

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**ESTUDIO DE LA RESISTENCIA RESIDUAL DE
TABLEROS DE PUENTE DE SECCIÓN MIXTA
SOMETIDOS A FUEGO.
APLICACIÓN AL PUENTE EXPERIMENTAL
CONSTRUIDO EN EL CAMPUS DE VERA DE LA
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA.**

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

CURSO 2016/2017

ETSICCP - UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

Valencia, septiembre de 2017

Autor: ZHENG LU, JIA WEI

Tutor: PAYÁ ZAFORTEZA, IGNACIO JAVIER

Cotutor: ALOS MOYA, JOSE

ÍNDICE

RESUMEN	1
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	5
1.1. Puente real	6
CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE	9
2.1. Normativa	9
2.1.1. UNE-EN 1991-1-2:2004. Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Parte 1-2: Acciones generales. Acciones en estructuras expuestas al fuego [5].	9
2.1.2. UNE-EN 1993-1-2:2011. Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero. Parte 1-2: Reglas generales. Proyecto de estructuras sometidas a fuego [6].	9
2.1.3. UNE-EN 1994-1-2:2011. Eurocódigo 4: Proyecto de estructuras mixtas de acero y hormigón. Parte 1-2: Reglas generales. Proyecto de estructuras sometidas a fuego [7].	10
2.1.4. UNE-EN 1992-1-2:2011. Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-2: Reglas generales. Proyecto de estructuras sometidas a fuego [8].	10
2.2. Documentación científica	11
2.2.1. Fire Hazard in bridges: Review, assessment and repair strategies [1].	11
2.2.2. Valencia bridge fire tests: Experimental study of a composite bridge under fire [3].	11
2.2.3. Validation fire tests on using adiabatic surface temperature for predicting heat transfer [9].	11
2.2.4. Analysis of a bridge failure due to fire using computational fluid dynamics and finite element models [10].	12
2.2.5. Structural Design for Fire Safety [11].	13
2.2.6. A Heat Transfer Textbook [12].	13
2.2.7. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering [13].	14
2.2.8. FDS User's Guide [14].	14
CAPÍTULO 3: OBJETIVOS	17
CAPÍTULO 4: HIPÓTESIS	19
4.1. Hipótesis adoptadas para los materiales empleados en la estructura	19
4.1.1. Densidad	19
4.1.2. Ecuaciones constitutivas	20
4.1.2.1. Módulo de Young o de elasticidad	22
4.1.3. Calor específico	24
4.1.4. Conductividad	25
4.1.5. Emisividad	26
4.2. Hipótesis adoptadas para las características del fuego	27
4.2.1. Material combustible empleado	27
4.2.2. Geometría y posición del burner o quemador	27
4.2.3. Potencia de fuego	28

CAPÍTULO 5: MODELOS NUMÉRICOS.....	29
5.1. Modelo de simulación de incendios.....	30
5.1.1. Definición del modelo	30
5.1.1.1. Datos de partida.....	30
5.1.1.2. Aproximaciones y convenios adoptados.....	30
5.2. Base de datos de modelos de simulación de incendio empleados	32
5.3. Modelo 01: Análisis de sensibilidad frente al mallado	33
5.4. Modelo 02: Análisis del volumen de control.....	39
5.5. Modelo 03: Análisis de sensibilidad frente a la presencia de armado en la losa	43
5.6. Modelo 04: Análisis de influencia de presencia de alas inferiores de vigas	44
5.7. Modelo 05: Análisis de influencia de la posición del quemador.....	46
CAPÍTULO 6: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	49
6.1. Modelo 01: Análisis de sensibilidad frente al mallado	49
6.2. Modelo 02: Análisis del volumen de control.....	60
6.3. Modelo 03: Análisis de sensibilidad frente a la presencia de armado en la losa	64
6.4. Modelo 04: Análisis de influencia de presencia de alas inferiores de vigas	68
6.5. Modelo 05: Análisis de influencia de la posición del quemador.....	72
CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y POSIBLES FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	77
CAPÍTULO 8: REFERENCIAS	79
CAPÍTULO 9: ANEXOS	81
9.1. Anexo A: Recomendaciones de tamaño de celda por el NIST.....	81
9.2. Anexo B: Propiedades de los materiales.....	82
9.2.1. Densidad	82
9.2.2. Calor específico	83
9.2.3. Conductividad	87
9.3. Anexo C: Situación crítica de la estructura en base a la temperatura crítica	90
9.3.1. Temperatura crítica de la estructura según Eurocódigo-3, parte 1-2 [6].....	90
9.3.2. Tiempo de exposición de la estructura según Eurocódigo-4, parte 1-2 [7].	91

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

FIG. 1. PUENTE DAÑADO POR INCENDIO DE UN TANQUE CISTERNA. FUENTE: [2].	5
FIG. 2. FOTOGRAFÍA DE LA ESTRUCTURA REAL. FUENTE:[3].	6
FIG. 3. ESQUEMA GENERAL DE LA ESTRUCTURA A ANALIZAR. FUENTE: [3].	7
FIG. 4. DIMENSIONES DEL PERFIL IPE-160. FUENTE: CATÁLOGO DE ARCELOR MITTAL [4].	7
FIG. 5. ESQUEMA DE DISEÑO DE LA PLACA-TERMÓMETRO. FUENTE: [9].	12
FIG. 6. PUENTE ANALIZADO EN LA PUBLICACIÓN [10]. FUENTE: [10].	12
FIG. 7. PORTADA DEL LIBRO SFPE HANDBOOK OF FIRE PROTECTION ENGINEERING. FUENTE: [13].	14
FIG. 8. CÁLCULO DE LA DENSIDAD DEL HORMIGÓN EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA.	19
FIG. 9. RELACIÓN TENSIÓN-DEFORMACIÓN EN ACERO ESTRUCTURAL. COMPARATIVA 20°C VS 600°C.	20
FIG. 10. EXPRESIONES PARA LA DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN TENSIÓN-DEFORMACIÓN EN EL ACERO ESTRUCTURAL EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA. FUENTE: EUROCÓDIGO-3, PARTE 1-2 [6].	20
FIG. 11. RELACIÓN TENSIÓN-DEFORMACIÓN EN ACERO PARA ARMADURAS PASIVAS. COMPARATIVA 20°C VS 600°C.	21
FIG. 12. RELACIÓN DE REDUCCIÓN DE LA RESISTENCIA CARACTERÍSTICA A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN ARMADO SEGÚN LA TEMPERATURA. FUENTE: EUROCÓDIGO-2, PARTE 1-2 [8].	21
FIG. 13. EXPRESIONES PARA LA DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN TENSIÓN-DEFORMACIÓN EN EL HORMIGÓN ARMADO EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA. FUENTE: EUROCÓDIGO-2, PARTE 1-2 [8].	22
FIG. 14. RELACIÓN TENSIÓN-DEFORMACIÓN EN HORMIGÓN ARMADO. COMPARATIVA 20°C VS 600°C.	22
FIG. 15. COEFICIENTES DE PROPORCIONALIDAD PARA EL MÓDULO DE YOUNG DE ACEROS ESTRUCTURALES EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA. FUENTE: EUROCÓDIGO-3, PARTE 1-2 [6].	23
FIG. 16. COEFICIENTES DE PROPORCIONALIDAD PARA EL MÓDULO DE YOUNG DE ACEROS PARA ARMADURAS PASIVAS EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA. FUENTE: EUROCÓDIGO-2, PARTE 1-2 [8].	23
FIG. 17. VALOR DEL CALOR ESPECÍFICO EN EL ACERO ESTRUCTURAL RESPECTO A LA TEMPERATURA. FUENTE: EUROCÓDIGO-3, PARTE 1-2 [6].	24
FIG. 18. VALOR DEL CALOR ESPECÍFICO EN EL HORMIGÓN RESPECTO A LA TEMPERATURA. FUENTE: EUROCÓDIGO-2, PARTE 1-2 [8].	25
FIG. 19. VALOR DE LA CONDUCTIVIDAD EN EL ACERO ESTRUCTURAL RESPECTO A LA TEMPERATURA. FUENTE: EUROCÓDIGO-3, PARTE 1-2 [6].	25
FIG. 20. VALOR DE LA CONDUCTIVIDAD EN EL HORMIGÓN RESPECTO A LA TEMPERATURA. FUENTE: EUROCÓDIGO-2, PARTE 1-2 [8].	26
FIG. 21. ESQUEMA DE FLUJO DE TRABAJO PARA EL ESTUDIO DE LA RESPUESTA TÉRMICA DEL TABLERO.	29
FIG. 22. ESQUEMA Y DETALLES DE LA DISTRIBUCIÓN DE TERMOPARES ALREDEDOR DEL TABLERO.	34
FIG. 23. SELECCIÓN DE TERMOPARES PARA LA COMPARATIVA DE MALLADOS.	34
FIG. 24. VISTAS EN ALZADO Y PERFIL DEL MODELO DE CELDAS DE 20 CM.	35
FIG. 25. VISTAS EN ALZADO Y PERFIL DEL MODELO DE MALLADO L.	35

FIG. 26. VISTAS EN ALZADO Y PERFIL DEL MODELO DE MALLADO M.	36
FIG. 27. VISTAS EN ALZADO Y PERFIL DEL MODELO DE MALLADO S.	36
FIG. 28. REDUCCIÓN DEL VOLUMEN DE ESTUDIO EN EL MALLADO XS.	37
FIG. 29. VISTAS EN ALZADO Y PERFIL DEL MODELO DE MALLADO XS.	37
FIG. 30. SLICES DE TEMPERATURA EN LAS ALINEACIONES X=CL E Y=1 DEL MODELO.	39
FIG. 31. SLICE DE TEMPERATURA EN Y=1. ZONA SUPERIOR, POR ENCIMA DE LA COTA Z=1.15 M.	40
FIG. 32. SLICE DE TEMPERATURA EN X=CL. ZONA SUPERIOR, POR ENCIMA DE LA COTA Z=1.15 M.	40
FIG. 33. SLICE DE TEMPERATURA EN Y=1. ZONA INFERIOR, POR DEBAJO DE LA COTA Z=1.15 M.	40
FIG. 34. SLICE DE TEMPERATURA EN X=CL. ZONA INFERIOR, POR DEBAJO DE LA COTA Z=1.15M.	40
FIG. 35. MODELO DE VOLUMEN REDUCIDO. VISTAS EN PERSPECTIVA, ALZADO Y PERFIL.	41
FIG. 36. SELECCIÓN DE TERMOPARES PARA EL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD FRENTE AL ARMADO.	43
FIG. 37. VISTA EN SMOKEVIEW DE LA SECCIÓN DEL TABLERO. MODELO FDS_03.PSM.	44
FIG. 38. VISUALIZACIÓN 2D EN PYROSIM FRENTE A PERSPECTIVA EN SMOKEVIEW. ADAPTACIÓN DE ALAS INFERIORES AL MALLADO.	44
FIG. 39. VISUALIZACIÓN 2D EN PYROSIM DE MODELO CON ALAS DE DIMENSIONES REALES.	45
FIG. 40. POSICIÓN DE LA ALINEACIÓN DE SENSORES EMPLEADOS.	45
FIG. 41. DISTRIBUCIÓN DE SENSORES PARA LA MEDICIÓN DE AST Y TEMPERATURAS DE SÓLIDOS.	46
FIG. 42. DISTRIBUCIÓN DE SENSORES EN VIGAS.	47
FIG. 43. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE TEMPERATURAS DE SENSORES SELECCIONADOS. COMPARATIVA DE MODELOS.	51
FIG. 44. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE TEMPERATURAS POR MODELOS Y SECCIONES. MEDICIÓN DE DISPERSIÓN SECCIONAL.	54
FIG. 45. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA POTENCIA DE FUEGO OBSERVADA EN CADA MODELO.	55
FIG. 46. VISUALIZACIÓN EN SMOKEVIEW. DESAJUSTE DE GEOMETRÍA Y PÉRDIDA DE ELEMENTOS.	58
FIG. 47. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS TEMPERATURAS DE LOS MODELOS. COMPARATIVA DE REDUCCIÓN DE VOLUMEN DE CONTROL.	62
FIG. 48. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS TEMPERATURAS EN SENSORES SELECCIONADOS. INFLUENCIA DE ARMADURAS.	66
FIG. 49. SLICE DE TEMPERATURAS EN Y=1.	66
FIG. 50. SLICE DE TEMPERATURAS EN X=CL.	66
FIG. 51. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE TEMPERATURAS. ESTUDIO DE INFLUENCIA DE ALAS INFERIORES.	70
FIG. 52. DISTRIBUCIÓN ESQUEMÁTICA DE LOS SENSORES EMPLEADOS. VISTA EN PLANTA INFERIOR.	72
FIG. 53. DISTRIBUCIONES DE TENSIONES PLÁSTICAS EN SECCIONES MIXTAS. FUENTE: EUROCÓDIGO-4, PARTE 1- 1 [19].	91

TABLA 1. PROPIEDADES CALORÍFICAS DE LA GASOLINA. COMPARATIVA DE DIVERSAS FUENTES.....	27
TABLA 2. POTENCIAS DE FUEGO PARA EL QUEMADOR DISPONIBLE.....	28
TABLA 3. SISTEMA DE UNIDADES EMPLEADO PARA LOS MODELOS DE INCENDIO.....	30
TABLA 4. COMPOSICIÓN POR CAPAS DE LA LOSA EN PYROSIM.....	31
TABLA 5. BASE DE DATOS DE MODELOS DE SIMULACIÓN DE INCENDIO.....	32
TABLA 6. DISTRIBUCIÓN Y TAMAÑO DE CELDAS DE MODELO DE CELDAS DE 20 CM.....	34
TABLA 7. DISTRIBUCIÓN Y TAMAÑO DE CELDAS DE MODELO DE MALLADO L.....	35
TABLA 8. DISTRIBUCIÓN Y TAMAÑO DE CELDAS DE MODELO DE MALLADO M.....	35
TABLA 9. DISTRIBUCIÓN Y TAMAÑO DE CELDAS DE MODELO DE MALLADO S.....	36
TABLA 10. DISTRIBUCIÓN Y TAMAÑO DE CELDAS DE MODELO DE MALLADO XS.....	36
TABLA 11. DISPOSICIÓN Y DIMENSIONES DE CELDA DEL MODELO DE VOLUMEN REDUCIDO.....	41
TABLA 12. VALORES PROMEDIOS DE LA POTENCIA DE FUEGO.....	55
TABLA 13. VALORES PROMEDIOS Y VARIACIÓN MEDIDA EN LA COMPARATIVA DE MODELOS DE MALLADO.....	56
TABLA 14. VALORES PROMEDIOS Y VARIACIÓN EN SECCIÓN CL.....	57
TABLA 15. VALORES PROMEDIOS Y VARIACIÓN EN SECCIÓN XS.....	57
TABLA 16. VALORES PROMEDIOS Y VARIACIÓN MEDIDA DE LOS MODELOS COMPARADOS DE VOLUMEN DE CONTROL.....	62
TABLA 17. DIFERENCIAS PROMEDIAS EN SENSORES ANTE PRESENCIA DE ARMADO.....	67
TABLA 18. VALORES PROMEDIOS Y DIFERENCIAS EN LA INFLUENCIA DE ALAS INFERIORES.....	71
TABLA 19. FLUJOS DE CALOR PARA LA LOSA SEGÚN CADA ESCENARIO.....	72
TABLA 20. FLUJOS DE CALOR PARA EL ALA INFERIOR DE LA VIGA SUR SEGÚN ESCENARIO.....	73
TABLA 21. FLUJOS DE CALOR PARA EL ALA INFERIOR DE LA VIGA NORTE SEGÚN ESCENARIO.....	73
TABLA 22. FLUJO DE CALOR SOBRE ALMA DE VIGA SUR SEGÚN ESCENARIO.....	74
TABLA 23. FLUJO DE CALOR SOBRE ALMA DE VIGA NORTE SEGÚN ESCENARIO.....	74
TABLA 24. CÁLCULO DEL DIÁMETRO CARACTERÍSTICO DEL FUEGO Y TAMAÑO DE CELDA RECOMENDABLE.....	81
TABLA 25. VARIACIÓN DE LA DENSIDAD DEL HORMIGÓN ARMADO EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA.....	82
TABLA 26. VARIACIÓN DEL CALOR ESPECÍFICO DEL ACERO ESTRUCTURAL EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA.....	83
TABLA 27. VARIACIÓN DEL CALOR ESPECÍFICO DEL HORMIGÓN (0% DE HUMEDAD) EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA.....	84
TABLA 28. VARIACIÓN DEL CALOR ESPECÍFICO DEL HORMIGÓN (1.5% DE HUMEDAD) EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA.....	85
TABLA 29. VARIACIÓN DEL CALOR ESPECÍFICO DEL HORMIGÓN (3% DE HUMEDAD) EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA.....	86
TABLA 30. VARIACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD DEL ACERO ESTRUCTURAL EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA.....	87
TABLA 31. VARIACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD DEL HORMIGÓN EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA.....	89
TABLA 32. CÁLCULO DEL TIEMPO DE EXPOSICIÓN PARA QUEMADOR GRANDE.....	92
TABLA 33. CÁLCULO DEL TIEMPO DE EXPOSICIÓN PARA EL QUEMADOR PEQUEÑO.....	92

GLOSARIO DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

<i>AST</i>	<i>Adiabatic Surface Temperature / Superficie de temperatura adiabática</i>	<i>°C</i>
<i>E</i>	<i>Energía total desprendida por un material combustible</i>	<i>J</i>
<i>E</i>	<i>Módulo de Young o de elasticidad</i>	<i>MPa</i>
<i>E_c</i>	<i>Módulo de elasticidad del hormigón armado a temperatura ambiente</i>	<i>MPa</i>
<i>E_{c,θ}</i>	<i>Módulo de elasticidad del hormigón a la temperatura θ</i>	<i>MPa</i>
<i>E_s</i>	<i>Módulo de elasticidad del acero estructural / acero para armaduras pasivas a temperatura ambiente</i>	<i>MPa</i>
<i>E_{s,θ}</i>	<i>Módulo de elasticidad del acero estructural / acero para armaduras pasivas a la temperatura θ</i>	<i>MPa</i>
<i>HRR</i>	<i>Heat Release Rate o potencia del fuego</i>	<i>W</i>
<i>HRRPUA</i>	<i>Heat Release Rate Per Unit Area o potencia del fuego por unidad de área</i>	<i>W/m²</i>
<i>S</i>	<i>Superficie o área considerada</i>	<i>m²</i>
<i>c_a</i>	<i>Calor específico del acero estructural / acero para armaduras</i>	<i>J/(kg · K)</i>
<i>c_c</i>	<i>Calor específico del hormigón armado</i>	<i>J/(kg · K)</i>
<i>f_{ck}</i>	<i>Resistencia característica del hormigón</i>	<i>MPa</i>
<i>f_{cd}</i>	<i>Resistencia de cálculo del hormigón a compresión</i>	<i>MPa</i>
<i>f_{cm}</i>	<i>Resistencia media a compresión del hormigón</i>	<i>MPa</i>
<i>f_{yk}</i>	<i>Resistencia característica del acero estructural / acero para armaduras pasivas</i>	<i>MPa</i>
<i>f_{yd}</i>	<i>Límite elástico de cálculo del acero estructural / acero para armaduras pasivas</i>	<i>MPa</i>
<i>f_{uk}</i>	<i>Resistencia última característica del acero estructural / acero para armaduras pasivas</i>	<i>MPa</i>
<i>m</i>	<i>Masa</i>	<i>kg</i>
<i>m_∞</i>	<i>Ratio de pérdida de masa por unidad de superficie</i>	<i>kg/m²/s</i>
<i>t</i>	<i>Tiempo empleado o considerado</i>	<i>s</i>

γ_c	<i>Coficiente parcial de seguridad del hormigón</i>	
γ_s	<i>Coficiente parcial de seguridad del acero estructural / acero para armadura pasiva</i>	
Δh_c	<i>Calor de combustión</i>	<i>J/kg</i>
θ	<i>Temperatura</i>	<i>°C</i>
$\theta_{a,cr}$	<i>Temperatura crítica en el acero</i>	<i>°C</i>
λ_a	<i>Conductividad térmica del acero estructural / acero para armaduras</i>	<i>W/(K · m)</i>
λ_c	<i>Conductividad térmica del hormigón armado</i>	<i>W/(K · m)</i>
ρ_a	<i>Densidad del acero estructural / acero para armaduras pasivas</i>	<i>kg/m³</i>
ρ_c	<i>Densidad del hormigón armado</i>	<i>kg/m³</i>
σ	<i>Constante de Stefan-Boltzmann</i>	<i>W/m² · K⁴</i>

RESUMEN

El presente Trabajo Fin de Máster se centra en el estudio de la resistencia de un elemento estructural experimental desarrollado en el Campus de la Universitat Politècnica de València frente a eventos de incendio. Este elemento se asemeja a un tablero mixto de puente, compuesto por dos vigas de acero IPE-160 y una losa de hormigón armado.

El interés del estudio de esta temática se basa en numerosos casos de accidentes que incluyen incendios en obras de paso. La falta de conocimientos y de procedimientos de evaluación y rehabilitación en este campo conduce en muchos casos a la demolición de los mismos.

Es por ello, que se pretende elaborar un modelo de simulación de incendios (basado en la geometría del elemento de estudio) para evaluar sobre él los efectos y consecuencias que puede generar un fuego. Sobre ese modelo se estudiará la sensibilidad frente a diferentes parámetros que caracterizan un fuego como puede ser el HRR y la localización del mismo. Se pretende aplicar el método de la temperatura crítica, contemplado en la normativa vigente con el fin establecer el escenario de fuego necesario para producir el colapso de la estructura.

De forma intrínseca al modelo numérico, se evalúan los efectos que tienen los diferentes parámetros de configuración del modelo. El fin a conseguir en este caso es que el modelo represente la realidad de una forma razonadamente aproximada.

Palabras clave: Temperatura crítica, resistencia frente a fuego, incendio en puentes, potencia de fuego, CFD, modelo de simulación de incendios, modelo numérico.

ABSTRACT

The present document is a study about the fire resistance of an experimental structural element made in the campus of the Polytechnic University of Valencia. This structural element tries to resemble a composite bridge deck in a minor scale. It is composed by two IPE-160 steel beams and a reinforced concrete slab.

The main interest of researching about this specific topic takes its basis on the large number of accidents in bridges where fire is directly involved. The lack of knowledge about procedures of assessment and repair in those cases leads in many of them to a demolition of the structure.

Therefore, the present work aims to create a fire simulation model with the given element dimensions to assess the effects and the consequences of a bridge fire. It will be analysed the sensitivity of the numerical model against heat release rate and the location of the fire focus. The critical temperature method will be applied, as the current regulations contemplate. The fire scenario that produces the structure collapse will be determined.

Strongly related to the numerical model, the effects of different model settings will be assessed. The main goal is to obtain a numerical model that reproduces the phenomena with acceptable approach.

Keywords: Critic temperature, bridge fires, heat release rate, CFD, fire simulation model, numerical model, fire resistance.

RESUM

El Treball Final de Màster es centra en l'estudi de la resistència d'un element estructural experimental desenvolupat en el Campus de la Universitat Politècnica de València davant la exposició d'esdeveniments d'incendi. Aquest element s'assembla a un tauler mixt de pont, compost per dos bigues d'acer IPE-160 i una llosa de formigó armat.

L'interés de l'estudi d'aquesta temàtica es basa en la gran quantitat d'accidents que inclouen incendis en obres de pas. La falta de coneixements i de procediments d'avaluació i rehabilitació en aquest camp condueix en molts casos a la demolició dels mateixos.

Es per això, que es pretén elaborar un model de simulació d'incendis (basat en la geometria de l'element d'estudi) per a avaluar els efectes i conseqüències que pot generar una situació de foc. Sobre aquest model s'estudiarà la sensibilitat en funció de diferents paràmetres que caracteritzen un foc com pot ser el HRR i la localització del mateix. Es pretén aplicar el mètode de la temperatura crítica, previst en la normativa vigent amb la finalitat d'establir l'escenari de foc necessari per a produir el col·lapse de l'estructura.

De forma intrínseca al model numèric, s'avaluen els efectes que tenen els diferents paràmetres de configuració del model. El objectiu es aconseguir que el model represente la realitat d'una forma raonadament aproximada.

Paraules clau: Temperatura crítica, resistència davant del foc, incendi en ponts, potència del foc, CFD, model de simulació d'incendis, model numèric.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

A lo largo de los siglos, el ser humano ha procurado avanzar en las diferentes ramas de la ciencia con el fin de obtener una serie de conocimientos que permitan comprender la naturaleza y los fenómenos que se producen en ella.

En el campo de la ingeniería, los conocimientos y el desarrollo tecnológico tienen el objetivo de suplir las necesidades de la sociedad sin renunciar a otros aspectos cada día más relevantes como la sostenibilidad y el cuidado del medioambiente. Por tanto, las diferentes ingenierías pretenden no sólo avanzar y desarrollar nuevos conocimientos, sino que también existe un deseo de revisar los conocimientos actuales y optimizar procesos, métodos y cálculos que se emplean habitualmente. En este sentido, la ingeniería civil tiene una gran repercusión en el entorno por la envergadura de las actuaciones que conllevan: proyecto y construcción de obras civiles y de edificación, planificación y gestión de aguas, planificación territorial y planeamiento urbanístico, entre otros.

Las estructuras que se diseñan y construyen cada día llevan tras de sí un conjunto de supuestas casuísticas de uso y afecciones en función del entorno en el que se localizan.

El presente Trabajo Fin de Máster, TFM, tiene relación con una de las afecciones que pueden producirse en las estructuras, provocando consecuencias nefastas a nivel económico e, incluso, social. Los incendios en puentes y sus consecuencias representan un campo del cual no se tiene un gran desarrollo tecnológico y específico aplicado. Existe una buena cantidad de casos de accidentalidad en puentes [1] con consecuencias no despreciables: desde daños materiales con cierres temporales del tráfico (Fig. 1) hasta colapsos totales con las consecuentes pérdidas económicas, directas e indirectas (afecciones a la red de transporte y conexión territorial).



Fig. 1. Puente dañado por incendio de un tanque cisterna. Fuente: [2].

Por tanto, la capacidad de actuación en estos casos depende directamente de la capacidad de análisis que se posee sobre la estructura y las características del fuego ocasionado. La posibilidad de concretar el nivel de seguridad que una estructura proporciona tras un evento accidental de incendio evitaría las consecuencias descritas.

Este análisis pretende conocer la resistencia que presenta un elemento estructural experimental (losa mixta) bajo unas condiciones de fuego definidas en los apartados desarrollados en este

documento. Para ello, el estudio se dividirá en partes diferenciadas. Por una parte, la creación de modelos numéricos con información recopilada de diversa bibliografía hará posible tener una estimación de los fenómenos a ocurrir y la magnitud de los mismos. Por otra parte, las pruebas realizadas en campo sobre el modelo real servirán para verificar y validar los modelos elaborados [3]. Partiendo de este proceso, será viable extraer unas conclusiones sobre los aspectos que se observen.

En este estudio se dará una especial importancia a los rangos de temperatura en los que la estructura podría considerarse en riesgo de colapso. Para ello, el estudio empleará la metodología de la temperatura crítica para los materiales que la componen y lo relacionarán con el comportamiento de dichos materiales.

El conocimiento por adquirir permitirá que en futuros eventos se puedan establecer criterios de actuación frente a una estructura dañada por fuego. Asimismo, futuras investigaciones podrían crear clasificaciones de riesgo en función de los daños y estudiar la resistencia remanente o post-incendio que ofrece la estructura de forma detallada.

El estudio a tratar en el presente documento se abordará mediante modelos numéricos. Si dichos modelos numéricos están bien elaborados y calibrados, deberían ser capaces de reproducir la realidad y con un grado de aproximación aceptable. Es decir, las comparaciones de resultados de modelos numéricos frente a pruebas experimentales arrojarían unas diferencias con poca importancia frente al resultado en sí mismo.

La utilización de modelos numéricos puede presentar las ventajas de un ahorro en realización de pruebas experimentales con sus correspondientes costes económicos y de tiempo. En ciertos casos, también permiten el aprovechamiento de los modelos numéricos para estudios relacionados con el objetivo inicial. Su aplicación en sucesos reales, permiten conocer las causas de esos sucesos, así como realizar acciones preventivas o de rehabilitación.

1.1. PUENTE REAL

El presente estudio se basa en una estructura real elaborada por el Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil. Sobre él se centrarán los modelos numéricos a elaborar.



Fig. 2. Fotografía de la estructura real. Fuente:[3].

La estructura de estudio pretende asemejarse a un tablero de puente mixto, compuesto por dos vigas IPE-160 y una losa de hormigón armado. Este conjunto se encuentra apoyado en sus extremos sobre estribos de hormigón, haciendo que la cota inferior del tablero se localice a +1.90 metros sobre una losa de nivelación. Dicha losa tiene un espesor de 0.10 metros y sobre su cara superior se establece el origen de cotas. ($z=0$)

Las vigas poseen una longitud de 6.20 metros, separadas 1 metro de distancia entre las directrices de las mismas.

La losa de hormigón tiene un espesor de 0.15 metros y unas dimensiones (en planta) de 6.24x2 metros. Su posición con respecto a las vigas es centrada, aportando simetría a la sección transversal y en el alzado.

En los extremos de las vigas, se disponen de neoprenos como aparatos de apoyo. Las dimensiones de estos elementos son 0.20x0.20x0.02 metros.

El esquema general de esta estructura se aprecia en la Fig. 3.

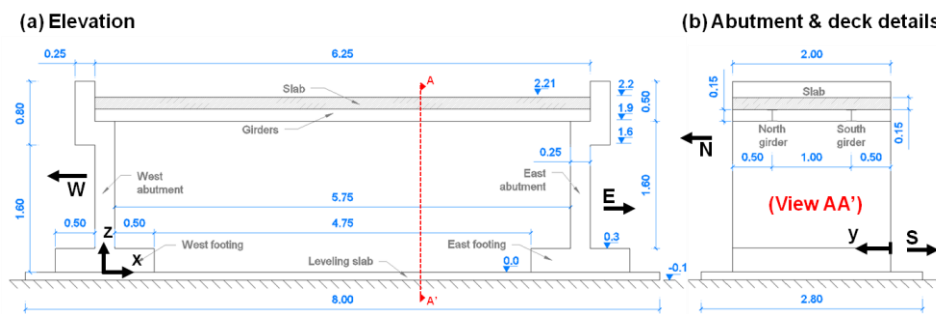
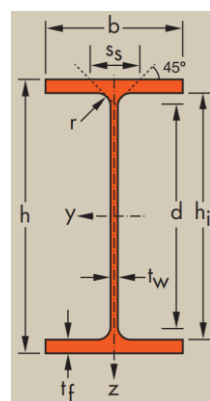


Fig. 3. Esquema general de la estructura a analizar. Fuente: [3].

En lo que respecta a la sección de la viga IPE-160, se trata de una geometría estandarizada, cuyas dimensiones se han consultado en el catálogo de Arcelor Mittal, tal y como indica la Fig. 4.



- $h = 160$
- $h_f = 127$
- $b = 82$
- $t_w = 5$
- $t_f = 7.4$
- $r = 9$

(Dimensiones en mm)

Fig. 4. Dimensiones del perfil IPE-160. Fuente: Catálogo de Arcelor Mittal [4].

El material que componen estas vigas corresponde a un acero estructural S-355, que se caracteriza por un límite elástico de 355 N/mm^2 .

La losa está realizada en hormigón armado estructural, HA-30, con una resistencia característica de 30 N/mm².

El armado de la losa se realiza en dos capas, superior e inferior. A su vez, cada capa dispone de la siguiente distribución de armado:

- 13 ϕ 8 en dirección longitudinal, con una longitud de 6.15 m.
- 41 ϕ 8 en dirección transversal, con una longitud de 1.95 m.

El recubrimiento nominal adoptado en cualquier caso es de 30 mm.

CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se tratará la revisión del estado del arte acorde a la temática que atañe al presente TFM: incendios en puentes.

La revisión del estado del arte se divide en 2 bloques diferenciados según el origen de la información. Se atiende, por una parte, a las normativas e instrucciones que rigen algunos aspectos de cálculo o parámetros relacionados con los incendios y los proyectos constructivos. Por otra parte, se ha realizado una búsqueda de publicaciones científicas centradas en temáticas de incendios, transferencia de calor y resistencia de las estructuras tras la aplicación de este tipo de cargas.

2.1. NORMATIVA

Por el contexto donde se desarrolla el presente trabajo (*Universitat Politècnica de València*), las normativas a revisar son aquellas que tienen vigencia o son aplicables en esta localización. En general, las normativas existentes ofrecen unas pautas relacionadas con:

- La caracterización de los materiales y su comportamiento
- Parametrización o tabulación de algunas variables como las acciones térmicas, curvas de tiempo-temperatura
- Cálculos básicos o simplificados de dichas acciones sobre estructuras

2.1.1. *UNE-EN 1991-1-2:2004. Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Parte 1-2: Acciones generales. Acciones en estructuras expuestas al fuego* [5].

Esta norma europea adaptada a la normativa española contiene los conceptos más específicos sobre fuego e incendios en relación con las estructuras. Contiene un glosario de términos y definiciones esenciales para situaciones de incendio, acciones térmicas y transferencia de calor.

En este documento se definen los conceptos que serán utilizados en otros Eurocódigos que se tratan más adelante. En este aspecto, resulta fundamental las curvas tiempo-temperatura. Asimismo, se discurre en aspectos físicos relacionados, como pueden ser: el tiempo equivalente de exposición, el factor de forma de los elementos, la carga de fuego, etc.

