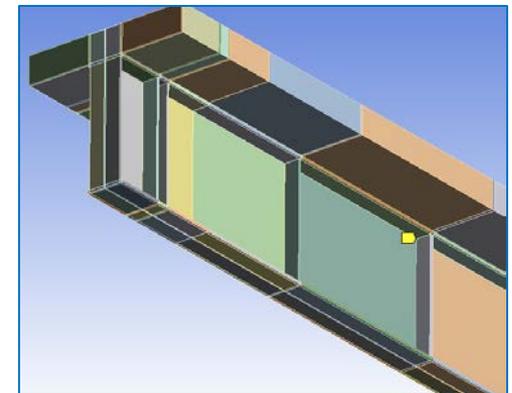
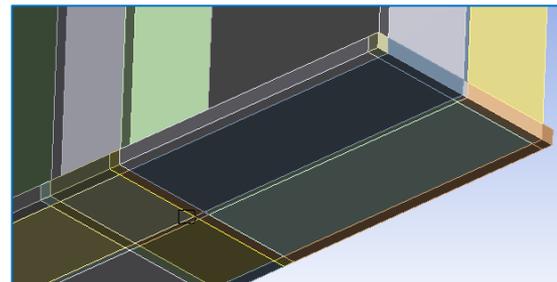
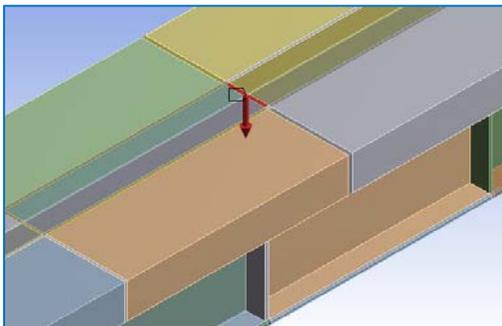
Resultados del modelo térmico

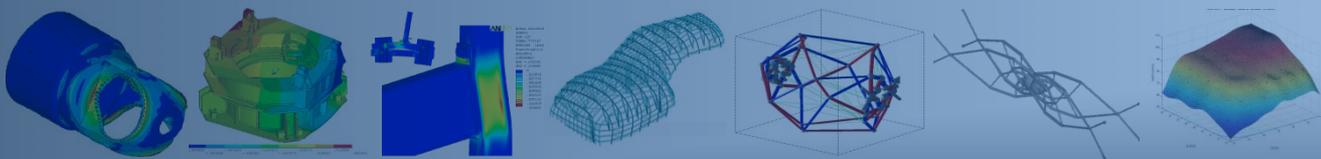




Modelo estructural. Condiciones de contorno

- Se aplica una **carga** en las superficies generadas en el centro de la viga.
- Se restringe el **desplazamiento vertical** en las líneas sobre las que se apoya la viga.
- Se restringe el **desplazamiento transversal** en pequeñas líneas sobre las líneas de apoyo.
- Se restringe el **desplazamiento longitudinal** de un punto en el centro de la viga.
- La **unión acero-hormigón** se asume perfectamente unida (*bonded en ANSYS*).



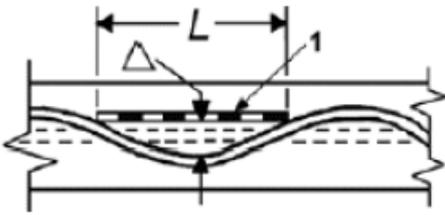


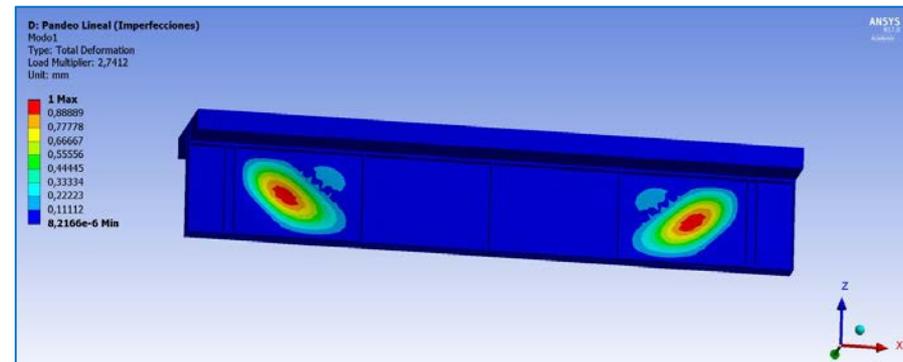
Modelo estructural. Imperfecciones

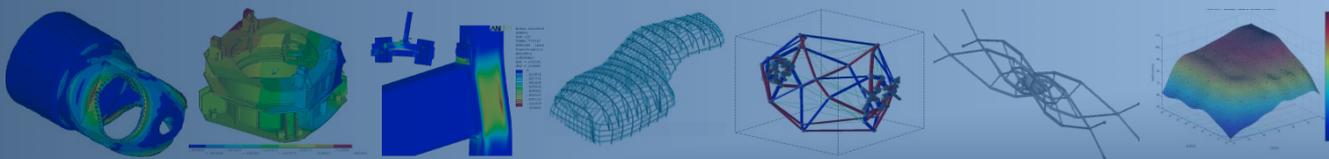
Se introducen las imperfecciones geométricas:

- La **forma** de las imperfecciones se introduce a partir del primer **modo de pandeo**.
- Se **escala** en base a las especificaciones del EC3. Un 80% de la **tolerancia geométrica de fabricación**.

No es necesario incluir las imperfecciones estructurales (tensiones residuales debidas al corte de las chapas y a la soldadura).

