Estudio del encapsulado de sensores de fibra óptica para la medida de muy altas temperaturas y de pautas para su aplicación en la monitorización de túneles sometidos a fuego

PAULA RINAUDO

EDITORIAL
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil

Estudio del encapsulado de sensores de fibra óptica para la medida de muy altas temperaturas y de pautas para su aplicación en la monitorización de túneles sometidos a fuego

Paula Rinaudo

Tesis Doctoral dirigida por:

Dr. Ignacio Payá-Zaforteza

Dr. Pedro A. Calderón García

Valencia, Julio 2015

Colección Tesis Doctorales

© Paula Rinaudo

© 2015, de la presente edición: Editorial Universitat Politècnica de València
Telf.: 963 877 012 / www.lalibreria.upv.es

ISBN: 978-84-9048-429-6 (versión impresa)

Queda prohibida la reproducción, distribución, comercialización, transformación, y en general, cualquier otra forma de explotación, por cualquier procedimiento, de todo o parte de los contenidos de esta obra sin autorización expresa y por escrito de sus autores.

A Susana y Gardy,

a Sergio,

a Vani, Vito y Lorenzo.

Agradecimientos

Esta tesis ha sido posible de realizar gracias el apoyo de mis directores Ignacio Payá-Zaforteza y Pedro Calderón. A quienes quiero agradecer los conocimientos transmitidos, su interés y tiempo dedicado. Muy especialmente quiero agradecerles haber confiado en mí desde el principio, aun cuando no me conocían y ayudarme en la convocatoria de mi beca.

Quiero agradecer a Benjamín Torres por su gran apoyo y ayuda en la etapa de los sensores y por darme ánimo. Gracias por enseñarme tanto, por las charlas de camino a AIDICO y por hacer más llevaderos los ensayos.

Estoy profundamente agradecida de haber podido trabajar con Salvador Sales y David Barrera del Instituto de Telecomunicaciones y aplicaciones Multimedia (ITEAM). Muchas gracias por todos los conocimientos transmitidos, paciencia y las reuniones debatiendo datos y resultados. David, gracias por tus explicaciones del funcionamiento de los equipos ópticos y por introducirme en el mundo de Matlab.

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento al programa ARCOIRIS del proyecto Erasmus Mundus Action 2, por financiar mi doctorado y mi estancia en Valencia. Quiero agradecer a los responsables del programa por darme esta oportunidad y al personal de la oficina de acción internacional: Begoña, Geraldine y Esther por su incansable trabajo para continuar generando becas y su buena predisposición. Gracias a Carlos de la oficina de programas internacionales de intercambio por la invaluable ayuda en las renovaciones de NIE y por tener siempre una respuesta a las infinitas preguntas.

El desarrollo de esta tesis ha sido posible gracias a la financiación recibida a través del Ministerio de Ciencia e Innovación proyecto BIA 2011-27104 "Definición de condiciones de Monitorización, encapsulado y fijación de sensores ópticos para medir temperaturas y deformaciones en estructuras sometidas a altas temperaturas".

Quiero aprovechar para agradecer a Antonio Hospitaler (padre e hijo) por estar siempre dispuestos a ayudarme y darme ideas en los modelos de fuego. Por las reuniones, siempre enriquecedoras y por transmitir siempre energías positivas.

No puedo dejar de agradecer a los bomberos Eduardo Loma-Ossorio y Emilio Miguel García por transmitirme sus experiencias y por brindarme su punto de vista en todo momento.

Agradezco a Manuel Romero y Enrique Serra por su colaboración y permiso para instalar los sensores en uno de sus ensayos de pilares y a Ana Espinos por su colaboración en el modelo de Abaqus.

Gracias Eduardo Cassiraga por el tiempo y conocimientos brindados en la evaluación de modelos y técnicas de interpolación.

No puedo dejar de agradecer a mis compañeros del ICITECH con quienes compartí mí día a día durante casi tres años. Gracias a los que desde el principio me hicieron sentir que no estaba sola. Gracias Tati, Yasna, Clara, Vicente y Aitor por las comidas, paellas, tapas y charlas compartidas. Estos años no hubiesen sido iguales sin ustedes. Gracias Guillem por hacer los días más divertidos y por tu ayuda con FDS, gracias Jose por la colaboración con los modelos de Abaqus y gracias Jorge por estar siempre dispuesto a ayudarme en el laboratorio.

Sin duda mi familia argentina en Valencia fue un apoyo enorme en esta Tesis. Gracias Mer, Mica, Javi y Juan por las risas y buenos momentos compartidos. Gracias Nahu y Lu, por estar siempre, en las buenas y en las malas. Gracias Rober por las infinitas charlas, paseos y meriendas.

Gracias a mis amigos que supieron entender esta aventura y me acompañaron siempre. Gracias por estar, por compartir, por las conversaciones por Skype y por poner siempre un toque de humor a mi vida.

No puedo dejar de agradecer a Sergio por estar ahí todo este tiempo, por apoyarme en este camino, por ser mi compañero y compartir mis alegrías y mis tristezas. Gracias también a Paula y Ángel por estar siempre pendientes y acompañarme durante esta etapa.

Mi más profundo agradecimiento a mi familia por su apoyo incondicional en todo momento, por apoyar y entender mis decisiones y por ser mí ejemplo siempre. Especialmente a mis padres, Susana y Gardy, por enseñarme a ser constante y a valorar cada momento, por sus consejos, charlas y visitas. A mi papá por transmitirme su amor por la ingeniería. A mi hermana y mi cuñado, Vani y Vito, por acompañarme en todo, independiente de donde estemos y por ser siempre ejemplos de perseverancia. A mi sobrino, Lorenzo, por llenarme de amor y energía.

Resumen

Acontecimientos como los incendios en los túneles de Tauern (2000), San Gotardo (2001) y Wuxi Lihu (2010) ponen de manifiesto la gran importancia y necesidad de monitorizar las estructuras vulnerables al fuego para poder evaluar su seguridad estructural, el daño generado, las zonas afectadas y, llegado el caso, proceder a su demolición de forma segura.

En estos casos es vital poder detectar el fuego en forma temprana y conocer la historia de temperaturas, es decir el tiempo de exposición y las temperaturas máximas alcanzadas en función del tiempo para poder evaluar el estado de la estructura y el daño alcanzado; con el fin de reducir los tiempos en los que la estructura este fuera de servicio y las pérdidas que esto suele contraer.

El éxito de la monitorización de estructuras sometidas a fuego depende fundamentalmente de dos aspectos. Por un lado es fundamental contar con sistemas de sensores que sean capaces de resistir las condiciones severas que se generan en un incendio, que a su vez sean fiables, fáciles de instalar y económicos. Por otro lado, es necesario contar con pautas de monitorización de estructuras vulnerables a la acción del fuego, que guíen el diseño de la red de sensores, que indiquen los métodos más adecuados para el procesado de los datos medidos y que faciliten la toma de decisiones en caso de incendio.

En este contexto general, esta Tesis Doctoral:

1. **Desarrolla sensores de fibra óptica para la medida de temperaturas** en estructuras sometidas a altas temperaturas. Las propiedades y el comportamiento de estos sensores son evaluados en ensayos experimentales, empleando hornos eléctricos de altas temperaturas y hornos de ensayos de fuego.

2. Establece unas **pautas de monitorización en túneles frente a la acción del fuego** que guían sobre el tipo de sensores a emplear, cómo, dónde y en qué cantidad deben colocarse.

El desarrollo de los sensores tiene una fuerte componente experimental, en la cual se evalúan distintos encapsulados y las propiedades resultantes de los sensores formados por los distintos encapsulados. El comportamiento de los sensores a ambientes adversos y altas temperaturas es evaluado en ensayos de fuego que exponen a los sensores a llama directa y a gradientes de temperaturas del orden de los 200°C/min similares a los de incendios reales.

Por su parte el desarrollo de las pautas de monitorización está basado en los resultados que se obtienen con modelos de mecánicas de los fluidos computacional en los que se estudian las temperaturas alcanzadas a lo largo del túnel en diferentes condiciones de incendios. A su vez el desarrollo de las pautas de monitorización requiere el empleo de herramientas estadísticas y de comparación de soluciones que han sido empleadas para determinar las configuraciones óptimas de colocación de sensores para problemas multiobjetivo.

Palabras clave: Fibra óptica, sensores alta temperatura, *Regenerated Fiber Bragg Gratting* (RFBG), pautas de monitorización, túneles, fuego.

Resum

Esdeveniments com els incendis als túnels de Tauern (2000), Sant Gotard (2001) I Wuxi Lihu (2010) posen de manifest la gran importància I necessitate de monitoritzar les estructures vulnerables al foc per a poder avaluar la seua seguretat, el dany generat, les zones afectades i, arribat el cas, procedir a la seua demolició de forma segura. En aquestos casos és vital poder detectar el foc de forma primerenca i conéixer la historia de temperaturas, és a dir, el temps d´exposició i les temperaturas màximes aconseguides en funció del temps per a poder avaluar l´estat de l´estructura i el dany aconseguit; a fi de reduir els temps en què l´estructura estiga fora de servici i les pèrdues que açò sol contraure.

L´èxit de la monitorització d´estructures sotmeses a foc depén fonamentalment de dos aspectos. Per un costat és fonamental comptar amb sistemes de sensors que siguen capaços de resistir les condicions severes que es generen en un incendi, i al mateix temps siguen fiables, fàcils d´instal·lar i econòmics. D´altra banda, és necessari comptar amb pautes de monitorització d´estructures vulnerables a lácció del foc, que guien el disseny de la xarxa de sensors, que indiquen els mètodes més adequats per al processat de les dades i que faciliten la presa de decicions en cas d´incendi.

En aquest context general, la present Tesi Doctoral:

1. **Desenrotlla sensors de fibra òptica per a la mesura de temperaturas** en estructures sotmeses a elevades temperaturas. Les propietats i el comportament d´estos sensors son avaluats en assajos experimentals, emprant forns elèctrics d´elevades temperaturas i forns d´assajos de foc.

2. Establix unes **pautes de monitorització en túnels enfront de l´acció del foc** que guien sobre els tipus de sensors a emprar, com, on i en quina quantitat han de col·locar-se.

El desenrotllament dels sensors té una forta component experimental, en la qual s´avaluen distints encapsulats i les propietats resultants dels sensors formats pels distints encapsulats. El comportament dels sensors davant ambient adversos i altres

temperaturas es avaluat en assajos de foc que exposen als sensors a flama directa i a gradients de temperaturas de l´ordre dels 200°C/min semblants als díncendis reals.

Per la seua banda, el desenrotllament de les pautes de monitorització està basat en els resultats que s´obtenen amb models de mecániques dels fluids computacional on s´estudies les temperaturas aconseguides al llarg del túnel en diferents condicions d´incendis. Al mateix temps, el desenrotllament de les pautes de monitorització requerix l´ocupació de ferramentes estadístiques i de comparació de solucions òptimes en problemes multiobjectius.

Paraules clau: Fibra òptica, sensors alta temperatura, Regenerated Fiber Brag Gratting (RFBG), pautes de monitorització, túnels, foc.

Summary

Disasters such as the fires in the Tauern tunnel (2000), St. Gotthard tunnel (2001) and Wuxi Lihu (2010) show the importance and the necessity of monitoring structures vulnerable to fire. Through this strategy, the assessment of fire damaged structures would be possible and if necessary, the demolition operation would be guided.

In those cases is vital to detect the fire in an early stage and to have available the temperature profile history, which means the exposition time and maximum temperatures as a function of time, in order to be able to evaluate the structural damage and reduce the time that the tunnel is closed and the economic losses associated with this time.

The success of a monitoring strategy depends mainly of two aspects. On one hand, it is vital to have sensors systems that are able to resist the harsh conditions that are presents in a fire and at the same time they should be reliable, easy to install and cheap. On the other hand, it is necessary to develop monitoring strategies to design sensors network, data management and to facilitate the decision making process.

Within this general context, this PhD. Thesis:

1. **Develop fiber optic sensors to measure high temperatures** on structures vulnerable to fire. The behavior and properties of the sensors are evaluated through experimental test, using both electrical and fire test furnaces.

2. Establishment of **monitoring guidelines for tunnel under fire loads** to design a sensor network including the number, type and positions of sensors to install.

The development of the sensors has a strong experimental component, in which the different packaging and the properties of the resulting sensors are studied. The behavior of the sensors under harsh environments and under high temperatures are tested on fire test where the sensors were subjected to direct flames and temperature increments of the order of 200°C/min, similar to those in a real fire.

Instead, the development of the monitoring guidelines is based on the results obtained from computational fluid dynamics models in which the temperatures reached along the tunnel in several fire scenarios are calculated. Furthermore, the development of the monitoring guidelines makes use of statistics and comparison techniques to define the optimal solutions of multi objective sensor network design problem.

Keywords: fiber optics, high temperature sensors, Regenerated Fiber Bragg Gratting (RFBG). Monitoring guidelines, tunnels, fire.

Índice general

Resumen VII

Resum IX

Summary XI

Índice general XIII

Lista de figuras XIX

Lista de tablas XXIX

Lista de acrónimos XXXIII

Notaciones XXXV

1 Introducción y Objetivos 1

1.1 Planteamiento del problema 1
1.2 Objetivos y contribuciones de la tesis 4
1.3 Estructura de la tesis 5

2 Estado del arte 7

2.1 Incendios en túneles 8
2.1.1 Proyecto relevantes de seguridad en túneles 13

2.1.2 Mecánica de los incendios en túneles . . . 15
2.1.3 Curvas para el diseño de túneles a fuego . . . 18
2.1.4 Ensayos de fuego y modelos de mecánica de los fluidos . . . 25
2.1.5 Consecuencias de incendios en túneles . . . 28
2.1.6 Degradación del hormigón en función de la temperatura . . . 28
2.1.7 Evaluación de daños en túneles sometidos a fuego . . . 34
2.1.8 Sistemas de detección de incendios en túneles . . . 36
2.2 Monitorización estructural (SHM) . . . 39
2.2.1 Conceptos generales . . . 39
2.2.2 Componentes de un sistema de SHM . . . 41
2.2.3 Proceso de monitorización estructural . . . 41
2.2.4 Monitorización estructural en túneles . . . 44
2.2.5 Los sensores ópticos y la monitorización estructural . . . 47
2.3 Medición de alta temperatura . . . 49
2.3.1 Termopares . . . 50
2.3.2 Sensores infrarrojos . . . 51
2.3.3 Sensores ópticos . . . 52
2.3.4 Investigaciones relativas a la degradación térmica de las FBG y al desarrollo de sensores ópticos de altas temperaturas . . . 54
2.3.5 Sensores ópticos comerciales de altas temperaturas . . . 56
2.4 Conclusiones . . . 59

3 Diseño y desarrollo de un sensor puntual de altas temperaturas basado en RFBG 61

3.1 Introducción . . . 61
3.2 Encapsulado del sensor . . . 62
3.3 Hornos utilizados en los ensayos . . . 64
3.4 Redes de difracción de Bragg Regeneradas . . . 67
3.5 Calibraciones . . . 70
3.5.1 Encapsulado A . . . 72
3.5.2 Encapsulado B . . . 75
3.5.3 Encapsulado C . . . 78
3.5.4 Comparación de las calibraciones . . . 80
3.6 Temperaturas máximas y tiempos de exposición estudiados . . . 80
3.6.1 Encapsulado A . . . 81
3.6.2 Encapsulado B . . . 84

3.6.3 Encapsulado C . . . 86
3.7 Multiplexación . . . 88
3.8 Conductividad del encapsulado . . . 89
3.8.1 Ensayo experimental . . . 89
3.8.2 Modelo numérico . . . 91
3.9 Tiempos de respuesta . . . 94
3.9.1 Encapsulado A . . . 97
3.9.2 Encapsulado B . . . 97
3.9.3 Encapsulado C . . . 99
3.9.4 Comparación de los resultados . . . 99
3.10 Conclusiones . . . 103

4 Validación del sensor en ensayos de fuego 105
4.1 Introducción . . . 105
4.2 Cableado . . . 106
4.2.1 Ensayos de cableado . . . 106
4.2.2 Conclusiones de los ensayos . . . 109
4.3 Aplicación a probetas de hormigón sometidas a fuego . . . 109
4.3.1 Descripción de los sensores ensayados . . . 110
4.3.2 Descripción del ensayo . . . 111
4.3.3 Modelo numérico de transferencia de calor . . . 114
4.3.4 Resultados . . . 115
4.3.5 Conclusiones del ensayo en probetas de hormigón . . . 122
4.4 Aplicación a un elemento estructural: pilar metálico relleno de hormigón . . . 123
4.4.1 Descripción de los sensores ensayados . . . 124
4.4.2 Descripción del ensayo . . . 125
4.4.3 Modelo numérico de transferencia de calor . . . 126
4.4.4 Resultados . . . 130
4.4.5 Conclusiones del ensayo del pilar metálico relleno de hormigón . . . 132
4.5 Conclusiones . . . 133

5 Monitorización de temperaturas en túneles sometidos a fuego 135
5.1 Introducción . . . 135

5.2 Pautas para el diseño de una configuración de sensores para la monitorización de temperaturas en túneles 138
5.2.1 Paso 1: Recopilación de información 139
5.2.2 Paso 2: Definición de los escenarios de fuego 140
5.2.3 Paso 3: Modelos de mecánica de los fluidos 141
5.2.4 Paso 4: Planteo de configuraciones de sensores 142
5.2.5 Paso 5: Evaluación de las configuraciones propuestas 142
5.2.6 Paso 6: Comparación de los errores de las configuraciones y sus costos 149
5.3 Definición del sistema y del programa de monitorización 150
5.4 Gestión de datos del sistema de monitorización de temperaturas 151
5.5 Conclusiones 152

6 Deducción del escenario de incendio y validación de modelos de FDS a partir de datos de monitorización de temperaturas. Aplicación al caso del túnel Virgolo. 155

6.1 Introducción 155
6.2 Ensayo de fuego en el túnel Virgolo 158
6.2.1 Descripción del túnel 160
6.2.2 Sensores colocados en el ensayo 160
6.2.3 Datos obtenidos en el ensayo 162
6.3 Modelos de mecánica de los fluidos 165
6.3.1 Descripción del modelo e incógnitas del problema 166
6.3.2 Análisis de la pendiente longitudinal del túnel 169
6.3.3 Análisis de la tasa de liberación de calor máxima 171
6.3.4 Análisis de la altura de las bateas 174
6.3.5 Análisis de la función de crecimiento de la tasa de liberación de calor 176
6.3.6 Análisis de la geometría de las bateas 179
6.3.7 Estudio de la distancia entre bateas 186
6.3.8 Análisis de la posición de las bateas respecto a la sección transversal 190
6.3.9 Limitaciones del modelo 197
6.4 Conclusiones 199

7 Aplicación de las pautas de diseño de configuraciones de sensores para la monitorización de temperatura al caso del túnel Virgolo 201

7.1 Introducción 201
7.2 Paso 1: Recopilación de información 201

7.3 Paso 2: Definición de los Escenarios de fuego . . . 202
7.4 Paso 3: Modelos de mecánica de los fluidos . . . 203
7.5 Paso 4: Planteo de las configuraciones de sensores . . . 206
7.6 Paso 5: Evaluación de las configuraciones propuestas . . . 208
7.6.1 Cálculo de las temperaturas en todos los puntos de la cuadrícula . . . 209
7.6.2 Definición y evaluación de errores . . . 211
7.6.3 Elección del método de interpolación . . . 212
7.7 Paso 6: Comparación de los errores de las configuraciones y sus costos . . . 214
7.7.1 Selección de una configuración para cada grupo . . . 214
7.7.2 Comparación de las configuraciones seleccionadas . . . 221
7.8 Comparación de las configuraciones óptimas con cantidad total de sensores entre 400 y 600 . . . 227
7.9 Envolvente de temperaturas para cada linea de sensores . . . 232
7.10 Conclusiones . . . 232

8 Conclusiones y futuras líneas de investigación 235
8.1 Conclusiones . . . 235
8.2 Futuras líneas de investigación . . . 238
8.2.1 Sensores de alta temperatura . . . 238
8.2.2 Monitorización de estructuras a fuego . . . 239

A Listado de publicaciones del autor ligadas a la tesis 241

B Estudio del volumen de control y del tamaño de celda del modelo de FDS del túnel Virgolo 243
B.1 Estudio del Volumen de control . . . 243
B.2 Estudio del mallado y tamaño de celda . . . 245

C Gráficas complementarias Pautas túnel Virgolo 249

Índice de figuras

2.1. Causas principales de incendios en túneles según estudios de PIARC, OECD y STUVA (Marlair et al., 2004) 13

2.2. Triángulo de fuego (www.wikimedia.org) 16

2.3. Evolución típica de un incendio (Ingason, 2012) 17

2.4. Curvas nominales temperatura tiempo 20

2.5. Curvas HRR tiempo para el caso de $Q_{max} = 30MW$ (Ingason, 2006) 22

2.6. Esquema de la función HRR(t) caracterizada por tres tramos lineales . 22

2.7. Perfil de temperatura para una losa de espesor mayor a 200mm, bajo la curva ISO-834 (CEN-EN 2-1-2, 2004) 29

2.8. Curva tensión deformación para Hormigón a distintas temperaturas para áridos silíceos (CEN-EN 2-1-2, 2004) 32

2.9. Coeficiente de reducción de la resistencia característica del hormigón en función de la temperatura (CEN-EN 2-1-2, 2004) 32

2.10. Curva tensión deformación para el acero al carbono a distintas temperaturas (CEN-EN 3-1-2, 2005) 33

2.11. Relación entre la tensión de rotura de adherencia y la temperatura (Calavera, 2005) 34

2.12. Esquema típico de un sistema de monitorización estructural (Bisby y Briglio, 2004). 42

2.13. Tipos de sensores ópticos. Adaptado de Glisic e Inaudi (2007). 48

2.14. Principio de funcionamiento de una FBG 53

2.15. Nomenclatura FBG 54

2.16. Sensores OETMS-400 y OETMS-700 (*O-Eland*) 58

2.17. Opciones de encapsulado del sensor OptoTemp 2000 Ultra.(*Micro Materials*) 58

2.18. Principio de funcionamiento del sensor OptoTemp 2000 basado en fluorescencia óptica (*Micro Materials*) 58

2.19. Rejilla tipo 'chiral'. Sección longitudinal y transversal. (*Chiral Photonics*) 59

3.1. Hornos utilizados en los ensayos 64

3.2. Uniformidad de la temperatura en los hornos 66

3.3. Comparación de comportamiento de FBGs y RFBGs con la temperatura 67

3.4. Evolución en el tiempo de la temperatura y del NLPR de una FBG en el proceso de regeneración 69

3.5. Espectros en el Proceso de regeneración 69

3.6. Superposición de espectros a lo largo del tiempo 71

3.7. Encapsulado A. Ciclos calibración 73

3.8. Encapsulado A. Relación Temperatura - Longitud de onda 74

3.9. Encapsulado A. Polinomios de ajuste cuadrático y cúbico 75

3.10. Encapsulado B. Ciclo calibración. 75

3.11. Encapsulado B. Polinomios de ajuste cuadrático y cúbico 76

3.12. Encapsulado B. Detalle mediciones para el ciclo de 950°C 78

3.13. Encapsulado C. Ciclo calibración. 78

3.14. Encapsulado C. Polinomios de ajuste cuadrático y cúbico 79

3.15. Comparación calibraciones 81

3.16. Encapsulado A. Evaluación de la temperatura máxima. Ciclo 1 82

3.17. Encapsulado A. Evaluación de la temperatura máxima. Ciclo 2 83

3.18. Encapsulado A. Observación con lupa de la RFBG degradada 83

3.19. Encapsulado A. Evaluación de la temperatura máxima. Ciclo 3 84

3.20. Encapsulado B. Evaluación de la temperatura máxima. Ciclo 1 84

3.21. Encapsulado B. Evaluación de la temperatura máxima. Ciclo 2 85

3.22. Encapsulado B. Observación con lupa de la RFBG 86

3.23. Encapsulado C. Evaluación de la temperatura máxima. Ciclo 1 86

3.24. Encapsulado C. Espectros. Ciclo 1 87

3.25. Encapsulado C. Observación con lupa de la RFBG 87

3.26. NLPR en función del tiempo para dos FBGs multiplexadas en el proceso de regeneración 88

3.27. Espectros antes y después del proceso de regeneración para dos FBGs multiplexadas 89

3.28. Conductividad. Esquema del ensayo 90

3.29. Ensayo conductividad. Temperaturas fuera y dentro del horno 91

3.30. Encapsulado A. Transferencia de calor a lo largo del encapsulado para un gradiente de 980°C 92

3.31. Encapsulado B. Transferencia de calor a lo largo del encapsulado para un gradiente de 980°C 93

3.32. Encapsulado C. Transferencia de calor a lo largo del encapsulado para un gradiente de 980°C 94

3.33. Tiempo de Respuesta. Definiciones 95

3.34. Tiempo de respuesta experimentales y teóricos para Temperaturas objetivo 100, 200, 300 y 400 en la fase de calentamiento. Encapsulado A 98

3.35. Tiempo de respuesta experimentales y teóricos para Temperaturas objetivo 100, 200, 300 y 400 en la fase de enfriamiento. Encapsulado A 98

3.36. Tiempo de respuesta experimentales y teóricos para Temperaturas objetivo 100, 200, 300 y 400 en la fase de calentamiento. Encapsulado B 100

3.37. Tiempo de respuesta experimentales y teóricos para Temperaturas objetivo 100, 200, 300 y 400 en la fase de enfriamiento. Encapsulado B 100

3.38. Tiempo de respuesta experimentales y teóricos para Temperaturas objetivo 100, 200, 300 y 400 en la fase de calentamiento. Encapsulado C 101

3.39. Tiempo de respuesta experimentales y teóricos para Temperaturas objetivo 100, 200, 300 y 400 en la fase de enfriamiento. Encapsulado C 101

3.40. Comparación de Tiempos de respuesta para Temperatura objetivo de 100°C 102

3.41. Tiempos de respuesta para fase de calentamiento teóricos para los tres encapsulados para temperaturas objetivos de 100 a 1200 °C 102

3.42. Tiempos de respuesta para fase de enfriamiento teóricos para los tres encapsulados para temperaturas objetivos de 100 a 1200 °C 103

4.1. Resultados del ensayo de cableado. Ciclo 1 107

4.2. Resultados del ensayo de cableado. Ciclo 2 108

4.3. Comparación de la curva ISO 834 aplicada en el ensayo de fuego y la curva de fuego utilizada por Lönnermark et al. (2008) 110

4.4. Nomenclatura y posición de los sensores en las probetas 112

4.5. Vista frontal del horno. Posición de los quemadores en la cara lateral derecha, termómetros de placa, bloques de hormigón celular y probetas 113

4.6. Vista general del modelo de transferencia de calor 114

4.7. Temperaturas registradas por los termómetros de placa PT1 a PT4 y temperatura objetivo dentro del horno (ISO 834) 115

4.8. Probeta 1. Gráficas temperaturas - tiempo. Temperaturas registradas por los sensores ópticos (FOS), termopares (TC) y termómetros de placa (PT). Las temperaturas calculadas por los modelos numéricos también se grafican (FEM). 117

4.9. Probeta 2. Gráficas temperaturas - tiempo. Temperaturas registradas por los sensores ópticos (FOS), termopares (TC) y termómetros de placa (PT). Las temperaturas calculadas por los modelos numéricos también se grafican (FEM). 118

4.10. Probeta 1 después del ensayo 119

4.11. Probeta 2 después del ensayo 119

4.12. Temperaturas calculadas por el modelo en el hormigón para Probeta 1 en el intervalo de tiempo t=3600 seg. 121

4.13. Vista frontal del horno previo al ensayo. Pilar tubular y termómetros de placa. 125

4.14. Instalación de los sensores embebidos (FOS2 y FOS3) 127

4.15. Instalación del sensor en superficie (FOS1) 128

4.16. Protección del cableado 128

4.17. Modelo numérico de transferencia de calor 129

4.18. Temperaturas registradas por los sensores ópticos (FOS1, FOS2 y FOS3), temperaturas registradas por los termopares (TC1, TC2 y TC3), temperaturas calculadas por el modelos numérico para las tres posiciones en estudio (FEM1, FEM2 y FEM3), temperatura objetivo dentro del horno (ISO 834) y temperatura promedio registrada por los termómetros de placa (PT prom.) 130

4.19. Resultados del ensayo de tiempo de respuesta para el FOS1 y el TC1, para temperaturas objetivo de 100, 200, 300 y 400°C 132

5.1. Vista 3D del túnel, superficie monitorizada y puntos de la cuadricula . 138

5.2. Ejemplo de configuración de sensores (puntos rojos) con $N_y = 5$ y $N_x = 6$. Los puntos celestes representan los puntos de interpolación. . 143

5.3. Posiciones relativas del fuego y las secciones de sensores 144

5.4. Diagrama de cajas y bigotes. Ejemplo y nomenclatura 147

5.5. Ejemplo de frontera de Pareto para una carga de fuego determinada y 20 configuraciones de sensores 149

6.1. Estrategia para la deducir el escenario de fuego a partir de datos de monitorización de temperaturas 157

6.2. Esquema del ensayo de fuego (Bergmeister, 2006). 159

6.3. Geometría de la sección transversal del túnel 160

6.4. Sensores de temperatura utilizados en el ensayo. Posiciones y nomenclatura 161

6.5. Temperatura registradas por los termopares del ensayo en la posición 7 de la sección transversal para diferentes posiciones en longitud. . . . 162

6.6. Temperatura registradas por los termopares del ensayo en la posición 5 de la sección transversal para diferentes posiciones en longitud. . . . 163

6.7. Temperatura registradas por los termopares del ensayo en la posición 3 de la sección transversal para diferentes posiciones en longitud. . . . 163

6.8. Temperatura registradas por los termopares del ensayo en las posiciones D13 a D16 y por el termopar embebido en el hormigón a 5mm de la superficie en la posición D16. 164

6.9. Geometría del modelo 166

6.10. Planta túnel. Esquema la carga de fuego. 168

6.11. Comparación de temperaturas obtenidas por los modelos de FDS variando la pendiente longitudinal 170

6.12. Comparación de temperaturas obtenidas por los modelos de FDS variando la tasa de liberación de calor máxima 173

6.13. Comparación de temperaturas obtenidas por los modelos de FDS variando la altura de las bateas 175

6.14. Tasa de liberación de calor en función del tiempo para el modelo V_860_h8 178

6.15. Comparación de temperaturas obtenidas por los modelos de FDS variando la función de crecimiento de la tasa de liberación de calor . . . 180

6.16. Geometrías de las bateas estudiadas 181

6.17. Posición de las bateas estudiadas 181

6.18. Comparación de temperaturas obtenidas por los modelos de FDS variando el área de las bateas para los modelos con la distancia entre ejes de bateas constante 183

6.19. Comparación de temperaturas obtenidas por los modelos de FDS variando el área de las bateas para los modelos con la separación entre bateas igual a 1,2m 184

6.20. Perfiles de velocidades y temperaturas en el plano vertical del túnel x=0, t=4 min 185

6.21. Comparación de temperaturas obtenidas por los modelos de FDS variando la sección de las bateas para el área 'h' 187

6.22. Comparación de temperaturas obtenidas por los modelos de FDS variando la distancia libre entre bateas para el área 'b' 188

6.23. Comparación de temperaturas obtenidas por los modelos de FDS variando la distancia libre entre bateas para el área 'e' 189

6.24. Comparación de temperaturas obtenidas por los modelos de FDS variando la distancia al eje longitudinal para el área 'h' 192

6.25. Comparación de temperaturas obtenidas por los modelos de FDS variando la distancia al eje longitudinal para el área 'b' 193

6.26. Comparación de temperaturas obtenidas por los modelos de FDS variando la distancia al eje longitudinal para el área 'e' 194

6.27. Comparación de temperaturas obtenidas por los modelos de FDS variando la HRRPUA para los modelos seleccionados. 196

6.28. Comparación temperaturas registradas (líneas continuas) por los termopares a lo largo del intradós de túnel (posición 5) y temperaturas simuladas (líneas de trazos) 197

6.29. Comparación temperaturas registradas (líneas continuas) por los termopares en la sección transversal de túnel para x=0 y temperaturas simuladas (líneas de trazos) 198

7.1. Curva típica de la HRR en función del tiempo 202

7.2. Escenarios de fuego estudiados. HRR en función del tiempo 202

7.3. División del perímetro de la sección transversal del túnel y nomenclatura de los puntos 205

7.4. Distribución de sensores en la sección transversal. En cada fila se representan 5 distribuciones diferentes de una misma cantidad de sensores. 207

7.5. Resultados de un modelo de FDS. Temperaturas reales para el intervalo de tiempo t=15 min para el escenario de fuego HRR=100 en el centro del túnel y en el centro de la sección transversal 208

7.6. Métodos de interpolación para la configuración 'ckr 20' 210

7.7. Diagrama de cajas y bigotes para los 4 índices para la configuración 'cimr 5' considerando las 36 situaciones posibles 213

7.8. Evaluación de los errores para las 5 configuraciones con $N_y = 3$ y $nx = 5$215

7.9. diagramas de pareto RMSE 222

7.10. diagramas de pareto MAE 223

7.11. diagramas de pareto MAE(RE300) 224

7.12. diagramas de pareto MAE(RE600) 225

7.13. Diagrama de burbuja representando el porcentaje de los casos en los cuales una configuración forma parte de la frontera de pareto. 226

7.14. Sección transversal x=0. Escenario de fuego con HRR 100 ubicado en el centro de la longitud del túnel y en el centro de la sección, t=600 s 228

7.15. Sección transversal x=0. Escenario de fuego con HRR 100 ubicado en el centro de la longitud del túnel y en el centro de un carril, t=600 s . 228

7.16. Sección longitudinal, posición 'l'. Escenario de fuego con HRR 100 ubicado en el centro de la longitud del túnel y en el centro de la sección, t=600 s 229

7.17. Sección longitudinal, posición 'l'. Escenario de fuego con HRR 100 ubicado en el centro de la longitud del túnel y en el centro de un carril, t=600 s 229

7.18. Curvas de nivel de las Temperaturas calculadas (°C), Diferencia entre las Temperaturas reales y las calculadas (°C) y Error relativo (%) para las configuraciones 'cfkor 10', 'ceimpr 10' y 'bdhknqs 10' 230

7.19. Isotermas de las Temperaturas reales obtenidas para el escenario de fuego con HRR 100 ubicado en el centro de la longitud del túnel y en el centro de la sección, t=600 s 231

7.20. Temperaturas máximas alcanzadas por cada escenario de fuego en función de su posición en la sección transversal 233

B.1. Velocidades en el plano en plano vertical que pasa por eje de las bateas en los 40 m centrales del túnel [m/s]. Intervalo de tiempo t=450 s . . 244

B.2. Comparación de temperaturas obtenidas por los modelos de FDS variando la longitud total del modelo. Resultados para el punto x=0 posición 5 (D15) 245

B.3. Comparación de temperaturas obtenidas por los modelos de FDS variando la el mallado del modelo. 247

Índice de tablas

2.1. Listado de incendios en túneles de carretera (ASHRAE, 2007; NCHRP, 2011) 9

2.2. HRR máximas propuestas por diferentes instituciones y autores [MW]. 21

2.3. Curvas de diseño de acuerdo con la normativa francesa (CETU, 2003) 23

2.4. Comparación entre ensayos y CFD (Kuzmin, 2011) 26

2.5. Consecuencias de incendios en túneles 28

2.6. Cambios en el hormigón causados por la temperatura (Nijland y Larbi, 2001; Georgali y Tsakiridis, 2005; Concrete Society, 2008) 31

2.7. Sensores de fibra óptica para la medida de altas temperaturas disponibles en el mercado 57

3.1. Encapsulados propuestos 63

3.2. Características de los hornos utilizados 65

3.3. Comparación de los hornos disponibles 66

3.4. Encapsulado A. Desplazamiento de longitudes de onda a longitud de onda de referencia 74

3.5. Encapsulado A. Indicadores estadísticos 74

3.6. Encapsulado B. Indicadores estadísticos. 76

3.7. Encapsulado B. Desplazamiento de la curva de calibración 77

3.8. Encapsulado C. Indicadores estadísticos. 80

3.9. Encapsulado C. Desplazamiento de la curva de calibración 80

3.10. Comparación calibraciones. 81

3.11. Resumen tiempos de respuesta [seg.] para $T_{obj} = 100$ 99

4.1. Ubicación y características de los sensores 111

4.2. Ubicación y características de los sensores 124

4.3. Resumen de los tiempos de respuesta del ensayo 132

5.1. Tasas de liberación de calor propuestas 141

6.1. Resumen de los modelos variando la pendiente longitudinal 169

6.2. Resumen de los modelos variando la tasa de liberación de calor máxima 172

6.3. Resumen de los modelos variando la altura de las bateas 174

6.4. Cálculo de la Energía del modelo 178

6.5. Resumen de los modelos variando la función de crecimiento de la tasa de liberación de calor 179

6.6. Resumen de los modelos variando la geometría de las bateas 182

6.7. Resumen de los modelos variando posición al eje del túnel bateas . . . 186

6.8. Resumen de los modelos variando la distancia d 191

7.1. Cargas de fuego propuestas 203

7.2. Tamaño de celda necesario para los modelos con Q_{max} menores a 30 MW 204

7.3. RMSE máximos 217

7.4. MAE máximos 218

7.5. MAE(RE300) máximos 219

7.6. MAE(RE600) máximos 220

7.7. Temperaturas máximás (°C) 232

B.1. Modelos estudiados para definir el volumen de control 244

B.2. Modelos estudiados para definir el mallado 246

Lista Acrónimos

AIDICO	Instituto tecnológico de la Construcción
CETU	Centre D'estudes des tunnels (Centro de estudios de los túnles)
CFD	Computer Fluid Dinamics (Modelo de mecánica de los fluidos)
DARTS	Durable And Reliable Tunnels Structures
DNS	Direct Numerical Simulation
EGOLF	European Group of Organizations for Fire Testing
EMI	Electric and Magnetic interference (Interferencias magnéticas y eléctricas)
FBG	Fiber Bragg Grating (Redes de difracción de Bragg)
FDS	Fire dynamics simulator
FEM	Finite Element Method (método de elementos finitos)
FHWA	Federal Highway Administration
FIT	Fire In Tunnels
FOS	Fiber Optic Sensor (sensor óptico)
HC	Curva de hidrocarburos
HCM	Curva de hidrocarburos modificada
HGV	Heavy Goods Vehicle (Vehículo de transporte de cargas pesadas)
HRR	Heat Release Rate (tasa de liberación de calor)
HRRPUA	Heat Release Rate Per Unit Area (tasa de liberación de calor por unidad de área)
ICITECH	Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón
ISO	International Organization for Standardization
ITA	Iternational Tunneling Association
ITEAM	Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia

LES	Large Eddy Simulation
MAE	Mean Absolute Error (error abosuluto medio)
MAE(RE300)	Error medio absoluto del error relativo de los puntos que tienen temperaturas mayores a 300°C
MAE(RE600)	Error medio absoluto del error relativo de los puntos que tienen temperaturas mayores a 600°C
ME	Mean Error (error medio)
MSE	Mean Square Error (error cuadrático medio)
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
NDT	Non Destructive Test (ensayos no destructivos)
NFPA	National Fire Protection Association
NIST	National Institute of Standards and Technology
NLPR	Nivel de Lóbulo Principal a Ruido
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
PCHIP	Piecewise Cubic Hermite Interpolating Polynomial
PIARC	Permanent International Association of Road Congress
PT	Plate Thermometer (termómetros de placa)
RABT	Richtlinien für Ausstattung und Betrieb Tunneln (Directrices para el equipamiento y operación de túneles)
RANS	Reynolds Average Navier Stokes
RFBG	Regenerated Fiber Bragg Grating (Redes de difracción de Bragg regeneradas)
RIC	Rango Intercuartílico
RMSE	Root Mean Square Error (raiz del error cuadrático medio)
SHM	Structural Health Monitoring
SIRTAKI	Safety Improvement in Road and rail Tunnels using Advanced Knolodge Intensive decision support.
SOFO	Surveillance d'Ouvrages par Fibres Optiques (monitorización estructural utilizando fibra óptica)
STUVA	Studiengesellschaft für unterirsiche Verkersanlagen mbH (Asociación de investigación para el servicio de transporte subterraneo Ltd.)
TC	Thermocouple (termopar)
UPTUN	UPgrading of existing TUNnels

Notaciones

a_3, b_3, c_3, d_3	Coeficientes de calibración para un ajuste cúbico
A	Área de la sección transversal de un túnel
A_f	Área de la carga de fuego
b_2, c_2, d_2	Coeficientes de calibración para un ajuste cuadrático
c	Calor específico del material
d	Distancia transversal desde el eje del túnel al aje de la carga de fuego
d_x	Distancia longitudinal entre dos puntos
d_{y*}	Distancia entre dos puntos a lo largo del desarrollo del perímetro de la superficie monitorizada
D	Diámetro característico de una batea de fuego
D^*	Diámetro característico de la llama
e	Espesor del encapsulado
E_{batea}	Energía disponible de una batea
E_{tot}	Energía total liberada por el fuego
g	Gravedad
h	Altura del pilar o altura de la carga de fuego (medida desde el pavimento a la carga de fuego)
$\dot{h}_{net}$	Flujo neto de calor
H	Estadístico de la prueba de Kruskal - Wallis
i	Pendiente longitudinal del túnel
k	Cantidad de muestras
k_β	Constante empírica dependiente del combustible
K_T	Coeficiente de sensibilidad en temperatura de la red de difracción
L	Longitud de un túnel

L_{long}	Dimensión longitudinal del rectángulo que limita la carga de fuego
L_{trans}	Ancho del rectángulo que limita la carga de fuego
m	Masividad
m_c	Cantidad de material combustible
$\dot{m}$	Velocidad de combustión de la masa
$\dot{m}_a$	Velocidad de flujo de la masa de aire
n	Cantidad de puntos de la cuadrícula de puntos de la superficie monitorizada
n_{300}	Cantidad de puntos de la cuadrícula de puntos de la superficie monitorizada que tienen temperaturas mayores que 300°C
n_{600}	Cantidad de puntos de la cuadrícula de puntos de la superficie monitorizada que tienen temperaturas mayores que 600°C
n_{eff}	Índice de refracción efectivo del núcleo de la fibra óptica
n_x	Separación en sentido longitudinal del túnel de dos secciones transversales monitorizadas consecutivas
N	Tamaño total de todas las muestras
N_i	Tamaño de la muestra i
N_x	Cantidad de secciones transversales monitorizadas de un túnel
N_y	Cantidad de sensores que tiene cada secciones transversal monitorizadas de un túnel
$Q1$	Primer cuartil. Valor por debajo del cual queda un cuarto (25 %) de todos los valores de una serie ordenada
$Q3$	Tercer cuartil. Valor por debajo del cual quedan las tres cuartas partes (75 %) de todos los valores de una serie ordenada
Q_{batea}	Tasa de liberación de calor máxima de una batea
Q_{max}	Tasa de liberación de calor máxima
s	Distancia libre entre bateas
t_d	Tiempo en el que finaliza el incendio (duración del incendio)
t_D	Tiempo en el que empieza la fase de decrecimiento en la función de la tasa de liberación de calor
t_{max}	Tiempo en el que se alcanza la tasa de liberación de calor máxima
T_0	Temperatura inicial
T_a	Temperatura ambiente
T_c	Temperatura en el hormigón
T_{cal}	Temperaturas calculadas por interpolación de temperaturas conocidas

$T_{c,c}$	Temperatura crítica de calentamiento
$T_{c,e}$	Temperatura crítica de enfriamiento
$T(\Delta\lambda)$	Temperatura en función de la variación de la longitud de onda
T_{FDS}	Temperaturas obtenidas de un modelo de mecánica de los fluidos
T_g	Temperatura del gas
T_i	Temperatura al inicio del ensayo
$T(\lambda)$	Temperatura en función de la longitud de onda
T_{obj}	Temperatura objetivo
Tr	Temperatura registrada por un sensor
$T_{r,c}$	Tiempo de respuesta para la etapa de calentamiento
$T_{r,e}$	Tiempo de respuesta para la etapa de enfriamiento
T_{ref}	Temperatura de referencia
Ts	Temperatura simulada por un modelo
v	Velocidad longitudinal en un túnel

α_c	Coeficiente de transferencia de calor por convección
$\alpha_{D,g}$	Tasa de decrecimiento cuadrático de la tasa de liberación de calor
$\alpha_{D,L}$	Tasa de decrecimiento lineal de la tasa de liberación de calor
$\alpha_{g,g}$	Tasa de crecimiento cuadrático de la tasa de liberación de calor
$\alpha_{g,L}$	Tasa de crecimiento lineal de la tasa de liberación de calor
χ	Coeficiente de eficiencia de la combustión
$\phi_{exterior}$	Diámetro exterior del encapuslado (mm)
$\phi_{interior}$	Diámetro interior del encapuslado (mm)
$\delta\mathcal{E}$	Variación de la deformación unitaria
δx	Tamaño de celda en un modelo de macánica de los fluidos
ΔH_c	Calor de combustión
$\Delta\lambda_B$	Variación de la longitud de onda reflejada en una red de difracción de Bragg
Δn	Variación del índice de refracción del núcleo de una fibra óptica
Δt_h	Intervalo de tiempo que se tarda en colocar el sensor dentro del horno
ΔT	Variación de Temperatura
ΔT_m	Incremento de temperatura en el espesor del encapsulado

ϵ	Emisividad resultante del producto de la emisividad del fuego por la emisividad del material
κ	Constante de Stephan- Bolzman
λ_0	Longitud de onda inicial
λ_B	Longitud de onda de Bragg
λ_f	Longitud de onda final
λ_{ref}	Longitud de onda inicial de referencia
Λ	Periodo espacial de las pertubaciones inducidas en el índice de refracción del núcleo de la fibra
ρ	Densidad del material
ρ_a	Densidad del aire
$\tau_{u,inc}$	Tensión de rotura de adherencia después del incendio
τ_u	Tensión de rotura de adherencia antes del incendio

Capítulo 1

Introducción y Objetivos

1.1 Planteamiento del problema

El rápido crecimiento de las urbanizaciones en los últimos años, la necesidad de nuevas vías de transporte y criterios medioambientales han llevado a la congestión de las carreteras existentes y al aumento del número de túneles. Los túneles y las estructuras subterráneas resultan cada vez más indispensables para descongestionar áreas urbanas.

Sin embargo, junto con el aumento del número de túneles y sus longitudes, se han producido accidentes que han disparado el interés público por la seguridad en los mismos y han llevado a una gran inversión de la Unión Europea y Estados Unidos en proyectos de investigación que apuntan a mejorar la seguridad en túneles. Estos proyectos tienen diferentes objetivos, como evaluar estrategias de mejora de túneles existentes para disminuir la posibilidad de accidentes y a su vez garantizar una respuesta más adecuada en caso de incendios; optimizar el diseño de túneles, etc. De los resultados de estos proyectos surgieron la Directiva 2004/4/EC del Parlamento Europeo respecto a los requerimientos mínimos para la seguridad en túneles de carretera y la actualización la normativa para túneles de carretera, puentes y otras carreteras de difícil acceso de la NFPA (*National Fire Protection Association*, 2010).

A su vez la ITA (*International Tunneling Association*, 2004) ha desarrollado guías para categorizar los diferentes túneles y proteger sus elementos estructurales ante la acción del fuego con el objetivo de brindar seguridad tanto a las personas como a los equipos de rescate. Estas recomendaciones remarcan la importancia de proteger la estructura del colapso por un período de tiempo determinado y la necesidad de disminuir los costos indirectos asociados a la operación anormal del túnel hasta que esté completamente rehabilitado.

Se ha realizado por tanto un gran esfuerzo por disminuir el **riesgo** de pérdidas de vidas a causa de **incendios en túneles** y numerosos proyectos se han realizado para evaluar alternativas que reduzcan la probabilidad de ocurrencia de este tipo de eventos y/o las consecuencias asociadas a las pérdidas humanas. No obstante, son muy pocas las medidas desarrolladas para disminuir las consecuencias de un incendio en términos económicos.

Las consecuencias económicas asociadas a incendios en túneles dependen en gran medida del *tiempo* que el túnel esté cerrado. Además, la evaluación de daños en estructuras sometidas a fuego es una tarea complicada. En el caso de incendios en túneles, la aplicación de técnicas no destructivas o menormente destructivas para evaluar la capacidad remanente de la estructura y sus materiales componentes luego de un incendio resultan de difícil aplicación por la rugosidad y por la no verticalidad de las superficies. A su vez algunos autores destacan las dificultades existentes en estimar las temperaturas máximas alcanzadas y en que conocer la historia de temperaturas a la cuál fue sometida la estructura sería de gran utilidad para realizar el diagnóstico.

La **monitorización de estructuras** (*Structural Health Monitoring*, en inglés o SHM) puede brindar una solución a este problema. Esta disciplina se puede definir como el empleo de medidas regulares tomadas in situ de parámetros estructurales y medioambientales claves para alertar de estados anómalos de la estructura, impedir accidentes y proporcionar consejos para las tareas de mantenimiento y rehabilitación (Li et al., 2004).

En el caso de los túneles, es habitual monitorizar su comportamiento estructural y el de los edificios aledaños durante la fase constructiva. En su etapa de servicio existen numerosos sistemas para detectar el inicio de un incendio, algunos de estos se basan en detectar variaciones de temperaturas. Sin embargo estos sistemas no pueden ser utilizados como sistemas de monitorización de altas temperaturas durante un incendio ya que su rango de funcionamiento no suele superar los 185°C y por lo tanto funcionan solo durante los primeros minutos del incendio.

En este contexto, esta Tesis Doctoral plantea monitorizar las temperaturas en túneles vulnerables a la acción del fuego con el objetivo de conocer la historia de temperaturas a la cual está expuesta la estructura en función del tiempo durante todo el incendio. Esta medida facilita las tareas de evaluación de daños y permite la puesta en funcionamiento del túnel en un plazo menor y por lo tanto reduce las pérdidas económicas. La **monitorización de temperaturas**, por tanto, es una medida que, a priori, apunta a la **disminución de las consecuencias económicas de un incendio en túneles**, y a su vez permite mejorar las tareas de evacuación y de extinción del incendio; con lo cual también conlleva una reducción en las pérdidas de vidas. Sin embargo, hasta el momento la monitorización de temperaturas en túneles ha sido considerada como una medida para detectar el incendio y no se ha considerado la monitorización de temperaturas como una medida que brinde información durante el proceso de extinción, de diagnóstico y reparación de la estructura.

Los sistemas de monitorización se componen de tres elementos: un sistema de sensores, un sistema de procesado de datos (adquisición, transmisión y almacenaje de los datos) y un sistema de evaluación de la seguridad de la estructura. Por lo tanto para definir la estrategia de monitorización de temperaturas en túneles se requiere de **sensores de altas temperaturas** y **pautas de monitorización** que guíen en el diseño de la distribución y cantidad de sensores.

Tradicionalmente, los sensores eléctricos se han empleado en los trabajos de monitorización, pero cada vez se utilizan más los **sensores de fibra óptica**, y dentro de ellos, los sensores basados en el empleo de las redes de difracción de Bragg (*Fiber Bragg Gratings* en inglés, FBGs en adelante). El éxito de los sensores ópticos se debe a la disminución de su precio y a sus ventajas respecto a los sensores convencionales. Las principales ventajas de los sensores ópticos son: su capacidad de multiplexación que hace que en una sola fibra óptica puedan disponerse múltiples sensores, inmunidad a las interferencias electromagnéticas y que son pasivos, es decir, no requieren el aporte de energía para funcionar correctamente (Glisic e Inaudi, 2007).

La monitorización de temperaturas en túneles durante un incendio requiere de sensores que puedan medir temperaturas del orden de los 1200°C. No obstante, los sensores para la medición de temperaturas superiores a los 600ºC basados en la tecnología de fibra óptica son muy escasos. Las FBGs convencionales sufren una degradación importante cuando son sometidas a elevadas temperaturas. De hecho, los sensores ópticos comerciales convencionales basados en FBGs miden temperaturas máximas de 300ºC.

Los sensores eléctricos existentes de alta temperatura no son adecuados para la monitorización de estructuras debido a que cada uno necesita conectarse con cable independiente al equipo de adquisición de datos, lo que limita la cantidad de sensores a instalarse. Mientras que los sensores ópticos distribuidos trabajan normalmente con temperaturas de hasta 185°C, existiendo algunas tecnologías novedosas que alcanzan los 750ºC.

En los últimos años se han propuesto alternativas para superar las temperaturas límites de trabajo de las FBGs. Sin embargo, la fibra óptica no puede instalarse sin protección en el exterior o interior de una estructura porque es muy frágil y las condiciones de la obra y las inclemencias del tiempo la destruirían. Por ello, los sensores ópticos están formados por lo menos de la fibra óptica y un **encapsulado** que protege a la fibra. El diseño de este encapsulado y su modo de fijación a la estructura son elementos claves para el correcto funcionamiento del sensor y su diseño es uno de los objetos primordiales de todo desarrollo de sensores.

En resumen, existen grandes lagunas relativas al empleo de sensores ópticos para la medición de altas temperaturas en elementos estructurales sometidos a los efectos de un incendio, a pesar de las importantes aplicaciones que este tipo de sensores podrían

encontrar. Así mismo, las pautas sobre como monitorizar una estructura son muy escasas y, en el caso de estructuras vulnerables al fuego, como los túneles, inexistentes.

1.2 Objetivos y contribuciones de la tesis

La presente Tesis Doctoral se centra en el empleo de la monitorización de temperaturas en túneles como una alternativa para disminuir las consecuencias de incendios, fundamentalmente las económicas. Se plantea la monitorización de altas temperaturas, ya que se considera el parámetro fundamental para estudiar fenómenos relacionados con la acción del fuego y permite a partir de él evaluar la magnitud del incendio, las propiedades de los materiales, el daño ocasionado y el estado global de la estructura.

En este contexto, los objetivos principales de esta Tesis Doctoral son:

1. **Desarrollar un sensor de fibra óptica para la medida de altas temperaturas** en estructuras sometidas a altas temperaturas.
2. Establecer **pautas de monitorización en túneles frente a la acción del fuego** que guíen sobre el tipo de sensores a emplear y fundamentalmente cómo, dónde y en qué cantidad deben colocarse.

El **sensor de altas temperaturas** desarrollado y estudiado en esta Tesis Doctoral está basado en el empleo de fibra óptica por ser una tecnología emergente con numerosas ventajas como se detalla en el capítulo 2. En el campo de los sensores ópticos de altas temperaturas existen aspectos que requieren ser estudiados en mayor profundidad. Estos establecen las principales contribuciones y objetivos particulares de la presente Tesis Doctoral respecto a este punto:

- El diseño y el estudio de encapsulados de sensores ópticos puntuales y multiplexables de altas temperaturas.
- El desarrollo de un programa experimental en laboratorio que valide el funcionamiento de los sensores desarrollados y que permita:
  - Caracterizar las respuestas de las redes de difracción de Bragg regeneradas y encapsuladas frente a elevadas variaciones térmicas y evaluar la influencia de la presencia del encapsulado en las mismas
  - Evaluar las temperaturas máximas a las que pueden trabajar los sensores desarrollados.
- El desarrollo de pautas para evaluar el tiempo de respuesta de sensores ópticos de temperatura. Aplicación de éstas para la evaluación del tiempo de respuesta de los sensores en forma experimental y teórica.

- El estudio de la regeneración de redes de difracción Bragg multipleaxadas.
- La validación de los sensores en elementos estructurales de laboratorio sometidos a fuego. Es decir, validación del correcto funcionamiento de los sensores en un ambiente agresivo, expuestos a llama directa y a gradientes de temperatura importantes que no son posibles de lograr en horno eléctricos de laboratorio.
- El estudio de formas de protección del cableado y de diferentes formas de colocación: utilización de adhesivo y bridas de alta temperaturas y embebidos en hormigón

Las **pautas de monitorización de altas temperaturas en túneles** desarrolladas en esta tesis están basadas en el concepto utilizado por Glisic e Inaudi (2007) de subdividir la estructura en celdas e instrumentarlas en forma eficiente y en el concepto de planificación óptima de sistemas de monitorización de Orcesi y Frangopol (2011) el cuál considera al problema como uno con dos objetivos: maximizar la calidad de los datos de la monitorización y minimizar el costo de la instalación. Siendo las pautas de monitorización de temperaturas en casos de incendios inexistentes, las principales contribuciones y objetivos particulares de la presente Tesis Doctoral respecto a este punto son:

- La propuesta de una metodología para el diseño de una configuración de sensores para la monitorización de temperaturas en túneles.
- La aplicación de la metodología propuesta a un caso concreto.
- La validación del empleo de los datos de un sistema de monitorización de temperaturas para deducir un escenario de incendio en un túnel. Esto se hace a través de un caso concreto.

1.3 Estructura de la tesis

El contenido de esta tesis está dividido en ocho capítulos.

El **capítulo 1** describe la problemática estudiada y los objetivos de la tesis.

El **capítulo 2** resume el estado del arte relativo a los temas de la tesis, resaltando la necesidad de la presente investigación. Este capítulo está dividido en tres partes: la primera estudia la problemática de los incendios en túneles, la segunda la monitorización estructural y la tercera la medición de altas temperaturas.

El **capítulo 3** presenta el diseño y desarrollo de un sensor de alta temperatura basado en la tecnología de redes de difracción de Bragg regeneradas. Se estudian las propiedades del sensor en función de los encapsulados estudiados.

El **capítulo 4** presenta la aplicación de los sensores desarrollados en ensayos de fuego. En el primer ensayo presentado se adhieren los sensores a las superficies de probetas de hormigón y en el segundo ensayo se adhiere un sensor a la superficie exterior de un pilar metálico relleno de hormigón y se colocan dos sensores multiplexados embebidos en el hormigón. Estos ensayos exponen a los sensores, cableado y sistemas de fijación a condiciones severas similares a las de incendios reales.