2.1.2. *UNE-EN 1993-1-2:2011. Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero. Parte 1-2: Reglas generales. Proyecto de estructuras sometidas a fuego* [6].

Esta norma europea recibe el rango de norma nacional. En él se describen los principios, requisitos y reglas para el dimensionamiento de estructuras realizadas en acero y sometidas a fuego.

Establece unos aspectos de seguridad, de modo que las estructuras sean lo suficientemente resistentes durante un incendio, permitiendo la evacuación de los ocupantes y limitando los daños que se puedan generar en la estructura y en otras estructuras colindantes. Consecuentemente, provee de unos procedimientos de cálculo basado en enfoques prescriptivos y basado en prestaciones. Además,

se ofrecen ciertas ayudas al dimensionamiento al proveer de algunos datos tabulados o modelos de cálculo simplificados.

En esta norma pueden encontrarse algunos parámetros del acero estructural. Entre ellos destacan las diferentes ecuaciones constitutivas del material en función de la temperatura, la variación del calor específico y de la conductividad térmica.

A pesar de denominarse como reglas generales, buena parte de los aspectos que se tratan tienen un enfoque notable hacia las estructuras de edificación.

2.1.3. UNE-EN 1994-1-2:2011. Eurocódigo 4: Proyecto de estructuras mixtas de acero y hormigón. Parte 1-2: Reglas generales. Proyecto de estructuras sometidas a fuego [7].

Esta norma europea también queda adaptada como norma nacional. Como su propio título indica, se centra en todos aquellos aspectos relativos a fuego en estructuras mixtas. Nuevamente, el contenido que se presenta tiene un carácter general (bases de proyecto, propiedades de los materiales) o posee un enfoque más relacionado con los proyectos de estructuras de edificación.

Adicionalmente, en este documento se pueden obtener algunos parámetros como puede ser la variación de la ecuación constitutiva del hormigón. También facilita cálculos resistentes de elementos mixtos, teniendo en consideración la interacción entre ambos materiales y las condiciones de temperatura presentes. Así pues, aparecen unos procedimientos de cálculo y detalles constructivos acerca de pilares y vigas mixtas.

2.1.4. UNE-EN 1992-1-2:2011. Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-2: Reglas generales. Proyecto de estructuras sometidas a fuego [8].

De forma similar a los apartados 2.1.2 y 2.1.3, esta norma expone los aspectos de diseño y detalles constructivos de estructuras realizadas en hormigón, ya sea armado o pretensado. Este documento establece con mayor detalle el comportamiento del acero que compone las armaduras pasivas y activas. También hace mayor énfasis en el comportamiento del hormigón frente a incendios, relacionando con parámetros como la composición de los áridos, el nivel de humedad del hormigón o el tipo de sollicitación (compresión o tracción).

Al igual que sus homónimos de estructuras de acero o mixtas, ofrece una serie de datos tabulados y métodos simplificados de cálculo para el diseño de estructuras con este material.

2.2. DOCUMENTACIÓN CIENTÍFICA

De forma adicional a las normativas, pueden encontrarse una serie de documentos de base científica relacionados con la temática de este trabajo. La documentación que corresponde a esta parte se compone de publicaciones o artículos científicos realizadas por investigadores a nivel internacional y de bibliografía escrita por autores de reconocimiento internacional en el campo de la ingeniería del fuego en estructuras.

2.2.1. *Fire Hazard in bridges: Review, assessment and repair strategies* [1].

Esta publicación supone una de las principales justificaciones del presente trabajo. Los numerosos casos de incendio y las consecuencias que generan remarcan la necesidad de estudiar con más profundidad los incendios en puentes. La escasez de conocimientos específicos aplicables a este tipo de estructuras limita las posibles actuaciones que se puedan realizar tras el evento de incendio. A su vez, entorpecen el uso de la red de transportes afectada y, en muchos casos, conlleva un impacto económico importante sobre el sistema.

Por tanto, este artículo es un primer paso hacia la solución de un problema detectado dentro de las infraestructuras de transporte terrestre y, en particular, en las obras de paso. Aporta información detallada sobre los fenómenos producidos en las estructuras implicadas: localización, composición de la estructura, la forma en la que se generó el evento y el estudio realizado sobre el mismo. También expone algunas de los aspectos en los que futuras investigaciones deberían profundizar.

2.2.2. *Valencia bridge fire tests: Experimental study of a composite bridge under fire* [3].

Este estudio experimental realizado en la UPV tiene una base similar a la del presente trabajo. La estructura descrita en el apartado 1.1, se somete a diferentes escenarios de fuego para evaluar el comportamiento de la estructura. Describe un procedimiento científico exhaustivo para la realización de ensayos de incendios sobre estructuras, en especial asemejadas a tableros de puente.

El artículo supone un punto de partida para la elaboración del presente estudio. Así como el contraste de los resultados que se obtendrán más adelante.

2.2.3. *Validation fire tests on using adiabatic surface temperature for predicting heat transfer* [9].

Los ensayos realizados en este artículo demuestran que es posible realizar una estimación muy precisa de las temperaturas que se transmiten a la viga mediante superficies de temperatura adiabáticas (*Adiabatic Surface Temperature, AST*). El estudio emplea una placa-termómetro para realizar las mediciones de las AST y, mediante un cálculo inverso, es capaz de determinar el campo de temperaturas del elemento de estudio. Dicha placa-termómetro, Fig. 5, fue diseñada por uno de los autores del estudio con el objetivo de obtener lecturas de temperaturas no afectadas por fenómenos de radiación y/o convección procedente de fuentes no deseadas.

A su vez, el artículo realiza un repaso general sobre conceptos básicos de transferencia de calor: radiación, convección, flujo de calor neto y el concepto de AST.

Los resultados obtenidos de las mediciones se comparan con cálculos precisos de transferencia de calor mediante modelos de dinámica computacional de fluidos y elementos finitos.

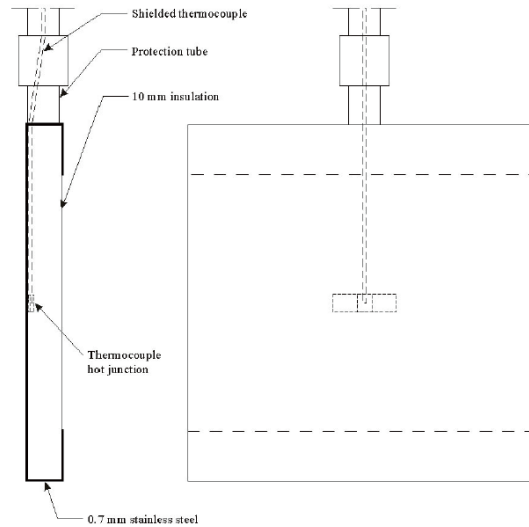


Fig. 5. Esquema de diseño de la placa-termómetro. Fuente: [9].

2.2.4. Analysis of a bridge failure due to fire using computational fluid dynamics and finite element models [10].

El estudio se centra en el análisis paramétrico del colapso de un puente real, localizado en Birmingham (Alabama, EE. UU.), por un incendio acontecido en enero de 2002. El accidente de un camión cisterna que transportaba hidrocarburos (gasolina) fue el origen del incendio.

El análisis de la estructura, un puente de 88.53 m dividido en varios vanos, conlleva la realización de modelos numéricos y el contraste de los mismos frente a datos tomados en campo. Por tanto, los modelos fueron realizados con datos del proyecto de la obra y mediante algunas hipótesis sobre los parámetros que caracterizan al fuego ocasionado. Dichas hipótesis pudieron basarse en contenido audiovisual recogido durante el incendio.



Fig. 6. Puente analizado en la publicación [10]. Fuente: [10].

Los modelos utilizados fueron ajustados mediante diversos análisis de sensibilidad, que afectaban a parámetros como el volumen de control o los tamaños de celda empleados. Así pues, se realizó un estudio paramétrico acerca de las cargas actuantes, la potencia del fuego y las condiciones de contorno. Se concluye que el establecimiento de ciertos valores para algunos de los parámetros intervinientes en el estudio resulta primordial para una correcta modelización de los fenómenos observados en la realidad.

Adicionalmente, se realizaron análisis de parámetros fuera del objetivo principal de la línea de investigación: la respuesta térmica de la estructura, la influencia de sobrecargas y el escenario de fuego empleado.

2.2.5. *Structural Design for Fire Safety* [11].

El texto de este documento hace una revisión de los conceptos básicos sobre fuegos e incendios, pero con una gran conexión con el diseño estructural. A pesar de que tiene un enfoque más centrado a estructuras de edificación (incendios en habitaciones), los conceptos básicos sirven de aplicación para incendios en entornos abiertos, al aire libre, como pueden ser los puentes.

Incluye una serie de ejemplos prácticos, así como datos tabulados de propiedades de los diferentes materiales combustibles. Estos han servido para contrastar los valores en otras referencias.

También resulta de interés los capítulos dedicados al diseño de estructuras en función del material: acero, hormigón, madera, entre otros.

2.2.6. *A Heat Transfer Textbook* [12].

Este libro describe el fenómeno de la transferencia de calor, desde sus conceptos más triviales, con la formulación matemática involucrada. Incluye breves ejemplos prácticos resueltos y una serie de problemas para la comprensión de las ideas expresadas en el texto.

Se revisan conceptos como la conservación de la energía (adaptada para la 1ª ley de la termodinámica), los modos de transferencia de calor y la transferencia de masa.

Se establecen 3 grandes capítulos que estudian en detalle los modos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación. En ellos, se plantean los conceptos teóricos con una carga matemática y física importante. En el caso de la conducción, se establece la resolución del fenómeno para casos unidimensionales y bidimensionales. En la convección, se estudia el fenómeno en función de las condiciones de flujo (laminar, turbulento o transitorio), así como su relación con la teoría de la capa límite y la convección forzada (en conducciones). Por último, el estudio del fenómeno de la radiación, que permite la transferencia de calor mediante ondas emitidas por un cuerpo que contiene energía. Introduce los factores que afectan a la radiación en función de la posición relativa de los cuerpos.

Estos conceptos describen la base física que atañe a la temática de estudio. Su dominio resultará fundamental para abordar la elaboración de modelos numéricos, así como su verificación.

2.2.7. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering [13].

El contenido de este documento es de enorme extensión, apreciable directamente por el volumen de páginas del mismo (3.512 páginas en formato electrónico).

Los conceptos que se estudian en este texto incluyen conceptos vistos en el documento del apartado 2.2.6 y 2.2.6, pero de una forma más variada y abarcando muchos otros aspectos físicos relacionados con la reología y las cualidades térmicas de los materiales.



Fig. 7. Portada del libro SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Fuente: [13].

Además, se tratan temas vistos anteriormente que hacen referencia a la combustión. En este libro se pueden encontrar las bases de la combustión, incidiendo en aspectos como las reacciones estequiométricas que tienen lugar y los calores de combustión que pueden producir diversos compuestos químicos (hidrocarburos, plásticos), materiales naturales (maderas) o incluso objetos cotidianos (mobiliario, electrodomésticos, productos domésticos, etc.). Por tanto, este documento resulta de gran utilidad al proporcionar una biblioteca de compuestos combustibles junto con sus propiedades térmico-químicas.

En otro de los capítulos, que se pueden encontrar en este texto, se hace revisión del análisis de estructuras sin un gran nivel de detalle. Seguidamente, se realiza un repaso del comportamiento de los materiales de construcción más comunes en función de la temperatura de exposición a la que se encuentran. Describe cómo pueden variar las características resistentes de dichos materiales al someterse a calor: cambios en la ecuación constitutiva, en el calor específico, en la conductividad, etc. Entre los materiales de construcción se puede encontrar: acero, hormigón (convencional, reforzado con fibras o de alta resistencia), ladrillos, madera, polímeros reforzados con fibras, yeso y otros aislantes.

La importancia de este documento se ve resaltada por los autores que participan en su redacción. Se trata de autores de gran reconocimiento en el campo de la ingeniería del fuego, como pueden ser *Babrauskas, Vytenis; Buchanan, Andy o Drysdale, Dougal*.

2.2.8. FDS User's Guide [14]

El manual de usuario de FDS es un documento útil para la iniciación en el programa en los casos en los que no se use una interfaz gráfica. A lo largo de este manual se listan los comandos disponibles para FDS, así como algunos comentarios sobre los mismos.

En el caso del uso de Pyrosim, el manual provee de información para entender las diferentes configuraciones disponibles en el programa. En particular, se ha consultado la salida de datos (*outputs*), uso de sensores y otros parámetros del programa. También aporta recomendaciones para el buen funcionamiento y optimización de los modelos elaborados (impedir la aparición de errores de ejecución, mejorar el tiempo computacional).

CAPÍTULO 3: OBJETIVOS

En este capítulo se definen los aspectos fundamentales que se tratarán en el estudio.

El objetivo principal consiste en evaluar la resistencia remanente de un puente tras un incendio. Se desea cuantificar la resistencia de un elemento experimental, losa mixta, al haber sido sometida a un incendio que genere unos daños de carácter permanente en la estructura. Para ello, se basará en los resultados obtenidos en cuanto a campo de temperaturas, relacionándolo con el comportamiento mecánico o estructural de los materiales que lo componen. En este aspecto, cobra gran relevancia la obtención de la temperatura crítica, θ_{cr} , para la sección de la viga de acero.

Sin embargo, este objetivo es acompañado por otra serie de objetivos secundarios e íntimamente relacionados con el objetivo principal.

Se analizará la sensibilidad de ciertos parámetros que afectan a la elaboración de los modelos de simulación de incendios y que influyen en la resistencia del elemento, pudiendo generar una mayor gravedad en las consecuencias tras el incendio. Entre ellos la posición del foco del fuego y la potencia del mismo.

Se valorará los resultados que proveen los modelos numéricos, así como su grado de aproximación al fenómeno real correspondiente mediante comparativas con cálculos simplificados recomendados por la normativa vigente.

CAPÍTULO 4: HIPÓTESIS

Los supuestos considerados para llevar a cabo el estudio se clasifican según la índole de los mismos. En este capítulo se expondrán las hipótesis consideradas en cada aspecto para la posterior creación de los modelos numéricos. Se dividirán en dos apartados bien diferenciados. Por un lado, se tratarán los materiales y sus propiedades. Por otro, aquellos aspectos que caracterizan un fuego.

4.1. HIPÓTESIS ADOPTADAS PARA LOS MATERIALES EMPLEADOS EN LA ESTRUCTURA

Los materiales que componen el elemento estructural son básicamente 3: acero estructural, S-355; hormigón armado, HA-30, y barras de acero corrugado, B-500S. Para los materiales mencionados, se han adoptado unos criterios de caracterización que se definirán en este apartado. Puesto que los materiales se verán afectados por acciones térmicas, determinados parámetros varían en función de la temperatura a la que someten. Algunos de estos parámetros son: la ecuación constitutiva (relación tensión-deformación), el calor específico y la conductividad.

Para estos parámetros, se ha considerado las pautas que marcan las normativas europeas, es decir, los Eurocódigos. A continuación, se tratarán cada uno de los parámetros considerados y se revisarán los supuestos adoptados.

4.1.1. Densidad

La variación de la densidad con respecto a la temperatura se tiene en cuenta únicamente en el hormigón, en el que el Eurocódigo-2, parte 1-2 [8], apartado 3.2.2 fija una serie de expresiones para el cálculo del mismo. Estas expresiones se recogen en la Fig. 8 y dependen de la densidad del hormigón a temperatura ambiente, cuyo valor se considera de 2300 kg/m³.

$$\begin{aligned} \rho(\theta) &= \rho(20\text{ }^{\circ}\text{C}) && \text{para } 20\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 115\text{ }^{\circ}\text{C} \\ \rho(\theta) &= \rho(20\text{ }^{\circ}\text{C}) \cdot (1 - 0,02(\theta - 115)/85) && \text{para } 115\text{ }^{\circ}\text{C} < \theta \leq 200\text{ }^{\circ}\text{C} \\ \rho(\theta) &= \rho(20\text{ }^{\circ}\text{C}) \cdot (0,98 - 0,03(\theta - 200)/200) && \text{para } 200\text{ }^{\circ}\text{C} < \theta \leq 400\text{ }^{\circ}\text{C} \\ \rho(\theta) &= \rho(20\text{ }^{\circ}\text{C}) \cdot (0,95 - 0,07(\theta - 400)/800) && \text{para } 400\text{ }^{\circ}\text{C} < \theta \leq 1\ 200\text{ }^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

Fig. 8. Cálculo de la densidad del hormigón en función de la temperatura.

Por otra parte, el Eurocódigo-3, parte 1-2 [6], expresa que la variación de densidad del acero estructural es inapreciable con respecto a la temperatura. Por tanto, se considera constante y con un valor de 7850 kg/m³.

Puesto que no se ha mencionado en ninguna de las normativas la variación de la densidad del acero para armaduras pasivas, se considerará el mismo valor que para acero estructural.

4.1.2. Ecuaciones constitutivas.

Las curvas que relacionan la tensión con la deformación de cada material se ven modificadas con la variación de la temperatura a la cual se exponen. Por lo general, los materiales presentan una reducción de dicha tensión cuando se someten a temperaturas elevadas. Se han modificado los materiales de la siguiente forma:

- Acero estructural, S-355. Caracterizado según el Eurocódigo-3, parte 1-2 [6], apartado 3.2.1. La norma presenta una serie de expresiones que modifican la curva inicial del material, Fig. 10. En la Fig. 9, se aprecia una comparación entre el comportamiento de (a) un acero estructural sometido a 20°C frente a (b) otro a 600°C.

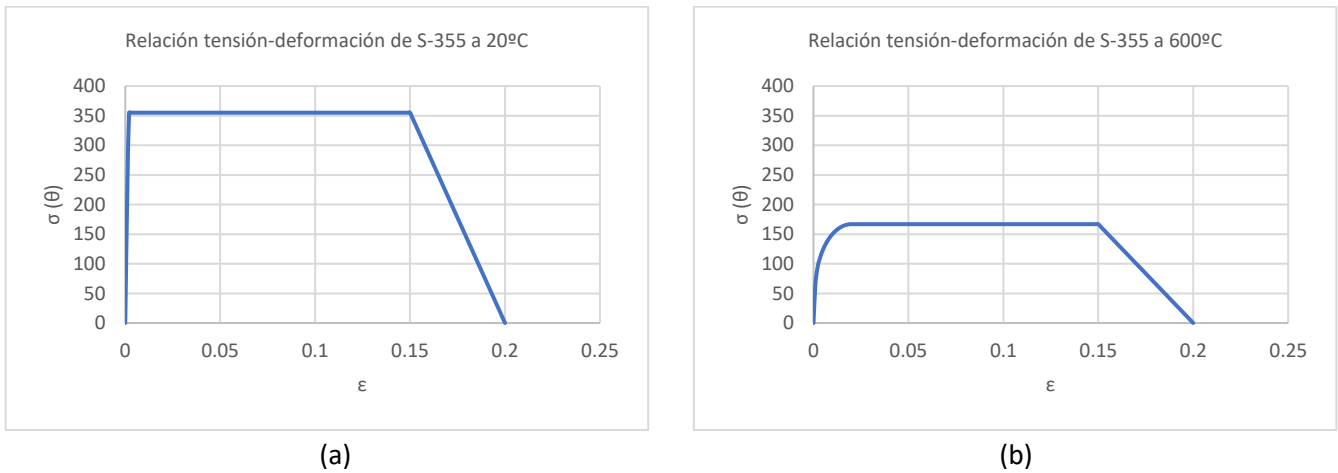


Fig. 9. Relación tensión-deformación en acero estructural. Comparativa 20°C vs 600°C.

Zonas de deformación	Tensión σ	Módulo tangente
$\epsilon \leq \epsilon_{p,0}$	$\epsilon E_{a,0}$	$E_{a,0}$
$\epsilon_{p,0} < \epsilon < \epsilon_{y,0}$	$f_{p,0} + c + (b/a) [a^2 - (\epsilon_{y,0} - \epsilon)^2]^{0,5}$	$\frac{b(\epsilon_{y,0} - \epsilon)}{a [a^2 - (\epsilon_{y,0} - \epsilon)^2]^{0,5}}$
$\epsilon_{y,0} \leq \epsilon \leq \epsilon_{u,0}$	$f_{y,0}$	0
$\epsilon_{u,0} < \epsilon < \epsilon_{r,0}$	$f_{y,0} [1 - (\epsilon - \epsilon_{t,0}) / (\epsilon_{u,0} - \epsilon_{t,0})]$	-
$\epsilon = \epsilon_{r,0}$	0,00	-
Parámetros	$\epsilon_{p,0} = f_{p,0} / E_{a,0}$ $\epsilon_{t,0} = 0,02$	$\epsilon_{u,0} = 0,15$ $\epsilon_{r,0} = 0,20$
Funciones	$a^2 = (\epsilon_{y,0} - \epsilon_{p,0}) (\epsilon_{y,0} - \epsilon_{p,0} + c / E_{a,0})$ $b^2 = c (\epsilon_{y,0} - \epsilon_{p,0}) E_{a,0} + c^2$ $c = \frac{(f_{y,0} - f_{p,0})^2}{(\epsilon_{y,0} - \epsilon_{p,0}) E_{a,0} - 2(f_{y,0} - f_{p,0})}$	

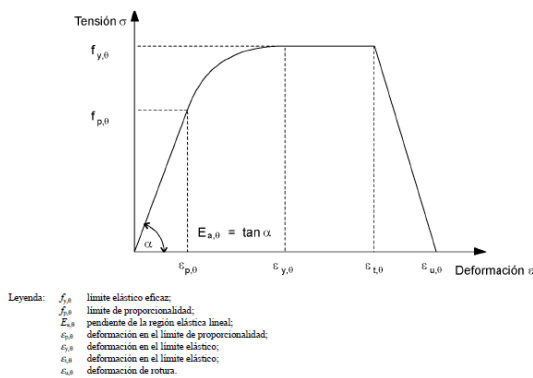


Fig. 10. Expresiones para la determinación de la relación tensión-deformación en el acero estructural en función de la temperatura. Fuente: Eurocódigo-3, parte 1-2 [6].

- Acero para armaduras pasivas, B-500S. Caracterizado según el Eurocódigo-2, parte 1-2 [8], apartado 3.2.3. Las expresiones que emplea la norma en este caso son idénticas a las de la Fig. 10, aplicadas en el caso del acero estructural, S-355. La principal diferencia reside en la magnitud de las tensiones soportadas por cada tipo de acero. En la Fig. 11, se muestra la comparación de comportamientos entre (a) armaduras sometidas a 20°C frente a (b) otras a 600°C.

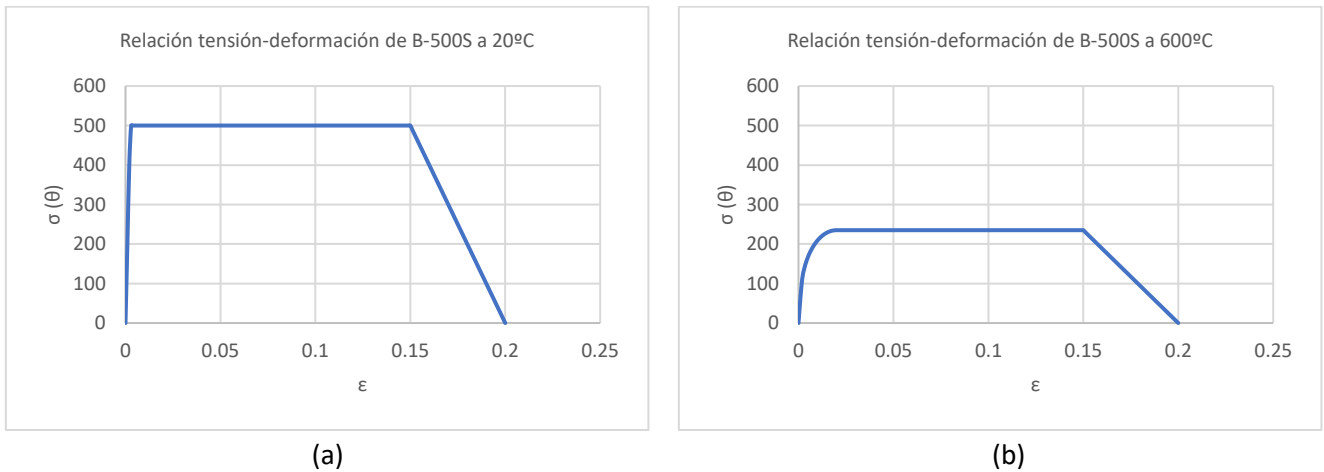
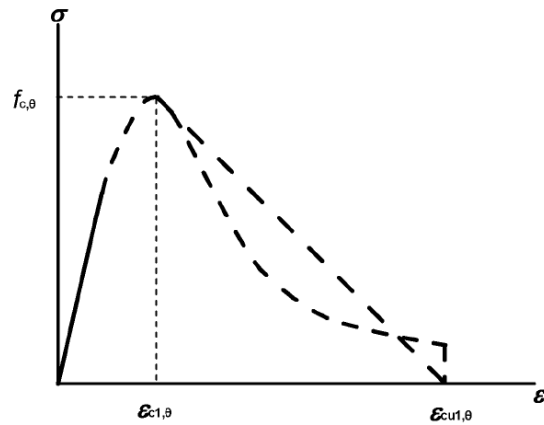


Fig. 11. Relación tensión-deformación en acero para armaduras pasivas. Comparativa 20°C vs 600°C.

- Hormigón armado, HA-30. Caracterizado según el Eurocódigo-2, parte 1-2 [8], apartado 3.2.2.1. La norma fija una reducción de la resistencia característica a compresión simple en función de los áridos empleados para la elaboración del hormigón. Los parámetros de reducción quedan recogidos en la Fig. 12. En este caso, se ha optado por la opción más desfavorable, es decir, el empleo de árido silíceo. En cuanto a la reducción de la relación tensión-deformación, la Fig. 13, recoge las expresiones para tal fin. Finalmente, en la Fig. 14, se aprecia la comparativa del comportamiento entre (a) hormigón a 20°C frente a (b) otro a 600°C.

Hormigón temp. θ [°C]	Áridos silíceos			Áridos calcáreos		
	$f_{c,\theta}/f_{ck}$ [-]	$\epsilon_{c1,\theta}$ [-]	$\epsilon_{cu1,\theta}$ [-]	$f_{c,\theta}/f_{ck}$ [-]	$\epsilon_{c1,\theta}$ [-]	$\epsilon_{cu1,\theta}$ [-]
1	2	3	4	5	6	7
20	1,00	0,0025	0,0200	1,00	0,0025	0,0200
100	1,00	0,0040	0,0225	1,00	0,0040	0,0225
200	0,95	0,0055	0,0250	0,97	0,0055	0,0250
300	0,85	0,0070	0,0275	0,91	0,0070	0,0275
400	0,75	0,0100	0,0300	0,85	0,0100	0,0300
500	0,60	0,0150	0,0325	0,74	0,0150	0,0325
600	0,45	0,0250	0,0350	0,60	0,0250	0,0350
700	0,30	0,0250	0,0375	0,43	0,0250	0,0375
800	0,15	0,0250	0,0400	0,27	0,0250	0,0400
900	0,08	0,0250	0,0425	0,15	0,0250	0,0425
1000	0,04	0,0250	0,0450	0,06	0,0250	0,0450
1100	0,01	0,0250	0,0475	0,02	0,0250	0,0475
1200	0,00	-	-	0,00	-	-

Fig. 12. Relación de reducción de la resistencia característica a compresión del hormigón armado según la temperatura. Fuente: Eurocódigo-2, parte 1-2 [8].



Rango	Tensión $\sigma(\theta)$
$\varepsilon \leq \varepsilon_{c1,\theta}$	$\frac{3\varepsilon f_{c,\theta}}{\varepsilon_{c1,\theta} \left(2 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c1,\theta}} \right)^3 \right)}$
$\varepsilon_{ct}(\theta) < \varepsilon \leq \varepsilon_{cu1,\theta}$	Para cuestiones de tipo numérico debería adoptar una rama descendente. Se permiten modelos lineales o no lineales.

Fig. 13. Expresiones para la determinación de la relación tensión-deformación en el hormigón armado en función de la temperatura. Fuente: Eurocódigo-2, parte 1-2 [8].

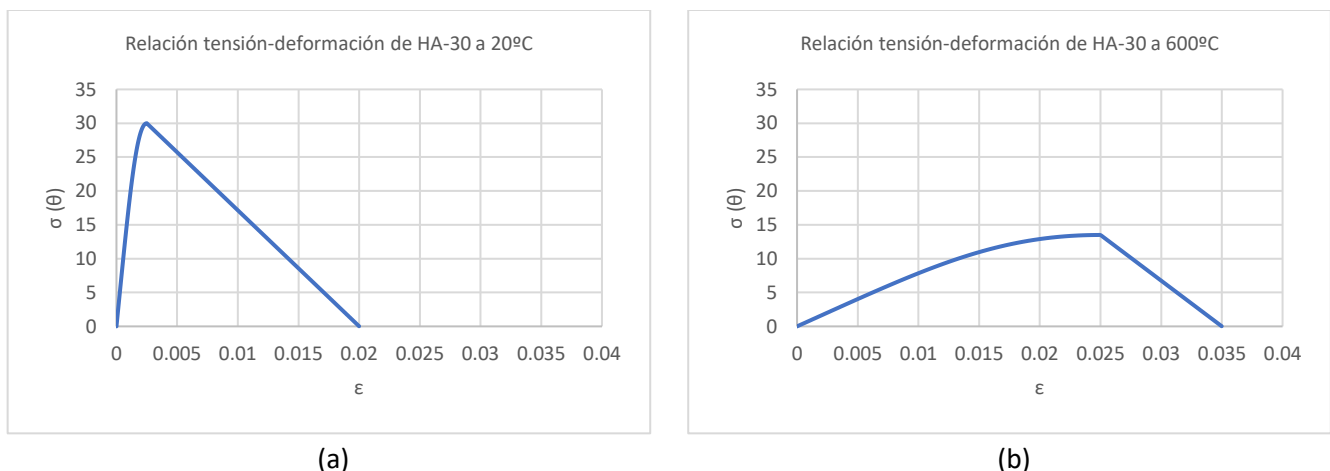


Fig. 14. Relación tensión-deformación en hormigón armado. Comparativa 20°C vs 600°C.

4.1.2.1. Módulo de Young o de elasticidad

Intrínsecamente relacionado con las ecuaciones constitutivas de los materiales y sus representaciones gráficas, el módulo de Young o de elasticidad es un parámetro que corresponde con la rama elástica del comportamiento de los materiales. En esta rama, las deformaciones producidas por las tensiones aplicadas pueden recuperarse al cesar dichas tensiones.

El módulo de Young, E , puede definirse como la pendiente de dicha rama dentro de la ecuación constitutiva (sobre su representación gráfica en forma de curva). Su expresión formal se rige según la ecuación (1).

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \tag{1}$$

Por tanto, al modificarse la ecuación constitutiva con respecto a la temperatura, el módulo de Young también sufrirá variación.

- Acero estructural, S-355. En el apartado 3.2.1 del Eurocódigo-3, parte 1-2 [6], figuran la expresión y los coeficientes correspondientes para el cálculo del módulo de Young para cada valor de la temperatura (Fig. 15).

Temperatura del acero θ_s	Coeficientes de reducción a temperatura θ_s respecto al valor de f_y o E_s a 20 °C		
	Coeficiente de reducción (respecto a f_y) para el límite elástico eficaz $k_{y,\theta} = f_{y,\theta}/f_y$	Coeficiente de reducción (respecto a f_y) para el límite de proporcionalidad $k_{p,\theta} = f_{p,\theta}/f_y$	Coeficiente de reducción (respecto a E_s) para la pendiente de la región elástica lineal $k_{E,\theta} = E_{s,\theta}/E_s$
20 °C	1,000	1,000	1,000
100 °C	1,000	1,000	1,000
200 °C	1,000	0,807	0,900
300 °C	1,000	0,613	0,800
400 °C	1,000	0,420	0,700
500 °C	0,780	0,360	0,600
600 °C	0,470	0,180	0,310
700 °C	0,230	0,075	0,130
800 °C	0,110	0,050	0,090
900 °C	0,060	0,0375	0,0675
1 000 °C	0,040	0,0250	0,0450
1 100 °C	0,020	0,0125	0,0225
1 200 °C	0,000	0,0000	0,0000

NOTA Puede emplearse una interpolación lineal para valores intermedios de temperatura del acero.

Fig. 15. Coeficientes de proporcionalidad para el módulo de Young de aceros estructurales en función de la temperatura. Fuente: Eurocódigo-3, parte 1-2 [6].

- Acero para armaduras pasivas, B-500S. De forma similar al acero estructural, S-355, el acero para armaduras pasivas también reduce su módulo según los coeficientes que figuran en el apartado 3.2.3 del Eurocódigo-2, parte 1-2 [8]. En la Fig. 16 pueden apreciarse dichos valores, que corresponden con armaduras de clase N (más habitual). También se realiza una diferenciación entre laminado en caliente o conformado en frío. En este caso, se considera la laminación en caliente, al ser la más habitual.