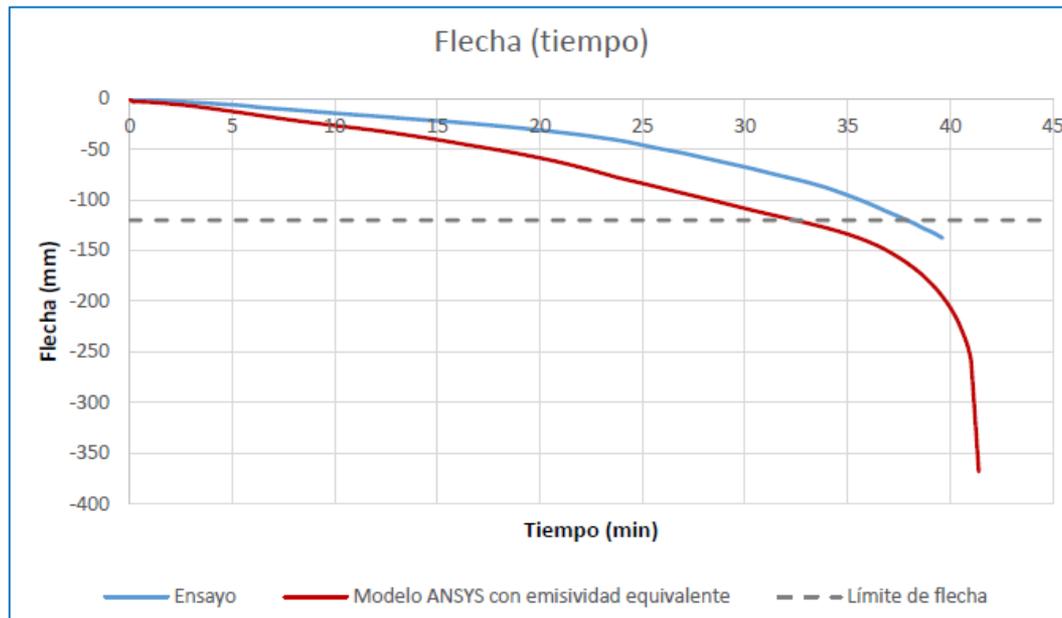
| Descripción | Desviación admisible |
|--|---|
| <p>Ondulación del alma</p>  | $ \Delta = D/100$ pero $ \Delta \geq t_w$ Desviación más estricta: $ \Delta = D/150$ |



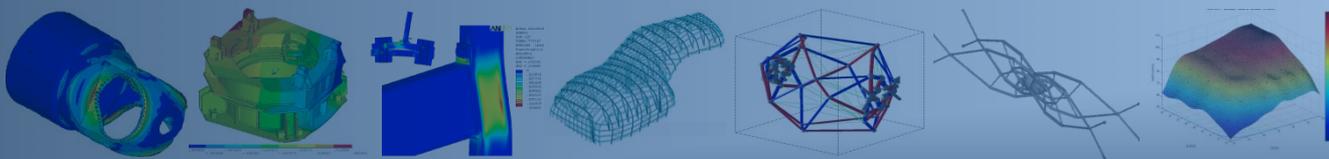


Resultados del modelo estructural. Curva flecha-tiempo

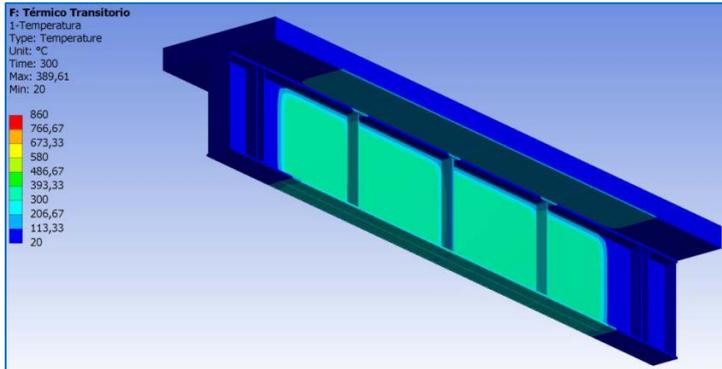
- Se comparan **las curvas flecha-tiempo** del modelo y del ensayo experimental de referencia.
- Se observa que el comportamiento del modelo es **más flexible** que el del ensayo experimental de referencia.



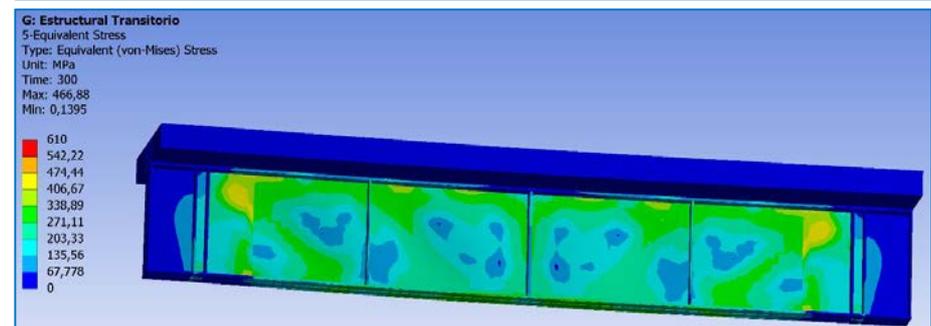
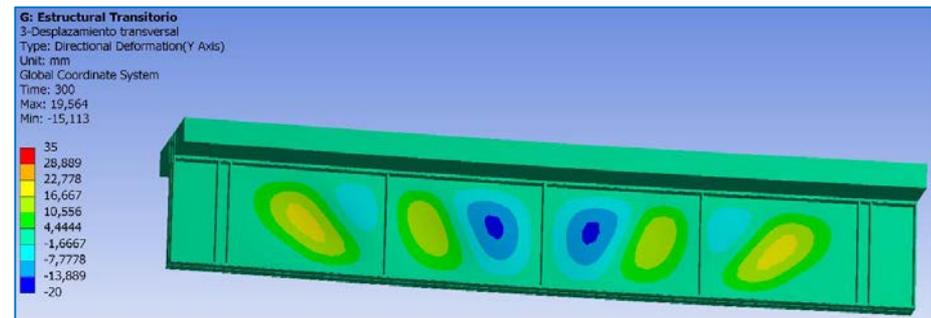
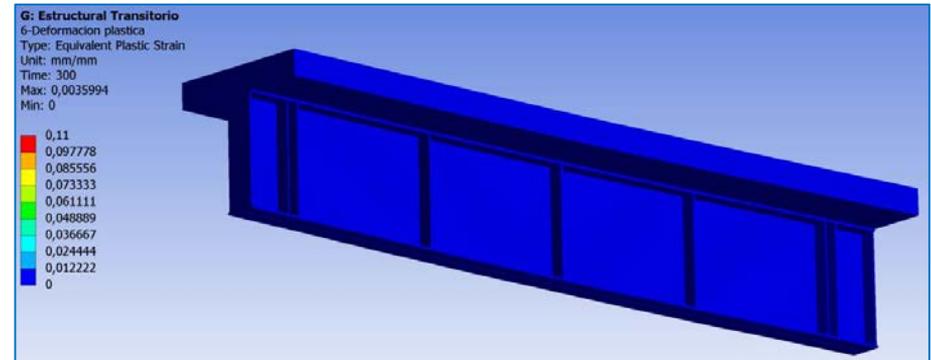
- Para observar con mayor detalle el comportamiento estructural de la viga mixta se analizan **distintos instantes** de tiempo.