El **capítulo 5** plantea el concepto de la monitorización de temperaturas en túneles como una alternativa para disminuir las consecuencias de los incendios en túneles, fundamentalmente las económicas. Además desarrolla una metodología para el diseño de una red de sensores de alta temperatura para la monitorización de temperaturas en túneles. La instalación de esta red de sensores permitiría la monitorización de las temperaturas del túnel en caso de incendio y facilitaría las tareas de diagnóstico, disminuyendo el tiempo de cierre del túnel y las pérdidas económicas.

El **capítulo 6** valida la posibilidad de deducir el escenario de incendio a partir de datos obtenidos de la monitorización de temperaturas y la utilización de modelos de mecánica de los fluidos. En particular se trabaja con los datos registrados en un ensayo de fuego en el túnel Virgolo.

El **capítulo 7** presenta la aplicación de la metodología desarrollada en el capítulo 5 al caso del túnel Virgolo. Para ello se emplea el modelo de mecánica de los fluidos validado en el capítulo 6. En este capítulo también se presentan algunas formas de representar los datos que se pueden obtener en la monitorización de temperaturas en túneles.

El **capítulo 8** resume las conclusiones de la presente tesis doctoral y plantea futuras líneas de investigación.

Finalmente en el **Apéndice A** recoge las publicaciones derivadas de la presente tesis doctoral. Los **Apéndices B y C** contienen información complementaria a la investigación desarrollada.

Capítulo 2

Estado del arte

La importancia de los túneles de carretera se ve reflejada en el aumento del volumen de tráfico y de la cantidad de kilómetros construidos. Por ejemplo, Ingason y Wickström (2011) estiman un incremento del volumen del tráfico privado en un 50 % y del público en un 100 % para el año 2020 y que se construirán aproximadamente 2500 km de túneles en Europa.

A su vez accidentes recientes en túneles han disparado el interés público por la seguridad en los mismos y han llevado a una gran inversión de la Unión Europea y Estados Unidos en proyectos de investigación que apuntan a mejorar la seguridad en túneles, fundamentalmente buscando disminuir el riesgo ante la ocurrencia de un incendio y mejorando el diseño.

En este capítulo se identifican las investigaciones previas relacionadas con los temas estudiados en la tesis. El capítulo está dividido en tres apartados. La sección 2.1 plantea la problemática de los incendios en túneles y sus consecuencias, con especial énfasis en el rol de la temperatura en el fenómeno del incendio y la importancia de conocer la historia de temperaturas para realizar un diagnóstico. La sección 2.2 expone una visión sobre la monitorización estructural y su aplicación a túneles. Finalmente la sección 2.3 hace referencia a la medición de altas temperaturas y en particular a la medición de temperaturas en ensayos de fuego o estructuras sometidas a fuego y a los sensores de fibra óptica de alta temperatura.

2.1 Incendios en túneles

De acuerdo con varias estadísticas europeas referidas por Carvel y Marlair (2012) es menos probable que ocurra un accidente en un túnel que en un tramo carretera a cielo abierto. Sin embargo, si consideramos el tráfico de los túneles, el crecimiento de los mismos en los últimos años y las consecuencias asociadas a incendios en túneles, las posibilidades de que ocurra un accidente en un túnel con consecuencias serias no resultan tan remotas (Carvel y Marlair, 2012).

Según Brousse et al. (2005) las estadísticas europeas estiman que el fuego se produce con una frecuencia de aproximadamente 4 a 5 incendios por cada 100 millones de kilómetros de vehículos. Menos del 1 % de los incendios será caracterizado como incendios con consecuencias graves (incendios que involucran lesiones, muertes o daños materiales grandes).

A su vez las estadísticas señalan las siguientes probabilidades de accidentes:

- 1 accidente por cada 1,1 millones de vehículos por kilómetro en carreteras principales.
- 1 accidente por cada 3 millones de vehículos por kilómetro en túneles bidireccionales.
- 1 accidente por cada 6 millones de vehículos por kilómetro en túneles unidireccionales.

Estos datos reflejan que los túneles bidireccionales y unidireccionales son 3 y 6 veces más seguros respectivamente que un tramo de carretera principal a cielo abierto de igual longitud.

La tabla 2.1 resume los incendios en túneles de carretera más importantes desde 1949. Esta tabla proporciona información sobre el año del incendio, la ubicación del túnel y su longitud, la duración del fuego y sus consecuencias reflejadas como daños a las personas, vehículos y a la estructura. Se destaca que en los incendios donde se ven involucrados camiones las consecuencias son más severas.

Por su parte los incendios en túneles ferroviarios tienen asociado un gran potencial de pérdidas de vidas humanas debido a la cantidad de pasajeros que transportan. No obstante, de acuerdo con Carvel y Marlair (2012) este tipo de accidentes tienen una probabilidad de ocurrencia muy baja debido a que en los túneles ferroviarios de pasajeros la carga combustible existente suele ser baja. Por lo tanto esta tesis se centra en el estudio de los túneles de carretera.

Tabla 2.1: Listado de incendios en túneles de carretera (ASHRAE, 2007; NCHRP, 2011)

Año	Túnel	País	Long.(m)	Duración del fuego	Daños Personas	Daños Vehículos	Daños Estructura
1949	Holland	Estados Unidos	2550	4h	66 heridos	10 camiones, 13 coches	Severo
1965	Blue Mountain	Estados Unidos	1300			1 camión	
1967	Suzaka	Japón	244	11h	2 heridos	12 camiones	
1968	Moorfleet	Alemania	243	1h		1 camión	Severo
1970	Wallace	Estados Unidos	1000				Menor
1974	Mont Blanc	Francia, Italia	11600	15min	1 herido		
1974	Chesapeake Bay Bridge	Estados Unidos	2440	4h	1 herido	1 camión	
1976	Crossing BP	Francia	430	1h	12 heridos	1 camión	Severo
1978	Velsen	Países Bajos	770	1h 20min	5 muertos 5 heridos	4 camiones, 2 coches	Severo
1979	Nihonzaka	Japón	2045	159 h	7 muertos 2 heridos	127 camiones, 46 coches	Severo
1980	Kajiwara	Japón	740	1,5h	1 muerto	2 camiones	Severo
1982	Caldecott	Estados Unidos	1028	2h 40min	7 muertos, 2 heridos	3 camiones, 1 autobús, 4 coches	Severo
1982	Lafontaine	Canadá	1390		1 muerto	1 camión	Limitado
1983	Pecorila Galleria	Italia	662		9 muertos 22 heridos	10 coches	Limitado
1986	L' Arme	Francia	1105		3 muertos, 5 heridos	1 camión, 4 coches	Limitado
1987	Gumefens	Suiza	343	2 h	2 muertos	2 camiones, 1 camioneta	Menor
1990	Røldal	Noruega	4656	50 min	1 herido		Limitado
1990	Mont Blanc	Francia /Italia	11600		2 heridos	1 camión	Limitado

Continúa en la página siguiente

Continúa de página anterior

Año	Túnel	País	Long.(m)	Duración del fuego	Daños Personas	Daños Vehículos	Daños Estructura
1993	Serra Ripoli	Italia	442	2h 30min	4 muertos 4 heridos	5 camiones, 11 coches	Limitado
1993	Hovden	Noruega	1290	1 h	5 heridos	1 motor, 2 coches	Limitado
1994	Huguenot	Sudáfrica	3914	1 h	1 muertos, 28 heridos	1 autobús	Severo
1995	Pfander	Austria	6719	1 h	3 muertos 4 heridos	1 camión, 1 camioneta, 1 coche	Severo
1996	Isola delle Femmine	Italia	148		5 muertos, 20 heridos	1 camión cisterna, 1 autobús, 18 coches	Severo
1999	Mont Blanc	Francia - Italia	11600	2.2 días	39 muertos	23 camiones, 10 coches, 1 moto, 2 camiones de bomberos	Severo. Cerrado 3 años
1999	Tauern	Austria	6401	15h	12 muertos, 49 heridos	14 camiones, 26 coches	Severo. Cerrado 3 meses
2000	Seljestad	Noruega	1272	45min	6 heridos	1 camión, 4 coches	
2001	Prapontin	Italia	4409		19 heridos	1 camión	Severo
2001	Gleinalm	Austria	8320		5 muertos, 4 heridos		
2001	Ville Marie Tunnel	Canadá	8400				
2001	Guldborgsund	Dinamarca	460		5 muertos, 6 heridos		
2001	St. Gottard	Suiza	16900	2 días	11 muertos	2 camiones, 23 coches	Severo
2002	Tauern	Austria	6401		1 muerto		
2002	A86	Francia	618	6 h	2 muertos	1 coche, 1 moto	
2002	TedWilliams	Estados Unidos	2600			1 autobús	
2002	Homer	Nueva Zelanda			3 heridos	1 autobús	

Continúa en la página siguiente

Continúa de página anterior

Año	Túnel	País	Long.(m)	Duración del fuego	Daños Personas	Daños Vehículos	Daños Estructura
2003	Locica	Eslovenia	800			1 camión,1 coche	
2003	Fløyfjell	Noruega	3100	10 min	1 muerto	1 coche	Limitado
2003	Golovec	Eslovenia	700			1 autobús	
2003	Baregg	Suiza	1390		2 muertos, 21 heridos	4 camiones, 3 camiones de bomberos	Severo
2004	Baregg	Suiza	1080		1 muerto, 1 herido	1 camión,1 coche	Severo
2004	Dullin	Francia	1500			1 autobús	-
2004	Kinkempois	Bélgica	600			1 camión	Menor
2004	Frejus	Francia - Italia	12900			1 camión	
2005	Frejus	Francia - Italia	1290	6 h	2 muertos, 21 tratados por inhalación de humos	4 vehículos de cargas pesadas (tipo de cargas: neumáticos, queso, chatarra y pegamento), 3 camiones de bomberos	Severo
2006	Viamala	Suiza	760		9 muertos 6 heridos	1 autobús, 2 coches	
2006	Crap-Teig	Suiza	2171			1 vehículo de carga pesada (tipo de carga: pallets de madera)	Daños estructurales y eléctricos limitados
2007	Burnley	Australia	2900		3 muertos	4 vehículos de cargas pesadas, 7 coches	Menor
2007	Caldecott	Estados Unidos - Canadá	1028			1 coche	
2007	Santa Clarita	Estados Unidos - Canadá	165		3 muertos 23 heridos	33 semi-trailers; 1 coche	
2007	San Martino	Italia		>45 min	2 muertos; 10 heridos	1 vehículos de cargas pesadas	

Continúa en la página siguiente

Continúa de página anterior

Año	Túnel	País	Long.(m)	Duración del fuego	Daños Personas	Daños Vehículos	Daños Estructura
2009	Eiksund	Noruega	7700		5 muertos	1 vehículo de cargas pesadas, 1 coche	
2009	Gubrist	Suiza			4 heridos	2 coches	
2010	Trojane	Eslovenia	885		5 heridos	1 vehículo de cargas pesadas	
2010	Wuxi Lihu	China			24 muertos, 19 heridos	1 autobús	
2011	Oslofjord	Polonia	7306	35 min	12 tratados por inhalación de humos	1 Camión con carga de papel	Daños menores. Cerrado 2 semanas.
2011	Brynglas M4	Reino Unido	370		1 Camión	Daños menores en el hormigón	
2013	Gudvanga	Noruega	11428		73 tratados por inhalación de humos	1 vehículo de cargas pesadas con carga de queso	
2014	East river montain	Estados Unidos	1650		-	1 Camión	Daños menores. Cerrado una semana
2015	Caldecott	Estados Unidos - Canadá	1028	5 h	-	2 coches	Daños menores

En cuanto a las causas de incendios en túneles de carretera Marlair et al. (2004) señalan que la principal causa de accidentes en túneles se debe a defectos técnicos en los vehículos seguida por colisiones traseras. La figura 2.1 resume las causas principales de incendios en túneles según los estudios realizados por PIARC (*Permanent International Association of Road Congresses*), OECD (*Organisation for Economic Co-operation and Development*) y STUVA (*Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen mbH*, Asociación de Investigación para el servicio de transporte subterráneo Ltd.)

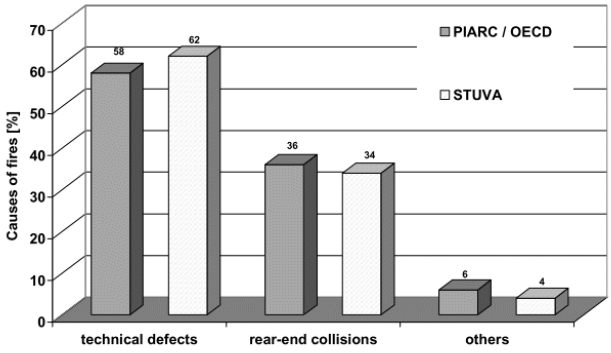


Figura 2.1: Causas principales de incendios en túneles según estudios de PIARC, OECD y STUVA (Marlair et al., 2004)

2.1.1 Proyecto relevantes de seguridad en túneles

Eventos recientes en túneles han disparado el interés público por la seguridad en los mismos. A su vez el incremento del volumen de tráfico en los túneles y de la longitud de los mismos ha puesto el foco en el problema del fuego en túneles y han llevado a una gran inversión de la Unión Europea y Estados Unidos en proyectos de investigación que apuntan a mejorar la seguridad en túneles, fundamentalmente buscando disminuir el riesgo ante la ocurrencia de un incendio y mejorando el diseño.

Estos proyectos tienen diferentes objetivos, como evaluar estrategias de actualización de túneles existentes para disminuir la posibilidad de accidentes y a su vez garantizar una respuesta más adecuada en caso de incendios; optimizar el diseño de túneles, etc. A continuación se resumen los proyectos europeos más relevantes:

DARTS *Durable and Reliable Tunnel Structures*; 2001-2004 (DARTS, 2004). Proyecto formado por ocho socios europeos con el objetivo de optimizar el diseño de túneles para garantizar una larga duración y reducir los costos. Se desarrollaron herramientas para el diseño óptimo de túneles desde el punto de vista económico y considerando aspectos ambientales, geotécnicos, cualidades técnicas y consideraciones de seguridad estructural.

FIT *Fire in Tunnels*; 2001-2005 (Brousse et al., 2005). Consorcio de 33 socios de 12 países europeos. El proyecto realizó una recopilación de información sobre los resultados de todas las investigaciones relacionadas con prevención y mitigación de incendios en túneles en Europa y en el mundo. El estudio incluyó túneles de carretera, de metro y ferroviarios. En particular revisó la normativa referente a las curvas de diseño de túneles.

UPTUN *Cost-effective, sustainable and innovative upgrading methods for fire safety in existing tunnels*; 2002-2006 (UPTUN, 2006). Consorcio formado por 42 socios de 18 países europeos. Este proyecto evaluó las tecnologías existentes y desarrolló tecnologías innovadoras para evaluar los métodos de mejora de seguridad estructural en túneles. Se centró en la detección y monitorización de incendios, el comportamiento de las personas y las medidas de mitigación y protección de las estructuras. En este proyecto se llevaron a cabo numerosos ensayos a escala real.

Safe Tunnel *Safety in Road Tunnels*; 2001-2004 (Safe-Tunnel, 2005). Proyecto formado por 9 socios. El objetivo principal era reducir la cantidad y extensión de los incendios en túneles de carretera a través de la utilización de medidas preventivas.

SIRTAKI *Safety Improvement in Road and Rail Tunnels using Advanced Information Technologies and Knowledge Intensive Decision Support Models*; 2001-2004 (SIRTAKI, 2004). Proyecto formado por 12 socios europeos. El proyecto apuntaba a reformar los conceptos operacionales relacionados con la severidad y el manejo de emergencias.

Virtual Fires *Virtual Real Time Emergency Simulator*, 2001-2004 (Virtual-Fires, 2004). Consorcio formado por 8 socios de 5 países europeos. El objetivo de este proyecto era desarrollar un simulador para poder entrenar a los bomberos en las tareas de extinción de incendios en túneles.

Safe-T *Safety in Tunnels*; 2003-2007 (Khoury y Molag, 2006). El objetivo de este proyecto era revisar los requisitos europeos en cuanto a seguridad de los túneles y desarrollar buenas prácticas en la toma de decisiones relativas a la seguridad en túneles. Dados los antecedentes de la experiencia negativa con el antiguo concepto operativo del túnel del Mont Blanc, especial énfasis se puso en conceptos operativos transfronterizos. La experiencia de las autoridades regionales, bomberos y servicios de rescate de emergencia fueron de especial importancia para este proyecto.

L-SURF *Large Scale Underground Research Facility*; 2005-2008 (Amberg y Wietek, 2008). Este proyecto tuvo como objetivo evaluar la necesidad de una instalación subterránea para realizar pruebas de seguridad en túneles y el desarrollo de la misma. El resultado fue la creación de la Fundación L-SURF.

Dentro de los proyecto de seguridad en túneles realizados por Estados Unidos destacan:

Making Transportation Tunnels Safe and Secure (NCHRP, 2006) Este proyecto tenía por objetivo general pautas generales para brindar seguridad tanto a los dueños

de los túneles como a los operarios. Este proyecto generó recomendaciones relativas a la protección de túneles y refuerza el concepto de la importancia de cerrar el túnel el menor tiempo posible en caso de una acción extraordinaria como ser un incendio o un sismo. Este proyecto revisa la vulnerabilidad de los túneles ante diversas acciones extraordinarias basándose fundamentalmente en los efectos de los explosivos.

International Technology Scanning Program (FHWA, 2006) En este proyecto un equipo formado por 11 instituciones de Estados Unidos estudio los sistemas de transporte subterráneo de Europa con el objetivo de conocer las prácticas que se realizan relativa a la seguridad en túneles y a la respuesta ante acciones extraordinarias.

Design fires in road tunnels (NCHRP, 2011) Este proyecto realiza una síntesis de la literatura actual, prácticas habituales e investigaciones recientes relativas a las cargas de fuego de diseño en túneles. Entre otra información resume los incidentes de fuego más importantes y estudia sus causas y consecuencias y los ensayos de fuego en túneles más significativos.

Los resultados de estos proyectos fueron la base de la Directiva 2004/4/EC del Parlamento Europeo respecto a los requerimientos mínimos para la seguridad en túneles de carretera, de la actualización de la normativa para túneles de carretera, puentes y otras carreteras de difícil acceso de la NFPA (*National Fire Protection Association*, 2010) y de las pautas para la resistencia estructural a fuego de túneles de carretera de ITA (*International Tunneling Association*, 2004).

Todos estos proyectos manifiestan la necesidad de investigar en los temas relativos a la seguridad en túneles. A su vez, la gran cantidad de información generada a partir de estos proyectos forma una base para poder desarrollar normativa que mejore la seguridad en túneles y disminuya el riesgo asociado a eventos de fuego.

Además, estas recomendaciones remarcan la importancia de proteger la estructura del colapso por un período de tiempo determinado y la necesidad de disminuir los costos indirectos asociados a la operación anormal del túnel hasta que esté completamente rehabilitado.

2.1.2 Mecánica de los incendios en túneles

El fuego o combustión es una rápida reacción química de oxidación de carácter exotérmico, autoalimentada, con presencia de un combustible en fase sólida, líquida o gaseosa. Desde el punto de vista químico se entiende que el fuego es un proceso de reacción química rápida, fuertemente exotérmica de oxidación-reducción, en las que participa una sustancia combustible y una comburente, que se produce en condiciones energéticas favorables y en la que se desprende calor, radiación luminosa, humo y gases de combustión.

Los elementos básicos del fuego pueden ser representados en el triángulo de fuego, formado por el combustible, el comburente y el calor (figura 2.2). Donde el combustible es cualquier sustancia que sea capaz de arder; el comburente es el elemento en cuya presencia el combustible puede arder, el oxígeno es el agente oxidante más común y el calor es la energía que es preciso aportar para que el combustible y el comburente reaccionen, generalmente es proporcionado por un foco de ignición (Esparza, 2002). Si falta alguno de estos elementos, el fuego no se produce o se apaga.

Figura 2.2: Triángulo de fuego (www.wikimedia.org)

Los catastróficos incendios en túneles ocurridos en los últimos años han puesto el foco en el estudio de la dinámica de incendios en túneles, ya que estos tienen un comportamiento diferente a los incendios en compartimientos cerrados debido a que los túneles son espacios confinados donde el calor se concentra y favorece al incendio.

Los incendios en túneles suelen tener una severidad mucho mayor que los incendios a cielo abierto. La severidad de un incendio suele ser expresada en términos de tasa de liberación de calor (*Heat Realese Rate* en inglés y de ahora en adelante HRR), es decir en términos de energía liberada en función del tiempo. Ensayos de incendios en túneles revelan que la HRR de un fuego dentro de un túnel puede ser hasta cuatro veces mayor que alcanza el un fuego producido por el mismo material a cielo abierto (Carvel et al., 2001).

A su vez a medida que el incendio se desarrolla en el túnel éste interactúa con la corriente de aire y distorsiona el patrón de comportamiento de la ventilación, generando remolinos y el efecto de retroceso de humos de la capa caliente, conocido como *backlayering*.

En el caso de incendios en túneles el aporte de aire se puede ver incrementado por los sistemas de ventilación forzada, lo cual permite que la combustión pueda desarrollarse sin limitación de oxígeno. Además, la distribución del combustible dentro del túnel hace que esté expuesto a la radiación que emiten las llamas por lo cual arde de forma muy rápida.

Otro factor determinante es la característica de los combustibles. En los accidentes en túneles con consecuencias más severas la carga de fuego puede clasificarse como mercancías peligrosas. Por ejemplo en el incendio del túnel de Mont Blanc la carga de fuego fue margarina y gasoil.

La evolución de un incendio originado por un vehículo dentro de un túnel tiene un comportamiento característico en el que se pueden diferenciar las fases que se muestran en la figura 2.3 y que se describen a continuación (García García et al., 2014; Ingason, 2012).

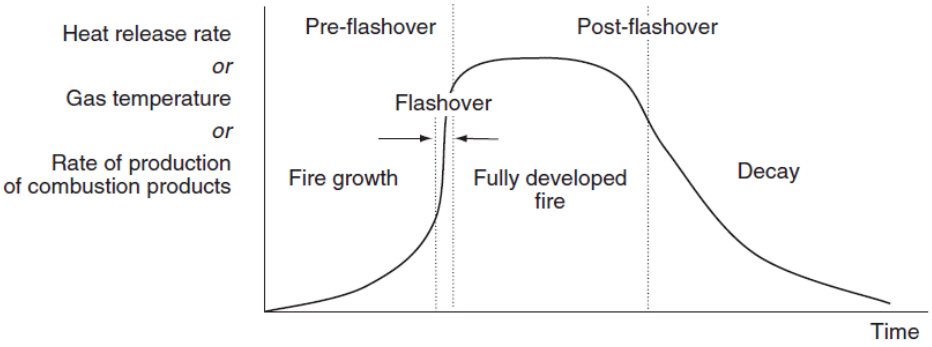


Figura 2.3: Evolución típica de un incendio (Ingason, 2012)

En la *fase de crecimiento* el fuego progresa a partir de un foco inicial extendiéndose por el vehículo en forma ascendente. Su evolución es lenta comparada con las fases posteriores. Su extinción es posible a través de las bocas de incendio o extintores. Los gases generados por el fuego ascienden a la parte superior del túnel circulando en ambos sentidos y las llamas apenas alcanzan la clave del túnel. La zona inferior del túnel está libre de humo y calor.

Si el fuego no se controla en esta etapa y las condiciones permiten que el fuego siga creciendo se entra en la *fase de crecimiento exponencial o flashover*. En esta etapa las llamas alcanzan la clave y empiezan a circular por debajo de ésta. El resto del combustible es calentado y si alcanza su punto de ignición empieza a arder. En esta etapa se da el efecto horno en el cual la radiación de los gases y llamas transmiten el calor. El humo se habrá extendido varios metros y a medida que se aleja de la zona del fuego comienza a enfriarse y empieza a descender, dificultando las tareas de evacuación y extinción.

Si ocurre el flashover, rápidamente se alcanza la etapa de *desarrollo completo del incendio*. En esta etapa la tasa de liberación de calor máxima es alcanzada y mantenida durante toda la etapa. Todas las fuentes combustibles presentes se ven involucradas en esta etapa, donde el tipo de combustible y de ventilación tienen una gran influencia.

Al final de esta etapa algunas de las fuentes combustibles comienzan a disminuir y tiene lugar la fase de decaimiento hasta que el fuego se extingue por completo.

2.1.3 Curvas para el diseño de túneles a fuego

Las curvas de diseño de túneles a fuego son idealizaciones de los escenarios de fuego que podrían ocurrir en un túnel y representan una envolvente de todos estos casos. Las curvas de diseño de fuego se expresan como la variación de la temperatura en función del tiempo o de la tasa de liberación de calor en función del tiempo.

Estas situaciones de diseño se utilizan fundamentalmente para diseñar las salidas de emergencia, los sistemas de detección de incendios, los sistemas de ventilación, el equipamiento del túnel y la estructura, con el objetivo de garantizar la seguridad de las personas y de la estructura, sobre todo durante el proceso de evacuación. En función del objetivo del diseño se seleccionan curvas más o menos severas y requerimientos de tiempo mayores.

De acuerdo con la Directiva 2004/54/EC del Parlamento europeo los elementos estructurales del túnel deben ser ensayados a fuego como cualquier elemento estructural convencional, por lo cual se debe definir las condiciones de carga del ensayo.

Para el diseño de elementos estructurales sometidos a fuego es usual utilizar curvas temperatura tiempo y asumir que esta curva de temperatura se da en todo el elemento. Sin embargo en el caso de túneles existe un intenso debate sobre la utilización de estas curvas y muchos autores plantean que las curvas temperaturas tiempo no representan la severidad que pueden alcanzar los incendios en túneles y que en su lugar se deben utilizar curvas HRR en función del tiempo (Marlair et al., 2004).

Este debate tiene su origen en que el fuego es una energía liberada y como tal la magnitud de un incendio se define por su potencia o HRR. Luego las temperaturas alcanzadas originadas por ese fuego dependen de múltiples factores como las propiedades térmicas de los materiales, la geometría del túnel, posición del incendio dentro del túnel, los sistemas de ventilación, etc.

Hoy en día ambos tipos de curvas se siguen utilizando. Para el diseño de los elementos estructurales sometidos a fuego, se utilizan curvas de temperatura en función del tiempo y se consideran situaciones de fallo cuando alcanzan determinadas temperaturas definidas en cada normativa. Las diferencias en la velocidad de calentamiento, intensidad y duración de incendios normalizados implican un comportamiento estructural diferente al de un incendio real.

La respuesta estructural del túnel ante un incendio depende de múltiples factores siendo un factor fundamental la *curva temperatura tiempo* que le impone el incendio a la estructura. En particular tienen gran influencia la rampa de calentamiento, la

temperatura máxima, la duración del incendio y la forma de enfriamiento (Kyriakos, 2004).

Para el diseño de los elementos de ventilación y el planteamiento de análisis de riesgos, por ejemplo, se utilizan las curvas de potencia liberada-tiempo. A través de modelos de mecánica de los fluidos (ver subsección 2.1.4) se puedan plantear diferentes curvas potencia liberada en función del tiempo y calcular las curvas de temperatura tiempo de los gases para cada caso en particular y los diversos efectos que tiene el fuego como ser los gases tóxicos, la disminución de la visibilidad, etc.

Con el objetivo de caracterizar curvas de HRR en función del tiempo, se han realizado números ensayos para estimar las cargas de fuego de diversos escenarios de fuego en túneles.

A continuación se presentan las curvas normalizadas temperatura tiempo y las curvas de diseño HRR en función del tiempo planteadas por diversos autores.

Curvas nominales temperatura - tiempo

Las curvas temperatura tiempo expresan la temperatura del aire en la proximidad de las superficies de un elemento en función del tiempo. Las curvas nominales son curvas normalizadas para verificar la resistencia a fuego, y son la base de los métodos simplificados de cálculo. Estas curvas son las que se aplican en los ensayos de resistencia al fuego. En el caso de edificación hay un consenso general en utilizar la curva ISO 834 (ISO, 1975). Sin embargo, para túneles no existe tal consenso por lo cual varios países han desarrollados sus propias curvas. La figura 2.4 muestra las curvas temperatura tiempo usualmente utilizadas.

La curva **ISO 834**, también llamada curva de fuego estándar, representa el comportamiento de combustibles celulósicos (madera, papel, tejidos, etc.) típicos en incendios en edificios. Supone combustible ilimitado como se muestra en las temperaturas crecientes en función del tiempo y no incluye la fase de decaimiento de los fuegos reales. Está definida por la Norma internacional ISO 834 a través de la siguiente ecuación:

$$T_g(t) = 20 + 345log_{10}(8t + 1)$$

La **curva de los hidrocarburos**, HC, (CEN-EN 1-1-2, 2004) fue desarrollada por la industria petroquímica debido a que los químicos y combustibles que utilizan tienen una combustión mucho más rápida que los materiales celulósicos. Esta curva esta representa adecuadamente los incendios de bateas (*pool fires*, en inglés) y de diversos combustibles. Está definida por la ecuación:

$$T_g(t) = 20 + 1080(1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t})$$

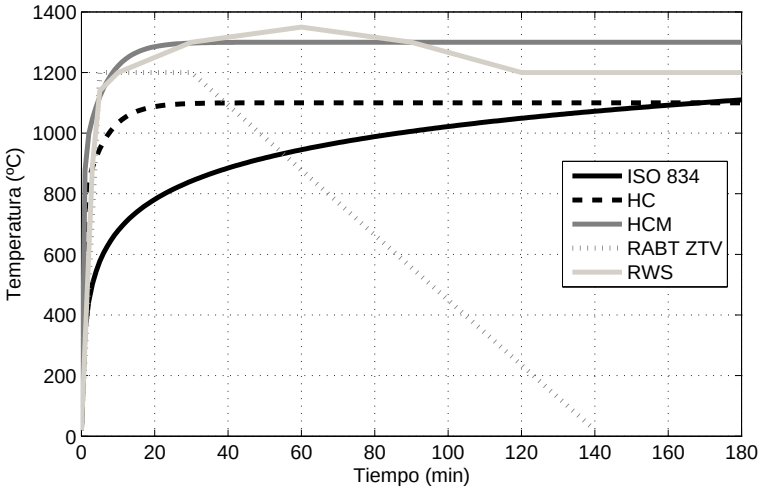


Figura 2.4: Curvas nominales temperatura tiempo

La normativa francesa ha plantado una modificación a la curva de los hidrocarburos dando origen a la **curva de los hidrocarburos modificada**, HCM. Esta curva es muy similar a la curva HC pero alcanza una temperatura máxima mayor con el objetivo de representar las temperaturas alcanzadas por el incendio de un tanque de combustible dentro de un espacio confinado como un túnel. Está definida por la ecuación:

$$T_g(t) = 20 + 1280(1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t})$$

La **curva RABT ZTV** fue desarrollada por Alemania como resultado de una serie de ensayos. Esta curva existe en dos versiones para carretera y para vehículos ferroviarios, en la figura 2.4 se representa la curva para carretera. La curva está caracterizada por una rama ascendente lineal, seguida de un tramo de desarrollo completo del incendio y una rama descendente también lineal (RABT, 1985).

Por su parte el ministerio de transporte holandés ha desarrollado la **curva RWS** para el diseño de túneles exclusivamente. Esta curva se ha obtenido a partir de ensayos de fuego en túneles y tiene por objetivo representar el incendio de un camión cisterna con una carga de fuego de 300 MW con una duración del incendio de 2 horas.

La *International Tunnelling Association* (ITA) y PIARC han desarrollado recomendaciones para el empleo de las diversas curvas temperatura tiempo (International Tunnelling Association, 2004).

Curvas HRR tiempo

Las curvas HRR tiempo han sido estudiadas por diversos autores basándose en numerosos ensayos a escala real. Las HRR de diseño son usualmente caracterizadas por la **HRR máxima**, Q_{max}. Existen numerosas técnicas para estimar la HRR de un determinado vehículo, por ejemplo algunos fabricantes de vehículos directamente indican la HRR máxima del mismo y a su vez se pueden calcular analíticamente, sin embargo no hay un consenso general sobre el procedimiento para el cálculo de la HRR máxima. NCHRP (2011) y PIARC (1999) destacan que los materiales que se queman en un incendio en túneles son fundamentalmente los vehículos involucrados. Esto incluye todos los materiales que componen los vehículos y fundamentalmente la carga que llevan. Ésta puede variar significativamente y da origen a diferentes tipos de fuegos. La magnitud del fuego dependerá fundamentalmente de la carga de fuego del vehículo, de la fuente de ignición y su intensidad, distribución de la carga dentro del vehículo, de la tasa de propagación del fuego y de las características del túnel y el ambiente que lo rodea. Ingason (2006) y Ingason y Lönnermark (2012) resumen las HRR obtenidas en diversos ensayos de fuego a escala real.

La tabla 2.2 resume las HRR máximas propuesta por diversas instituciones y autores. Es importante destacar que PIARC (1999) solo propone valores de Q_{max} y no hace referencia a las curvas de crecimiento.

Tabla 2.2: HRR máximas propuestas por diferentes instituciones y autores [MW].

Vehículos	PIARC (1999)	CETU (2003)	Marlair et al. (2004)	Ingason (2005b)	NFPA (2010)
1 coche	2.5-5	-	5	4	5-10
2-3 coches	8	8	10	-	10-20
1 furgoneta	15	15	20	-	-
1 autobús	20	-	30	30	20-30
Camión con carga combustible	20-30	30	50	15-130	-
Camión con carga peligrosa	-	100	70-150	-	70-200
Tanque de combustible	-	200	200	-	200-300

Actualmente es cada vez más común definir **curvas HRR-tiempo** en vez de solo la HRR máxima, Q_{max} (Ingason, 2006; Ingason, 2009). Las curvas de diseño HRR - tiempo en túneles suelen estar definidas por un tramo de crecimiento lineal, cuadrático o exponencial y luego se combinan distintas opciones de tramos con Q_{max} constante y/o tramos de decrecimiento. Algunos autores definen estas curvas por tramos, sin embargo Ingason (2005a) y Ingason (2009) proponen una única función exponencial.

A modo de ejemplo, la figura 2.5 muestra curvas distintos tipos de curvas de HRR-tiempo para el caso de un camión de cargas pesadas con $Q_{max} = 30MW/min$ (Ingason, 2006).

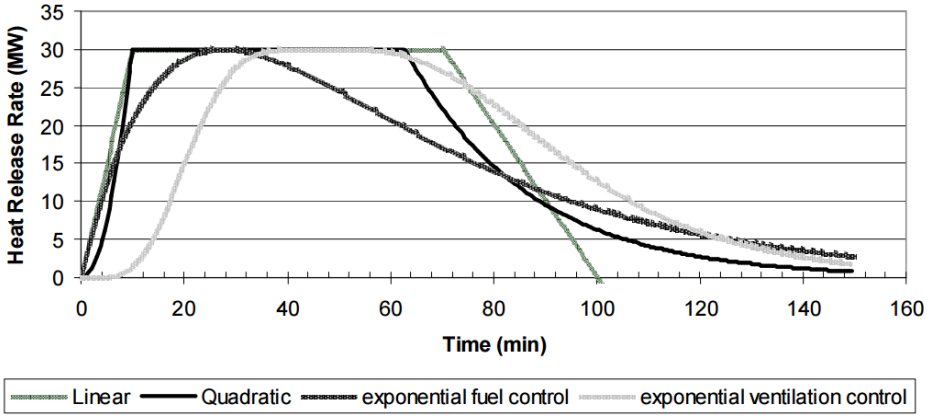


Figura 2.5: Curvas HRR tiempo para el caso de $Q_{max} = 30MW$ (Ingason, 2006)

La recomendaciones francesas para el diseño de los sistemas de ventilación (CETU, 2003) proponen una curva de crecimiento caracterizada por 3 tramos *lineales* (ver figura 2.6). El primero de crecimiento contante desde el tiempo cero a t_{max}, seguido por un intervalo que mantiene constante el valor de Q_{max} hasta el tiempo t_D y luego un tramo de decrecimiento desde el valor máximo hasta cero en el tiempo t_d.

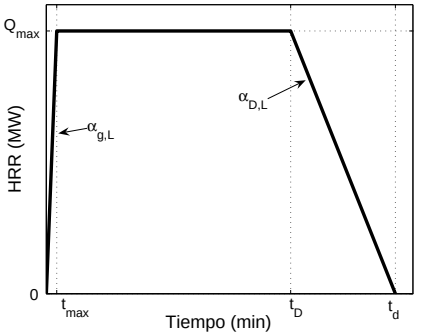


Figura 2.6: Esquema de la función HRR(t) caracterizada por tres tramos lineales

Luego la curva HRR en función del tiempo puede definirse por:

$$HRR(t) = \begin{cases} \alpha_{g,L}\, t & \text{para } 0 < t \leq t_{max} \\ \alpha_{g,L}\, t_{max} = Q_{max} & \text{para } t_{max} < t \leq t_D \\ Q_{max} - \alpha_{D,L}(t - t_D) & \text{para } t_D < t \leq t_d \end{cases}$$

Donde $\alpha_{g,L}$ y $\alpha_{D,L}$ son las tasas de crecimiento y decrecimiento lineal respectivamente. Los valores característicos de estas curvas se detallan en la tabla 2.3.

Tabla 2.3: Curvas de diseño de acuerdo con la normativa francesa (CETU, 2003)

Vehículos	E_{tot} [GJ]	Q_{max} [MW]	t_{max} [min]	t_D [min]	t_d [min]	$\alpha_{g,L}$ $\left[\frac{MW}{min}\right]$	$\alpha_{D,L}$ $\left[\frac{MW}{min}\right]$
2-3 coches	17	8	5	25	45	1,6	0,4
1 furgoneta	38	15	5	35	55	3	0,75
Camión con carga combustible	144	30	10	70	100	3	1
Camión con carga peligrosa	450	100	10	70	90	10	5
Tanque de combustible	960	200	10	70	100	20	6,7

El proyecto UPTUN también propone la utilización de curvas de crecimiento linear (Marlair et al., 2004) y en particular propone los siguientes valores:

$$\begin{cases} \alpha_{g,L} = 10\dfrac{MW}{min} & \text{si } Q_{max} \leq 30MW \\ \alpha_{g,L} = 20\dfrac{MW}{min} & \text{si } Q_{max} > 30MW \end{cases}$$

En este caso el valor t_{max} puede calcularse por la ecuación:

$$t_{max} = \frac{Q_{max}}{\alpha_{g,L}}$$

Y la duración total del fuego se debe determinar en función del combustible disponible.

Ingason (2005b) propone una curva de *crecimiento cuadrático* desde el tiempo cero a t_{max}, seguida de un valor constante de Q_{max} hasta t_d y luego una curva de decrecimiento exponencial desde el valor máximo hasta cero en un tiempo infinito (ver figura 2.5).

En este caso la curva HRR en función del tiempo puede definirse por las siguientes ecuaciones:

$$HRR(t) = \begin{cases} \alpha_{g,q}\, t^2 & \text{para } 0 < t \leq t_{max} \\ \alpha_{g,g}\, t_{max}^2 = Q_{max} & \text{para } t_{max} < t \leq t_D \\ Q_{max}\, e^{-\alpha_{D,q}(t-t_D)} & \text{para } t_D < t \leq t_d \end{cases}$$

Donde $\alpha_{g,q}$ y $\alpha_{D,q}$ son las tasas de crecimiento y decrecimiento cuadrático respectivamente. Para el caso de un coche ($Q_{max} = 4MW$) define un valor de $\alpha_{g,q} = 0,036MW/min^2$ y $\alpha_{D,q} = 0{,}06min^{-1}$ y para el caso de un autobús ($Q_{max} = 30MW$) define un valor de $\alpha_{g,q} = 0,36MW/min^2$ y $\alpha_{D,q} = 0{,}042min^{-1}$. Para el caso de un camión con carga combustible no define estos valores.

Los valor t_{max} y t_D los define con las siguientes ecuaciones:

$$t_{max} = \sqrt{\frac{Q_{max}}{\alpha_{g,q}}} \text{ y } t_D = \frac{\chi\, E_{tot}}{Q_{max}} + \frac{2}{3} t_{max} - \frac{1}{\alpha_{D,q}}$$

Donde χ es el coeficiente de eficiencia de combustión definido entre 0,97 y 0,99 y E_{tot} es la energía total liberada por el fuego. En el caso que $t_D > t_{max}$ no hay período constante y los valores de Q_{max} y t_{max} se definen por las siguientes ecuaciones:

$$Q_{max} = \chi \alpha_{D,q} E_{tot} (1 - \frac{\alpha_{D,q^{3/2}}}{6} \sqrt{\frac{\chi E_{tot}}{\alpha_{g,q}}}) \text{ y } t_{max} = \frac{Q_{max}}{\alpha_{g,L}}$$

A su vez la *National Fire Protection Association* (NFPA, 2010) define los valores máximos de HRR e indica que los valores máximos son alcanzados en forma muy rápida con una función de crecimiento cuadrática. Sin embargo no contempla la etapa de mantenimiento constante de la Q_{max} ni la etapa de decrecimiento.

Ingason (2005a) presenta un método para definir la función HRR en función del tiempo con una única función del tipo exponencial, en vez de utilizar tres funciones. La función propuesta es:

$$HRR(t) = Q_{max}\; n\; r\; (1 - e^{-k\, t})^{n-1}\; e^{-k\, t}$$

Donde n es un parámetro arbitrario sin ningún significado físico y los parámetros r y k están definidos por las siguientes ecuaciones: $r = \left(1 - \frac{1}{n}\right)^{1-n}$ y $k = \frac{Q_{max}}{E_{tot}}\; r$.

Esta ecuación es válida solo para fuegos controlados por el combustible, es decir situaciones en las que hay suficiente oxígeno para quemar todo el combustible.

Ingason (2006) propone una nueva curva exponencial que es aplicable a los fuegos controlados por ventilación, es decir incendios donde hay combustible suficiente para arder siempre que haya oxígeno. La función propuesta es:

$$HRR(t) = Q_{max}\ (18,96\ e^{-10t/t_d}(1 - e^{-10t/t_d})^7 + 37,59\ e^{-7t/t_d}(e^{-7t/t_d} - 1)^{20})$$

Donde $t_d = 2,03\frac{E_{tot}}{Q_{max}}$ y $t_{max} = 0,24t_d$. Ingason (2009) modifica esta ecuación exponencial proponiendo coeficientes diferentes.

Para el diseño de cada túnel en particular se deberá seleccionar la curva que mejor represente el tráfico que circula por el túnel. En particular se deberán tener en cuenta las HRR asociadas a vehículos que transporten mercancías peligrosas si estas están permitidas en el túnel.

2.1.4 Ensayos de fuego y modelos de mecánica de los fluidos

El comportamiento de los fluidos en un incendio puede ser analizado a través de modelos computacionales de mecánica de los fluidos (*Computational fluid dynamics*, en inglés, CFD) o a través de ensayos experimentales.

Rhodes (2012) destaca que en general se tiende a confiar más en los resultados de los ensayos experimentales que en los resultados de los modelos debido a que los ensayos son reales mientras que los modelos son simulaciones. Sin embargo los ensayos de incendios en túneles son difíciles de reproducir y de garantizar la medición correcta de los parámetros en estudio, mientras que las simulaciones pueden ser repetidas en una forma más controlada.

Las herramientas de CFD aplicadas a la seguridad de túneles en caso de incendio se utilizan tanto para diseñar los sistemas de protección contra incendios como para investigar fuegos reales. El cálculo computacional permite considerar múltiples escenarios de fuego y estimar sus consecuencias sin tener que realizar costosos experimentos para cada caso a analizar. Por estos motivos muchas veces se realizan simulaciones previas a los ensayos. En cualquier caso es muy importante validar los resultados de los modelos con resultados experimentales. La tabla 2.4 compara las dos alternativas.

Los **ensayos a escala real de fuego en túneles** han sido realizados desde 1965 con diferentes objetivos como comprender la mecánica de los fluidos en incendios en túneles, ensayar el comportamiento de las instalaciones de túneles, como los sistemas de ventilación, de detección de incendios y de rociadores y estudiar las temperaturas alcanzadas en la estructura.

En función del objetivo del ensayo se define la carga de fuego, la forma de materializarla y la instrumentación del ensayo. Por lo general se materializa a través de bateas de combustible o vehículos. En cuanto a la instrumentación del ensayo, depen-

Tabla 2.4: Comparación entre ensayos y CFD (Kuzmin, 2011)

Ensayos	CFD
Descripción del fenómeno a través de la observación y medidas.	Predicción del fenómeno a través de simulaciones numéricas.
Para una determinada carga de fuego.	Para infinitas cargas de fuego.
Medidas en un limitado número de puntos.	Posibilidad de registrar numerosos tipos de medidas y en infinitos puntos.
Para determinados rango de cargas.	Para cualquier rango de cargas e incluso para cargas peligrosas.
Costosos.	Económicos. Están limitados por los recursos computacionales.
No requieren validación.	Requieren validación.

de fuertemente del objetivo, sin embargo en todos los ensayos de fuego se registra la temperatura en numerosos puntos, siendo habitual registrar la temperatura del aire en la zona cercana al fuego utilizando termopares montados en estructuras auxiliares (también llamadas árboles de termopares) y la temperatura del gas y de la superficie en la bóveda del túnel que es donde se alcanzan las temperaturas máximas. El registro de temperaturas es necesario para poder caracterizar el fuego y las cargas a la que está expuesta la estructura (SOLIT, 2012). Felicetti (2008) resalta que conocer las temperaturas alcanzadas en la etapa de calentamiento es vital en las investigaciones experimentales relativas a la respuesta estructural del hormigón sometido a cargas de fuego.

Cuando se trata de ensayos para evaluar la seguridad de las personas es habitual registrar la radiación, las concentraciones de gases y las condiciones de visibilidad. El registro de la velocidad del aire suele realizarse cuando se evalúa el funcionamiento de los sistemas de ventilación o cuando se requiere calcular la tasa de liberación de calor.

SOLIT (2012) y Rhodes (2012) resumen los ensayos realizados a escala real en túneles y los ensayos realizados a escala en laboratorios y sus objetivos. Ingason y Lönnermark (2012) resumen los ensayos realizados con el objetivo de determinar la tasa de liberación de calor de incendios en túneles.

Los **modelos computacionales de mecánica de los fluidos** en túneles son una alternativa más reciente. Están basados en el método de diferencias finitas para resolver las ecuaciones que gobiernan el comportamiento del fluido. Éstos modelos requieren de la solución de un sistema de por lo menos cinco ecuaciones en derivadas parciales (conservación de la masa, de la energía y las tres componentes de la cantidad de movimiento) acompañadas de las condiciones de contorno adecuadas (Migoya Valor,

2003). Estas ecuaciones se resuelven con la mayor resolución espacial y temporal posible para poder obtener la distribución espacio temporal de las variables de interés.

Estos modelos constan de las siguientes etapas de cálculo: definición de un modelo matemático (ecuaciones diferenciales); definición de un modelo de discretización (discretización y técnicas de solución de las ecuaciones) y resolución del sistema de ecuaciones (códigos o programas comerciales) (Kuzmin, 2011).

Para modelar el flujo del gas en forma adecuada se debe prestar atención al modelo de turbulencia adecuado. El flujo del gas es el encargado del transporte de los productos de combustión. Los modelos de CFD tratan la turbulencia de tres formas diferentes: RANS (*Reynolds Average Navier Stokes*), LES (*Large Eddy Simulation*) y DNS (*Direct Numerical Simulation*). Los modelos DNS buscan soluciones directas de las ecuaciones de Navier Stokes, los modelos LES resuelven las ecuaciones para los remolinos de mayor tamaño y modelan la influencia de los de menor tamaño en el movimiento del fluido y los modelos RANS modelan la influencia de los remolinos a través de ecuaciones dinámicas. Los modelos RANS y LES los que mejor se adaptan a la resolución de incendios. Migoya Valor (2003) describe las diferencias de estos modelos.

Existen diversos programas para la resolución de los sistemas de ecuaciones. Olenick y Carpenter (2003) presentan un listado detallado de los programas informáticos de mecánica de los fluidos disponibles y en su página web *International survey of computer models for fire and smoke* se encuentra un versión actualizada de los programas disponibles. Dentro de los programas comerciales de CFD que se utilizan habitualmente se puede distinguir los que son de tipo general como Fluent o CFX y los que se ajustan específicamente al estudio del fuego como FDS y JASMINE.

Estos programas han sido utilizados por diversos autores. Por ejemplo Muhasilovic y Duhovnik (2012) evalúan el comportamiento de sistemas de ventilación en túneles utilizando Fluent, Caliendo et al. (2012) utilizan CFX para la modelización de escenarios de fuego en un túnel curvo y Miles (2008) utiliza Jasmine para modelar los resultados de un ensayo de fuego variando condiciones de ventilación.

El programa FDS es el que más ha sido validado y utilizado para modelado de incendios en túneles. La validación de FDS fue realizada por varios autores a través de la comparación de resultados simulados con resultados experimentales (ver por ejemplo McGrattan y Hamins (2006), Cochard (2003), Hu et al. (2006) y Vigne y Jönsson (2009)).

La validación de los modelos de CFD es una tarea compleja debido a la incertidumbre de los datos registrados en los ensayos y a la cantidad de variables involucradas en el problema. Sin embargo estos modelos pueden reproducir cualitativamente el desarrollo de incendios en túneles, siendo el grado de correspondencia logrado subjetivo y variable en función de la complejidad del modelo y de los datos (Rhodes, 2012).

2.1.5 Consecuencias de incendios en túneles

Los incendios en túneles generan daños a las personas y a las estructuras. Las personas se ven afectadas por los gases tóxicos liberados, por el humo que les disminuye la visibilidad y dificulta su evacuación, por la disminución de oxígeno y en menor medida por el calor liberado. El calor liberado en el incendio produce fundamentalmente daños a la estructura y las instalaciones. PIARC (1999) detalla los efectos de los incendios sobre las personas y la tabla 2.1 resume las consecuencias en términos de vidas humanas y heridos en incendio en túneles de carretera.

Dentro de las **pérdidas económicas** podemos distinguir las pérdidas directas como las relacionadas a los vehículos, mercancías y costos de reparación del túnel y las pérdidas indirectas como las pérdidas ocasionadas por el cierre del túnel y la perturbación del tráfico. En algunos casos las tareas de diagnóstico y reparación pueden llevar semanas, meses e incluso años (NCHRP, 2011). Las pérdidas ocasionadas por el cierre del túnel suelen ser mayores que los costos de reparación del túnel, como se indica en la tabla 2.5.

Tabla 2.5: Consecuencias de incendios en túneles

Túnel	Pérdidas vidas[1]	Pérdidas ingresos económicos[2]	Costo reparaciones[2]	Total pérdidas económicas[2]	Tiempo cerrado[1]
Eurotunnel (2008)	-	211 Mi.€	87 Mi.€	298 Mi.€	1 año
Mont Blanc (1999)	39	203 Mi.€	189 Mi.€	392 Mi.€	3 años
Tauern (1999)	12	18.5 Mi.€	6.2 Mi.€	24.7 Mi.€	3 meses

[1] Datos basados en Niels Peter et al. (2008)
[2] Datos basados en Peter (2000)

Es importante destacar que las consecuencias del incendio dependen en gran medida del tiempo transcurrido hasta la detección del mismo y de las posibilidades de actuación de los bomberos (Kim et al., 2010).

2.1.6 Degradación del hormigón en función de la temperatura

En general el hormigón tiene un buen comportamiento en caso de incendio, debido a que es un material incombustible y a que no emite sustancias tóxicas ni humos. Además posee propiedades térmicas que hacen que la transferencia de calor hacia el interior del material sea lenta.

La distribución de temperaturas en el hormigón del túnel sometido a fuego dependerá de diversos factores como la curva de temperatura en función del tiempo y las pro-

piedades de los materiales. A modo de ejemplo la figura 2.7 muestra la distribución de temperaturas en función del tiempo en una losa de espesor mayor a 200mm bajo la curva de fuego ISO-834 para distintos intervalos de tiempo (30, 60, 90, 120, 180 y 240 minutos).

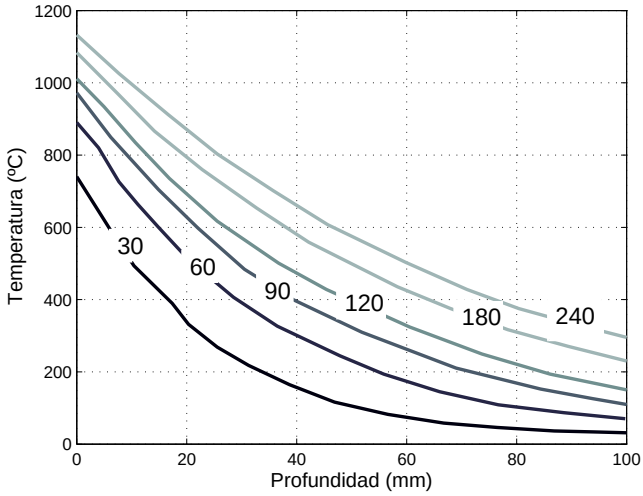


Figura 2.7: Perfil de temperatura para una losa de espesor mayor a 200mm, bajo la curva ISO-834 (CEN-EN 2-1-2, 2004)

Las propiedades mecánicas del hormigón como la resistencia y el módulo de elasticidad se ven significativamente reducidas durante la exposición a elevadas temperaturas. El uso generalizado del hormigón como elemento estructural ha llevado a un extenso estudio de las propiedades del mismo ante elevadas temperaturas (ver por ejemplo Khoury (2000) y Purkiss y Li (2013)).

La resistencia al fuego es un concepto que se aplica a la estructura o elementos estructurales y no a los materiales, sin embargo la degradación de las propiedades de los materiales con las altas temperaturas afecta significativamente la resistencia del elemento estructural del que forma parte el material (Khoury, 2000; Arioz, 2007). Por este motivo en esta sección se resumen las variaciones de las propiedades del hormigón con la temperatura.

Khoury (2000) destaca que existen tres temperaturas que pueden considerarse críticas para estructuras de hormigón:

1. Ensayos experimentales demuestran que el *spalling* se desarrolla en la superficie del hormigón en el rango de temperaturas entre 250 y 420°C dependiendo de la velocidad de calentamiento y las características del hormigón.

2. Al alcanzarse los 300°C la perdida de resistencia del hormigón es significativa
3. Al alcanzarse los 550 - 600°C el hormigón ya no pude cumplir sus funciones estructurales.

Efectos físico - químicos en el hormigón originados por la temperatura

Al ser expuesto a elevadas temperaturas la composición química y la estructura mineralógica del hormigón sufren una serie de cambios. La tabla 2.6 resume los cambios que sufre el hormigón con la temperatura y los cambios en la resistencia del mismo.

El comportamiento del hormigón a elevadas temperaturas depende de varios factores como la temperatura máxima alcanzada, la velocidad de calentamiento, tipo de árido que forma el hormigón, contenido de humedad, edad del hormigón, etc.

En particular el tipo de áridos utilizados en el hormigón a afectan significativamente las propiedades del hormigón a elevadas temperaturas debido a la estructura mineralógica de los agregados. El cuarzo presente en los áridos silíceos sufre cambios en su estructura al alcanzar los 570 °C generando cambios en su volumen. En cambio los áridos calcáreos (calizas) sufren cambios a temperaturas mucho más elevadas, 800 - 900 °C (Arioz, 2007).

Efectos de la temperatura en las propiedades mecánicas del hormigón

Los cambios generados en el hormigón por las altas temperatura se ven reflejados en sus propiedades mecánicas. De acuerdo con el Eurocódigo 2, parte 1.2 las relaciones tensión deformación del hormigón a compresión varían con la temperatura y dependen del tipo de árido utilizado. La figura 2.8 muestra esta variación para el caso de áridos silíceos.

Se puede apreciar que el módulo de elasticidad se reduce considerablemente para temperaturas superiores a 500°C. Una vez que el hormigón se enfría a temperatura ambiente no vuelve a alcanzar su resistencia inicial a compresión. Su resistencia residual depende de la temperatura máxima que haya alcanzado durante la fase de calentamiento.

La resistencia característica a compresión del hormigón también se ve reducida por la temperatura. La figura 2.9 muestra el coeficiente de reducción en función de la temperatura que propone el Eurocódigo para este parámetro.