Temperatura del acero θ [°C]	$f_{yk,\theta} / f_{yk}$		$f_{pk,\theta} / f_{pk}$		$E_{s,\theta} / E_s$	
	laminado en caliente	conformado en frío	laminado en caliente	conformado en frío	laminado en caliente	conformado en frío
1						
20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
100	1,00	1,00	1,00	0,96	1,00	1,00
200	1,00	1,00	0,81	0,92	0,90	0,87
300	1,00	1,00	0,61	0,81	0,80	0,72
400	1,00	0,94	0,42	0,63	0,70	0,56
500	0,78	0,67	0,36	0,44	0,60	0,40
600	0,47	0,40	0,18	0,26	0,31	0,24
700	0,23	0,12	0,07	0,08	0,13	0,08
800	0,11	0,11	0,05	0,06	0,09	0,06
900	0,06	0,08	0,04	0,05	0,07	0,05
1000	0,04	0,05	0,02	0,03	0,04	0,03
1100	0,02	0,03	0,01	0,02	0,02	0,02
1200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fig. 16. Coeficientes de proporcionalidad para el módulo de Young de aceros para armaduras pasivas en función de la temperatura. Fuente: Eurocódigo-2, parte 1-2 [8].

- Hormigón armado. HA-30. A pesar de que el Eurocódigo-2, parte 1-2 [8] no especifica una metodología para obtener la variación del módulo de Young, sí que realiza una relación entre las resistencias características a compresión en función de la temperatura, Fig. 12. Si se tienen dichos valores, es posible obtener el módulo de Young secante aplicando las ecuaciones (2) y (3), que figuran en el apartado 3.1.2 del Eurocódigo-2, parte 1-1 [15].

$$E_{cm} = 22 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0.3} \quad (2)$$

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \quad (3)$$

4.1.3. Calor específico

Este parámetro también varía en cada material en función del rango de temperaturas que se emplee. Así pues, las normativas especifican una serie de expresiones para el cálculo de las mismas.

- Acero estructural, S-355. La norma correspondiente, Eurocódigo-3, parte 1-2 [6], apartado 3.4.1.2, fija las bases para el cálculo del valor del calor específico según el rango de temperaturas. En resumen, dicho parámetro queda graficado en la Fig. 17 en función de la temperatura.

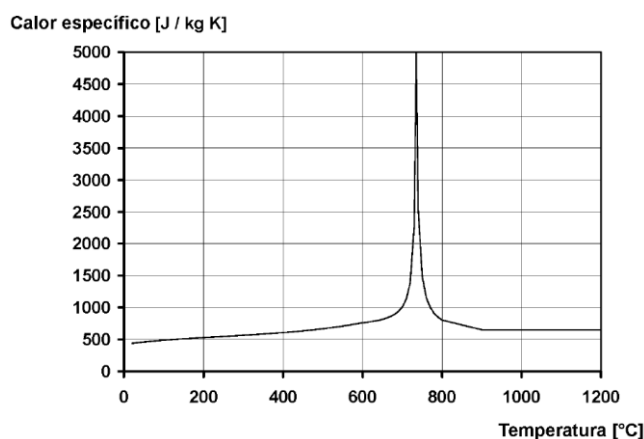


Fig. 17. Valor del calor específico en el acero estructural respecto a la temperatura. Fuente: Eurocódigo-3, parte 1-2 [6].

- Acero para armaduras pasivas, B-500S. Puesto que el Eurocódigo-2, parte 1-2 [8], no especifica el tratamiento de la variación de este parámetro, se ha considerado que el comportamiento es idéntico al caso anterior, acero estructural, S-355.
- Hormigón armado, HA-30. El Eurocódigo-2, parte 1-2 [8], en su apartado 3.2.2, fija una serie de expresiones para el cálculo del calor específico de este material en función del material. El resultado puede resumirse en la gráfica que contiene la Fig. 18, donde se aprecia que, para mayores porcentajes de humedad, el calor específico aumenta de valor en el rango de temperatura entre 100 y 200°C.

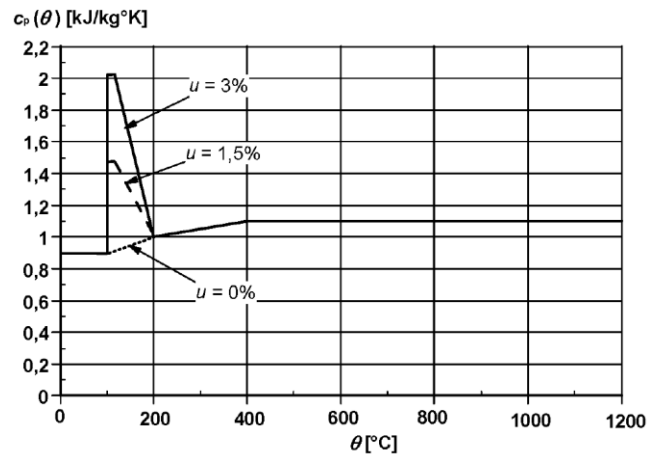


Fig. 18. Valor del calor específico en el hormigón respecto a la temperatura. Fuente: Eurocódigo-2, parte 1-2 [8].

4.1.4. Conductividad

De forma similar al establecimiento de los valores de Calor específico, la variación de la conductividad con la temperatura también queda recogida en las normativas correspondientes.

- Acero estructural, S-355. En el Eurocódigo-3, parte 1-2 [6], figuran dos expresiones para el cálculo de los valores en función del rango de temperaturas. La Fig. 19 muestra de forma gráfica dichos valores.

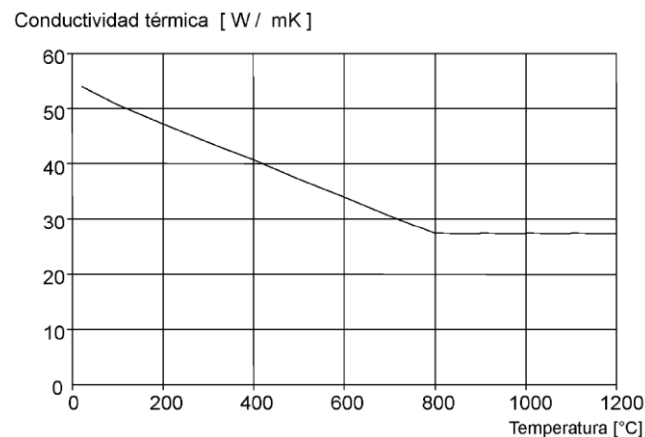


Fig. 19. Valor de la conductividad en el acero estructural respecto a la temperatura. Fuente: Eurocódigo-3, parte 1-2 [6].

- Acero para armaduras pasivas, B-500S. En este caso, las normativas no ofrecen información específica sobre el comportamiento, por lo que se asume los valores del acero estructural.
- Hormigón armado, HA-30. Según el Eurocódigo-2, parte 1-2 [8], el valor de la conductividad en el hormigón puede establecerse entre dos límites (superior e inferior), Fig. 20. Por ello, la norma presenta dos expresiones para el cálculo de los valores. Para este material, se ha considerado el supuesto de adoptar un valor medio localizado entre ambas curvas.

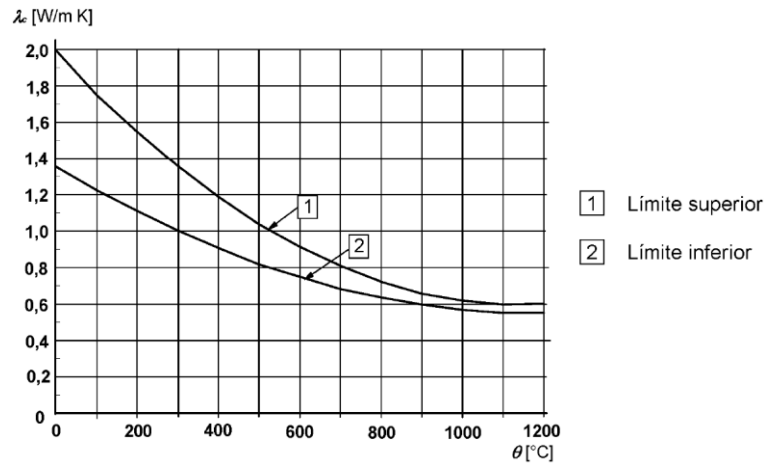


Fig. 20. Valor de la conductividad en el hormigón respecto a la temperatura. Fuente: Eurocódigo-2, parte 1-2 [8].

Los valores tabulados resultantes de las expresiones tratadas a lo largo del apartado 4.1 pueden consultarse en el Anexo B: Propiedades de los materiales.

4.1.5. Emisividad

La emisividad es un parámetro con importancia en los materiales frente a fenómenos térmicos debido a la pérdida de calor que tienen los materiales al ser radiados. Por tanto, intervendrá en el cálculo de la transferencia de calor en los sólidos que componen la estructura.

Este parámetro tomará un valor de 0.7, tanto para el hormigón como para el acero, según las normativas correspondientes (Eurocódigo-2, parte 1-2 [8] y Eurocódigo-3, parte 1-2 [6]).

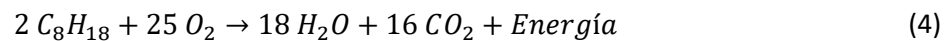
4.2. HIPÓTESIS ADOPTADAS PARA LAS CARACTERÍSTICAS DEL FUEGO

Otro de los aspectos esenciales en este estudio son las características relacionadas con el fuego a emplear. El uso de diferentes valores para cada parámetro depende de los supuestos que se consideren y afectarán en gran medida a los fenómenos que generen a la estructura y los resultados obtenidos.

4.2.1. Material combustible empleado

El material que se emplea como combustible para la generación de fuego es una mezcla de hidrocarburos derivado del petróleo, conocido también como gasolina.

De su composición química y de sus propiedades caloríficas dependerán parte de las características del fuego. La gasolina se formula químicamente como C_8H_{18} y su combustión se rige de la siguiente reacción estequiométrica:



En este caso, la componente que más interesa de la ecuación (4) es la cantidad de energía que se desprenderá por unidad de masa del combustible.

La gasolina posee un calor de combustión en torno a 43.7 MJ/kg. Dicho valor queda contrastado en diversas fuentes, según se aprecia en la Tabla 1.

GASOLINA, C_8H_{18}		
Fuente bibliográfica	Δh_c (MJ/kg)	m_{∞} (kg/m ² /s)
[11]	43.7	0.055
[13]	43.7	0.055
[16]	43.7	0.055

Tabla 1. Propiedades caloríficas de la gasolina. Comparativa de diversas fuentes.

4.2.2. Geometría y posición del burner o quemador

El material combustible empleado, gasolina, se encuentra en fase líquida a temperatura ambiente. Por tanto, es necesario disponer dicho material en un recipiente apto para su combustión. Dicho recipiente se le denomina burner o quemador.

En este apartado, se exponen las dimensiones que posee dicho quemador, así como otros aspectos relacionados con el mismo.

Entre el material disponible para el estudio, existen dos tipos de quemadores que se diferencian básicamente por el tamaño, ambos de geometría en planta cuadrada. El pequeño posee unas dimensiones de 0.50x0.50 m, con una altura de 0.20 m. El grande tiene unas medidas de 0.75x0.75 m, con una altura de 0.20 m.

Además de las dimensiones del quemador, resultará fundamental el posicionamiento de este elemento con respecto a la estructura. A priori, no puede definirse una posición clara con respecto al puente (centrado/lateral, altura). Este parámetro dependerá de la potencia de fuego necesaria para conseguir una deformación permanente en la estructura.

4.2.3. Potencia de fuego

En relación directa con lo descrito en el apartado 4.2.2 y 4.2.1, la potencia de fuego o también conocido como *Heat Release Rate (HRR)* es otro de los factores importantes en la definición del fuego. Representa la energía que desprende el fuego por unidad de tiempo y depende de las propiedades del material combustible empleado y la forma en que este combustiona. En este caso, dicho factor puede ser calculado teóricamente según las ecuaciones (5) y (6).

$$r = \dot{m}_{\infty} \cdot S \quad (5)$$

Donde r representa el ratio de pérdida de masa, medido en kg/s, y considerando una superficie unitaria (1 m²).

$$HRR = \Delta h_c \cdot r \quad (6)$$

La potencia de fuego también puede quedar expresada en función de la superficie considerada, según la ecuación (7). Es lo que se conoce como *Heat Release Rate Per Unit Area (HRRPUA)* o potencia de fuego por unidad de superficie.

$$HRRPUA = HRR/S \quad (7)$$

Puesto que el calor de combustión de la gasolina queda definido en el apartado 4.2.1, es posible establecer la potencia de fuego a emplear, basado en términos de masa unitaria y superficie unitaria.

$$\begin{aligned} HRR &= 2400 \text{ kW} \\ HRRPUA &= 2400 \text{ kW/m}^2 \end{aligned}$$

Para el quemador que se dispone, las potencias de fuego quedan reflejadas en la Tabla 2.

POTENCIAS DE FUEGO SEGÚN TAMAÑO DE QUEMADOR			
Tamaño de quemador	Área (m ²)	HRRPUA (kW/m ²)	HRR (kW)
Pequeño	0.250	2400	600

Tabla 2. Potencias de fuego para el quemador disponible.

Las potencias de fuego calculadas en la tabla anterior se han determinado bajo las expresiones teóricas y con los parámetros obtenidos de fuentes literarias. Sin embargo, dichas potencias de fuego pueden variar debido a diversas condiciones de contorno, como puede ser la eficiencia de combinación de combustión; la cantidad de oxígeno, O₂, en aire y otros factores. Esto lo refleja el autor *Vytenis Babrauskas* en el libro *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* [13].

CAPÍTULO 5: MODELOS NUMÉRICOS

Este capítulo se centrará en la elaboración de los modelos numéricos necesarios para realizar el estudio.

El proceso a seguir para el análisis del tablero frente a incendio será el que se describe a continuación y puede resumirse de forma esquemática según la Fig. 21.

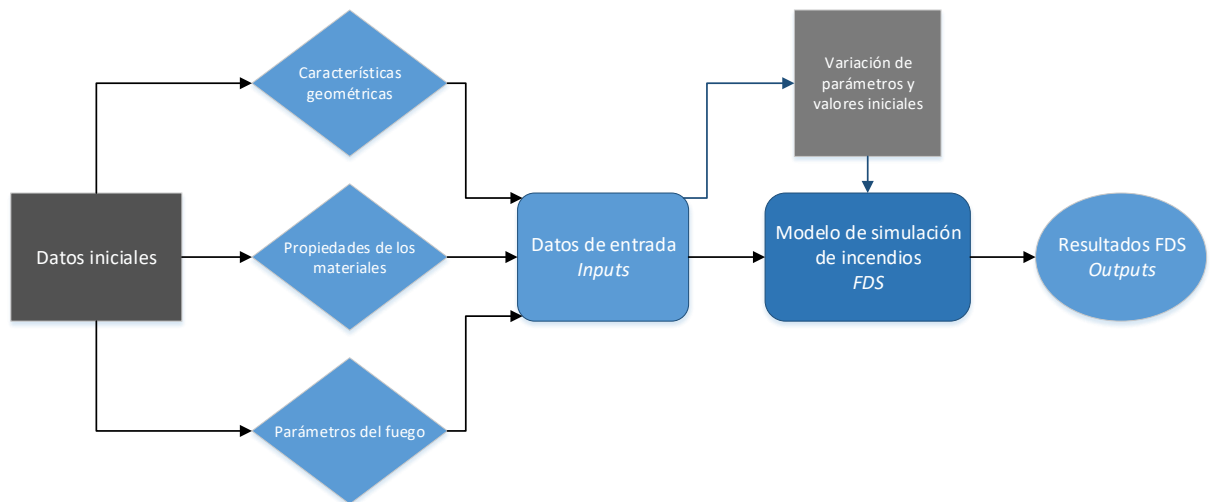


Fig. 21. Esquema de flujo de trabajo para el estudio de la respuesta térmica del tablero.

El análisis de exposición térmica a fuego es llevado a cabo mediante un **modelo de simulación de incendio** (Fire Dynamics Simulation -FDS-), que permite obtener las acciones térmicas sobre los elementos del tablero a partir de la geometría del mismo, los materiales que lo componen y los parámetros que definen el fuego. En este modelo se estudiará la sensibilidad del modelo a diversos aspectos, como pueden ser: la sensibilidad frente a los tamaños de celda empleados, la presencia de determinados elementos estructurales (alas inferiores de vigas, armado) y la posición del quemador y los datos resultado de fuego (temperaturas, flujos de calor).

5.1. MODELO DE SIMULACIÓN DE INCENDIOS

5.1.1. *Definición del modelo*

5.1.1.1. *Datos de partida*

La elaboración del modelo FDS parte de la geometría expuesta en el apartado 1.1.

Los parámetros de los materiales, en cuanto a comportamiento térmico refiere, se toman a partir de lo que quedó definido en el apartado 4.1.

Los análisis de los modelos de simulación de fuego se realizan mediante el software Pyrosim, v.2016.1.0425. Dicho software, a su vez, actúa como interfaz gráfica del programa *Fire Dynamics Simulator (FDS)*, v.6.4.0. Este último es el encargado de realizar los cálculos de simulación de fuego, basándose en el método de las diferencias finitas.

5.1.1.2. *Aproximaciones y convenios adoptados*

Para realizar el análisis, es necesario elaborar un modelo que sea capaz de representar los fenómenos que se aprecian en la realidad con la mayor exactitud posible.

La construcción del modelo de simulación de incendio pasa por la introducción de la información definida en apartados anteriores, como son la geometría de los elementos, las características de los materiales y del fuego.

El sistema de coordenadas empleado corresponde con un sistema dextrógiro cartesiano, orientando el eje X en dirección longitudinal y situando el eje Z en la vertical. El origen de coordenadas se localiza en el extremo sur, centrado longitudinalmente al pie del estribo izquierdo. Todo esto se aprecia con mayor facilidad en la imagen anterior del esquema general, Fig. 3.

Las unidades empleadas para las diferentes magnitudes, específicas de los modelos de simulación de fuego, son los correspondientes a los del sistema internacional (SI), Tabla 3. Sin embargo, se tiene como excepción la unidad empleada para la temperatura, donde se toman grados centígrados por una mayor comodidad en su empleo. No presenta desventajas frente al uso del grado Kelvin ya que tienen la misma escala de proporcionalidad (a diferencia de lo que ocurre con los grados Fahrenheit).

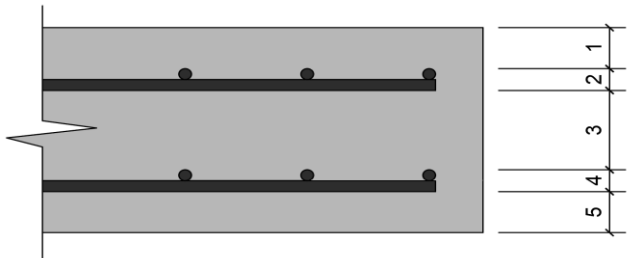
UNIDADES EMPLEADAS EN LOS MODELOS DE INCENDIO					
Energía	Longitud	Masa	Temperatura	Tiempo	Trabajo/Potencia
J	m	kg	°C	s	W

Tabla 3. Sistema de unidades empleado para los modelos de incendio.

Algunos de los aspectos relevantes que atañen a la modelización son la introducción de elementos de poco espesor, como las vigas, y la inclusión de un material heterogéneo, como el hormigón armado.

Por una parte, la imposibilidad de introducir barras o elementos viga, da lugar a modelizar los perfiles IPE-160 mediante elementos lámina. Por otra parte, el armado correspondiente a la losa se ha

incluido definiendo una superficie compuesta por capas. De este modo, se establecen diferentes capas con los distintos materiales, según se aprecia en la Tabla 4.



(Imagen no a escala)

COMPOSICIÓN DE CAPAS EN PYROSIM			
Capa	Espesor (m)	Hormigón (%)	Acero (%)
1	0.03	100	-
2	0.008	96	4
3	0.058	100	-
4	0.008	96	4
5	0.03	100	-

Tabla 4. Composición por capas de la losa en Pyrosim.

Esta última hipótesis se comparará frente a un modelo en el que no se introducirá el armado de la losa, permitiendo visualizar los efectos térmicos que tiene el armado dentro de la matriz de hormigón y en el modelo completo. De este modo, también se evaluará la conveniencia de incluir este elemento en los cálculos posteriores.

Los modelos empleados parten de un primer planteamiento general y conforme a las consecutivas revisiones de dichos modelos, se introducirán cambios con el objetivo de obtener un modelo optimizado para el elemento de estudio en cuestión.

En concordancia con el método de las diferencias finitas que emplea el software Pyrosim, el tamaño considerado para los elementos diferenciales puede suponer una variación dentro de los resultados obtenidos. Por ello, resulta necesario elaborar un análisis de sensibilidad del caso de estudio frente a diferentes propuestas de mallados, con diferentes configuraciones de tamaños de celdas.

Para una optimización mayor en el modelo de análisis, también se estudiará los volúmenes de control asumibles para el caso de estudio. La eliminación, dentro del modelo de cálculo, de celdas que no intervienen ni influyen en el resultado final suponen una mejora en lo que respecta a tiempo computacional y tamaño de datos en las salidas de resultados.

Otro de los aspectos que pueden afectar a los resultados a obtener es la inclusión de las alas inferiores en el cálculo. La información resultante que se obtiene incluyendo dichas alas o no se discutirá en uno de los apartados siguientes.

Acorde con lo descrito en los apartados 4.2.2 y 4.2.3, en el modelo se habrá de verificar que la energía en forma de flujo de calor que se aplicará al tablero es la suficiente como para conseguir los objetivos descritos en el Capítulo 3: Objetivos. A priori, en los primeros modelos se adopta el quemador pequeño (dimensiones 0.5x0.5 m) situándolo en centro luz y a mitad de la directriz del tablero, con una cota superior de $z=0.15$ m. En modelos posteriores se modificará su posición y tamaño según los resultados que se observen a lo largo del estudio.

5.2. BASE DE DATOS DE MODELOS DE SIMULACIÓN DE INCENDIO EMPLEADOS

En la tabla que se presenta en este apartado se recoge la serie de modelos empleados para el análisis. Se describe tanto la denominación de cada modelo como los aspectos fundamentales que se han tratado en el mismo. Mediante el estudio de las variables involucradas en cada modelo, se pretende extraer unas conclusiones que permitan caracterizar y explicar el comportamiento del fuego en este tipo de estructuras.

BASE DE DATOS DE MODELOS DE SIMULACIÓN DE INCEDIO		
Modelos de incendio (psm)	Objetivos	Variabes estudio
Modelo 00: FDS_00.psm	Primer modelo. Planteamiento general de geometría, materiales y mallado.	
Modelo 01: FDS_01.psm	Análisis de sensibilidad del mallado.	Temperaturas según sensores dispuestos bajo la estructura.
Modelo 02: FDS_02.psm	Análisis del volumen de control.	Temperaturas según sensores dispuestos bajo la estructura.
Modelo 03: FDS_03.psm	Análisis de sensibilidad frente a la presencia de armado.	Temperaturas según sensores localizados sobre la losa.
Modelo 04: FDS_04.psm	Análisis de influencia de presencia de alas inferiores de vigas.	Temperaturas en los sensores seleccionados.
Modelo 05: FDS_05.psm	Análisis de influencia de la posición del quemador. Obtención de flujos de calor sobre el tablero.	Temperaturas en sensores verticales sobre el quemador. ASTs y temperaturas en superficie inferior del tablero.

Tabla 5. Base de datos de modelos de simulación de incendio.

5.3. MODELO 01: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD FRENTE AL MALLADO

PROCEDE DE: Modelo00: FDS_00.psm

CON LAS SIGUIENTES MODIFICACIONES:

Se plantea el empleo de diferentes tamaños de celda para evaluar la sensibilidad del modelo frente a este cambio. También se presta atención a la disposición de las celdas respecto a los elementos del tablero. En general, se procura mantener límites en capa superior e inferior de la losa y en alas inferiores de las vigas.

Por tanto, el tamaño de celda es escogido con cierta aproximación a las distancias que dejan los límites anteriormente mencionados. El tamaño de celda, así como el número de celdas que componen cada elemento depende de su geometría.

Los mallados empleados vienen denominados de la siguiente forma: L, M, S y XS. Dicha nomenclatura hace referencia directa al tamaño de celda empleado. En cualquier caso, no hay una relación de proporcionalidad directa entre los diferentes tamaños de celda.

Por otro lado, se compara también con un modelo de mallado uniforme, que consta de celdas de 20 cm. Este modelo fue el creado en primera instancia, por la simplicidad de definición del mallado, ayudando a elaborar con mayor precisión los modelos anteriormente mencionados.

Los mallados L y M se diferencian básicamente en una mayor discretización en el entorno del tablero, pretendiendo obtener unos resultados más precisos que en el modelo L y de celdas de 20 cm.

Los modelos S y XS tienen un tamaño de celda más reducido que los modelos anteriores. Además de una mayor resolución del mallado en el entorno del tablero, se aplica también bajo el mismo, para observar la variación que puede generarse por una mayor discretización en el entorno de las llamas y del quemador.

Para llevar a cabo el análisis, se disponen sensores alrededor de la losa, sin llegar a haber contacto alguno con los sólidos. Dichos sensores se localizan de la siguiente forma:

- Bajo viga sur, separación de 1 m, cota $z=1.89$ m.
- Bajo viga norte, separación de 1 m, cota $z=1.89$ m.
- En alas de vigas, separación de 1 m entre dispositivos, separación de 0.005 m del alma, cota $z=1.98$ m.
- Bajo losa de hormigón, en eje longitudinal, separación de 1 m (se añaden x0 y x6, total de 7 termopares), cota $z=2.05$ m.
- Bajo losa de hormigón, en borde sur, separación de 1 m (se añaden x0 y x6, total de 7 termopares), cota $z=2.05$ m.
- Bajo losa de hormigón, en borde norte, separación de 1 m (se añaden x0 y x6, total de 7 termopares), cota $z=2.05$ m.
- Sobre losa de hormigón, en eje longitudinal, separación de 1 m (se añaden x0 y x6, total de 7 termopares), cota $z=2.25$ m.

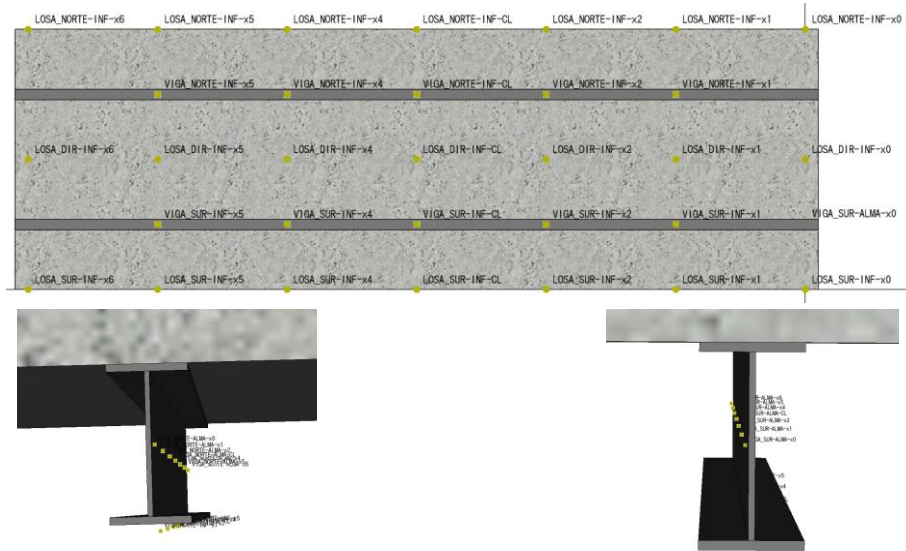


Fig. 22. Esquema y detalles de la distribución de termopares alrededor del tablero.

De los dispositivos mostrados anteriormente, únicamente una selección se tendrá en cuenta en la comparativa. Dicha selección se muestra en la Fig. 23 y se listan a continuación:

- LOSA_DIR-INF-CL
- LOSA_SUR-INF-CL
- VIGA_SUR-ALMA-x5
- VIGA_SUR-INF-x5
- LOSA_DIR-INF-x6
- LOSA_SUR-INF-x6

. Se considera que, debido a la doble simetría del elemento, el resultado en otros cuadrantes será muy similar.



Fig. 23. Selección de termopares para la comparativa de mallas.

Los detalles de cada malla utilizada se especifican a continuación.

MODELO DE CELDAS DE 20 CM			
Z inicial (m)	Z final (m)	Número de celdas (x,y,z)	Tamaño de celda (x,y,z) (m)
-0.25	-0.1	40,15,1	0.2000 x 0.2000 x 0.1500
-0.1	0	40,15,1	0.2000 x 0.2000 x 0.1000
0	2.4	40,15,12	0.2000 x 0.2000 x 0.2000
2.4	2.5	40,15,1	0.2000 x 0.2000 x 0.1000

Tabla 6. Distribución y tamaño de celdas de modelo de celdas de 20 cm.

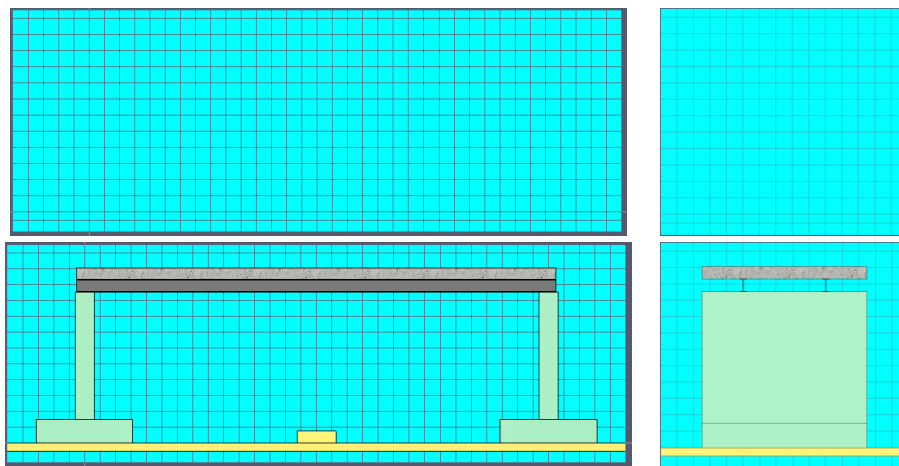


Fig. 24. Vistas en alzado y perfil del modelo de celdas de 20 cm.

MODELO DE MALLADO L			
Z inicial (m)	Z final (m)	Número de celdas (x,y,z)	Tamaño de celda (x,y,z) (m)
-0.25	1	50,36,8	0.1600 x 0.1667 x 0.1562
1	1.9	50,36,6	0.1600 x 0.1667 x 0.1500
1.899	2.21	50,36,2	0.1600 x 0.1667 x 0.1550
2.21	2.5	50,36,2	0.1600 x 0.1667 x 0.1450

Tabla 7. Distribución y tamaño de celdas de modelo de mallado L.

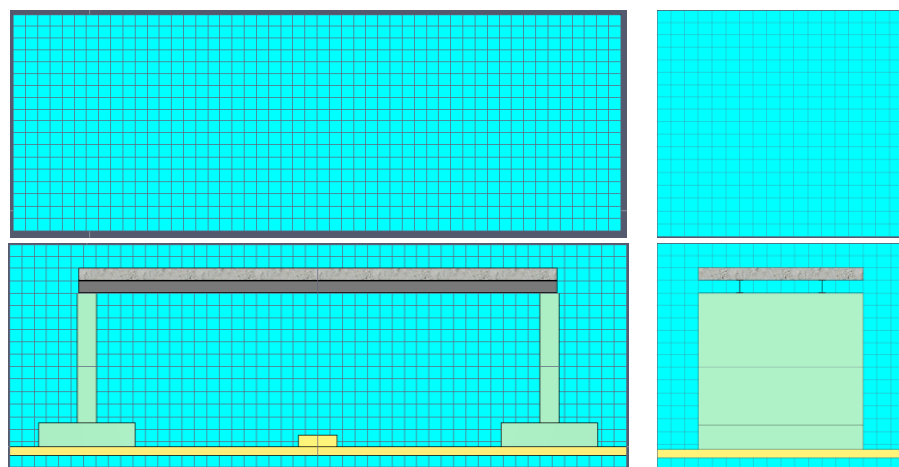


Fig. 25. Vistas en alzado y perfil del modelo de mallado L.

MODELO DE MALLADO M			
Z inicial (m)	Z final (m)	Número de celdas (x,y,z)	Tamaño de celda (x,y,z) (m)
-0.25	1	50,36,8	0.1600 x 0.1667x 0.1500
1	1.9	50,36,6	0.1600 x 0.1667 x 0.1500
1.9	2.21	100,72,4	0.0800 x 0.0833 x 0.0775
2.21	2.5	100,72,3	0.0800 x 0.0833 x 0.0967

Tabla 8. Distribución y tamaño de celdas de modelo de mallado M.

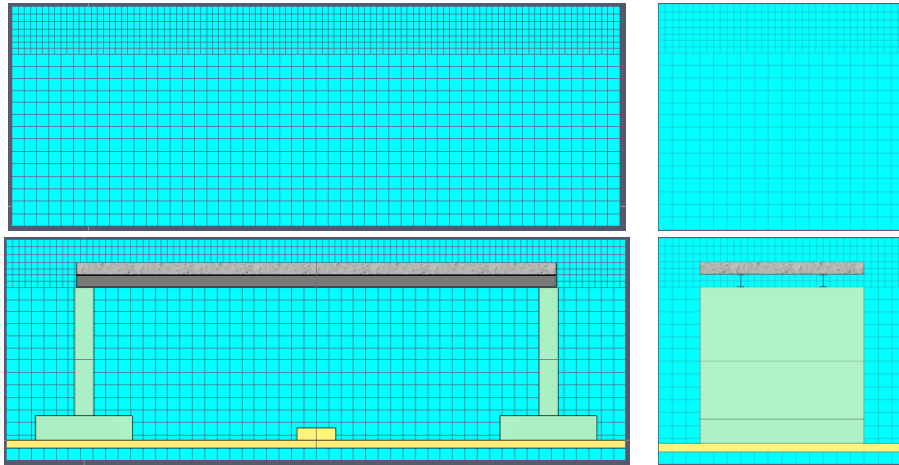


Fig. 26. Vistas en alzado y perfil del modelo de mallado M.