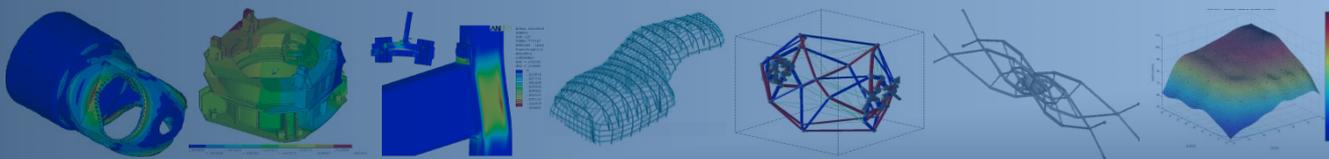


Resultados del modelo estructural. Tiempo 5 minutos.

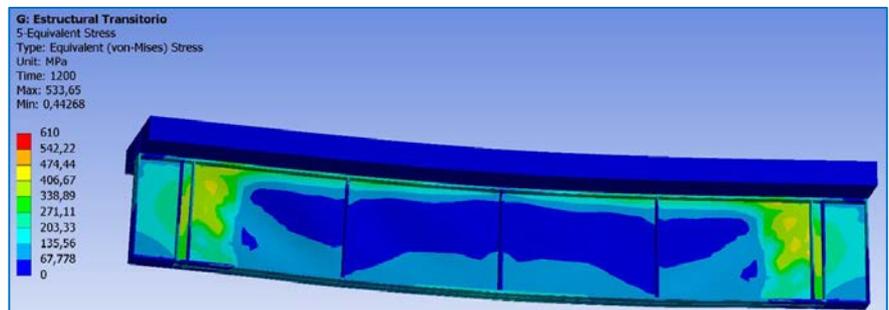
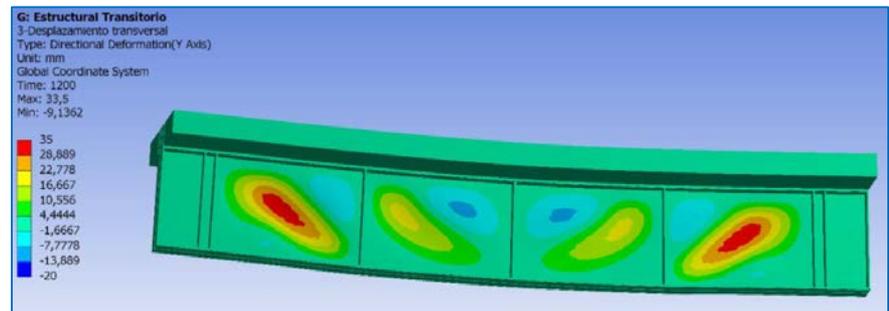
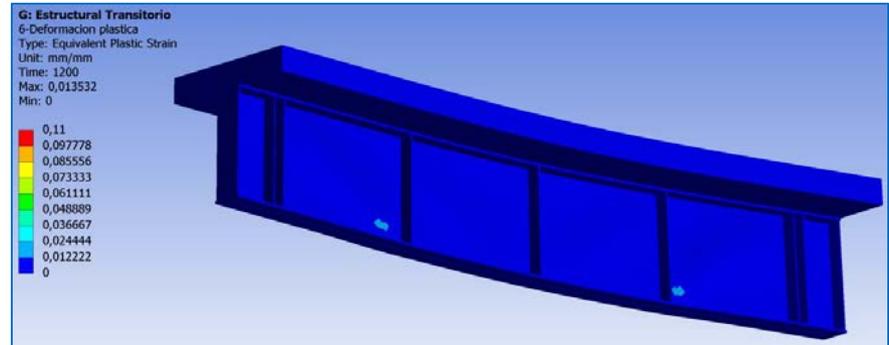
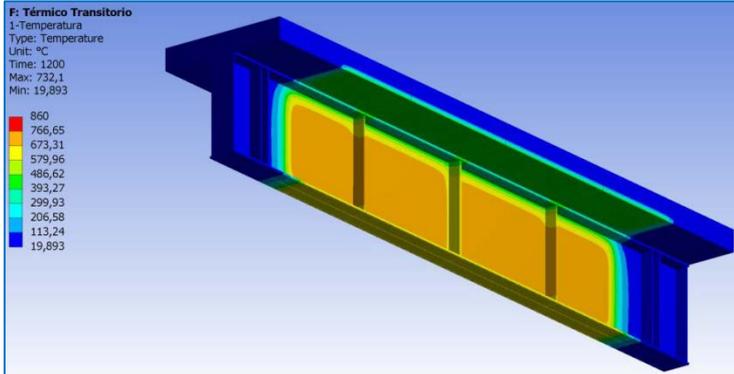


- Campo de temperaturas uniforme en la parte de la viga de dentro del horno.
- Temperatura máxima de 390°C.
- Deformación plástica inexistente.
- Desplazamientos transversales en todas las almas importantes.