Se puede apreciar que la resistencia característica del hormigón a compresión se ve reducida a la mitad para temperaturas cercanas a los 600°C:

Lai et al. (2014) estudian la influencia del contenido de humedad en la disminución de la resistencia característica residual del recubrimiento de hormigón de un túnel sometido a

Tabla 2.6: Cambios en el hormigón causados por la temperatura (Nijland y Larbi, 2001; Georgali y Tsakiridis, 2005; Concrete Society, 2008)

T[°C]	Cambios en el hormigón	Cambios en la resistencia del hormigón
70-80°C	Separación de la etringita, causando la disminución de la matriz de cemento.	-
105°C	El agua que se encuentra en los poros y la absorbida por los agregados comienza a evaporarse incrementando la porosidad.	Pérdidas de hasta el 10 %
250-350°C	Deshidratación del silicato de calcio y expansión térmica de los agregados. Comienzan a extenderse las micro fisuras. Oxidación de hidróxidos de hierro causando cambios de color permanente en los agregados hacia colores rosados. Presencia de *spalling* en la superficie del hormigón.	Pérdidas significativas de la resistencia comienzan a los 300°C
450-500°C	Disociación de la portlandita causando el deterioro de la pasta de cemento. Los cambios en el color se intensifican, tornándose la superficie del hormigón más rojiza. El hidróxido de Calcio se disocia a temperaturas cercanas a los 530°C	-
573°C	El cuarzo alfa se transforma en cuarzo beta, acompañado por un aumento del volumen del cuarzo, resultando en un fenómeno de fisuración alrededor del cuarzo de los agregados.	
600-800°C	Disociación de los carbonatos, en función del contenido de carbonatos en el hormigón se producirá mayor o menor contracción del hormigón. Comienza la fluencia del cemento portland indicando la temperatura crítica del hormigón desde el punto de vista estructural. Cambios de color hacia tonos grises.	A partir de los 600°C el hormigón ya no cumple sus funciones estructurales
800-1200°C	Completa desintegración de los agregados calcáreos y la pasta de cemento	-
1200°C	Color beige del hormigón	El hormigón comienza a derretirse
1300-1400°C	Color beige del hormigón	El hormigón se derrite

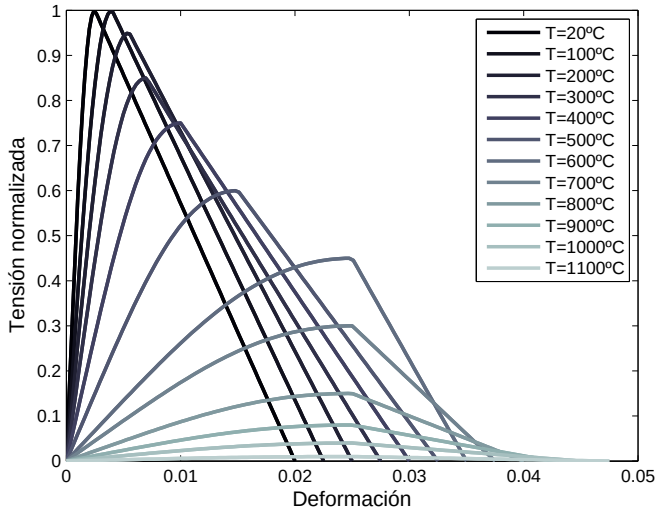


Figura 2.8: Curva tensión deformación para Hormigón a distintas temperaturas para áridos silíceos (CEN-EN 2-1-2, 2004)

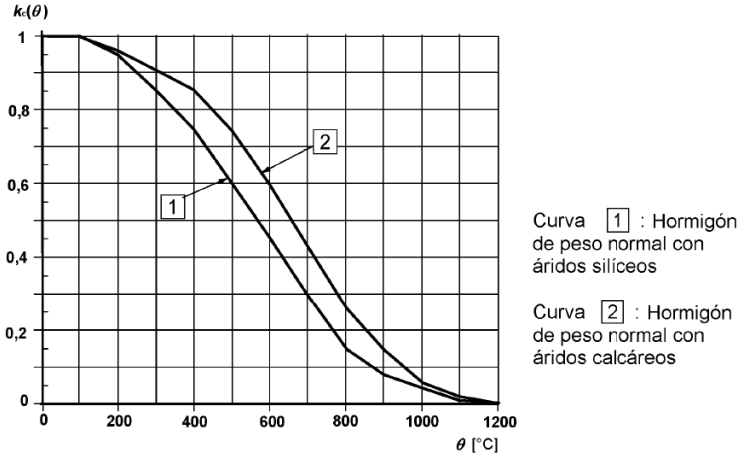


Figura 2.9: Coeficiente de reducción de la resistencia característica del hormigón en función de la temperatura (CEN-EN 2-1-2, 2004)

fuego, y concluyen que el la resistencia residual es menor cuando el hormigón contiene una humedad mayor.

Efectos de la temperatura en las propiedades térmicas del hormigón

Las *propiedades térmicas* del hormigón también se ven afectadas por la temperatura, éstas son importantes debido a que la transferencia de calor hacia el interior de la estructura depende de estas. En los modelos de transferencia de calor se adoptan las curvas de densidad, calor específico y conductividad de los materiales definidas en el Eurocódigo 2 Parte 1.2 (CEN-EN 2-1-2, 2004).

Kodur y Sultan (2003) estudian el efecto de la temperatura en las propiedades térmicas del hormigón de alta resistencia y concluyen que el tipo de árido utilizado tiene una gran influencia sobre estas propiedades, pero la presencia de fibras de acero no afecta a las mismas.

Efectos de la temperatura en las propiedades mecánicas de las armaduras

El fuego afecta también al comportamiento de las armaduras. El acero se debilita progresivamente desde temperaturas relativamente bajas (entre 100 y 20°C). . La figura 2.10 muestra la variación del diagrama tensión deformación para diferentes temperaturas de a cuerdo al CEN-EN 3-1-2 (2005). En el diagrama se puede observar la disminución del módulo de elasticidad en función de la temperatura. También se puede apreciar la disminución del límite elástico. Por ejemplo, para temperaturas de 600°C el límite elástico del acero (al 2 % de deformación) se reduce a un 50 % de su valor a temperatura ambiente.

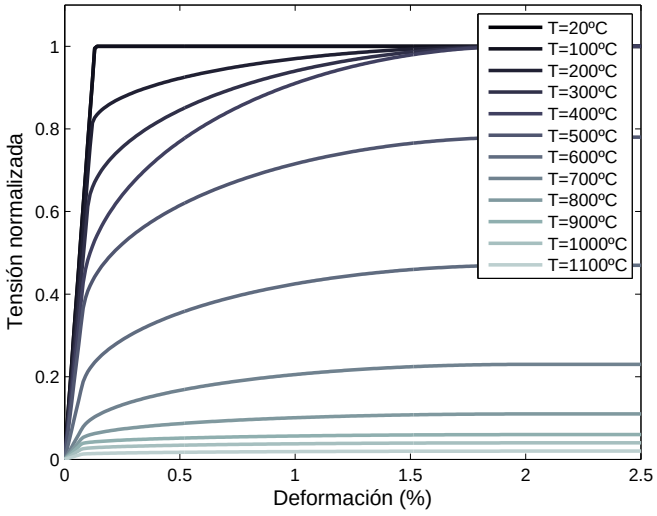


Figura 2.10: Curva tensión deformación para el acero al carbono a distintas temperaturas (CEN-EN 3-1-2, 2005)

Otro aspecto importante en el caso de estructuras de hormigón sometidas a incendios es la variación de la *adherencia entre la armadura y el hormigón*. La perturbación de esta característica es mayor después del incendio que durante la máxima temperatura alcanzada (Calavera, 2005). La figura 2.11 muestra la relación de la tensión de rotura de adherencia después del incendio ($\tau_{u,inc}$) y la anterior al mismo (τ). En la figura se observa que superados los 300°C el deterioro es muy rápido.

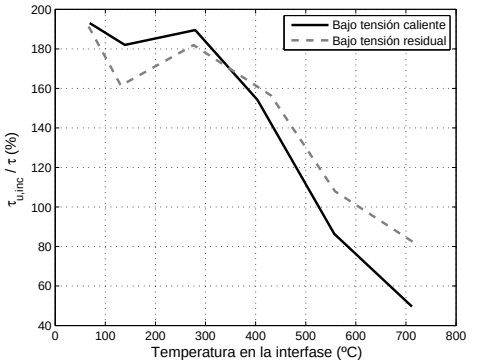


Figura 2.11: Relación entre la tensión de rotura de adherencia y la temperatura (Calavera, 2005)

2.1.7 Evaluación de daños en túneles sometidos a fuego

El principal objetivo de la evaluación de daños en túneles es obtener la información necesaria para evaluar la capacidad remanente de la estructura y proponer una reparación adecuada. En el caso de túneles es necesario repararlo para volverlo a su condición operativa, no conociéndose antecedentes de túneles que hayan sido cerrados en forma permanente por un incendio (Corsi, 2008a; Corsi, 2008b).

Es importante destacar que en el caso de túneles la estimación de los daños y sus técnicas de reparación debe contemplar además del estado del hormigón, la geología del túnel y el método constructivo. Ya que el hormigón del recubrimiento tiene distintas funciones en función de si el túnel está construido en roca o en un suelo blando y de la técnica constructiva utilizada. A su vez comprender la función del recubrimiento del hormigón permite considerar adecuadamente las cargas a las que está sometido. Por este motivo las recomendaciones existentes de reparación de estructuras sometidas a fuego como el informe técnico 68 de la Concrete Society del 2008 no son aplicables directamente a túneles.

Teniendo en cuanta que la prioridad es siempre la seguridad de las personas, el primer paso es obtener una primera conclusión sobre el daño en la estructura del túnel y definir zonas seguras tanto para los servicios de emergencia como para realizar tareas de inspección y reparación.

Según Corsi (2008a) el proceso de evaluación de daños y propuesta de reparación contempla las siguientes etapas:

- Determinar el riesgo de entrada al túnel.
- Determinar la función del recubrimiento de hormigón en función de la geología del túnel y el método constructivo utilizado.
- Evaluar el daño de la estructura teniendo en cuenta el daño a nivel del material.
- Evaluar el daño en el resto de los elementos del túnel.
- Definir la metodología de reparación.

Corsi (2008a) y Felicetti (2012) destacan que las tareas de evaluación de daños y propuesta de reparación de túneles están fuertemente influenciadas por la necesidad de volver a poner en funcionamiento el túnel en el **menor tiempo posible**, ya que cada día que el túnel está cerrado implica grandes pérdidas económicas para el propietario del túnel como para los usuarios.

Evaluar la capacidad residual de la estructura de hormigón dañado por el fuego es una tarea complicada. En general esta tarea se realiza por alguno de los siguientes dos procedimientos, siendo habitual combinar ambos procedimientos:

- evaluar las características residuales del hormigón dañado por el fuego a través de ensayos no destructivos o menormente destructivos;
- estimar la severidad del fuego para la determinación de los perfiles temperatura-tiempo y luego calcular la capacidad residual del hormigón.

En cuanto a la evaluación de las propiedades del hormigón dañado por fuego, existen numerosas técnicas no destructivas (NDT, *Non Destructive Test* en inglés) y menormente destructivas. Por ejemplo ensayo de martillo de rebote, velocidad de pulso ultrasónico, ensayos petrográficos, etc. Short et al. (2001), Colombo y Felicetti (2007) y Felicetti (2013) presentan detalladamente estas metodologías. Abraham y Dérobert (2003) presentan la aplicación de NDT al caso del incendio en el túnel de Mont Blanc y Niels Peter et al. (2008) y Leitner (2001) al incendio del túnel Tauern.

Felicetti (2012) y Corsi (2008a) destacan que en el caso de túneles, las NDT o las técnicas menormente destructivas resultan de difícil aplicación por la rugosidad de las superficies y la no verticalidad de las mismas. Además brindan información localizada y generalmente se deben aplicar dos técnicas para obtener un resultado más certero. Algunas técnicas novedosas se están desarrollando para salvar estas dificultades (Felicetti, 2012; Felicetti, 2013).

En la segunda metodología pueden distinguirse tres pasos. Evaluar la severidad del fuego a través de la inspección visual del color del hormigón y del estado de otros materiales (ver por ejemplo Erlin et al. (1972)) o modelos de dinámica de los fluidos; realización de modelos de transferencia de calor para obtener la distribución de temperaturas en el hormigón y evaluación de la capacidad residual del hormigón en función de las temperaturas alcanzadas.

Esta metodología pone de manifiesto la importancia de conocer la temperatura máxima alcanzada por la estructura. Informes de evaluación de daño de diversos túneles (ver Niels Peter et al. (2008)) y edificios sometidos a la acción del fuego (ver Calavera et al. (2005) y Wang et al. (2014)), destacan que la estimación de las temperaturas alcanzadas no es una tarea sencilla y que por no disponerse del perfil de temperaturas al que ha sido sometida la estructura es necesario realizar un mayor número de ensayos no destructivos.

Wright et al. (2013) destacan que conocer la historia de temperaturas en un evento de fuego es muy importante para evaluar el comportamiento de la estructura luego del incendio y que la aplicación de las técnicas relativas a los cambios de coloración de los materiales se suele dificultar por la presencia de hollín.

Khoury (2000) apunta que conocer el desarrollo de la distribución de temperaturas en las estructuras de hormigón es el primer paso para poder comprender el comportamiento de la estructura ante las cargas de fuego.

Todos estos informes acuerdan que conocer la *historia de temperaturas* experimentada por la estructura en diversos puntos es de gran interés ya que la capacidad residual del hormigón y las tensiones térmicas introducidas en la estructura dependerán tanto de las temperaturas máximas alcanzadas como de los tiempos de exposición.

2.1.8 Sistemas de detección de incendios en túneles

Los sistemas de detección de incendios en túneles, también llamados sistemas de monitorización, son diseñados con el objetivo de detectar incendios lo más rápido posible de forma que los dispositivos y procedimientos de seguridad sean activados en forma rápida, siendo la detección temprana de incendios fundamental para reducir las consecuencias de los incendios.

La importancia de los sistemas de detección de incendio se manifiesta en las numerosas investigaciones al respecto. Uno de los proyectos más importantes al respecto es el Proyecto internacional de detección de incendios en túneles de carretera financiado por la Fundación de investigación en protección contra incendios (*The fire protection research fundation*, en inglés) de Estados Unidos y Canadá. En la primera etapa de este proyecto se resumen los tipos de detectores de incendios y el funcionamiento de los mismos en incidentes en túneles (Zalosh y Chantranuwat, 2003). La segunda parte de este proyecto resume los sistemas de detección que existen, evalúa su comportamiento

en incendios ocurridos e incluye ensayos de diversos sistemas de detección en túneles a escala real (ver por ejemplo Liu et al. (2006b), Liu et al. (2006a), Liu et al. (2007) y Liu et al. (2010)). Estas investigaciones fueron la base para el desarrollo de la normativa NFPA 502 (NFPA, 2010). PIARC (2012) también resume los sistemas de detección de incendios y brinda recomendaciones para su mantenimiento.

El proyecto UPTUN también realizó ensayos a escala real de evaluación de sistemas de detección de incendios. Aralt y Nilsen (2009) resumen los resultados de los mismos. A su vez otra parte del proyecto UPTUN estudió el uso de los sistemas de procesado de imágenes para la detección temprana de incendios en túneles (Jamée et al., 2006).

Dentro de los sistemas de detección de incendios se distinguen los sistemas de detección manuales que son los que activan los usuarios y los sistemas de detección automáticos.

Los sistemas de detección de incendios automáticos se basan en la detección de humos, calor o llamas. A continuación se describen los principales métodos de detección de incendios (NCHRP, 2011; Maciocia, 2012)

1. **Sistemas de detección de calor lineal**. Dentro de estos sistemas se distinguen tres tipos:

   a) *Cable semiconductor multicapa*. Este sistema está compuesto por un alambre conductor central cubierto por un recubrimiento semiconductor sensible a la temperatura y un recubrimiento exterior conductor. El alambre central y el recubrimiento exterior están conectados a un panel donde monitorizan la resistencia del semiconductor. Un aumento de la temperatura en el cable genera una reducción de la resistencia del conductor y se produce la detección.

   b) *Cable digital detector de calor*. Consisten de dos polímeros conductores con recubrimiento exterior. Cuando el recubrimiento se derrite se produce la detección debido a que los conductores hacen contacto entre sí. Algunos de estos sistemas permiten detectar la ubicación del incendio.

   c) *Cables de fibra óptica*. Estos sistemas están compuestos por sensores distribuidos del tipo Raman scattering (ver subsección 2.2.5). Están compuestos por una fibra óptica protegida por un recubrimiento y conectada en uno de sus extremos a la unidad de control que emite una señal constantemente y recibe la reflexión de la señal. Los cambios de temperatura son detectados en la señal recibida.

2. **Sistemas de detección de humos por imágenes**. Los sistemas de detección de incendios por imágenes son sistemas que utilizan un software específico para analizar en tiempo real las imágenes de las cámaras de vídeo para detectar la presencia de humos y llamas. Estos sistemas además de detectar el incendio y su ubicación brindan una imagen de la situación al operario.

3. **Sistemas de detección de llamas**. Este tipo de detectores se basan en la detección de la radiación procedente del incendio. Pueden detectar radiación ultravioleta, radiación infrarroja o una combinación de ambas.

4. **Sistemas de detección puntual**. Estos sistemas son los sistemas tradicionales de detección de incendios. Son sistemas puntuales que funcionan detectando temperatura o humos y emiten una alarma al alcanzarse un valor determinado.

La aplicación sistemas de detección de incendios es recomendada por la PIARC (2006). La directiva Europea del 2004 establece que en los túneles de carretera de la Unión Europea de longitud mayor a 500 m se requiere la utilización de sistemas de detección de incendios. Por su parte la NFPA 502 (NFPA, 2010) establece la instalación de sistema de detección de incendios para túneles de longitudes mayores a 300 m y de 240 m en los casos donde la distancia desde cualquier punto del túnel a un punto seguro excede los 120 m. Sin embargo estas normativas no especifican la *ubicación de los sistemas de detección*. Siendo habitual colocarlos en la clave del túnel.

Características de los sistemas de detección lineal comerciales

Esta tesis se centra en el estudio de los sistemas de monitorización de temperaturas en túneles. Por este motivos esta sección resume las características de los sistemas de detección de incendios de lineales más utilizados en túneles.

Dentro de los cables digitales detectores de calor existe una amplia oferta en el mercado (véase por ejemplo ORTRAT S.L o Protectowire). Es importante destacar que estos sistemas solo detectan el incendio y en algunos casos son capaces de indicar la ubicación del mismo, pero no registran las temperaturas.

En la actualidad los sistemas de detección de calor lineales más utilizados son los basados en *sensores distribuidos de fibra óptica*. Vallinas González (2011) presenta un resumen de las empresas que proveen este tipo de sensores. Por ejemplo *LIOS Technology Gmbh* ha realizado más de 3500 instalaciones del sistema DE.TECT de detección de incendios en túneles o Simens cuenta con una gran experiencia en la instalación del sistema Fibrolaser (Siemens, 2010). Estos sistemas monitorizan la temperatura en forma constante y cuentan con mecanismos de activación de alarmas cuando se superan determinados criterios relativos a incrementos de temperaturas. Brindan una detección rápida y una localización concisa del incendio. Sin embargo su rango de funcionamiento está limitado a temperaturas máximas de hasta 120 °C. Por lo cual no pueden registrar temperaturas durante todo el incendio.

Existen unas pocas empresas que disponen de cables de fibra óptica para la detección de incendios con recubrimientos y tratamientos especiales que son capaces de resistir temperaturas significativamente superiores. El sistema Firelaser (*Bandweaver*) es capaz de resistir hasta 600°C, el cable Extreme Duty DTS de la empresa *QOREX* trabaja con temperaturas de hasta 700°C y el sistema de *AP Sensing* hasta 750°C. En estos

casos es importante destacar que para poder resistir estas temperaturas es necesario proteger a la fibra con recubrimientos específicos, los cuales pueden introducir errores en la medición de temperaturas. Estos errores no son importantes para la detección de incendios pero si lo serían en caso de utilizarse como sistemas de monitorización.

Los sistemas de detección de incendio en túneles son capaces de detectar el inicio de forma efectiva y algunos a su vez monitorizan las temperaturas. Sin embargo no son capaces de monitorizar las temperaturas alcanzadas a lo largo del incendio ni monitorizar el proceso de enfriamiento debido a que dejan de funcionar cuando alcanzan sus temperaturas máximas de trabajo, lo cual ocurre a los pocos minutos de iniciado el incendio.

2.2 Monitorización estructural (SHM)

2.2.1 Conceptos generales

La monitorización de estructuras (*Structural Health Monitoring* en inglés, SHM) es una rama de la ingeniería estructural dedicada al desarrollo de sistemas que proporcionen información sobre cualquier cambio significativo o daño que se produzca en una estructura (Gopalakrishnan et al., 2011). Su objetivo es brindar información en tiempo real acerca de la condición de la estructura (Glisic e Inaudi, 2007).

La información obtenida de la monitorización es utilizada habitualmente para planear y diseñar actividades de mantenimiento, de mejora de seguridad, verificar hipótesis y reducir la incertidumbre sobre los parámetros que se monitorizan (Glisic e Inaudi, 2007).

Aunque el establecimiento formal de esta disciplina es relativamente reciente (por ejemplo, la International Society for Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure se creó en el año 2003), la auscultación de puentes y edificios es relativamente antigua, pues ya ingenieros como Torroja o Nervi emplearon diferentes sistemas para medir y comprobar el comportamiento real de alguno de los innovadores diseños que crearon en la primera mitad del siglo XX (Torres Górriz, 2012).

La monitorización de estructuras es un campo de la ingeniería que ha experimentado un considerable auge en los últimos años. Según Bisby y Briglio (2004) los principales motivos para ello son:

- El envejecimiento del parque de estructuras hace cada vez más necesario invertir un mayor presupuesto en inspección, conservación y mantenimiento y un menor presupuesto en la construcción de obra nueva.

- El desarrollo de estructuras innovadoras por los materiales empleados, los sistemas estructurales, los procedimientos constructivos y/o las dimensiones requiere de sistemas que permitan verificar su correcto y seguro funcionamiento.
- El avance y el desarrollo de nuevos, funcionales y económicos sensores (como los sensores de fibra óptica y los materiales inteligentes) y sistemas de adquisición de datos.
- El desarrollo de potentes sistemas de transmisión y recolección de datos y el avance en los modelos de procesado de datos.
- Recientes accidentes y colapso de estructuras han sensibilizado a la opinión pública sobre la importancia de invertir en programas de mantenimiento, monitorización y gestión de infraestructuras.

Los sistemas de monitorización estructural pueden ser clasificados según la complejidad de los mismos y sus objetivos. El nivel básico o nivel 1 es el sistema que es capaz de detectar la existencia de daño. El nivel 2 es el que es capaz de detectar el daño y su localización. El nivel 3 detecta el daño, su ubicación y lo cuantifica. El nivel más complejo es el nivel 4 y es en el cuál el sistema de monitorización es capaz de brindar información detallada del daño y es capaz de utilizar esta información para para evaluar la seguridad de la estructura.

En caso de ocurrencia de eventos extraordinarios como el fuego, el sismo (que puede llevar asociada la aparición de incendios) y los ataques terroristas, la monitorización continua de la estructura es de gran ayuda para evaluar su seguridad y reparación, en caso necesario, establecer también un procedimiento seguro para su demolición.

Actualmente, es común instalar sensores en las grandes estructuras o en momentos problemáticos de la construcción o reparación de estructuras de menor entidad. Por ejemplo, Ou y Li (2010) describen la monitorización de estructuras en China donde cerca de cien estructuras de diferentes tipos (pavimentos, puentes, edificios, obras subterráneas y plataformas off-shore) son controladas con sistemas de monitorización y Glisic e Inaudi (2007) describen detalladamente los resultados de su extensa experiencia en el desarrollo sensores de fibra óptica para medir distintos parámetros en estructuras, la instrumentación de estructuras reales por todo el mundo y en la propuesta de recomendaciones para instrumentar algunos elementos como los pilotes de las cimentaciones profundas. Ansari (2005) presenta la aplicación de sistemas de monitorización y materiales inteligentes a diversas obras de ingeniería.

Sin embargo, hasta donde alcanza el conocimiento del autor, la acción del fuego no se ha considerado en la monitorización estructuras excepto en aquellos casos en los que se trataba de experimentos de laboratorio (véase por ejemplo Dwaikat et al. (2011) y Moliner et al. (2013)) o ensayos a escala real en los que precisamente se deseaba estudiar la respuesta de la estructura a esta acción (véase por ejemplo Han

et al. (2010) e Ingason et al. (2015)). Por este mismo motivo, no se ha encontrado bibliografía que haga referencia a **las pautas para la monitorización de estructuras reales vulnerables a la acción del fuego**.

2.2.2 Componentes de un sistema de SHM

Los sistemas de SHM son aplicables a todo tipo de estructura. Se pueden distinguir dos aspectos de la monitorización, por un lado la medición del parámetro y por el otro el registro de la lectura. Existen diferentes sistemas para registrar las mediciones, dependiendo del sistema de monitorización que se utilice. En líneas generales un sistema de monitorización estructural típico consta de (Bisby y Briglio, 2004; Glisic e Inaudi, 2007):

- Un sistema de sensores
- Un sistema de procesado de datos:
    - Sistema de adquisición de datos.
    - Comunicación de la información. Transmisión de la información hacia el sitio de procesado de datos.
    - Sistema de procesado de datos, eliminación del ruido y de los datos anómalos.
    - Almacenamiento de los datos procesados. Los datos siempre deben poder ser recuperados.
- Un sistema de evaluación de la seguridad de la estructura. Conversión de los datos en respuestas estructurales o magnitudes con sentido ingenieril

La figura 2.12 muestra un esquema de un sistema de monitorización estructural típico.

2.2.3 Proceso de monitorización estructural

El éxito de un buen trabajo de monitorización depende de una serie de tareas que engloban el proceso de monitorización estructural. Glisic e Inaudi (2007) profundizaron y sintetizaron las tareas que exige llevarlo a cabo:

- Selección de la estrategia de monitorización. La estrategia de monitorización es una tarea que exige un amplio conocimiento de la obra instrumentada. Esta tarea engloba a su vez otras actividades:
    - Establecer el objetivo de la monitorización.

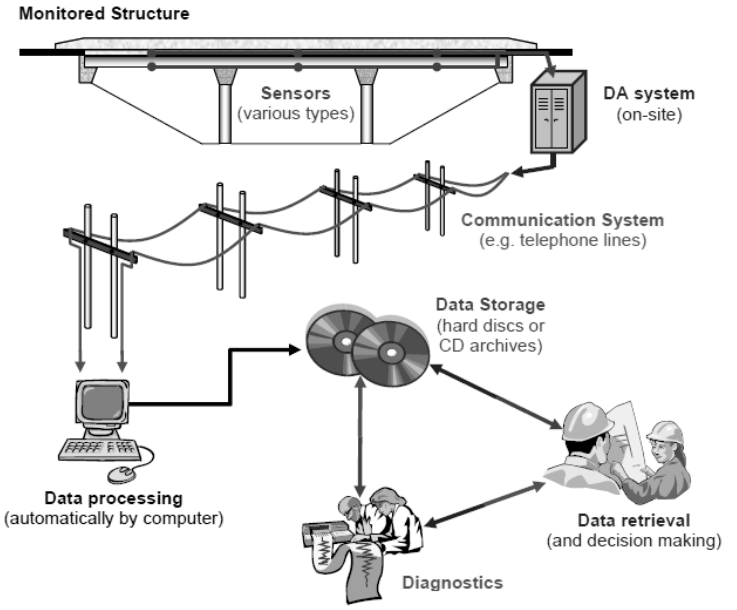


Figura 2.12: Esquema típico de un sistema de monitorización estructural (Bisby y Briglio, 2004).

  - Identificar y seleccionar los parámetros a ser monitorizados.
  - Seleccionar unos adecuados sistemas de monitorización.
  - Diseñar la red de sensores. Esta actividad depende las características de la obra, de su tipología y de su forma de trabajo.
  - Establecer el programa de monitorización.
  - Gestión de los datos.
  - Coste de la monitorización.
- Instalación del sistema de monitorización.
- Mantenimiento del sistema de monitorización.
- Gestión e interpretación de los datos.

Todas las actividades del proceso son importantes, sin embargo la selección de la **estrategia de monitorización** es la más importante. Ésta etapa comprende definir el objetivo de la monitorización y el parámetro a medir. Los parámetros monitorizados

pueden ser mecánicos (por ejemplo deformaciones, tensiones, cargas), físicos (como temperatura, humedad) y químicos (oxidación, pH). El parámetro seleccionado deberá representar adecuadamente el comportamiento de la estructura.

La selección del sistema de monitorización incluye la selección de un determinado tipo de sensores. Ésta depende de diversos factores como ser la capacidad del sensor para medir el parámetro requerido, limitaciones en la instalación de los sensores, requerimientos de durabilidad y costo.

Pautas de monitorización

Se entiende por pautas de monitorización a la metodología a seguir para el diseño de la red de sensores. Éste depende de la geometría y el tipo de estructura a monitorizarse; del parámetro a medirse y del objetivo de la monitorización. En el diseño de la red de sensores se establece la ubicación de los sensores de forma tal de poder obtener la mayor cantidad de información posible del sistema con la menor cantidad de sensores.

Glisic e Inaudi (2007) estudiaron la instrumentación de distintos elementos estructurales y propusieron unas pautas generales para su instrumentación. Como resultado proponen cuatro tipologías de instrumentación (simple, paralela, cruzada y triangular), estas se refieren a la posición de los sensores en el interior de la estructura.

El procedimiento general que proponen es similar al concepto de elementos finitos. Parte de la base de dividir a la estructura en partes e instrumentarla en forma eficiente. Este proceso se resume en las siguientes etapas:

1. Dividir la estructura en celdas.
2. Instrumentar cada celda con una tipología.
3. Analizar de acuerdo a las mediciones el comportamiento de la celda.
4. Extrapolar el comportamiento de la celda para conocer el comportamiento de la estructura.

Cada celda en que se divide una estructura puede estar instrumentada con una tipología concreta. La tipología dependerá del tipo de parámetro que se desee estudiar (deformación, deformación de cortante, curvatura, desplazamiento relativo, etc).

2.2.4 Monitorización estructural en túneles

En las obras de infraestructura y particularmente en los túneles es fundamental monitorizar ciertas magnitudes durante su proceso constructivo y durante su vida útil. La monitorización de parámetros geotécnicos y mecánicos en túneles durante su estado constructivo es habitual. Siendo la monitorización de estructuras la base de comprobación en algunos métodos constructivos. Sin embargo durante el resto de la vida útil del túnel son muy pocos los túneles que permaneces monitorizados.

La monitorización tiene un rol importante en cada etapa de la construcción de un túnel. Por ejemplo durante la construcción la monitorización tiene el objetivo de evaluar el impacto de las condiciones geológicas, el efecto del túnel en las estructuras cercanas y la metodología de construcción. En la etapa de servicio, la monitorización continua permite evaluar la seguridad del túnel durante su vida útil.

La instrumentación de los túneles permite cuantificar ciertos parámetros del comportamiento estructural, monitorizando su variación en el tiempo. De esta forma se puede detectar una estabilización o un posible fallo. A través de la comparación de los valores proyectados y los registrados se podrán realizar medidas correctoras.

La instrumentación a utilizar y su ubicación dependerá del objetivo de la monitorización. En cada caso se debe estudiar las condiciones geológicas y los métodos de construcción a utilizarse para poder definir adecuadamente los tipos de mediciones.

El instrumental usualmente utilizado en la monitorización de túneles se detalla a continuación junto a la descripción de su aplicación:

- *Sensor de deformación*. Se utilizan para el monitoreo de la tensión en estructuras de hormigón.
- *Inclinómetro*. Es un elemento de auscultación de alta precisión que permite controlar los desplazamientos horizontales del terreno, masas rocosas u otros elementos estructurales dentro de los cuales queda instalado.
- *Piezómetro*. Sirven para controlar las variaciones de las presiones intersticiales del terreno donde estén instalados.
- *Extensómetro de varilla*. Se instalan en pozos de sondeo con el objetivo de monitorear los desplazamientos del terreno en un punto (monopunto) o a varias profundidades, usando varillas de diferentes materiales y longitudes (multipuntos).
- *Célula de presión total*. Son destinadas a controlar la presión total en el terreno que es transmitida al revestimiento.
- *Célula de carga*. Se utilizan para medir cargas de tracción en anclajes o pernos.

- *Medidor de convergencia*. La cinta de convergencias se emplea en la medida de distancias entre pares de puntos de referencia instalados permanentemente.

En el terreno y edificio adyacentes se suelen instalar *células de asiento* (para medir asentamientos) y *clinómetros de superficie* (para medir la inclinación en estructuras).

Información detallada sobre estos instrumentos de medición se puede encontrar por ejemplo en Sisgeo (2014) y *Sensogeo Instrumentación y geotecnia* (2014).

Las estrategias de monitorización de túneles se basan en el empleo de instrumentación convencional y a su vez pueden ser adaptadas al uso de tecnología de sensores ópticos puntuales. El uso de sensores ópticos distribuidos para la medición de deformaciones promedio, temperaturas e integridad global de la estructura supone una innovación en el caso de túneles debido a la longitud que caracteriza estas estructuras (ver subsección 2.2.5).

Glisic e Inaudi (2007) y Roctest (2006) presentan las estrategias de monitorización para los parámetros más representativos de túneles.

Ejemplos de monitorización en túneles

La monitorización de túneles a temperatura ambiente ha sido empleada en numerosos túneles. A continuación se presentan algunos ejemplos representativos:

- **Galería de la presa de Luzzone, Suiza** (Inaudi et al., 1998).
  Monitorización de convergencia durante la excavación.
  Instrumental utilizado: 4 extensómetros multi-puntos tipo SOFO verticales y horizontales instalados en la roca.

- **Túnel N5, Suiza** (Inaudi et al., 1998).
  Monitorización de la retracción del hormigón en el corto y largo plazo.
  Instrumental utilizado: Sensores de deformación tipo SOFO embebidos en el hormigón, adheridos a las armaduras.

- **Túnel Mt. Terri** (Inaudi et al., 1998).
  Monitorización de la descompresión del macizo rocoso durante la excavación de un nuevo túnel.
  Instrumental utilizado: 9 sensores de deformación tipo SOFO instalados en la roca a través de la cementación de la perforación ejecutada desde el túnel existente al nuevo.

- **Túnel Kizlac T3A, Turquia** (Özbek et al., 2003).
  Se monitorizaron 5 puntos por sección, 3 en la parte de la bóveda y uno en cada hastial. En cada punto se monitorizaron los desplazamientos horizontales, longitu-

dinales y verticales (asentamientos).
Instrumental utilizado: Técnicas geotécnicas convencionales. No se especifica cuáles.

- **Túnel de Champ Baly, Suiza** (Li et al., 2004).
  Monitorización de convergencia y de la deformación longitudinal de las paredes, la bóveda y las fundaciones del túnel, desde la construcción y durante toda la vida útil.
  Instrumental utilizado: 9 sensores de deformación ópticos tipo SOFO y 9 termopares embebidos en el hormigón.

- **Túnel M111, España** (Canales y Peñafiel, 2004)
  Monitorización de convergencia. Monitorización de deformaciones continúas en 17 secciones transversales, 10 con 7 sensores por sección y 7 con 4 puntos.
  Instrumental utilizado: Estaciones totales con auto reconocimiento de prismas.

- **Túnel Tymfristos, Grecia** (Kontogianni y Stiros, 2005)
  Monitorización de convergencia.
  Instrumental utilizado: Estaciones totales.

- **Túnel Kallidromo, Grecia** (Kontogianni y Stiros, 2005)
  Monitorización de convergencia.
  Instrumental utilizado: Estaciones totales.

- **Túnel Bai Ni-jing 3, China** (Li et al., 2008)
  Monitorización de la deformación del revestimiento de hormigón. Se monitorizaron 10 secciones y 5 puntos por sección. En cada punto se colocaron dos sensores de deformación uno en forma longitudinal y otro en forma tangencial.
  Instrumental utilizado: Sensores de deformación basados en FBGs.

- **Túnel de Niayesh** (Ghorbani et al., 2012).
  Monitorización durante la etapa constructiva de las deformaciones en el túnel y las tensiones en el recubrimiento de hormigón. Monitorización de las deformaciones en el terreno y de asentamientos en superficie.
  Instrumental utilizado: Estación total con reflectores prismáticos, sensores de deformación, células de carga, inclinometros, extensómetros y medidor de asentamientos diferenciales.

- **Túnel línea 5 Barcelona, España** (Rodriguez, 2013).
  Monitorización de convergencia y deformaciones en 24 secciones de control. Control de asentamientos del terreno, edificios vecinos y edificios singulares.
  Instrumental utilizado: Inclinómetros, extensómetros de varilla, extensómetros de incrementares, piezómetros, células de presión y cintas de convergencia.

2.2.5 Los sensores ópticos y la monitorización estructural

La mayoría de los sensores convencionales están basados en la transmisión de señales eléctricas. Las limitaciones de éste tipo de sensores se basan en que usualmente no son lo suficientemente pequeños o durables como para ser embebidos (Li et al., 2004).

Los sensores de fibra óptica son una tecnología emergente que puede obtener mayores prestaciones en comparación con los sensores eléctricos convencionales. El éxito de los sensores ópticos se debe a la disminución de su precio y a sus ventajas respecto a los sensores convencionales. Las principales ventajas de los sensores ópticos son (Glisic e Inaudi, 2007):

- Su capacidad de multiplexación que hace que en una sola fibra óptica puedan disponerse múltiples sensores lo que resulta en un sistema más ligero y más fácil de instalar que un sistema de sensores convencionales.
- La flexibilidad de la fibra óptica que permite adaptar los sensores a multitud de formas estructurales.
- Los sensores ópticos son inmunes a las interferencias electromagnéticas por lo que la presencia de corrientes eléctricas como las que existen en las líneas de ferrocarril electrificadas no les afecta.
- Los sensores ópticos no necesitan un calibrado cada vez que el sensor realiza una toma de datos por lo que la obtención de medidas es siempre fiable.
- Los sensores ópticos son pasivos, es decir, no requieren el aporte de energía para funcionar correctamente. En cambio, los sensores eléctricos requieren el aporte de energía eléctrica para medir, lo que puede ser incompatible en caso de incendio por los posibles cortocircuitos derivados del empleo de materias líquidas conductoras en los trabajos de extinción del fuego.

La fibra óptica es el medio por excelencia en la transmisión guiada de la luz, por el que se envían pulsos de luz que representan los datos a transmitir. Está compuesta por tres regiones concéntricas: el núcleo, el revestimiento y la capa protectora. El *núcleo*, es la zona interior de la fibra óptica, tiene un diámetro exterior del orden 5 a 50 μm, generalmente es de sílice y es donde se reduce la propagación de la onda lumínica. Esta propagación se produce porque el índice de refracción del núcleo es mayor que el del revestimiento con lo que el haz lumínico se puede propagar mediante reflexión total o una serie de refracciones en el interior del núcleo (Ley de Snell).

El *revestimiento*, es la capa central entre el núcleo y la cubierta, su diámetro exterior es de 125 μm y usualmente también es de sílice. Su función es mantener la luz en el núcleo y minimizar las pérdidas. La *cubierta*, es la capa exterior de la fibra suele ser de plástico con un diámetro exterior entre 145 y 250 μm. Le da a la fibra resistencia mecánica y la protege frente a posibles daños y humedades.

La principal clasificación de sensores ópticos utilizados en la monitorización estructural de obras de ingeniería civil los clasifica en función de su aplicación como distribuidos, puntuales o de longitud. La figura 2.13 presenta esta clasificación, donde los recuadros con línea continua indican que los sensores pueden medir tanto deformación como temperatura, los recuadros con línea de trazo los que miden solo temperatura y los de línea de punto solo deformación.

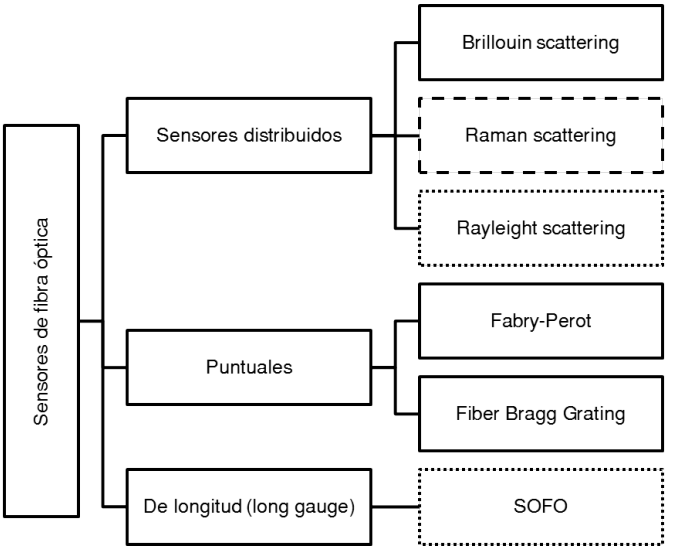


Figura 2.13: Tipos de sensores ópticos. Adaptado de Glisic e Inaudi (2007).

Los sensores distribuidos realizan medidas en forma continua a lo largo de la fibra. Tienen la principal ventaja de poder medir con un solo cable cualquier punto usando una única fuente de luz y un sistema de procesado. No obstante, la precisión y la sensibilidad son mucho menores que la de los discretos (Gu et al., 2000; Ansari, 2007).

Dentro de los sensores distribuidos se pueden distinguir tres tipos en función del efecto que se analiza (Brillouin scattering, Raman scattering o Rayleight scattering). Bao y Chen (2012) y Glisic e Inaudi (2007) explican el funcionamiento de estos tres tipos de sensores y comparan sus ventajas y desventajas. Información sobre el principio de funcionamiento de los sensores tipo Raman scattering y Rayleight scattering se puede encontrar en Kikuchi et al. (1988) y Masoudi et al. (2013) respectivamente. Shuai y Lijun (2011) explican el principio de funcionamiento de los sensores distribuidos tipo Brillouin scattering y muestran una aplicación en la monitorización de integridad de un túnel.

Los sensores puntuales miden en el punto sobre donde están colocados y los sensores de longitud (long-gauge) son sensores que miden una media sobre la longitud en la que están colocados. Los sensores de longitud son apropiados para medir el comportamiento

de materiales heterogéneos como el hormigón. Información detallada sobre este tipo de sensores puede ser consultada en Pinet et al. (2007) y Li et al. (2004). En particular Inaudi et al. (1998) describen el principio de funcionamiento de los sensores tipo SOFO y presentan aplicaciones en la monitorización de túneles.

Los sensores basados en la tecnología de Fiber Bragg Grating (FBG) son los más utilizados en la monitorización estructural. El principio de funcionamiento de estos sensores se explica en la subsección 2.3.3.

A su vez los sensores pueden ser clasificados en función del medio sensitivo. Los sensores intrínsecos utilizan la fibra como medio sensitivo, y las variaciones se producen sobre las propiedades de la fibra óptica. Por tanto, la fibra es empleada como medio de transporte de la luz y como medio sensitivo a la vez. En cambio los sensores extrínsecos utilizan la fibra óptica solamente como medio de transporte desde la fuente a la parte sensitiva. Por lo tanto la luz no sufre ningún cambio a lo largo de la fibra óptica. Por último pueden clasificarse en función del parámetro a medir (modulador de intensidad, interferométricos, espectométricos o polarimétricos).

2.3 Medición de alta temperatura

Los sensores de altas temperaturas tienen un rol fundamental en el estudio de estructuras sometidas al fuego. La temperatura debe ser el primer parámetro a medir en cualquier ensayo de fuego y en casos de incendios reales ya que es un parámetro dominante en las reacciones químicas y en los procesos de combustión.

Existen diversos instrumentos de medición de temperaturas con sus respectivas ventajas e inconvenientes. Informes realizados por el *National Institute of Standards and Technology*, NIST (McAllister et al., 2012) y la NFPA (NCHRP, 2011) remarcan la necesidad de mejorar las técnicas de medición de temperaturas en ensayos de fuego y destacan las ventajas que el uso de sensores de fibra óptica pueden aportar.

La monitorización de temperaturas es habitual en algunas estructuras con el objetivo de detectar el inicio de incendios, como por ejemplo en los túneles (ver subsección 2.1.8). Sin embargo los sistemas habitualmente utilizados en la detección de incendios no son capaces de registrar las temperaturas durante todo el incendio.

La importancia del registro de temperaturas durante un incendio se ve reflejada en los ensayos de fuego y particularmente en los ensayos de fuego en túneles donde la temperatura es el principal factor a medir (ver subsección 2.1.4).

A su vez Cowlard et al. (2010) y Reddy et al. (2011) manifiestan la importancia de la monitorización de temperaturas en estructuras y de la información que estos sistemas pueden brindar al cuerpo de bomberos.

A continuación se describen los instrumentos más usados para la medición de altas temperaturas en estructuras, industrias y en laboratorios de fuegos.

2.3.1 Termopares

Un termopar es un circuito formado por dos conductores metales diferentes o aleaciones de metales diferentes, que están unidos en sus extremos y en cuyas uniones existe una diferencia de temperatura que origina una fuerza electromotriz (efecto Seebeck).

Ésta fuerza generada es función de la diferencia de temperatura entre uno de los extremos denominado punto caliente o unión caliente y el otro denominado punto frío o unión fría (Medrano, 2002). A su vez la magnitud de esta fuerza depende de los materiales de los conductores utilizados en el termopar.

Los termopares están disponibles en diferentes combinaciones de metales o calibraciones para adaptarse a diferentes aplicaciones. Los tres más comunes son las calibraciones K, T y J, de los cuales el tipo K es el más popular debido a su amplio rango de temperaturas y bajo costo. Cada calibración tiene un rango de temperatura y un entorno de trabajo diferente. Aunque la calibración del termopar dicta la gama de temperaturas, el alcance máximo también está limitado por el diámetro del cable del termopar. Es decir, puede ser que un termopar muy delgado no logre alcanzar el rango de temperatura deseado (*Omega*).

El tipo de termopar más simple es el termopar por cuentas que se compone de dos piezas de alambre unidas por una soldadura. Este tipo de sensores suele ser una buena opción para medir temperaturas del gas debido a su facilidad de instalación. Estos termopares pueden tener distintos tipos de aislamientos.

Los termopares de sonda son los termopares que se alojan en un tubo metálico, llamado vaina de sonda. La vaina de sonda puede ser de distintos materiales, en función del material utilizado el termopar tendrá distintas propiedades.

Este elemento de medición tiene numerosas aplicaciones fundamentalmente en el ámbito industrial. A su vez, son normalmente usados en los laboratorios para ensayos de fuego, debido a la facilidad de instalación y su precio, a pesar de requerir una excesiva cantidad de cableado en la mayoría de los casos. Se los puede usar tanto para medir las temperaturas alcanzadas en el gas, en la superficie de los materiales a ensayar y embebidos. En hornos eléctricos se los usa para regular la temperatura del horno.

La principal ventaja de los termopares es que son económicos, intercambiables, tienen conectores estándar y son capaces de medir un amplio rango de temperaturas. Su principal limitación es la exactitud, ya que los errores del sistema inferiores a un 1 °C son difíciles de obtener y que cada termopar necesita ser conectado en forma individual a la unidad de recolección de datos.

Distintos autores han estudiados los errores introducidos en la medición con termopares como ser la diferencia en los valores de temperaturas registrados en función del termopar utilizado (Bova y Dickinson, 2008). Otros artículos hacen referencia a la variación del tiempo de respuesta del termopar en función del diámetro del mismo y a los errores que se pueden dar en la medida de la temperatura del gas en incendios debido a que la temperatura del sensor puede ser distinta de la temperatura que lo rodea (Pitts, 2000; Shannon y Butler, 2003).

Brohez et al. (2004) muestra un ejemplo de la utilización de dos termopares de distinto diámetro para corregir el error de radiación. Sin embargo Pitts et al. (2003) concluye que las medidas de temperaturas con termopares en fuegos de recintos pueden contener grandes errores y que la corrección de los efectos de la radiación en las medidas de temperaturas utilizando termopares de distintos diámetros no son aplicables en el caso de ensayos de fuego en recintos cerrados.

McAllister et al. (2012) remarca que esta tecnología está muy desarrollada, sin embargo su uso a ensayos de fuego de gran escala está limitado a por el hecho de que cada sensor necesita su propio cableado y estar conectado a la unidad de control.

2.3.2 Sensores infrarrojos

Los sensores infrarrojos o de radiación detectan la radiación emitida por los materiales calientes y la transforman en una señal eléctrica para poder determinar la temperatura del punto (*Omega*).

Normalmente el aparato consta de una lente que permite captar la emisividad infrarroja del objeto. La lente capta la cantidad de energía infrarroja que emite el objeto y la pasa a un complejo sistema que traduce la energía captada en señal eléctrica, la cual se traduce numéricamente en temperatura en la pantalla del termómetro.

Son sensores para medida de temperatura sin contacto, lo que permite realizar medidas de temperatura con alta precisión para rangos amplios de temperatura. Dependiendo de la calidad del instrumento pueden llegar a medir temperaturas de hasta los 1000 °C. Permiten la medición de temperaturas a distancia e incluso en objetos en movimiento. Tienen gran fiabilidad y rapidez.

Dentro de los tipos de sensores infrarrojos están los sensores puntuales y los superficiales. En cualquiera de las opciones miden solamente la temperatura superficial de superficies visibles. Amon et al. (2008) estudia las posibles aplicaciones de cámaras infrarrojas en ensayos de fuego.

La principal desventaja de este tipo de sensores radica en que deben tener campo libre con respecto al objeto a medir. Los rayos infrarrojos de los termómetros no pueden atravesar el cristal, lo cual impide en ensayos de fuego realizar la medición a través de un cristal con los termómetros infrarrojos estándar. Deberá evitarse la existencia de

polvo o restos de humedad en la lente de los termómetros y entre los termómetros y el objeto a medir. También tienen problemas para medir la temperatura de superficies pulidas, transparentes o brillantes (McAllister et al., 2012). A su vez la presencia de llamas puede distorsionar sus medidas (Meléndez et al., 2010).

De lo expuesto se deduce que la aplicación de sensores infrarrojos para la monitorización de estructuras sometidas a fuegos es limitada.

2.3.3 Sensores ópticos

Como se describió en la subsección 2.2.5 podemos distinguir entre los sensores ópticos de temperatura puntuales y los distribuidos. Los sensores ópticos distribuidos son utilizados habitualmente en la detección de incendios (ver subsección 2.1.8).

Para la medición de temperaturas puntuales, tradicionalmente se han empleado sensores eléctricos (termopares), pero cada vez se utilizan más los sensores de fibra óptica, y dentro de ellos, los sensores basados en el empleo de las redes de difracción de Bragg (Majumder et al., 2008).

Sensores de redes de difracción de Bragg, FBG

Una red de difracción de Bragg (FBG, *Fiber Bragg Grating* en inglés) es una modulación periódica o casi periódica en el índice de refracción del núcleo de la fibra óptica a lo largo de una longitud llamada longitud de rejilla. Como consecuencia parte de la luz incidente en la FBG es transmitida y parte es reflejada (ver figura 2.14). La longitud de onda a la que se produce un mayor acoplo de la luz entre el modo incidente y el modo contra-propagado se conoce por el nombre de longitud de onda de Bragg (λ_B), la cual se puede determinar por la ecuación:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \tag{2.1}$$

Donde n_{eff} es el índice de refracción efectivo en el núcleo de la fibra óptica y Λ la separación espacial de las perturbaciones en el índice de refracción (Grattan y Meggitt, 2000).

La longitud de onda de Bragg se ve afectada por las condiciones ambientales externas que afecten tanto al índice de refracción efectivo del núcleo de la fibra óptica como a la separación espacial entre perturbaciones del índice de refracción. Las FBG presentan una mayor sensibilidad a variaciones de temperatura y a deformaciones mecánicas aplicadas a la fibra, siendo despreciables el resto de efectos. La variación de la longitud

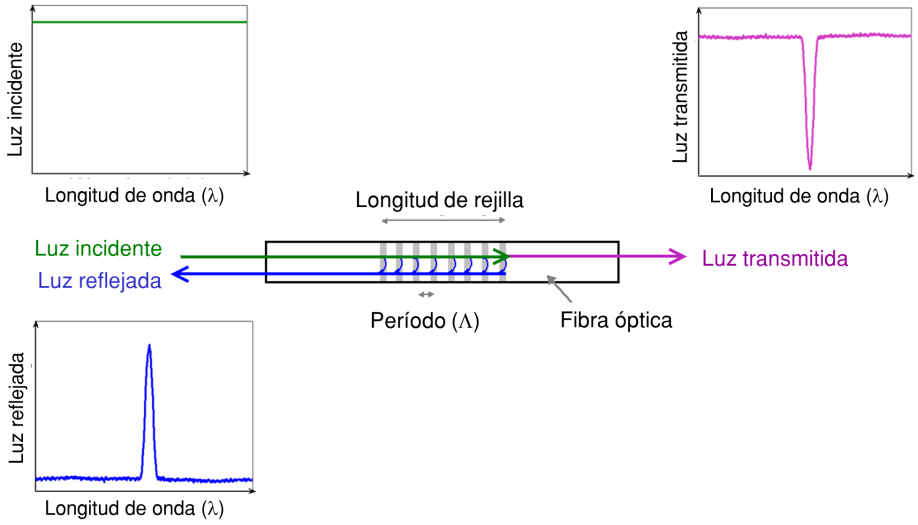


Figura 2.14: Principio de funcionamiento de una FBG

de onda de Bragg, $\Delta\lambda_B$, se puede hallar aplicando derivadas parciales respecto de los factores de la que ésta depende:

$$\Delta\lambda_B = \frac{\delta\lambda_B}{\delta\mathcal{E}}\Delta\mathcal{E} + \frac{\delta\lambda_B}{\delta T}\Delta T \tag{2.2}$$

Donde ΔT es la variación de la temperatura y $\delta\mathcal{E}$ es la variación de la deformación unitaria. En particular si la fibra está sometida solamente a cambios de temperatura, la variación de la longitud de onda de Bragg se puede relacionar directamente con esta acción, por lo cual la ecuación anterior se puede expresar como:

$$\Delta\lambda_B = \frac{\delta\lambda_B}{\delta T}\Delta T = K_T\Delta T \tag{2.3}$$

Donde K_T es la sensibilidad en temperatura de red de difracción, en unidades de pm/°C. Es importante destacar que esta relación es lineal a temperaturas menores de 100°C aproximadamente, siendo luego esta relación cuadrática o cúbica.

La figura 2.15 muestra un espectro típico de reflexión de una FBG y la nomenclatura que se utiliza habitualmente para hacer referencia a sus componentes. La potencia de pico es la máxima potencia reflejada y longitud de onda a la cual ocurre es la longitud de onda de Bragg (λ_B). El Nivel de lóbulo principal a ruido, NLPR, es la diferencia entre la potencia de pico y el nivel medio de ruido. El nivel de ruido puede definirse

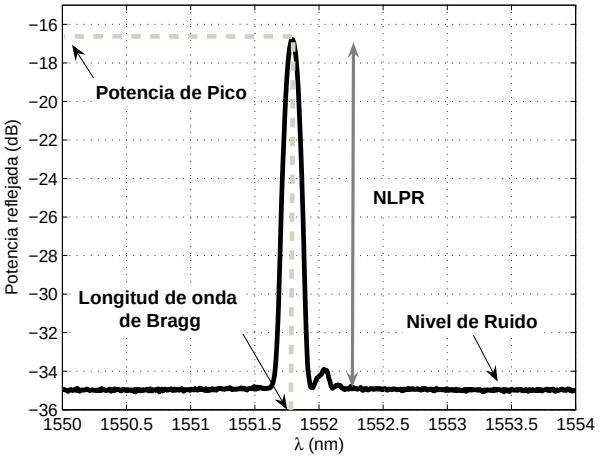


Figura 2.15: Nomenclatura FBG

como el nivel medio de potencia óptica fuera de la banda de longitudes de ondas con contenido espectral de la FBG.

Diversas marcas comerciales ofrecen sensores ópticos de temperatura basados en FBGs con distintas características, recubrimientos y encapsulados (ver por ejemplo *Technicasa* y *Smart Fibres*). En la mayoría de estos casos se alcanzan temperaturas máximas para su uso en continuo entre 150 y 300°C. Vallinas González (2011) ofrece un detallado estudio de los sensores de temperaturas de fibra óptica disponibles en el mercado y sus características.

2.3.4 Investigaciones relativas a la degradación térmica de las FBG y al desarrollo de sensores ópticos de altas temperaturas

Diversos autores han estudiado la estabilidad térmica de las FBGs y acuerdan en que las FBGs sufren una degradación progresiva e irreversible que depende tanto de la temperatura alcanzada como el tiempo al que fue expuesta a esta temperatura (Erdogan et al., 1994; Baker et al., 1997; Kannan et al., 1997). Estos autores explican el fenómeno de degradación de las FBG y concluyen que el tiempo necesario para producirse una determinada degradación de la FBG depende de la temperatura, siendo este tiempo del orden de unos minutos para temperaturas de 600°C.

Posibles soluciones al problema de la degradación térmica de las FBG han sido estudiadas por numerosos autores. Butov et al. (2006) propone aumentar la estabilidad térmica de las FBG adicionando dopantes al núcleo de la fibra. Otros autores como Baker et al. (1997) y Lemaire et al. (1993) proponen hidrogenar la fibra óptica para

aumentar la fotosensibidad de la misma. Este proceso genera que las FBGs inscritas en fibras hidrogenadas experimentes una degradación inicial mayor, sin embargo a temperaturas elevadas tienen un mejor comportamiento que en el caso sin hidrogenar.

Otra técnica menos desarrollada se basa en la utilización de métodos de inscripción de las FBGs basados en pulsos de gran energía y corta duración (Grobnic et al., 2004).

La utilización de redes de Bragg regeneradas, RFBG, es una de las alternativas más estudiadas. Las RFBGs son FBGs que atraviesan un proceso físico químico para mejorar la estabilidad térmica. En este proceso la FBG es expuesta a un tratamiento térmico en el cual la reflectividad de la FBG se degrada completamente y luego aumenta hasta estabilizarse, por esto el nombre de regeneradas. Estas técnicas han sido estudiadas por numerosos autores utilizando fibras ópticas con distintos dopantes y ciclos de temperatura diferentes (ver por ejemplo Canning et al. (2009), Fokine (2002) y Barrera et al. (2010)). Un resumen de la bibliográfica relevante respecto a las técnicas de regeneración de las FBG se puede encontrar en Barrera Vilar (2013).

De acuerdo con Canning et al. (2008) las RFBGs resultantes son mucho más estables ante la temperatura que una FBG sin regenerar y pueden resistir temperaturas cercanas al punto de fusión de la sílice.

Sin embrago las RFBG son frágiles y para poder ser utilizadas como sensores de altas temperaturas deben colocarse en un **encapsulado** adecuado. Los estudios realizados evalúan el comportamiento de las RFBG en hornos de laboratorio en condiciones mucho más favorables que las que se dan en ensayos de fuego o en estructuras reales.