MODELO DE MALLADO S

Z inicial (m)	Z final (m)	Número de celdas (x,y,z)	Tamaño de celda (x,y,z) (m)
-0.25	1	100,36,16	0.0800 x 0.0833 x 0.0781
1	1.9	100,36,12	0.0800 x 0.0833 x 0.0750
1.9	2.06	100,36,2	0.0800 x 0.0833 x 0.0800
2.06	2.21	100,36,2	0.0800 x 0.0833 x 0.0750
2.21	2.5	100,36,4	0.0800 x 0.0833 x 0.0723

Tabla 9. Distribución y tamaño de celdas de modelo de mallado S.

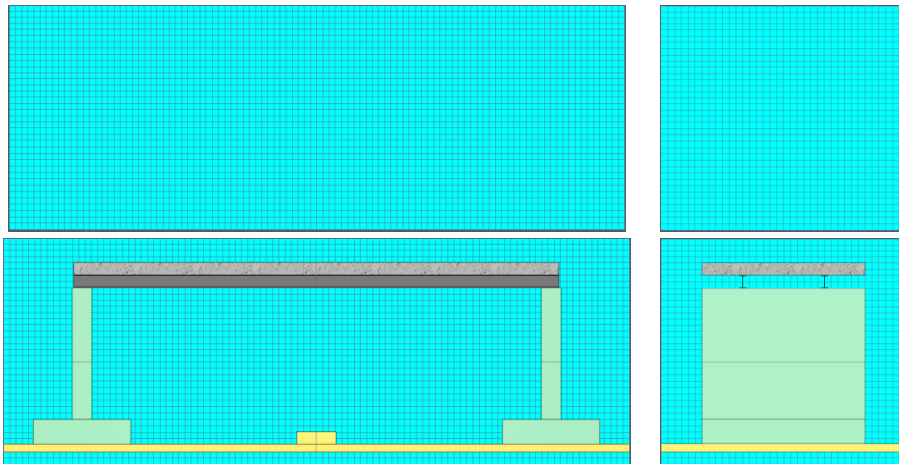


Fig. 27. Vistas en alzado y perfil del modelo de mallado S.

MODELO DE MALLADO XS

Z inicial (m)	Z final (m)	Número de celdas (x,y,z)	Tamaño de celda (x,y,z) (m)
0	1.9	128,58,40	0.0500 x 0.0500 x 0.0475
1.9	2.06	128,58,3	0.0500 x 0.0500 x 0.0533
2.06	2.21	128,58,3	0.0500 x 0.0500 x 0.0500
2.21	2.5	128.58.6	0.0500 x 0.0500 x 0.0483

Tabla 10. Distribución y tamaño de celdas de modelo de mallado XS.

Este modelo no resulta útil para la realización de cálculos posteriores debido al número de celdas totales que presenta. Sin embargo, se ha considerado necesario en esta parte para verificar resultados del mallado S. Puesto que el número de celdas aumentaba enormemente y, en consecuencia, el tiempo computacional, se ha prescindido de celdas en zonas externas (en planta) al tablero (volumen de control reducido con respecto a mallados anteriores, Fig. 28).

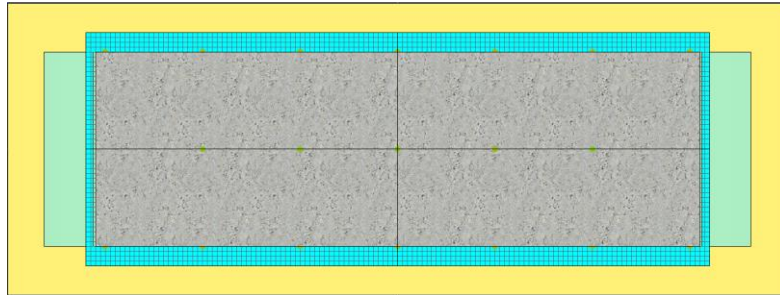


Fig. 28. Reducción del volumen de estudio en el mallado XS.

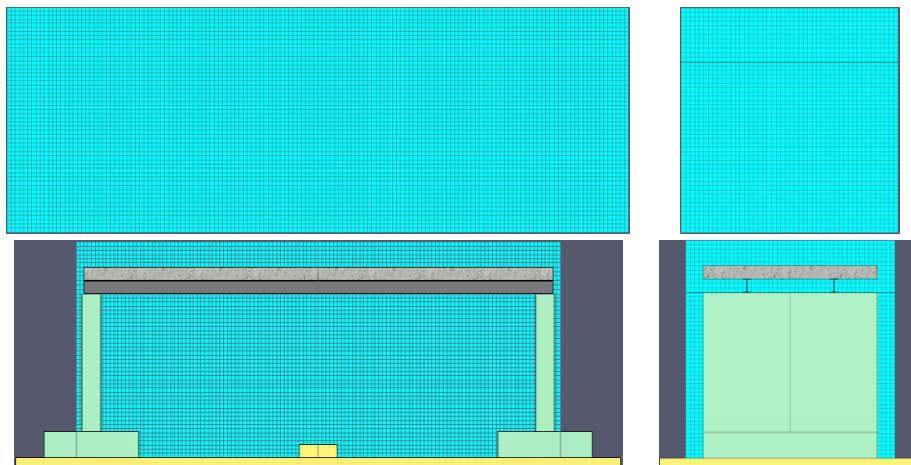


Fig. 29. Vistas en alzado y perfil del modelo de mallado XS.

Los tamaños de celda empleado en los modelos definidos en este apartado pueden contrastarse a su vez con las recomendaciones que ofrecen los creadores de FDS. Mediante el *D* Calculator* (una hoja de cálculo) [17], creada por el *National Institute of Standards and Technology (NIST)*, se recomiendan los tamaños de celda adecuados en función del HRR del fuego. Estos resultados se recogen en el Anexo A: Recomendaciones de tamaño de celda por el NIST.

El tiempo de simulación se configura en 60 segundos. El intervalo de tiempo escogido debe ser el suficiente como para permitir el establecimiento de un régimen cuasi estacionario. El alcance de un rango fijo de temperaturas posibilitaría el cálculo de temperaturas promediadas dentro del intervalo. En este aspecto, resulta importante tratar los datos, eliminando las ramas de crecimiento para evitar afectar al resto de datos.

En la ejecución del modelo, se ha procurado dividir el mallado en submallados de menor tamaño para aprovechar la ejecución del análisis mediante cálculos multihilo (utilización de varios núcleos de procesamiento).

Las pautas de tiempo de simulación y de subdivisión del mallado en otros de menor tamaño seguirán aplicándose en los modelos sucesivos. Mientras que el tiempo puede mantenerse constante, las subdivisiones variarán si se modifica la forma o el tamaño de la malla.

5.4. MODELO 02: ANÁLISIS DEL VOLUMEN DE CONTROL

PROCEDE DE: Modelo01: FDS_01.psm

CON LAS SIGUIENTES MODIFICACIONES:

Se reduce la zona de estudio del modelo. Se pretende obtener un volumen menor y sin afección en el análisis del tablero. El fin es optimizar el modelo en lo que corresponde al volumen de cálculos a realizar y, consecuentemente, el tiempo total de cálculo.

Al partir del modelo resultante del apartado 5.3, se procura respetar el tamaño de celda, así como la distribución o disposición de las mismas en el espacio del modelo.

Por tanto, se recurren a *slices* de temperatura situados en las alineaciones $x=CL$ e $y=1$ para concretar la reducción del volumen de control, Fig. 30. A pesar de una estabilización del HRR en torno a los 2 segundos y estabilización de la región de gases más calientes en torno a los 10 segundos, el momento que corresponde a cada *slice* será aquel en el que se observa una mayor área de gas afectando en ese plano.

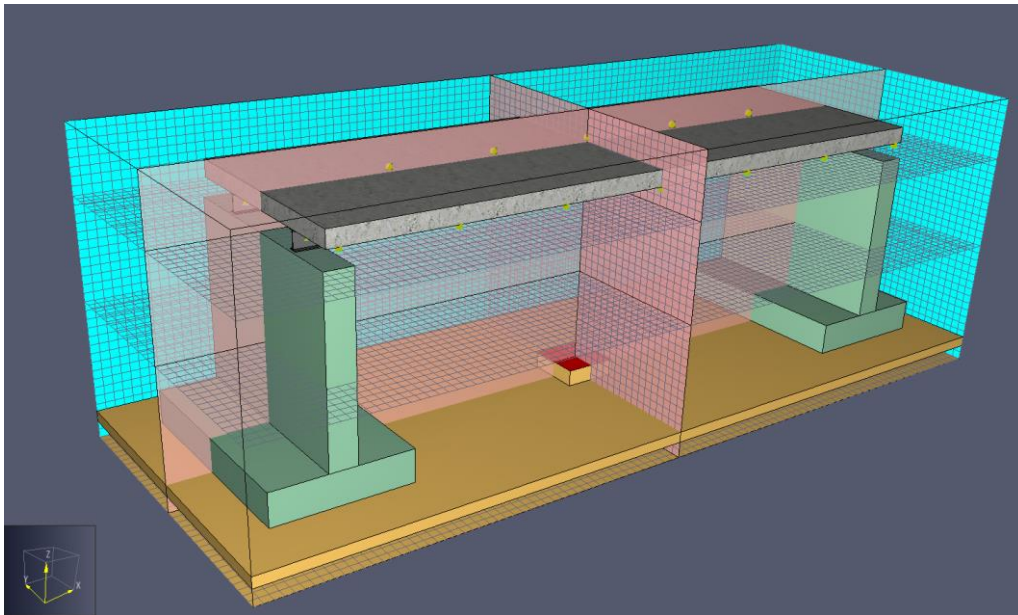


Fig. 30. Slices de temperatura en las alineaciones $x=CL$ e $y=1$ del modelo.

Por una parte, se debe evaluar la altura mínima del volumen que recoge al tablero y que, por tanto, afecta al cálculo y resultados.

En la Fig. 31 y Fig. 32, se observa que a una cota de 1.15 m es posible recoger toda la región de gases más calientes bajo el tablero y en un régimen cuasi-estacionario (volumen estabilizado).

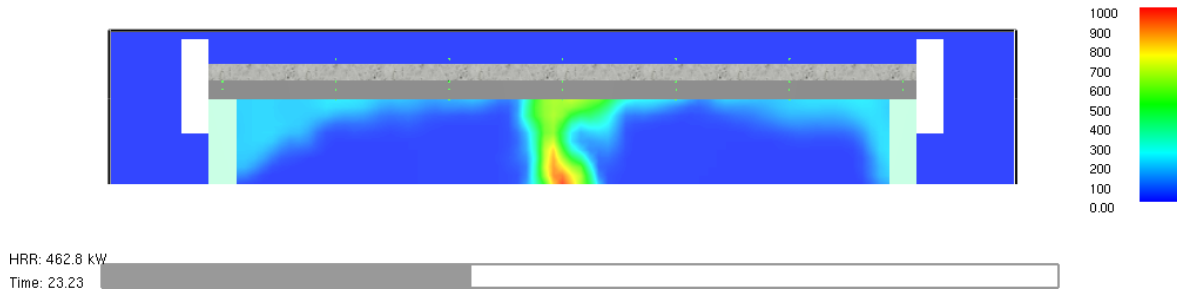


Fig. 31. Slice de temperatura en $y=1$. Zona superior, por encima de la cota $z=1.15$ m.

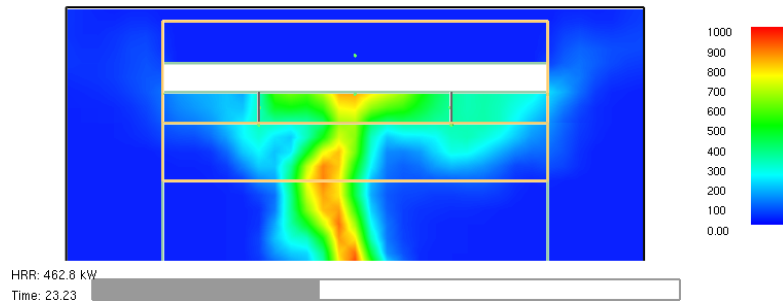


Fig. 32. Slice de temperatura en $x=CL$. Zona superior, por encima de la cota $z=1.15$ m.

Por otro, las dimensiones en planta mínima (dirección x e y) para la columna de fuego que genera la quema del combustible en la bandeja se extraen de la Fig. 33 y Fig. 34.

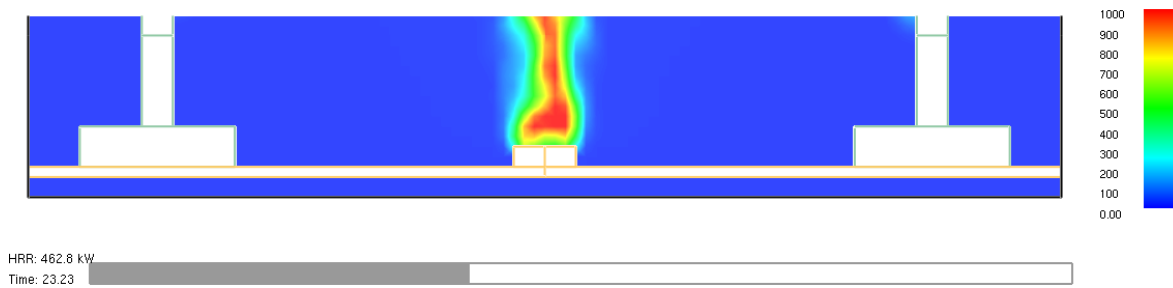


Fig. 33. Slice de temperatura en $y=1$. Zona inferior, por debajo de la cota $z=1.15$ m.

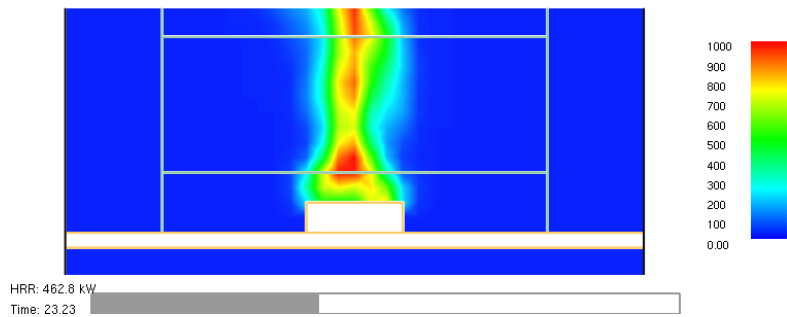


Fig. 34. Slice de temperatura en $x=CL$. Zona inferior, por debajo de la cota $z=1.15$ m.

Las dimensiones empleadas en planta para el volumen de control correspondiente a la columna de fuego son: 1.6x1.5m y con una altura hasta la cota 1.15m. Este volumen de control se encuentra centrado con respecto al quemador.

El volumen de control que confina al tablero se localiza inmediatamente sobre el volumen anterior. Partiendo de cota 1.15m y hasta la cota 2.5m, las dimensiones de este volumen en planta son: 6.4x3m.

De este modo, el mallado S del modelo 01 (5.3) queda reducido y subdividido en unos submallados, cuyas características se recogen en la Tabla 11.

MODELO DE VOLUMEN REDUCIDO				
Submallado	Z inicial (m)	Z final (m)	Número de celdas (x, y, z)	Tamaño de celda (x, y, z) (m)
Inferior	-0.25	1.15	20, 18, 18	0.0800x0.0833x0.0778
	1.15	1.9	80,36,10	0.0800x0.0833x0.0750
Superior	1.9	2.06	80,36,2	0.0800x0.0833x0.0800
	2.06	2.15	80,36,2	0.0800x0.0833x0.0750
	2.15	2.5	80,36,4	0.0800x0.0833x0.0725

Tabla 11. Disposición y dimensiones de celda del modelo de volumen reducido.

La aparición de diferentes dimensiones de celda en el submallado se debe únicamente a la búsqueda de un mejor ajuste de las celdas a las vigas (160 mm) y a la losa (150 mm).

Por lo que el modelo resultante se puede apreciar en la Fig. 35.

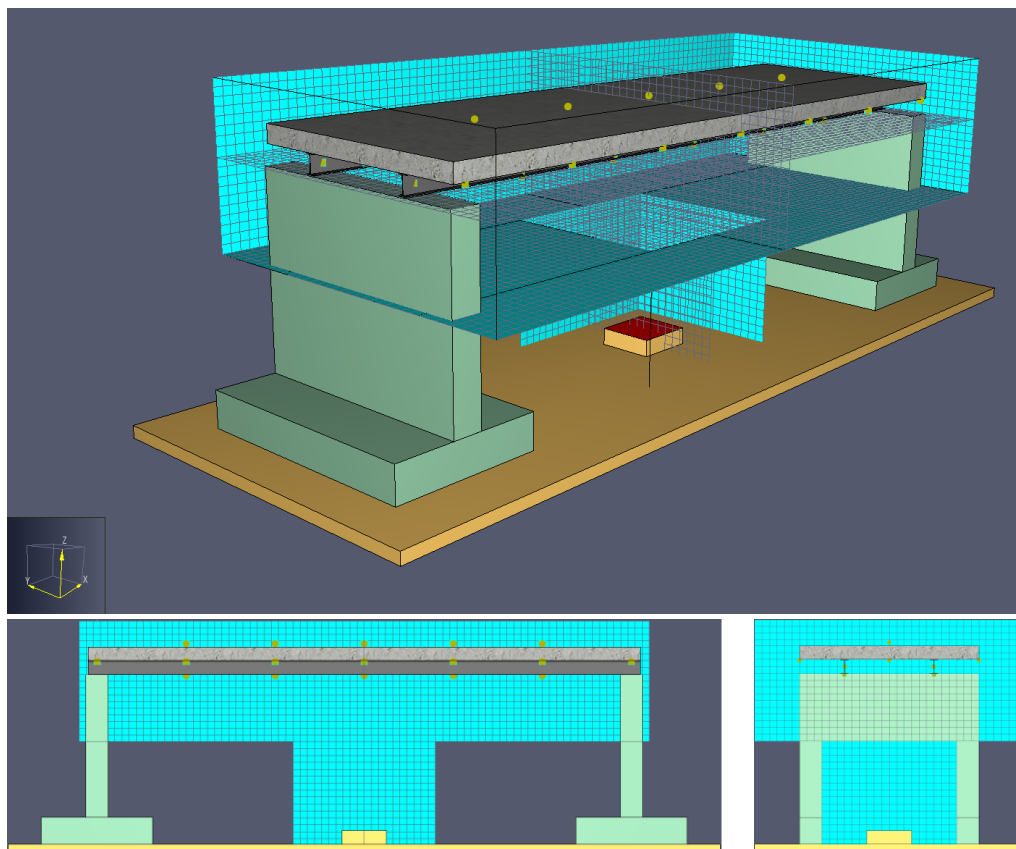


Fig. 35. Modelo de volumen reducido. Vistas en perspectiva, alzado y perfil.

De forma similar a los resultados del apartado 5.3, se extraerán los valores correspondientes a los sensores de control definidos en el apartado mencionado para ser comparados entre sí. Dichos sensores son:

- LOSA_DIR-INF-CL
- LOSA_SUR-INF-CL
- VIGA_SUR-ALMA-x5
- VIGA_SUR-INF-x5
- LOSA_DIR-INF-x6
- LOSA_SUR-INF-x6

5.5. MODELO 03: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD FRENTE A LA PRESENCIA DE ARMADO EN LA LOSA

PROCEDE DE: Modelo02: FDS_02.psm

CON LAS SIGUIENTES MODIFICACIONES:

Se establecen dos variantes del modelo anterior: una en la que se respeta el armado presente en la estructura real y otra en la cual se eliminan las barras corrugadas, quedando una losa homogénea de hormigón.

Para observar los cambios que pueden generarse en el modelo de simulación de incendios frente a este factor, se emplearán unos sensores de control similares a los establecidos en apartados anteriores (5.3 y 0). Sin embargo, en este caso se localizan en la superficie superior del tablero. Dichos sensores se listan a continuación:

- LOSA_DIR-SUP-CL
- LOSA_DIR-SUP-x6
- LOSA_MSUR-SUP-x4
- LOSA_MSUR-SUP-x5
- LOSA_SUR-SUP-CL
- LOSA_SUR-SUP-x6

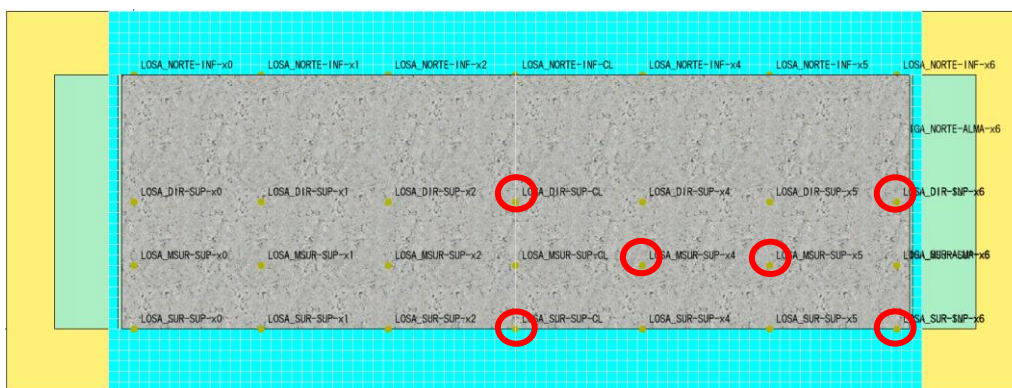


Fig. 36. Selección de termopares para el análisis de sensibilidad frente al armado.

Al mismo tiempo, se extraerán *lices* de temperatura en los planos $x=CL$ e $y=1$ para visualizar el comportamiento de la región de gases más calientes y cotejar con los resultados obtenidos en los sensores.

5.6. MODELO 04: ANÁLISIS DE INFLUENCIA DE PRESENCIA DE ALAS INFERIORES DE VIGAS

PROCEDE DE: Modelo 03: FDS_03.psm

CON LAS SIGUIENTES MODIFICACIONES:

Para la obtención de resultados válidos para el modelo de transferencia de calor, se pretende que los mismos tengan una precisión adecuada. Uno de los detalles que se observaba en anteriores modelos es que las alas inferiores de las vigas no eran capaces de ser reproducidas en el modelo de cálculo debido a su falta de adaptación frente al mallado escogido, Fig. 37.

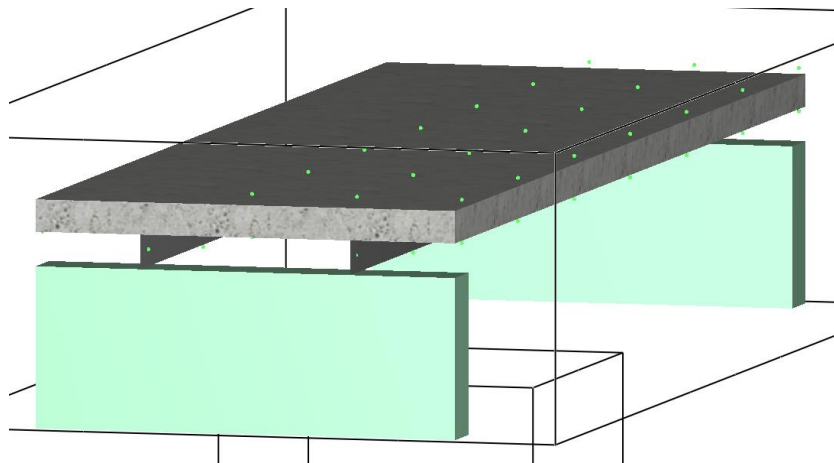


Fig. 37. Vista en Smokeview de la sección del tablero. Modelo FDS_03.psm.

Por tanto, este modelo pretende ajustar las alas inferiores al mallado, de modo que se tengan en consideración en el modelo de incendio y con ello establecer unas conclusiones acerca de la influencia de dichas alas.

Del mismo modo que ocurría con la adaptación de los sólidos a las dimensiones de la malla, las alas inferiores se han forzado a un tamaño de dos celdas para que el software pueda representarlo adecuadamente, Fig. 38. El ancho de las alas se ve incrementado a 0.166 m.

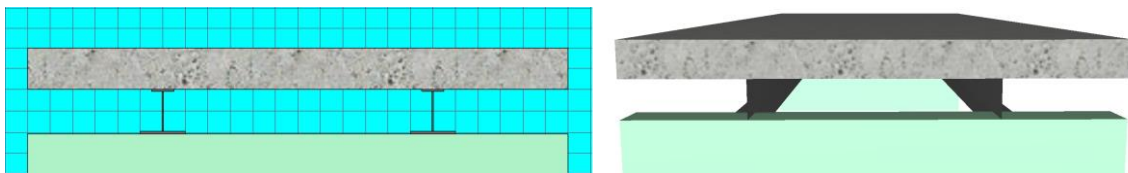


Fig. 38. Visualización 2D en Pyrosim frente a perspectiva en Smokeview. Adaptación de alas inferiores al mallado.

También se incluye un modelo en el cual se incremente la densidad de celdas en las zonas de las vigas, permitiendo recrear las alas inferiores con las mismas dimensiones que las reales, Fig. 39. Esta variante supone incrementar el número de celdas de dicho submallado por un factor aproximado de 4 (de 5.760 celdas a 23.040 celdas). A priori, se intuye que este cambio incrementará notablemente el tiempo de computación.

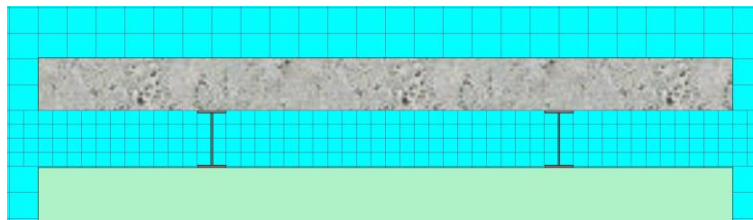


Fig. 39. Visualización 2D en Pyrosim de modelo con alas de dimensiones reales.

Para poder comparar los resultados entre el modelo sin alas inferiores frente a otro modelo con alas inferiores (adaptadas al mallado o de dimensiones reales), se tendrán en cuenta los sensores localizados a media altura del alma en su cara interna, Fig. 40. Se tomarán todos los sensores en ambas vigas, en toda su longitud y con una separación de 1 m.

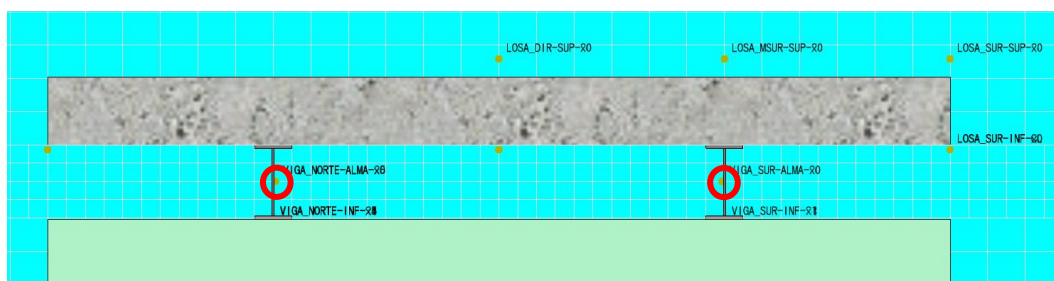


Fig. 40. Posición de la alineación de sensores empleados.

Además, se extraerán *slices* de temperaturas de la región de gases más calientes para observar el comportamiento alrededor de los perfiles IPE-160. Estos *slices* se situarán en planos con $x=1$, $x=2$ y CL.

5.7. MODELO 05: ANÁLISIS DE INFLUENCIA DE LA POSICIÓN DEL QUEMADOR

PROCEDE DE: Modelo 04: FDS_04.psm

CON LAS SIGUIENTES MODIFICACIONES:

En este modelo se pretende estudiar la variación de temperatura de los gases calentados por el quemador y que alcanzan el entorno de la estructura. Se comparará el escenario de fuego empleado en modelos anteriores (quemador pequeño definido en la Tabla 2) frente a un escenario alternativo.

El escenario de fuego alternativo tiene una variación en el HRR y en la posición del mismo. La potencia de fuego se modificará mediante la proposición de un quemador de 1 m² de superficie (cuadrado, de dimensiones de 1 x 1 m). También se procede a variar la altura del quemador, pasando de los 0.15 m de modelos anteriores a 1 m de altura.

De este último modelo (escenario de fuego alternativo) también se obtendrán los flujos de calor. Según las pruebas realizadas por *Wickström, Jansson y Tuovinen* [9], se puede obtener el flujo de calor mediante las superficies de temperaturas adiabáticas (AST) y la temperatura superficial de los sólidos. Dichas variables, aplicadas en la ecuación (8), dan como resultado el flujo de calor.

$$q'_s = \varepsilon_s \cdot \sigma \cdot (T_{AST}^4 - T_s^4) + h \cdot (T_{AST} - T_s) \quad (8)$$

De acuerdo al Eurocódigo-1, parte 1-2 [5], el coeficiente de convección (h) para casos de hidrocarburos tiene un valor de 50 W/m²·K.

Por tanto, será necesario disponer de dispositivos adicionales para obtener lecturas de las AST y de las temperaturas en las superficies de los sólidos. Dichos sensores se han dispuesto con numeraciones crecientes en primer lugar para el eje x y después para el eje y, tal y como se indica en la Fig. 41.

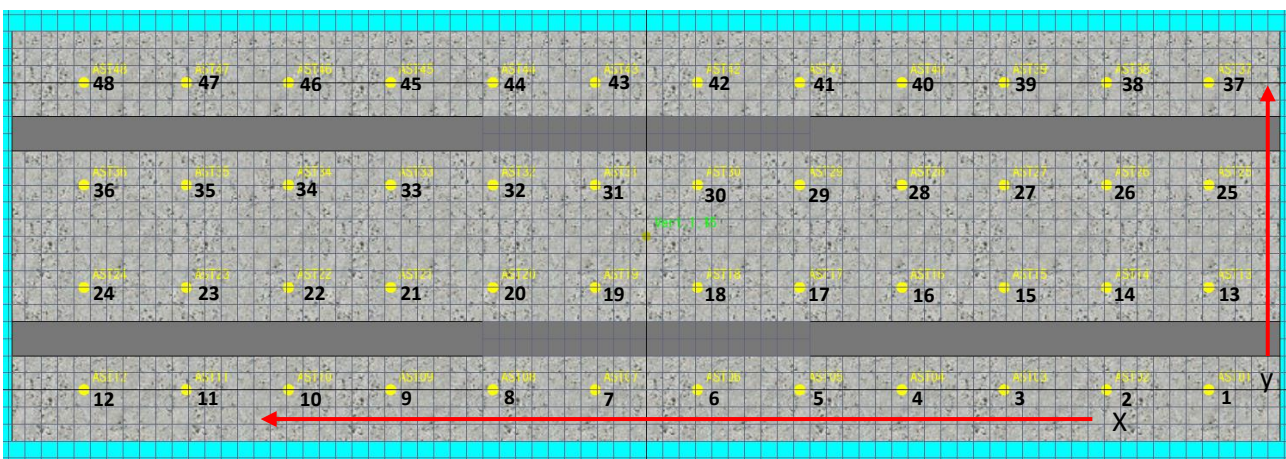


Fig. 41. Distribución de sensores para la medición de AST y temperaturas de sólidos.

En las vigas, se tomarán datos en las caras internas de las almas y en la cara externa del ala inferior, tal y como indica la Fig. 42. En este caso, la distribución se ha realizado con intervalos de 0.25 m, puesto que será la parte más sensible de la estructura.

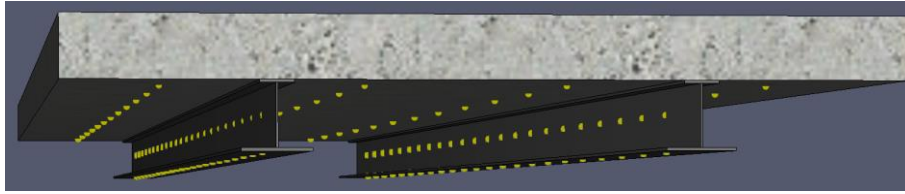


Fig. 42. Distribución de sensores en vigas.