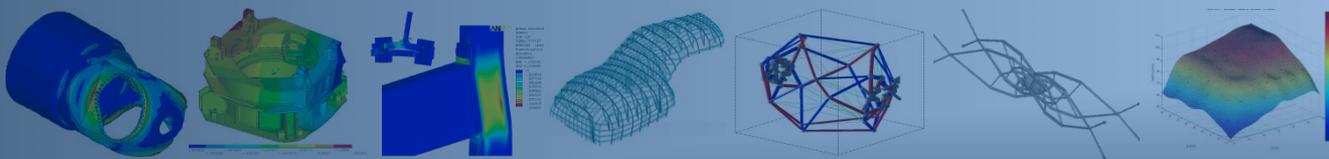




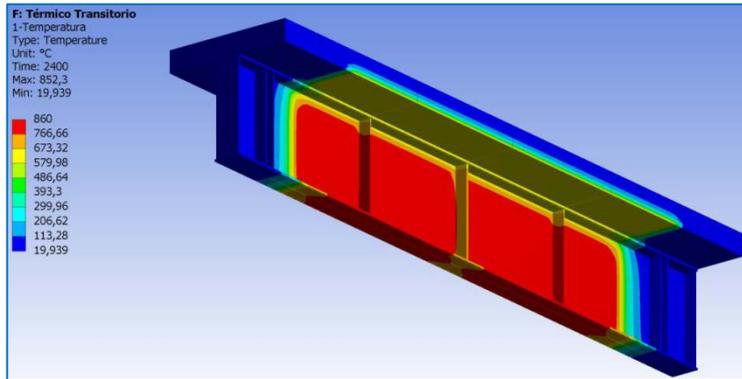
Resultados del modelo estructural. Tiempo 20 minutos.



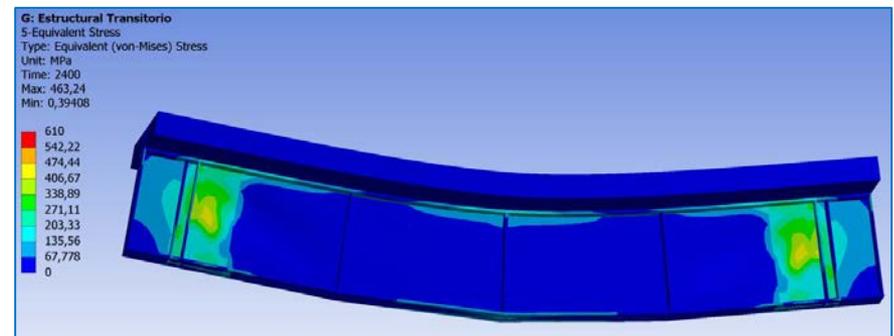
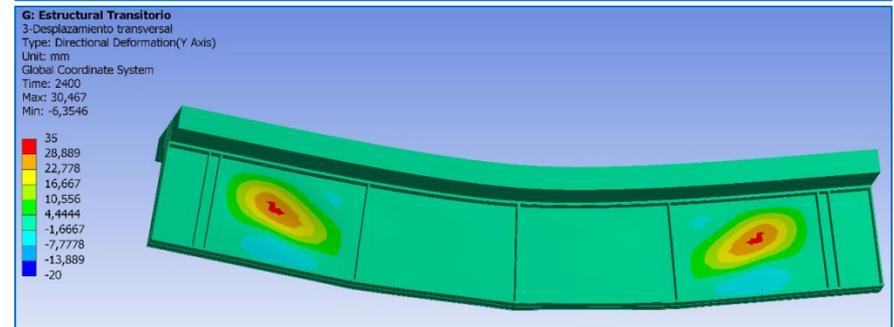
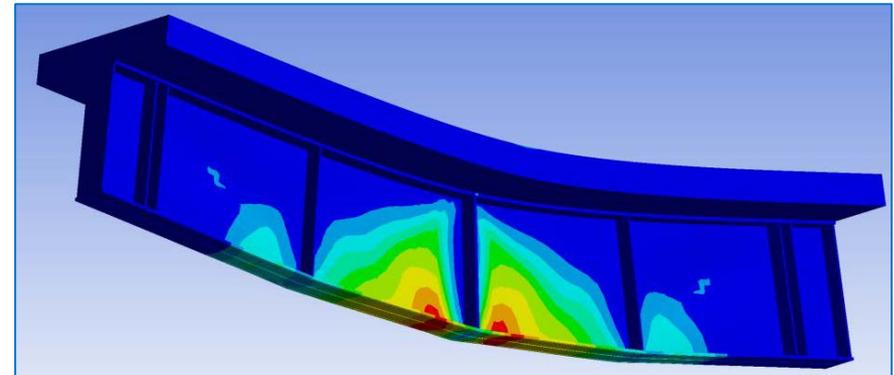
- Temperatura máxima de **732°C**.
- Deformación plástica apreciable cerca del vértice de las zonas extremas del alma.
- La abolladura del alma se acentúa en las **zonas extremas** de la viga.
- **Tensiones** importante en los límites del horno.

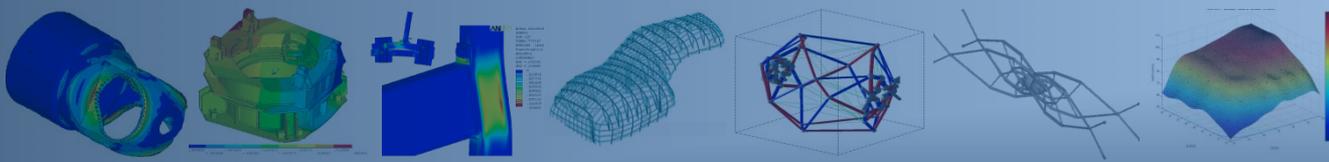


Resultados del modelo estructural. Tiempo 40 minutos.



- Temperatura máxima de 850°C .
- Deformación plástica muy importante en el centro de la viga.
- El desplazamiento transversal se acentúa más en las zonas extremas del alma.
- Mayores tensiones en los límites del horno.