Una alternativa para disminuir la fragilidad de las RFBG es utilizar recubrimientos. Por ejemplo Tu et al. (2013) proponen un sensor de altas temperaturas basado en RFBG con un recubrimiento multicapa de titanio, plata y níquel que resiste hasta 600°C. La colocación de este tipo de recubrimientos es de elevada complejidad y las temperaturas máximas alcanzadas por la RFBG resultante dependen de las propiedades de los materiales utilizados en el recubrimiento.

Salgado Díaz (2013) estudia el comportamiento de sensores de FBGs con recubrimientos de poliamida, acrilato, polietileno y sin recubrimiento en el intervalo de temperatura entre -40°C y 65°C y entre 20°C y 500°C. Este estudio concluye que la relación entre el desplazamiento de la longitud de onda y la temperatura se puede considerar lineal en el intervalo de temperaturas -10°C y 60°C, mientras que en el intervalo entre 100°C y 500°C esta relación se puede aproximar a un polinomio de segundo grado y que los materiales que recubren las FBG influyen en los coeficientes de calibración.

También concluye que hay FBGs que se borran a temperaturas entre 300°C y 500°C y que en las aplicaciones donde las FBGs se utilicen en entornos de altas temperaturas, dichas FBG deben recibir un tratamiento especial para poder resistir las altas temperaturas.

Aplicación de sensores ópticos en ensayos de fuego

Lönnermark et al. (2008) presenta un trabajo pionero en la utilización de sensores ópticos en ensayos de fuego. Este trabajo compara las temperaturas del gas registradas por termopares y sensores ópticos basados en FBGs en un ensayo de un túnel a escala reducida sometido a fuego. La ubicación de los sensores ópticos se determinó de forma de garantizar que no superen temperaturas mayores a los 300°C ya que los sensores utilizados tenían una temperatura máxima de uso de 350°C. Los sensores ópticos utilizados no tenían recubrimiento por lo cual eran sumamente frágiles.

Este estudio concluye que los termopares tienen ciertas ventajas frente a los sensores ópticos como su robustez y capacidad para resistir altas temperaturas, sin embargo los sensores ópticos registran mejores resultados para la medición de temperatura del gas. A su vez destaca que los sensores ópticos responden mejor a los cambios bruscos de temperatura.

Bueno et al. (2011) presentan la aplicación de sensores basados en FBG y RFBGs embebidos en probetas de hormigón sometidos a un ensayo de fuego. A su vez comparan las temperaturas registradas por los sensores con las obtenidas por termopares. En el ensayo se alcanzaron temperaturas dentro del hormigón del orden de los 600°C. Los sensores de FBG se borraron completamente durante el ensayo, mientras que los sensores de RFBGs presentaron un mejor comportamiento alcanzando temperaturas de hasta 600°C.

Estas aplicaciones muestran la viabilidad de utilizar sensores ópticos ante la acción del fuego. Sin embargo destacan la necesidad de poder alcanzar temperaturas mayores y de una mayor investigación relativa al uso de sensores ópticos en condiciones de fuego reales con grandes gradientes térmicos. En particular McAllister et al. (2012) destaca la necesidad de estudiar **encapsulados para sensores de fibra óptica que puedan resistir las condiciones de ensayos de fuego** y estudiar métodos para adherir los sensores a elementos estructurales para poder medir temperaturas en superficie.

2.3.5 Sensores ópticos comerciales de altas temperaturas

Dentro de la oferta de sensores de fibra óptica de temperatura se debe distinguir entre los sensores de temperatura y los de alta temperatura. Dentro de los sensores de altas temperaturas, la oferta comercial es reducida. La tabla 2.7 resume los sensores de altas temperaturas disponibles en el mercado.

Es importante remarcar que las temperaturas indicadas como temperaturas máximas son en el encapsulado y no en el cableado. Por lo cual todos estos sensores deben ser instalados de forma tal que el cableado quede fuera de la zona de altas temperaturas.

La marca *FOS&S* ofrece el sensor puntual *Temp Probe TP 01* capaz de medir hasta 500°C. Estos sensores están basados en la tecnología de FBGs y tienen un encapsulado

	Fabricante	Temperatura máxima	Tecnología	Multiplexables
Temp Probe TP 01	*FOS&S*	500°C	FBG de alta temperatura	No
OETMS-400	*O-Eland*	400°C	FBG de alta temperatura	Si
OETMS-700	*O-Eland*	700°C	FBG de alta temperatura	Si
OptoTemp 2000 Super	*Micro Materials*	400°C	Fluorescencia óptica	No
OptoTemp 2000 Ultra	*Micro Materials*	950°C	Fluorescencia óptica	No
Helica Sensor	*Chiral Photonics*	1000°C	Rejillas tipo 'chiral'	No

Tabla 2.7: Sensores de fibra óptica para la medida de altas temperaturas disponibles en el mercado

tubular de acero inoxidable (tipo SS316) de diámetro exterior de 4 mm y una longitud variable entre 10 y 60 cm. Se desconoce el tiempo que el sensor puede estar expuesto a la temperatura máxima sin degradarse.

La marca *O-Eland* ofrece los sensores *OETMS-400* y *OETMS-700* los cuales pueden trabajar hasta 400 y 700°C respectivamente. Los mismos están diseñados con la tecnología de FBGs tratadas para resistir altas temperaturas. Estos sensores tienen un encapsulado tubular de 3mm de diámetro exterior y una longitud de 90 mm de acero inoxidable. La figura 2.16 muestra este sensor (encapsulado, cable y conector). La misma empresa ofrece estos sensores en forma multiplexada, con hasta 32 sensores colocados en serie.

La empresa *MicroMaterials Inc* ofrece los sensores *OptoTemp 2000* en tres modalidades Flex, Super y Ultra siendo las temperaturas máximas de cada uno 230, 400 y 950°C. Los sensores Opto Temp 2000 se presentan en un encapsulado tubular cerámico, con un diámetro exterior de 1 o 3 mm y 15 cm de longitud. La figura 2.17 muestra estas dos opciones de encapsulado.

Estos sensores operan sobre el principio de la fluorescencia óptica. Un sensor basado en fluorescencia óptica se basa en que una fuente emisora de luz emite un haz de luz a través de una fibra óptica y este haz ilumina una superficie fluorescente. La superficie que ha sido iluminada emite por fluorescencia una radiación en respuesta a la excitación óptica. Parte de la luz emitida es guiada de vuelta por la fibra. Esta fluorescencia de retorno se controla por un detector, y su descomposición es analizada por un

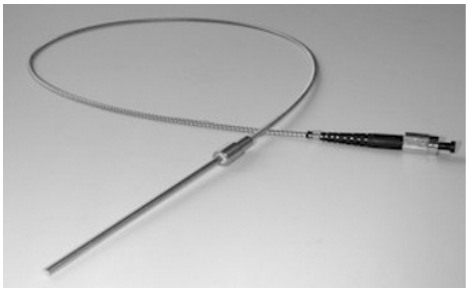


Figura 2.16: Sensores OETMS-400 y OETMS-700 (*O-Eland*)

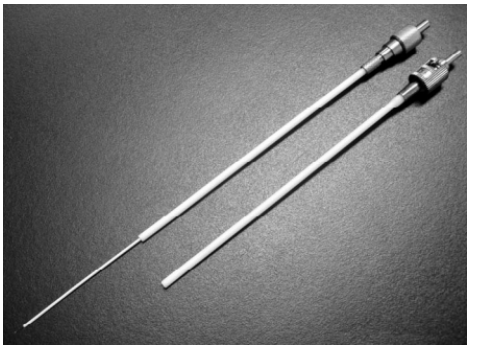


Figura 2.17: Opciones de encapsulado del sensor OptoTemp 2000 Ultra.(*Micro Materials*)

procesador. En el caso de la temperatura, la caída de la intensidad de fluorescencia es función del tiempo. Obteniendo el tiempo de caída, se obtiene la temperatura.

La figura 2.18 muestra una representación de cómo opera el sensor OptoTemp 2000. En el paso 1, un LED produce pulsos de luz que se reflejan en un espejo 45° sobre una lente. La lente enfoca la luz en el cable de conexión de fibra óptica (paso 2). La luz alcanza el fósforo en el extremo de la sonda (paso 3) y hace que el fósforo que emita fluorescencia (paso 4). La luz de fluorescencia es guiada hacia el controlador, donde un sensor de luz controla el decaimiento de la fluorescencia (pasos 5 y 6). El tiempo de caída se calcula y es traducido a una temperatura por un procesador electrónico. La desventaja de estos sensores radica en que no pueden ser multiplexables y que necesitan una fibra fotosensible.

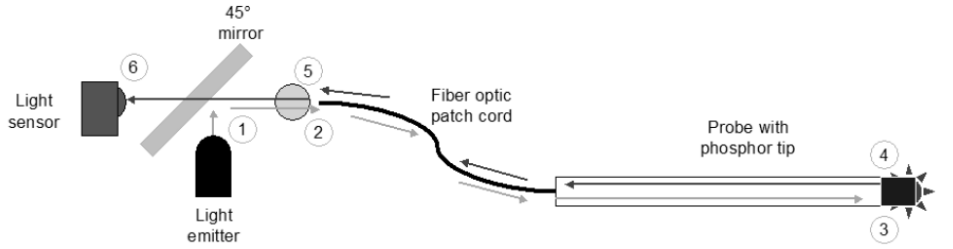


Figura 2.18: Principio de funcionamiento del sensor OptoTemp 2000 basado en fluorescencia óptica (*Micro Materials*)

La empresa *Chiral Photonics* ha desarrollado los sensores *Helica Sensors* que están basado en la rejilla tipo 'chiral' de la empresa Chiral photonics. Este tipo de rejillas se producen en un proceso microconformado en el que las fibras ópticas con núcleos no circulares o no concéntricas son torsionadas a medida que pasan a través de un horno en miniatura. Las estructuras periódicas generadas en la fibra son tan estables

como el material en el que se producen con paso helicoidal que va desde menos de un micrómetro a cientos de micras. La geometría de la sección transversal de la fibra determina la simetría de la estructura resultante que a su vez determina su selectividad polarización (Kopp et al., 2007). Estos sensores operan en temperaturas de hasta 1000°C. La desventaja de este tipo de sensores radica en que no son multiplexables y que la respuesta del sensor es obtenida en transmisión, lo cual dificulta la interrogación.

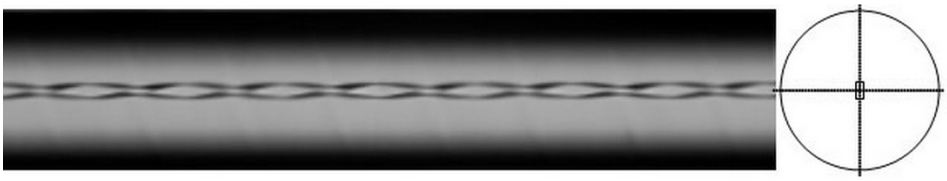


Figura 2.19: Rejilla tipo 'chiral'. Sección longitudinal y transversal. (*Chiral Photonics*)

2.4 Conclusiones

La revisión bibliográfica realizada manifiesta la importancia del estudio de los incendios en túneles y las numerosas investigaciones realizadas con el objetivo de mejorar la seguridad en túneles y disminuir el riesgo de incendios.

La **temperatura** es un parámetro muy significativo en los incendios en túneles debido a que el nivel de daño y consecuentemente las pérdidas económicas ocasionadas dependen de las temperaturas alcanzadas. La temperatura es un parámetro medido en todos los ensayos y modelos de fuego ya que es un indicador fundamental para establecer la magnitud del incendio y sus consecuencias.

Existen diversas técnicas de evaluación de daños en túneles sin embargo estas técnicas suelen consumir mucho **tiempo**, siendo el tiempo un factor fundamental para reducir las pérdidas económicas. Varios autores resaltan la importancia de conocer la historia de temperaturas en túneles y la dificultad existente para deducirla con las herramientas disponibles.

Las normativas y recomendaciones relativas a la **seguridad en túneles** destacan la importancia de detectar en forma temprana el inicio del incendio aunque no hacen referencia a la ubicación de los mismos. La oferta de sistemas de detección de incendios es muy abundante. Sin embargo estos sistemas no son capaces de registrar las temperaturas durante el incendio.

El desarrollo de los sistemas de monitorización estructural ha crecido notablemente en los últimos años debido a la mayor aceptación de sus beneficios por parte de los propietarios de las estructuras y al desarrollo de nuevas tecnologías. En la construcción de túneles es habitual monitorizar diversos parámetros. Sin embargo, la **monitorización**

de temperaturas no ha sido empleada como una metodología para disminuir el riesgo en túneles. Por lo tanto tampoco se han desarrollado **pautas de monitorización de temperaturas en túneles**.

La revisión de los **sensores de alta temperatura** disponibles indica que la causa por la cual no sea planteado esta posibilidad puede deberse a la necesidad de colocar un gran número de sensores de temperatura y la escasa oferta en el mercado de sensores multiplexables de altas temperaturas.

En el ámbito de los ensayos de fuego existe un interés por el desarrollo de **sensores de fibra óptica** capaces de resistir las condiciones agresivas generadas en este tipo de ensayos.

La revisión bibliográfica muestra la existencia de numerosas investigaciones de dispositivos ópticos para medir altas temperaturas. Sin embargo estos han sido ensayados en condiciones muy favorables y en en muy pocas ocasiones expuestos a ensayos de fuego. Se detecta un escaso desarrollo de los **encapsulados** necesarios para poder colocar los dispositivos ópticos desarrollados en condiciones de fuego.

Dentro de los avances mencionados se distingue que aún no se ha resuelto: cómo proteger la fibra mediante un encapsulado adecuado, cómo fijar e instalar el sensor en la estructura y cómo integrar las soluciones anteriores en el caso de sensores multiplexados.

En este contexto esta Tesis Doctoral propone aplicar la **monitorización de temperaturas en túneles** como una alternativa para disminuir las consecuencias de incendios, fundamentalmente las económicas y para mejorar la seguridad de los equipos de intervención durante y post-evento al poder disponer de información de la evolución de las temperaturas en tiempo real. Para esto:

- Desarrolla sensores de fibra óptica para la medida de altas temperaturas multiplexables compuestos por tres tipos de encapsulados diferentes.
- Los sensores desarrollados son validados en ensayos de fuego donde se exponen los sensores, el cableado y los sistemas de fijación a condiciones muy severas.
- Establece pautas de monitorización en túneles frente la acción del fuego para el diseño de la red de sensores y las aplica al caso del túnel Virgolo.
- A partir de los datos de temperatura registrados en un ensayo de fuego, aplica un proceso iterativo para deducir el escenario de fuego.

De lo expuesto se concluye la investigación planteada en esta tesis es necesaria, novedosa y relevante respecto al estado actual del conocimiento.

Capítulo 3

Diseño y desarrollo de un sensor puntual de altas temperaturas basado en RFBG

3.1 Introducción

La temperatura es el parámetro dominante en las reacciones químicas y procesos de combustión, por lo cual es el parámetro fundamental a ser medido en ensayos de fuego y en estructuras monitorizadas ante la acción del fuego. A su vez, las variaciones de temperaturas se verán reflejadas en las propiedades del hormigón (ver subsección 2.1.6) y en el estado de tensiones de la estructura debido a las dilataciones y compresiones que experimentan los materiales.

Por lo tanto, los sensores de altas temperaturas tienen un rol fundamental en el estudio de estructuras sometidas al fuego. Como se mencionó en la sección 2.3 existen diversos instrumentos de medición de temperaturas con sus respectivas ventajas e inconvenientes. Sin embargo, existe la necesidad de brindar nuevas alternativas para la medición de altas temperaturas.

El uso de sensores ópticos puede brindar grandes ventajas como su pequeño peso y volumen, su capacidad de multiplexación y su inmunidad frente a la radiación electromagnéticas. Dentro de los sensores de fibra óptica, los más utilizados son los basados en el empleo de FBGs (Glisic e Inaudi, 2007; Majumder et al., 2008). Las FBGs convencionales sufren una degradación importante cuando son sometidas a temperaturas cercanas a los 600°C (Erdogan et al., 1994; Canning et al., 2009). Una forma de

superar la limitación de temperaturas es emplear las FBGs regeneradas (RFBGs en lo sucesivo).

En este capítulo se presenta un sensor óptico puntual de RFBG para la medición de altas temperaturas desarrollado en el ámbito de esta tesis con la colaboración del Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH) y del Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia (ITEAM) de la Universitat Politècnica de València. Las RFBGs son elementos muy frágiles que no pueden ser instaladas directamente en la estructura o ensayo de fuego, por lo se dará especial importancia al desarrollo del encapsulado que protegerá a la RFBG.

En este capítulo se describe el principio de funcionamiento del sensor desarrollado y sus elementos componentes. También se presentan los ensayos realizados para calibrar los diferentes sensores, determinar sus temperaturas máximas y tiempos de respuesta. Ensayos adicionales que garantizan el buen funcionamiento del sensor y la posibilidad de multiplexación también son presentados.

3.2 Encapsulado del sensor

Como se ha mencionado anteriormente la fibra óptica y particularmente las RFBGs son idóneas para medir la variación de altas temperaturas, sin embargo la RFBG por sí misma no puede ser directamente instalada en la estructura por la fragilidad de la misma. Para poder constituirse un sensor basado en esta tecnología que sea capaz de medir correctamente altas temperaturas es necesario diseñar el encapsulado adecuado, la forma de fijación a la estructura y la protección del cableado que permite transmitir la señal hasta el interrogador.

El **encapsulado** es una parte vital del desarrollo del sensor ya que es el encargado de proteger a la fibra óptica y particularmente la zona de la RFBG durante el proceso de instalación y la vida útil del sensor. Esto se debe a que el proceso de inscripción de la FBG en la fibra óptica requiere quitar el recubrimiento de acrilato de la fibra para poder actuar directamente sobre el núcleo.

Además en el proceso de regeneración se somete a la FBG a temperaturas elevadas que tornan a la fibra aún más frágil y quebradiza. Por lo tanto se hace indispensable proteger la RFBG mediante un encapsulado adecuado que permita:

- Integridad de la instalación. Evitando la rotura del sensor durante su proceso de fabricación e instalación.
- Proteger a la RFBG de eventuales agresiones medioambientales o mecánicas.
- Permitir una correcta transferencia de temperatura entre el sensor y estructura.
- Garantizar una correcta señal del sensor que permita su identificación.

- Permitir la libre dilatación de la RFBG dentro del encapsulado.
- Garantizar que la RFBG se vea afectada solamente por las variaciones de temperatura, y no por otros parámetros como deformación, presión, etc.
- Resistir elevadas temperaturas durante tiempos de exposición prolongados.

El encapsulado diseñado consta de un tubo hueco de pequeño diámetro, de forma tal que la fibra queda holgada en su interior. De este modo el sensor es capaz de medir las variaciones de temperatura del material al que se halle adherido, sin que le afecte la deformación de dicho material, ya que la fibra tiene suficiente holgura en el interior del encapsulado.

Tras realizar un estudio de los posibles materiales para encapsulados que cumplan con las condiciones mencionadas anteriormente y que estén disponibles en el mercado en forma tubular con diámetros lo suficientemente pequeños, se han decidido estudiar tres tipos de encapsulados y para cada uno de ellos las características del sensor resultante. Cabe destacar que resulta difícil encontrar estos materiales en diámetros tan pequeños, motivo por el cual la geometría de los encapsulados varía para los diferentes materiales. En la tabla 3.1 se muestran las características geométricas de los encapsulados utilizados. Donde los encapsulados A y C son de base metálica y el encapsulado B es de base cerámica.

Tabla 3.1: Encapsulados propuestos

Encapuslado	A	B	C
$\phi_{exterior}$ (mm)	1.40	2.00	2.00
$\phi_{interior}$ (mm)	1.10	1.00	1.00
e (mm)	0.15	0.50	0.50

Para poder fijar el encapsulado a la fibra óptica es necesario generar un punto fijo. Para esto se emplea un adhesivo que resista altas temperaturas y que no altere la señal del sensor. En todos los casos se empleó el adhesivo de base metálica. Se diseña también la forma de colocar este adhesivo y la longitud del mismo de forma de garantizar que no se produzcan fenómenos de deslizamiento entre la fibra y el encapsulado.

Los sensores diseñados pueden medir temperatura del aire o del material, pueden colocarse tanto embebidos en el hormigón como adheridos a la superficie. En ambos casos se requiere colocar el sensor de forma tal que la RFBG este lo más cerca posible del punto a medir. La integración del sensor a la estructura es otro punto clave para obtener una medida correcta.

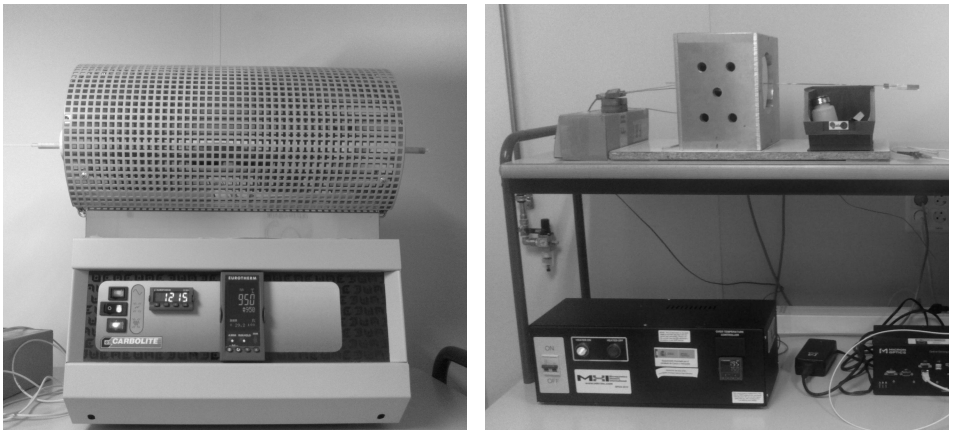
3.3 Hornos utilizados en los ensayos

Para el diseño del sensor de alta temperatura es indispensable contar con hornos adecuados para poder realizar los ensayos. Dentro de las particularidades que deben tener los hornos destacan:

1. Posibilidad de monitorizar el espectro en todo momento.
2. Posibilidad de registrar la temperatura alcanzada por el horno en función el tiempo.
3. Obtener una temperatura lo más uniforme posible, particularmente en la zona donde se sitúe la FBG/RFBG.
4. Poder alcanzar las temperaturas a las que se desea ensayar los sensores (temperaturas mayores a 1250 °C en algunos casos).

Lamentablemente no fue posible contar con un horno que cumpla simultáneamente todas estas características, por lo cual se trabajó con dos hornos diferentes dependiendo del ensayo a realizar. La figura 3.1 muestra los hornos utilizados en los ensayos y la tabla 3.2 resume sus principales características.

El **horno Carbolite MTF 12/38/400** (figura 3.1a) es un horno de tubo horizontal montado sobre una unidad básica. Consta de un enrejado protector exterior, que favorece la refrigeración por aire natural y protege al usuario de superficies calientes. Permite alcanzar temperaturas de trabajo de hasta 1200 °C aunque es recomendable no sobrepasar 1100 °C. La longitud calentada es de a 400 mm.



(a) Carbolite MTF 12/38/400 **(b)** MHI RHUL-MP1125-4

Figura 3.1: Hornos utilizados en los ensayos

Tabla 3.2: Características de los hornos utilizados

	Carbolite MTF 12/38/40	MHI
T máxima (°C)	1200	1700
T máxima recomendable (°C)	1100	1350
Longitud de tubo (mm)	450	101.6
Longitud calentada (mm)	400	50.8
Longitud uniforme (mm)	135	20
Diam. Interior tubo (mm)	38	25.4
Termopar	Interno - Tipo N	Externo - Tipo K

El horno permite controlar la temperatura de la muestra, a través de un termopar (Tipo N) insertado dentro del tubo de trabajo para poder medir la temperatura lo más cerca de la pieza posible. A su vez consta de un indicador de temperatura digital en el horno que muestra el valor de la temperatura en todo momento y de un puerto de salida que permite establecer comunicaciones digitales entre el regulador individual del horno y un ordenador.

El **horno MHI** (figura 3.1b) se compone de un radiador robusto (RHUL-MP1125-4) muy versátil que puede ser colocado tanto en horizontal como en vertical y una unidad de control BPAN-0-2010. Al no contar con protección exterior se le agregó una caja protectora de aluminio para proteger al usuario. Se optó por este modelo de horno debido a la necesidad de alcanzar temperaturas mayores de 1100 °C.

El control de la temperatura se realiza a través de un termopar externo (Tipo K) ya que el termopar interno que traía el horno de fábrica estaba posicionado en una zona donde la temperatura era sensiblemente inferior a la del centro del horno. Este horno tiene el inconveniente que debido a sus pequeñas dimensiones, la temperatura alcanzada en la zona calentada es muy poco uniforme, presentando grandes gradientes y brindando una lectura poco fiable. Se ha constatado que la temperatura del horno puede diferir de la del termopar en hasta 100 °C. Las comunicaciones digitales no han podido establecerse, por lo cual se optó por agregar otro termopar externo para almacenar los datos de las temperaturas alcanzadas en función del tiempo.

Para alcanzar una temperatura más uniforme, ambos extremos de los hornos son ajustados con tapones terminales de cerámica. El horno Carbolite MTF 12/38/400, puede mantener una temperatura uniforme en $\pm$ 5 °C a lo largo de 135 mm de acuerdo con los manuales suministrados por el proveedor. El horno MHI no constaba

con estos datos en su manual, con lo cual se comprobó experimentalmente el perfil de uniformidad de temperaturas, ya que esto es un dato primordial para realizar los ensayos. Se observó que puede mantener una temperatura uniforme en $\pm$ 5°C a lo largo de 25 mm. En la figura 3.2 se comparan los perfiles de uniformidad de temperaturas para ambos hornos. Resulta evidente que el horno Carbolite tiene una uniformidad mucho mayor que el MHI.

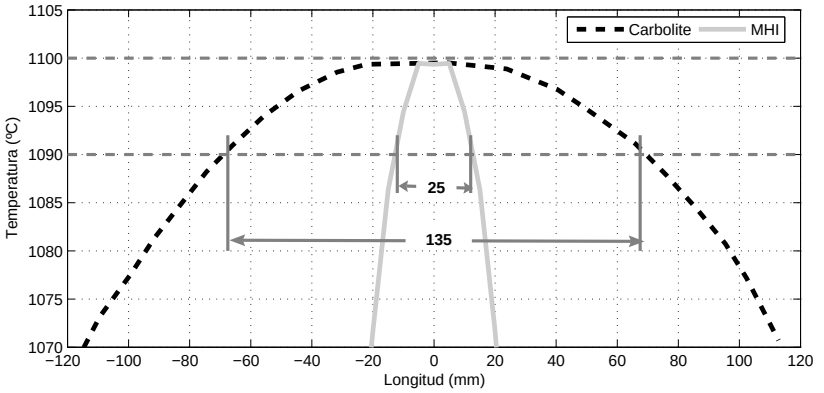


Figura 3.2: Uniformidad de la temperatura en los hornos

Tabla 3.3: Comparación de los hornos disponibles

Carbolite	MHI
Es una única pieza q contiene todo el sistema del horno	El horno se compone de diferentes piezas unidas
Buena precisión	Poca precisión
Requiere tener un encapsulado mínimo de 30 cm $(42/2 + 6 = 27)$	Permite tener un encapsulado de 12 cm $(16/2 + 2 = 10)$
Temperatura uniforme en 135 mm	Temperatura uniforme en 25 mm
	Gradientes de temperaturas importantes dentro del horno
Se utiliza para pruebas donde es indispensable controlar la temperatura (calibraciones) con ciclos de temperaturas de hasta 1100°C	Se utiliza para regenerar y para aplicar ciclos de temperaturas mayores de 1100 °C

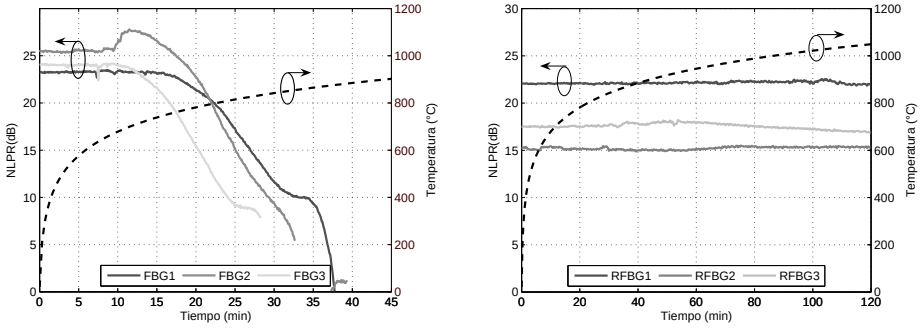
En la tabla 3.3 se resumen las principales diferencias de los hornos disponibles en el laboratorio teniendo en cuenta las necesidades de los ensayos llevados a cabo.

Luego de comprender las diferencias entre ambos hornos es vital remarcar que para realizar las calibraciones de los sensores desarrollados se debe utilizar un horno que sea capaz de mantener la temperatura lo más uniforme posible, de forma de asegurar que la lectura de la temperatura del termopar es lo más cercana posible a la temperatura en la RFBG. Motivo por el cual se utilizó el horno Carbolite para realizar las calibraciones y luego con los sensores calibrados se aplicaron ciclos en el horno MHI para obtener las temperaturas máximas. De esta forma no se necesita confiar en la lectura del termopar colocado en el MHI, que contiene una fuente de error relativamente grande debido a la poca uniformidad de las temperaturas.

3.4 Redes de difracción de Bragg Regeneradas

El sensor de alta temperatura diseñado está basado en la tecnología de RFBG. Esto se debe a que los sensores ópticos basados en FBG, son de gran aplicación en estructuras que se encuentren en temperaturas ambientes o moderadas, pero a temperaturas elevadas pierden sus prestaciones. Para este tipo de sensores se entiende como temperaturas elevadas las que superan los 600 °C, ya que a partir de estos valores las FBG empiezan a perder su reflectividad hasta que se borran totalmente (Erdogan et al. (1994) y Canning et al. (2009)).

A modo de ejemplo, la figura 3.3 compara el comportamiento de FBGs y RFBGs ante la misma curva de temperaturas. En el eje vertical izquierdo se representa el NLPR (ver figura 2.15) y en el eje vertical derecho se indica la escala de temperaturas. En las curvas de las figuras se indica con una flecha hacia que eje corresponde la curva. En



(a) Degradación de FBGs **(b)** Comportamiento de RBFG

Figura 3.3: Comparación de comportamiento de FBGs y RFBGs con la temperatura

este caso las curvas de líneas continuas representan el NLPR y las líneas de trazo la temperatura. Se observa que las RFBGs tienen un comportamiento mucho más estable con la temperatura.

Las RFBGs son redes de difracción que pasan un proceso de transformación físico-químico para ser capaces de resistir altas temperaturas. En primer lugar se hidrogena la fibra óptica mediante la exposición de la misma al hidrógeno a altas presiones. El hidrógeno introducido en el interior de la fibra óptica será el responsable de la transformación físico-química que se producirá más tarde. A continuación se inscriben las FBGs. Finalmente la red de difracción es sometida a altas temperaturas en un horno (temperaturas de regeneración en horno a 950ºC aproximadamente) (Barrera, 2010). Durante esta última fase, y mientras se produce la transformación físico-química, la red de difracción aparentemente desaparece completamente para volver posteriormente a aparecer, motivo por el cual reciben el nombre de redes de difracción regeneradas.

Cabe destacar que la temperatura mínima necesaria para producir la regeneración en el caso de las fibras monomodo estándar SMF-28 se encuentra en torno a 950°C. En caso de no superarse esta temperatura mínima, la FBG simplemente se degrada. Dependiendo del horno que se utilice, puede ocurrir que el horno alcance una temperatura algo menor que la indicada o que la FBG quede en una zona del horno donde no se alcance la temperatura máxima. Por estos motivos la curva de temperatura de regeneración utilizada, tiene una temperatura máxima algo mayor a la de regeneración. Las propiedades de los hornos con los que se realizaron las regeneraciones fueron tenidas en cuenta en el diseño de los ensayos.

En la figura 3.4 se muestra el proceso de regeneración de una FBG en función del tiempo. Se pueden distinguir dos fases durante este proceso. Una primera fase de degradación de la FBG original hasta su desaparición y una segunda fase donde se produce un aumento de la potencia óptica reflejada hasta estabilizarse. Se representa la curva de temperatura aplicada en función del tiempo y la evolución temporal de la FBG/RFBG durante el tratamiento térmico. Esta se representa a través del NLPR.

En la figura 3.5a se observa la evolución del espectro durante el proceso de regeneración. Donde los colores de los espectros van de negro a blanco en función del tiempo del proceso transcurrido, siendo negro el inicio del proceso y blanco el final. El espectro se desplaza hacia la derecha a medida que aumenta la temperatura hasta que alcanza la temperatura de regeneración, luego desaparece y se regenera, finalmente a medida que se enfría la RFBG se desplaza hacia la izquierda.

Al alcanzar la temperatura ambiente la RFBG alcanza una longitud de onda levemente menor a la longitud de onda inicial de la FBG precursora como puede verse en la figura 3.5b. Este desplazamiento, para este tipo de fibra y este proceso de regeneración está en el orden de los 0.2 nm. Como puede observarse, el proceso de regeneración provoca que la reflectividad de la RFBG resultante sea menor a la FBG origen, siendo mayor cuanto mayor sea la reflectividad de la FBG inicial.

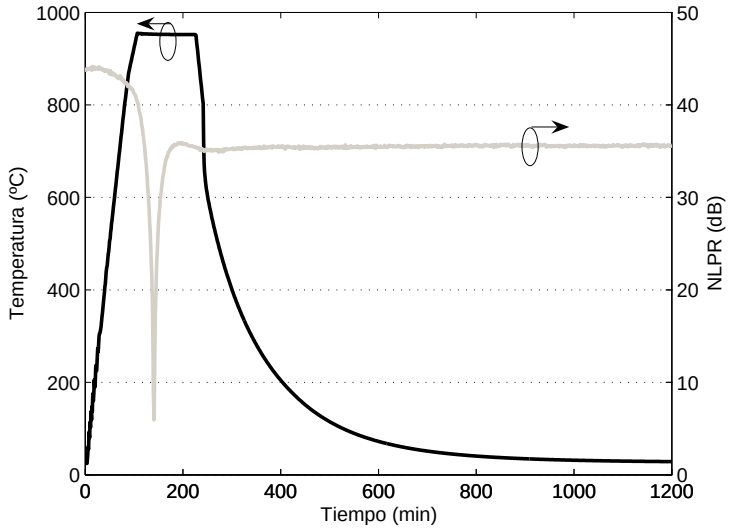
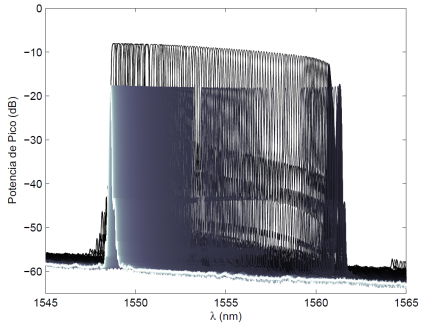
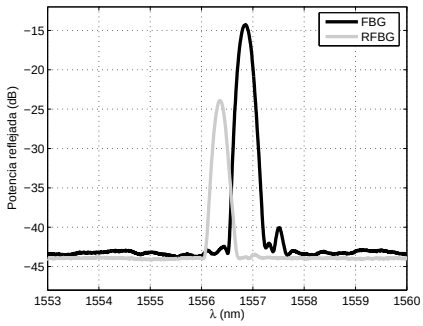


Figura 3.4: Evolución en el tiempo de la temperatura y del NLPR de una FBG en el proceso de regeneración



(a) Superposición de espectros a lo largo del tiempo



(b) FBG precursora y RFBG

Figura 3.5: Espectros en el Proceso de regeneración

Una vez creadas, las RFBGs no se degradan hasta temperaturas superiores a los 1200°C (Fokine, 2002) y además su degradación se produce a un ritmo mucho menor que el observado en las FBGs convencionales a temperaturas inferiores. La aparición de las RFBGs, capaces de medir de forma continua temperaturas superiores a 1200 °C ha supuesto una revolución para la medida de temperaturas extremas.

El proceso de regeneración es un proceso complejo que depende de múltiples factores como el tipo de fibra óptica utilizada, el tiempo y la temperatura utilizada durante la regeneración, etc. Se realizaron diferentes ensayos variando pequeños parámetros hasta obtener un proceso repetitivo de regeneración de las FBGs. Dentro de los parámetros que se variaron figuran la preparación de la fibra, los tipos de encapsulados y forma de fijar el encapsulado a la fibra.

Inicialmente se regeneraron las FBGs sin encapsulado y en el horno tubular Carbolite MTF 12/38/400, debido a que tiene temperatura más estables. Se notó que la RFBG obtenida era excesivamente frágil y en el proceso de encapsulado existía riesgo de romperse la RFBG.

Para solucionar este problema se diseñó un sistema de regeneración-encapsulado que mejora el proceso de fabricación. La principal ventaja de realizar el proceso de regeneración con la fibra ya encapsulada es que facilita el manipuleo del conjunto ya que la parte más frágil está protegida desde el principio del proceso. El inconveniente es que debido a las dimensiones del horno y del encapsulado se debe realizar el proceso de a un sensor por vez. Como resultado, se obtuvo la patente "Procedimiento de fabricación de RFGB y sensor que incorpora una RFGB obtenida mediante dicho procedimiento" (ES 2479916 A1).

El proceso de regeneración se ha realizado con tres tipos de encapsulados distintos. En todos los casos se monitorizó el espectro. Para representar la evolución temporal de la FBG/RFBG durante el tratamiento térmico se utiliza la relación de Nivel de Lóbulo Principal a Ruido (NLPR), como se explicó anteriormente. En la figura 3.6 se muestra la evolución del NLPR de la FBG y temperatura en el interior del horno durante todo el proceso de regeneración para FBGs sin encapsulado y con los 3 encapsulados estudiados.

Cabe destacar que el proceso de regeneración seguido en estos ensayos no se ve afectado por la presencia del encapsulado. A su vez el proceso de generación del sensor es el mismo para los 3 encapsulados estudiados.

3.5 Calibraciones

La calibración de los sensores consiste en la obtención de los coeficientes, llamados coeficientes de sensibilidad, que permitan transformar los datos de longitud de onda (λ) en variables ingenieriles, en este caso la temperatura (°C). Estos coeficientes se han obtenido experimentalmente para cada tipo de sensor.

Los ensayos de calibración consisten en colocar el sensor a calibrar en el horno junto a un termopar. A estos se les aplican distintos ciclos de temperaturas y se registran durante todo el ensayo las temperaturas del termopar y las longitudes de onda de los sensores ópticos. Luego estos datos se vuelcan a una gráfica longitud de onda

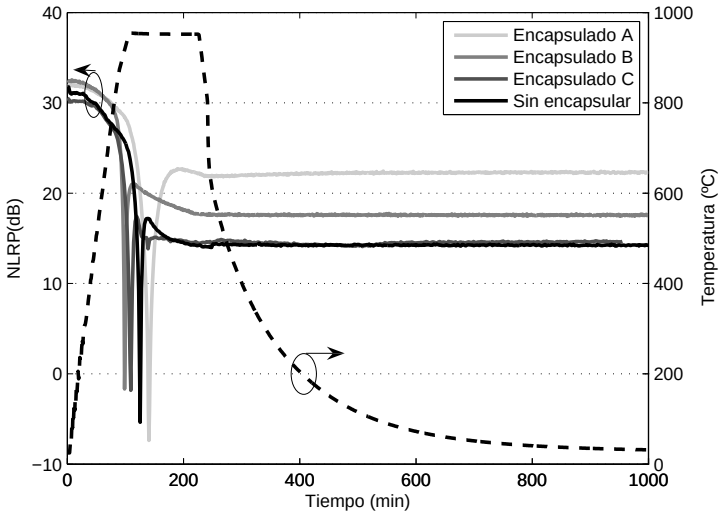


Figura 3.6: Superposición de espectros a lo largo del tiempo

versus temperatura y aplicando el método de mínimos cuadrados se obtienen diferentes ajustes polinómicos.

Las ecuaciones obtenidas permiten calcular la temperatura a partir de la longitud de onda medida por el sensor. En todos los casos se han evaluado ajustes cuadráticos (Ecuación 3.1) y cúbicos (Ecuación 3.2).

$$T(\lambda) = b_2\lambda^2 + c_2\lambda + d_2 \tag{3.1}$$

$$T(\lambda) = a_3\lambda^3 + b_3\lambda^2 + c_3\lambda + d_3 \tag{3.2}$$

Es importante destacar que los coeficientes obtenidos son dependientes de la longitud de onda a la cual fue inscrita la FBG. Por este motivo, se deberá realizar un desplazamiento de la ecuación definida en la calibración para cada longitud de onda.

A bajas temperaturas se suelen definir ecuaciones de calibración lineales (Ecuación 3.3), lo cual permite trabajar en incrementos de longitud de onda ($\Delta\lambda$) e independizar el problema de la longitud de onda inicial.

$$T(\Delta\lambda) = c_1\Delta\lambda + d_1 \tag{3.3}$$

En el caso de los sensores en estudio, no se puede trabajar con incrementos de longitud de onda porque al estar tratando con altas temperaturas la relación entre la longitud de onda y la temperatura no es lineal.

Los ciclos utilizados para las calibraciones varían para cada encapsulado ya que cada uno de ellos es capaz de resistir diferentes condiciones de temperatura y tiempos de exposición (ver sección 3.6).

En todos los casos se ha utilizado el horno Carbolite MTF 12/38/48 debido a que garantiza uniformidad de temperaturas en una longitud mayor. En los casos donde se obtenían buenos resultados al alcanzar la temperatura máxima de uso de este horno (1100°C), se procedió a realizar en una primera etapa, la calibración hasta 1100°C y luego a extrapolar estos resultados hasta temperaturas mayores. En una segunda etapa se evaluaron las temperaturas máximas que puede alcanzar el sensor en el horno MHI, ajustando las temperaturas alcanzadas por el sensor en función de los datos obtenidos al aplicar los coeficientes de calibración a las longitudes de onda registradas.

Una vez obtenidas las calibraciones para los tres sensores, definidos por cada encapsulado, han sido comparadas entre sí y con la calibración de la RFBG sin encapsulado.

3.5.1 Encapsulado A

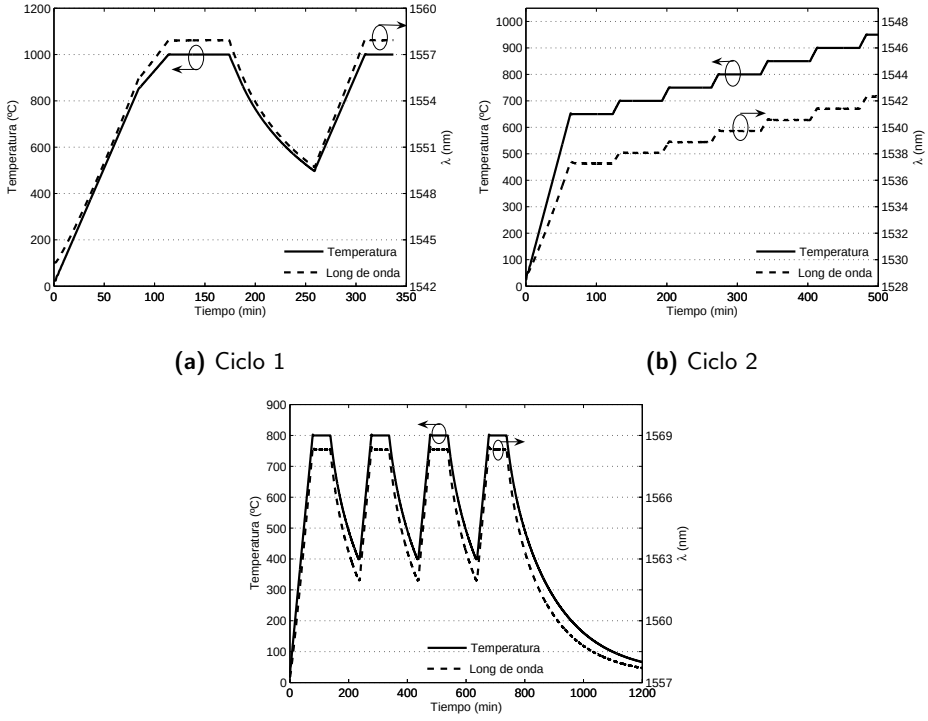
La calibración de este sensor se basa en los resultados de los tres ensayos que se describen a continuación. La figura 3.7 muestra los tres ciclos propuestos, donde la línea continua representa la temperatura y la línea de trazos la longitud de onda en función del tiempo.

Inicialmente, se programaron ciclos de temperatura similares a los de regeneración ya que se preveía que el sensor podría resistir sucesivos ciclos de hasta 1000°C (Ciclo 1). A pesar que el sensor no mostró un buen comportamiento luego de alcanzar la mitad del segundo ciclo, se pudieron utilizar los datos obtenidos en la primera parte del ensayo.

En el segundo ensayo de calibración (Ciclo 2) se plantea subir hasta 650°C con una pendiente constante y luego realizar escalones incrementares de 50°C mantenidos 60 minutos cada uno a temperatura uniforme. El objetivo de estos escalones es poder evaluar la temperatura hasta la cual el sensor muestra un buen comportamiento y a su vez obtener datos de cada escalón de temperaturas para calibrar.

De los resultados de los dos primeros ciclos, surge plantear un tercer ciclo en el que se aplican cuatro ciclos sucesivos que llegan hasta los 800°C, para poder garantizar que la relación entre la longitud de onda y la temperatura se repite en los sucesivos ciclos (Ciclo3).

Para los tres ciclos estudiados se procede a representar gráficamente la relación de la longitud de onda y la temperatura (figura 3.8). Es importante destacar que cada ciclo fue realizado con un sensor diferente y cada uno tenía una longitud de onda inicial (λ_0). Por esto en la figura 3.8a la curva que representa a cada ciclo tiene un origen



(a) Ciclo 1

(b) Ciclo 2

(c) Ciclo 3

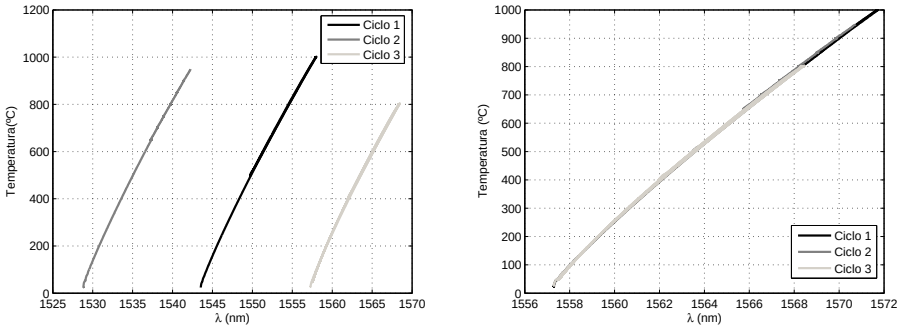
Figura 3.7: Encapsulado A. Ciclos calibración

diferente. Con lo cual es necesario tomar un punto de referencia caracterizado por una longitud de onda inicial de referencia (λ_{ref}) y una temperatura de referencia (T_{ref}).

En este caso se tomó como punto de referencia uno sobre la curva del ciclo 3 con una $\lambda_{ref} = 1557,300$ y $T_{ref} = 28°C$. Por lo tanto las curvas de los otros dos sensores deberán ser desplazadas a los parámetros de referencia (figura 3.8b).

La tabla 3.4 muestra la longitudes de onda y temperaturas iniciales de cada ciclo (λ_0 y T_0), las longitudes de onda asociadas a la temperatura de referencia ($\lambda_{ref(i)}$) y el desplazamiento en longitud de onda a realizarse para cada ciclo.

En la figura 3.9 se muestran los ajustes cuadrático y cúbico propuestos y los datos de los tres ensayos. Gráficamente se nota un buen ajuste en los dos casos, pero se distinguen pequeñas zonas donde el polinomio cúbico se adapta mejor a la curva de los datos.



(a) Longitudes de onda iniciales **(b)** Longitud de onda desplazadas a λ_{ref}

Figura 3.8: Encapsulado A. Relación Temperatura - Longitud de onda

Tabla 3.4: Encapsulado A. Desplazamiento de longitudes de onda a longitud de onda de referencia

	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo3
T_0 (°C)	24	25	28
λ_0(nm)	1543.535	1528.825	1557.300
$\lambda_{ref(i)}$(nm)	1543.545	1528.935	1557.3
$\lambda_{ref} - \lambda_{ref(i)}$	13.755	28.465	0

Los indicadores estadísticos de las funciones se muestran en la tabla 3.5, de los mismos se deduce que efectivamente el ajuste cúbico presenta un mejor ajuste.

Tabla 3.5: Encapsulado A. Indicadores estadísticos

	Ajuste Cuadrático	Ajuste Cúbico
R^2	0.9996	0.9998
RMSE	5.17	3.86

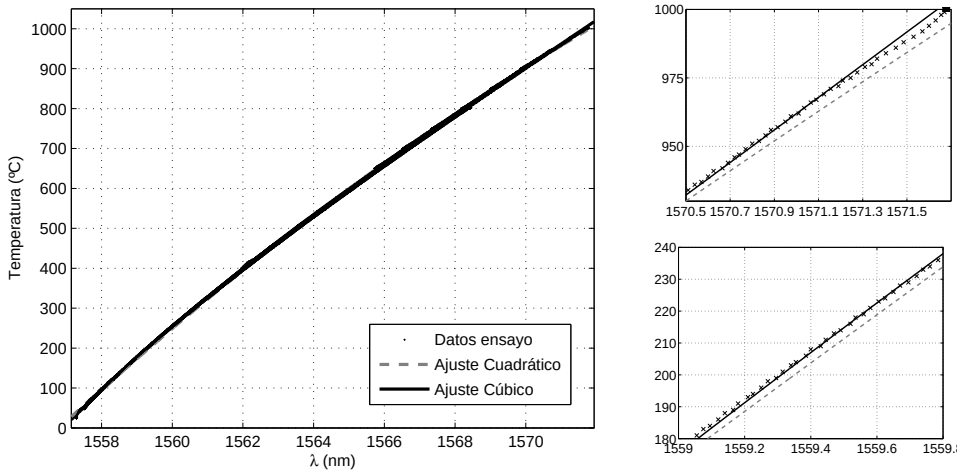


Figura 3.9: Encapsulado A. Polinomios de ajuste cuadrático y cúbico

3.5.2 Encapsulado B

La figura 3.10 muestra el ciclo de temperatura al cual fue sometido el sensor del encapsulado B y la respuesta del mismo en términos de longitud de onda.

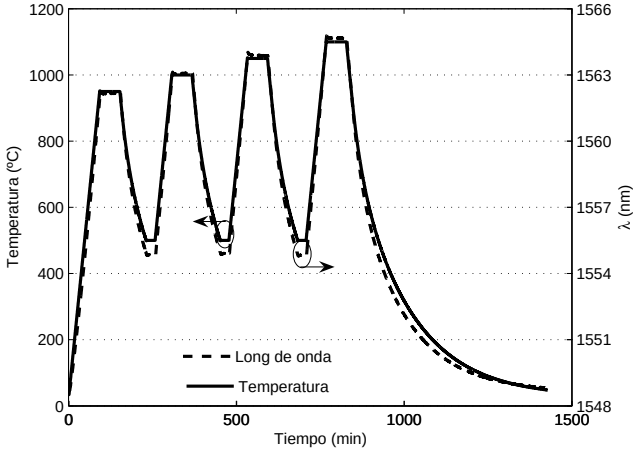


Figura 3.10: Encapsulado B. Ciclo calibración.

La curva de temperaturas propuesta consta de cuatro ciclos. El primer ciclo toma como temperatura objetivo la de regeneración (950°C) y los ciclos siguientes aumentan la

temperatura objetivo de 50ºC en 50°C hasta el cuarto ciclo que alcanza una temperatura de 1100ºC. Se optó por este ciclo de temperaturas porque permitía evaluar en un solo ensayo la capacidad del sensor de ser sometido hasta 1100ºC, siendo esta la máxima temperatura permitida por el horno del ensayo. Las temperaturas máximas de cada ciclo se mantienen durante 60 minutos para garantizar que sea uniforme dentro del horno, obteniendo además mayor cantidad de datos para la calibración.

Para poder realizar la calibración se procede a representar gráficamente la temperatura en función de la longitud de onda y aplicar diferentes tipos de ajustes. La figura 3.11 muestra los datos obtenidos en el ensayo y los ajustes cuadrático y cúbico propuestos. Los dos ajustes propuestos se adaptan a la curva generada por los datos en los ensayos.

Si se focaliza sobre el tramo final de las curvas se puede notar que a partir de los 1000ºC el ajuste cuadrático empieza a alejarse de los datos del ensayo, mientras que el ajuste cúbico se mantiene en correspondencia con los datos del ensayo. A su vez, el ajuste cúbico presenta mejores indicadores estadísticos, como puede verse en la tabla 3.6.

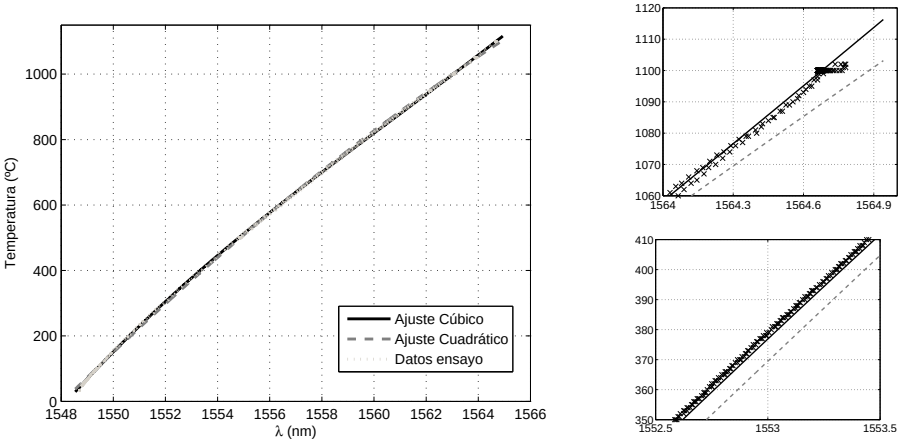


Figura 3.11: Encapsulado B. Polinomios de ajuste cuadrático y cúbico

Tabla 3.6: Encapsulado B. Indicadores estadísticos.

	Ajuste Cuadrático	Ajuste Cúbico
R^2	0.9997	0.9999
RMSE	5.71	2.79

La calibración fue realizada para un sensor que para una temperatura de 34°C tiene una longitud de onda 1548,7 nm. Para poder realizar una comparación entre los diferentes sensores, se ha calculado el polinomio de caracterización para los valores de T_{ref} y λ_{ref} utilizados en la caracterización del sensor con encapsulado A (tabla 3.7).

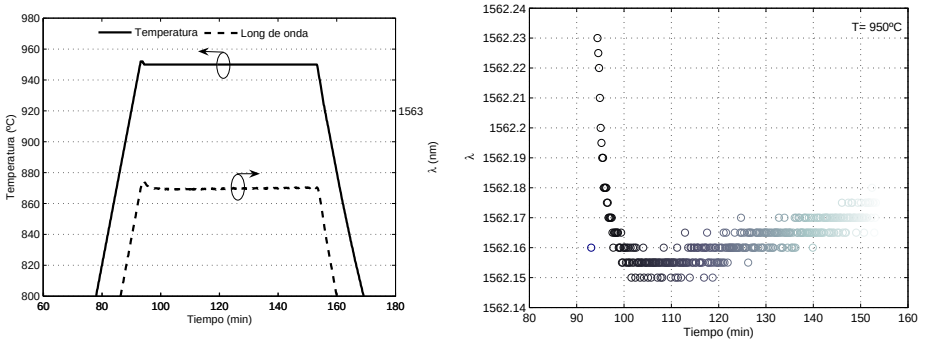
Tabla 3.7: Encapsulado B. Desplazamiento de la curva de calibración

λ_0	T_0	a_3	b_3	c_3	d_3
1548.70	34	0.06164	-288.6	4.505 E+05	-2.345 E+08
1557.30	28	0.06164	-286.9	4.450 E+05	-2.300 E+08

Una vez realizada la calibración, se procede a realizar diversos ciclos de temperatura en el horno MHI para poder alcanzar temperaturas superiores a 1100°C y poder estudiar las temperaturas máximas que puede alcanzar el sensor (ver subsección 3.6.2).

Resulta interesante resaltar que las temperaturas indicadas en las figuras son las registradas por el termopar que se encuentra dentro del horno y no las funciones de temperatura teóricas que se programaron en el horno. En los intervalos donde se le indicó al horno una temperatura constante, tanto la temperatura medida por el termopar como la longitud de onda indican un pequeño pico inicial (figura 3.12a). Esto se debe a que el horno funciona comparando la temperatura de la curva objetivo con la temperatura del termopar de referencia. Por lo tanto, el horno está calentando hasta que detecta que la temperatura medida es mayor a la temperatura objetivo y deja de calentar. Como consecuencia, en un primer momento el horno puede obtener una temperatura objetivo mayor a la programada.

En el resto del intervalo, el termopar refleja un valor de temperatura constante (950°C), mientras que la longitud de onda refleja pequeñas fluctuaciones. Esto indica que el sensor de fibra óptica tiene una mayor sensibilidad a los cambios de temperatura que el termopar. En la figura 3.12 se representan los valores de longitud de onda para los cuales el termopar indica 950°C en función del tiempo. En esta figura se ve claramente que la temperatura del horno no es constante. La longitud de onda refleja un calentamiento inicial del horno, seguido de un enfriamiento y luego pequeños aumentos de temperatura para lograr mantener la temperatura objetivo del intervalo. El tiempo que tarda un sensor en registrar un incremento de temperatura se llama tiempo de respuesta. En el apartado sección 3.9 se evalúan los tiempos de respuesta de los sensores en estudio.