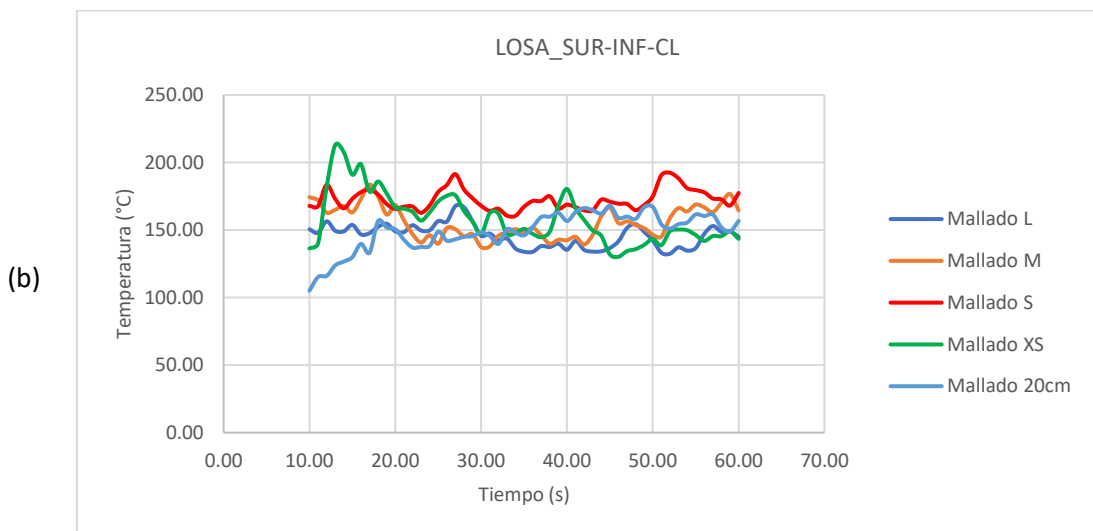
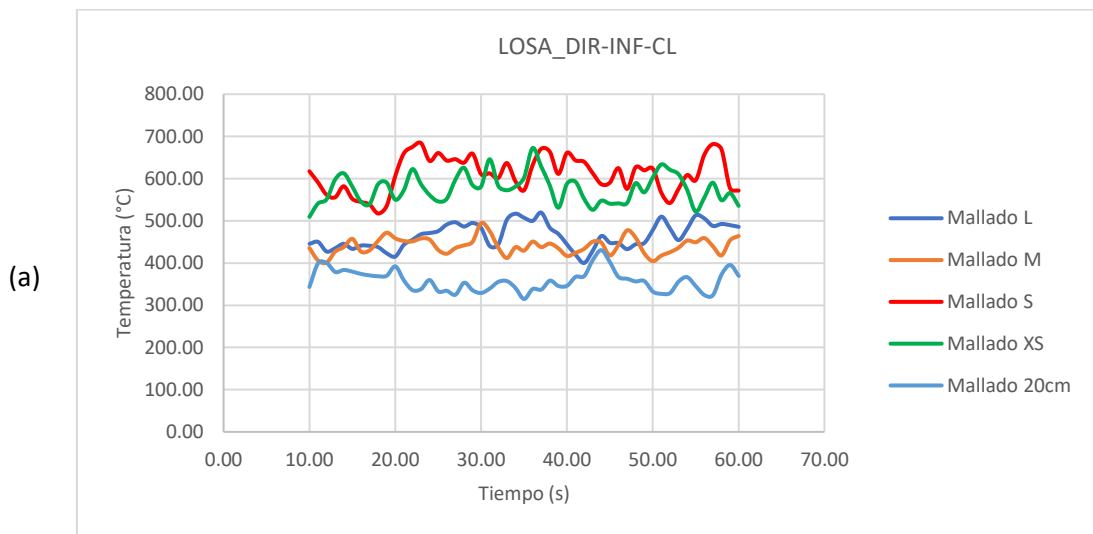
CAPÍTULO 6: ANÁLISIS DE RESULTADOS

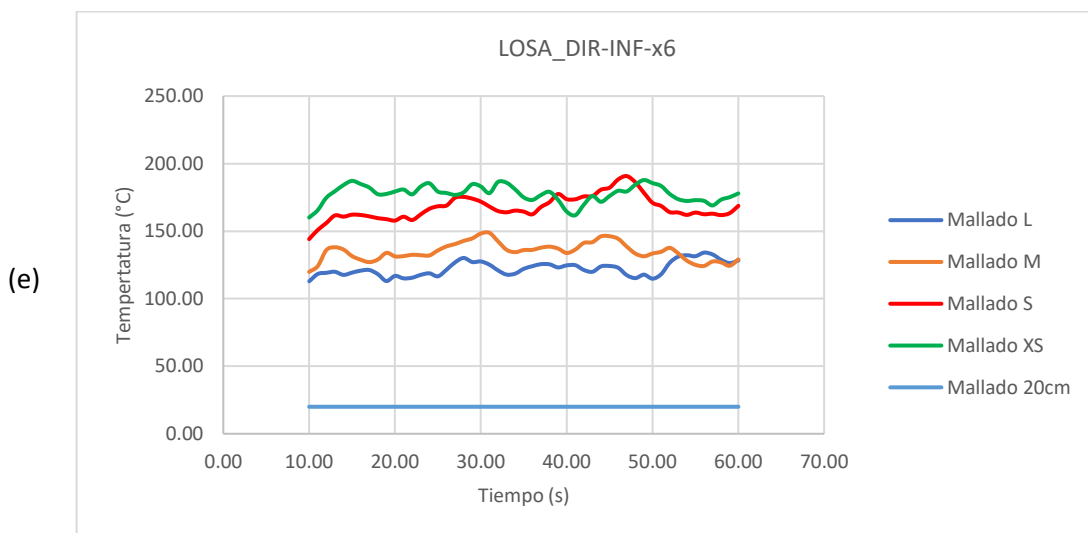
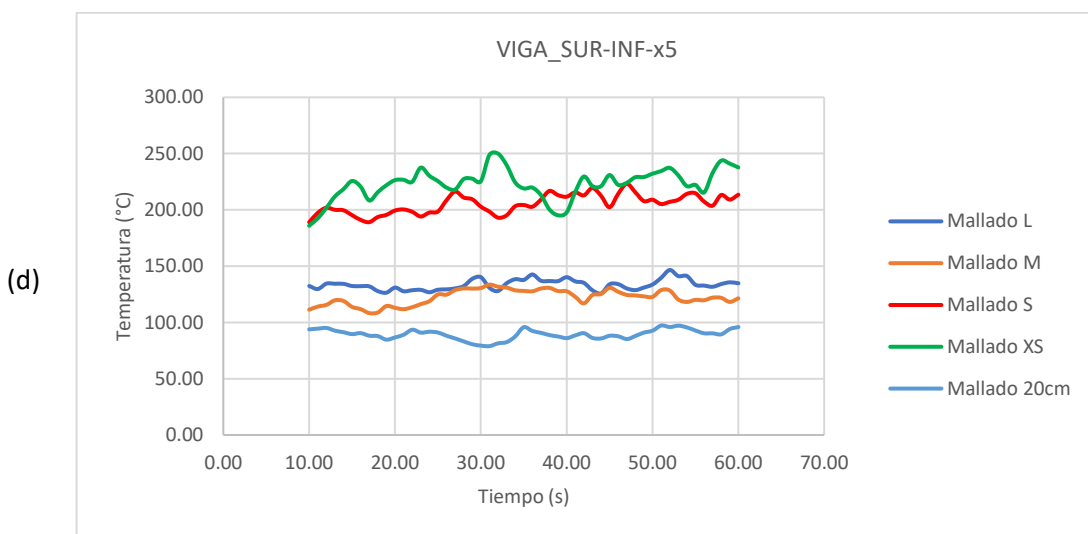
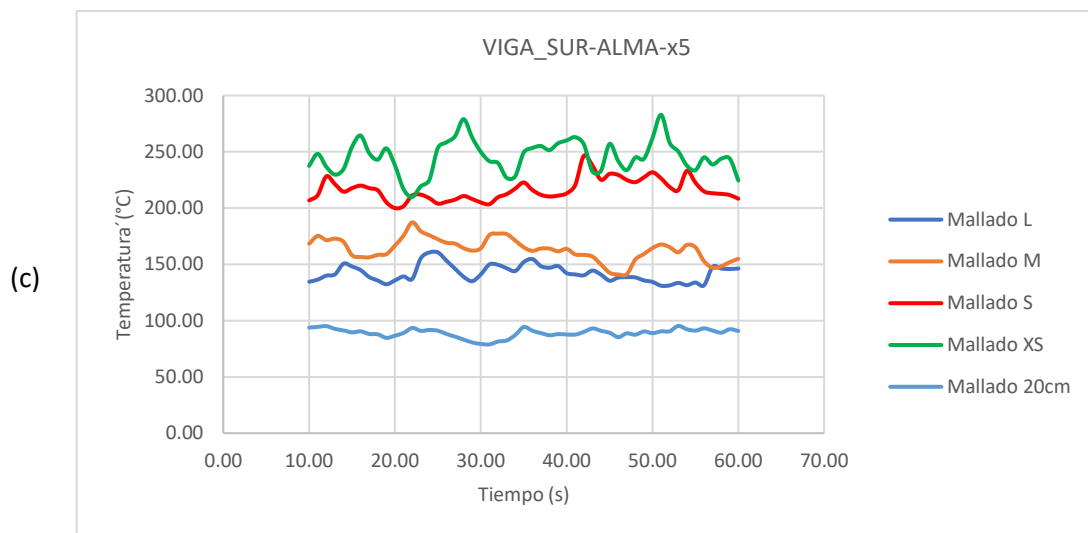
En este capítulo se presentarán los resultados obtenidos de los modelos definidos en el capítulo anterior. Se mantendrá la estructura de presentación, separando los resultados por modelos. Asimismo, se realizará un análisis de los resultados obtenidos, facilitando la obtención de conclusiones posteriores.

6.1. MODELO 01: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD FRENTE AL MALLADO

RESULTADOS:

De los dispositivos termopares seleccionados anteriormente, se obtienen los siguientes resultados:





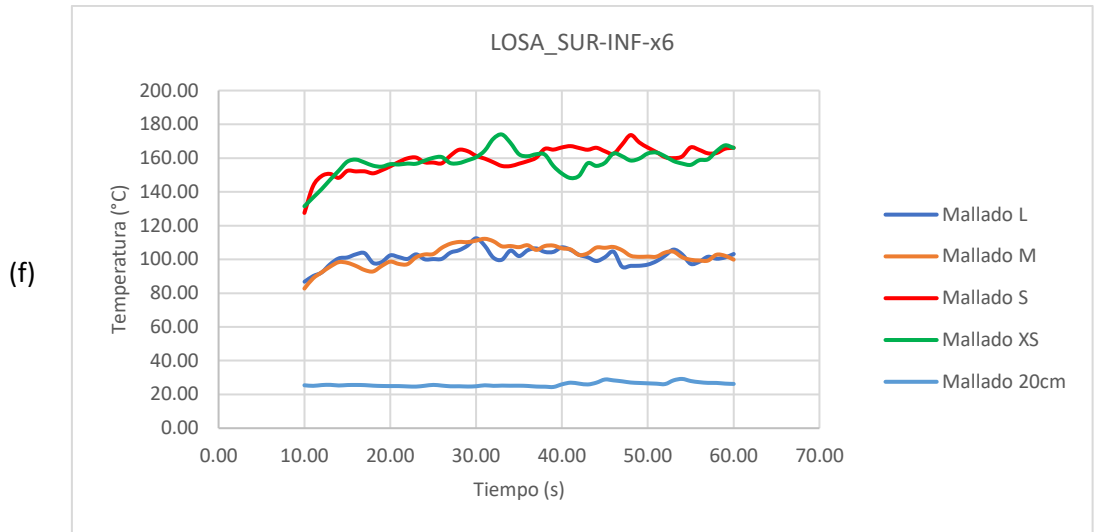
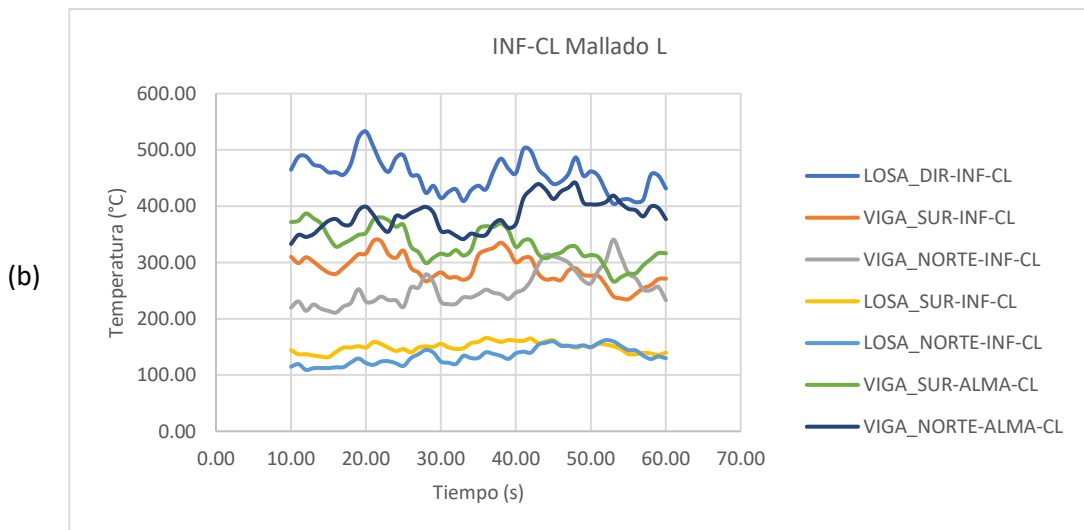
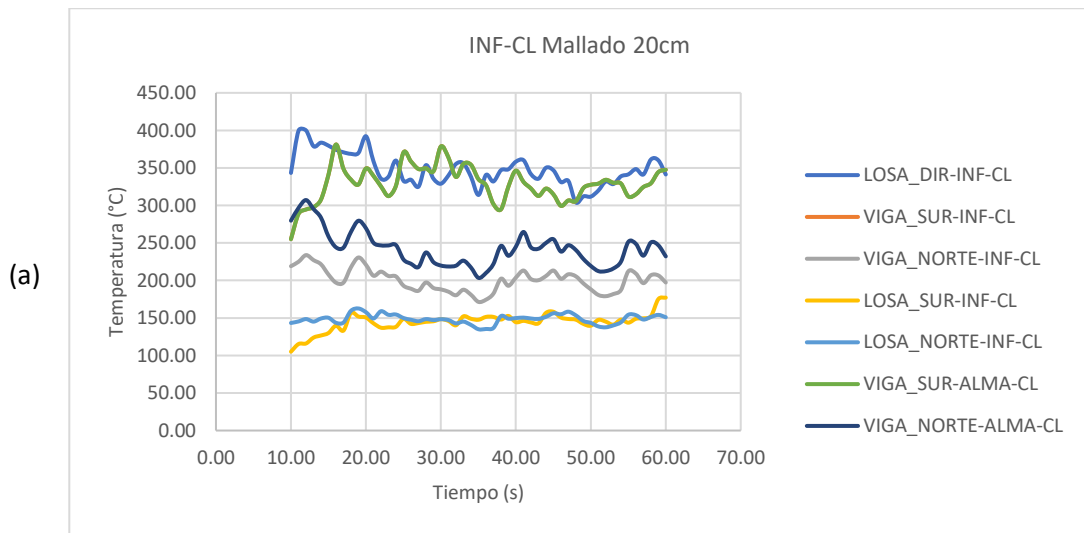
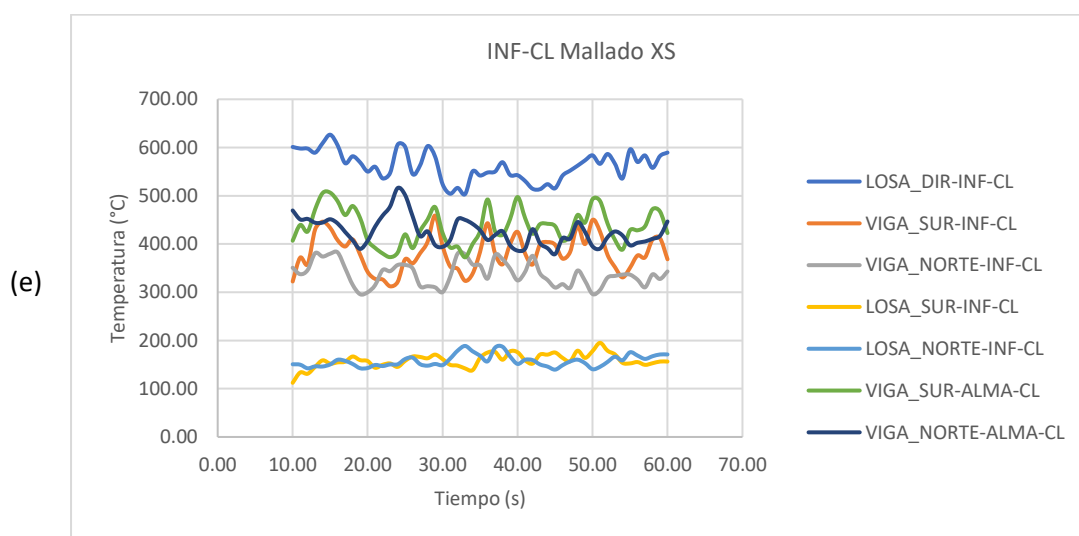
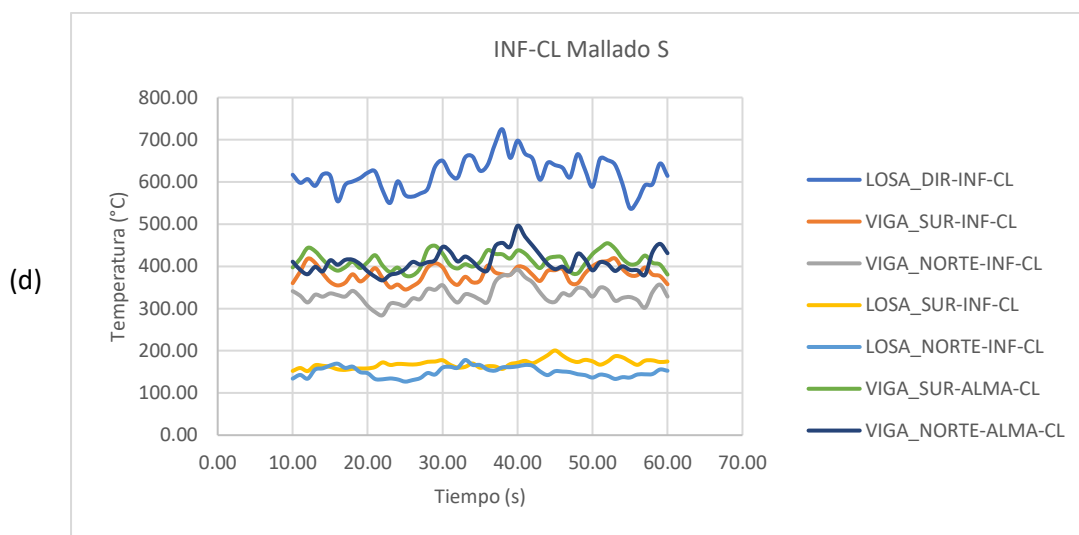
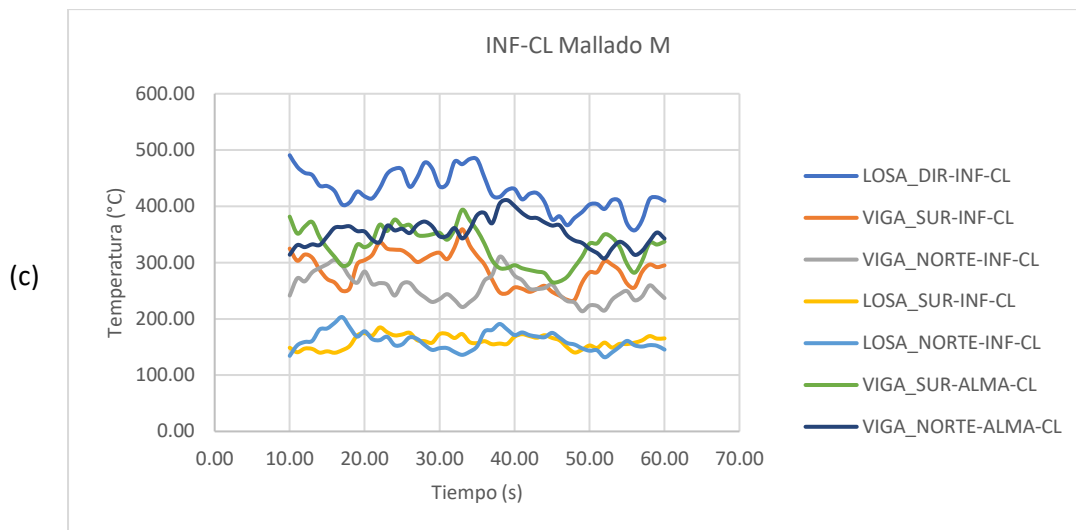
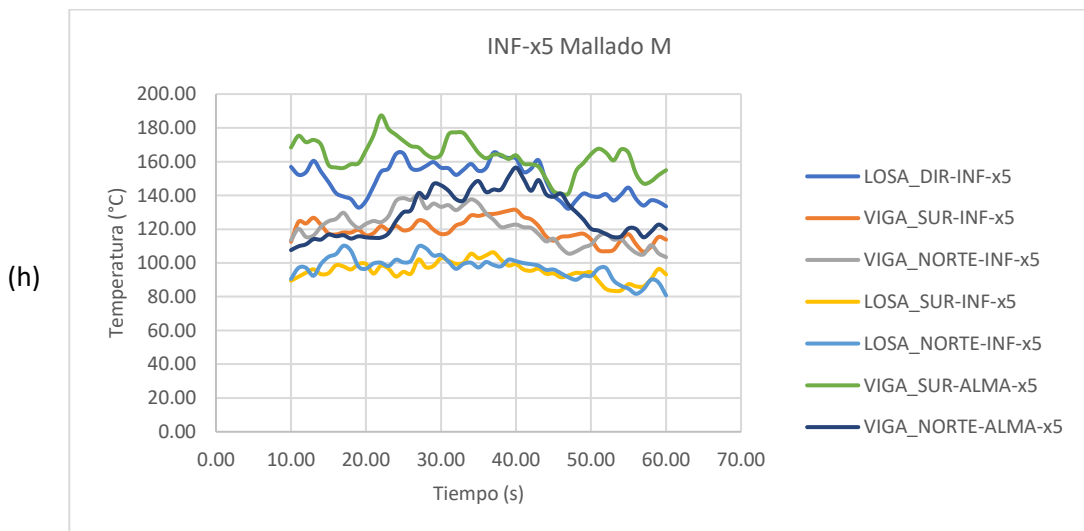
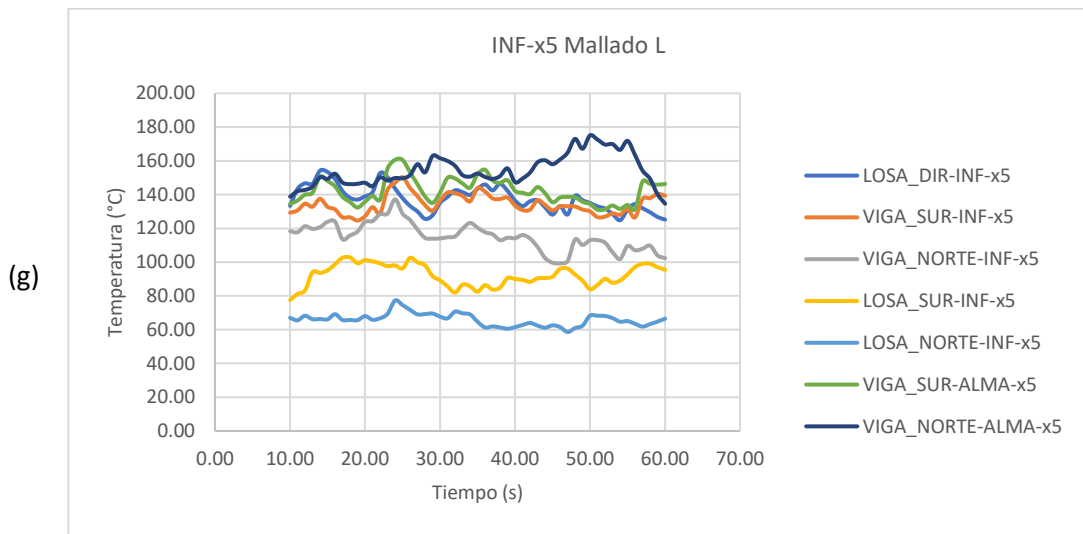
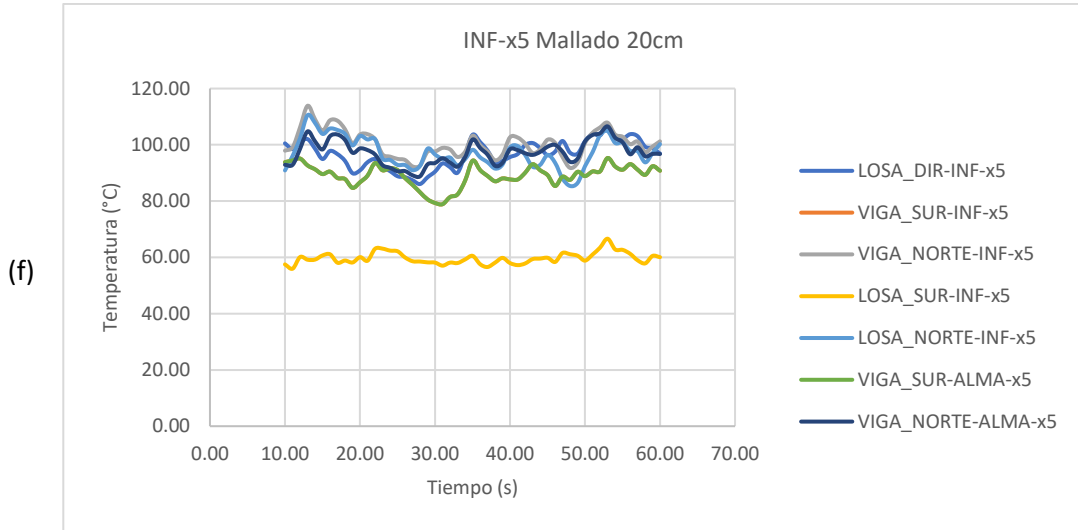


Fig. 43. Representación gráfica de temperaturas de sensores seleccionados. Comparativa de modelos.

También se presentan los resultados de sensores alineados a lo largo de una sección. Con ello se observará la dispersión de las temperaturas dentro de la propia sección. Los resultados, en este caso, se separan según mallados. Las secciones representadas son la de centro luz y x5.







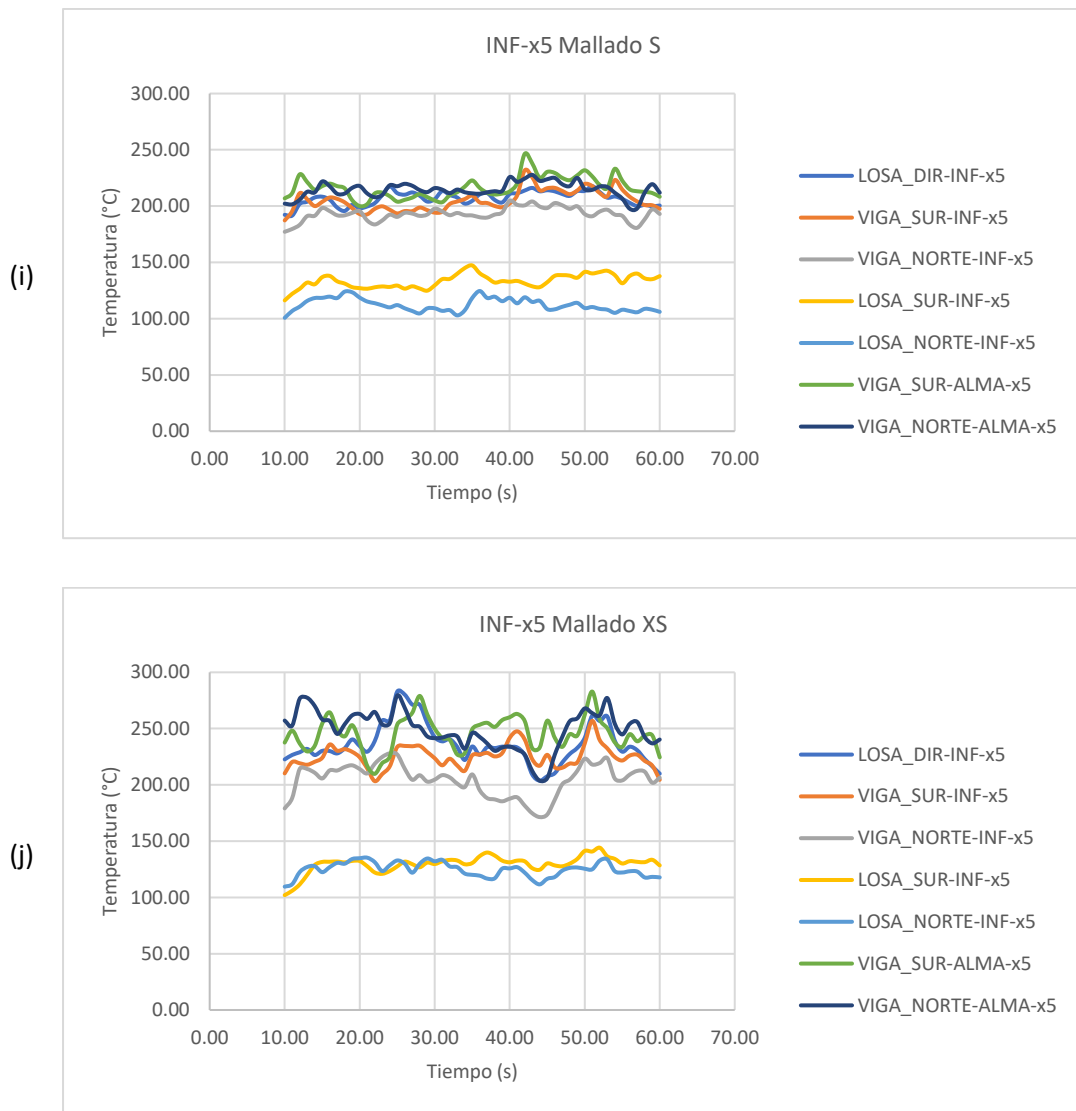
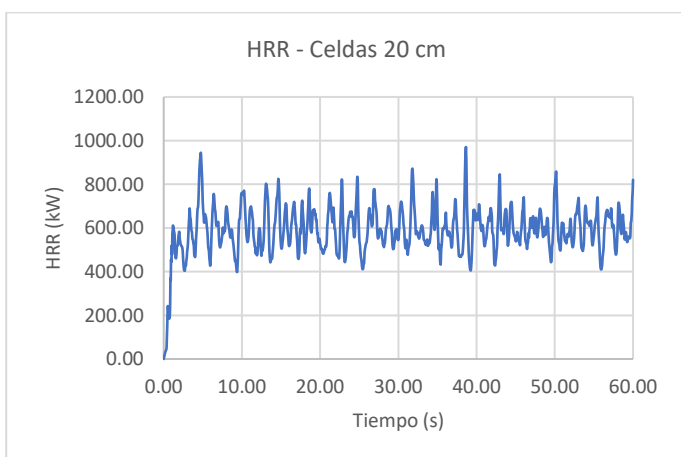
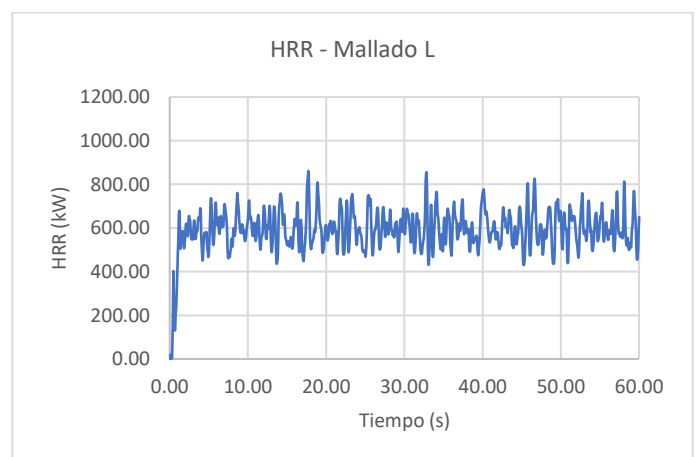


Fig. 44. Representación gráfica de temperaturas por modelos y secciones. Medición de dispersión seccional.