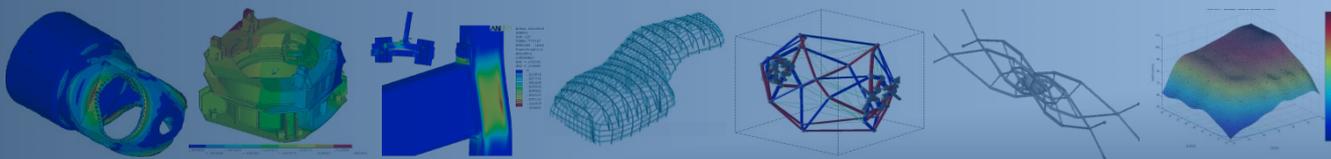




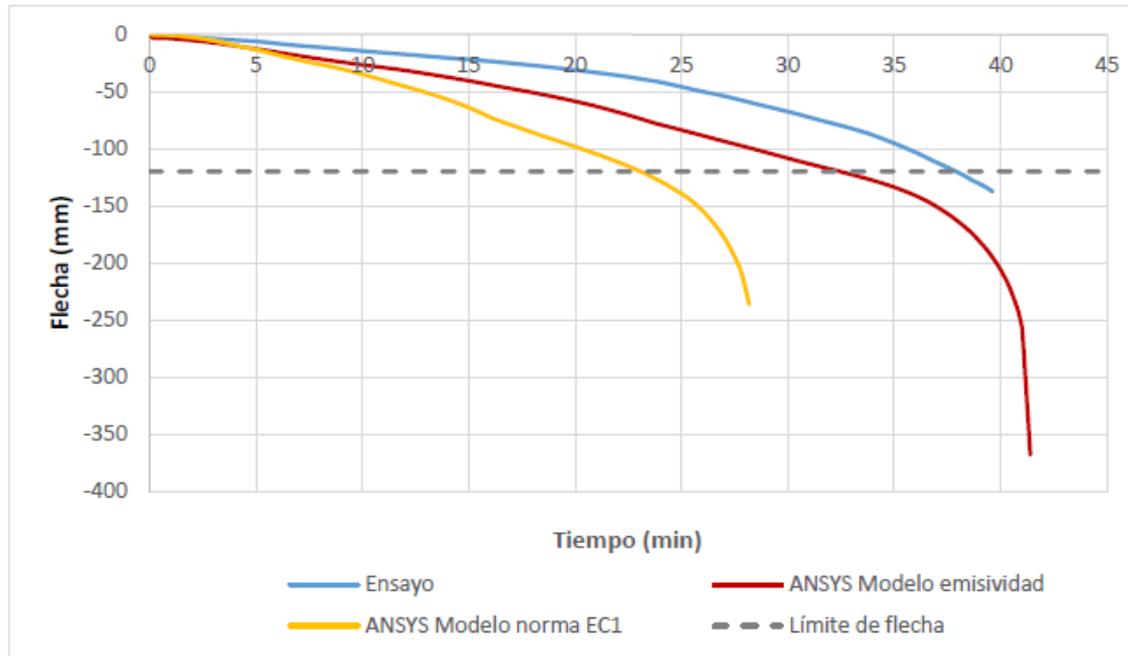
Estudios paramétricos. Modelo base

Se elabora un modelo base más acorde a la normativa, realizando las siguientes modificaciones en el modelo inicial:

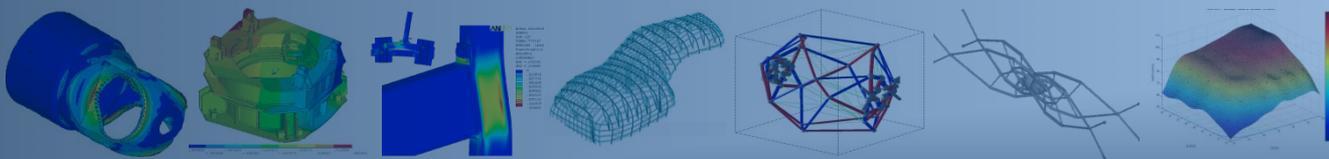
- La **emisividad** es la propuesta por el **EC3**, sustituyendo la emisividad equivalente en función de la temperatura de Ghوجل. Se considera el efecto sombra del EC3.
- La **curva de fuego** es la **estándar**.
- Las condiciones de **exposición al fuego**, convección y radiación, son aplicadas a lo largo de **toda la longitud** de la viga.



Estudios paramétricos. Influencia de la emisividad

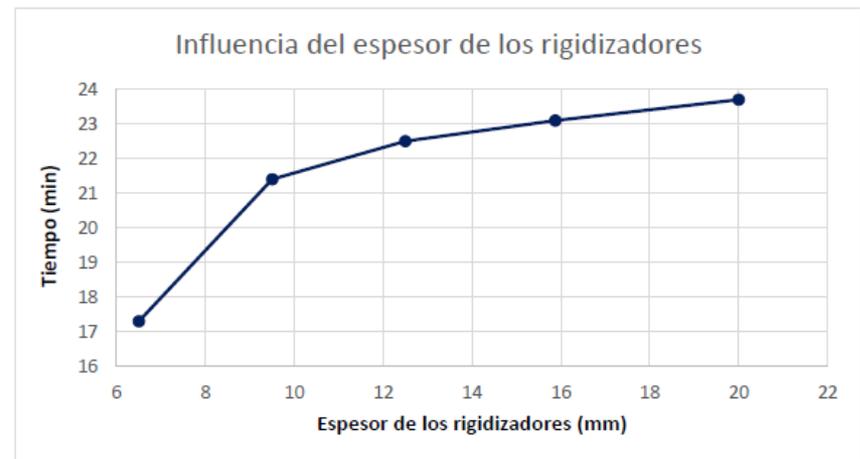
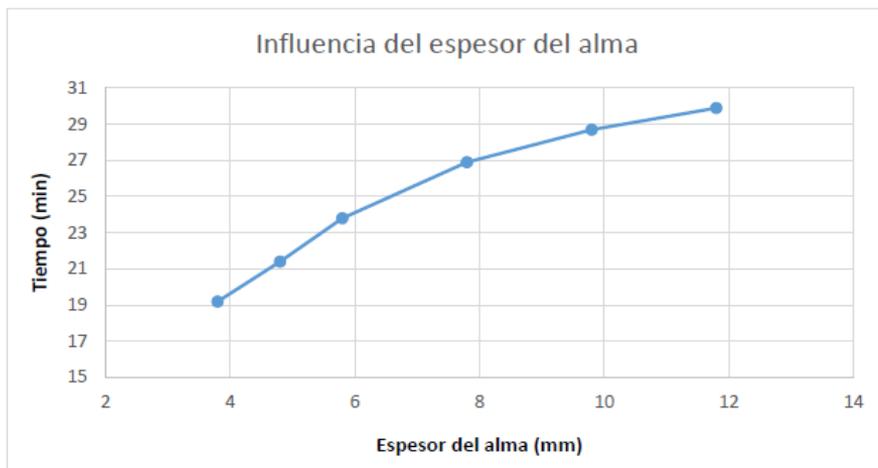