(a) Temperatura y longitud de onda en función del tiempo.

(b) Longitud de onda en función del tiempo para temperatura constante en el termopar

Figura 3.12: Encapsulado B. Detalle mediciones para el ciclo de 950°C

3.5.3 Encapsulado C

En este caso se aplica la misma curva planteada para el encapsulado tipo B. A los fines de calibrar se utilizaron los datos hasta el tercer ciclo, alcanzando temperaturas de 1050°C como se muestran en la figura 3.13, ya que al superar este valor el sensor comienza a fallar. En el apartado sección 3.6 se evalúan las temperaturas máximas que resiste el sensor.

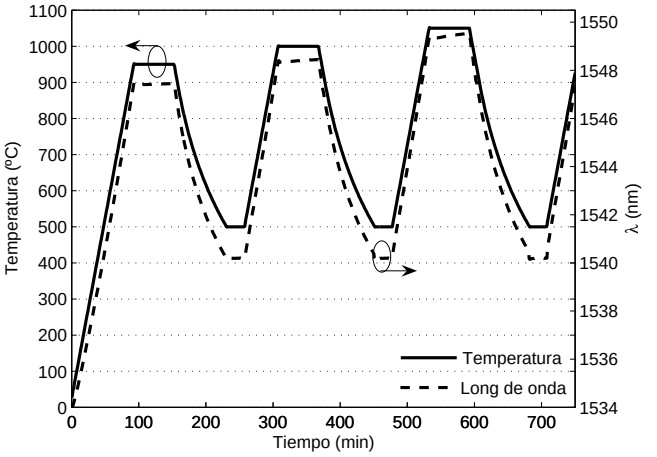


Figura 3.13: Encapsulado C. Ciclo calibración.

En la figura 3.13 se observa que tanto las curvas de calentamiento como las de enfriamiento son repetitivas. Nuevamente, al llegarse a temperaturas elevadas, al horno le cuesta más lograr una temperatura estable. Sin embargo, el termopar registra una temperatura constante mientras que el sensor de fibra óptica capta una pequeña variación de temperaturas. Por otro lado, en los ciclos de enfriamiento, cuando el horno alcanza el intervalo de 500°C constantes se ve que la longitud de onda tiene valores constantes, ya que el horno puede mantener estos rangos de temperaturas sin ningún tipo de dificultad.

Se han evaluado curvas de ajuste polinómicas de grado 2 y de grado 3 (figura 3.14). Se observa que para elevadas temperaturas se obtienen mejores ajustes con curvas polinómicas de grado 3. Calculando los diferentes coeficientes de la curva de ajuste, se obtiene una calibración completa de estos dispositivos en todo su rango de funcionamiento.

En la figura 3.14 se muestran los ajustes cuadrático y cúbico propuestos superpuestos con los datos del ensayo. Gráficamente se nota un buen ajuste en los dos casos, pero se distinguen pequeñas zonas donde el polinomio cúbico se adapta mejor a la curva de los datos, fundamentalmente a temperaturas elevadas. En la tabla 3.8 se muestran los indicadores estadísticos de las curvas de ajuste estudiadas, el ajuste cúbico presenta mejores valores.

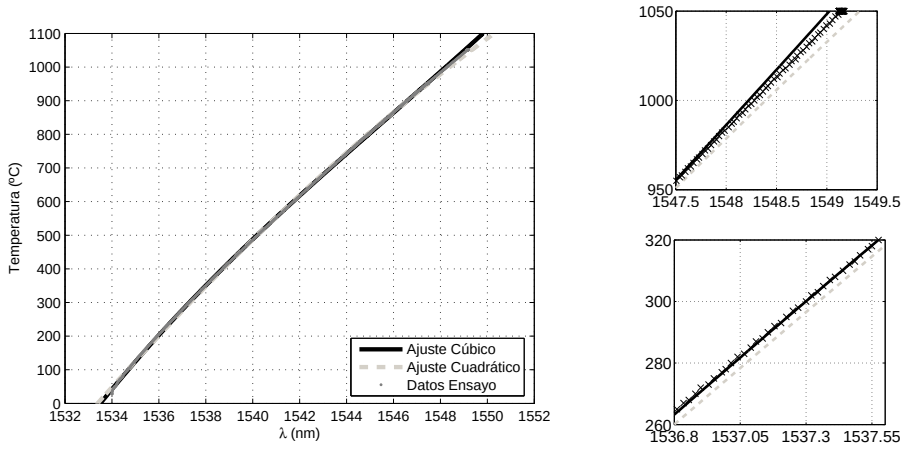


Figura 3.14: Encapsulado C. Polinomios de ajuste cuadrático y cúbico

La calibración estudiada es válida para un sensor con una longitud de onda 1534,01 nm asociados a la temperatura de 28°C. Para poder realizar una comparación entre los diferentes sensores, se ha calculado el polinomio de caracterización para los valores de temperatura y longitud de onda utilizados en la caracterización del sensor con encapsulado tipo A (tabla 3.9).

Tabla 3.8: Encapsulado C. Indicadores estadísticos.

	Ajuste Cuadrático	Ajuste Cúbico
R^2	0.9998	0.9999
RMSE	3.633	2.089

Tabla 3.9: Encapsulado C. Desplazamiento de la curva de calibración

λ_0	T_0	a_3	b_3	c_3	d_3
1534.01	34	0.0557	-258.3	3.994 E+05	-2.058 E+08
1557.30	28	0.0557	-262.21	4.115 E+05	-2.152 E+08

3.5.4 Comparación de las calibraciones

Se comparan gráfica y numéricamente las tres calibraciones estudiadas y de la RFBG sin encapsulado. La figura 3.15 muestra las calibraciones estudiadas en forma superpuesta.

La tabla 3.10 muestra los coeficientes de los polinomios de caracterización de los diferentes encapsulados. Siendo estos polinomios de la forma:

$$T(\lambda) = a_3\lambda^3 + b_3\lambda^2 + c_3\lambda + d_3 \tag{3.4}$$

Se comprueba que los sensores desarrollados tienen comportamientos similares a las RFBGs sin encapsular, siguiendo un comportamiento cúbico fundamentalmente a altas temperaturas.

3.6 Temperaturas máximas y tiempos de exposición estudiados

Para establecer los límites de operación de los sensores desarrollados, en este apartado se evalúa la fluctuación de la potencia y del espectro de las RFBGs para cada encapsulado frente a diversos ciclos de temperatura. A través de estos se determinará el rango de operación para los encapsulados y los tiempos de exposición en los que pueden operar. A continuación, se presentan los ensayos y resultados más representativos para cada sensor estudiado, resaltando las similitudes y diferencias encontradas

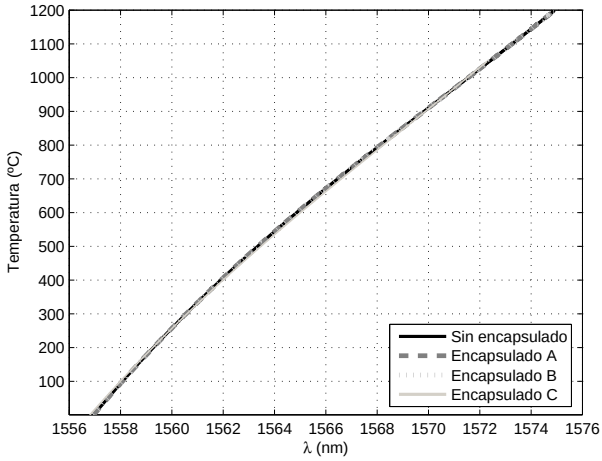


Figura 3.15: Comparación calibraciones

Tabla 3.10: Comparación calibraciones.

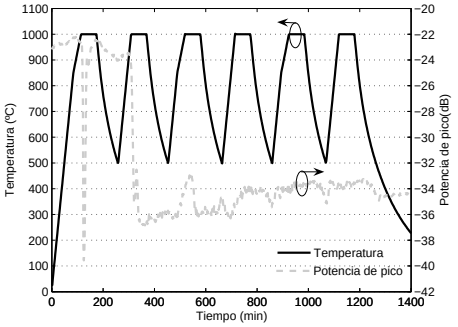
	a_3	b_3	c_3	d_3
Sin encapsulado	0.0575	-271.1	4.259 E+05	-2.231 E+08
Encapsulado A	0.0563	-265.6	4.171 E+05	-2.183 E+08
Encapsulado B	0.06164	-286.9	4.450 E+05	-2.300 E+08
Encapsulado C	0.0557	-262.2	4.115 E+05	-2.152 E+08

3.6.1 Encapsulado A

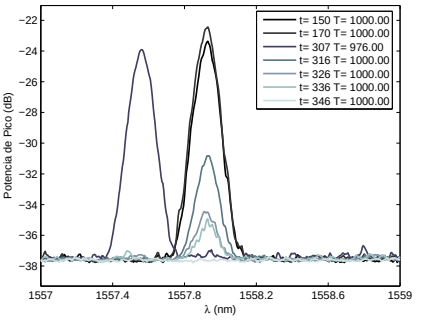
En la figura 3.16 se representa la fluctuación de la potencia de la RFBG en función del tiempo al ser sometida a ciclos sucesivos de temperaturas que alcanzan los 1000°C. En el primer ciclo se distingue un una pérdida de potencia parcial, pero se recupera en forma rápida, lo cual evidencia un empalme de mala calidad pero no una degradación de a la RFBG.

En la figura 3.16b se representan los espectros en un instante de tiempo antes y después de esta pérdida de potencia (t=150 y 170 minutos), donde se ve que el espectro no presenta degradaciones. Sin embargo cuando empieza el segundo ciclo a 1000°C se da una pérdida de potencia no reversible hasta q el espectro desaparece por completo, generando la degradación total del sensor. Cabe destacar que la RFBG sin encapsular

puede resistir temperaturas mayores (1200°C) sin degradarse (Barrera Vilar, 2013), por lo cual se puede deducir que la degradación es originada por el encapsulado.



(a) Evolución de la temperatura y potencia de pico



(b) Evolución del espectro

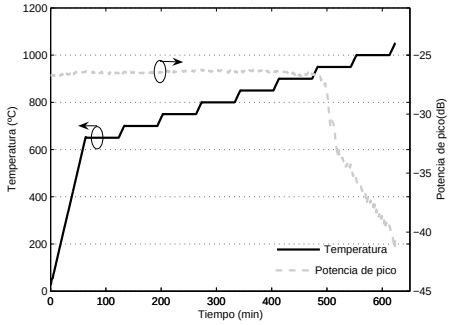
Figura 3.16: Encapsulado A. Evaluación de la temperatura máxima. Ciclo 1

Para el segundo ciclo de temperaturas estudiado (figura 3.17) la potencia no tiene fluctuaciones hasta que se superan los 950°C. Luego de aproximadamente 20 minutos de mantener esta temperatura el espectro se degrada en forma rápida acompañado por un aumento en el nivel de ruido. Si bien el espectro no se borra completamente, su degradación no permite identificar un pico definido con lo cual ya no puede usarse como sensor. La figura 3.17c muestra el proceso de degradación del sensor al mantenerse la temperatura constante a 950°C.

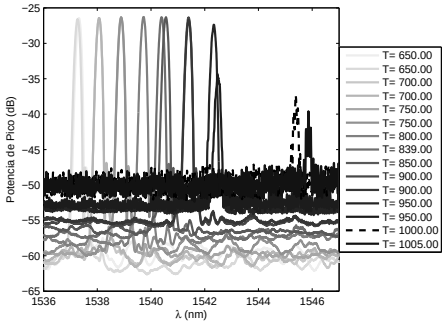
Para comprender mejor el motivo de esta degradación, se extrae la fibra del sensor y se analiza la RFBG con una lupa binocular Leica, modelo MZ APO. La figura 3.18 muestra una imagen de la zona de la RFBG luego de ser sometida al ciclo 2. Se observa una pérdida de sección en la fibra, lo cual explica el origen de la degradación del espectro. A su vez, el color de la fibra se ve alterado y se nota una contaminación de la misma originada por la degradación del material del encapsulado.

El tercer ciclo estudiado evidencia que el sensor puede ser sometido ciclos sucesivos de hasta 800°C sin presentar degradación en su espectro ni sufrir pérdidas de potencia (Fig. 18).

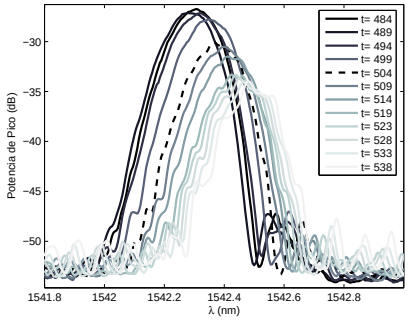
De los resultados obtenidos se puede decir que la temperatura máxima de trabajo en forma permanente del sensor es **800°C**. A su vez en el entorno entre 800 y **1000°C** muestra un buen comportamiento durante tiempos cortos de exposición, siendo su temperatura límite dependiente de su historia de temperaturas.



(a) Evolución de la temperatura y potencia de pico



(b) Evolución del espectro



(c) Espectros en función del tiempo para T=950°C

Figura 3.17: Encapsulado A. Evaluación de la temperatura máxima. Ciclo 2

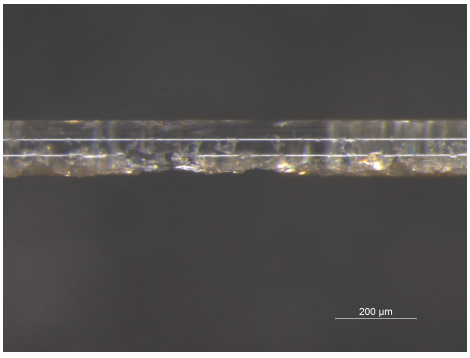
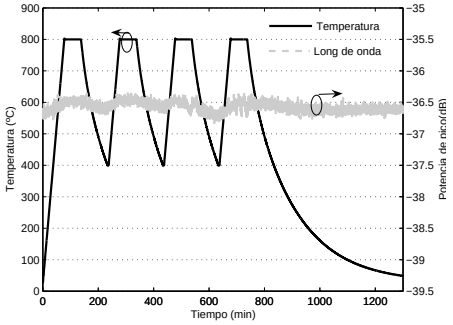
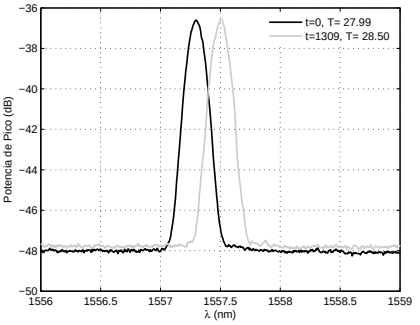


Figura 3.18: Encapsulado A. Observación con lupa de la RFBG degradada



(a) Evolución de la temperatura y potencia de pico

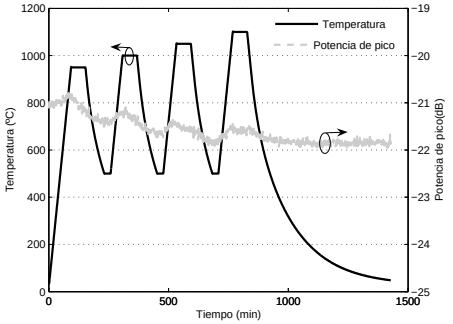


(b) Evolución del espectro

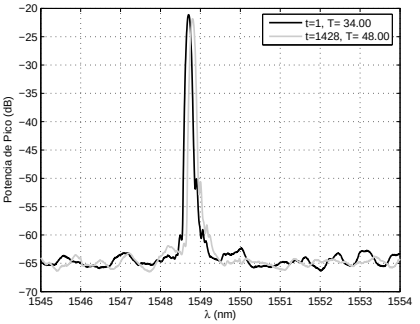
Figura 3.19: Encapsulado A. Evaluación de la temperatura máxima. Ciclo 3

3.6.2 Encapsulado B

A partir de los datos obtenidos con el ciclo de temperatura utilizado en la calibración se representa gráficamente la potencia de pico de la RFBG en función del tiempo y de la temperatura (figura 3.20a). Se puede observar que en los tramos de temperatura ascendente la potencia de pico sufre un pequeño incremento y luego decrece levemente en los intervalos de altas temperaturas. Cuando se deja enfriar la FBG se observa que la potencia de pico se estabiliza.



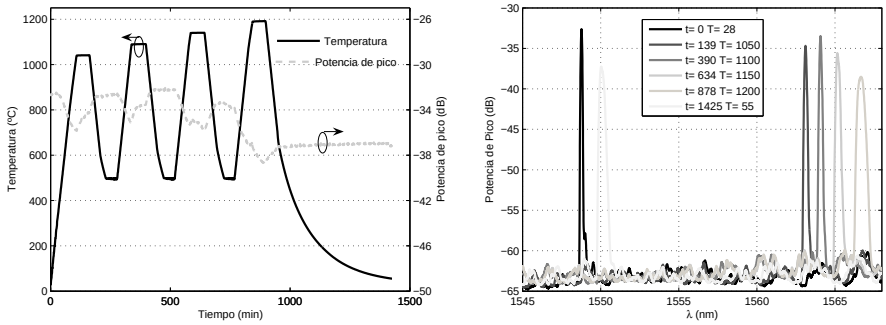
(a) Evolución de la temperatura y potencia de pico



(b) Evolución del espectro

Figura 3.20: Encapsulado B. Evaluación de la temperatura máxima. Ciclo 1

Es importante notar que la variación de potencia luego de los cuatro ciclos es del orden de 1dB, lo cual no es significativo. A su vez, no hay signos de degradación en



(a) Evolución de la temperatura y potencia de pico

(b) Evolución del espectro

Figura 3.21: Encapsulado B. Evaluación de la temperatura máxima. Ciclo 2

el espectro, como puede observar en la figura 3.20b donde se ve que el espectro de la RFBG en el momento inicial del ensayo es similar al espectro luego de los cuatro ciclos y el nivel de ruido también se mantiene constante.

Con el fin de establecer valores máximos ante los cuales puede trabajar el sensor, se aplicaron cuatro ciclos siendo la temperatura máxima del primero 1050°C y luego cada ciclo asciende 50°C más. Este ciclo es llamado Ciclo 2 y sus resultados se muestran en la figura 3.21. En los primeros 3 ciclos se observan pequeñas fluctuaciones en la potencia de la fibra óptica reflejada del orden de 1 dB, siendo esta variación reversible. Sin embargo en el último ciclo que llega hasta 1200°C, se produce una pérdida de potencia no reversible del orden de 3dB.

En la figura 3.21b se puede observar que el espectro mantiene su forma para los distintos valores de temperatura alcanzados. Se nota un pequeño ensanchamiento de la RFBG luego de alcanzar las temperaturas máximas del ensayo asociado a la pérdida de potencia. El nivel de ruido también permanece constante.

De lo expuesto se puede concluir que este sensor es capaz de soportar temperaturas del orden de **1200°C** por lo menos durante una hora. No se han superado los 1200°C en los ensayos debido a que a temperaturas superiores a esta se recomienda utilizar fibras de otros materiales, como por ejemplo fibra de zafiro (Canning et al., 2009).

Finalizado el ensayo, se extrae la fibra del sensor y se analiza la RFBG con la lupa binocular para verificar que la fibra no presente alteraciones. La figura 3.22 muestra una imagen de la zona de la RFBG luego de ser sometida al ciclo 2. No se observan alteraciones en la sección de la fibra ni en el núcleo.

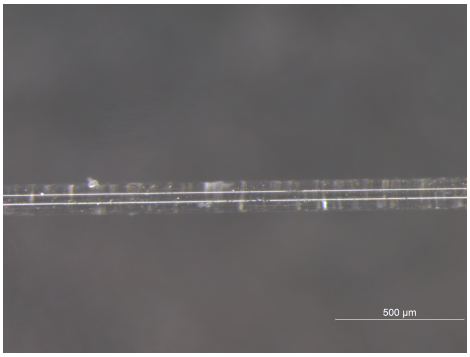
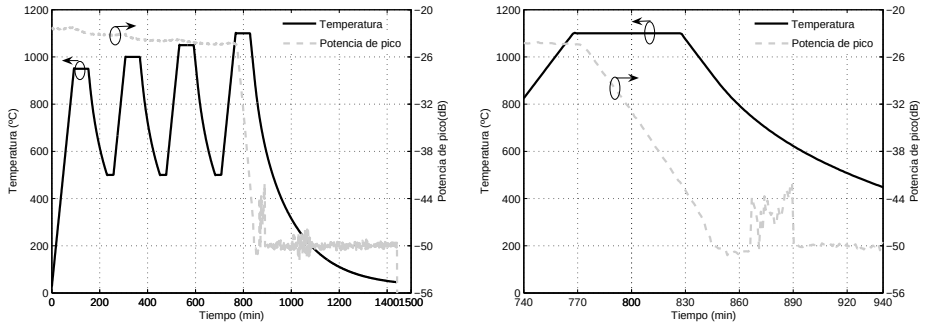


Figura 3.22: Encapsulado B. Observación con lupa de la RFBG

3.6.3 Encapsulado C

Con los datos obtenidos de los sucesivos ciclos de temperatura incrementales utilizados para calibrar el sensor, se gráfica la potencia de pico de la RFBG en función del tiempo y de la temperatura (figura 3.23).

En los tramos de temperatura ascendente la potencia de pico sufre un pequeño incremento y luego decrece levemente en los intervalos de altas temperaturas. Cuando alcanza los 1100°C en el cuarto ciclo se pierden casi 20dB la potencia.

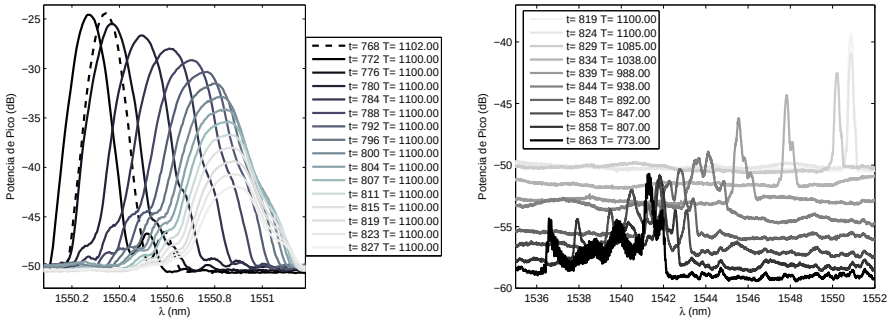


(a) Evolución de la temperatura y potencia de pico

(b) Detalle de pérdida de potencia y degradación del espectro

Figura 3.23: Encapsulado C. Evaluación de la temperatura máxima. Ciclo 1

En la figura 3.24a se muestra la secuencia de los espectros en función del tiempo mientras la temperatura se mantiene a 1100°C. Se observa que los espectros siguen teniendo una buena forma, con un pico definido, pero se evidencia una deformación permanente en el espectro ya que a pesar de tener su temperatura constante la RFBG



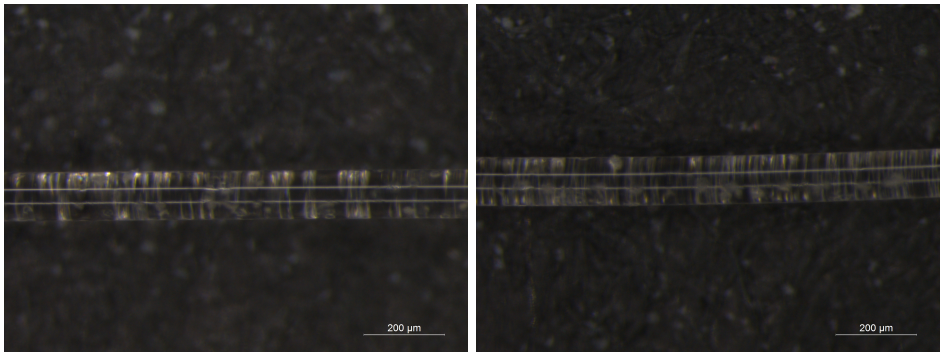
(a) Degradación de la potencia de pico a Temperatura constante

(b) Degradación del espectro en la rama descendente

Figura 3.24: Encapsulado C. Espectros. Ciclo 1

muestra un desplazamiento en longitud de onda importante y una pérdida de potencia. Cuando comienza la etapa de enfriamiento, el espectro comienza a deformarse hasta que se rompe la fibra (figura 3.24b).

Luego del ensayo la RFBG se analiza con una lupa binocular. La figura 3.25 muestra imágenes de la fibra óptica en la zona de la RFBG luego de ser sometida al ciclo estudiado, se observa un estrechamiento de la sección y una deformación permanente.



(a) Estrechamiento de la sección

(b) Deformación permanente

Figura 3.25: Encapsulado C. Observación con lupa de la RFBG

Como se explicó anteriormente estos cambios no ocurren cuando la RFBG está sin encapsulado, por lo cual se puede decir que se deben a la interacción con el encapsulado y que a temperaturas extremas éste comienza a degradarse. De lo expuesto se puede concluir que este sensor es capaz de soportar temperaturas del orden de **1050°C** por lo menos durante una hora.

3.7 Multiplexación

Una de las grandes ventajas de la fibra óptica es su capacidad de multiplexación. Generalmente la multiplexación se realiza a través de empalmes o conexiones entre los sensores al momento de instalarse en la estructura.

En el caso en el que los sensores se encuentren separados por una distancia pequeña se puede evitar el empalme inscribiendo y regenerando las FBGs en el mismo encapsulado. Como resultado se obtiene un encapsulado de mayor longitud que tiene varias RFBGs multiplexadas. Este proceso permite evitar el empalme y facilitar la instalación.

En esta apartado se estudia si es posible regenerar con éxito FBGs que se encuentren multiplexadas. De las diferentes pruebas realizadas regenerando sensores multiplexados en un mismo encapsulado, se concluye que para obtener buenos resultados es imprescindible preparar la fibra, las FBGs y el encapsulado en forma adecuada ya que si no la regeneración de una FBG puede influir sobre la otra.

En la figura 3.26 se representa gráficamente el NLPR de dos FBGs multiplexadas durante sus regeneraciones. Se observa que la regeneración de una no afecta a la otra. La figura 3.27 muestra los espectros de las FBGs multiplexadas antes de regenerarse (t=0) y los espectros luego de las regeneraciones (t=2260min).

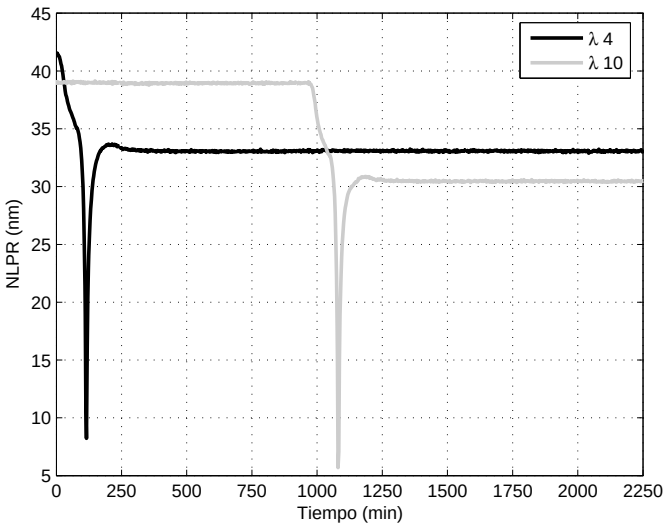


Figura 3.26: NLPR en función del tiempo para dos FBGs multiplexadas en el proceso de regeneración

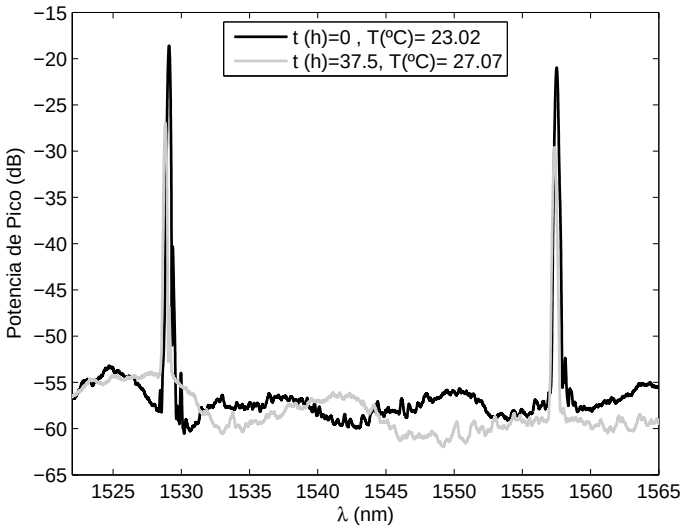


Figura 3.27: Espectros antes y después del proceso de regeneración para dos FBGs multiplexadas

3.8 Conductividad del encapsulado

En el desarrollo del sensor, se le da especial importancia al encapsulado y a las interferencias que este puede realizar en la medición de temperaturas. Dependiendo si el sensor es multiplexado o no y del lugar de donde se instale se obtendrán diferentes configuraciones y esto modificará la longitud del encapsulado.

En los casos donde se tiene un encapsulado con varias RFBG multiplexadas en su interior o cuando el encapsulado se prolonga hasta llegar a zonas de temperaturas bajas, interesa estudiar si el encapsulado altera la medida de las temperaturas debido a la transmisión de calor a lo largo del tubo.

3.8.1 Ensayo experimental

El ensayo experimental se realiza con el encapsulado tipo A para la calibración del modelo numérico. El ensayo consiste en aplicar una rampa de temperatura ascendente a un sector del tubo del encapsulado y observar si la zona que esta fuera del horno se calienta por efecto de la conductividad del tubo.

Se utiliza en horno MHI debido a que permite calentar una zona pequeña del encapsulado. Se programa una rampa de temperatura ascendente desde temperatura ambiente hasta 1000°C con una velocidad de 10°C/min y luego se mantiene esta temperatu-

ra durante 10 horas. Se colocaron las tapas cerámicas en los laterales para aislar la temperatura del interior del horno, garantizando que desde las tapas del horno hacia afuera el encapsulado se encuentre rodeado de aire a temperatura ambiente.

La figura 3.28 muestra un esquema del ensayo. Se coloca en el horno el extremo de un tubo, del mismo material y dimensiones que el encapsulado tipo A, que contiene dos sensores en la zona que se va a mantener a temperatura ambiente. Las RFBGs se encuentran a 35 y 70 cm del centro del horno.

Durante todo el ensayo se registraron los espectros de las RFBGs y los valores de temperatura del horno. Aplicando las calibraciones obtenidas anteriormente se calculan las temperaturas en los puntos situados a 35 y 70 cm de centro del horno. En la figura 3.29 se presenta sobre el eje de la izquierda la temperatura registrada en el centro del horno y en el eje de la derecha se presentan las temperaturas registradas por las RFBGs fuera del horno (a 35 y 70 cm). Se observa que las temperaturas en los puntos medidos fuera del horno se mantienen casi constantes, presentando pequeñas fluctuaciones, que considerando la duración del ensayo pueden entenderse como fluctuaciones de la temperatura ambiente. Es importante remarcar que ambos sensores miden temperaturas similares, lo cual implica que no se ven influenciadas por la temperatura dentro del horno.

Esto permite saber que la presencia de gradientes térmicos a lo largo del encapsulado, no afectan la medida de temperatura que registran los sensores de temperatura desarrollados cuando estos están por lo menos a 35 cm de la fuente de calor.

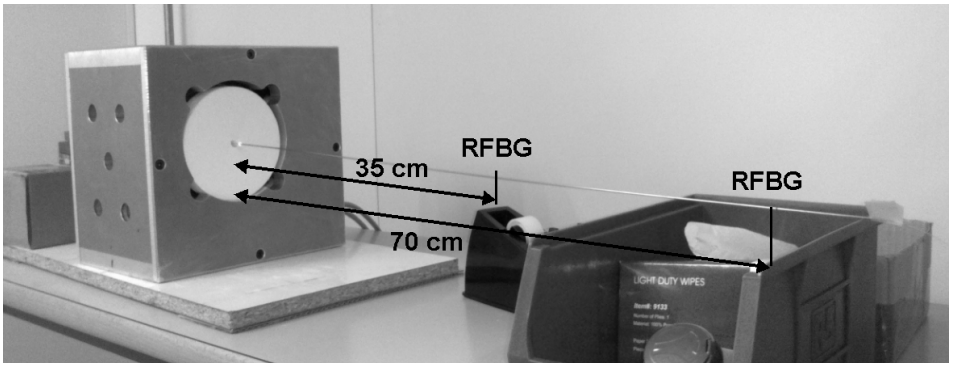


Figura 3.28: Conductividad. Esquema del ensayo

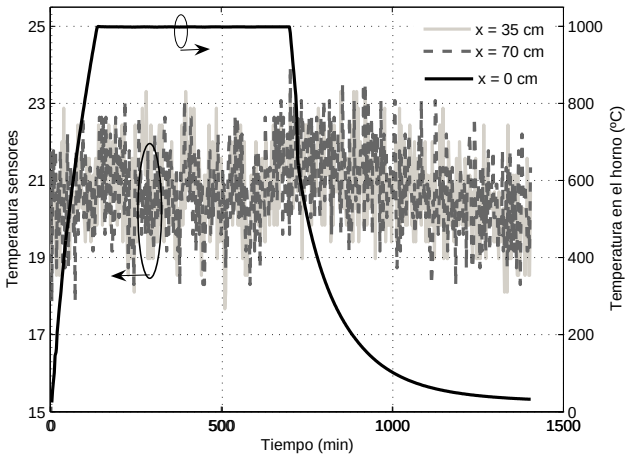


Figura 3.29: Ensayo conductividad. Temperaturas fuera y dentro del horno

3.8.2 Modelo numérico

Para conocer el comportamiento del encapsulado a diferentes distancias del horno ante un fuerte gradiente de temperatura, se plantea un modelo térmico no lineal del ensayo realizado mediante el empleo del software Abaqus (SIMULIA, 2006). El modelo se valida con los puntos de los cuales se tomaron datos. A su vez, como se trabaja con diferentes encapsulados, una vez validado el modelo del encapsulado A se trabaja variando el material del encapsulado.

Encapsulado A

Se modela 90 cm de tubo de encapsulado tipo A, se define la densidad, el calor especifico y la conductividad del material teniendo en cuanta su variación con la temperatura.

Se define una temperatura inicial constante de 20°C a lo largo de todo el tubo. En la zona donde está el horno se aplican condiciones de contorno de transferencia de calor por convección y por radiación, teniendo en cuenta la evolución de la temperatura en función del tiempo dentro del horno.

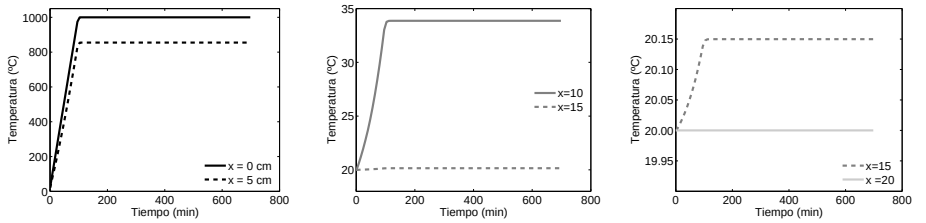
En las caras no expuestas al fuego se aplica una condición de contorno de transferencia de calor por convección con un coeficiente de calor por convección que incluye los efectos de transferencia de calor por radiación de acuerdo con el Eurocódigo (EN 1991-1-2 3.1).

La figura 3.30 muestra la evolución de la temperatura en función del tiempo obtenida por este modelo, para distintas distancias medidas desde el centro del horno. El punto situado en el centro del horno ($x = 0cm$) sigue la curva que se le especificó. A una distancia de 5cm desde el centro del horno (final de la zona calentada), es decir una zona de transición entre la zona calentada y la zona que está a temperatura ambiente, la temperatura es menor que en el centro del horno.

Para los puntos que se encuentran fuera del horno, las temperaturas alcanzadas son del orden de la temperatura ambiente. A 10 cm del horno se alcanzan 34°C con lo cual la temperatura en este punto se ve afectada por el fuerte gradiente de temperatura a lo largo del encapsulado. Mientras que a 15 cm del centro del horno la temperatura prácticamente coincide con la temperatura ambiente y a 20cm del centro del horno la temperatura no se ve afectada por el gradiente en el extremo del tubo. Teniendo en cuenta que la zona calentada es la comprendida entre $x = 0$ y $x = 5cm$ se puede decir que para gradientes de $\Delta T(1000 - 20) = 980°C$ solo 10 cm de encapsulado pueden verse afectados por el efecto de la conductividad en el encapsulado. En la mayoría de las aplicaciones estos fuertes gradientes no se producen en esta corta distancia, con lo cual no representa un problema.

Encapsulado B

Una vez validado el modelo anterior, se usa como base para estudiar el comportamiento del encapsulado tipo B, cambiando las propiedades del material y las características geométricas de tubo. La figura 3.31 representa la evolución de la temperatura de diferentes puntos a partir del centro del horno. Las figuras muestran que dentro del horno se tienen las mismas curvas de temperatura que para el encapsulado tipo A. A distancias de 10 y 15 cm desde el centro del horno se obtienen temperaturas de 140 y 40 °C respectivamente, lo cual muestra que la temperatura se ve incrementada por la



(a) Dentro del horno ($x = 0, x = 5$)

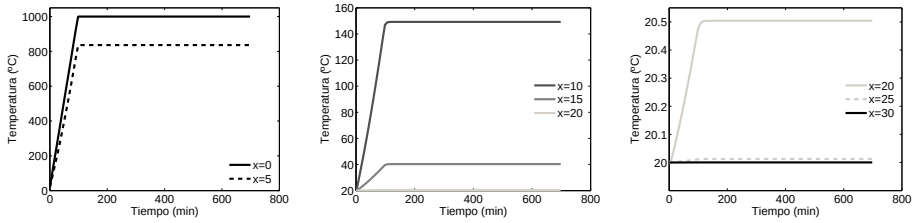
(b) Longitud afectada ($5 < x < 15$)

(c) Longitud no afectada ($x > 15$)

Figura 3.30: Encapsulado A. Transferencia de calor a lo largo del encapsulado para un gradiente de 980°C

conductividad a lo largo del tubo. A distancias mayores de 25 cm del centro del horno la temperatura ambiente se mantiene constante.

El encapsulado tipo B transmite el gradiente de temperatura hasta una distancia mayor debido a que el encapsulado tipo B tiene un mayor diámetro que el encapsulado tipo A.



(a) Dentro del horno $(x = 0, x = 5)$ **(b)** Longitud afectada $(5 < x < 20)$ **(c)** Longitud no afectada $(x > 25)$

Figura 3.31: Encapsulado B. Transferencia de calor a lo largo del encapsulado para un gradiente de 980°C

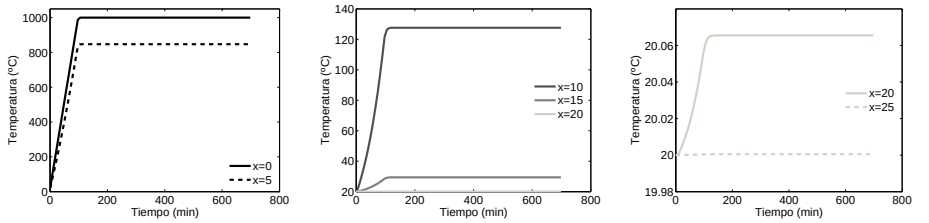
Encapsulado C

Para estudiar el comportamiento del encapsulado C se parte del modelo del encapsulado B y se cambian las propiedades térmicas del material, manteniendo la geometría del modelo.

La figura 3.32 representa la evolución de la temperatura de diferentes puntos a partir del centro del horno. Nuevamente se representa gráficamente las temperaturas en función del tiempo dentro del horno a y a diferentes distancias del centro del horno. Para distancias de 10 y 15 cm se alcanzan temperaturas de 128 y 30 °C respectivamente, siendo estos valores menores que para el encapsulado tipo B (a pesar de tener la misma sección geométrica). Para distancias mayores de 25°C las temperaturas en el encapsulado no se ven afectadas por el gradiente de temperaturas del extremo del encapsulado.

Se está en una situación intermedia entre los casos anteriores. Esto resulta lógico, por tratarse de un material con menor coeficiente de conductividad que el encapsulado tipo B e igual sección y mayor coeficiente de conductividad térmica pero mayor sección respecto al encapsulado tipo A.

En el caso de este encapsulado, por ser dúctil, se entiende que podrán darse aplicaciones multiplexadas en un mismo encapsulado, siendo aconsejable evitar separaciones de las RFBGs menores a los 15 cm ya que en casos de gradientes térmicos importantes podrían dar resultados distorsionados.



(a) Dentro del horno $(x = 0, x = 5)$ **(b)** Longitud afectada $(5 < x < 20)$ **(c)** Longitud no afectada $(x > 25)$

Figura 3.32: Encapsulado C. Transferencia de calor a lo largo del encapsulado para un gradiente de 980°C

3.9 Tiempos de respuesta

El tiempo de respuesta o rapidez de respuesta de un sensor es la capacidad del sensor para seguir las variaciones de la magnitud de entrada (en este caso la temperatura), es decir es el tiempo que el sensor tarda en reaccionar ante una variación de temperatura. Los factores que más influyen en este parámetro son la masa del sensor, las propiedades térmicas del mismo y el gradiente de temperatura.

El tiempo de respuesta es muy importante debido a que en aplicaciones donde ocurren variaciones de temperaturas en escalas de tiempo menores al tiempo de respuesta, pueden presentarse errores instantáneos significativos si el sensor no fue elegido apropiadamente. A pesar de la importancia de este parámetro, en la búsqueda bibliográfica no fue posible encontrar una normativa que regule el ensayo de tiempo de respuesta para sensores ópticos de temperatura.

Se ha encontrado solamente un acuerdo del Grupo Europeo de Organización de los ensayos de fuego (EGOLF, European Group of Organizations for Fire Testing), que fija las pautas para determinar el tiempo de respuesta de termopares para ser utilizados para la medida de temperatura del gas en ensayo de reacción de fuego (EGOLF, 2008). Este acuerdo define al tiempo de respuesta de un termopar como el tiempo que tarda en registrar un 63,2 % de la diferencia entre la temperatura inicial y final. A su vez establece que debe calcularse en la fase de enfriamiento del ensayo y que la temperatura del horno al inicio del ensayo debe ser de 700°C.

Por otro lado algunas marcas comerciales de termopares, como por ejemplo *RDC Control*, aplican la misma definición que EGOLF, pero utilizan incrementos de temperatura desde temperatura ambiente a 100°C y calculan un tiempo de respuesta para la fase de calentamiento y otro para la de enfriamiento.

La ausencia de una normativa, dificulta la posibilidad de comparar resultados con otros sensores existentes. Por este motivo se fijó una metodología de ensayo que se basa

fundamentalmente en EGOLF, 2008 y se calcularon experimental y numéricamente los tiempos de respuesta para los tres sensores desarrollados.

Se plantea el estudio del tiempo de respuesta en dos fases. En la primera fase se determina el tiempo de respuesta para cada sensor en forma experimental; en la segunda, se obtienen los tiempos de respuesta resolviendo el problema de transferencia de calor empleando los resultados de la fase 1 para la calibración del modelo numérico.

En el **ensayo de tiempo de respuesta**, se calienta el horno a la temperatura objetivo (T_{obj}) y se espera hasta que el horno estabilice su temperatura. Se utiliza el horno Carbolite, ya que mantiene la temperatura constante y su mayor longitud garantiza que el sensor esté en la zona del horno con la temperatura objetivo. Una vez alcanzada esta temperatura se introduce en forma rápida el sensor dentro del horno y se deja hasta que se estabilice su temperatura. Se registra en todo momento la temperatura del sensor. Luego se saca el sensor en forma rápida del horno y se deja enfriar al aire a temperatura ambiente (T_a).

La figura 3.33 muestra este proceso y esquematiza la definición de tiempo de respuesta para la fase de calentamiento y enfriamiento.

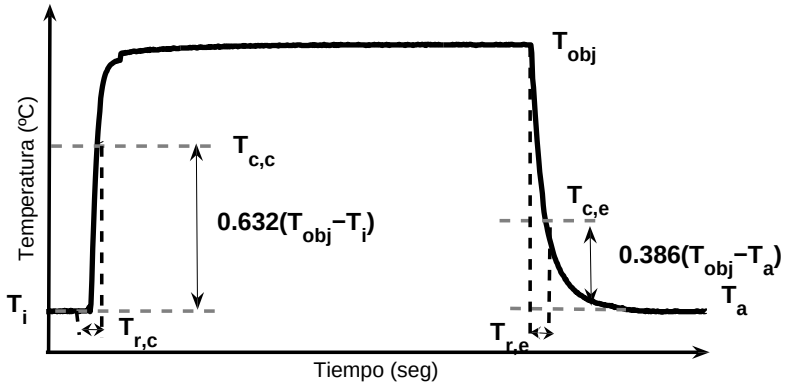


Figura 3.33: Tiempo de Respuesta. Definiciones

Se calcula el tiempo de respuesta como el $63,2\,\%$ del tiempo que tarda el sensor para responder a un cambio de temperatura desde un valor inicial a un valor final. Por lo tanto el tiempo de respuesta para la etapa de calentamiento ($T_{r,c}$) se calcula como el tiempo que tarda el sensor en alcanzar la temperatura crítica de calentamiento ($T_{c,c}$) definida por la siguiente ecuación:

$$T_{c,c} = 0,632(T_{obj} - T_i) + T_i \tag{3.5}$$

Donde T_i es la temperatura al inicio del ensayo. El tiempo de respuesta para la etapa de enfriamiento ($T_{r,e}$) se calcula como el tiempo que tarda el sensor en alcanzar la temperatura crítica de enfriamiento ($T_{c,e}$), estando está definida por la siguiente expresión:

$$T_{c,e} = (1 - 0,632)(T_{obj} - T_a) \tag{3.6}$$

El ensayo se repite al menos dos veces para cada sensor y por intervalo de temperatura estudiado. Se estudian experimentalmente las temperaturas objetivo de 100, 200, 300 y 400°C.

Para el **modelo teórico** de transferencia de calor para determinar el tiempo de respuesta se plantean como hipótesis que el tiempo que tarda la fibra en responder es despreciable frente al tiempo que tarde el calor en transferirse de la superficie exterior del encapsulado al interior. Se asume que la resistencia interna del encapsulado es despreciable (emisividad infinita) y temperatura constante en el encapsulado, por tanto se puede asumir un modelo de trasferencia de calor cero dimensional.

Los parámetros que entran en el modelo son:

- Espesor del encapsulado, e
- Masividad, $m = \dfrac{1}{e}$
- Calor específico del material del encapsulado, c
- Coeficiente de transferencia de calor por convección, α_c
- Densidad del material, ρ
- Emisividad resultante, ϵ. Obtenida como el producto de la emisividad del fuego por la emisividad del material
- Constante de Stephan- Bolzman, κ
- Temperatura del gas T_g. Función definida por la temperatura inicial T_i, Temperatura objetivo T_{obj} y el intervalo de tiempo que se tarda en colocar el sensor dentro del horno Δt_h

Partiendo de la definición de flujo neto de calor, $\dot{h}_{net}$, el incremento de temperatura en el espesor del encapsulado, ΔT_m, puede definirse como:

$$\Delta T_m = \frac{m.\dot{h}_{net}.\Delta t}{c.\rho} \tag{3.7}$$

Donde $\dot{h}_{net}$ se puede escribir como:

$$\dot{h}_{net} = (\Phi\epsilon\kappa[(T_g + 273)^4 - (T_m + 274)^4] + \alpha_c(T_g - T_m)).\Delta t \tag{3.8}$$

Reemplazando la Ecuación 3.8 en la Ecuación 3.7 se obtiene:

$$\Delta T_m = \frac{m}{c.\rho}(\Phi\epsilon\kappa[(T_g + 273)^4 - (T_m + 274)^4] + \alpha_c(T_g - T_m)).\Delta t \tag{3.9}$$

Por lo tanto la curva de temperatura en función del tiempo se obtendrá resolviendo la siguiente ecuación:

$$T_m(t + \Delta t) = T_m(t) + \Delta T_m \tag{3.10}$$

Conocida $T_m(t)$ se pueden calcular los tiempos de respuesta.

3.9.1 Encapsulado A

La figura 3.34 muestra los resultados obtenidos en los ensayos experimentales y teóricos para el encapsulado A para las temperaturas objetivo estudiadas para la fase de calentamiento. En las gráficas las líneas continuas representan las curvas de transferencia de calor obtenidas con el modelo teórico, las líneas de trazo representan la temperatura crítica donde se alcanza el $63,2\,\%$ del incremento de temperatura y los puntos representan los datos obtenidos experimentalmente.

La figura 3.35 muestra los resultados obtenidos en los ensayos experimentales y teóricos para en encapsulado A para las temperaturas objetivo estudiadas para la fase de enfriamiento desde las temperatura objetivo a temperatura ambiente.

Las figuras muestran un muy buen ajuste entre el modelo numérico y los resultados de los ensayos. A su vez se evidencia que el tiempo de respuesta depende del incremento de temperatura, tanto para la fase de calentamiento como en la de enfriamiento.

Los valores de tiempo de respuesta obtenidos son mayores en la fase de enfriamiento que en la de calentamiento.

3.9.2 Encapsulado B

La figura 3.36 muestra los resultados obtenidos en los ensayos experimentales y teóricos para en encapsulado B para las temperaturas objetivo estudiadas para la fase de calentamiento. Al igual que en Encapsulado A, las líneas continuas de las gráficas representan las curvas de transferencia de calor obtenidas con el modelo teórico, las líneas

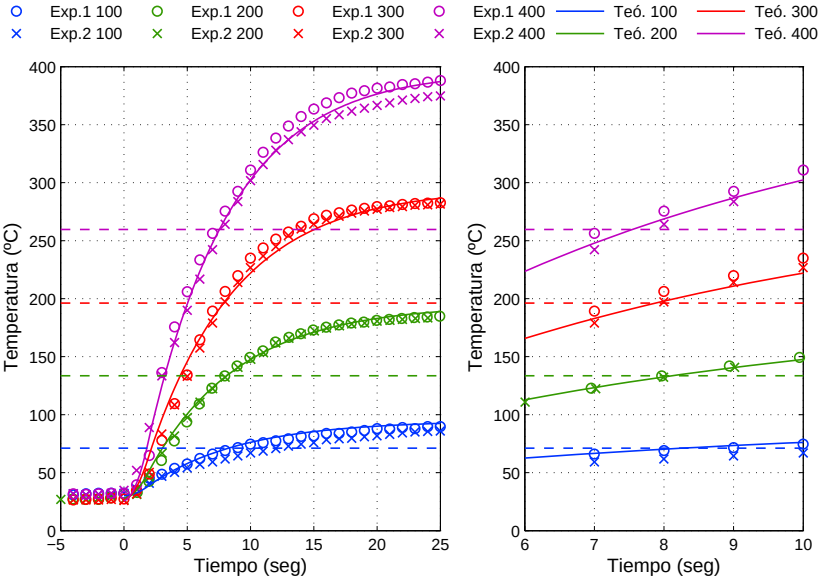


Figura 3.34: Tiempo de respuesta experimentales y teóricos para Temperaturas objetivo 100, 200, 300 y 400 en la fase de calentamiento. Encapsulado A

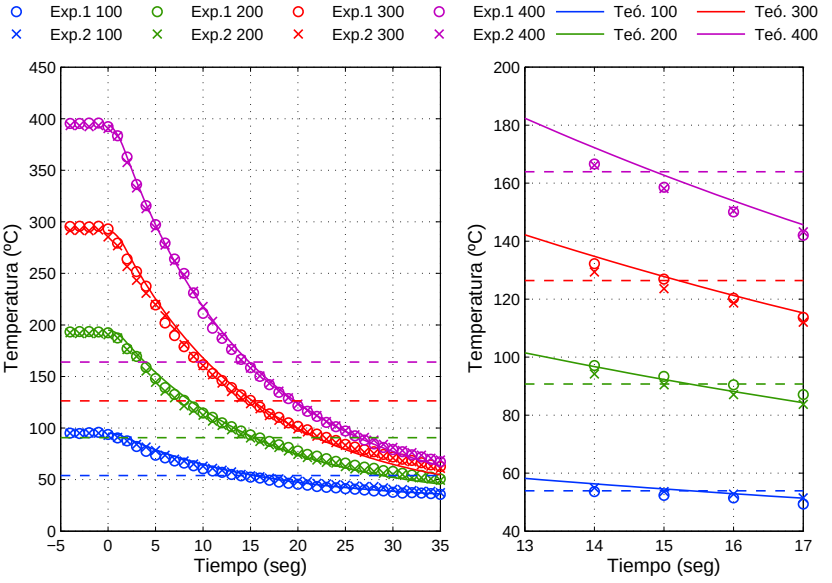


Figura 3.35: Tiempo de respuesta experimentales y teóricos para Temperaturas objetivo 100, 200, 300 y 400 en la fase de enfriamiento. Encapsulado A

de trazo representan la temperatura crítica donde se alcanza el $63,2\,\%$ del incremento de temperatura y los puntos representan los datos obtenidos experimentalmente.

La figura 3.37 muestra los resultados obtenidos en los ensayos experimentales y teóricos para en encapsulado B para las temperaturas objetivo estudiadas para la fase de enfriamiento desde las temperatura objetivo a temperatura ambiente.

3.9.3 Encapsulado C

La figura 3.38 muestra los resultados obtenidos en los ensayos experimentales y teóricos para en encapsulado C para las temperaturas objetivo estudiadas para la fase de calentamiento.

Al igual que en Encapsulado A, las líneas continuas de las gráficas representan las curvas de transferencia de calor obtenidas con el modelo teórico, las líneas de trazo representan la temperatura crítica donde se alcanza el $63,2\,\%$ del incremento de temperatura y los puntos representan los datos obtenidos experimentalmente.

La figura 3.39 muestra los resultados obtenidos en los ensayos experimentales y teóricos para en encapsulado C para las temperaturas objetivo estudiadas para la fase de enfriamiento desde las temperatura objetivo a temperatura ambiente.

3.9.4 Comparación de los resultados

A continuación se compararan los resultados obtenidos para los tres encapsulados. Como se observó que los tiempos de respuesta disminuyen a medida que aumenta la temperatura, se comparan los resultados a la temperatura de objetivo de 100°C, tanto para calentamiento como para enfriamiento.

Tabla 3.11: Resumen tiempos de respuesta [seg.] para $T_{obj} = 100$

Encapsulado	Calentamiento	Enfriamiento
A	8,2	15,4
B	20,1	38,7
C	24,2	43,9

La tabla 3.11 resume los tiempos de respuesta para calentamiento y enfriamiento para los 3 encapsulados estudiados para la temperatura objetivo de 100°C. Resulta evidente que el encapsulado tipo A es el que presenta mejores tiempos de respuesta, lo cual se debe a que es el que menor espesor tiene y a las propiedades térmicas de su material.