También se observa el HRR que arroja cada mallado:



(a)



(b)

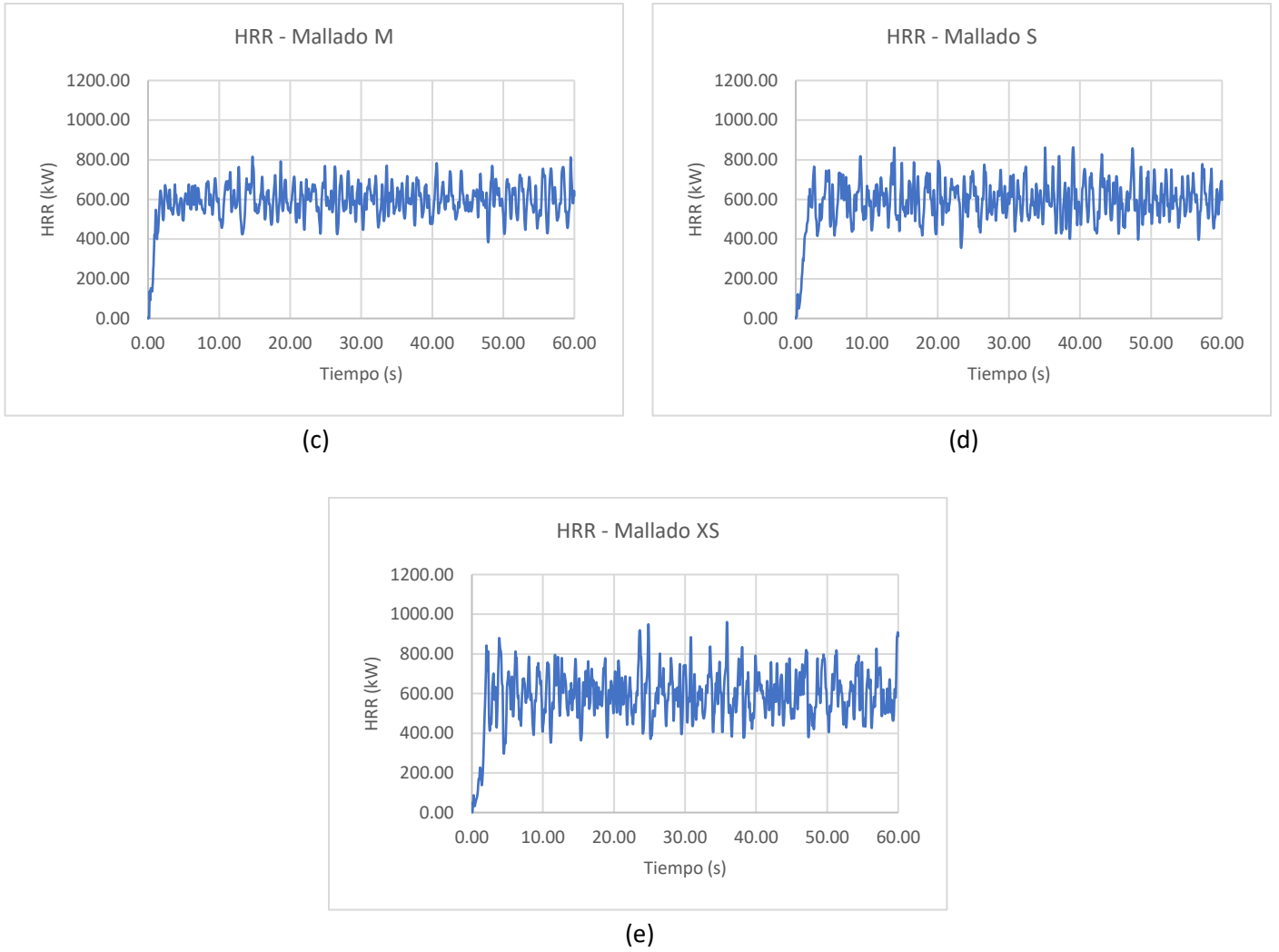


Fig. 45. Representación gráfica de la potencia de fuego observada en cada modelo.

Los valores de HRR correspondientes a los diferentes modelos han sido promediados en la Tabla 12. Dentro de los valores adoptados para obtener los promedios anteriores se han obviado los correspondientes a las ramas de crecimiento (hasta los 2 segundos).

VALORES PROMEDIOS DE HRR	
Modelo	Promedio (kW)
Celdas 20 cm	599.57
Mallado L	599.63
Mallado M	599.64
Mallado S	599.54
Mallado XS	600.75

Tabla 12. Valores promedios de la potencia de fuego.

Los resultados obtenidos por los sensores de control se han promediado a fin de comparar los diferentes mallados frente a un valor de referencia. En este caso, dicho valor es el correspondiente al mallado XS, por resultar de una discretización más precisa. En la tabla siguiente, se presentan los valores promediados, en cada sensor de control.

VALORES PROMEDIOS Y VARIACIÓN DE LOS SENSORES SELECCIONADOS						
Sensor	LOSA_DIR-INF-CL		LOSA_SUR-INF-CL		VIGA_SUR-ALMA-x5	
Modelo	Promedio (°C)	Variación	Promedio (°C)	Variación	Promedio (°C)	Variación
Celdas 20 cm	347.68	-38.17%	329.09	-13.15%	89.10	-63.70%
Mallado L	455.99	-18.91%	287.06	-24.25%	142.26	-42.05%
Mallado M	426.67	-24.12%	287.12	-24.23%	163.19	-33.52%
Mallado S	618.83	10.05%	380.64	0.45%	216.40	-11.84%
Mallado XS	562.31	-	378.93	-	245.47	-

VALORES PROMEDIOS Y VARIACIÓN DE LOS SENSORES SELECCIONADOS						
Sensor	VIGA_SUR-INF-x5		LOSA_DIR-INF-x6		LOSA_SUR-INF-x6	
Modelo	Promedio (°C)	Variación	Promedio (°C)	Variación	Promedio (°C)	Variación
Celdas 20 cm	89.10	-60.41%	20.00	-88.88%	25.58	-84.08%
Mallado L	134.44	-40.26%	120.05	-33.24%	99.62	-37.99%
Mallado M	119.31	-46.98%	129.27	-28.11%	100.18	-37.64%
Mallado S	205.02	-8.90%	167.59	-6.80%	158.56	-1.30%
Mallado XS	225.05	-	179.82	-	160.64	-

Tabla 13. Valores promedios y variación medida en la comparativa de modelos de mallado.

Por otro lado, también resultará importante observar la variación de los resultados a nivel de sección transversal. A continuación, se presentan valores de secciones con alineación centro luz y x5.

VARIACIÓN A NIVEL SECCIONAL ENTRE MALLADOS. SECCIÓN: INF-CL										
MODELO	CELDAS 20 CM		MALLADO L		MALLADO M		MALLADO S		MALLADO XS	
SENSOR	Promedio (°C)	Variación	Promedio (°C)	Variación	Promedio (°C)	Variación	Promedio (°C)	Variación	Promedio (°C)	Variación
LOSA_SUR-INF-CL	144.43	58.46%	149.31	67.26%	159.81	62.54%	169.52	72.61%	158.83	71.75%
VIGA_SUR-INF-CL	329.09	5.35%	288.35	36.76%	287.63	32.59%	380.47	38.52%	381.56	32.15%
VIGA_SUR-ALMA-CL	329.09	5.35%	331.68	27.26%	328.19	23.08%	412.92	33.27%	436.01	22.46%
LOSA_DIR-INF-CL	347.68	-	455.99	-	426.67	-	618.83	-	562.31	-
VIGA_NORTE-ALMA-CL	242.40	30.28%	384.08	15.77%	352.86	17.30%	411.05	33.58%	425.33	24.36%
VIGA_NORTE-INF-CL	200.45	42.35%	253.89	44.32%	254.75	40.29%	333.06	46.18%	337.95	39.90%
LOSA_NORTE-INF-CL	148.50	57.29%	133.88	70.64%	160.92	62.29%	149.23	75.89%	157.66	71.96%

Tabla 14. Valores promedios y variación en sección CL.

VARIACIÓN A NIVEL SECCIONAL ENTRE MALLADOS. SECCIÓN: INF-x5										
MODELO	CELDAS 20 CM		MALLADO L		MALLADO M		MALLADO S		MALLADO XS	
SENSOR	Promedio (°C)	Variación	Promedio (°C)	Variación	Promedio (°C)	Variación	Promedio (°C)	Variación	Promedio (°C)	Variación
LOSA_SUR-INF-x5	59.70	38.27%	92.22	32.97%	95.34	35.98%	133.42	35.52%	129.73	44.96%
VIGA_SUR-INF-x5	89.10	7.88%	134.44	2.28%	119.31	19.88%	205.02	0.92%	225.05	4.53%
VIGA_SUR-ALMA-x5	89.10	7.88%	142.26	-3.41%	163.19	-9.59%	216.40	-4.58%	245.47	-4.13%
LOSA_DIR-INF-x5	96.71	-	137.57	-	148.90	-	206.91	-	235.73	-
VIGA_NORTE-ALMA-x5	97.18	-0.48%	154.43	-12.25%	128.67	13.59%	214.61	-3.72%	248.85	-5.57%
VIGA_NORTE-INF-x5	100.36	-3.77%	115.12	16.32%	121.33	18.52%	193.00	6.72%	204.45	13.27%
LOSA_NORTE-INF-x5	97.14	-0.44%	65.89	52.10%	97.06	34.81%	112.12	45.81%	124.73	47.09%

Tabla 15. Valores promedios y variación en sección x5.

ANÁLISIS:

Según lo planteado en las hipótesis, se aprecia que a partir de los 10 segundos de simulación no figuran datos pertenecientes a la rama de crecimiento del fuego. Se consigue establecer las temperaturas dentro de un rango fijo, lo que permitió extraer valores promedios y medir las variaciones.

De las gráficas y valores tabulados en la parte de resultado, se pueden esclarecer una serie de observaciones y conclusiones. Algunas de ellas están relacionadas con el software empleado, mientras que otras implican también a la geometría del caso y los fenómenos físicos que se producen.

En las gráficas correspondientes a sensores localizados en puntos más extremos de la losa (x6), Fig. 43 (e) y Fig. 43 (f), se observa que el mallado compuesto por celdas de 20 cm arroja resultados muy dispares en comparación con el resto de mallados. En estos casos, los resultados pueden verse influenciados por los algoritmos internos del software, que consideran la celda llena e incluyen el

sensor dentro de un sólido. En el visor *Smokeview* incluido en el software, se observa una pérdida de elementos (alas y almas de vigas) que no son capaces de ajustarse al mallado definido, Fig. 46. Además, por este efecto anterior, se aprecia también que los elementos presentan unas dimensiones mayores o menores a las definidas (mayor espesor en alzado de estribos, quemador reducido, pie de estribos reducidos, etc.).

Por tanto, el mallado de celdas de 20 cm no supone una buena elección para la geometría que presenta el tablero. La forma en la que ajusta la geometría distorsiona groseramente los resultados. Sin embargo, por su gran simplicidad, se obtienen tiempos computacionales bajos. Esto podría ser idóneo para primeras aproximaciones de un modelo complejo.

Por otra parte, los mallados L y M presentan una gran similitud en los resultados. Este comportamiento se acentúa en gráficas como Fig. 43 (d) y Fig. 43 (f), donde los valores son muy aproximados y difiriendo de otros modelos (mallado S, por ejemplo). En la Tabla 13, la diferencia observada frente al mallado de referencia (mallado XS) puede ser de hasta el orden de 40%.

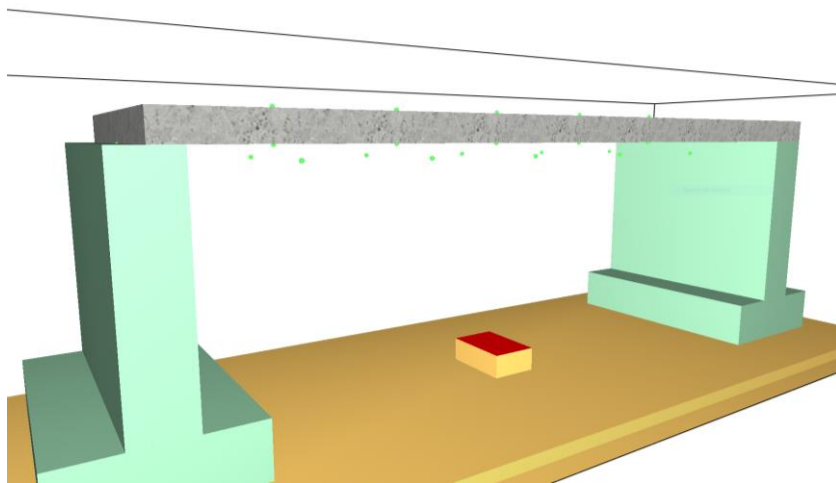


Fig. 46. Visualización en *Smokeview*. Desajuste de geometría y pérdida de elementos.

Por la diferencia en resultados entre los mallados L y M con respecto al mallado S, de hasta 150°C en algunos casos, se planteó el cálculo de un mallado con un nivel de detalle aún mayor. Aunque el mallado XS no resulta eficiente en cuanto a tiempo computacional, la precisión de los resultados servirá para comprobar la validez de los resultados ofrecidos por el mallado S. Comparando los valores ofrecidos por los 4 mallados, los resultados del mallado XS en la Tabla 13, Tabla 14 y Tabla 15 verifican la validez de los resultados del mallado S e indicando que los mallados L y M ofrecen resultados no suficientemente precisos.

En cuanto a la variabilidad que se produce entre los mallados S y XS, dichas diferencias pueden deberse al ruido que el software introduce, la aleatoriedad de las llamas, cierta sensibilidad a la diferencia de tamaño de las celdas, entre otros. Sin embargo, el valor de variación máxima en torno al 10% puede considerarse una aproximación aceptable.

A nivel seccional, en la Tabla 14 y Tabla 15 todos los casos muestran una dispersión de las temperaturas registradas dentro de la alineación de los sensores en centro luz. Es decir, al concentrar la llama bajo centro luz y centro del eje longitudinal del tablero, el sensor localizado en dicho punto registra mayores temperaturas. Conforme se aleja hacia los extremos de esa sección transversal, las

temperaturas se ven disminuidas. Este fenómeno no ocurre para los mallados S y XS en la sección x5 (Tabla 15), donde las temperaturas registradas en las vigas no difieren en un porcentaje significativo (10%) con respecto al considerado foco en la sección (directriz). Incluso, en algunos sensores, la temperatura en alguna de las vigas puede superar a la de la directriz. Dicho resultado depende básicamente de la dispersión de la región de gases más calientes que el software considere.

Como sucede con los sensores de control, en las secciones, los modelos de mallado S y XS vuelven a presentar temperaturas más parejas entre sí en comparación con los mallados L y M.

Por tanto, se considera que el tamaño de malla más adecuado para la realización de este estudio corresponde con el mallado S.

6.2. MODELO 02: ANÁLISIS DEL VOLUMEN DE CONTROL

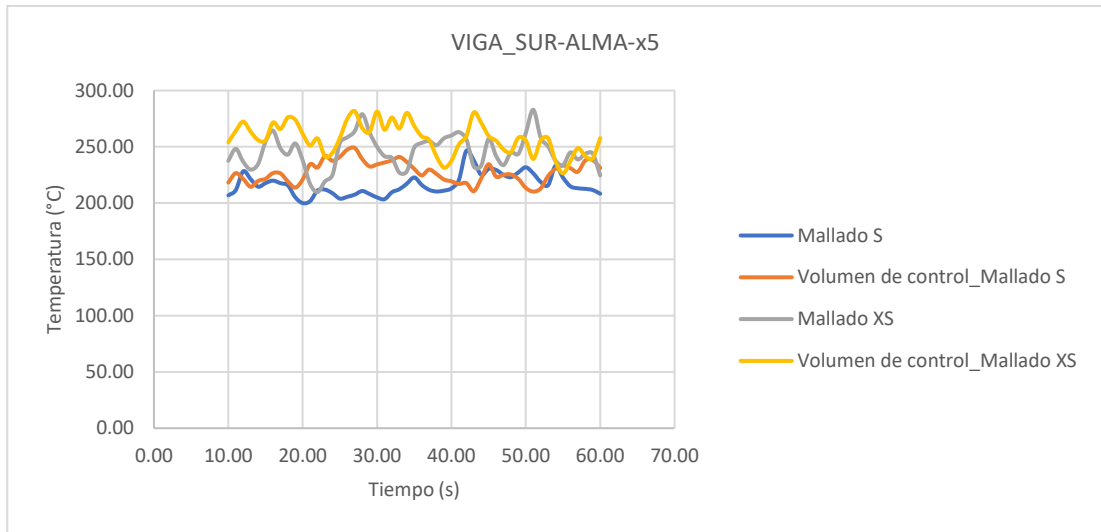
RESULTADOS:

La comparativa fundamental en este caso es la diferencia que pueda generarse entre los resultados del mallado S original frente a un mallado S con volumen de control reducido según las pautas marcadas en el punto anterior. También se incluirán resultados de los mallados XS y XS con volumen de control reducido para verificar la solución adoptada.

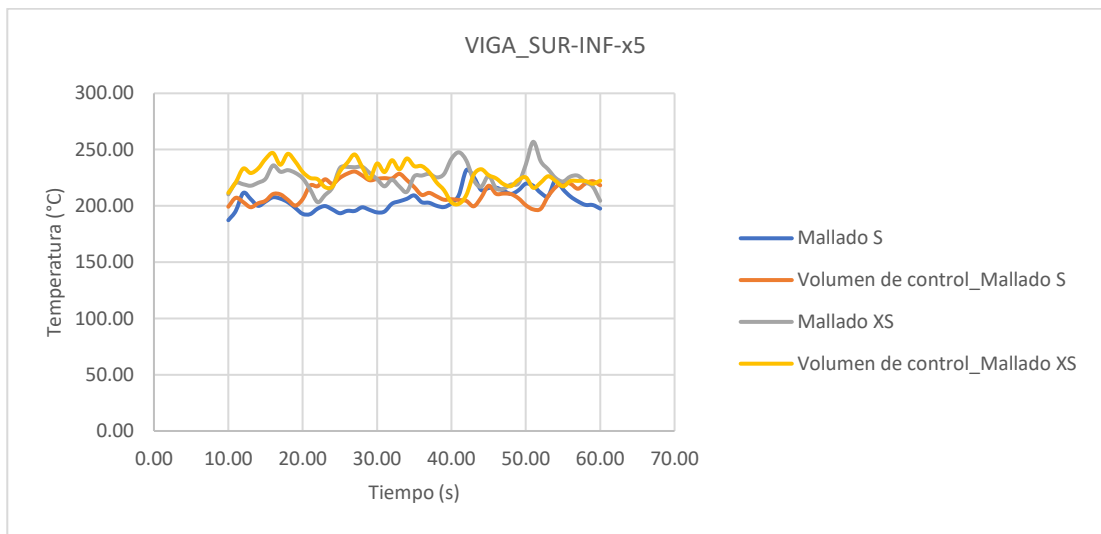
Los resultados obtenidos se muestran gráficamente en la Fig. 47.



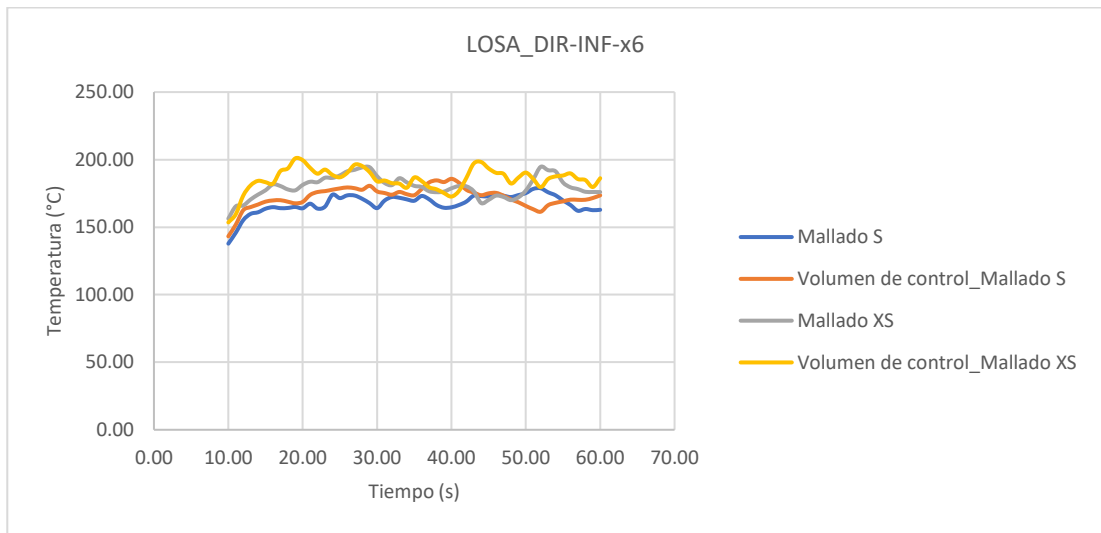
(c)



(d)



(e)



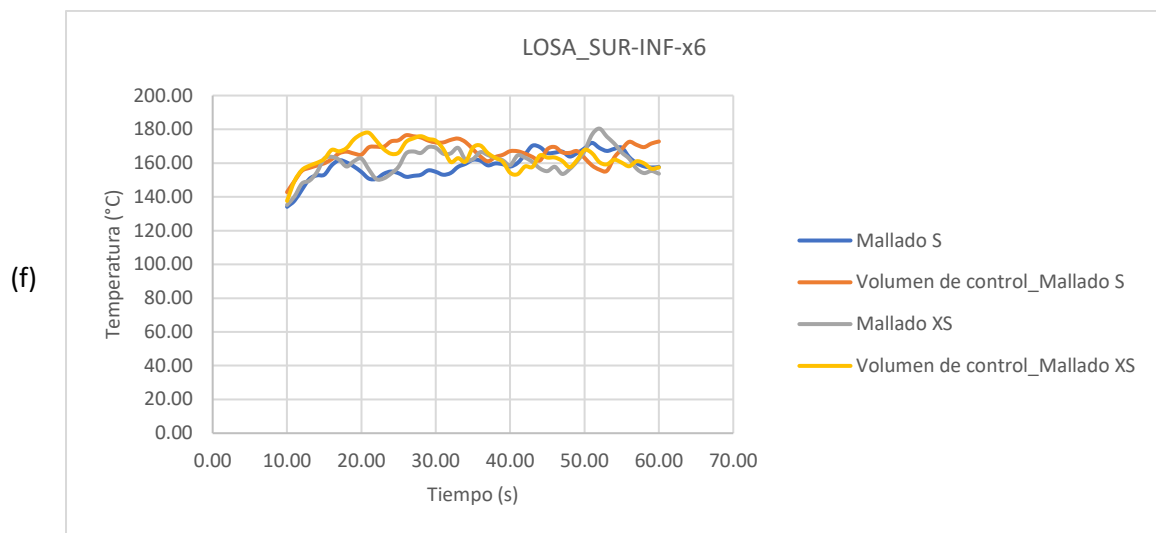


Fig. 47. Representación gráfica de las temperaturas de los modelos. Comparativa de reducción de volumen de control.

Estos resultados pueden resumirse igualmente de forma tabulada, ofreciendo los valores promedios en cada sensor y midiendo su variación con respecto al modelo que se considera más exacto, modelo de mallado XS.

VALORES PROMEDIOS Y VARIACIÓN DE LOS SENSORES SELECCIONADOS

Sensor	LOSA_DIR-INF-CL		LOSA_SUR-INF-CL		VIGA_SUR-ALMA-x5	
Modelo	Promedio (°C)	Variación	Promedio (°C)	Variación	Promedio (°C)	Variación
Mallado S	618.83	10.05%	380.47	-0.28%	216.40	-11.84%
Mallado XS	562.31	-	381.56	-	245.47	-
Vol. Control Mallado S	586.62	4.32%	348.49	-8.67%	227.64	-7.27%
Vol. Control Mallado XS	547.33	-2.67%	373.54	-2.10%	257.73	4.99%

VALORES PROMEDIOS Y VARIACIÓN DE LOS SENSORES SELECCIONADOS

Sensor	VIGA_SUR-INF-x5		LOSA_DIR-INF-x6		LOSA_SUR-INF-x6	
Modelo	Promedio (°C)	Variación	Promedio (°C)	Variación	Promedio (°C)	Variación
Mallado S	205.02	-8.90%	167.59	-6.80%	158.56	-1.30%
Mallado XS	225.05	-	179.82	-	160.64	-
Vol. Control Mallado S	212.78	-5.45%	172.36	-4.15%	166.18	3.45%
Vol. Control Mallado XS	226.78	0.77%	185.50	3.16%	163.66	1.88%

Tabla 16. Valores promedios y variación medida de los modelos comparados de volumen de control.

ANÁLISIS:

Con respecto al modelo resultante del apartado 5.3, la reducción de volumen en el mallado S supone la eliminación de 71.280 celdas (129.600 celdas frente a las 58.320 actuales), un 55% menos de elementos de cálculo. Dicha reducción deriva también en una mejora en los tiempos de cálculo.

La reducción de los volúmenes de control de los modelos genera unos resultados, en general, aceptables. La variación medida con respecto al modelo de referencia (Mallado XS) apenas supera un valor absoluto de un 10%, habiendo muchos otros casos en los que se sitúa por debajo del 5%.

Si se compara el modelo de referencia (Mallado XS) con su homónimo de volumen reducido, se aprecia que las variaciones en todos los sensores son inferiores a un valor absoluto del 5%.

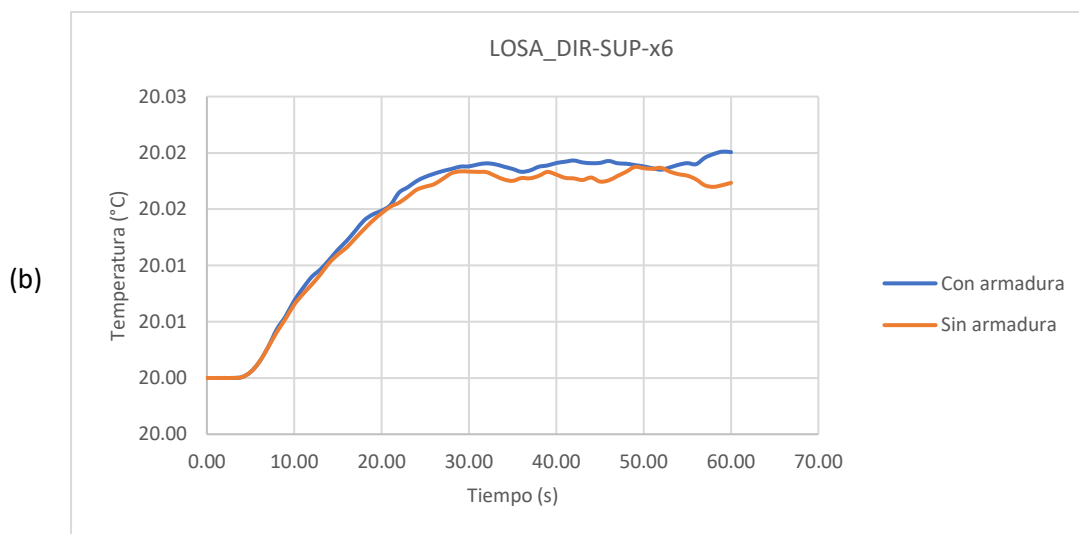
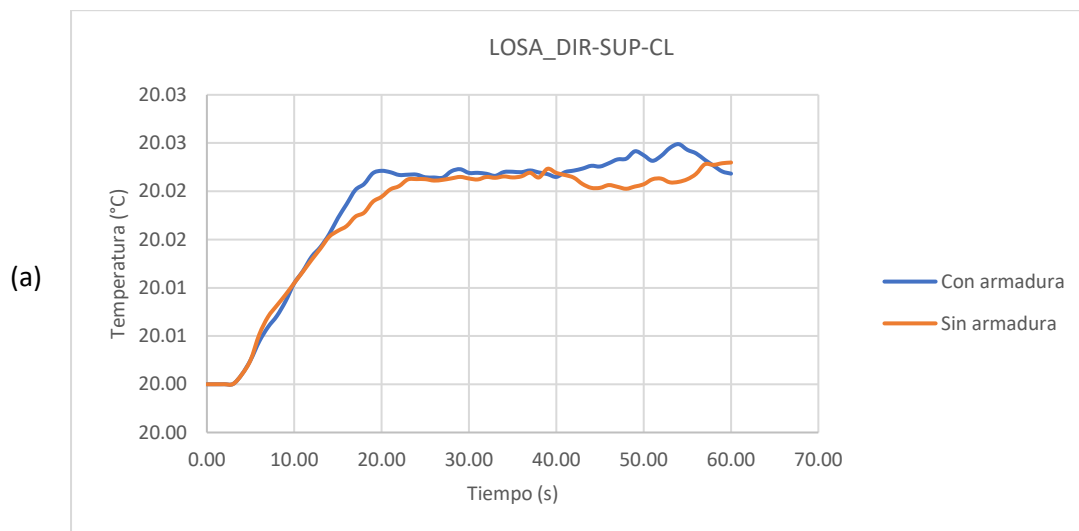
Dentro de estas comparativas, debería introducirse el factor del ruido que introduce el programa. Es decir, a pesar de que las diferencias son bajas, si se eliminara el ruido introducido por el software, la variación sería aún menor.

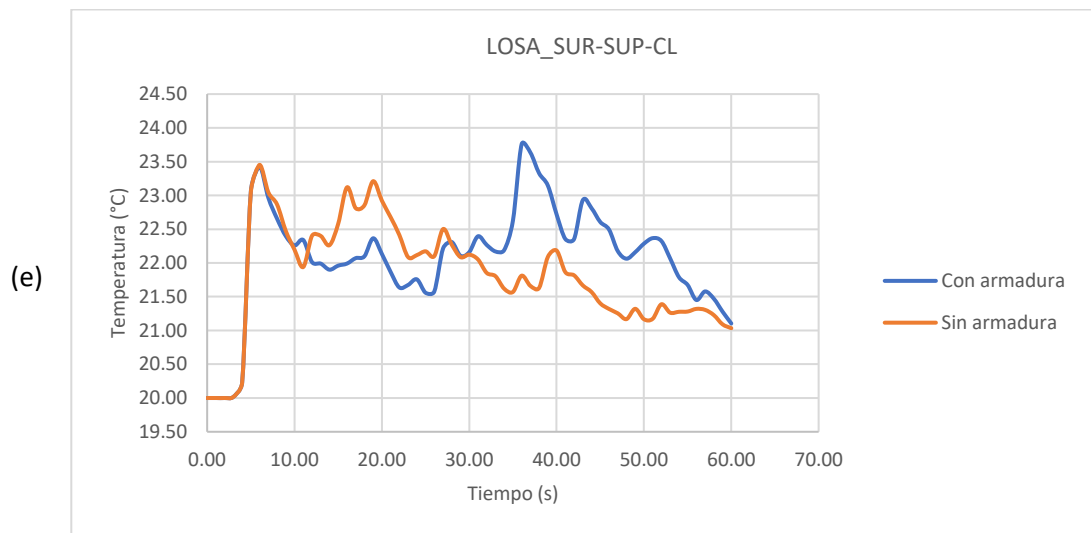
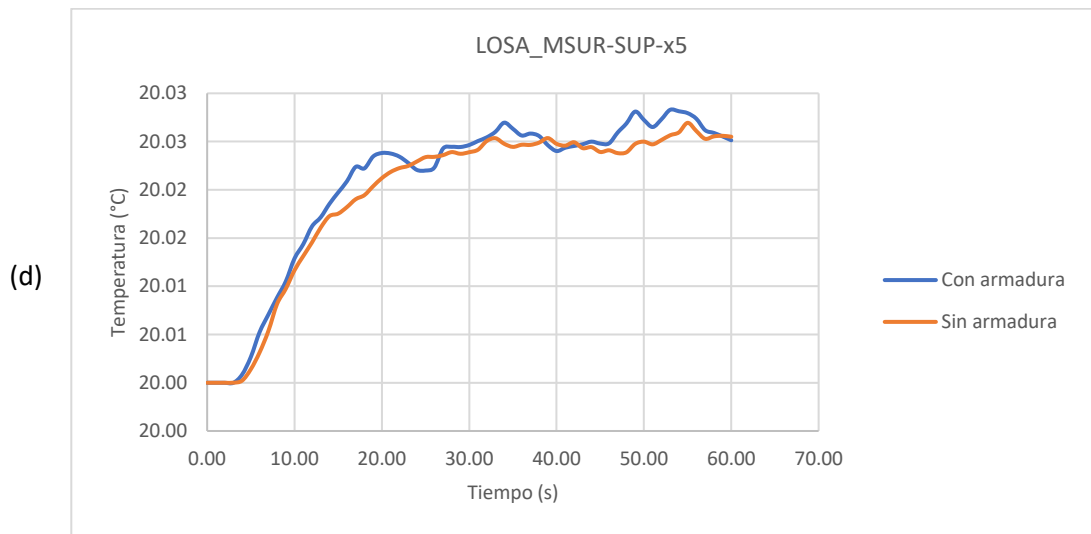
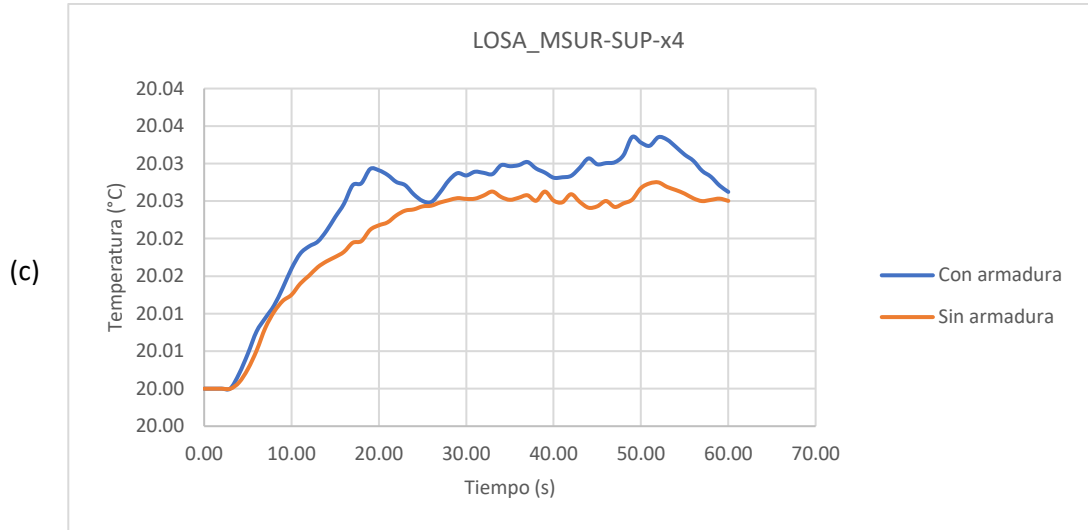
Esto conduce a considerar que la reducción del volumen de control empleada es correcta.