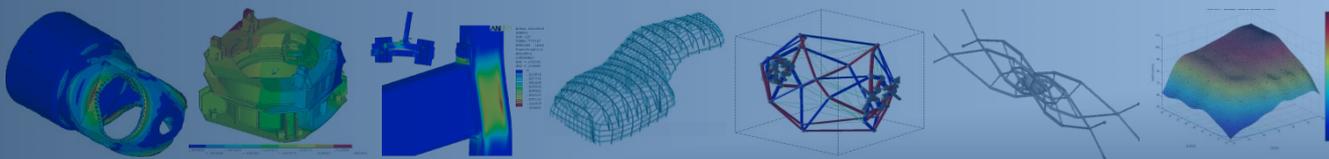
| | Tiempo (min) | Desviación respecto al ensayo (%) |
|---|--------------|-----------------------------------|
| Ensayo | 38,0 | 0,0 |
| Modelo ANSYS. Emisividad según bibliografía | 32,5 | -14,5 |
| Modelo ANSYS. Emisividad según EC1 | 23,0 | -39,5 |



Estudios paramétricos. Influencia espesores alma y rigidizadores

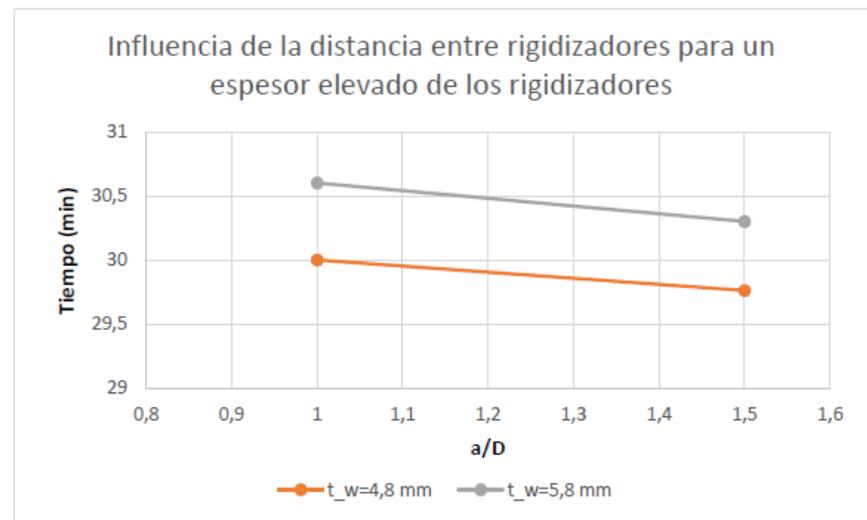
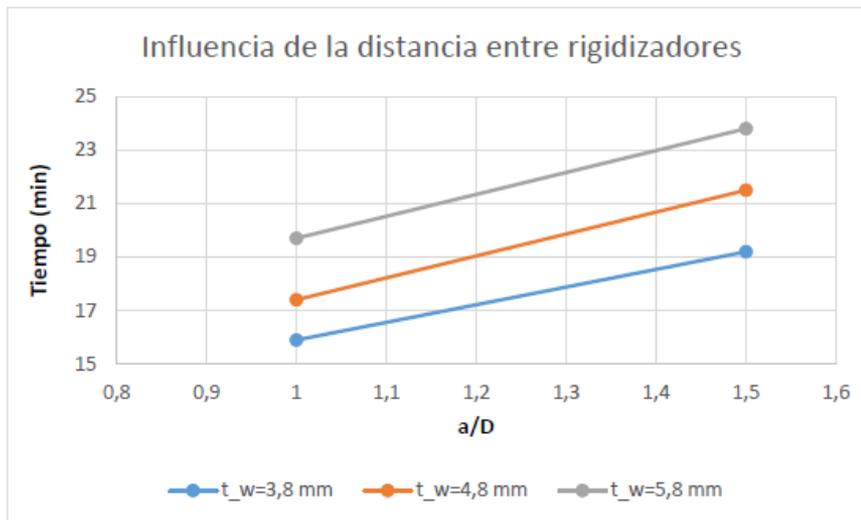
- La **influencia del espesor del alma** y de los **rigidizadores** sobre el tiempo de resistencia al fuego presenta una **tendencia asintótica**, a partir de cierto valor ya han evitado el **modo de fallo** correspondiente.



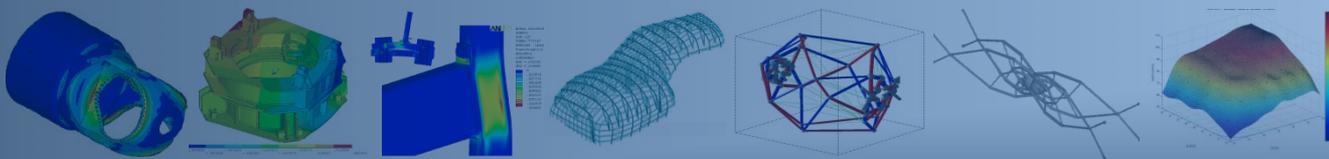


Estudios paramétricos. Influencia distancia rigidizadores (1)

- Influencia de la **distancia entre rigidizadores** ($t_r = 9,5$ mm):
- Influencia de la **distancia entre rigidizadores** ($t_r = 20$ mm):