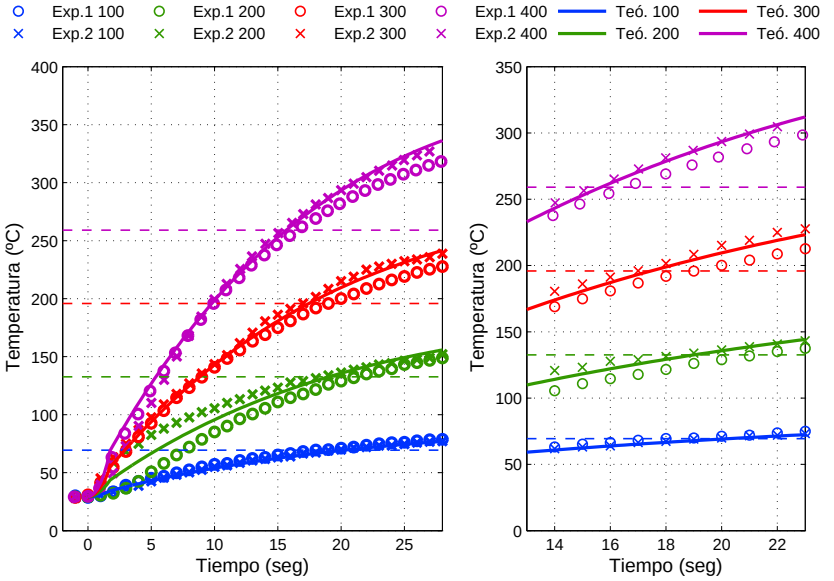


Figura 3.36: Tiempo de respuesta experimentales y teóricos para Temperaturas objetivo 100, 200, 300 y 400 en la fase de calentamiento. Encapsulado B

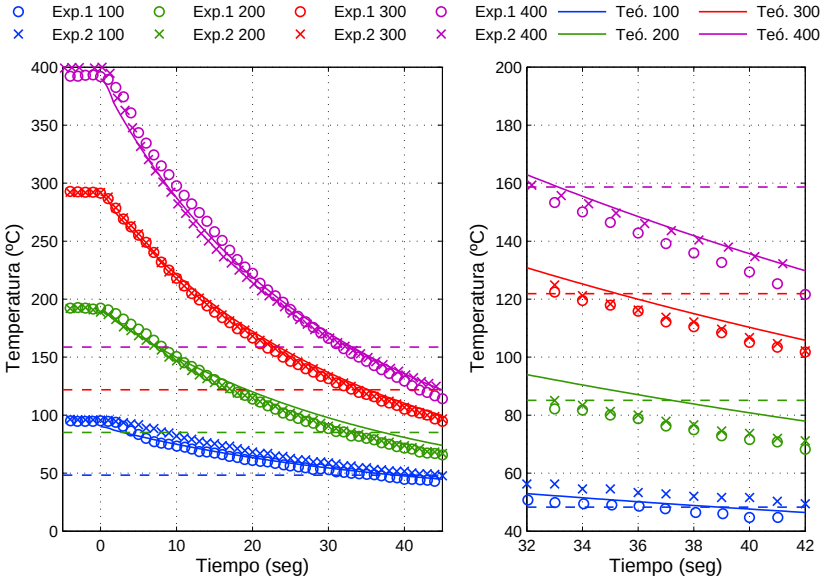


Figura 3.37: Tiempo de respuesta experimentales y teóricos para Temperaturas objetivo 100, 200, 300 y 400 en la fase de enfriamiento. Encapsulado B

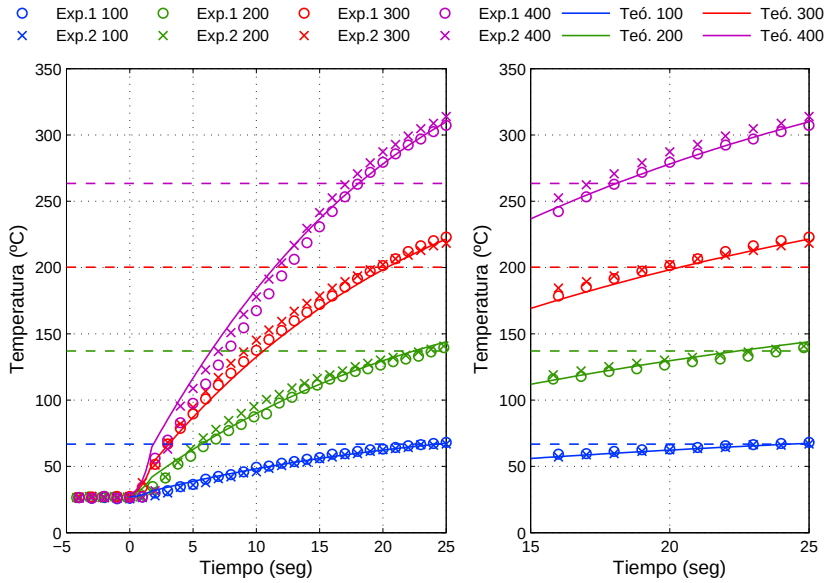


Figura 3.38: Tiempo de respuesta experimentales y teóricos para Temperaturas objetivo 100, 200, 300 y 400 en la fase de calentamiento. Encapsulado C

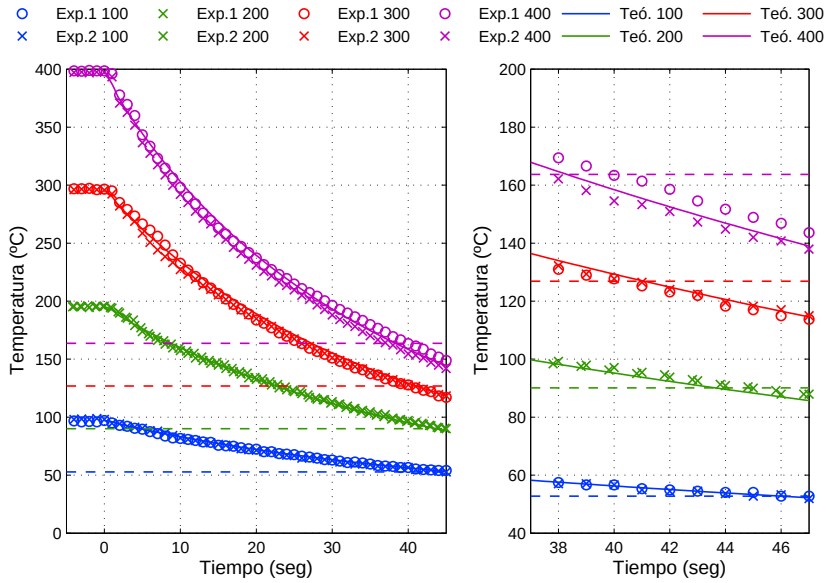
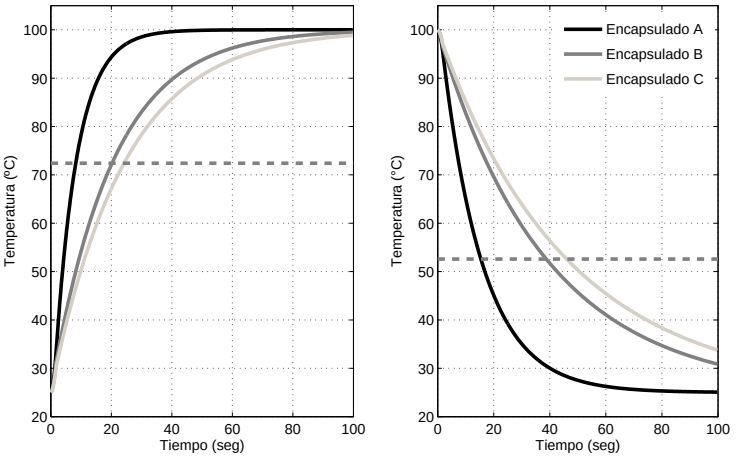


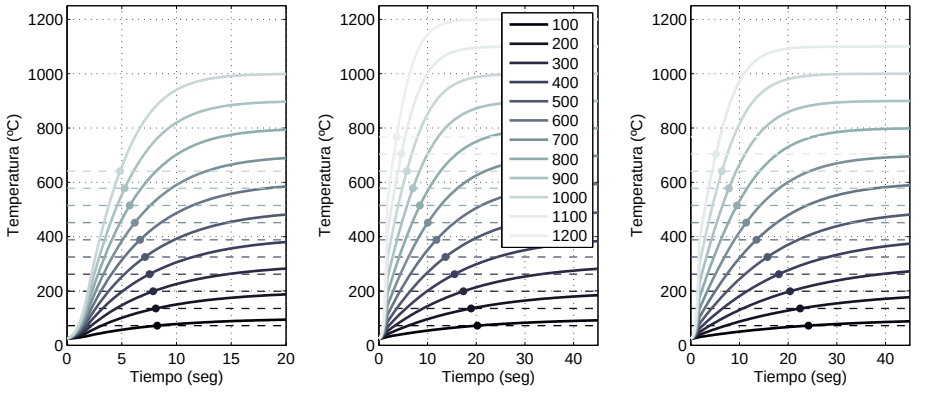
Figura 3.39: Tiempo de respuesta experimentales y teóricos para Temperaturas objetivo 100, 200, 300 y 400 en la fase de enfriamiento. Encapsulado C



(a) Calentamiento **(b)** Enfriamiento

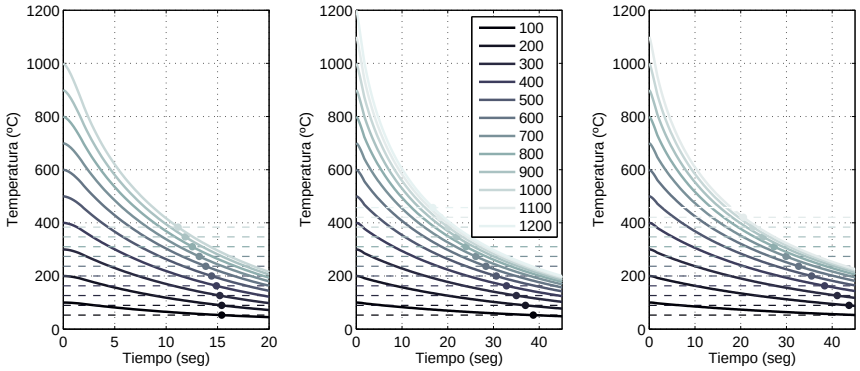
Figura 3.40: Comparación de Tiempos de respuesta para Temperatura objetivo de 100°C

Finalmente las figuras 3.41 y 3.42 muestran los resultados de las simulaciones numéricas para intervalos incrementares de a 100°C para temperaturas desde 100°C hasta 1000°C para el encapsulado A, 1200°C para el encapsulado B y hasta 1100°C para el encapsulado C. En la figura el punto representa el tiempo de respuesta para cada Temperatura objetivo.



(a) Encapsulado A **(b)** Encapsulado B **(c)** Encapsulado C

Figura 3.41: Tiempos de respuesta para fase de calentamiento teóricos para los tres encapsulados para temperaturas objetivos de 100 a 1200 °C



(a) Encapsulado A **(b)** Encapsulado B **(c)** Encapsulado C

Figura 3.42: Tiempos de respuesta para fase de enfriamiento teóricos para los tres encapsulados para temperaturas objetivos de 100 a 1200 °C

En el capítulo 4, la figura 4.19 y la tabla 4.3 de la subsección 4.4.4 comparan el tiempo de respuesta del sensor óptico con encapsulado A con el del termopar utilizado en el ensayo de fuego presentado en la sección 4.4. Los resultados muestran que los sensores ópticos tienen tiempos de respuesta menores.

3.10 Conclusiones

En este capítulo se han desarrollado encapsulados para sensores de altas temperaturas resultando tres tipos de sensores. Dentro de las ventajas de los sensores desarrollados destaca la capacidad de multiplexación, la escasa conductividad y los reducidos tiempos de respuesta.

Los sensores desarrollados permiten alcanzar distintas temperaturas máximas. La elección de uno u otro sensor dependerá de la aplicación y de las condiciones que rodeen al sensor.

Es de remarcar que el encapsulado tipo A, a pesar de tener una temperatura máxima menor que los otros, es el más flexible y el que tiene un menor costo, lo cual hace que pueda ser conveniente para determinadas aplicaciones, por ejemplo para ser embebido dentro de estructuras de hormigón ya que generalmente no se superan los 800°C en el interior del hormigón.

Por otro lado el encapsulado tipo B, es el que presenta mayor capacidad para repetir ciclos y alcanzar mayores temperaturas. Se puede decir que es el que menor influencia

ejerce sobre la RFBG, sin embargo su encapsulado es frágil, lo cual limita su aplicación al caso de contextos muy hostiles, como por ejemplo donde haya excesivas vibraciones.

El encapsulado tipo C, prácticamente combina las ventajas del A y el B, ya que es un material relativamente flexible pero es capaz de medir hasta 1050°C sin presentar signos de degradación, lo cual amplía sus posibilidades de aplicación. Sin embargo este tipo de encapsulado es el más caro.

En el capítulo siguiente se muestran aplicaciones de los sensores a casos de fuego directo y se valida su comportamiento mediante la comparación de sus resultados con los de termopares.

Capítulo 4

Validación del sensor en ensayos de fuego

4.1 Introducción

En los últimos años se han desarrollado dispositivos ópticos capaces de medir altas temperaturas (ver subsección 2.3.4) sin embargo las referencias bibliográficas muestran su aplicación solamente en condiciones de ensayos de laboratorio con hornos eléctricos. Estas condiciones son muy distintas a las condiciones de escenarios de fuego reales o a las de ensayos de fuego normalizadas.

A pesar de las ventajas que presentan los sensores de fibra óptica, su aplicación en el campo de las altas temperaturas se encuentra limitado. Lönnermark et al. (2008) presentaron la primera aplicación de sensores de temperatura basados en FBG para medir la temperatura del gas en un ensayo de fuego de un modelo a escala reducida de un túnel. En este ensayo los sensores alcanzaron los 250°C. Otro trabajo pionero es el de Bueno et al. (2011) quién ensayó probetas de hormigón a fuego con sensores basados en FBGs y RFBGs embebidos en hormigón, que alcanzaron los 600°C.

Este capítulo presenta aplicaciones de los sensores desarrollados en ensayos de fuego sometidos a la curva ISO 834 (ISO, 1975) instalados en superficies metálicas y de hormigón y embebidos en hormigón. También se plantea la necesidad de un cableado adecuado y se brindan posibles soluciones de cableado y recomendaciones para la instalación de los sensores.

La aplicación de los sensores desarrollados en ensayos de fuego es un paso muy importante para su futura aplicación en la monitorización de temperaturas en condiciones de

fuego, ya que se expone a los sensores a llama directa y a gradientes de temperaturas del orden de 200°C/min siendo estas condiciones similares a las de un incendio real.

Los ensayos de fuego se realizaron en las instalaciones del Laboratorio de Resistencia al Fuego del Instituto Tecnológico de la Construcción (AIDICO) de Valencia.

4.2 Cableado

El cableado consiste en la unión entre el sensor y el sistema de adquisición de datos (interrogador) o la unión entre sensores. La utilización de sensores de fibra óptica supone la ventaja de utilizar un sistema de cableado pasivo compuesto básicamente por cables de fibra óptica que no podrán ser la causa inicial del fuego, ni presentarán riesgo de descargas.

En caso de incendio, el sistema de cableado debe ser capaz de no propagar el incendio y de mantener la comunicación a pesar del aumento de temperatura, presencia de llamas, etc. Existen diferentes normativas referentes a las condiciones que deben cumplir los cables de fibra óptica durante un incendio, entre ellas se puede mencionar: UNE–EN 60332-1-2 (2005) (No propagación de llama); UNE–EN 60332-3-22 (2009) (No Propagación del Incendio) y UNE–EN 50268-2 (2000) (Baja Emisión de Humos). Existen cables comerciales que cumplen estas normativas como los que ofrecen Prysmian group (*Prysmian Draka Cables*) o Brand Rex (*Brand Rex*).

4.2.1 Ensayos de cableado

A los fines prácticos, para poder instalar los sensores desarrollados en ensayos de fuego de laboratorio se utilizaron tubos de acero inoxidable de diferentes diámetros como elementos protectores del cableado de la fibra óptica. Paso previo, se realizaron ensayos simples para evaluar su comportamiento como elementos protectores de la fibra óptica.

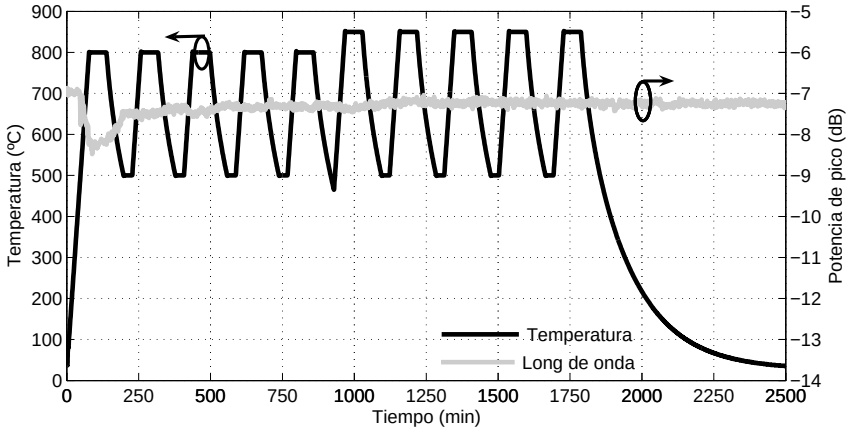
El ensayo consiste en colocar dentro del horno Carbolite (ver sección 3.3) el tubo de acero inoxidable en estudio con una fibra óptica en su interior. En uno de los extremos de la fibra (fuera del horno) se coloca una FBG de referencia para poder monitorizar su potencia y la llegada de señal hasta ésta cuando en la zona dentro del horno se desarrolla el ciclo de temperatura.

Se realiza el ensayo con dos ciclos de temperaturas:

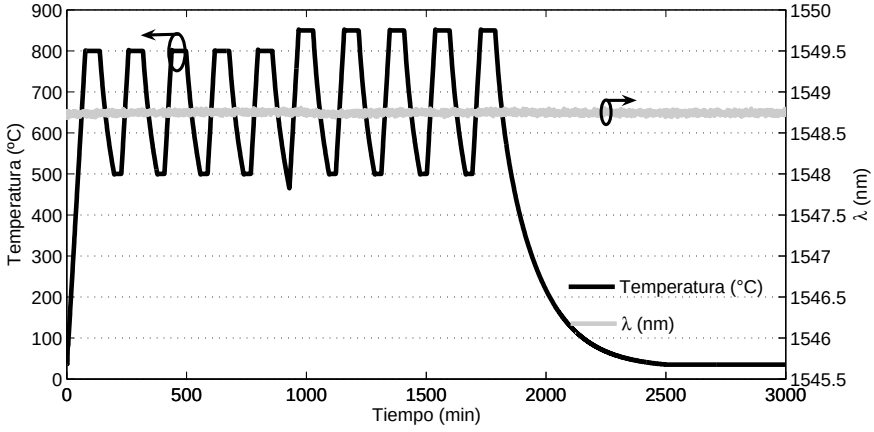
- **Ciclo 1.** Se aplican cinco ciclos entre 500°C y 800°C manteniendo las temperaturas máximas una hora por ciclo, seguidos de cinco ciclos entre 500°C y 850°C. La elección de este ciclo se debe a que el sensor tipo A tiene 800°C como temperatura máxima en su uso prolongado (ver 3.6.1).

- **Ciclo 2.** Consta de ciclos de temperatura entre 500ºC y 900ºC manteniéndolos una hora cada uno. El objetivo de este ciclo es alcanzar temperaturas del orden de las que se alcanzan con la curva ISO 834 tras una hora de ensayo.

Los resultados del **ciclo 1** se muestran en la figura 4.1 y los del **ciclo 2** en la figura 4.2.



(a) Evolución de la Temperatura y la potencia de pico en función del tiempo



(b) Evolución de la Temperatura y la longitud de onda en función del tiempo

Figura 4.1: Resultados del ensayo de cableado. Ciclo 1

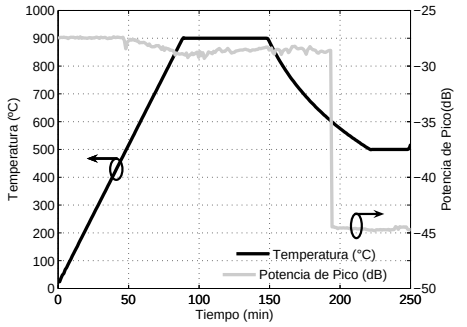
La figura 4.1a muestra la evolución de la temperatura y la potencia de pico en función del tiempo para el **ciclo 1**. Se observa una pérdida de potencia inicial del orden de 1,5 dB durante el primer ciclo de temperatura, seguida de una recuperación de la misma dejando solo una pérdida permanente de 0,5 dB. Luego del tercer ciclo la potencia de

pico se mantiene prácticamente constante. Además, no se observan variaciones en la forma del espectro ni un aumento en el nivel de ruido.

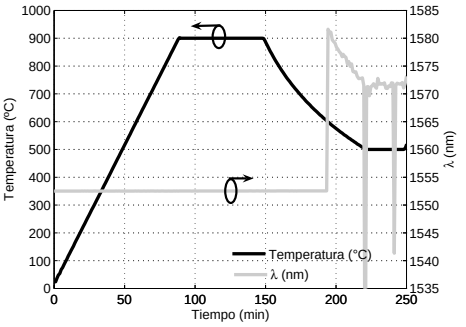
En la figura 4.1b se puede apreciar que la longitud de onda se mantiene casi constante, presentando una fluctuación mínima debida a que la FBG de referencia se encuentra muy saturada, no habiendo un máximo definido. Debe tenerse en cuenta que la duración del ensayo fue de casi dos días, lo que implica la existencia de una fluctuación de la temperatura ambiente y la captación de la misma por la FBG. Es importante remarcar, que la variación de longitud de onda solo puede deberse a algo que ocurra en las inmediaciones de la FBG y que lo que este antes de ella solo puede generar un deterioro de señal (atenuación del pico o aumento de nivel de ruido) pero no un desplazamiento en longitud de onda.

La figura 4.2a muestra la evolución de la temperatura y la potencia de pico en función del tiempo para el **ciclo 2** (se muestran los resultados del primer ciclo solamente). Se observa una pérdida de potencia gradual al superarse los 500°C que se estabiliza cuando la temperatura empieza a ser constante. La pérdida de potencia irreversible luego de permanecer durante una hora a 900°C es del orden de 2 dB.

En el proceso de enfriamiento se evidencia claramente una rotura de la fibra cuando se llega a los 600°C. Esto se debe a que el recubrimiento se pega al tubo durante la fase de calentamiento, impidiendo el libre desplazamiento de la fibra durante la fase de enfriamiento y al querer contraerse se rompe. La rotura de la fibra se evidencia también en la gráfica de evolución de longitud de onda (figura 4.2b). El espectro mantiene su forma hasta que se pierde por completo, debido a la rotura de la fibra que se encuentra antes que él.



(a) Evolución de la Temperatura y la potencia de pico en función del tiempo



(b) Evolución de la Temperatura y la longitud de onda en función del tiempo

Figura 4.2: Resultados del ensayo de cableado. Ciclo 2

4.2.2 Conclusiones de los ensayos

De los ensayos realizados se puede concluir que el cableado es parte fundamental de la instalación de los sensores debido a que la elección del cableado condiciona la transferencia de datos.

Los cableados estudiados en laboratorio realizaron su función adecuadamente durante ciclos sucesivos de temperaturas de hasta 900°C. Para temperaturas de hasta 950°C el cableado demostró ser capaz de ejercer su función hasta la fase de enfriamiento.

Debido a que los ensayos de fuego se han planificado con la curva ISO 834 que tiene solo un ciclo de calentamiento, se considera adecuado utilizar el tubo estudiado como cableado.

4.3 Aplicación a probetas de hormigón sometidas a fuego

En esta sección se presenta la aplicación de los sensores desarrollados para medir la temperatura en un ensayo de fuego bajo la curva ISO-834 (ISO (1975)) durante una hora. En este ensayo se instalaron sensores con diferentes tipos de encapsulados sobre la superficie de dos probetas de hormigón (de 0,5 x 0,1 x 0,1m cada una). Las temperaturas registradas por los sensores fueron comparados con las medidas por termopares y las temperaturas calculadas con un modelo térmico realizado con el software Abaqus (SIMULIA (2006)).

Los principales objetivos de este ensayo fueron:

1. Exponer los sensores a llama directa y a condiciones similares a las que existen en condiciones de fuego reales.
2. Exponer los sensores a gradientes de temperatura del orden de los que se dan en incendios reales, ya que en los hornos eléctricos no se pueden alcanzar este tipo de gradientes.
3. Detectar problemas asociados a la instalación de los sensores en condiciones similares a las de una instalación de monitorización de temperaturas.

Este ensayo es de gran importancia ya que en los ensayos realizados por otros autores no se presentan condiciones tan severas. En la figura 4.3 se comparan la curva ISO 834 utilizada en el ensayo realizado con la curva de temperatura utilizada por Lönnermark et al. (2008).

Se puede observar que las condiciones del ensayo realizado son mucho más severas debido a que se alcanzan temperaturas mayores y los incrementos de temperatura son más rápidos.

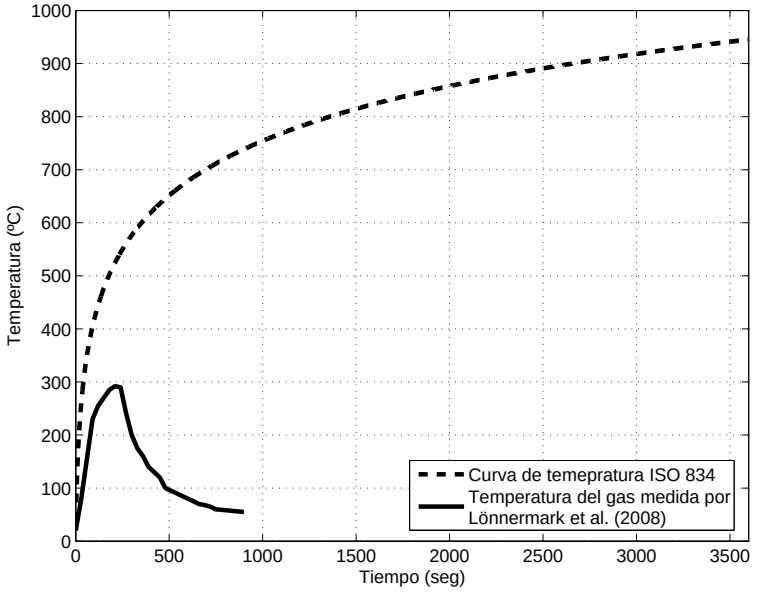


Figura 4.3: Comparación de la curva ISO 834 aplicada en el ensayo de fuego y la curva de fuego utilizada por Lönnermark et al. (2008)

4.3.1 Descripción de los sensores ensayados

Se ensayaron seis sensores, dos de cada clase de encapsulado estudiado (ver Capítulo 3). Los sensores fueron fijados a la superficie de dos probetas de hormigón. La longitud de la rejilla de Bragg utilizada para fabricar todos los sensores fue de 0.5 cm y se utilizaron sensores de diferentes longitud de onda (λ_0) para facilitar la interpretación de los datos durante el ensayo.

La tabla 4.1 contiene la información de la probeta donde se instaló cada sensor, tipo de encapsulado y longitud de onda al inicio del ensayo de cada uno de los sensores (FOS1 a FOS6).

El material del encapsulado de cada sensor le confiere diferentes propiedades, como su fragilidad, rigidez y costo. Por lo tanto, la longitud del encapsulado de los sensores fue definida según el tipo de material del encapsulado. Debido a la rigidez y fragilidad del encapsulado tipo B (encapsulado cerámico), la longitud de estos encapsulados fue limitada a 12 cm. Para el encapsulado tipo C se utilizó una longitud de 16 cm lo cual facilita la fabricación del sensor y su manipulación. Para el encapsulado tipo A, se utilizó un sensor de 16 cm de longitud y uno con una longitud de 60 cm evitándose en este último caso la separación del sensor y del cableado.

Tabla 4.1: Ubicación y características de los sensores

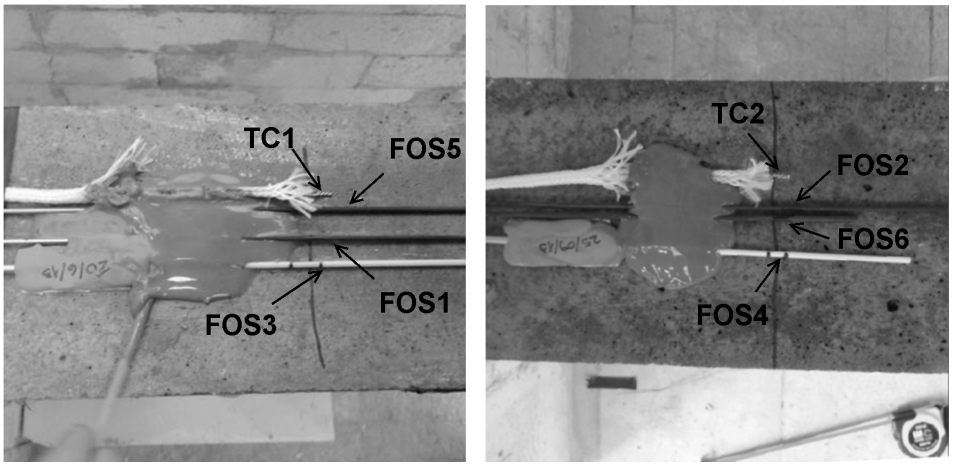
	Probeta	Encapsulado	$\lambda_0(nm)$
FOS1	1	A	1543.520
FOS2	2	A	1557.255
FOS3	1	B	1459.610
FOS4	2	B	1529.825
FOS5	1	C	1530.095
FOS6	2	C	1553.340

4.3.2 Descripción del ensayo

Los sensores se instalaron cercanos a la superficie de dos probetas de 0,5 x 0,1 x 0,1 m de hormigón de alta resistencia con fibras de acero. La instalación de todos los sensores se realizó siguiendo el siguiente patrón: la distancia de los sensores a la pared del horno era de 30 cm; los sensores se centraron en el ancho (lado corto) de la probeta y la distancia libre entre la cara superior de las probetas y los sensores era de aproximadamente 2 mm.

La distancia vertical de 2 mm se deja libre con la intención de que los sensores queden fuera de la capa límite. En esta capa es donde se dan efectos de viscosidad significativos originando gradientes de temperaturas, como consecuencia las temperaturas en la capa límite son menores que fuera de ella.

Los sensores ópticos se fijaron a la cara superior de las probetas mediante adhesivo de altas temperaturas que mantiene sus propiedades hasta temperaturas de 1093°C. El adhesivo también se utilizó para permitir mantener el sensor levemente elevado respecto a la superficie. En la instalación de los sensores se tuvo especial cuidado en conseguir que la parte sensora no estuviera en contacto con la probeta, de esta forma el sensor mide la temperatura del gas en la cercanía de la superficie. Esto se realiza por dos motivos. Por un lado se pretende evitar errores, debido a la dificultad de garantizar un contacto perfecto del sensor con la superficie durante todo el ensayo. Por otro lado, se prefiere registrar temperaturas del gas en vez de temperaturas en superficie ya que las temperaturas del gas brindan una idea de la severidad del incendio y permiten calcular las temperaturas en superficie a través de un modelo de transferencia de calor utilizando las temperaturas del gas como condiciones de contorno. En cambio calcular las temperaturas del gas dadas las temperaturas en superficie involucra un complejo proceso iterativo.



(a) Sensores en la probeta 1. Termopar TC1 y Sensores ópticos FOS1, FOS3 y FOS5

(b) Sensores en la probeta 2. Termopar TC2 y Sensores ópticos FOS2, FOS4 y FOS6

Figura 4.4: Nomenclatura y posición de los sensores en las probetas

Además de los sensores ópticos, se instaló en cada probeta un termopar tipo K de dimensiones 2 x 0,8 mm con cable de fibra cerámica para verificar las temperaturas registradas por los sensores ópticos. El termopar instalado en la probeta 1 se llamó TC1 y el instalado en la probeta 2 TC2. Éstos se adhirieron a las probetas con el mismo adhesivo cerámico que los FOS. La figura 4.4 muestra las probetas con los sensores instalados y su nomenclatura.

Los sensores ensayados y las probetas de hormigón fueron sometidos a un ensayo de fuego donde se aplicó la curva de fuego ISO-834 durante una hora. En este ensayo se utilizó un horno cúbico de 1.5m de lado. El horno dispone de seis quemadores de gas natural distribuidos en dos caras paralelas. La figura 4.5 muestra las probetas de hormigón en el horno previo al ensayo. La posición de las probetas se definió en función de la localización de los orificios del horno para extraer los cables. Las probetas se colocaron sobre bloques de hormigón celular para facilitar la instalación de los sensores y para reducir los gradientes de temperaturas a lo largo de las probetas, ya que el horno tiene temperaturas más homogéneas en la mitad de su altura.

A su vez el horno dispone en la cara trasera de una abertura circular para la extracción de los gases de combustión. La presión en el interior del horno es regulada por un sensor de presión que regula la apertura de la abertura circular.

La temperatura dentro del horno se controla por cuatro termómetros de placa (PT), en la figura PT1 a PT4 numerados de izquierda a derecha y de atrás hacia adelante. Los PT se instalaron con la cara aislada de cara a la probeta, para que la cara expuesta de

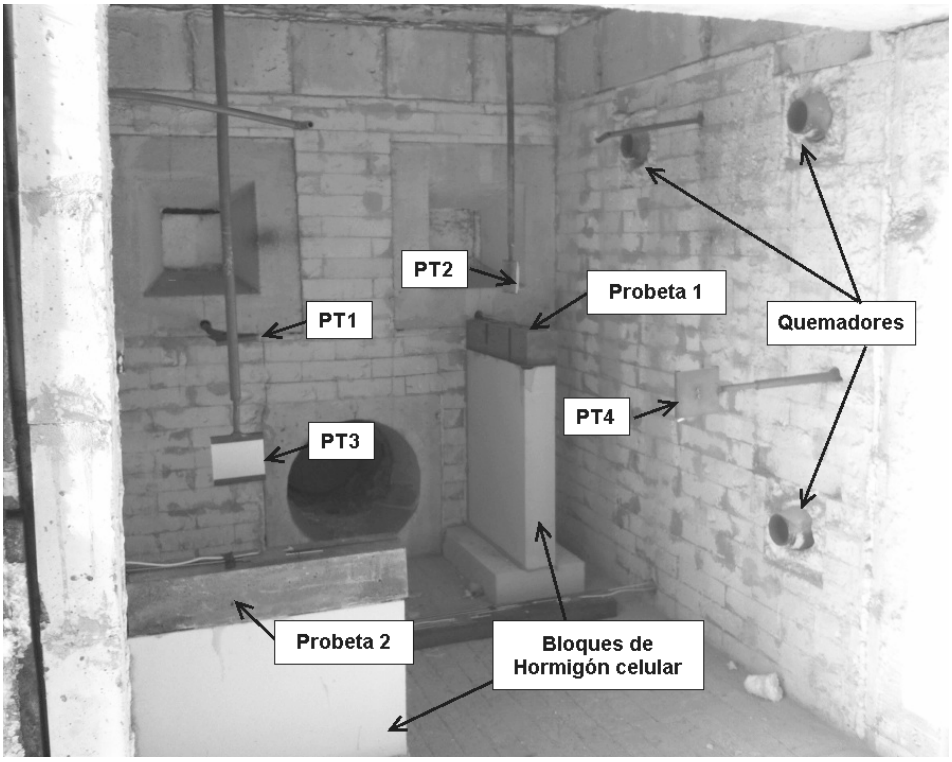


Figura 4.5: Vista frontal del horno. Posición de los quemadores en la cara lateral derecha, termómetros de placa, bloques de hormigón celular y probetas

los PT recibiera el mismo flujo radiante que las probetas y los PT no fueran afectados por la radiación propia de las probetas. Los PT son elementos que reciben un flujo de calor radiante similar a las probetas y por eso la temperatura medida por ellos (llamada temperatura adiabática (Wickström et al., 2007)) es apropiada para calcular la transferencia de calor en elementos sometidos a cargas de fuego.

El sistema de sensores ópticos requiere además de los mismos de la instalación de una unidad lectora, un sistema de cableado y un sistema de manejo de datos. La unidad lectora o instrumento de medida de las FBG/RFBG (interrogador) emite la luz, detecta y procesa el espectro reflejado de los sensores y decodifica y transmite la información al sistema de adquisición de datos (ordenador). El interrogador óptico utilizado (Micron Optics sm125-500) tiene un rango de longitud de onda de 1510 a 1590 nm y cuatro canales. Debido a la necesidad de 6 canales (uno para cada sensor), se utilizó un expansor (Micron Optics sm041-416) para ampliar la cantidad de canales del interrogador.

El software Micron Optics Enlight (*Micron Optics, Sensing analysis software ENLIGHT*) se utilizó para definir la adquisición y visualización de datos. Se registraron los espectros reflejados y las longitudes de onda cada 4 segundos. Luego se aplicaron las ecuaciones de calibración correspondientes (ver sección 3.5) para transformar las longitudes de onda en temperaturas.

Tanto los termopares de comparación (TC1 y TC2) como los termómetros de placa, se conectaron a la unidad de adquisición de datos de temperatura.

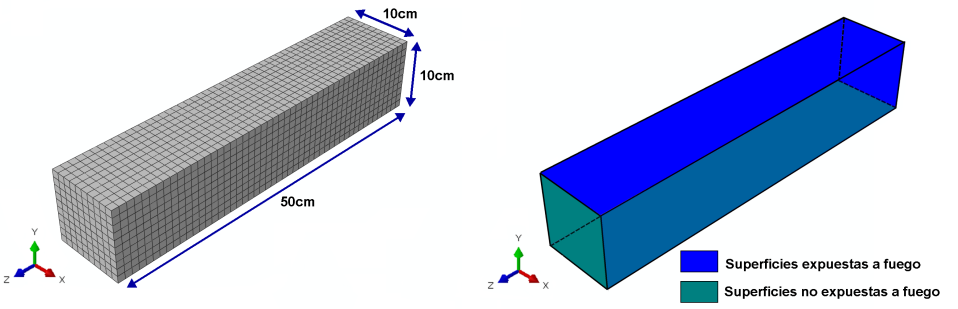
4.3.3 Modelo numérico de transferencia de calor

Para calcular las temperaturas teóricas de la superficie del hormigón en ambas probetas se realizó un modelo de transferencia de calor con propiedades térmicas de los materiales no lineales. El software Abaqus (SIMULIA (2006)) fue utilizado.

El modelo consta de una parte prismática de 10 x 10 x 50 cm (ver figura 4.6) que fue mallada con elementos de transferencia de calor tipo DC3D8. Éstos son elementos tridimensionales de 8 nodos con un grado de libertad por nodo. El tamaño máximo de los elementos se fijó en 1cm, resultando un modelo de 6171 nodos y 5000 elementos sólidos.

Las propiedades térmicas y la densidad del hormigón varían en función de la temperatura y se definieron de acuerdo al Eurocódigo 2, Parte 1-2 (CEN-EN 2-1-2, 2004). En particular se consideró que se utilizaron agregados calcáreos para elaborar el hormigón.

Las cargas térmicas se aplicaron en dos escalones de carga. En el primero se definió la temperatura inicial de la probeta con un valor de 12°C según lo indicado por el termómetro de placa al inicio del ensayo. En el segundo escalón se aplicaron las car-



(a) Dimensiones del modelo y mallado

(b) Superficies expuestas y no expuestas a fuego

Figura 4.6: Vista general del modelo de transferencia de calor

gas térmicas del horno del ensayo. Para esto se definieron condiciones de interacción superficiales de transferencia de calor por convección (*Surface film condition*) y de radiación (*surface radiation*) en las cuatro caras de la probeta expuesta a fuego (ver figura 4.6b). Se aplicó un coeficiente de transferencia de calor por convección de 25 W/m^2, un coeficiente de emisividad de las superficies expuestas de 0.8 y coeficiente de emisividad del fuego de 1. Se definió la constante de Stephan Bolzmann con un valor de 5,67 x $10^{-8}W/(m^2K^4)$. Estos parámetros de transferencia de calor se adoptaron del Eurocódigo 1, Parte 1-2 (CEN-EN 1-1-2, 2004).

Debido a las diferencias de temperaturas medidas por los termómetros de placa, se realizaron dos modelos, uno para cada probeta, aplicando a cada uno la curva de temperatura registrada por el termómetro de placa más cercano a cada probeta (PT2 para la probeta 1 y PT3 para la probeta 2).

4.3.4 Resultados

Para poder comprender mejor los resultados de los sensores en las probetas es fundamental conocer las temperaturas registradas por los termómetros de placa. En la figura 4.7 se superponen las temperaturas registradas por los cuatro termómetros de placa y la curva de temperaturas IS0 834 que es la curva objetivo dentro del horno.

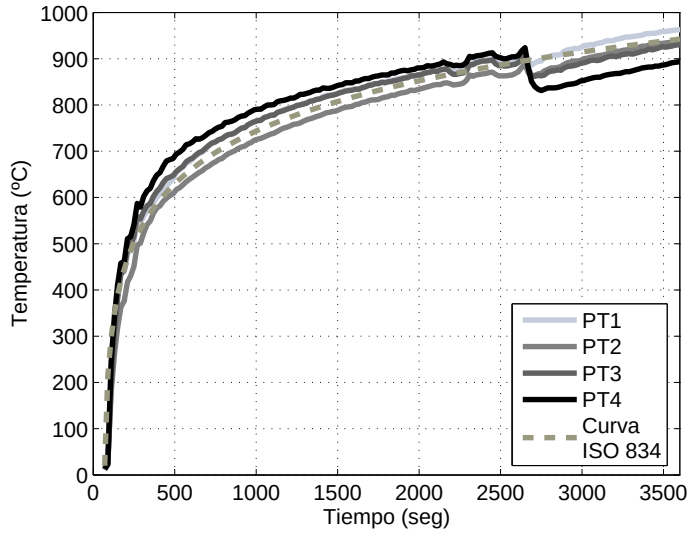


Figura 4.7: Temperaturas registradas por los termómetros de placa PT1 a PT4 y temperatura objetivo dentro del horno (ISO 834)

Las pequeñas discrepancias entre las temperaturas registradas por los termómetros de placa se originan por las diferencias en posiciones de los termómetros respecto a los quemadores. Sin embargo, las curvas de temperaturas registradas están razonablemente cerca a la curva objetivo, siendo las temperaturas registradas por PT4 las que presentan mayores divergencias.

Las cuatro curvas de temperaturas registradas por los termómetros de placa muestran una reducción de temperatura a partir del intervalo de tiempo t=2600 segundos. Esto se debe a que en ese momento fue cuando se logró estabilizar la presión dentro del horno.

Las curvas temperatura-tiempo medidas por los sensores ópticos colocados en la probeta 1 (FOS1, 3 y 5) son mostradas en la figura 4.8. En las mismas también se representan las temperaturas medidas por el termopar (TC1) y por el termómetro de placa PT2 que es el más cercano a la probeta y las temperaturas teóricas calculadas por el modelo numérico en la superficie de la probeta 1 (FEM1).

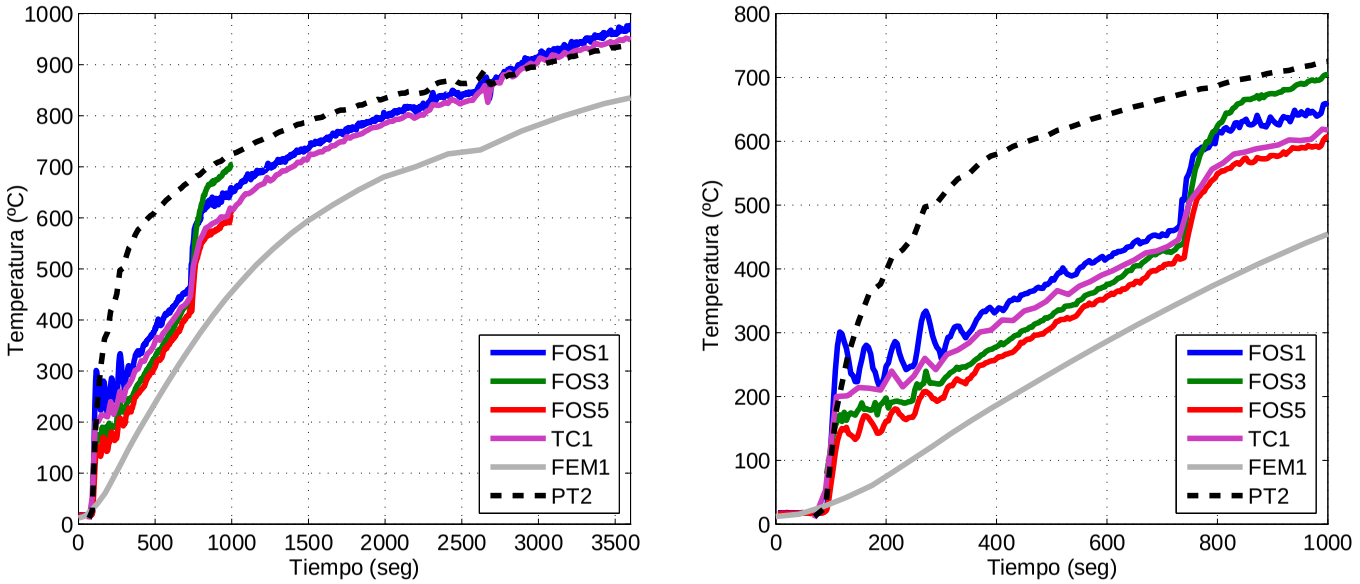
La figura 4.10 muestra el estado de la probeta 1 y los sensores colocados en ella al final del ensayo. Los resultados muestran que:

- FOS1 y TC1 registraron medidas muy similares. La temperatura máxima medida por el FOS1 fue de 968°C mientras que TC1 midió 952°C, esto representa una diferencia de 1.65 % de la temperatura máxima medida por TC1.

- Durante los primeros minutos del ensayo se presentan ciertas diferencias en las temperaturas medidas por los sensores (ver figura 4.8b), éstas se deben principalmente a las pequeñas variaciones en la posición vertical de los mismos, las cuales originan variaciones en sus posiciones respecto a la capa límite. A su vez durante los primeros 300 segundos del ensayo se puede notar que las temperaturas registradas por los sensores ópticos presentan sucesiones de valles y picos, las cuales se deben a la rápida capacidad de respuesta de estos sensores (ver sección 3.9) y no a ruido en las lecturas.

- Luego de los primeros 740 segundos de ensayo, se nota un incremento brusco de temperaturas registrado por todos los sensores. Esto puede explicarse debido a que el adhesivo que fijaba los sensores a la probeta se despegó a causa del *spalling*, como se muestra en la figura 4.10b. Como consecuencia, los sensores incrementan su separación de la superficie de hormigón y miden una temperatura mayor. Este incremento de temperatura muestra que el espesor de la capa límite es mayor a 2 mm y que en la separación de adhesivo al hormigón posicionó los sensores fuera de la capa límite.

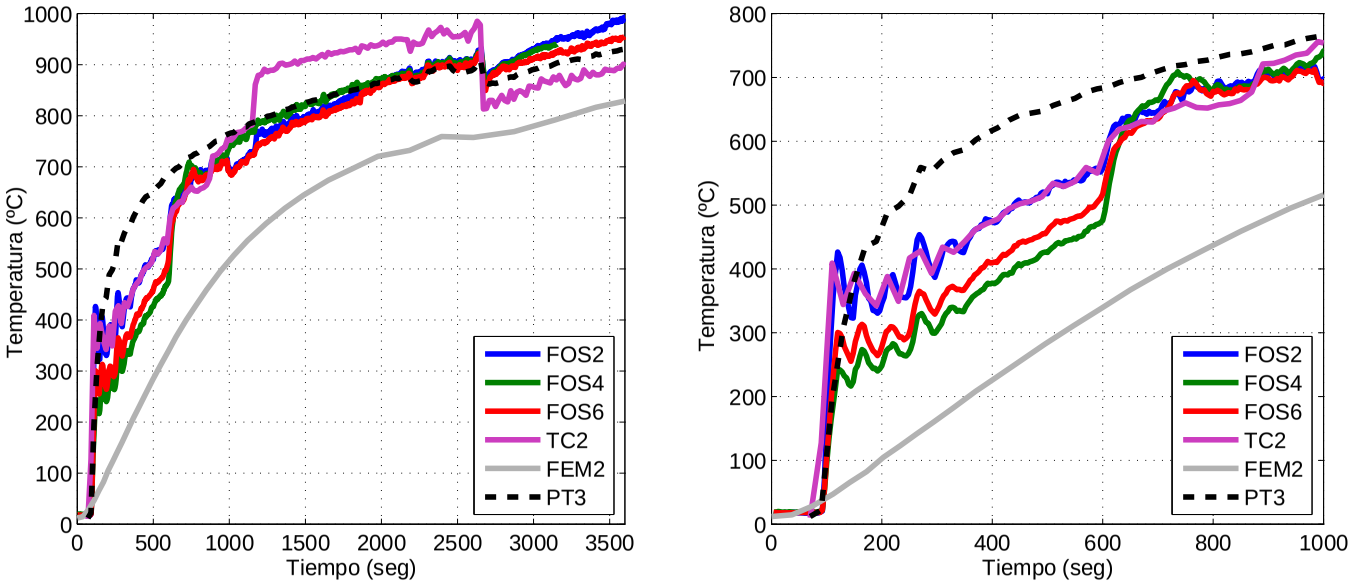
- Los sensores FOS3 y FOS5 se rompen luego de 1000 segundos de ensayo. Es importante destacar que los sensores dejan de funcionar en forma simultánea, lo cual indica un fallo global de la instalación y no una rotura local de los sensores. De la inspección realizada luego del ensayo se concluye que el *spalling* dañó la



(a) t= 0 a 3600 seg

(b) Detalle de escala de tiempo. t= 0 a 1000 seg

Figura 4.8: Probeta 1. Gráficas temperaturas - tiempo. Temperaturas registradas por los sensores ópticos (FOS), termopares (TC) y termómetros de placa (PT). Las temperaturas calculadas por los modelos numéricos también se grafican (FEM).



(a) t= 0 a 3600 seg

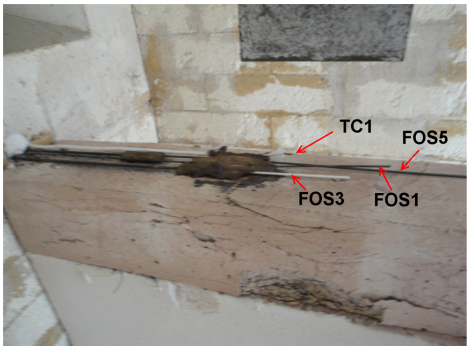
(b) Detalle de escala de tiempo. t= 0 a 1000 seg

Figura 4.9: Probeta 2. Gráficas temperaturas - tiempo. Temperaturas registradas por los sensores ópticos (FOS), termopares (TC) y termómetros de placa (PT). Las temperaturas calculadas por los modelos numéricos también se grafican (FEM).

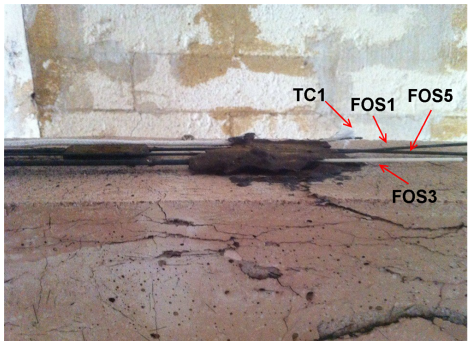
conexión entre los sensores y la fibra óptica que conectaba los sensores con el sistema de adquisición de datos.

- Los sensores ópticos registran correctamente la variación de temperatura dentro del horno que ocurre a los 2600 segundos del ensayo.

La figura 4.9 muestran las temperaturas medidas por los sensores colocados en la probeta 2 (FOS2, 4 y 6 y TC2). También se representan las temperaturas medidas por el termómetro de placa PT3 (el más cercano a esta probeta) y las temperaturas superficiales del hormigón en correspondencia con la zona de los sensores calculadas con el modelo de transferencia de calor (FEM2). El estado final de la probeta y los

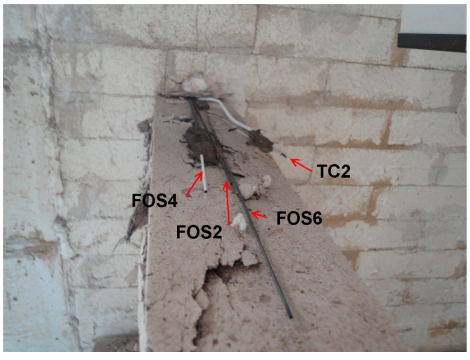


(a) Posición final de los sensores. Vista general.

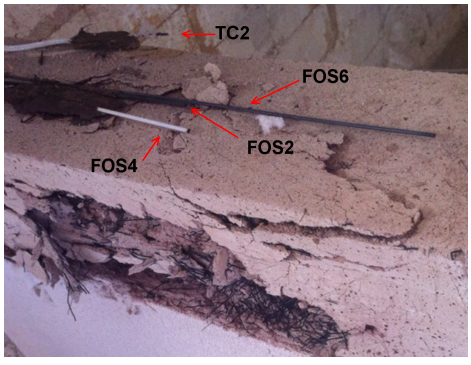


(b) *Spalling* en la zona de unión entre el sensor óptico y el cableado. Vista lateral.

Figura 4.10: Probeta 1 después del ensayo



(a) Posición final de los sensores. Vista general.



(b) *Spalling* en la zona de unión entre el sensor óptico y el cableado. Vista lateral.

Figura 4.11: Probeta 2 después del ensayo

sensores luego del ensayo se muestra en figura 4.11. De los resultados obtenidos se puede destacar que:

- Los sensores ópticos FOS2 y FOS6 presentaron un comportamiento excelente durante todo el ensayo. La temperatura máxima medida por estos sensores se dio en el segundo 3600 y fue de 990°C en el FOS2 y de 957°C en el FOS6. Esto significa que la diferencia de medidas fue del orden del 3.3 % de la temperatura medida por el FOS2. El sensor FOS4 dejo de funcionar en el segundo 3156, en ese momento medía una temperatura de 940°C. En ese instante de tiempo FOS2 medía 948°C, lo que indica una diferencia de solo 0.84 % respecto a FOS2.

- La inspección visual, una vez terminado el ensayo, permitió explicar la rotura de FOS4. En la figura 4.11 se nota que una parte de la probeta se desprendió a causa del *spalling* justo en la zona del sensor. Se observa que el encapsulado del sensor esta partido, dejando la fibra y la RFBG expuesta al ambiente agresivo del ensayo, lo cual generó la rotura del sensor.

- En esta probeta también se observan algunas diferencias en las temperaturas medidas al inicio del ensayo ocasionadas por las diferencias en las posiciones verticales de los sensores. En este caso, la presencia de un quemador 50cm por encima de la probeta 2, alineado horizontalmente hacia la posición de los sensores TC2 y FOS2 también influenció las temperaturas. A su vez, se repite la secuencia de picos y valles, las cuales se atribuyen, como se explicó anteriormente al tiempo de respuesta.

- En esta probeta también se aprecia un incremento brusco de temperaturas registrado por todos los sensores atribuido al desprendimiento del pegamento de la superficie de hormigón por el *spalling* y al consecuente posicionamiento de los sensores fuera de la capa límite. En este caso se da en el segundo 600 mientras que en la probeta 1 se dio en el segundo 740.

- A partir del segundo 1070, las temperaturas registradas por los sensores ópticos (sobre todo por FOS2) se aproximan considerablemente a las temperaturas registradas por el termómetro de placa PT3. Se aprecia que a partir de este momento los sensores ópticos mantienen un mejor comportamiento que el termopar TC2. El termopar TC2 registra un incremento de temperaturas del orden de los 100°C, que supera las temperaturas medidas por los termómetros de placa. Éste sensor continúa midiendo temperaturas mayores al resto de los sensores hasta el segundo 2630, que es cuando la temperatura del horno baja levemente debido a la estabilización de la presión interna del mismo. La razón por la cual el termopar TC2 registra estas diferencias se explica en la figura 4.11a donde se muestra que el pegamento que fijaba los sensores a la probeta se despegó de la superficie y se partió en dos partes, dejando al TC2 libre lo cual generó que con turbulencias dentro del horno éste se desplace originando estas diferencias.

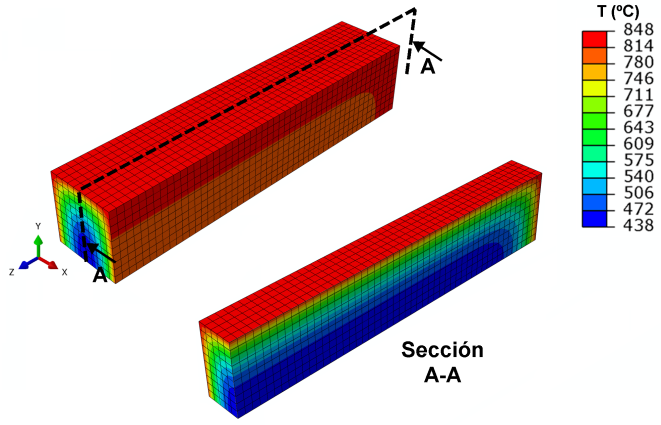


Figura 4.12: Temperaturas calculadas por el modelo en el hormigón para Probeta 1 en el intervalo de tiempo t=3600 seg.

Finalmente, a pesar de las diferencias conceptuales entre la temperatura del gas registrada por los FOSs y los TCs y las temperaturas adiabáticas registradas por los PTs, los valores registrados pos todos los sensores en la etapa en la que los FOSs y los TCs esta posicionados fuera de la capa límite fueron similares. La similitud de los resultados se debe a dos motivos. Por un lado, el proceso de transferencia de calor es dominado por radiación y los registros de temperaturas de los sensores se verán fundamentalmente afectados por esta componente de la transferencia de calor. Como consecuencia las temperaturas registradas no se verán significativamente afectadas por la diferencia de las áreas de los sensores, ya que esta afecta fundamentalmente a la componente convectiva de la transferencia de calor. Por otro lado, la radiación emitida por las probetas de hormigón es despreciable comparada con la radiación emitida por las llamas y las paredes del horno. Por lo tanto, las temperaturas registradas por los FOSs y los TCs que están afectadas por la radiación de las probetas de hormigón están en el mismo orden que las temperaturas de los PTs que están aisladas de la radiación de las probetas.

Además, las temperaturas registradas por los FOSs son mayores que las temperaturas en la superficie del hormigón calculadas por el modelo de transferencia de calor, corroborando que los FOSs registraron temperatura del gas y no temperatura en superficie. Como ejemplo de los resultados de los modelos de transferencia de calor, la figura 4.12 se muestran las temperaturas en el hormigón de la probeta 1 calculadas por el modelo para el intervalo de tiempo t=3600s.

4.3.5 Conclusiones del ensayo en probetas de hormigón

En esta sección se mostró la aplicación de los sensores de fibra óptica desarrollados (en el Capítulo 3) para medir altas temperaras en un ensayo de fuego bajo la curva estándar ISO 834 durante una hora.

Algunos de los sensores ensayados midieron hasta 970°C y resistieron las severas condiciones del ensayo durante una hora. Los sensores fueron sometidos al impacto de llama directa y a incrementos de temperatura del orden de 200 °C/min similares a los que se dan en incendios reales.

Las temperaturas registradas por los sensores mostraron concordancia con las temperaturas registradas por los termopares. Además, la comparación de las temperaturas de los FOSs con las temperaturas en la superficie del hormigón calculadas, confirman que los FOSs no están en contacto con la superficie del hormigón y consecuentemente que las temperaturas registradas por los FOSs no son las temperaturas de la superficie de las probetas.

Las temperaturas registradas por los sensores ópticos se ven afectadas por la distancia entre el sensor y la superficie a la cual están fijados, en este caso el hormigón. Para medir la temperatura del gas es necesario garantizar que los sensores están instalados fuera de la capa límite. El espesor de la capa límite depende de diversos factores como la velocidad del gas (Schlichting et al., 2003) y fue subestimado durante la instalación de los sensores. Al principio del ensayo los sensores estaban a una distancia de la superficie de aproximadamente de 2 mm. Luego de que se desprenda el adhesivo de la superficie los sensores incrementaron esta distancia y se registraron aumentos en las temperaturas registradas que muestran que se encontraban fuera de la capa límite. Esta distancia resulta un parámetro importante a tener en cuenta en futuras aplicaciones.