6.3. MODELO 03: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD FRENTE A LA PRESENCIA DE ARMADO EN LA LOSA

RESULTADOS:

Los resultados corresponden con los sensores establecidos anteriormente. Por lo que se procede a comparar los resultados que arrojan ambas variantes:





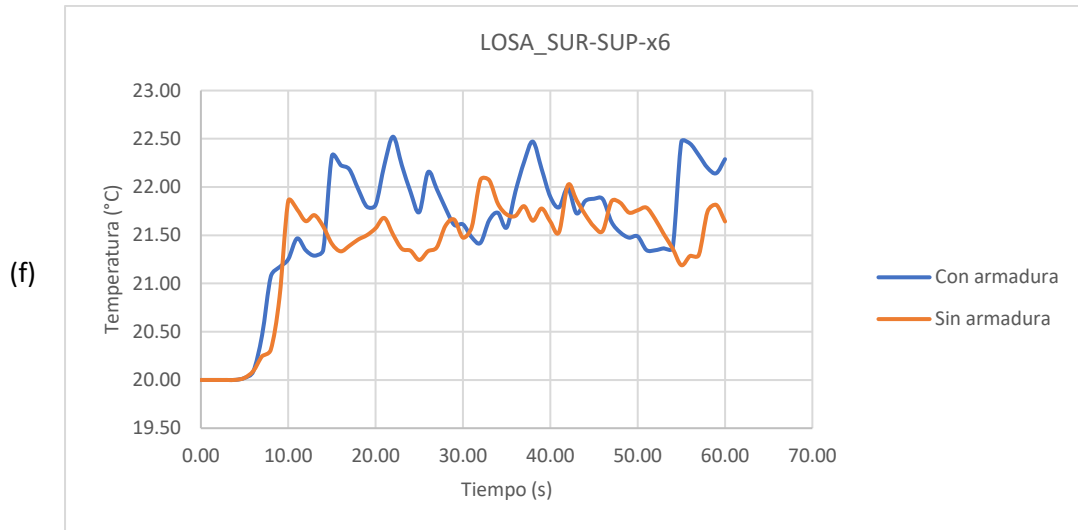


Fig. 48. Representación gráfica de las temperaturas en sensores seleccionados. Influencia de armaduras.

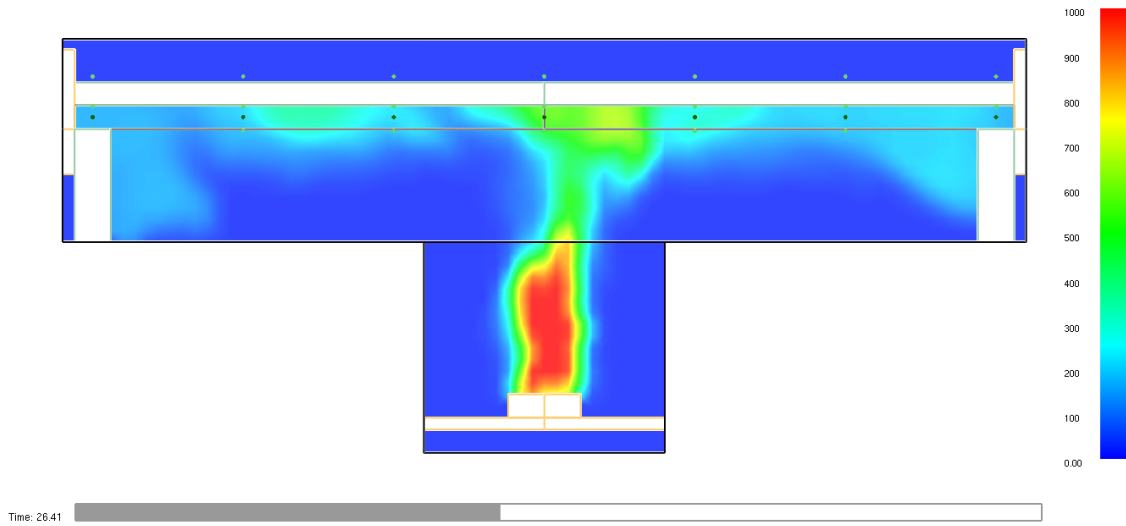


Fig. 49. Slice de temperaturas en $y=1$.

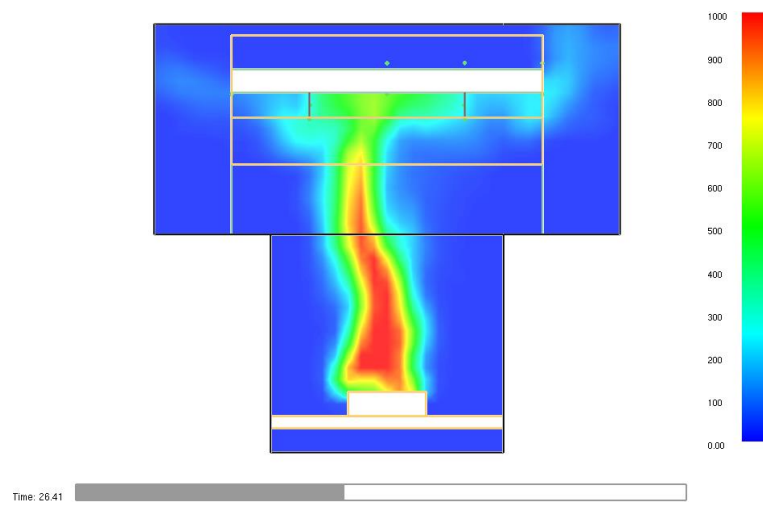


Fig. 50. Slice de temperaturas en $x=CL$.

También se ha calculado las diferencias promedias en valor absoluto para cada sensor, presentando dichos resultados en la Tabla 17.

DIFERENCIA ENTRE MODELOS ANTE ARMADO						
Sensor	LOSA_DIR-SUP-CL	LOSA_DIR-SUP-x6	LOSA_MSUR-SUP-x4	LOSA_MSUR-SUP-x5	LOSA_SUR-SUP-CL	LOSA_SUR-SUP-x6
Δ promedio (°C)	0.00118	0.00077	0.00103	0.00052	0.57675	0.39019

Tabla 17. Diferencias promedias en sensores ante presencia de armado.

ANÁLISIS:

A partir de los resultados obtenidos, los valores de diferencias promedias resultan ser muy bajos, con máximos del orden de 0.5 °C, que pueden ser considerados poco relevantes frente a las temperaturas máximas que registran los sensores (20-23°C).

Las máximas diferencias se producen generalmente en los sensores que se localizan en los bordes longitudinales del tablero, Fig. 48 (e) y Fig. 48 (f). Estos sensores se ven ligeramente afectados por la región de gases más calientes que asciende por dichos bordes. La rama de crecimiento de las temperaturas en estos sensores es brusca y apuntada, produciéndose en fases tempranas por debajo de los 10 segundos.

En el resto de sensores presentan un comportamiento similar entre ellos, con una rama de crecimiento suave y con una tendencia a la estabilización a partir de los 20 segundos, aproximadamente. La variación de temperaturas entre modelos para estos sensores resulta casi inapreciable, puesto que se tratan de diferencias del orden de milésimas.

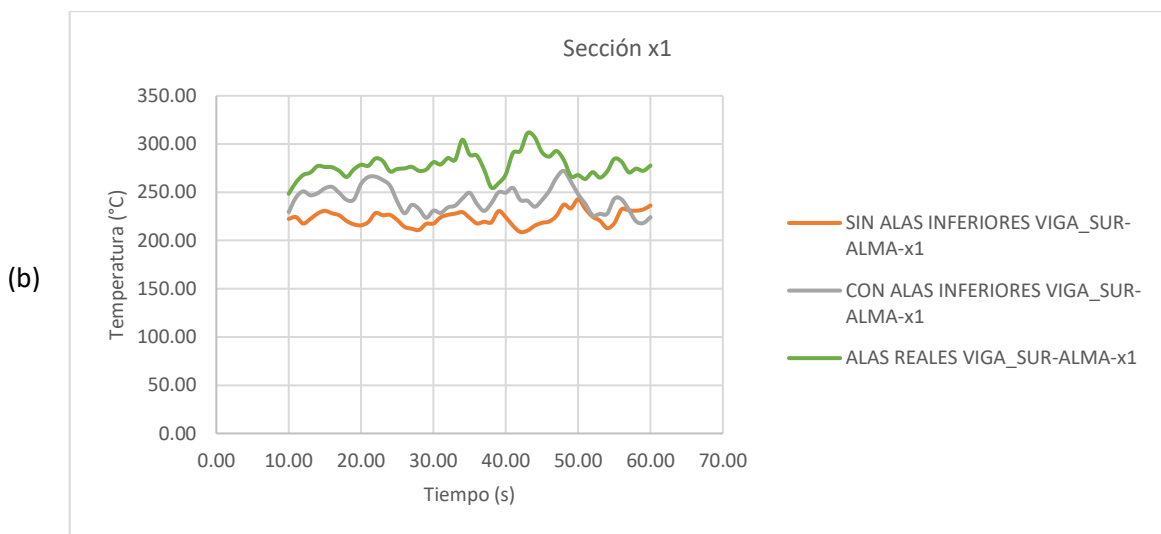
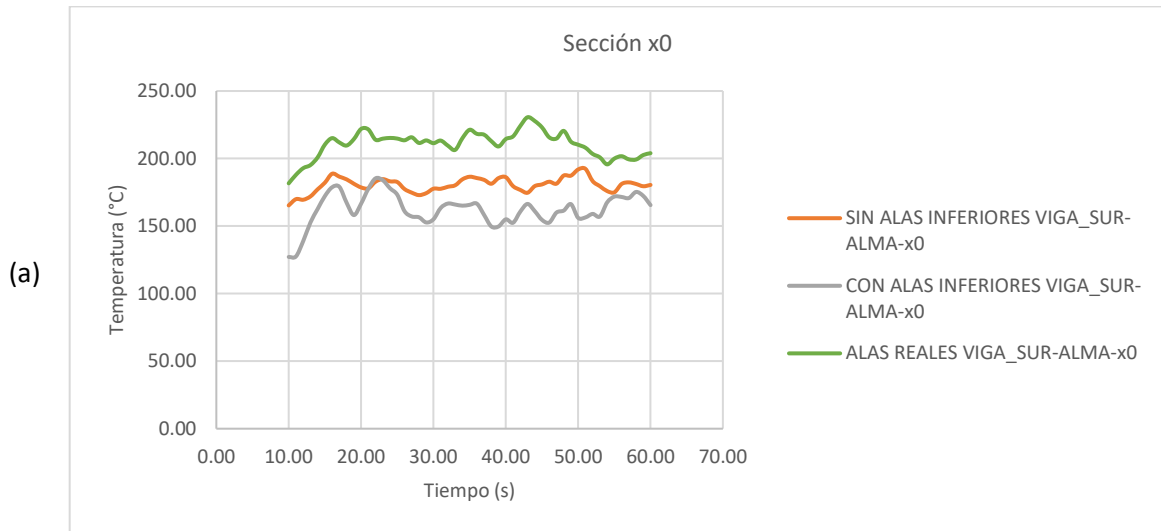
Estos resultados quedan contrastados con lo que se puede apreciar en la Fig. 49 y Fig. 50. Al producirse la elevación de la región de gases más calientes desde el quemador, se encuentra con un obstáculo (tablero) y tiende a dispersarse por los laterales libres (bordes de mayor longitud). A su paso, por dichos bordes entran en contacto leve con los sensores situados en estos extremos, efecto visible sobre todo en la Fig. 50.

Por tanto, es posible despreciar los efectos térmicos que introduce la inclusión de armado en la losa en los modelos de simulación de incendios. Esto ofrece la ventaja de simplificar el modelo en este aspecto.

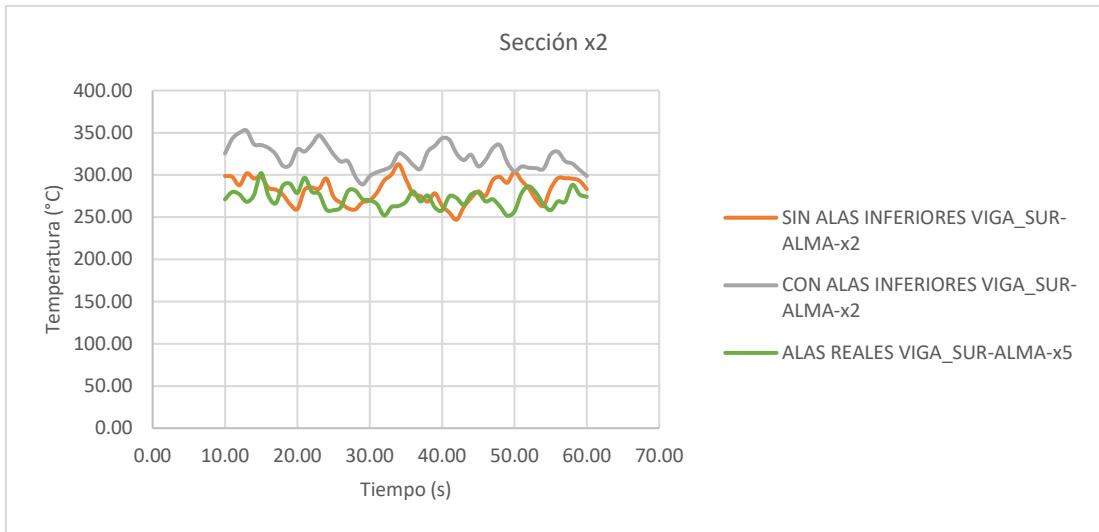
6.4. MODELO 04: ANÁLISIS DE INFLUENCIA DE PRESENCIA DE ALAS INFERIORES DE VIGAS

RESULTADOS:

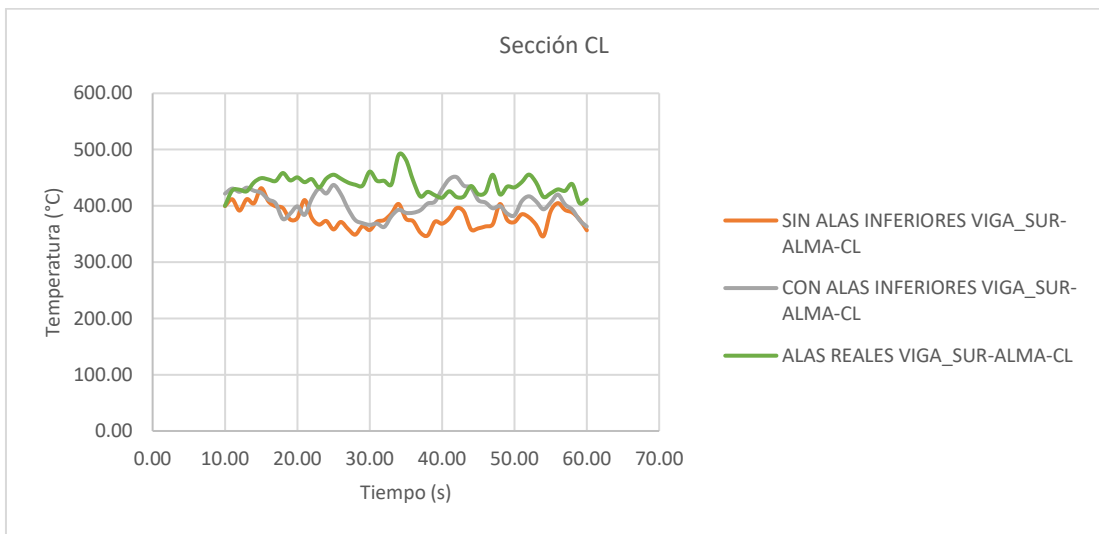
Los resultados obtenidos se agrupan en representaciones gráficas según la sección a la que pertenece cada sensor. Se mostrarán únicamente los correspondientes a la viga sur, ya que la inclusión de más datos dificulta la observación de los resultados.



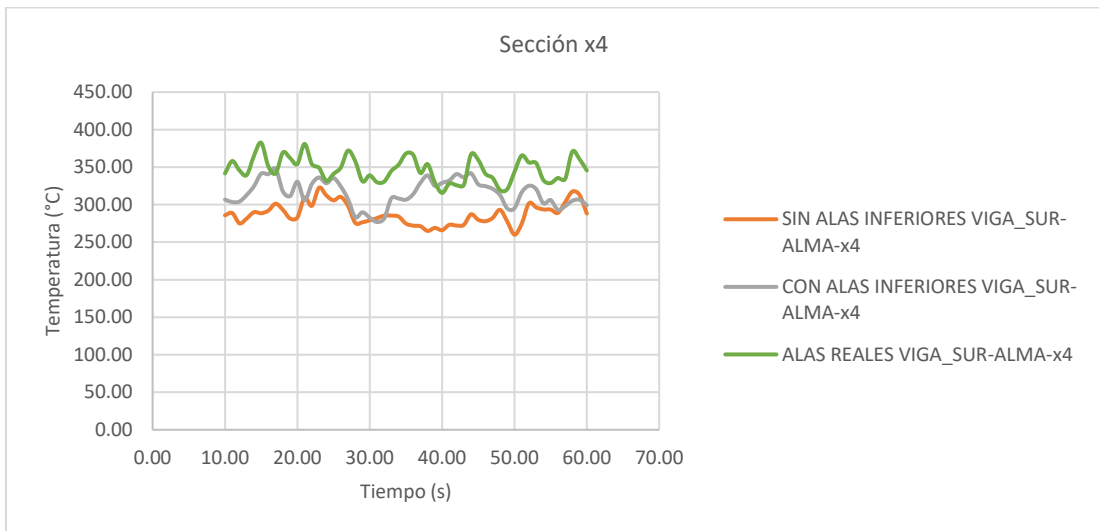
(c)



(d)



(e)



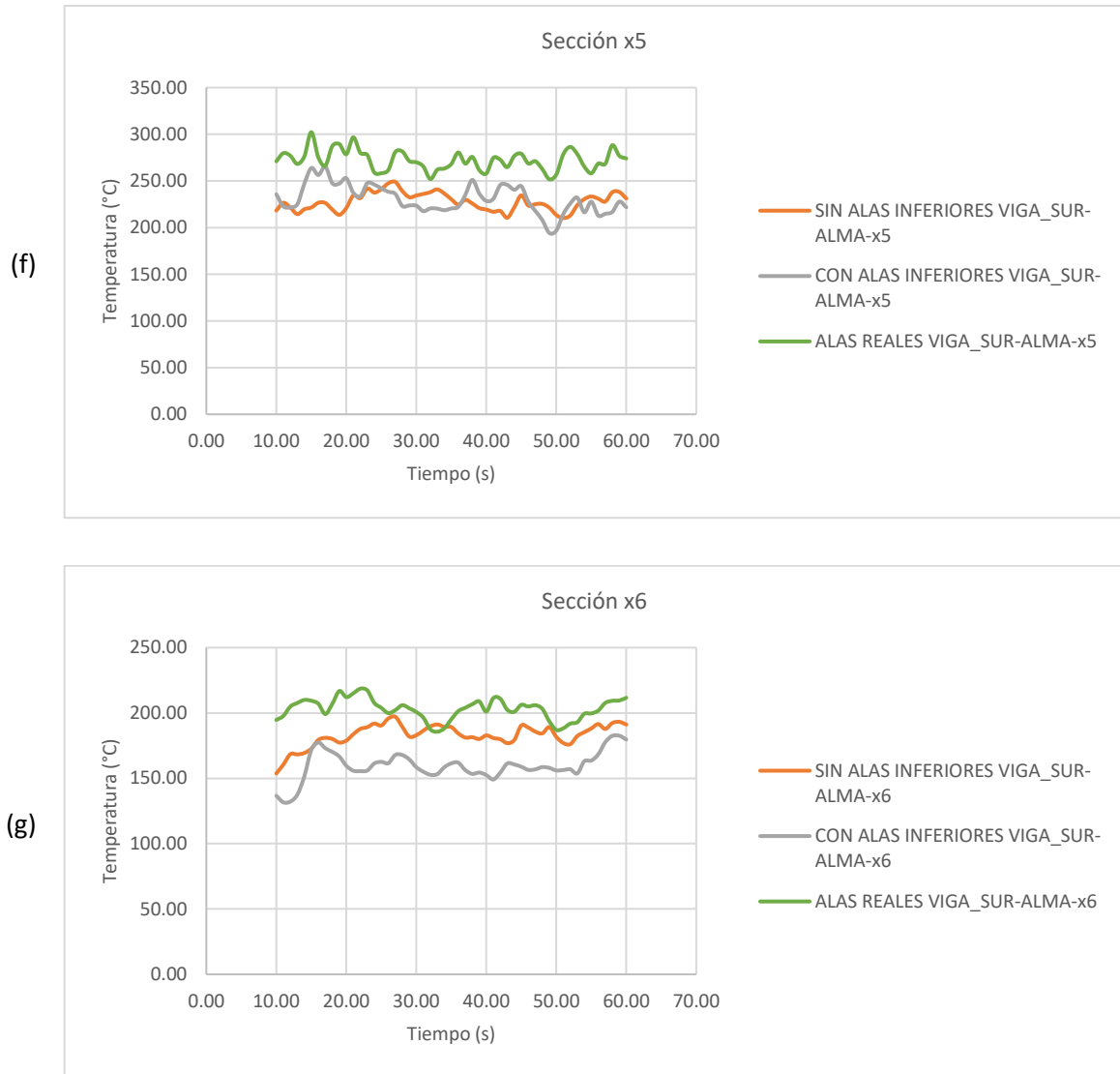


Fig. 51. Representación gráfica de temperaturas. Estudio de influencia de alas inferiores.

Sin embargo, en la comparativa mediante los valores promedios, se incluyen también los resultados que arrojan los sensores de la viga norte. Estos datos se presentan en la Tabla 18.

VALORES PROMEDIOS Y DIFERENCIAS					
Modelo	Sin alas inferiores	Con alas inferiores	Alas reales	Diferencia (%)	
Sensor	Promedio (°C)	Promedio (°C)	Promedio (°C)	(Sin/Reales)	(Con/Reales)
VIGA_SUR-ALMA-x0	180.56	162.29	210.52	-14.2%	-22.9%
VIGA_SUR-ALMA-x1	223.26	242.70	277.35	-19.5%	-12.5%
VIGA_SUR-ALMA-x2	281.86	321.11	352.12	-20.0%	-8.8%
VIGA_SUR-ALMA-CL	379.81	403.94	436.43	-13.0%	-7.4%
VIGA_SUR-ALMA-x4	287.28	315.26	347.14	-17.2%	-9.2%
VIGA_SUR-ALMA-x5	227.64	230.81	272.32	-16.4%	-15.2%
VIGA_SUR-ALMA-x6	183.08	159.47	203.03	-9.8%	-21.5%
VIGA_NORTE-ALMA-x0	178.07	162.29	213.84	-16.7%	-24.1%
VIGA_NORTE-ALMA-x1	223.34	254.28	280.73	-20.4%	-9.4%
VIGA_NORTE-ALMA-x2	286.02	336.08	352.72	-18.9%	-4.7%
VIGA_NORTE-ALMA-CL	396.33	417.22	445.06	-10.9%	-6.3%
VIGA_NORTE-ALMA-x4	296.41	324.28	348.08	-14.8%	-6.8%
VIGA_NORTE-ALMA-x5	227.47	241.75	276.55	-17.7%	-12.6%
VIGA_NORTE-ALMA-x6	181.73	162.38	214.68	-15.3%	-24.4%

Tabla 18. Valores promedios y diferencias en la influencia de alas inferiores.

ANÁLISIS:

La integración de las alas inferiores de las vigas en el modelo supone un cambio sustancial en las temperaturas registradas por los termopares. Como se aprecia en la Fig. 51, la ausencia de estas en el modelo de cálculo da como resultado unos niveles de temperaturas más bajos en la mayoría de casos. En general, la diferencia con respecto al modelo de alas de dimensiones reales supera el 10% en todos los casos.

Por otro lado, el modelo con alas inferiores adaptadas al mallado ofrece una leve mejoría con respecto al anterior. Si bien, no igualan al modelo considerado más preciso (con alas de dimensiones reales), en general ofrece una diferencia térmica por debajo del 10% (Tabla 18).

Este comportamiento observado no se cumple en las secciones extremas del tablero (x0 y x6). En estos casos, el rango de temperaturas del modelo sin alas inferiores es mayor que en el modelo de alas adaptadas al mallado. Sin embargo, en ambos casos, la aproximación frente al caso con alas de dimensiones reales no es aceptable. Los índices de diferencias medidos se sitúan entre el 15 y el 25%.

Por tanto, las alas inferiores de las vigas serán consideradas en modelos posteriores. Sin embargo, puesto que el cálculo del modelo que incluye las alas de dimensiones reales tiene un tiempo de computación alto (superior a las 3 horas), se asumirá el modelo con alas adaptadas al mallado. En este caso, el error cometido está dentro de lo aceptable, ofreciendo una aproximación buena.

Del modelo considerado para cálculos posteriores se deberá tener en cuenta que las lecturas de temperaturas son de mayor precisión conforme más se acercan al foco del fuego. La dispersión de la región de gases más calientes a lo largo del tablero puede ser un factor clave en los errores que se cometan a la hora de extraer resultados en modelos numéricos.

6.5. MODELO 05: ANÁLISIS DE INFLUENCIA DE LA POSICIÓN DEL QUEMADOR

RESULTADOS:

En primer lugar, como recordatorio, la Fig. 52 muestra esquemáticamente como la disposición de los sensores de acuerdo a la Fig. 41.

48	47	46	45	44	43	42	41	40	39	38	37
36	35	34	33	32	31	30	29	28	27	26	25
24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13
12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1

Fig. 52. Distribución esquemática de los sensores empleados. Vista en planta inferior.

Los resultados obtenidos sobre la losa se muestran en la Tabla 19.

FLUJO DE CALOR SOBRE LOSA							
Posición	Modelo (kW/m ²)		Diferencia				
	z=0.15	z=1					
LOSA 01	4.51	16.47	-72.6%	LOSA 23	7.01	26.96	-74.0%
LOSA 02	3.97	16.20	-75.5%	LOSA 24	6.01	22.81	-73.7%
LOSA 03	3.91	15.44	-74.6%	LOSA 25	6.13	21.41	-71.4%
LOSA 04	5.08	16.43	-69.1%	LOSA 26	7.36	25.08	-70.7%
LOSA 05	6.84	18.88	-63.7%	LOSA 27	9.03	29.53	-69.4%
LOSA 06	8.65	27.28	-68.3%	LOSA 28	11.34	34.87	-67.5%
LOSA 07	8.69	27.89	-68.8%	LOSA 29	14.37	40.77	-64.8%
LOSA 08	6.78	19.77	-65.7%	LOSA 30	20.39	51.68	-60.5%
LOSA 09	4.93	18.39	-73.2%	LOSA 31	20.35	52.87	-61.5%
LOSA 10	3.76	17.38	-78.4%	LOSA 32	14.37	43.61	-67.1%
LOSA 11	3.85	17.60	-78.1%	LOSA 33	11.26	38.36	-70.6%
LOSA 12	4.42	17.64	-74.9%	LOSA 34	8.91	32.04	-72.2%
LOSA 13	6.25	21.64	-71.1%	LOSA 35	7.40	26.41	-72.0%
LOSA 14	7.34	25.16	-70.8%	LOSA 36	6.18	22.36	-72.3%
LOSA 15	8.82	30.08	-70.7%	LOSA 37	4.36	15.36	-71.6%
LOSA 16	11.20	35.72	-68.6%	LOSA 38	3.91	15.03	-74.0%
LOSA 17	14.46	42.09	-65.6%	LOSA 39	4.04	14.54	-72.2%
LOSA 18	21.16	54.01	-60.8%	LOSA 40	5.30	15.20	-65.2%
LOSA 19	20.48	55.58	-63.2%	LOSA 41	7.23	17.18	-57.9%
LOSA 20	13.83	44.65	-69.0%	LOSA 42	9.21	25.11	-63.3%
LOSA 21	10.81	38.85	-72.2%	LOSA 43	9.24	27.49	-66.4%
LOSA 22	8.50	32.32	-73.7%	LOSA 44	7.23	19.61	-63.1%
				LOSA 45	5.27	17.27	-69.5%
				LOSA 46	3.94	16.18	-75.6%
				LOSA 47	3.90	16.69	-76.6%
				LOSA 48	4.36	16.97	-74.3%

Tabla 19. Flujos de calor para la losa según cada escenario.

Por otro lado, se muestran los resultados para las vigas de forma desglosada en la Tabla 20, Tabla 21, Tabla 22 y Tabla 23. En este caso, la localización de cada sensor se especifica en el nombre de cada posición. Únicamente interesa conocer la coordenada a lo largo del eje x, longitudinal en la viga.

FLUJO DE CALOR SOBRE ALA INFERIOR DE VIGA SUR			
Posición	Modelo (kW/m ²)		Diferencia
	z=0.15	z=1	
S ALAINF_SUR-0,25	6.16	22.24	-72.3%
S ALAINF_SUR-0,50	6.00	21.88	-72.6%
S ALAINF_SUR-0,75	5.99	22.67	-73.6%
S ALAINF_SUR-1,00	5.98	23.55	-74.6%
S ALAINF_SUR-1,25	6.41	24.78	-74.1%
S ALAINF_SUR-1,5	7.09	25.89	-72.6%
S ALAINF_SUR-1,75	8.17	27.53	-70.3%
S ALAINF_SUR-2,00	9.63	29.27	-67.1%
S ALAINF_SUR-2,25	11.22	31.14	-64.0%
S ALAINF_SUR-2,5	12.93	33.70	-61.6%
S ALAINF_SUR-2,75	15.09	43.40	-65.2%
S ALAINF_SUR-3,00	16.37	52.89	-69.0%
S ALAINF_SUR-3,25	14.96	46.06	-67.5%
S ALAINF_SUR-3,50	12.72	36.23	-64.9%
S ALAINF_SUR-3,75	10.99	33.65	-67.3%
S ALAINF_SUR-4,00	9.39	32.70	-71.3%
S ALAINF_SUR-4,25	7.95	31.51	-74.8%
S ALAINF_SUR-4,50	6.87	29.07	-76.4%
S ALAINF_SUR-4,75	6.26	27.08	-76.9%
S ALAINF_SUR-5,00	5.86	25.53	-77.0%
S ALAINF_SUR-5,25	5.75	24.32	-76.3%
S ALAINF_SUR-5,50	5.82	23.52	-75.3%
S ALAINF_SUR-5,75	6.00	23.46	-74.4%

Tabla 20. Flujos de calor para el ala inferior de la viga sur según escenario.

FLUJO DE CALOR SOBRE ALA INFERIOR DE VIGA NORTE			
Posición	Modelo (kW/m ²)		Diferencia
	z=0.15	z=1	
S ALAINF_NORTE-0,25	6.14	22.01	-72.1%
S ALAINF_NORTE-0,50	5.96	21.51	-72.3%
S ALAINF_NORTE-0,75	5.93	21.95	-73.0%
S ALAINF_NORTE-1,00	5.98	22.75	-73.7%
S ALAINF_NORTE-1,25	6.47	24.10	-73.2%
S ALAINF_NORTE-1,50	7.14	25.53	-72.0%
S ALAINF_NORTE-1,75	8.18	27.36	-70.1%
S ALAINF_NORTE-2,00	9.58	28.69	-66.6%
S ALAINF_NORTE-2,25	11.14	30.24	-63.2%
S ALAINF_NORTE-2,50	12.99	32.75	-60.3%
S ALAINF_NORTE-2,75	15.38	42.57	-63.9%
S ALAINF_NORTE-3,00	17.06	52.82	-67.7%
S ALAINF_NORTE-3,25	15.37	46.81	-67.2%
S ALAINF_NORTE-3,50	12.90	36.74	-64.9%
S ALAINF_NORTE-3,75	11.10	33.46	-66.8%
S ALAINF_NORTE-4,00	9.53	31.91	-70.1%
S ALAINF_NORTE-4,25	8.12	30.40	-73.3%
S ALAINF_NORTE-4,50	7.04	28.33	-75.2%
S ALAINF_NORTE-4,75	6.33	26.82	-76.4%
S ALAINF_NORTE-5,00	5.86	25.23	-76.8%
S ALAINF_NORTE-5,25	5.88	24.11	-75.6%
S ALAINF_NORTE-5,50	6.01	23.32	-74.2%
S ALAINF_NORTE-5,75	6.20	23.48	-73.6%

Tabla 21. Flujos de calor para el ala inferior de la viga norte según escenario.

FLUJO DE CALOR SOBRE ALMA DE VIGA SUR			
Posición	Modelo (kW/m ²)		Diferencia
	z=0.15	z=1	
S ALMA_SUR-0,25	5.73	19.37	-70.4%
S ALMA_SUR-0,50	6.39	21.09	-69.7%
S ALMA_SUR-0,75	6.98	22.37	-68.8%
S ALMA_SUR-1,00	7.50	23.95	-68.7%
S ALMA_SUR-1,25	8.24	26.44	-68.8%
S ALMA_SUR-1,50	8.92	28.66	-68.9%
S ALMA_SUR-1,75	9.76	31.11	-68.6%
S ALMA_SUR-2,00	10.78	33.70	-68.0%
S ALMA_SUR-2,25	12.05	36.07	-66.6%
S ALMA_SUR-2,50	13.62	39.22	-65.3%
S ALMA_SUR-2,75	15.32	43.16	-64.5%
S ALMA_SUR-3,00	16.26	46.57	-65.1%
S ALMA_SUR-3,25	15.08	44.59	-66.2%
S ALMA_SUR-3,50	13.22	41.03	-67.8%
S ALMA_SUR-3,75	11.49	38.17	-69.9%
S ALMA_SUR-4,00	10.17	36.10	-71.8%
S ALMA_SUR-4,25	9.10	33.56	-72.9%
S ALMA_SUR-4,50	8.29	30.83	-73.1%
S ALMA_SUR-4,75	7.68	28.30	-72.8%
S ALMA_SUR-5,00	6.97	25.49	-72.7%
S ALMA_SUR-5,25	6.43	23.77	-73.0%
S ALMA_SUR-5,50	5.75	22.37	-74.3%
S ALMA_SUR-5,75	5.23	20.22	-74.1%

Tabla 22. Flujo de calor sobre alma de viga sur según escenario.