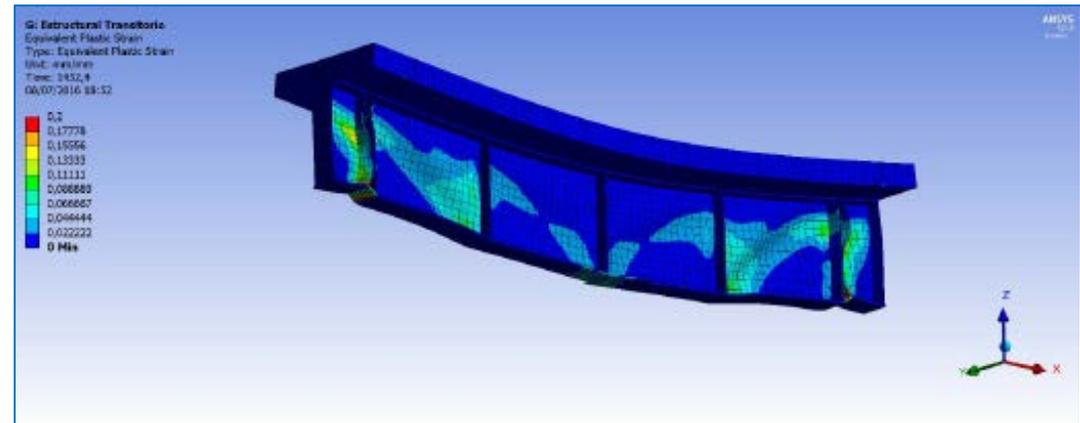


- Se ha **ampliado** el estudio paramétrico a casos con un **elevado espesor de los rigidizadores** para comprender mejor el comportamiento observado.
- La justificación a este comportamiento 'no normal' se encuentra en un **cambio en el modo de fallo**.

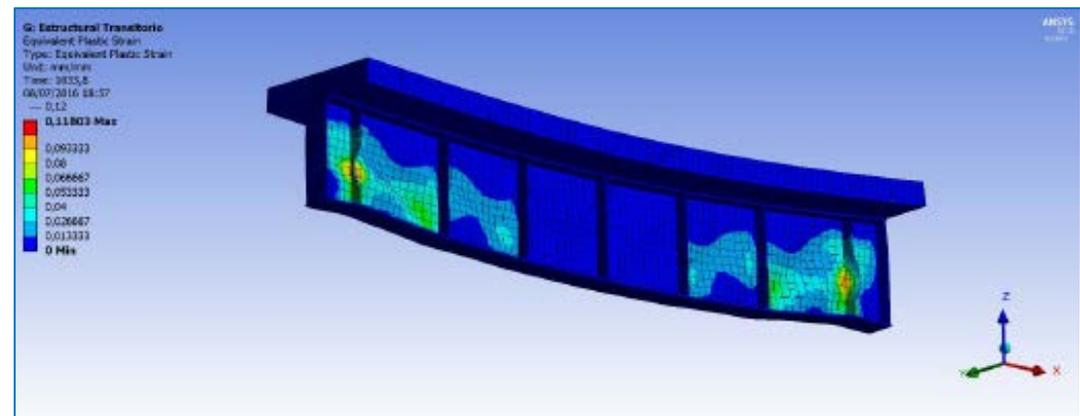


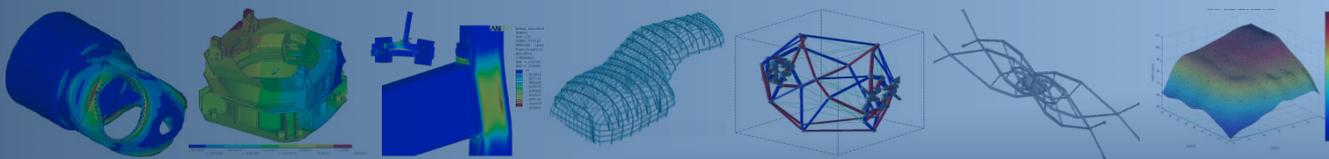
Estudios paramétricos. Influencia distancia rigidizadores (2)

- Modo de fallo para $a/D = 1,5$. La banda traccionada del alma queda “anclada” en la unión del rigidizador con el ala superior.



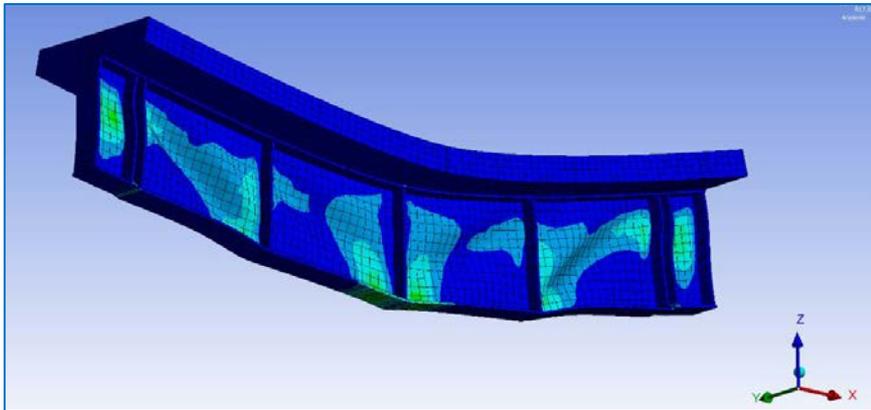
- Modo de fallo para $a/D=1,0$. El punto de “anclaje” se desplaza hacia la parte inferior de los rigidizadores reduciéndose la contribución del ala superior.