Es importante tener en cuenta que previo a la colocación del sensor se deberá definir que temperaturas se van a registrar: temperaturas del gas o de la superficie. En el caso de querer medirse temperaturas en superficie se deberá garantizar que la parte sensora este en perfecto contacto con la superficie durante todo el ensayo. Especial atención debe ponerse a evitar que el sensor se desprenda de la superficie. La aplicación de este tipo de sensores para medir temperaturas superficiales del hormigón se reduce a los casos donde el *spalling* pueda reducirse o evitarse por ejemplo mediante el empleo de fibras plásticas.

La conexión entre el sensor y el cableado que conecta el sensor con el sistema de adquisición de datos es un punto crítico de la instalación, como puedo verse en el ensayo. Lograr una unión que pueda resistir el *spalling* bajo las condiciones críticas de fuego es un gran desafío.

Los sensores ópticos con encapsulado tipo A y C son los que mostraron mejor comportamiento, ya que resistieron las condiciones hostiles del ensayo de fuego y los sensores

con encapsulado tipo A mostraron su corto tiempo de respuesta. El uso de sensores con encapsulado tipo B deberá evitarse en la superficie de elementos de hormigón, debido a la fragilidad de este tipo de encapsulado.

El uso de sensores ópticos de altas temperaturas resulta competitivo con los termopares, especialmente en los casos donde los termopares no son confiables debido a la presencia de interferencias magnéticas o eléctricas, como lo son los túneles de trenes eléctricos.

4.4 Aplicación a un elemento estructural: pilar metálico relleno de hormigón

En esta sección se presenta la aplicación de los sensores desarrollados para medir temperaturas en un pilar metálico relleno de hormigón ensayado a fuego bajo la curva ISO-834 (ISO, 1975). Éstos pilares forman parte de la investigación del grupo de investigación dirigido por el Dr. M.L. Romero y el Dr. A. Hospitaler de la Universitat Politècnica de València, que permitió colocar los sensores apareados con los termopares que ellos utilizarían para poder evaluar el comportamiento de los sensores ópticos en situaciones de un ensayo real.

Las temperaturas registradas por los sensores fueron comparadas con las medidas por termopares y con las temperaturas calculadas con un modelo térmico realizado con el software Abaqus (SIMULIA (2006)).

Los objetivos de este ensayo fueron:

1. Aplicar los sensores a un elemento estructural bajo un ensayo de fuego bajo carga, teniendo condiciones de instalación más severas.
2. Detectar puntos críticos de la instalación.
3. Evaluar el comportamiento de los sensores desarrollados en una aplicación real, utilizándolos para medir temperaturas en superficie y temperaturas en el hormigón.
4. Evaluar el comportamiento de sensores multiplexados embebidos en hormigón.
5. En el caso de los sensores embebidos en el hormigón se busca evaluar el comportamiento de los sensores en todas las etapas del ensayo: posicionamiento de los sensores adheridos a las armaduras, colocación de las armaduras dentro del tubo metálico, hormigonado del hormigón, vibrado, soldado de la placa metálica en la base, traslado del tubo, etc.

6. En el caso del sensor en superficie se busca validar su capacidad para medir temperaturas en superficie metálicas y evaluar el funcionamiento del sistema de fijación utilizado.

4.4.1 Descripción de los sensores ensayados

Se ensayaron tres sensores, todos de encapsulado tipo A (ver Capítulo 3). Uno de los sensores se fijó a la superficie exterior del pilar metálico y los otros dos (multiplexados) se instalaron embebidos en el hormigón.

La longitud de la rejilla de Bragg utilizada para fabricar todos los sensores fue de 0.5 cm. En los sensores que se multiplexaron se utilizaron sensores de longitud de onda (λ_0) suficientemente separadas para facilitar el posterior análisis de los datos y su interpretación durante el ensayo.

La tabla 4.2 contiene la información de la posición cada sensor y longitud de onda al inicio del ensayo de cada uno de los sensores (FOS1 a FOS3).

Tabla 4.2: Ubicación y características de los sensores

	Ubicación	Tipo	Altura[1]	$\lambda_0(nm)$
FOS1	Superficie	Puntual	$\frac{h}{2}$	1554.845
FOS2	Embebido	Multiplexado	$\frac{h}{4}$ (inferior)	1552.350
FOS3	Embebido	Multiplexado	$\frac{h}{2}$	1534.600

[1] Posición del sensor respecto a la altura del pilar (h).

Para facilitar la instalación y disminuir los puntos frágiles de la misma se diseñó el encapsulado del FOS1 con una longitud de 190 cm. Esta longitud permitió colocar el sensor a mitad de la altura del pilar y proteger la fibra hasta la zona de bajas temperaturas, sin necesidad de agregar ningún elemento de unión.

Para los FOS2 y FOS3 se diseñó un encapsulado único de una longitud de 155 cm. Esta longitud surge de tener en cuenta la altura del pilar y posición del orificio de salida de los cables. El diseño del encapsulado permite tener un único punto de empalme de la instalación, en la unión del fin del encapsulado con el cableado, que queda embebida en el hormigón.

4.4.2 Descripción del ensayo

El elemento a ensayar es un pilar tubular metálico relleno de hormigón. La longitud del elemento es de 3,18 m, el diámetro exterior es de 0,271 m y el espesor del tubo metálico es de 10 mm. La columna fue pre cargada axialmente y luego se le aplicó la carga de fuego (ISO-834) a través de la activación de los quemadores del horno.

El ensayo fue realizado en un horno de 5 x 3 x 3 m en las instalaciones de AIDICO (Instituto Tecnológico de la construcción). El horno tiene 16 quemadores, distribuidos en dos filas horizontales en la mitad de la altura, una en cada lado largo del horno. La temperatura del horno es controlada por 6 termómetros de placa colocados dentro del horno, como muestra la figura 4.13.

El elemento fue instrumentado con termopares en varios puntos de la superficie exterior y del interior del hormigón (embebidos). Como el objetivo desde el punto de vista de esta Tesis Doctoral era comparar las temperaturas registradas por los termopares con las de los sensores de fibra óptica, la descripción del ensayo se centrará en los puntos donde se colocaron sensores de ambos tipos.

Figura 4.13: Vista frontal del horno previo al ensayo. Pilar tubular y termómetros de placa.

Instalación de los sensores embebidos

Los sensores FOS2 y FOS3 se instalaron embebidos en el hormigón. Ambos sensores se colocaron a una profundidad de un tercio del ancho de la sección de hormigón. FOS3 se colocó en la mitad de la altura de la columna y FOS2 en en el cuarto inferior. En las mismas posiciones se colocaron termopares (TC2 y TC3 respectivamente). Tanto los FOS como los TC se fijaron a las armaduras previo al hormigonado utilizando bridas. En parte interior del tubo existía un orificio circular para permitir la salida de los cables de los termopares y el cableado de los sensores ópticos. La figura 4.14 muestra los detalles de la instalación de los sensores embebidos.

Es importante destacar que el proceso de instalación de los sensores es una etapa muy importante debido a la fragilidad de los mismos. Por esto se monitorizaron los espectros de los sensores durante la etapa de instalación, hormigonado y vibrado. No habiéndose observado ningún tipo de daño o rotura de los sensores durante estas etapas.

Instalación del sensor en superficie

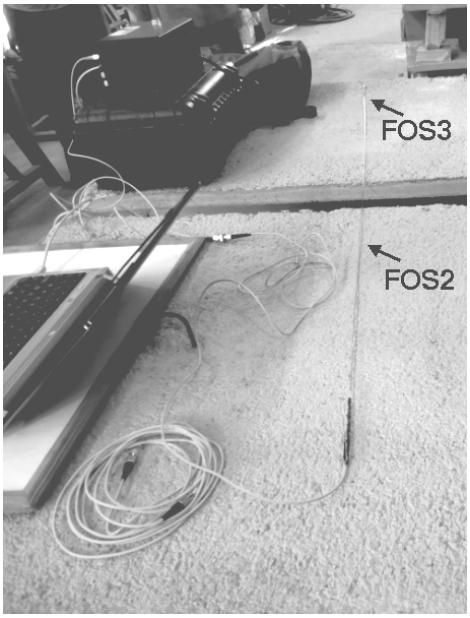
La instalación de este sensor se realizó una vez que el pilar había sido trasladado a las instalaciones de AIDICO y montado en el horno de ensayo. El sensor FOS1 se instaló en la superficie exterior del pilar en la mitad de la altura. El sensor fue fijado al elemento mediante el empleo de cables metálicos resistentes a altas temperaturas (figura 4.15).

Junto al FOS1 se instaló un termopar, éste se fijó a la superficie mediante un hierro de pequeño diámetro soldado a la superficie. La figura 4.15b muestra un detalle de FOS1 y TC1 y sus sistemas de fijación a la superficie.

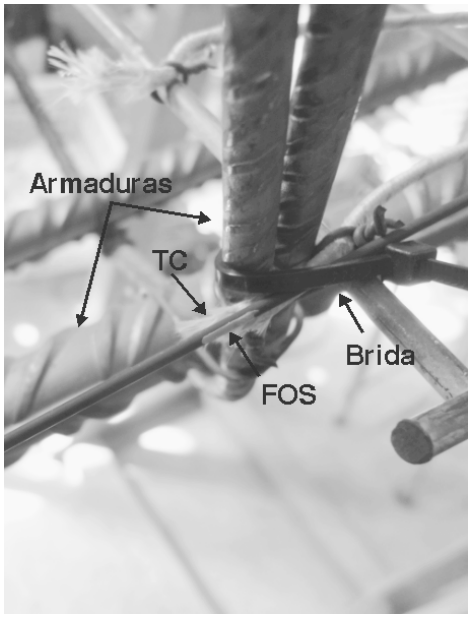
La cara inferior del horno consta de un orificio para la salida de los cables, tanto de los termopares como de los sensores ópticos. Luego de la instalación de los sensores se protegió el cableado mediante la colocación de fibra de vidrio y una capa de arena, de forma tal que todo el cableado que no esté preparado para resistir altas temperaturas quede protegido. La figura 4.16 muestra el orificio de salida de los cables y el proceso de colocación de las capas protectoras.

4.4.3 Modelo numérico de transferencia de calor

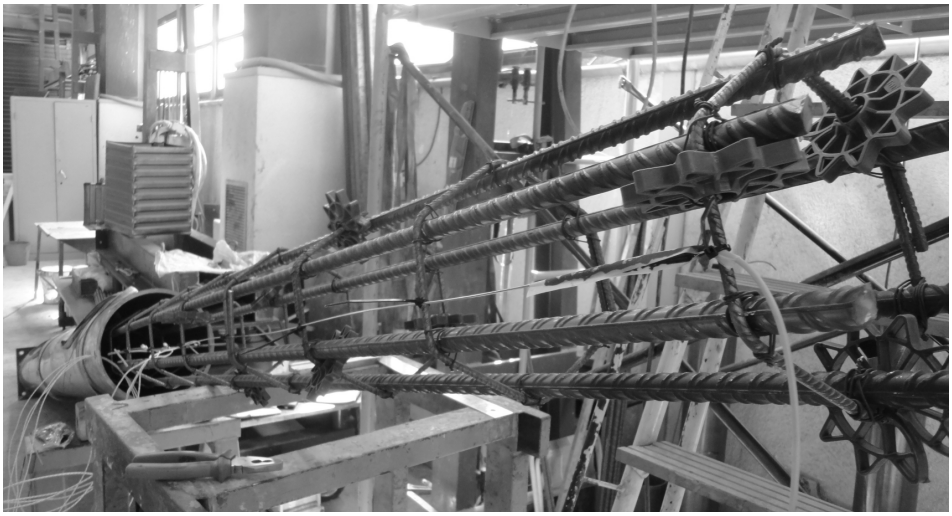
Para calcular las temperaturas teóricas en las posiciones de FOS1 (temperatura de la superficie metálica) y de FOS2 y FOS3 (temperatura del hormigón) se realizó un modelo de transferencia de calor con propiedades térmicas de los materiales no lineales. El software Abaqus (SIMULIA (2006)) fue utilizado. La respuesta mecánica del modelo no fue considerada ya que ese análisis excede los objetivos del presente estudio.



(a) Sensores multiplexados antes de su instalación.

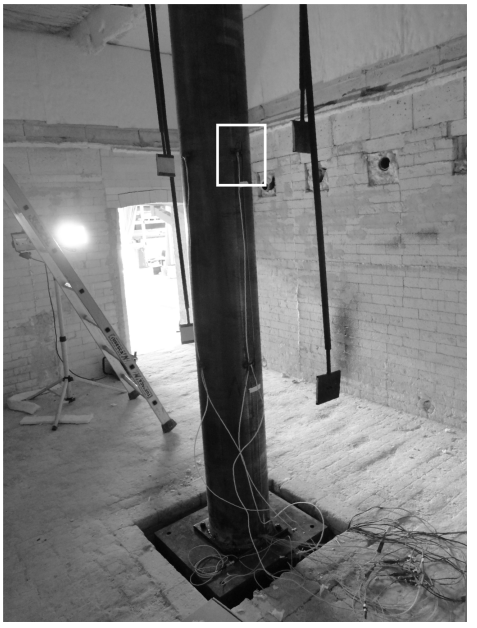


(b) Detalle de la instalación TC, FOS, brida y armaduras



(c) Colocación de la armadura con los sensores en el pilar

Figura 4.14: Instalación de los sensores embebidos (FOS2 y FOS3)



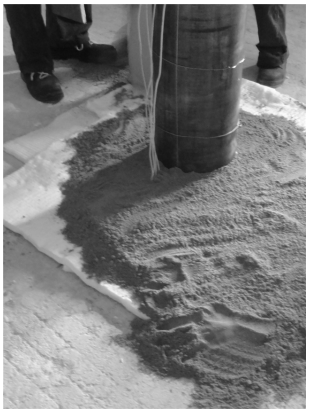
(a) Posición FOS1. Vista general

(b) Detalle de la instalación FOS1, TC1 y cables de fijación

Figura 4.15: Instalación del sensor en superficie (FOS1)

(a) Orificio de salida para cables de FOS y TC

(b) Recubrimiento con fibra de vidrio



(c) Recubrimiento con arena

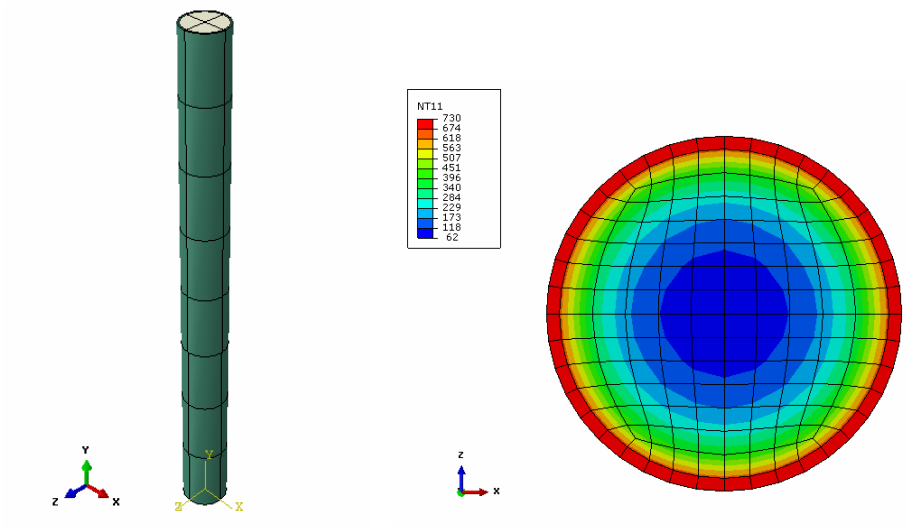
Figura 4.16: Protección del cableado

El modelo de Abaqus consta de una parte cilíndrica de 3,18 m de alto con un diámetro de 0,261 m y una parte tubular concéntrica con el cilindro de la misma altura y un diámetro exterior de 0,271 m con un espesor de 0,01 m. En la figura 4.17a se muestran las partes del modelo. Las partes fueron malladas con elementos de transferencia de calor tipo DC3D8. Éstos son elementos tridimensionales de 8 nodos con un grado de libertad por nodo.

Las propiedades de los materiales fueron definidas en función de la temperatura usando los valores propuesto por el Eurocódigo 2, parte 1-2 (CEN-EN 2-1-2, 2004) para el hormigón y el Eurocódigo 3, parte 1-2 (CEN-EN 3-1-2, 2005) para el acero.

Las cargas térmicas se aplicaron en dos escalones de carga. En el primero se definió la temperatura inicial del elemento con un valor de 20°C. En el segundo escalón se aplicaron las cargas térmicas del horno del ensayo. Para esto se definieron condiciones de interacción superficiales de transferencia de calor por convección (*Surface film condition*) y de radiación (*surface radiation*) en la cara exterior del tubo de acero. La curva de temperatura aplicada se definió en función de las temperaturas registradas por los termómetros de placa.

Se aplicó un coeficiente de transferencia de calor por convección de 25 W/m^2, un coeficiente de emisividad de las superficies expuestas de 0.7 y coeficiente de emisividad del fuego de 1. Se definió la constante de Stephan Bolzmann con un valor de 5,67



(a) Vista general de la geometría del modelo

(b) Temperatura en la sección central (t=25 min)

Figura 4.17: Modelo numérico de transferencia de calor

x $10^{-8} W/(m^2 K^4)$. Los parámetros principales del modelo de transferencia de calor están basados en el modelo propuesto por Espinos et al., 2010 y en el Eurocódigo 1, Parte 1-2 (CEN-EN 1-1-2, 2004).

4.4.4 Resultados

La figura 4.18 compara las curvas temperatura-tiempo registradas por los sensores ópticos (FOS) y los termopares (TC) y los resultados del modelo de elementos finitos (FEM). En la figura también se incluyen la temperatura objetivo (ISO-834) y el promedio de la temperatura registrada por los PT (PT prom.). Se muestran los resultados de los primeros 25 minutos del ensayo ya que luego falló el sistema de cableado y se interrumpió la toma de datos de los FOS.

Se asume que lo ocurrido fue un problema con el cableado porque no se evidenció una pérdida de potencia o deformación de espectro de las RFBG, ocurriendo una pérdida repentina de la señal. Se cree que la protección del cableado no fue suficiente o que un movimiento brusco del pilar originó la rotura.

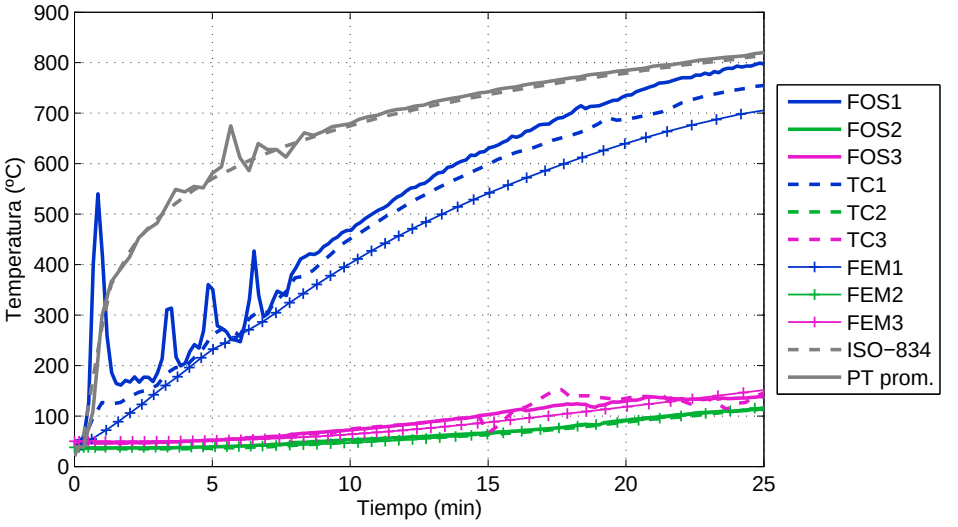


Figura 4.18: Temperaturas registradas por los sensores ópticos (FOS1, FOS2 y FOS3), temperaturas registradas por los termopares (TC1, TC2 y TC3), temperaturas calculadas por el modelos numérico para las tres posiciones en estudio (FEM1, FEM2 y FEM3), temperatura objetivo dentro del horno (ISO 834) y temperatura promedio registrada por los termómetros de placa (PT prom.)

El FOS1 muestra cambios rápidos durante los primeros minutos del ensayo mientras el TC1 muestra pequeñas oscilaciones durante el mismo período de tiempo. Esto se debe a dos motivos. Por un lado, la toma de datos de los FOS se realizó cada 10 segundos mientras que la de los TC cada 20 segundos. Por otro lado, el FOS1 muestra un tiempo de respuesta menor que el TC1. Por estos motivos el FOS1 pudo captar los rápidos cambios de temperatura dentro del horno.

Para comprender el origen de los picos registrados por el FOS es necesario entender el mecanismo de regulación de temperatura del horno. Al horno se le asigna una temperatura objetivo y luego los quemadores regulan su potencia comparando para cada intervalo de tiempo la temperatura objetivo con la temperatura registrada por los termómetros de placa. Por lo tanto los quemadores están constantemente regulando su potencia. Teniendo en cuenta este comportamiento, parece que la forma de la curva registrada por el FOS1 muestra adecuadamente las variaciones temperatura dentro del horno.

Luego de esta primera parte del ensayo, FOS1 y TC1 registran temperaturas similares, mostrando una diferencia de temperatura máxima de 50°C. Esta diferencia es aceptable teniendo en cuanta que durante el ensayo algunos de los cables que fijaban al FOS1 se rompieron, dejando al FOS1 más alejado de la superficie. Como consecuencia los sensores no se encontraban exactamente en la misma posición. Además, FOS1 y TC1 no se encontraban completamente adheridos a la superficie con lo cual la transferencia de calor entre la superficie y los sensores no fue posible, lo que hizo que los sensores midan temperatura del gas y no temperatura de la superficie. Esto explica que la temperatura en la superficie del tubo (FEM1) sea menor que las registradas por FOS1 y TC1.

Los FOS2 y FOS3 (multiplexados embebidos en el hormigón) muestran muy buen ajuste con los termopares (TC2 y TC3). Además, como los sensores están embebidos, las temperaturas registradas son similares a las obtenidas en el modelo numérico (FEM2 y FEM3). Lamentablemente la rotura del cableado ocurre en un período de tiempo temprano del ensayo, y no permite que los sensores embebidos alcancen altas temperaturas. Cabe destacar que en el intervalo entre 15 y 20 minutos del ensayo TC3 presenta oscilaciones en las temperaturas registradas.

Para comprobar que el FOS1 tiene un tiempo de respuesta menor que el TC1, se realizó un ensayo experimental del tiempo de respuesta de un termopar con las características del TC1 utilizado en el ensayo como el que se describió en la sección 3.9.

La figura 4.19 compara gráficamente los resultados experimentales del tiempo de respuesta de un sensor óptico del tipo de FOS1 y de un termopar de las mismas características de las del TC1 utilizado en el ensayo. La tabla 4.3 resume el tiempo de respuesta calculado experimentalmente para los dos sensores para las cuatro temperaturas objetivo estudiadas. Los resultados muestran que en el caso de los sensores comparados el tiempo de respuesta del sensor óptico es menor que el del termopar.

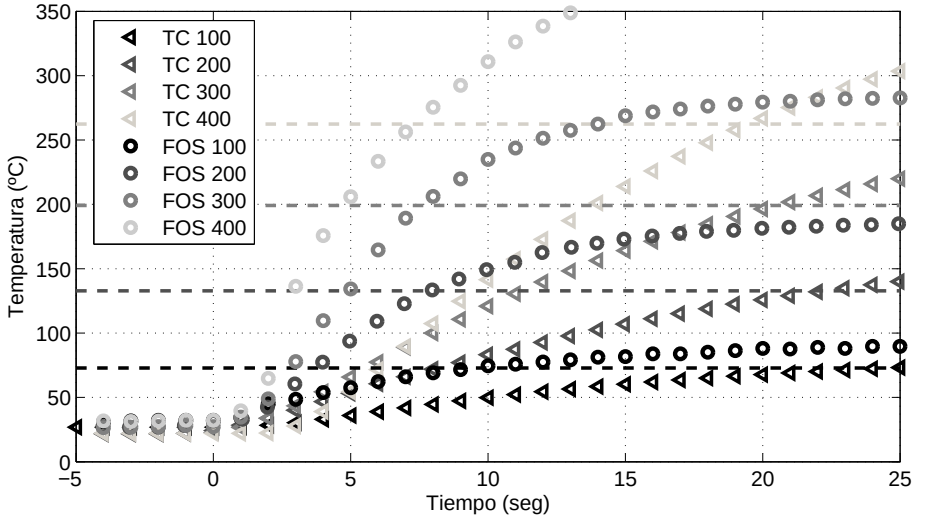


Figura 4.19: Resultados del ensayo de tiempo de respuesta para el FOS1 y el TC1, para temperaturas objetivo de 100, 200, 300 y 400°C

Tabla 4.3: Resumen de los tiempos de respuesta del ensayo

$T_{objetivo}$	100°C	200°C	300°C	400°C
FOS1	11 s	9 s	8 s	7 s
TC1	25 s	22 s	21 s	20 s

4.4.5 Conclusiones del ensayo del pilar metálico relleno de hormigón

Los sensores multiplexado y embebidos en el hormigón mostraron tener un buen comportamiento durante todas las etapas (colocación, hormigonado, vibrado, traslado, ensayo). A pesar de no alcanzarse temperaturas muy altas en los mismos (temperaturas máximas registradas del orden de 150°C), el buen comportamiento en todas las etapas es un resultado muy importante.

El sensor instalado en superficie muestra un buen comportamiento, aunque no mide temperatura en superficie por no lograrse una adhesión completa y permanente del sensor a la superficie. La utilización de alambres resistentes a altas temperaturas como elementos de fijación no resultó ser adecuada. Otras alternativas de sistemas de fijación, como el pegado, deben estudiarse en profundidad.

El registro de temperaturas del sensor FOS1 pone de manifiesto la importancia de conocer los tiempos de respuesta de los sensores, y no confundir la capacidad del sensor para registrar cambios de temperaturas muy rápidos con ruido en la toma de datos. El FOS1 resultó tener un tiempo de respuesta menor que el TC1.

El punto crítico de la instalación resultó ser el cableado. Se debe profundizar el estudio del cableado y de la protección del mismo, para obtener un sistema de sensores que pueda registrar temperaturas durante todo el ensayo.

4.5 Conclusiones

En este capítulo se mostraron la aplicación de los sensores desarrollados en ensayos de fuego en probetas de hormigón y en un elemento estructural (pilar metálico).

Los ensayos presentados en este capítulo son un paso importante para su utilización en la monitorización de temperaturas en estructuras sometidas a fuego y en ensayos de fuego. La principal diferencia de estos ensayos con los ensayos realizados habitualmente a sensores ópticos de alta temperatura radica en la exposición del sensor a la llama directa y a gradientes de temperaturas muy bruscos, que en hornos eléctricos no pueden alcanzarse.

Las condiciones de ensayo planteadas en este capítulo son mucho más severas tanto para el sensor como para el sistema de fijación y cableado. En rigor en los ensayos habituales de sensores de alta temperatura, el cableado no se expone a temperatura, quedando éste a temperatura ambiente.

El proceso de instalación de los sensores es un punto clave debido a la fragilidad de los mismos y a que la correcta medición de la temperatura depende en gran medida de cómo se instale el sensor. Durante todo el proceso de colocación y especialmente en el caso de que los sensores estén embebidos, se recomienda tomar datos.

Los sensores desarrollados pueden colocarse embebidos en el hormigón como se mostró en la subsección 4.4.2. El proceso de instalación de los sensores embebidos en hormigón requiere la preparación de la armadura o estructura sostén del sensor; colocación y fijación del sensor a la estructura auxiliar, hormigonado y vibrado del hormigón.

A su vez los sensores pueden colocarse en la superficie de elementos metálicos y de elementos de hormigón. En los casos donde se coloquen los sensores en superficie se recomienda utilizar pegamento de altas temperaturas y en el caso de utilizarse sobre superficies de hormigón se debe evitar el *spalling*. Para que un sensor registre la temperatura de la superficie se debe garantizar la adhesión total del sensor con la superficie durante todo el ensayo.

En los ensayos realizados se observó que resulta más sencillo medir temperaturas del gas cercanas a la superficie y luego utilizar estos datos como condiciones de contorno

para calcular las temperaturas en superficie. En caso de buscar medir temperaturas del gas cercanas a la superficie se debe tener en cuenta colocar los sensores fuera de la capa límite.

En los ensayos realizados los sensores mostraron tener un buen comportamiento a las condiciones severas a las cuales fueron expuestos. Sin embargo, hay puntos en los cuales debe profundizarse el estudio. Entre estas áreas se encuentra el cableado, las conexiones entre el sensor y el cableado y las formas de fijación de los sensores.

Finalmente es importante remarcar que para poder tener un sistema de monitorización de altas temperaturas es necesario que todos los componentes del sistema funcionen adecuadamente ante las condiciones de temperatura a las que estén expuestos.

Capítulo 5

Monitorización de temperaturas en túneles sometidos a fuego

5.1 Introducción

En túneles de carretera y ferrocarriles existen diferentes tipos de sistemas de seguridad, como los sistemas de detección de incendios, sistemas de ventilación, sistemas de extinción y sistemas de alarma. Si bien estos sistemas son muy diversos, todos ellos tienen los mismos objetivos básicos: reducir el riesgo de lesiones o muerte para los usuarios del túnel y reducir el riesgo de daños a la estructura del túnel (Carvel y Beard, 2012).

Para poder comprender la existencia de estos sistemas debemos comprender el concepto de riesgo en sí mismo y los conceptos relacionados con la prevención y protección. En términos generales el riesgo es la probabilidad de ocurrencia de un evento por las potenciales consecuencias asociadas. Las medidas preventivas son las que apuntan a reducir la probabilidad de ocurrencia del evento, mientras que las medidas de protección son las que apuntan a disminuir sus consecuencias.

Dentro de los proyectos más importantes en seguridad en túneles se encuentran los proyectos FIT, Safe tunnel, UPTUN, Safe T (ver subsección 2.1.1). Estos proyectos tienen diferentes objetivos, como evaluar estrategias de modernización de túneles existentes para disminuir la posibilidad de accidentes y a su vez garantizar una respuesta más adecuada en caso de incendios; optimizar el diseño de túneles, etc (Khoury, 2003). Otras organizaciones como la *International Tunneling Association* (ITA) han desarrollado guías para categorizar los diferentes túneles y proteger sus elementos estructurales ante la acción del fuego con el objetivo de brindar seguridad tanto a las

personas como a los equipos de rescate (International Tunnelling Association, 2004). Estas recomendaciones remarcan la importancia de proteger la estructura del colapso por un período de tiempo determinado y la necesidad de disminuir los costos indirectos asociados a la operación anormal del túnel hasta que esté completamente rehabilitado.

Existe un gran esfuerzo por disminuir la probabilidad de ocurrencia de incendios en túneles y las consecuencias asociadas a las pérdidas humanas. No obstante, son muy pocas las medidas que se evalúan para disminuir las **consecuencias de un incendio en términos económicos**.

Como se explicó en la subsección 2.1.5 la pérdidas económicas indirectas asociadas al cierre del túnel son las que producen mayores pérdidas económicas y el **tiempo** que permanece el túnel cerrado es el factor determinante en estas consecuencias.

Corsi (2008a) identifica los grupos que se ven afectados por el cierre del túnel:

- Propietario del túnel. Es el principal interesado en disminuir el tiempo de cierre del túnel. Especialmente si es un túnel de peaje.
- Usuarios del túnel. La mayoría de los túneles son vínculos vitales entre regiones que afectan altamente los procedimientos comerciales y el desempeño entre estas regiones. Un túnel cerrado por obras genera desvíos y atascos, que implican mayor tiempo de viaje para los usuarios.

Por otro lado, teniendo en cuenta que la estructura de la mayoría de los túneles es de hormigón y este es un material de bajo costo, a veces se prefiere reducir el tiempo dedicado a la evaluación del daño y al diseño de la reparación, y proponer una reparación de mayor costo que repare más hormigón del estrictamente necesario pero de forma más rápida. A su vez en túneles es siempre más económico reparar un túnel que construir uno nuevo, debido a que los costos y tiempos de construcción son mayores que si se repara (Corsi, 2008a).

Además la evaluación de daños en túneles sometidos a la acción del fuego presenta diversas dificultades, como se explicó en la subsección 2.1.7. Entre estas se encuentra la no verticalidad y la rugosidad de las paredes que limita la aplicación de las técnicas no destructivas y la dificultad para estimar la historia de temperaturas a la cual fue expuesta la estructura.

En este capítulo se plantea como medida de protección de túneles de carretera que tienen un alto riesgo de incendios, ya sea por tener una probabilidad de ocurrencia de incendios elevada por sus características de tráfico y geométricas o por tener consecuencias económicas elevadas, la instalación de un **sistema de monitorización de temperaturas**.

La monitorización de temperaturas permite reducir el tiempo de diagnóstico y la cantidad de ensayos no destructivos debido a que los datos (temperaturas del aire en

función del tiempo y del espacio) obtenidos de este sistema serán utilizados para el diagnóstico y diseño de reparación. Estos datos permitirán realizar modelos de transferencia de calor para calcular las temperaturas alcanzadas por la estructura y poder deducir la capacidad remanente de los materiales; definir las áreas afectadas por el fuego y la severidad del daño de cada zona.

Además, la implementación de un sistema de monitorización de temperaturas, que resista durante todo el incendio, brindará información valiosa a los equipos de rescate y de extinción del incendio.

El principal *objetivo* del sistema de monitorización planteado es brindar un mapa de temperaturas del aire/gas en tiempo real en la cercanía de la superficie de todo el túnel, permitiendo conocer la historia de temperaturas y disminuir los tiempos necesarios para realizar el diagnóstico de la estructura. El *parámetro a ser monitorizado* será la temperatura del gas cercano a la superficie del túnel, debido a que es el parámetro fundamental para estudiar el fenómeno de fuego en túneles. Básicamente este parámetro es medido en todos los ensayos de fuego, es la carga que se le aplica a la estructura y las propiedades de los materiales dependen de las temperaturas alcanzadas (ver sección 2.1).

La definición de esta estrategia de monitorización incluye: a) el diseño de una red de sensores, es decir establecer donde se instalaran los sensores; b)definir el sistema de monitorización (tipo de sensores, cableado, unidades lectoras, etc); c)definir la frecuencia de guardado de datos; d) definir un plan de gestión de datos y e) evaluar el costo de monitorización.

El *diseño de la red de sensores* tiene infinitas soluciones. Un buen diseño de la red de sensores implica encontrar un equilibrio entre el costo de la instalación (proporcional a la cantidad de sensores a instalarse) y la calidad de los datos obtenidos (representado a través de los errores asociados a los datos). En la sección 5.2 se plantean las pautas a seguir para diseñar una red de sensores y obtener diagramas que relacionen el costo de la red de sensores con la calidad de los datos obtenidos. Siendo finalmente el gestor del túnel quien deberá decidir qué sistema de monitorización se instalará en función de los condicionantes económicos.

La metodología que se propone permite evaluar en cualquier túnel, tanto de carretera como ferroviario, diferentes configuraciones de sensores y poder identificar los sistemas que mejor se adaptan a las necesidades de cada túnel. En particular, esta Tesis Doctoral estudia el caso de túneles de carretera. Cabe destacar que esta metodología se basa en la instalación de sensores de temperatura externos a la estructura, lo que posibilita instalar estos sistemas tanto en túneles nuevos como existentes. En el caso de túneles nuevos, se podría plantear complementar este sistema con sensores embebidos en el hormigón.

Una vez definida la red de sensores (definida por la cantidad de sensores y su ubicación), se debe definir el tipo de sensores necesarios y establecerse el programa de monitorización (frecuencia de guardado de datos). En la sección 5.3 se explican los condicionantes de estas tareas y se proponen alternativas para la monitorización de temperaturas en túneles vulnerables a la acción del fuego.

En la sección 5.4 se explican las tareas de planificación de la gestión e interpretación de datos. Se detalla la información que el sistema de monitorización puede brindar durante el incendio y posibles aplicaciones de los datos registrados.

5.2 Pautas para el diseño de una configuración de sensores para la monitorización de temperaturas en túneles

El objetivo de la monitorización de temperaturas es obtener las temperaturas del gas (aire) en función del tiempo a lo largo de una superficie a la que llamaremos *superficie monitorizada*) cerca de la superficie interior del túnel (ver figura 5.1). Es importante remarcar que esta superficie es teórica y que no está materializada físicamente.

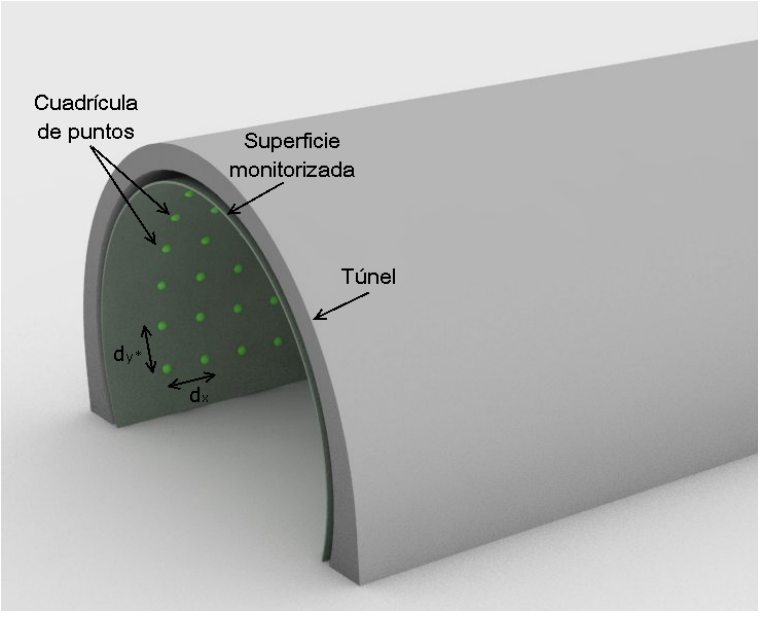


Figura 5.1: Vista 3D del túnel, superficie monitorizada y puntos de la cuadricula

A los fines prácticos se discretiza esta superficie en una cuadrícula de puntos definida por la distancia longitudinal entre puntos d_x y la distancia a lo largo del desarrollo del perímetro de la superficie d_{y*}.

Una configuración de sensores es un subconjunto de los puntos de la cuadrícula donde habrá sensores, es decir donde se registraran las temperaturas en función del tiempo. El resto de los puntos de la cuadrícula se llamaran puntos de interpolación debido a que en esos puntos las temperaturas se obtendrán por interpolación.

Para la evaluación de las configuraciones de sensores se utilizarán las temperaturas obtenidas en los puntos de la cuadrícula. La cuadrícula deberá ser lo suficientemente densa para obtener temperaturas en una gran cantidad de puntos y para no condicionar las configuraciones de sensores. En la figura 5.1 se representa un túnel con una superficie monitorizada y la definición de los puntos de la cuadrícula.

Se pueden diseñar infinitas configuraciones de sensores para el sistema de monitorización de temperaturas en túneles vulnerables a la acción del fuego. La solución óptima dependerá de las características del túnel como son su importancia, densidad de tráfico, pérdidas económicas asociadas al cierre del túnel, geometría del túnel y de las limitaciones económicas y políticas del caso en estudio.

A continuación se describen los pasos de la metodología propuesta para evaluar el comportamiento de diferentes estrategias de monitorización (definidas por la cantidad de sensores y su distribución) y obtener los datos necesarios para seleccionar la que maximiza la calidad de la información disponible minimizando el costo del sistema de monitorización.

5.2.1 Paso 1: Recopilación de información

El primer paso es recopilar la mayor información posible sobre el túnel en estudio. Dentro de la información necesaria para poder aplicar esta metodología destacan:

- Geometría del túnel. Definición de las dimensiones, tipo de sección transversal, área, longitud, pendiente longitudinal, etc.
- Tipo de túnel: bidireccional/unidireccional, cantidad de carriles de circulación.
- Materiales. Características de los materiales, presencia de capas protectoras o recubrimientos.

Es deseable contar con información de cantidad y composición del tráfico, sistemas de detección de incendio, sistemas de ventilación, protocolos de actuación en caso de incendios, proceso constructivo y modificaciones/reparaciones efectuadas.

5.2.2 Paso 2: Definición de los escenarios de fuego

Los escenarios de fuego quedan definidos por la carga de fuego, en este caso tasa de liberación de calor (HRR, *Heat Realease Rate* en inglés) en función del tiempo, la ubicación del fuego y sus dimensiones.

La elección de los escenarios de fuego es muy importante, debido a que el objetivo es encontrar un sistema de monitorización que brinde resultados adecuados para todos los escenarios de fuego. Por lo tanto se debe contemplar desde el escenario de fuego donde el incendio es de una pequeña escala al caso donde es de gran escala. En esta etapa se deberá contemplar si hay restricciones en el tipo de vehículos que pueden circular o si se prevé el paso de cargas especialmente peligrosas.

Entre las tasas de liberación de calor de diseño de fuego en túneles propuestos por diversos autores (ver la subsección 2.1.3 Curvas HRR tiempo), se propone utilizar las nueve HRR planteadas por Marlair et al., 2004. Esta referencia caracteriza las cargas de fuego por su tasa de liberación de calor máxima (Q_{max}) y propone una función de crecimiento de la tasa de liberación de calor lineal con una tasa de crecimiento (ver figura 2.6):

$$\begin{cases} \alpha_{g,l} = 10\dfrac{MW}{min} & \text{si } Q_{max} \leq 30MW \\ \alpha_{g,l} = 20\dfrac{MW}{min} & \text{si } Q_{max} > 30MW \end{cases}$$

La tabla tabla 5.1 resume las HRR propuestas, detallando las tasas de liberación máximas (Q_{max}) y ejemplificando con que vehículos de carretera se corresponden los escenarios. La tabla también propone a modo de ejemplo, dimensiones de la geometría de la carga de fuego caracterizadas por la longitud (L_{long}), ancho (L_{trans}) y altura medida como la distancia del pavimento a la carga (h). Éstas dimensiones se basan en las utilizadas por Caliendo et al., 2012.

Dependiendo de la geometría del túnel, fundamentalmente de la pendiente longitudinal y del tipo de sección transversal, se determinarán las posiciones más desfavorables de los escenarios propuestos. Usualmente resulta que la ubicación del escenario de fuego en la mitad de la longitud del túnel y en el centro de la sección transversal es una de las más desfavorables.

Tabla 5.1: Tasas de liberación de calor propuestas

HRR (MW)	Ejemplos de vehículos de carretera	L_{long} [m]	L_{trans} [m]	h [m]
5	1-2 coches	6	2	0.2
10	Furgoneta, 2-3 coches	12	2	0.2
20	Turismo, múltiples vehículos	12	2.5	0.2
30	Autobús, vehículo de cargas pesadas vacío	12	2.5	0.4
50	Camión con carga combustible	12	2.5	0.4
70	Vehículo de cargas pesadas	12	2.5	0.4
100	Vehículo de cargas pesadas (promedio)	12	2.5	0.4
150	Vehículo de cargas pesadas de fácil combustión	12	2.5	0.4
200	Tanque de combustible - Múltiples vehículos de cargas pesadas	12	2.5	0.4

5.2.3 Paso 3: Modelos de mecánica de los fluidos

Se modelará el túnel y cada uno de los escenarios de fuego planteados en la subsección 5.2.2 mediante el empleo de modelos de dinámica de los fluidos computacional (CFD, ver subsección 2.1.4).

La construcción del modelo de CFD implica definir:

1. El volumen de control, que en el caso de túnel queda definido por un volumen que contenga el ancho y alto del túnel y una longitud igual a la longitud del túnel a modelar.
2. Una geometría, incluida en el volumen de control, que represente la geometría del túnel.
3. Mallado, es decir discretizar del volumen de control.
4. Propiedades de los materiales, fundamentalmente las propiedades térmicas (conductividad, densidad, calor específico y emisividad).
5. Cargas de fuego.
6. Tiempo de simulación, siendo este el tiempo de incendio que se simulará.
7. Modelo de combustión.

8. Salidas del modelo.

Los modelos de CFD pueden producir una gran cantidad de datos de salida. Es importante solicitar al programa solo los datos que se necesitan debido que algunos datos de salida generan grandes volúmenes de información y a su vez a mayor cantidad de datos de salida mayor tiempo de cálculo se requerirá. También se debe definir la frecuencia de guardado de datos, es decir cada que intervalo de tiempo el programa guardará datos de salida.

El objetivo de estos modelos es obtener para cada escenario de fuego la evolución de las temperaturas del gas en función del tiempo en los puntos de la cuadrícula de la superficie monitorizada. En este paso deberá definirse la cuadrícula de puntos.

5.2.4 Paso 4: Planteo de configuraciones de sensores

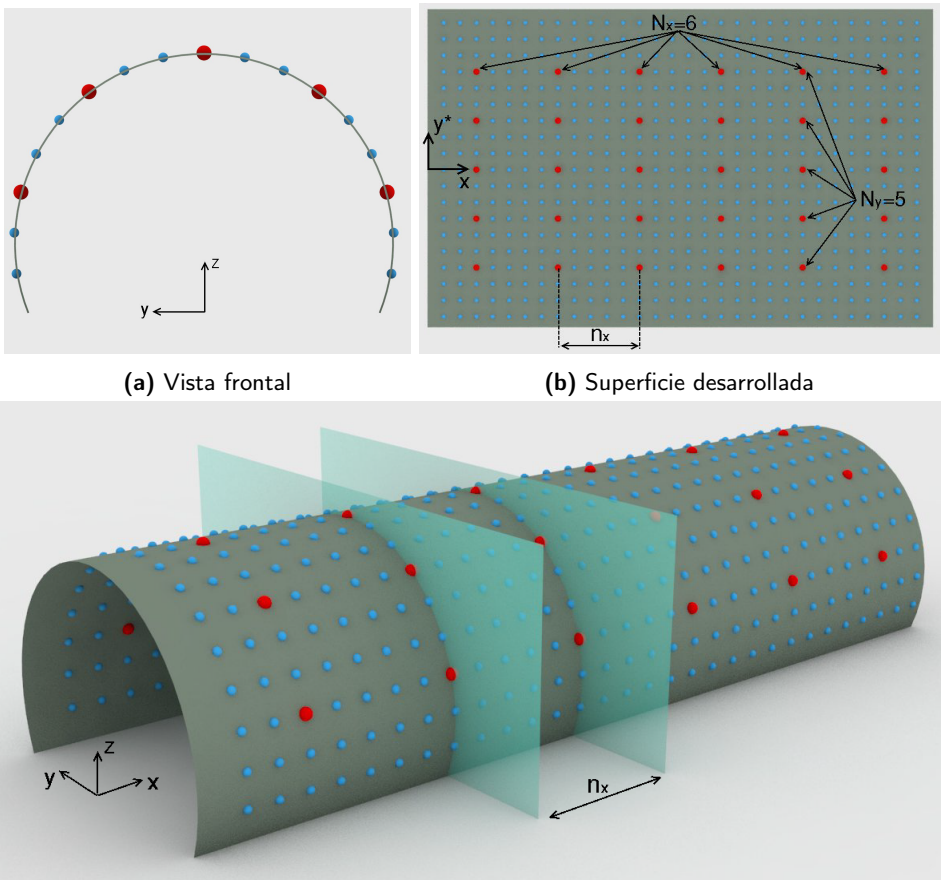
Las configuraciones de sensores tendrán una distribución regular, luego podrán ser definidas por el número de secciones transversales monitorizadas N_x, su separación longitudinal n_x, el número de sensores que tiene cada sección transversal N_y y la distribución de los mismos. La figura 5.2 muestra un ejemplo de configuración de sensores donde se monitorizan seis secciones transversales ($N_x = 6$) con cinco sensores por sección ($N_y = 5$) distribuidos como se muestra en figura 5.2a. La distribución de sensores es un factor fundamental porque dado un número fijo de sensores estos podrán distribuirse de formas muy diversas y cada una de las configuraciones resultantes tendrá un comportamiento particular.

Las configuraciones de sensores deberán plantearse teniendo en cuenta las zonas donde se producen las temperaturas máximas. Se recomiendan configuraciones con por lo menos tres sensores en la sección transversal.

5.2.5 Paso 5: Evaluación de las configuraciones propuestas

Para evaluar las configuraciones de sensores se consideran dos posibles posiciones del fuego respecto a los sensores. La primera contempla la posición más favorable, la cual considera que el centro de la carga de fuego coincide con una sección monitorizada. La segunda es el caso más desfavorable y considera que el centro de la carga de fuego esta equidistante entre dos secciones transversales con sensores. La figura 5.3 representa estas dos situaciones.

Para evaluar las configuraciones se realizará para cada una de las configuraciones planteadas en la subsección 5.2.4, para cada uno de los escenarios de fuego que se defina en la subsección 5.2.2, y para las dos posiciones descritas el proceso que se describe a continuación.



(a) Vista frontal **(b)** Superficie desarrollada

(c) Vista 3D de la superficie

Figura 5.2: Ejemplo de configuración de sensores (puntos rojos) con $N_y = 5$ y $N_x = 6$. Los puntos celestes representan los puntos de interpolación.

Cálculo de las temperaturas en todos los puntos de la cuadrícula

Para los puntos de la cuadrícula que forman parte de la configuración en estudio se asume que las temperaturas en función del tiempo son conocidas. Estas serán proporcionadas por los modelos de CFD de la subsección 5.2.3. Para el resto de los puntos (puntos de interpolación) se calcularán las temperaturas en función del tiempo a partir de los datos de los puntos de las configuraciones.

Para simplificar este proceso se desarrolla la superficie monitorizada transformando el sistema de coordenadas tridimensional (x, y, z) en un sistema de coordenadas bidimensional $(x, y*)$ como se muestra en la figura 5.2b.

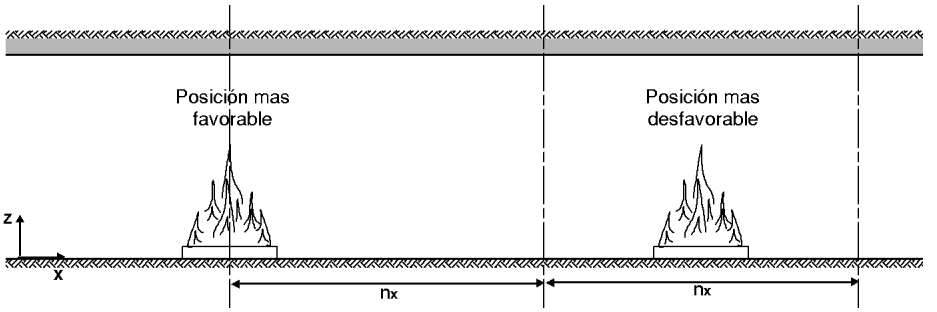


Figura 5.3: Posiciones relativas del fuego y las secciones de sensores

La interpolación es el proceso por el cuál a partir de los datos conocidos se estiman los valores de la función $T(x, y*)$ para valores de $(x, y*)$ que no forman parte del conjunto de sensores de la configuración.

Se propone realizar este proceso con varios métodos exactos de interpolación. Los métodos de interpolación son **exactos**, cuando los valores estimados en los puntos donde se conocen los datos son los valores conocidos y son **inexactos**, cuando no se cumple esta condición (Burrough et al., 1998).

A continuación se describen brevemente los métodos de interpolación con los que se propone trabajar, éstos son todos exactos (Moler, 2008):

- **Interpolación lineal a trozos**. Es la forma más simple de interpolación. Para los valores intermedios entre datos, esta interpolación calcula un valor dado por la recta que une los dos puntos contiguos dados por los datos. La función global obtenida será continua pero no derivable.

- **Vecino más cercano**. Es un método de interpolación espacial desarrollado por (Sibson, 1981). Este método busca los valores de la función en los puntos más cercanos al punto de temperatura desconocida y aplica ponderaciones sobre ellos basándose en áreas proporcionales para interpolar un valor. La función global obtenida es discontinua.

- **Interpolación cúbica a trozos con polinomios de hermite**. También conocida como PCHIP (*Piecewise Cubic Hermite Interpolating Polynomial*) es un método similar a la interpolación lineal a trozos, pero utiliza polinomios cúbicos de hermite para calcular los valores intermedios entre puntos conocidos. Estos polinomios garantizan que para datos monótonos crecientes o decrecientes la función será también monótona creciente o decreciente, por lo tanto preservan la forma de los datos. La función global obtenida será continua pero no derivable.

- **Interpolación cúbica spline**. Es una de las interpolaciones fragmentarias más utilizada. Este método interpola en cada uno de los intervalos mediante un

polinomio de grado tres de modo que la función global tenga derivada segunda continua.

- **Kriging**. Es un procedimiento de estadísticas geográficas avanzado que genera una superficie estimada a partir de un conjunto de puntos dispersados con valores conocidos. Este método se basa en regresiones de los valores observados y en la asignación de pesos de acuerdo a los valores de covarianza espacial. Aún más que con otros métodos de interpolación, para la utilización del método Kriging se debe realizar un estudio previo del comportamiento espacial de las temperaturas antes de seleccionar el mejor método de estimación para generar la superficie de salida (Stein, 1999).

Se sugiere trabajar con funciones definidas a trozos y no con un único polinomio debido a que se requerirían polinomios de alto orden y éstos tienen la tendencia a oscilar en sus extremos, lo cual generaría errores mayores.

Definición y evaluación de errores

La evaluación de las configuraciones de sensores y de los métodos de interpolación propuestos se realizará a partir de la comparación entre los valores *reales* con los valores *estimados*. Los valores reales serán los datos de temperaturas en función del tiempo obtenidos del modelos de mecánica de los fluidos (T_{FDS}) y los valores estimados son los datos obtenidos a partir de la interpolación de los datos de temperatura que medirían los sensores (T_{cal}).

Se deberán plantear los índices con los que se trabajará y evaluarlos para cada uno de los casos.

Existen diversos índices para la evaluación de los métodos de interpolaciones espaciales, estando la mayoría de ellos basados en la evaluación de interpolaciones de mecánica de los fluidos y de geotecnia. Los índices más usuales son:

- Error medio (*Mean Error*)

$$ME = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(T_{cal_i} - T_{FDS_i})$$

- Error absoluto medio (*Mean Absolute Error*)

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|T_{cal_i} - T_{FDS_i}|.$$

- Error cuadrático medio (*Mean Square Error*)

$$MSE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(T_{cal_i} - T_{FDS_i})^2.$$

- Raíz del error cuadrático medio (*Root Mean Square Error*)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(T_{cal_i} - T_{FDS_i})^2}.$$

Donde n es la cantidad de puntos de cuadrícula o un subconjunto de estos. Algunos autores consideran a los coeficientes RMSE y MAE las mejores medidas del rendimiento de la predicción. Destacando que resumen la diferencia media entre los valores estimados y los reales en las mismas unidades (Willmott, 1982).

Además de errores de este tipo se sugiere utilizar índices que tengan sentido desde el punto de vista ingenieril.

Por ejemplo se puede plantear un error medio absoluto del error relativo de los puntos que tengan temperaturas mayores a 300°C (temperatura a la cual el hormigón pierde significativamente su resistencia a compresión) y de los que tengan temperaturas mayores a 600°C (temperatura a partir de la cual el hormigón ya no es útil desde el punto de vista de la estructura). Estos índices tendrían la siguiente forma:

$$MAE(RE300) = \frac{1}{n_{300}}\sum_{i=1}^{n_{300}}\left|\frac{T_{cal_i} - T_{FDS_i}}{T_{FDS_i}}\right|.$$

$$MAE(RE600) = \frac{1}{n_{600}}\sum_{i=1}^{n_{600}}\left|\frac{T_{cal_i} - T_{FDS_i}}{T_{FDS_i}}\right|.$$

Donde n_{300} y n_{600} son la cantidad de puntos de la cuadrícula que tienen temperaturas mayores a 300 y 600°C respectivamente.

Elección del método de interpolación

Una vez definidos y evaluados los índices, se comparará para cada configuración los errores de los distintos métodos de interpolación utilizados. Esto es necesario debido a que no necesariamente el mismo método de interpolación será el que brinde mejores resultados para todas las configuraciones.

Se comparan los datos de los diferentes métodos para elegir el método de interpolación que estadísticamente muestre un mejor comportamiento. Para esto utilizamos *diagramas de cajas y bigotes* y *reglas de decisión*.

Los diagramas de cajas y bigotes nos darán una representación visual de los resultados. La figura 5.4 muestra un ejemplo de este diagrama y sus elementos característicos.

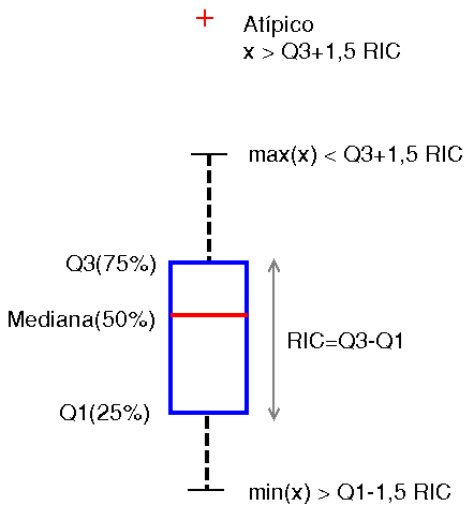


Figura 5.4: Diagrama de cajas y bigotes. Ejemplo y nomenclatura

Para construir el diagrama se deben hallar los cuartiles Q1 y Q3, que definen los bordes de la caja. Este rectángulo está dividido por un segmento que indica donde se posiciona la mediana (el segundo cuartil coincide con la mediana) y nos brinda una idea de la simetría de los datos. Los bigotes de la caja quedan definidos por los valores máximos y mínimos, sin contar los valores atípicos, que son los datos que se alejan de la caja en más de una vez y media el rango intercuartílico ($RIC = Q3 - Q1$).