FLUJO DE CALOR SOBRE ALMA DE VIGA NORTE			
Posición	Modelo (kW/m ²)		Diferencia
	z=0.15	z=1	
S ALMA_NORTE-0,25	5.23	19.34	-72.9%
S ALMA_NORTE-0,50	6.04	21.08	-71.4%
S ALMA_NORTE-0,75	6.82	22.21	-69.3%
S ALMA_NORTE-1,00	7.47	23.60	-68.3%
S ALMA_NORTE-1,25	8.25	25.86	-68.1%
S ALMA_NORTE-1,50	8.95	27.92	-67.9%
S ALMA_NORTE-1,75	9.84	30.36	-67.6%
S ALMA_NORTE-2,00	10.94	32.95	-66.8%
S ALMA_NORTE-2,25	12.26	35.33	-65.3%
S ALMA_NORTE-2,50	13.93	38.59	-63.9%
S ALMA_NORTE-2,75	15.74	43.09	-63.5%
S ALMA_NORTE-3,00	16.91	46.05	-63.3%
S ALMA_NORTE-3,25	15.73	44.51	-64.7%
S ALMA_NORTE-3,50	13.96	40.61	-65.6%
S ALMA_NORTE-3,75	12.32	37.46	-67.1%
S ALMA_NORTE-4,00	10.99	35.35	-68.9%
S ALMA_NORTE-4,25	9.86	32.94	-70.1%
S ALMA_NORTE-4,50	8.94	30.36	-70.6%
S ALMA_NORTE-4,75	8.21	27.89	-70.6%
S ALMA_NORTE-5,00	7.47	25.18	-70.3%
S ALMA_NORTE-5,25	6.98	23.56	-70.4%
S ALMA_NORTE-5,50	6.34	22.14	-71.3%
S ALMA_NORTE-5,75	5.56	20.13	-72.4%

Tabla 23. Flujo de calor sobre alma de viga norte según escenario.

ANÁLISIS:

Con este último escenario ($z=1$), se aprovecharía en gran medida el HRR generado, pues los flujos de calor obtenidos son del orden entre 3 o 4 veces el del escenario original.

En ambos casos, puede observarse que el flujo de calor disminuye conforme se aproxima a los extremos, tanto longitudinales como transversales. Esto guarda relación con la distribución de temperaturas que se producen en la región de gases más calientes.

En lo que respecta a los flujos de calor obtenidos, se aprecia un valor máximo de 55.58 kW/m² localizado en el punto LOSA 19. Los puntos adyacentes LOSA 18, LOSA 30 y LOSA 31 muestran valores muy similares. De acuerdo con el esquema de la Fig. 41, el valor máximo de flujo de calor corresponde con la zona central del tablero, en el entorno de la vertical del quemador.

Si se observan los flujos en las vigas, tanto almas como alas. En ambas vigas se aprecia un comportamiento similar al visto en la losa. Comparando los valores obtenidos en alas inferiores frente

a las alas, se puede afirmar que estas últimas presentan valores más bajos, en torno a un 10%. Esto puede explicarse por una mayor cercanía de las alas inferiores al foco de calor.

La evaluación acerca de la magnitud de los flujos de calor obtenidos dependerá de un modelo de transferencia de calor o de su cálculo simplificado, abarcado en el Anexo C: Situación crítica de la estructura en base a la temperatura crítica. La temperatura que alcance la estructura depende de este parámetro, pero también del tiempo de exposición, así como la dispersión que se genere a lo largo de la estructura.

Para el tiempo aproximado de 9 minutos en el escenario de quemador más próximo, determinado en el anexo mencionado anteriormente, se estima que la zona central de la estructura expuesta al flujo máximo de calor alcanzará la temperatura crítica y con ello el colapso.

CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y POSIBLES FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

En este capítulo se presentan las conclusiones puntualizadas extraídas del análisis realizado en el Capítulo 6: Análisis de Resultados. Dichas conclusiones son:

- El tamaño de las celdas empleadas afecta a la solución obtenida. Sin embargo, dicho tamaño o dimensiones deben acotarse en función de cada caso particular. Es decir, para un caso determinado, puede obtenerse un tamaño de celda máximo a partir del cual la solución converge y la diferencia entre resultados puede obviarse.
- Es recomendable delimitar el volumen de estudio adecuadamente. Esto permite simplificar y realizar el cálculo de forma más eficiente. La realización de este análisis en fases tempranas del estudio supone un ahorro en tiempo computacional, se elimina el cálculo de zonas que no interesan y que no afectan a los resultados que se quieren obtener.
- La inclusión del armado en la losa no aporta una diferencia notable en los resultados obtenidos. Es decir, la no inclusión del mismo ofrece una ventaja en cuanto a simplicidad en el modelo, sin afectar al resultado final. Este aspecto sí debería tenerse en cuenta en modelos de transferencia de calor, estructurales o modelos más avanzados cuyo nivel de detalle es más exhaustivo (análisis de efectos locales).
- La disposición de alas inferiores en las vigas reporta un cambio en el comportamiento de la región de gases más calientes bajo el tablero. En función del tamaño de las mismas, puede resultar imprescindible su inclusión en modelos numéricos.
- En referencia al punto anterior, las superficies horizontales tienden a generar cúmulos de gas caliente en las caras inferiores. Este efecto puede verse aumentado si se disponen de elementos o formas que impidan la libre circulación de los gases hacia los bordes libres.
- La disposición del quemador, así como la potencia de fuego son determinantes en la caracterización de un escenario de fuego. De ellos dependen las temperaturas de la región de gases más calientes y el flujo de calor que se transmitirá a la estructura.
- Por todo ello, los aspectos que particularizan cada caso corresponden fundamentalmente a la geometría del elemento de estudio y la potencia de fuego que intervenga.
- En el caso particular planteado en este trabajo, el colapso podría producirse mediante la disposición de un quemador de 1 m² de superficie, a una cota de 1 m (a 0.9 m del tablero). Se considera también que el combustible empleado es gasolina, por lo que el HRR es de 2400 kW aplicados durante al menos 9 minutos (tiempo a contabilizar desde el momento en el que el gas alcance los rangos de máxima temperatura).

Tras la realización de este análisis, es posible listar una serie de ideas en las que futuras investigaciones puedan centrarse:

- Estudio con modelo termo-estructural de las acciones térmicas extraídas en el presente trabajo. Una evaluación que compruebe las resistencias de estructuras sometidas a la temperatura crítica.
- Análisis de afección de acciones térmicas sobre conectores de estructuras mixtas. Estudio sobre la interacción de los conectores con la losa ante acciones térmicas. Casos aplicados en puentes de sección mixta.
- Análisis de transferencia de calor en hormigón armado, centrado en el comportamiento e interacción entre el hormigón y las armaduras. Estudio de parámetros como la adherencia de las barras corrugadas, predicción de temperaturas en el armado, resistencia del conjunto y otros.
- Clasificación de niveles de riesgo para estructuras afectadas por incendio. Evaluables en función de las características de la estructura, del fuego y capacidades resistentes residuales.
- Estudios en detalle de posibles interacciones entre la geometría del elemento y la potencia de fuego aplicada.

CAPÍTULO 8: REFERENCIAS

- [1] M. Garlock, I. Paya-Zaforteza, V. Kodur, and L. Gu, "Fire hazard in bridges: Review, assessment and repair strategies," *Eng. Struct.*, vol. 35, pp. 89–98, 2012.
- [2] "Tanker fire in Susquehanna Township," 2014. [Online]. Available: http://www.pennlive.com/news/2016/05/three_years_ago_today_tanker_t.html. [Accessed: 24-Aug-2017].
- [3] J. Alos-Moya, I. Paya-Zaforteza, A. Hospitaler, and P. Rinaudo, "Valencia bridge fire tests: Experimental study of a composite bridge under fire," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 138, pp. 538–554, 2017.
- [4] Arcelor Mittal, "Prontuario Arcelor Mittal," 2017. [Online]. Available: http://sections.arcelormittal.com/fileadmin/redaction/2-Products_Services/1_Product_Range/ES-EN-IT/IPE.pdf. [Accessed: 27-Jul-2017].
- [5] Comité Europeo de Normalización, "Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Parte 1-2: Acciones generales. Acciones en estructuras expuestas al fuego.," *AENOR*, p. 61, 2005.
- [6] Comité Europeo de Normalización, "Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero. Parte 1-2: Reglas generales. Proyecto de estructuras sometidas a fuego.," *AENOR*, p. 82, 2011.
- [7] Comité Europeo de Normalización, "Eurocódigo 4: Proyecto de estructuras mixtas de acero y hormigón. Parte 1-2: Reglas generales. Proyecto de estructuras sometidas al fuego.," *AENOR*, p. 110, 2011.
- [8] Comité Europeo de Normalización, "Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-2: Reglas generales. Proyecto de estructuras sometidas al fuego.," *AENOR*, p. 101, 2011.
- [9] U. Wickström, R. Jansson, and H. Tuovinen, "Validation fire tests on using the adiabatic surface temperature for predicting heat transfer," *SP Rep.*, no. 310, p. 72, 2009.
- [10] J. Alos-Moya, I. Paya-Zaforteza, M. E. M. Garlock, E. Loma-Ossorio, D. Schiffner, and A. Hospitaler, "Analysis of a bridge failure due to fire using computational fluid dynamics and finite element models," *Eng. Struct.*, vol. 68, pp. 96–110, 2014.
- [11] A. H. Buchanan, "Structural Design for Fire Safety," p. 438, 2017.
- [12] J. H. Lienhard IV and J. H. Lienhard V, "A heat transfer textbook," *J. Heat Transfer*, p. 768, 2017.
- [13] M. J. Hurley *et al.*, "SFPE handbook of fire protection engineering," *SFPE*, p. 3512, 2016.
- [14] K. Mcgrattan and R. Mcdermott, "Sixth Edition Fire Dynamics Simulator User 's Guide," 2016.
- [15] Comité Europeo de Normalización, "Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para la edificación.," *AENOR*, no. 141, p. 242, 2011.
- [16] C. A. Haper, "Handbook of Building Materials for Fire Protection," vol. 22, no. 6, p. 562, 2004.
- [17] National Institute of Standards and Technology, "D* Calculator." [Online]. Available: <http://www.thunderheadeng.com/downloads/5999/>.
- [18] K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk, and K. Overholt, "Sixth Edition Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 3 : Validation," vol. 1, pp. 1–147, 2015.
- [19] Comité Europeo de Normalización, "Eurocódigo 4: Proyecto de estructuras mixtas de acero y hormigón. Parte 1-: Reglas generales. Proyecto de estructuras sometidas al fuego.," 2011.

CAPÍTULO 9: ANEXOS

En este capítulo se recogen los diferentes anexos que complementan o justifican las decisiones y valores adoptados en el desarrollo del documento. También incluyen algunos cálculos complementarios.

9.1. ANEXO A: RECOMENDACIONES DE TAMAÑO DE CELDA POR EL NIST

En el manual de validación de modelos FDS [18], en su capítulo 6, ofrece una expresión para calcular el diámetro característico de un fuego. Dicha expresión se presenta en la ecuación (9).

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} \cdot c_p \cdot T_{\infty} \cdot \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (9)$$

El diámetro del fuego característico depende de las características del aire: densidad, calor específico y temperatura. Estos parámetros vienen fijados para el aire a una temperatura ambiente de 20°C. También intervienen el HRR (a modificar) y la gravedad.

Por tanto, para el caso particular estudiado, los datos de entrada y de salida se recogen en la Tabla 24.

Input		Output	
Qdot =	600 kW	D* =	0.781741 m
dens =	1.204 kg/m ³	Mesh D*/5 =	0.156348 m
cp =	1.005 kJ/kg-K	Mesh D*/10 =	0.078174 m
T =	293 K	Mesh D*/20 =	0.039087 m
g =	9.81 m/s ²		

Tabla 24. Cálculo del diámetro característico del fuego y tamaño de celda recomendable.

El diámetro característico del fuego es de 0.78 m, por lo que los tamaños de celda recomendables son los que figuran inmediatamente debajo de dicho valor en la Tabla 24. La elección de un valor u otro depende de la finura del mallado (grueso, regular, fino) a considerar, así como la precisión de los resultados.

9.2. ANEXO B: PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

En este anexo se presentan los resultados obtenidos de las expresiones que figuran a lo largo del apartado 4.1. Estos resultados forman parte de los datos de entrada del software empleado para realizar los modelos numéricos.

9.2.1. Densidad

- Hormigón armado, HA-30.

VARIACIÓN DE ρ_c RESPECTO A θ			
θ (°C)	ρ_c (kg/m ³)		
20	2300	340	2206
40	2300	360	2199
60	2300	380	2192
80	2300	400	2185
100	2300	450	2175
115	2300	500	2165
130	2292	550	2155
145	2284	600	2145
160	2276	650	2135
175	2268	700	2125
190	2259	750	2115
200	2254	800	2105
220	2247	850	2094
240	2240	900	2084
260	2233	950	2074
280	2226	1000	2064
300	2220	1050	2054
320	2213	1100	2044
		1150	2034
		1200	2024

Tabla 25. Variación de la densidad del hormigón armado en función de la temperatura.

9.2.2. Calor específico

- Acero estructural, S-355.

VARIACIÓN DE c_a RESPECTO A θ					
θ (°C)	c_a [J/(kg·K)]				
20	439.80	390	601.11	800	803.26
30	446.73	400	605.88	810	770.57
40	453.36	410	610.85	820	745.22
50	459.70	420	616.02	830	725.00
60	465.78	430	621.41	840	708.49
70	471.59	440	627.04	850	694.75
80	477.16	450	632.92	860	683.14
90	482.50	460	639.06	870	673.20
100	487.62	470	645.48	880	664.60
110	492.54	480	652.18	890	657.08
120	497.26	490	659.18	900	650.00
130	501.81	500	666.50	910	650.00
140	506.19	510	674.15	920	650.00
150	510.42	520	682.13	930	650.00
160	514.51	530	690.48	940	650.00
170	518.48	540	699.19	950	650.00
180	522.33	550	708.28	960	650.00
190	526.09	560	717.76	970	650.00
200	529.76	570	727.66	980	650.00
210	533.36	580	737.97	990	650.00
220	536.90	590	748.72	1000	650.00
230	540.40	600	760.22	1010	650.00
240	543.87	610	767.58	1020	650.00
250	547.31	620	776.19	1030	650.00
260	550.75	630	786.39	1040	650.00
270	554.21	640	798.67	1050	650.00
280	557.68	650	813.75	1060	650.00
290	561.18	660	832.69	1070	650.00
300	564.74	670	857.21	1080	650.00
310	568.36	680	890.17	1090	650.00
320	572.05	690	936.88	1100	650.00
330	575.83	700	1008.16	1110	650.00
340	579.71	710	1130.36	1120	650.00
350	583.71	720	1388.33	1130	650.00
360	587.83	730	2291.25	1140	650.00
370	592.10	740	2525.00	1150	650.00
380	596.52	750	1482.89	1160	650.00
		760	1159.48	1170	650.00
		770	1001.92	1180	650.00
		780	908.67	1190	650.00
		790	847.03	1200	650.00

Tabla 26. Variación del calor específico del acero estructural en función de la temperatura

- Acero para armaduras pasivas, B-500S. (*Ídem que los valores de acero estructural, S-355*).
- Hormigón armado, HA-30. (*Variable según el grado de humedad, u*).

VARIACIÓN DE C_c RESPECTO A θ		390	1095	810	1100
u (%)	0	400	1100	820	1100
θ (°C)	c_c [J/(kg·K)]	410	1100	830	1100
20	900	420	1100	840	1100
30	900	430	1100	850	1100
40	900	440	1100	860	1100
50	900	450	1100	870	1100
60	900	460	1100	880	1100
70	900	470	1100	890	1100
80	900	480	1100	900	1100
90	900	490	1100	910	1100
100	900	500	1100	920	1100
110	910	510	1100	930	1100
120	920	520	1100	940	1100
130	930	530	1100	950	1100
140	940	540	1100	960	1100
150	950	550	1100	970	1100
160	960	560	1100	980	1100
170	970	570	1100	990	1100
180	980	580	1100	1000	1100
190	990	590	1100	1010	1100
200	1000	600	1100	1020	1100
210	1005	610	1100	1030	1100
220	1010	620	1100	1040	1100
230	1015	630	1100	1050	1100
240	1020	640	1100	1060	1100
250	1025	650	1100	1070	1100
260	1030	660	1100	1080	1100
270	1035	670	1100	1090	1100
280	1040	680	1100	1100	1100
290	1045	690	1100	1110	1100
300	1050	700	1100	1120	1100
310	1055	710	1100	1130	1100
320	1060	720	1100	1140	1100
330	1065	730	1100	1150	1100
340	1070	740	1100	1160	1100
350	1075	750	1100	1170	1100
360	1080	760	1100	1180	1100
370	1085	770	1100	1190	1100
380	1090	780	1100	1200	1100
		790	1100		
		800	1100		

Tabla 27. Variación del calor específico del hormigón (0% de humedad) en función de la temperatura.

VARIACIÓN DE c_c RESPECTO A θ					
u (%)	1.5				
θ (°C)	c_c [J/(kg·K)]				
20	900	390	1095	810	1100
30	900	400	1100	820	1100
40	900	410	1100	830	1100
50	900	420	1100	840	1100
60	900	430	1100	850	1100
70	900	440	1100	860	1100
80	900	450	1100	870	1100
90	900	460	1100	880	1100
100	1470	470	1100	890	1100
110	1470	480	1100	900	1100
120	1442	490	1100	910	1100
130	1373	500	1100	920	1100
140	1287	510	1100	930	1100
150	1204	520	1100	940	1100
160	1138	530	1100	950	1100
170	1092	540	1100	960	1100
180	1064	550	1100	970	1100
190	1050	560	1100	980	1100
200	1000	570	1100	990	1100
210	1005	580	1100	1000	1100
220	1010	590	1100	1010	1100
230	1015	600	1100	1020	1100
240	1020	610	1100	1030	1100
250	1025	620	1100	1040	1100
260	1030	630	1100	1050	1100
270	1035	640	1100	1060	1100
280	1040	650	1100	1070	1100
290	1045	660	1100	1080	1100
300	1050	670	1100	1090	1100
310	1055	680	1100	1100	1100
320	1060	690	1100	1110	1100
330	1065	700	1100	1120	1100
340	1070	710	1100	1130	1100
350	1075	720	1100	1140	1100
360	1080	730	1100	1150	1100
370	1085	740	1100	1160	1100
380	1090	750	1100	1170	1100
		760	1100	1180	1100
		770	1100	1190	1100
		780	1100	1200	1100
		790	1100		
		800	1100		

Tabla 28. Variación del calor específico del hormigón (1.5% de humedad) en función de la temperatura.

VARIACIÓN DE c_c RESPECTO A θ				
u (%)	3			
θ (°C)	c_c [J/(kg·K)]			
20	900	390	1095	
30	900	400	1100	
40	900	410	1100	
50	900	420	1100	
60	900	430	1100	
70	900	440	1100	
80	900	450	1100	
90	900	460	1100	
100	2020	470	1100	
110	2020	480	1100	
120	1960	490	1100	
130	1809	500	1100	
140	1619	510	1100	
150	1435	520	1100	
160	1286	530	1100	
170	1179	540	1100	
180	1112	550	1100	
190	1075	560	1100	
200	1000	570	1100	
210	1005	580	1100	
220	1010	590	1100	
230	1015	600	1100	
240	1020	610	1100	
250	1025	620	1100	
260	1030	630	1100	
270	1035	640	1100	
280	1040	650	1100	
290	1045	660	1100	
300	1050	670	1100	
310	1055	680	1100	
320	1060	690	1100	
330	1065	700	1100	
340	1070	710	1100	
350	1075	720	1100	
360	1080	730	1100	
370	1085	740	1100	
380	1090	750	1100	
		760	1100	
		770	1100	
		780	1100	
		790	1100	
		800	1100	
			810	1100
			820	1100
			830	1100
			840	1100
			850	1100
			860	1100
			870	1100
			880	1100
			890	1100
			900	1100
			910	1100
			920	1100
			930	1100
			940	1100
			950	1100
			960	1100
			970	1100
			980	1100
			990	1100
			1000	1100
			1010	1100
			1020	1100
			1030	1100
			1040	1100
			1050	1100
			1060	1100
			1070	1100
			1080	1100
			1090	1100
			1100	1100
			1110	1100
			1120	1100
			1130	1100
			1140	1100
			1150	1100
			1160	1100
			1170	1100
			1180	1100
			1190	1100
			1200	1100

Tabla 29. Variación del calor específico del hormigón (3% de humedad) en función de la temperatura.

9.2.3. Conductividad

- Acero estructural, S-355.

VARIACIÓN DE λ_a RESPECTO A θ					
θ (°C)	λ_a [W/(K·m)]				
20	53.33	390	41.01	800	27.36
30	53.00	400	40.68	810	27.30
40	52.67	410	40.35	820	27.30
50	52.34	420	40.01	830	27.30
60	52.00	430	39.68	840	27.30
70	51.67	440	39.35	850	27.30
80	51.34	450	39.02	860	27.30
90	51.00	460	38.68	870	27.30
100	50.67	470	38.35	880	27.30
110	50.34	480	38.02	890	27.30
120	50.00	490	37.68	900	27.30
130	49.67	500	37.35	910	27.30
140	49.34	510	37.02	920	27.30
150	49.01	520	36.68	930	27.30
160	48.67	530	36.35	940	27.30
170	48.34	540	36.02	950	27.30
180	48.01	550	35.69	960	27.30
190	47.67	560	35.35	970	27.30
200	47.34	570	35.02	980	27.30
210	47.01	580	34.69	990	27.30
220	46.67	590	34.35	1000	27.30
230	46.34	600	34.02	1010	27.30
240	46.01	610	33.69	1020	27.30
250	45.68	620	33.35	1030	27.30
260	45.34	630	33.02	1040	27.30
270	45.01	640	32.69	1050	27.30
280	44.68	650	32.36	1060	27.30
290	44.34	660	32.02	1070	27.30
300	44.01	670	31.69	1080	27.30
310	43.68	680	31.36	1090	27.30
320	43.34	690	31.02	1100	27.30
330	43.01	700	30.69	1110	27.30
340	42.68	710	30.36	1120	27.30
350	42.35	720	30.02	1130	27.30
360	42.01	730	29.69	1140	27.30
370	41.68	740	29.36	1150	27.30
380	41.35	750	29.03	1160	27.30
		760	28.69	1170	27.30
		770	28.36	1180	27.30
		780	28.03	1190	27.30
		790	27.69	1200	27.30

Tabla 30. Variación de la conductividad del acero estructural en función de la temperatura.

- Acero para armaduras pasivas, B-500S. (*Ídem que los valores de acero estructural, S-355*).
- Hormigón armado, HA-30.

VARIACIÓN λ_c RESPECTO A θ			
θ (°C)	$\lambda_{c,inf}$ [W/(k·m)]	$\lambda_{c,sup}$ [W/(k·m)]	$\lambda_{c,media}$ [W/(k·m)]
20	1.95	1.33	1.64
30	1.93	1.32	1.62
40	1.90	1.31	1.61
50	1.88	1.29	1.59
60	1.86	1.28	1.57
70	1.83	1.27	1.55
80	1.81	1.25	1.53
90	1.79	1.24	1.52
100	1.77	1.23	1.50
110	1.74	1.22	1.48
120	1.72	1.21	1.46
130	1.70	1.19	1.45
140	1.68	1.18	1.43
150	1.66	1.17	1.41
160	1.64	1.16	1.40
170	1.61	1.15	1.38
180	1.59	1.13	1.36
190	1.57	1.12	1.35
200	1.55	1.11	1.33
210	1.53	1.10	1.32
220	1.51	1.09	1.30
230	1.49	1.08	1.29
240	1.47	1.07	1.27
250	1.45	1.06	1.25
260	1.44	1.04	1.24
270	1.42	1.03	1.23
280	1.40	1.02	1.21
290	1.38	1.01	1.20
300	1.36	1.00	1.18
310	1.34	0.99	1.17
320	1.33	0.98	1.15
330	1.31	0.97	1.14
340	1.29	0.96	1.13
350	1.27	0.95	1.11
360	1.26	0.94	1.10
370	1.24	0.93	1.09
380	1.22	0.93	1.07
390	1.21	0.92	1.06
400	1.19	0.91	1.05
410	1.17	0.90	1.04
420	1.16	0.89	1.02
430	1.14	0.88	1.01
440	1.13	0.87	1.00
450	1.11	0.86	0.99
460	1.10	0.86	0.98
470	1.08	0.85	0.97
480	1.07	0.84	0.95
490	1.06	0.83	0.94
500	1.04	0.82	0.93
510	1.03	0.81	0.92
520	1.01	0.81	0.91
530	1.00	0.80	0.90
540	0.99	0.79	0.89
550	0.98	0.78	0.88
560	0.96	0.78	0.87
570	0.95	0.77	0.86
580	0.94	0.76	0.85
590	0.93	0.76	0.84
600	0.91	0.75	0.83
610	0.90	0.74	0.82
620	0.89	0.74	0.81
630	0.88	0.73	0.80
640	0.87	0.72	0.80
650	0.86	0.72	0.79
660	0.85	0.71	0.78
670	0.84	0.70	0.77
680	0.83	0.70	0.76
690	0.82	0.69	0.76
700	0.81	0.69	0.75
710	0.80	0.68	0.74
720	0.79	0.68	0.73
730	0.78	0.67	0.73
740	0.77	0.67	0.72
750	0.76	0.66	0.71
760	0.76	0.66	0.71
770	0.75	0.65	0.70
780	0.74	0.65	0.69
790	0.73	0.64	0.69
800	0.72	0.64	0.68
810	0.72	0.63	0.67
820	0.71	0.63	0.67

830	0.70	0.62	0.66	1020	0.61	0.57	0.59
840	0.70	0.62	0.66	1030	0.61	0.56	0.59
850	0.69	0.62	0.65	1040	0.61	0.56	0.59
860	0.68	0.61	0.65	1050	0.61	0.56	0.58
870	0.68	0.61	0.64	1060	0.60	0.56	0.58
880	0.67	0.60	0.64	1070	0.60	0.56	0.58
890	0.67	0.60	0.63	1080	0.60	0.56	0.58
900	0.66	0.60	0.63	1090	0.60	0.55	0.58
910	0.66	0.59	0.63	1100	0.60	0.55	0.58
920	0.65	0.59	0.62	1110	0.60	0.55	0.58
930	0.65	0.59	0.62	1120	0.60	0.55	0.57
940	0.64	0.59	0.61	1130	0.60	0.55	0.57
950	0.64	0.58	0.61	1140	0.60	0.55	0.57
960	0.63	0.58	0.61	1150	0.60	0.55	0.57
970	0.63	0.58	0.60	1160	0.60	0.55	0.57
980	0.63	0.57	0.60	1170	0.60	0.55	0.57
990	0.62	0.57	0.60	1180	0.60	0.55	0.57
1000	0.62	0.57	0.59	1190	0.60	0.55	0.57
1010	0.62	0.57	0.59	1200	0.60	0.55	0.57

Tabla 31. Variación de la conductividad del hormigón en función de la temperatura.

9.3. ANEXO C: SITUACIÓN CRÍTICA DE LA ESTRUCTURA EN BASE A LA TEMPERATURA CRÍTICA

En este anejo se justificarán algunos de los aspectos considerados para la elaboración del modelo de transferencia de calor.

9.3.1. Temperatura crítica de la estructura según Eurocódigo-3, parte 1-2 [6].

En el apartado 4.2.4 del Eurocódigo-3, parte 1-2 [6] se define un procedimiento para obtener la temperatura crítica. Un elemento estructural metálico se considera en riesgo de colapso si presenta dicha temperatura uniformemente distribuida a lo largo del mismo.

Su cálculo depende básicamente del grado de utilización, μ_0 , que presente la estructura al comienzo del incendio y se rige mediante la ecuación (10).

$$\theta_{a,cr} = 39.19 \cdot \ln\left(\frac{1}{0.9674 \cdot \mu_0} - 1\right) + 482 \quad (10)$$

A su vez, el grado de utilización, μ_0 , es la relación entre el esfuerzo que presenta la estructura y el máximo que puede resistir, ecuación (11). Los esfuerzos que presenta la expresión (11) se toman en el comienzo del incendio.

$$\mu_0 = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}} \quad (11)$$

En este caso, los parámetros anteriores adoptan los siguientes valores:

- La carga de diseño $E_{fi,d}$ en la estructura en el momento de inicio del incendio ($t=0$) corresponde únicamente a su peso propio.

$$\text{Peso propio} = p = 3.63 \text{ kN/m}^2 \rightarrow E_{fi,d} = \frac{p \cdot l^2}{8} = 35.34 \text{ kN} \cdot m$$

- El esfuerzo máximo resistido $R_{fi,d,0}$ también se establece para el inicio del incendio ($t=0$). Se establece mediante un cálculo analítico, procedente de las expresiones (13), (14), (15) y la Fig. 53.

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c}; \quad f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \quad (12)$$

$$N_{pl,a} = A_p \cdot f_{yd} = N_{c,f} \quad (13)$$

$$N_{c,f} = b_{eff} \cdot x \cdot (0.85 \cdot f_{cd}) \quad (14)$$

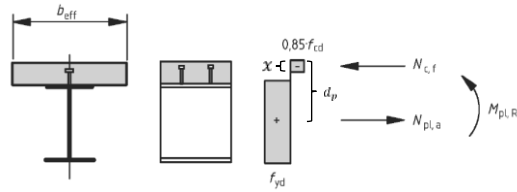


Fig. 53. Distribuciones de tensiones plásticas en secciones mixtas. Fuente: Eurocódigo-4, parte 1-1 [19].

$$M_{p,Rd} = N_{c,f} \cdot (d_p - 0.5 \cdot x) \quad (15)$$

$$R_{fi,d,0} = M_{p,Rd} = 154.133 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Por tanto:

$$\theta_{a,cr} = 680.32 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\mu_0 = 0.2690$$

9.3.2. Tiempo de exposición de la estructura según Eurocódigo-4, parte 1-2 [7].

La obtención del tiempo al que se debe exponer la estructura para alcanzar el colapso de la estructura es un factor muy relevante tanto en los modelos numéricos como en la realidad.

El cálculo del tiempo se ha realizado para establecer la temperatura crítica anterior sobre la parte metálica del elemento estructural. El procedimiento sigue las pautas marcadas por el Eurocódigo-4, parte 1-2 [7], en su apartado 4.3.4.2.2. Tal y como indica este apartado, se asume la hipótesis de no transferencia de temperaturas entre el ala superior y la losa de hormigón. La formulación empleada para el cálculo del tiempo corresponde con la expresión X.

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \cdot \left(\frac{1}{c_a \cdot \rho_a}\right) \cdot \left(\frac{A_m}{V}\right) \cdot h_{net,d} \cdot \Delta t \quad (16)$$

Los parámetros k_{sh} , A_m y V dependen directamente de la geometría de la sección considerada.

Por tanto, el tiempo de calentamiento necesario es de 528 segundos (9 minutos aproximadamente), según se refleja en la Tabla 32. Dichos resultados se presentan para el quemador grande (superficie de 1 m^2).

Por otro lado, se calcula también los resultados para el otro escenario: quemador pequeño a cota $z=0.15 \text{ m}$. En este caso, el tiempo necesario se incrementa considerablemente a 1638 segundos (alrededor de 27 minutos).

PERFIL A CALCULAR: IPE-160	
k_{sh}	0.520
A_m/V	327.437 1/m
$\theta_{a,t}$	680.32 °C
A_m	0.658 m ² /m
V	0.00201 m ³ /m
c_a	891.419 J/kgK
$h_{net,d}$	52887.087 W/m ²
ρ_a	7850 kg/m ³
t	528.373 s
	8.81 min

CAJÓN ENVOLVENTE	
A_m/V	36.890 1/m
A_m	0.484 m ² /m
V	0.01312 m ³ /m
c_a	891.419 J/kgK

Tabla 32. Cálculo del tiempo de exposición para quemador grande.

PERFIL A CALCULAR: IPE-160	
k_{sh}	0.520
A_m/V	327.437 1/m
$\theta_{a,t}$	680.32 °C
A_m	0.658 m ² /m
V	0.00201 m ³ /m
c_a	891.419 J/kgK
$h_{net,d}$	17057.664 W/m ²
ρ_a	7850 kg/m ³
t	1638.214 s
	27.30 min

CAJÓN ENVOLVENTE	
A_m/V	36.890 1/m
A_m	0.484 m ² /m
V	0.01312 m ³ /m
c_a	891.419 J/kgK

Tabla 33. Cálculo del tiempo de exposición para el quemador pequeño.