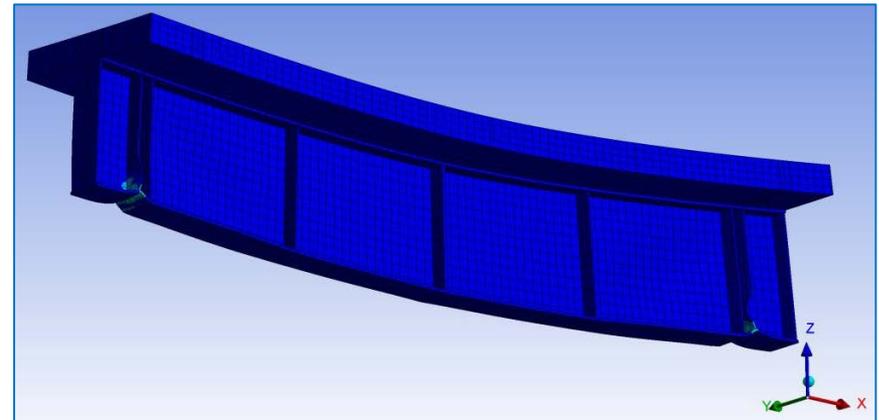


Modos de fallo

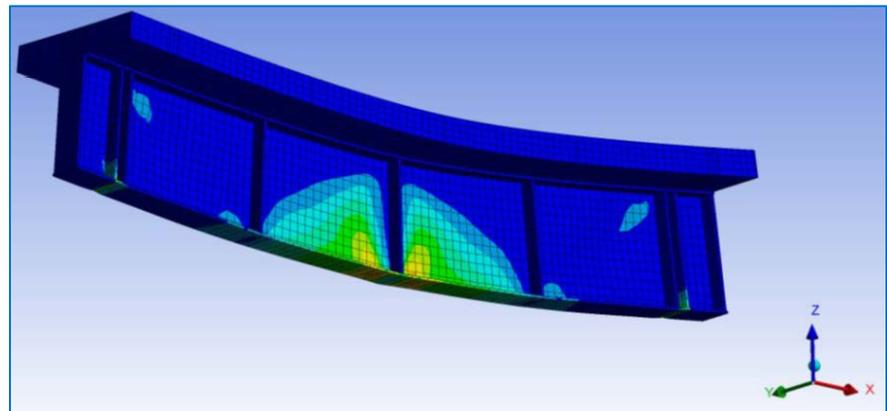
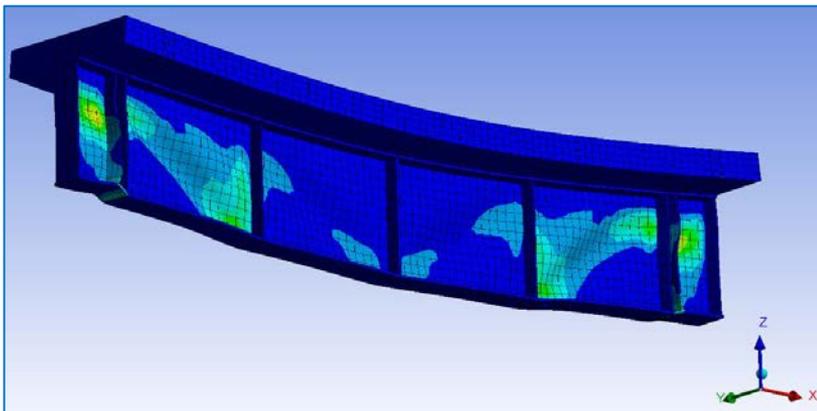
- Abolladura del alma:



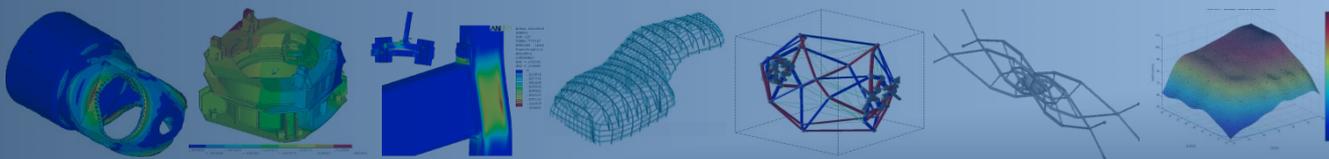
- Pandeo de los rigidizadores de los apoyos:



- Combinación de abolladura del alma y pandeo de los rigidizadores de los apoyos:

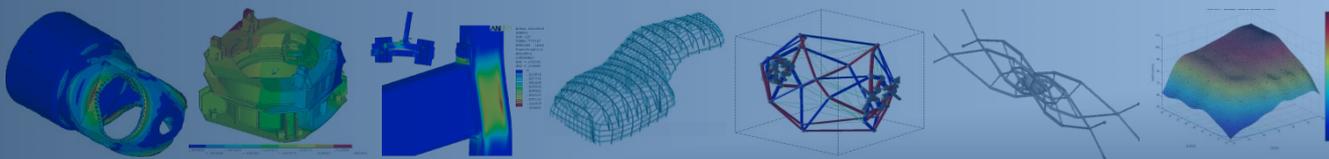


- Plastificación:



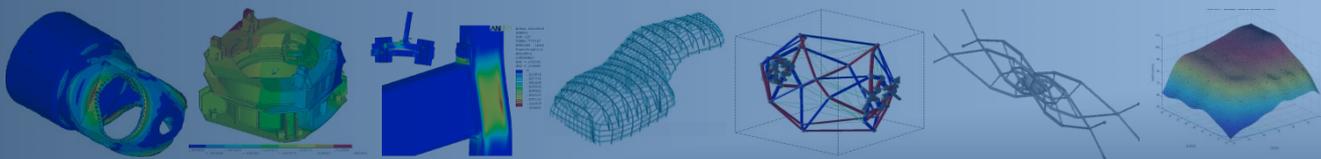
Conclusiones

- Los **parámetros** que recogen los **ECs** para el análisis térmico, en especial la **radiación**, resultan excesivamente **conservadores**. Ha sido necesario implementar el modelo de emisividad de Ghojel para obtener resultados similares a los del ensayo experimental.
- El **alma** es el elemento de la viga **más sensible** a las modificaciones de los **parámetros del problema térmico**.
- El modelo de elementos finitos propuesto proporciona **resultados del lado de la seguridad** respecto al ensayo. Esto es debido a la mayor temperatura (sobre todo del alma) que se obtiene en el problema térmico.
- El modelo propuesto representa adecuadamente el modo de fallo de la viga ensayada, combinación de plastificación y abolladura del alma.



Trabajos futuros

- Realizar un estudio paramétrico más amplio que permita observar un mayor número de respuestas y modos de fallo en vigas mixtas frente al fuego.
- Modelar la unión acero-hormigón, de forma más realista, incluyendo los conectores.
- Comparar los resultados de los estudios paramétricos proporcionados por el modelo con los deducidos de la normativa vigente.



Gracias por su atención
Obrigado pela atenção
Thanks for your attention