Las reglas de decisión nos permiten decidir si los resultados obtenidos con los distintos métodos de interpolación presentan diferencias significativas. En el caso de que presenten diferencias significativas se realiza una comparación entre los métodos estudiados para poder determinar cuáles presentan diferencias significativas y cuáles no.

Se utilizan *pruebas no paramétricas* para comparar los errores obtenidos en los diferentes modelos utilizando los métodos de interpolación propuestos. Se emplean este tipo de pruebas ya que los datos no presentan una distribución normal, o mejor dicho se desconoce la distribución que tienen ya que se desconoce la probabilidad de ocurrencia de cada evento.

Se propone utilizar la **prueba de H de Kruskal - Wallis o prueba de H** debido a que proporciona un método no paramétrico en el análisis de varianza para clasificaciones simples o experimentos de un factor, y se pueden hacer generalizaciones (Spiegel y Stephens, 2002).

La prueba de H compara k muestras de tamaños $N_1, N_2, ...N_k$ donde el tamaño total de todas las muestras juntas está dado por $N = N_1 + N_2 + ... + N_k$. En este caso se considera a cada método de interpolación utilizado como una muestra, siendo todas del mismo tamaño. El tamaño de las muestras será el total de los escenarios de fuego planteados en todas sus posiciones y considerando las posición más favorable y más desfavorable de los sensores respecto al fuego.

Los datos de todas las muestras juntas se ordenan y la suma de rangos para las k muestras son $R_1, R_2, ..., R_k$ respectivamente. Luego se define el estadístico:

$$H = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{j=1}^{k} \frac{R_j^2}{N_j} - 3(N+1) \tag{5.1}$$

Puede demostrarse que la distribución muestras de H se aproxima a una distribución chi cuadrada, con $k-1$ grados de libertad, siempre y cuando $N_1, N_2, ...N_k$ sean todas al menos igual a 5.

Los resultados de la prueba paramétrica de Kruskal Wallis nos indican si hay diferencias significativas entre los métodos. Si no hay diferencias significativas entre los métodos, deberá utilizarse como criterio para elegir el método de interpolación más conveniente la velocidad de cálculo del método, prefiriéndose el método que más rápido obtenga las interpolaciones.

Si la prueba de Kruskal Wallis indica la existencia de diferencias significativas, se aplicaran *pruebas de comparaciones múltiples* para saber cuáles son los métodos que presentan diferencias significativas. Si hay un método que es significativamente mejor que el resto se optará por éste. Si los métodos que minimicen los errores no tienen diferencias significativas entre sí, se aplicará el criterio de velocidad de cálculo.

Es decir, como primer criterio se busca el método que proporciona menores errores de interpolación y como segundo criterio se prioriza el método que calcule más rápido.

Al final del Paso 5 tendremos una serie de índices definidos y evaluados para todas las configuraciones en todos los casos y un método de interpolación elegido para cada configuración. En el siguiente paso se trabajará directamente con los índices correspondientes al método de interpolación elegido para cada configuración.

5.2.6 Paso 6: Comparación de los errores de las configuraciones y sus costos

La planificación óptima de un sistema de monitorización es un problema con dos objetivos. Por un lado maximizar la calidad de los de datos de la monitorización estructural (minimizar los errores) y por otra lado minimizar el costo de la instalación (Orcesi y Frangopol, 2011).

Como parámetro para evaluar el costo se propone utilizar la cantidad total de sensores que requiere cada configuración para instalarse en el túnel. Éste parámetro se propone debido a su facilidad para evaluarlo y a que está relacionado al costo de la instalación.

Para cada carga de fuego se representan los índices máximos de cada configuración versus el número total de sensores. Para encontrar las configuraciones de sensores que minimizan los índices y minimizan la cantidad de sensores se obtendrán las *fronteras de Pareto* de cada carga de fuego en estudio. Esta frontera tiene las soluciones óptimas de Pareto (Deb, 2001), que son las configuraciones que no pueden mejorar ninguno de los objetivos sin degradar otro. Las configuraciones que no forman parte de la frontera de Pareto serán descartadas.

La figura 5.5 muestra un ejemplo de los diagramas que se obtendrán para cada índice y para cada carga de fuego considerados. Cada círculo representa una configuración y la línea de trazos representa la frontera de Pareto.

Cabe destacar que el objetivo de este paso es encontrar un conjunto de soluciones óptimas y no una única solución debido a que es un problema multi-objetivo.

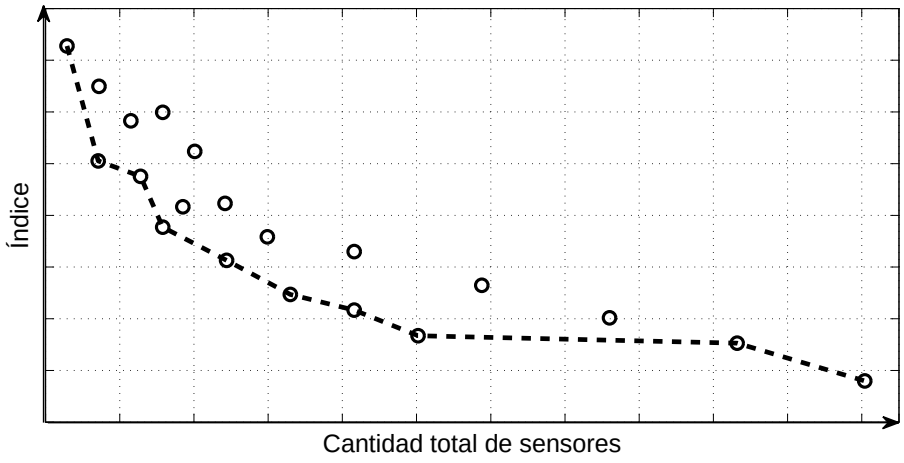


Figura 5.5: Ejemplo de frontera de Pareto para una carga de fuego determinada y 20 configuraciones de sensores

Luego la elección final de la configuración de sensores dependerá de las limitaciones económicas y de la importancia del túnel que definirá los errores máximos que pueden ser asumidos.

5.3 Definición del sistema y del programa de monitorización

La definición del sistema de monitorización depende de varios factores como el tipo de parámetro a medir, la compatibilidad con el ambiente donde se instalará, proceso de instalación, etc.

En el caso de monitorización planteado existen fundamentalmente dos alternativas la instalación de termopares o de sensores de alta temperatura ópticos. En la sección 2.3 se detallan las ventajas y desventajas generales de cada uno de estos sensores y marcas comerciales de los mismos.

A los fines prácticos los termopares tienen la ventaja de ser de fácil aplicación y robustos. Sin embargo dependiendo de la cantidad de sensores a instalarse y de la longitud del túnel, este tipo de sensores pueden ser una alternativa inviable, ya que para cada sensor se necesita un cableado, con lo cual llevaría a un sistema con demasiados metros de cableado y consecuentemente el precio y el volumen de la instalación se incrementarán.

Por el contrario, la utilización de sensores ópticos de altas temperaturas permite multiplexar los sensores con los cual se reduce significativamente el volumen y el costo del cableado. Los sensores ópticos también presentan inmunidad a las interferencias electromagnéticas, lo cual es una ventaja importante en el caso que este tipo de interferencias estén presentes. Además los sensores ópticos suelen tener tiempos de respuesta menores que los termopares. Sin embargo este tipo de sensores, como el desarrollado en la Capítulo 3, requieren delicadeza en su instalación y su aplicación a la monitorización de temperaturas no fue aún estudiado en profundidad.

Para poder evaluar el tipo de sensores a instalarse se deben estimar las temperaturas máximas. Para esto se debe realizar una envolvente de temperaturas de todos los escenarios de fuego estudiados. De esta forma podrán conocerse las temperaturas máximas que se alcanzarán en las distintas posiciones de la sección transversal.

En cada caso en particular deberán analizarse las ventajas de cada tipo de sensores y del resto de los componentes asociados al tipo de sensores (cableado, unidades lectores, conectores, etc.)

En cuanto al tipo de monitorización se propone una monitorización continua durante toda la vida útil de la estructura. De acuerdo con Glisic e Inaudi, 2007, se pueden distinguir dos aspectos en la monitorización: la medición del parámetro y el guardado

del parámetro. La frecuencia de guardado de datos depende de la velocidad de variación del parámetro monitorizado.

En el caso de la temperatura la variación será muy lenta diariamente hasta que se detecte un evento especial (incendio) durante este los cambios de temperatura serán muy rápidos. El parámetro (temperatura) deberá ser medido cada intervalos de tiempo cortos, del orden de los segundos, dependiendo de la capacidad del sistema que se utilice. Luego se deberá comparar cada medición con la medición del intervalo de tiempo anterior, si no se registran diferencias o si las diferencias son menores a un valor prefijado, por ejemplo 1°C, se procederá a guardar los datos 4 veces al día. Por el contrario si se registran diferencias mayores al valor prefijado, se deberán guardar todos los datos hasta que se desactive manualmente el guardado de datos.

El valor prefijado dependerá de la frecuencia de medición del parámetro, cuanto menor sea el intervalo de tiempo entre mediciones del parámetro menor será el valor prefijado y de las variaciones de temperaturas diarias en el interior del túnel.

5.4 Gestión de datos del sistema de monitorización de temperaturas

La gestión de datos del sistema de monitorización puede ser básica o avanzada. Un manejo básico de la información de un sistema de monitorización consta de leer los sensores, almacenar los datos y permitir el acceso a la información. En la estrategia planteada se propone un manejo avanzado de la información contemplando también la interpolación, visualización, interpretación y análisis de los datos. Para esto es imprescindible desarrollar un software que sea capaz de leer los sensores, interpolar las lecturas y visualizar los datos. El desarrollo de este software no es objeto de esta investigación. Sin embargo se plantean las funciones que debe realizar el mismo.

El software de gestión de los datos debe como primer paso obtener las temperaturas de los puntos monitorizados e interpolar los datos al resto de los puntos, utilizando el método de interpolación elegido en la fase de diseño de la red de sensores. Luego deberá permitir la visualización de temperaturas del aire a lo largo del túnel en tiempo real.

Es aconsejable contar con una visualización interactiva de datos. Por ejemplo, disponer de una imagen global con las temperaturas en función del tiempo de la superficie monitorizada desarrollada desde la que se pueda acceder a cada sensor en particular y obtener su curva de temperatura tiempo. En el software también es recomendable incorporar temperaturas críticas que emitan alarmas. Se pueden definir temperaturas críticas para los bomberos, o para la estructura.

Disponer de los datos de temperatura en tiempo real es muy importante para mejorar la evacuación de personas y para evaluar la eficacia de las medidas de extinción del fuego.

Una vez finalizado el incendio, los datos registrados pueden tener diversas aplicaciones. El uso principal de estos datos es brindar información para el diagnóstico de la estructura. Para esto se deberá realizar un modelo de transferencia de calor donde los datos de entrada son las curvas temperaturas tiempo obtenidas por el sistema de monitorización. El resultado del modelo de transferencia de calor brindará información sobre las temperaturas alcanzadas por la estructura en función del tiempo y a partir de ellas se pueden deducir las propiedades de los materiales y la extensión de las áreas afectadas por cada nivel de daño.

En el caso de un incendio severo conocer las temperaturas alcanzadas por la estructura en función del tiempo, nos permite identificar zonas que por ejemplo no pueden ser reparadas y zonas que no fueron afectadas. A su vez conocer las temperaturas máximas alcanzadas por la estructura en distintos puntos y el tiempo al cual estuvo expuesta a estas temperaturas facilitará la interpretación de los daños observados.

En caso de incendio leve, conocer la historia de temperaturas a la cual fue sometida la estructura permite identificar rápidamente si hay zonas que requieren algún tipo de reparación y disminuir los tiempos necesarios para poder volver a poner en funcionamiento el túnel. Ya que por ejemplo, si las temperaturas alcanzadas fueron bajas se puede saber que la estructura no sufrió ningún daño en forma rápida.

Cabe destacar que los datos obtenidos por el sistema de monitorización de temperaturas deben ser interpretados junto a una inspección visual del túnel y un análisis de las causas del incendio, no debiéndose nunca interpretar estos datos en forma aislada.

Las hipótesis de las causas del incendio pueden ser modeladas mediante el empleo de modelos de mecánica de los fluidos. Luego comparando las temperaturas registradas con las que se obtienen de los modelos de mecánica de los fluidos se pueden validar las hipótesis de los escenarios de fuego. Éste tipo de modelos puede brindar mucha información adicional que permita comprender mejor las causas y el desarrollo del incendio. En el Capítulo 6 se muestra un ejemplo de cómo sería este proceso mediante el empleo de los datos obtenidos de un ensayo de fuego.

5.5 Conclusiones

La aplicación de la estrategia de monitorización planteada permite conocer, en el caso de un incendio, la historia de temperaturas en función del tiempo permitiendo disminuir la cantidad de ensayos a ejecutarse para realizar el diagnóstico y propuesta de reparación de la estructura. Por lo tanto se disminuirá el *tiempo* que se tarde en realizar el diagnóstico, permitiendo reducir el tiempo de cierre del túnel.

La monitorización de temperaturas, por tanto, es una medida que, a priori, apunta a la disminución de las consecuencias económicas. Sin embargo, conocer las temperaturas en tiempo real en distintos puntos del túnel permite mejorar las tareas de evacuación de personas y de extinción del incendio; con lo cual también conlleva una reducción en las pérdidas de vidas. Sin embargo, al menos hasta donde alcanza el conocimiento de los autores, hasta el momento no se ha considerado la monitorización de temperaturas como una medida de reducción de riesgo en túneles.

Se brindan pautas para diseñar una red de sensores de un sistema de monitorización de temperaturas. El diseño de una red de sensores es un problema multiobjetivo, por lo cual no se obtiene una solución única sino un conjunto de soluciones óptimas (diagramas de Pareto). Luego el dueño o propietario del túnel deberá tomar la decisión final. Este procedimiento brinda a la persona que tome la decisión un criterio para elegir.

Capítulo 6

Deducción del escenario de incendio y validación de modelos de FDS a partir de datos de monitorización de temperaturas. Aplicación al caso del túnel Virgolo.

6.1 Introducción

Conocer el escenario de fuego es importante para poder determinar las causas del incendio y la gravedad del mismo. La **tasa de liberación de calor** (**HRR**) es un parámetro fundamental para magnificar la severidad del incendio.

La tasa de liberación de calor de un incendio en un túnel depende de diversos factores como ser la geometría del túnel, los vehículos involucrados y sus cargas y las condiciones de ventilación. La separación de los vehículos y la naturaleza de las cargas de los vehículos juegan un papel fundamental ya que de esto depende que el fuego se pueda extender hacia otros vehículos.

Existe un gran esfuerzo por vincular las temperaturas alcanzadas en un túnel con las tasas de liberación de calor. Ingason (2006) e Ingason y Lönnermark (2012) resumen las HRR máximas y las temperaturas máximas alcanzadas en diversos ensayos de fuego a escala real.

Entre los métodos para medir la HRR durante ensayos de fuego se puede mencionar el calorímetro de consumo de oxígeno, masa combustible consumida o flujo de calor convectivo. Sin embargo estos métodos no son posibles de utilizar en el caso de un incendio real.

Algunos autores presentan métodos para estimar la tasa de liberación de calor en recintos cerrados basados en las temperaturas medidas. Por ejemplo Overholt y Ezekoye (2012) presentan una metodología para determinar la tasa de liberación de calor en función del tiempo a partir de las temperaturas medidas en el recito. Jahn et al. (2011) presentan una metodología para predecir el crecimiento de incendios en recintos cerrados basados en técnicas de asimilación de datos de las temperaturas registradas por sensores. Es necesario destacar que estas metodologías son de aplicación solo en recintos cerrados y en principio en ensayos de laboratorio, debido a que las temperaturas que utilizan como entrada de datos, son temperaturas en puntos en el centro de la sección transversal y en diferentes alturas, lo que no permitiría el uso normal de una estructura o túnel. Sin embargo, estos trabajos remarcan la importancia de conocer las temperaturas a lo largo de un incendio y la necesidad de estimar las tasas de liberación de calor.

Un proceso para calcular la **tasa de liberación de calor en incendios en túneles**, que tienen un comportamiento muy diferente a los recintos cerrados, no se ha estudiado aún en profundidad. Un método para obtener la HRR en función de las temperaturas registradas fue presentado por Migoya et al. (2011). Esta metodología compara las temperaturas registradas con una base de datos que contiene las temperaturas simuladas por sucesivas numeraciones numéricas. Sin embargo esta metodología fue presentada para HRR de hasta 25 MW y considerando una única posición del fuego, que es un dato de entrada de la metodología.

En este contexto, el objetivo de este capítulo es plantar una **metodología para a partir de las temperaturas registradas por un sistema de monitorización** y una recopilación de datos del incendio, poder **deducir el escenario de fuego** en términos de tasa de liberación de calor en función del tiempo. La figura 6.1 muestra la metodología planteada.

Tomando como datos de partida las temperaturas medidas en un ensayo de fuego, sobre el cual se tienen suficientes datos, se aplica la metodología planteada para validar la posibilidad de deducir el escenario de fuego a partir de datos de una monitorización de temperaturas.

En este capítulo se trabaja con los datos de uno de los tres ensayos de fuego realizados en el túnel del Virgolo en Bolzano, Italia. Estos ensayos formaron parte del proyecto UPTUN. Este ensayo resulta adecuado por disponerse de suficientes datos (Bergmeister, 2006; Bergmeister, 2008) tanto de la toma de datos como de la geometría del túnel.

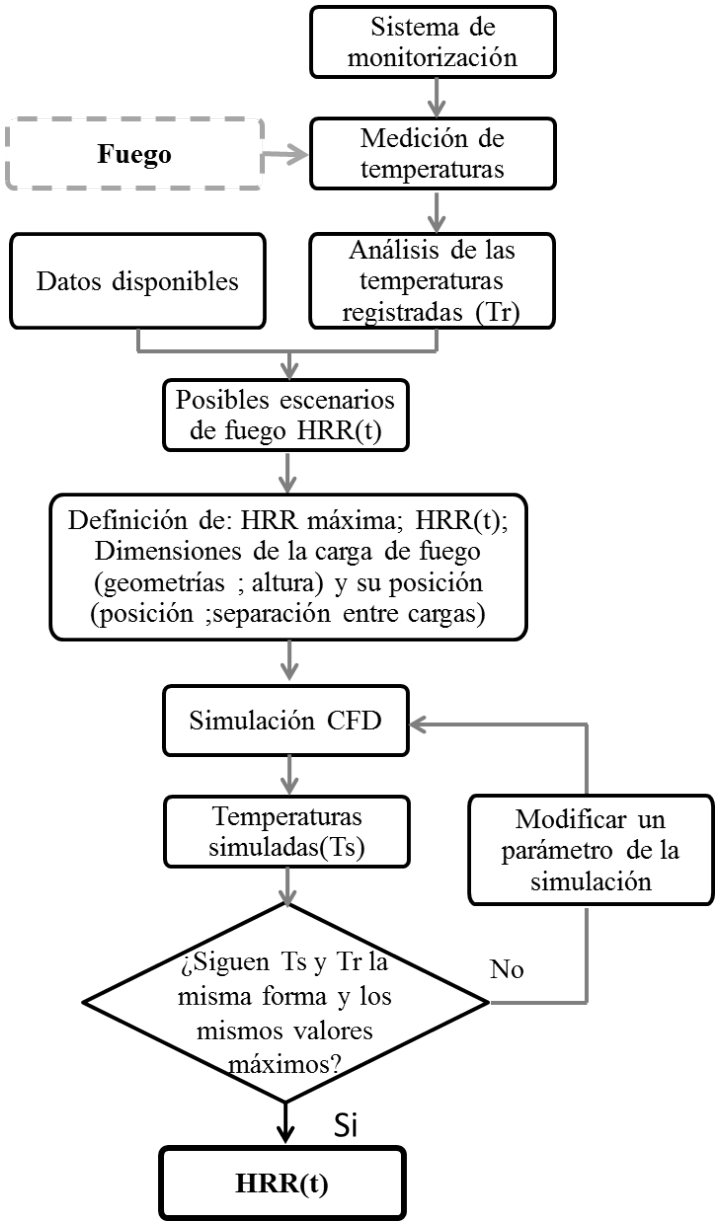


Figura 6.1: Estrategia para la deducir el escenario de fuego a partir de datos de monitorización de temperaturas

A través de este proceso también, se **valida el modelo de mecánica de los fluidos del túnel**, que en el Capítulo 7 se utilizará como base para aplicar las pautas de monitorización de temperaturas.

6.2 Ensayo de fuego en el túnel Virgolo

En el marco del proyecto europeo UPTUN se han realizado varios ensayos de fuego en el túnel Virgolo de la autovía del Breno. El objetivo general de los ensayos era investigar diferentes sistemas para hacer los túneles más seguros. En particular los ensayos incluyeron el estudio de:

- el comportamiento y procesos de limpieza de varios tipos de hormigón proyectado,
- sistemas de detección y supresión,
- comportamiento de las personas dentro del túnel y vías de escape,
- el comportamiento de fijaciones a altas temperaturas.

Para esto se desarrollaron 4 ensayos de fuego y varios ensayos de laboratorio. Dentro de los ensayos de fuego se incluye un ensayo en un mini-túnel y tres ensayos de fuego a escala real.

El ensayo en el mini-túnel consistió en un ensayo dentro de un compartimiento de placas de hormigón donde se generó un incendio de aproximadamente 10MW, en este ensayo se estudió el comportamiento de sistemas de fijaciones, y del hormigón proyectado y se evaluó la carga de fuego sobre el hormigón.

Las características de los ensayos de fuego a escala real se resumen a continuación:

- **Ensayo 1**. Carga de fuego de 10 MW. En el ensayo se colocan dos barreras auto hinchables (*tunnel plug*, en inglés) a 30 y 60 m del fuego. Se evalúa el comportamiento de éstas barreras y el de las personas ante un incendio.
- **Ensayo 2**. Carga de fuego de 20 MW. A los 5 minutos de iniciado el ensayo se activan los rociadores de agua. Se estudia el efecto de los mismos.
- **Ensayo 3**. Carga de fuego de 30 MW. A los 10 minutos de iniciado el ensayo se activan las Cortinas de agua y luego los rociadores. Se evalúa el comportamiento de ambos sistemas.

La duración de cada ensayo fue de aproximadamente 30 minutos. En todos los casos las cargas de fuego fueron generadas en bateas de combustible diésel. Cada batea contenía

aproximadamente 70 litros y una potencia aproximada de 5 MW. Las distintas cargas de fuego se lograron prendiendo distintas cantidades de bateas de fuego. El área de las bateas es aproximadamente entre 1,5m^2 y 2m^2. Se desconocen las dimensiones exactas de las bateas, la separación entre ellas y su ubicación en el túnel. La figura 6.2 muestra un esquema de la posición de las bateas en el ensayo.

En este capítulo se trabaja con los datos obtenidos en el Ensayo 3 hasta la activación de las cortinas de agua. Utilizar el ensayo 1 nos genera otra dificultad debido a la presencia de las barreras auto hinchables. En el ensayo 2 el tiempo hasta la activación de las medidas de extinción de incendio es menor que en el ensayo 3, permitiéndonos trabajar con menor tiempo de ensayo que el Ensayo 3.

Figura 6.2: Esquema del ensayo de fuego (Bergmeister, 2006).

Durante los ensayos se midieron temperaturas del gas y del hormigón a diferentes profundidades, la concentración de dióxido de carbono, la velocidad del aire y la visibilidad. Información detallada sobre todas los ensayos realizados y los registros de los diversos parámetros, puede consultarse en (Bergmeister, 2006).

6.2.1 Descripción del túnel

El túnel del Virgolo es un túnel de dos tubos con dos carriles unidireccionales cada uno y con una sección tipo herradura con una altura de 6,5 m y un ancho de 10 m, resultando en una sección transversal de 54 m^2. La longitud total del túnel es de 860 m, siendo su trazado en planta recto. La pendiente longitudinal del túnel es un parámetro desconocido.

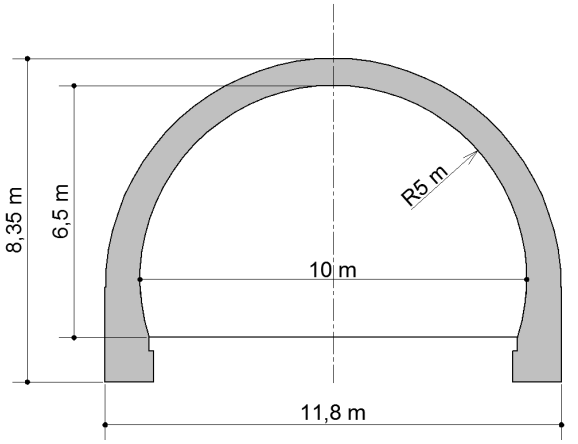


Figura 6.3: Geometría de la sección transversal del túnel

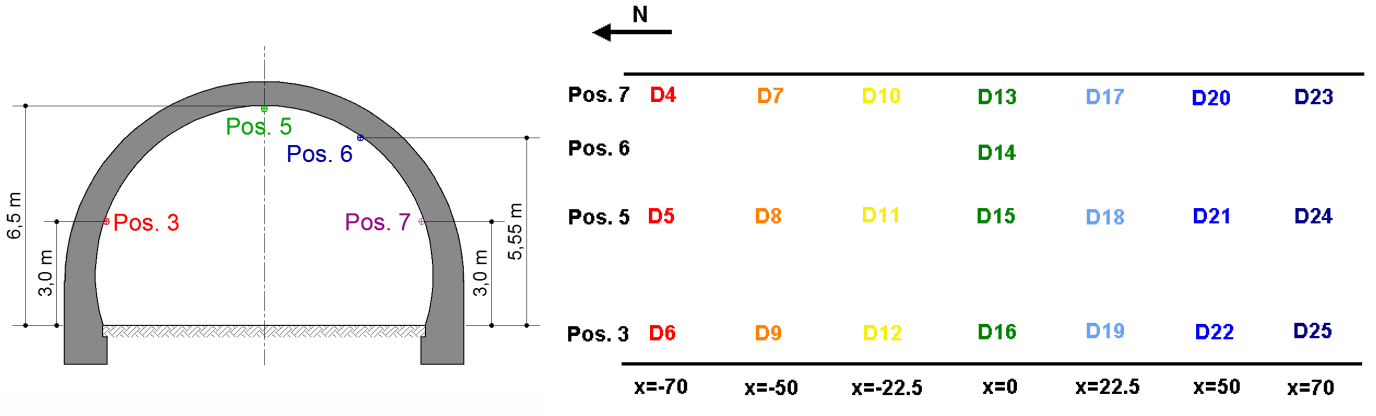
El túnel es de hormigón C20/25. Como parte del ensayo se colocaron 6 tipos de capas de hormigón proyectado en franjas de aproximadamente tres metros de ancho cada una. Estas franjas cubren una mitad de la superficie interior del túnel desde el intradós. Las características térmicas de las mismas no se conocen, motivo por el cual se modela todo el túnel con un único tipo de hormigón.

6.2.2 Sensores colocados en el ensayo

Termopares tipo T de la marca Newport Omega se han utilizado para medir las temperaturas. Estos termopares pueden medir temperaturas de hasta 1200°C.

Los termopares se colocaron en la cercanía de la superficie de hormigón y embebidos a diferentes profundidades. Los registros de las temperaturas del gas son los que se utilizaron en este estudio. Se establecieron tres posiciones en la sección transversal a lo largo de las cuales se registraron temperaturas en 7 puntos distribuidos en un ancho de 140m (70m a cada lado del fuego).

La figura 6.4a muestra las posiciones de los sensores en la sección transversal del túnel. La posición 5 se encuentra en el intradós del túnel a 6,5m de altura y la posición 3 y



(a) Sección transversal

(b) Vista superior

Figura 6.4: Sensores de temperatura utilizados en el ensayo. Posiciones y nomenclatura

la posición 7 a 3 m de altura localizadas en el lado oeste y este respectivamente. La disposición y la nomenclatura de los sensores se detallan en la figura 6.4.

Además se midieron velocidades del aire. Los anemómetros utilizados funcionan correctamente hasta temperaturas de 70°C. A 30 metros hacia cada lado del fuego se colocaron 2 anemómetros a 2 y 4 m de altura, a 50cm de la superficie del túnel.

6.2.3 Datos obtenidos en el ensayo

A continuación se muestran las temperaturas del aire (gas) registradas por los termopares durante el ensayo 3. El inicio del fuego se da en el minuto 2 del registro de temperaturas y en el minuto 9 de iniciado el ensayo se activan las cortinas de agua. Si bien hay registros de temperaturas hasta el minuto 25 del ensayo, en el presente trabajo se muestran los resultados hasta el minuto 13, ya que luego del minuto 9 los resultados se ven modificados por la activación de las cortinas de agua.

Las figuras 6.5, 6.6 y 6.7 muestran las temperaturas registradas por los termopares ubicados a distintas distancias del centro del fuego en correspondencia con la posición 7, 5 y 3 respectivamente de la sección transversal. Para facilitar su interpretación cada color representa una distancia respecto al eje x.

Se nota que las temperaturas a lo largo del túnel no son simétricas respecto al centro del fuego, esto podría deberse a la presencia de una pendiente longitudinal o a la presencia de algún tipo de ventilación. Como no hay sistemas de ventilación en el

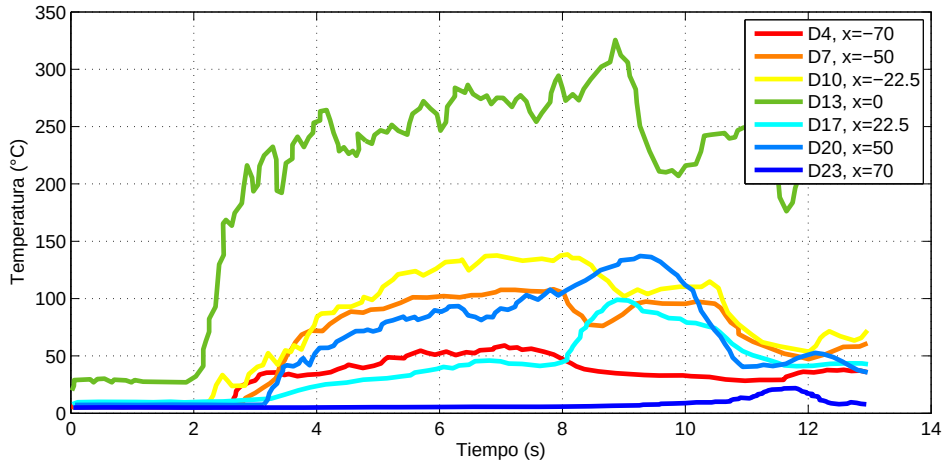


Figura 6.5: Temperatura registradas por los termopares del ensayo en la posición 7 de la sección transversal para diferentes posiciones en longitud.

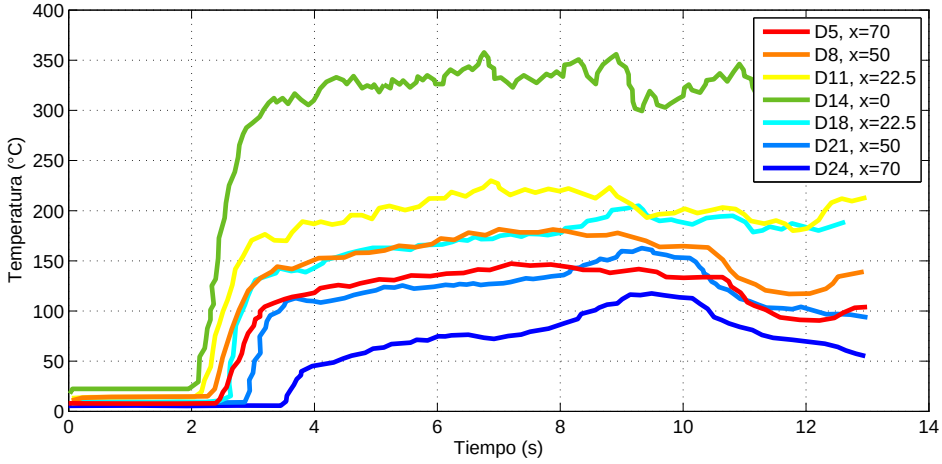


Figura 6.6: Temperatura registradas por los termopares del ensayo en la posición 5 de la sección transversal para diferentes posiciones en longitud.

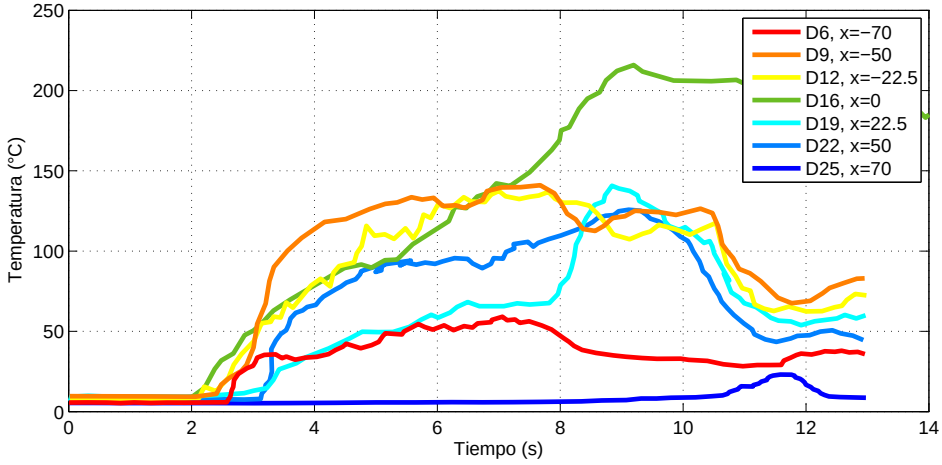


Figura 6.7: Temperatura registradas por los termopares del ensayo en la posición 3 de la sección transversal para diferentes posiciones en longitud.

túnel y no se registran velocidades del aire significativas, se supone que existe una pendiente longitudinal.

La temperatura registrada por los termopares al inicio del ensayo es del orden de los 20°C y las temperaturas máximas están en el rango de los 300 - 350°C. En un caso real estas temperaturas máximas sugerirían que los vehículos involucrados en el incendio son coches.

Las temperaturas registradas por los sensores a lo largo de la posición 3 son menores que las registradas por la posición 7, esto evidencia que la carga de fuego no está centrada respecto a la sección transversal.

En el minuto 9 de las gráficas (minuto 7 de iniciado el fuego) se activaron las cortinas de agua, lo cual también se ve reflejado en los registros de temperaturas.

En la figura 6.6 se observa claramente que las curvas de todos los sensores en el intradós del túnel registran un rápido aumento de la temperatura seguido de un régimen casi estacionario. Las temperaturas máximas registradas por los termopares presentan una secuencia lógica respecto a la distancia del fuego.

En la figura 6.5 las curvas D10, D7 y D4 presentan una relación correcta entre las temperaturas máximas y su distancia al fuego. D17 registra valores inferiores a D20 cuando debería ser al revés ya que D17 está más cerca del fuego que D20.

Las temperaturas registradas por los sensores en la posición 3 no presentan la forma esperada (figura 6.7). Las temperaturas registradas por D16 presentan un crecimiento más lento que el esperado y durante los 5 minutos iniciales del fuego no es la curva con mayor temperatura de las de la posición 3. Por otro lado D19 también presenta un crecimiento muy lento, registrando temperaturas inferiores a las de D22.

La figura 6.8 representa las temperaturas en la sección transversal correspondiente al centro del fuego (x=0) en las posiciones 3, 5, 6 y 7. Además a los fines comparativos se gráfica la temperatura registrada por el termopar embebido en el hormigón a 5mm de la superficie en correspondencia con la posición D16.

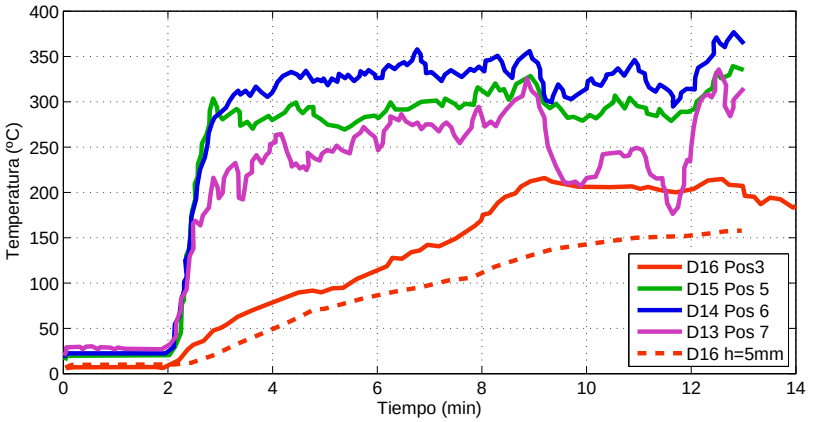


Figura 6.8: Temperatura registradas por los termopares del ensayo en las posiciones D13 a D16 y por el termopar embebido en el hormigón a 5mm de la superficie en la posición D16.

Durante el primer minuto de iniciado el fuego se observa un crecimiento muy rápido de las temperaturas registradas por los termopares D13, D14 y D15, mostrando las tres curvas la misma pendiente, mientras que D16 presenta una pendiente mucho inferior. Esto puede deberse a que el termopar en la D16 no esté bien colocado y en vez de medir temperatura del gas esté midiendo temperatura de la superficie (o de la capa límite). A los fines comparativos, se ha representado el registro de temperaturas del hormigón a una profundidad de 5mm desde la superficie en correspondencia con D16 (línea de trazo). Puede notarse que la temperatura registrada por D16 que debería ser temperatura del gas tiene un comportamiento más parecido a la temperatura del hormigón.

Detectar posibles fallos en las mediciones es un paso muy importante para comprender mejor las diferencias entre las temperaturas de los modelos y las registradas.

6.3 Modelos de mecánica de los fluidos

Para obtener un escenario de fuego que se aproxime suficientemente al real se plantea modelar el túnel en estudio y simular en él diferentes escenarios de fuego. El objetivo de estas simulaciones es obtener las temperaturas del gas en los mismos puntos donde se registraron en el ensayo para poder compararlas.

Entre los programas de mecánica de los fluidos computacional (CFD, *Computer Fluid Dynamics*) existentes, se opta por trabajar con el software FDS (*Fire Dynamics Simulator*, (McGrattan et al., 2004)) debido a que ha sido empleado con éxito en el modelado de fuego en túneles por otro autores como McGrattan y Hamins, 2006; Cheong et al., 2009.

FDS es el procesador de cálculo, por lo cual se necesita generar en forma independiente los archivos de entrada (archivos de texto) y luego procesar los archivos de salida. Para la visualización de los resultados de salida se ha utilizado el software Smokeview (Forney y McGrattan, 2007) y para procesar los resultados numéricos se ha utilizado Matlab (MATLAB, 2011).

La generación de un modelo de FDS incluye definir la geometría del mismo, la carga de fuego, las características de los materiales, el volumen de control y las condiciones de contorno.

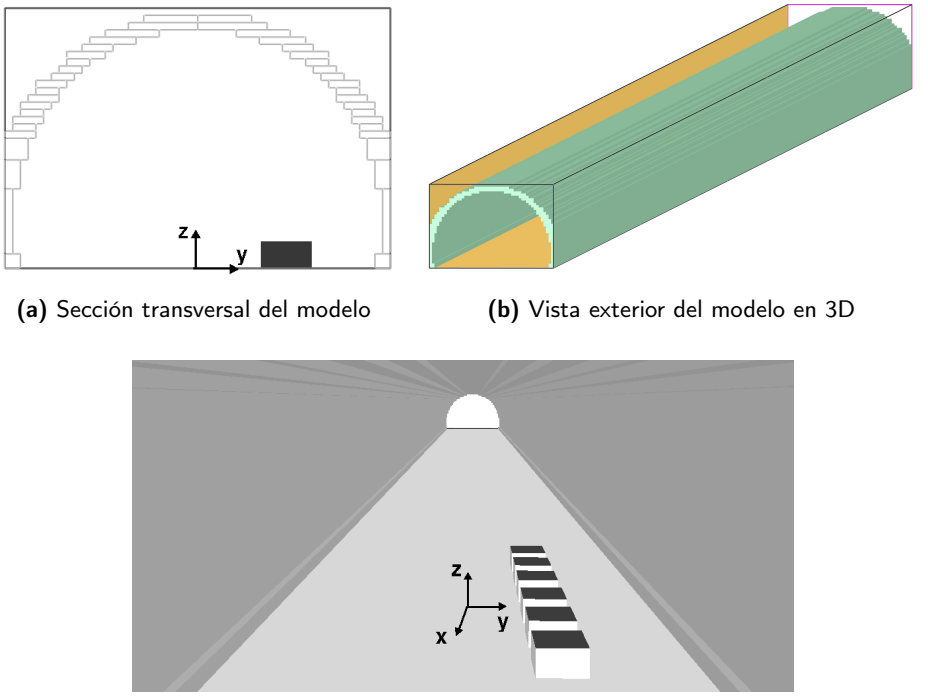
Como recurso computacional para calcular los modelos se ha utilizado el cluster para proceso paralelo masivo Rigel, compuesto por 72 nodos. Los nodos del cluster son BX920S3 de Fujitsu sobre chasis blade BX900S2. Este modelo de blade incorpora 18 servidores por chasis. El cluster está formado por un total de 4 chasis. Cada nodo del chasis tiene dos procesadores Intel Xeon $E5-2450$ 16T y 64 GB de memoria RAM DDR3.

6.3.1 Descripción del modelo e incógnitas del problema

La definición de la geometría del modelo y sus límites son el primer paso a establecer en un modelo de dinámica de los fluidos. El modelo consiste en un prisma rectangular, con una sección transversal de 10,2m de ancho por 7 m de alto y una longitud igual a la longitud de túnel a modelar (figura 6.9).

El eje x del modelo (eje longitudinal del túnel) tiene su origen en el centro del túnel para hacer coincidir el sistema de coordenadas con las coordenadas utilizadas en el ensayo. El sistema de coordenadas del modelo se encuentra representado en la figura 6.9c.

Definir qué longitud del túnel es necesario modelar para representar adecuadamente las condiciones de borde es muy importante para no alterar las condiciones de contorno (Rhodes, 2012). En el Apéndice B, sección B.1 se estudia la longitud del túnel necesaria de ser modelada. En el caso de no alterar las condiciones de contorno, se podría modelar una longitud menor a la total porque el objetivo del modelo es conocer las temperaturas en la parte central del túnel.



(a) Sección transversal del modelo

(b) Vista exterior del modelo en 3D

(c) Vista interior del modelo en 3D

Figura 6.9: Geometría del modelo

El túnel se modeliza utilizando sólidos prismáticos aproximando la curvatura del túnel a tramos rectos como se muestra en la figura 6.9a ya que en FDS no es posible modelizar sólidos curvos. A su vez, para prevenir la aparición de vórtices en las esquinas de los prismas se utilizó la opción "sawtooth". En el Apéndice B, sección B.2 se estudia el mallado y el tamaño de celda del modelo. En el modelo inicial se utilizó un tamaño de celda de 0,2 m de lado.

A todos los sólidos que forman el túnel se les asigna el material "Hormigón". Las características térmicas del material fueron definidas de acuerdo al eurocódigo (CEN-EN 2-1-1, 2004). Como se mencionó anteriormente en una parte del túnel se aplicaron diferentes capas de recubrimiento, como se desconocen las propiedades térmicas de éstas se simplifica el modelo utilizando un único tipo de material.

Dentro de los parámetros desconocidos se encuentra la pendiente longitudinal del túnel, i (%), este parámetro de la geometría del túnel que se estudia en la subsección 6.3.2. La pendiente longitudinal del túnel se contempla en el modelo girando el vector gravedad.

En los extremos del túnel se definen condiciones de contorno abiertas, que permiten tanto la entrada como la salida de los fluidos en forma libre. Como condiciones iniciales del modelo se plantea una temperatura constante en todo el túnel de 20°C (de acuerdo con las temperaturas registradas durante del ensayo).

El escenario de fuego es la principal incógnita del problema. Partiendo de los datos del ensayo se definen las siguientes variables:

- Tasa de liberación de calor máxima: Q_{max} [MW]
- Tasa de liberación de calor en función del tiempo: Q(t)
- Altura de la carga de fuego: h [m]
- Área de las bateas: $A_f[m^2]$, definida por la dimensión paralela al eje longitudinal, L_{long} [m], y la dimensión paralela a la sección transversa, L_{trans} [m].
- Posición de las bateas respecto en la sección transversal: d [m], medido desde el eje de la sección transversal al eje de la batea.
- Distancia libre entre bateas: s[m]

La variación de estos parámetros y de la pendiente longitudinal del túnel se estudian en las secciones siguientes.

La figura 6.10 muestra un esquema de la posición de la carga de fuego y de las variables que la definen en la planta del túnel.

Se define un tiempo de simulación del incendio de 10 minutos (600 segundos) y un escenario de fuego inicial con los siguientes parámetros: $Q_{max} = 30MW$ y una curva

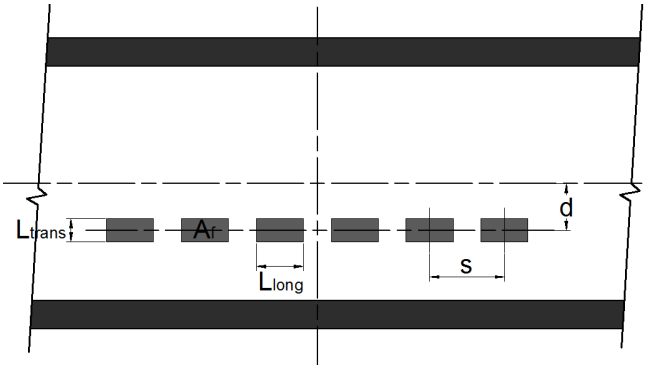


Figura 6.10: Planta túnel. Esquema la carga de fuego.

de crecimiento lineal de la tasa de liberación de calor de cero a Q_{max}, alcanzando el 80 % de este valor a los 45 segundos y el 100 % a los 240 segundos. Luego se mantiene constante hasta el segundo 600. Estos valores de tiempo hacen referencia al eje de tiempo del modelo y se proponen a partir de la observación del crecimiento de las temperaturas registradas en el ensayo.

Es importante destacar que en el modelo el tiempo cero (t=0) es el momento donde empieza el fuego, mientras que en el ensayo el tiempo cero es cuando comienza la toma de datos que es 108 s antes del inicio del fuego. Por lo tanto para poder comparar los resultados, en las gráficas se desplazará el eje de tiempo del modelo 108 segundos. Cuando se haga referencia a tiempos estarán referidos al eje de tiempo del ensayo, excepto que se aclare lo contrario. En la subsección 6.3.5 se estudian distintas funciones de crecimiento de la tasa de liberación de calor.

Las bateas se modelan como seis sólidos prismáticos de altura $h = 0,6m$, con ancho $L_{trans} = 1m$ y un largo $L_{long} = 2m$, resultando el área de cada batea $A = 2m^2$. Como posiciones iniciales de las bateas se adoptan un distancia $d = 2m$ y una separación entre bateas $s = 1,25m$. A la cara superior de cada batea se le asigna la carga de fuego, como una carga por metro cuadrado:

$$HRRPUA = \frac{30000KW}{6\ .\ 2m^2} = 2500\frac{KW}{m^2} \tag{6.1}$$

Como modelo para la resolución de las ecuaciones de cantidad de movimiento se optó por el modelo LES con un parámetro de coeficiente de Smagorinsky de 0.20 (valor por defecto de FDS). En este modelo se calculan los remolinos de mayor tamaño mientras que los de tamaños más pequeños se simulan a partir del coeficiente de Smagorinsky mediante aproximaciones empíricas. En cuanto al modelo de combustión se utiliza el

modelo de fracción de mezcla que es el modelo por defecto de FDS y el propuesto por McGrattan et al., 2010 para los modelos LES.

Como datos de salida, FDS permite registrar entre otros parámetros, la evolución temporal de la temperatura de la celda y la temperatura del termopar modelado. Esta última se diferencia de la temperatura de la celda en que tiene en cuenta el diámetro del termopar y su emisividad, lo cual genera un pequeño desfase entre ambas.

Como el objetivo es poder comparar las temperaturas registradas por los *termopares físicos* colocados en el ensayo con las temperaturas obtenidas por el modelo, se optó por definir *termopares modelados* de 2 mm de diámetro en los lugares donde en el ensayo había termopares.

6.3.2 Análisis de la pendiente longitudinal del túnel

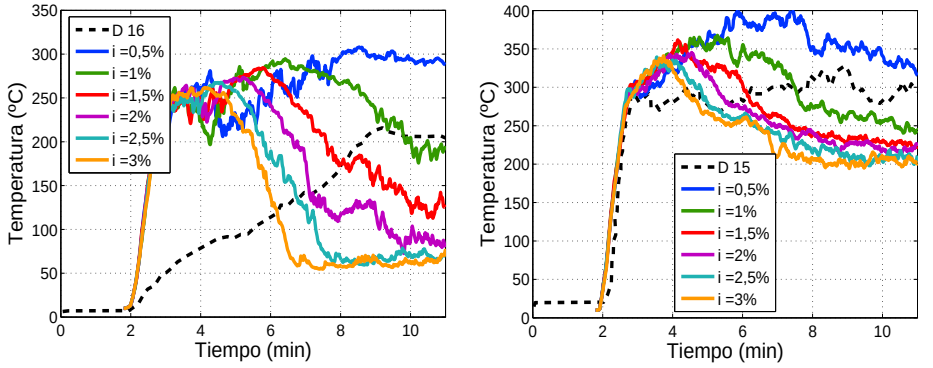
Este parámetro es un parámetro fundamental ya que condiciona el comportamiento de los humos y del incendio. De los parámetros que se variarán en el modelo, la pendiente longitudinal es el único parámetro de la geometría del túnel, que por no conocerse se debe estudiar.

La tabla 6.1 resume los modelos estudiados. Estos modelos tienen las mismas características geométricas que el modelo V_860_30_M4 (ver sección B.2). Las únicas modificaciones realizadas son la pendiente longitudinal y la HRRPUA.

El parámetro HRRPUA fue modificado porque en los modelos anteriores se observó que las temperaturas alcanzadas en la sección central del túnel eran mayores a las del ensayo. El valor de HRRPUA se disminuyó de 2500$\frac{KW}{m^2}$ a 2400$\frac{KW}{m^2}$, lo cual se ve reflejado en la tabla 6.1 en el valor de Q_{max}.

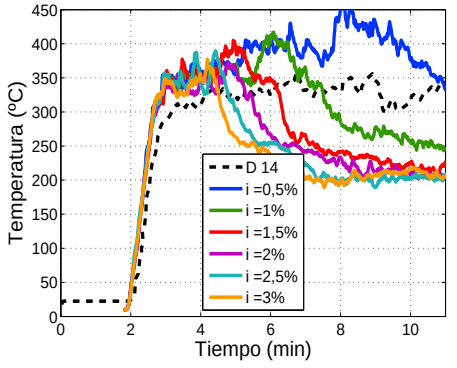
Tabla 6.1: Resumen de los modelos variando la pendiente longitudinal

Nombre	$i[\%]$	Q_{max} [MW]	Q(t)	h [m]	L_{long} [m]	L_{trans} [m]	s [m]	d [m]
V_860_i05	0,5	28,8	f1	0,6	2	1	1,2	2
V_860_i10	**1,0**	28,8	f1	0,6	2	1	1,2	2
V_860_i15	1,5	28,8	f1	0,6	2	1	1,2	2
V_860_i20	2,0	28,8	f1	0,6	2	1	1,2	2
V_860_i25	2,5	28,8	f1	0,6	2	1	1,2	2
V_860_i30	3,0	28,8	f1	0,6	2	1	1,2	2

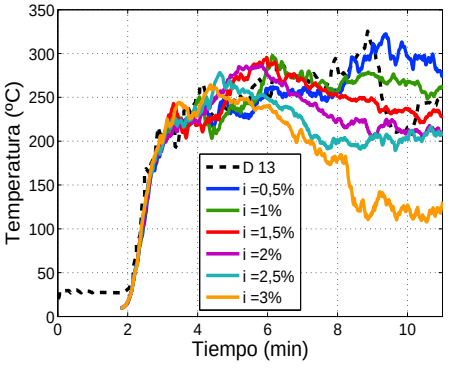


(a) D16 x=0 posición 3

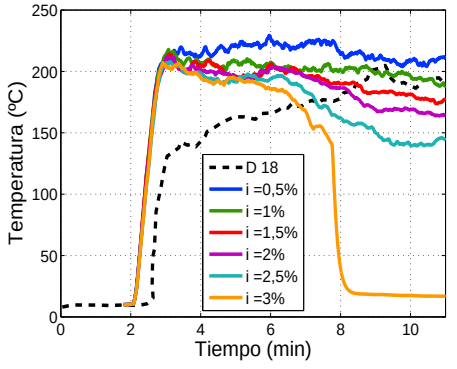
(b) D15 x=0 posición 5



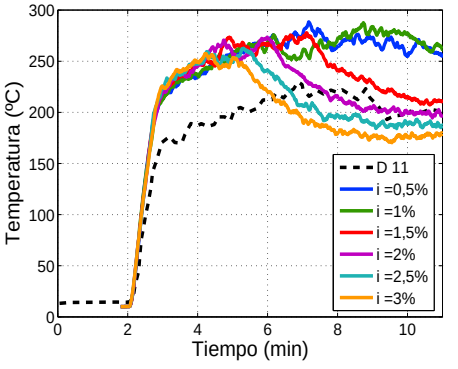
(c) D14 x=0 posición 6



(d) D13 x=0 posición 7



(e) D18 x=22,5 posición 5



(f) D11 x=-22,5 posición 5

Figura 6.11: Comparación de temperaturas obtenidas por los modelos de FDS variando la pendiente longitudinal

La figura 6.11 compara las curvas temperatura tiempo registradas por los termopares del ensayo con las obtenidas por los seis modelos en seis de los puntos estudiados.

Los puntos representados son los de coordenada x=0 en las posiciones 3, 5, 6 y 7 (llamados D16, D15, D14 y D13 respectivamente) y los puntos a + / - 22,5 m del centro del fuego en la posición 5 (llamados D18 y D11). La elección de estos puntos se debe a que son dónde mejor se ven reflejados los cambios en los modelos. Estos mismos puntos serán los que se representarán en las subsecciones siguientes.

En general se observa que las curvas temperatura tiempo dato (líneas de trazo) tienen una tramo caracterizado por un crecimiento pronunciado seguido de una tramo de leve crecimiento. Las curvas de los modelos de i=0,5 % e i=1 % tienen una forma similar, mientras que los modelos con pendientes mayores el tramo de leve crecimiento presenta una menor duración y esta seguido por un tramo de decrecimiento. Las figuras de los puntos D15, D13 y D11 se observa claramente este comportamiento.

En particular en las figuras de los puntos D13 y D11 los modelos con pendientes i=0,5 % e i=1 % son muy similares entre sí, mientras que en el punto D15 el modelo con pendiente i=1 % se acerca más a las temperaturas dato.

Si bien se estima que la curva dato del punto D16 mide temperatura de la superficie en vez de temperatura del gas, se entiende que las temperaturas del gas deben alcanzar valores del orden de los de D16 en la parte que estabiliza su temperatura. Se observa que el modelo con pendiente i=1 % tiene los mismos valores que los datos de D16 a partir del minuto 9.

En los puntos D14 y D18 se observa que los modelos con pendiente i=0,5 % e i=1 % tienen formas y valores similares a las de los datos, siendo el modelo con i=1 % el que más se acerca a los valores de los datos.

Por lo tanto, se decide emplear para el resto de los cálculos una pendiente longitudinal del túnel del 1 %.

6.3.3 Análisis de la tasa de liberación de calor máxima

La temperatura máxima alcanzada depende de la tasa de liberación de calor máxima. Según SFPE, 2002 la tasa de liberación de calor máxima de una batea (*pool fire*) al alcanzarse el régimen estacionario puede ser estimada con la siguiente ecuación:

$$Q_{batea} = \dot{m}.\Delta H_c(1 - e^{-k_\beta.D}).A_f \tag{6.2}$$

Donde $\dot{m}$ es la velocidad de combustión de la masa, ΔH_c es el calor de combustión del combustible y k_β es una constante empírica; estos tres valores dependen del tipo

de combustible. Para el caso de combustible tipo diésel adoptan los siguientes valores: $\dot{m} = 0,045 \frac{kg}{m^2 s}$; $\Delta H_c = 44,4 \frac{MJ}{kg}$ y $k_\beta = 2,1 m^{-1}$.

El parámetro A_f es el área del fuego y D es el diámetro de la batea determinado por:

$$D = \sqrt{\frac{4A_f}{\pi}} \tag{6.3}$$

Luego la tasa de liberación de calor la batea depende del tipo de combustible y del área de la misma. Tomando el área de la batea del modelo V_860_i10 y reemplazando en la Ecuación 6.2 y Ecuación 6.3 se obtiene:

$$Q_{batea} = 0,045 \frac{kg}{m^2 s} 44,4 \frac{MJ}{kg} (1 - e^{-2,1 m^{-1} 1,59 m}) 2m^2 = 3,86 MW$$

Es importante destacar para un determinado tipo de combustible, a mayor área de fuego mayor tasa de liberación de calor. Luego para una cantidad de combustible fija, a mayor área de fuego menor tiempo de fuego. En la subsección 6.3.6 se estudiará el efecto de variar el área de las bateas.

La tasa de liberación de calor máxima para las seis bateas del ensayo será $6Q_{batea} = 23,2 MW$. En el modelo V_860_i10 se trabajó con una tasa de liberación de calor máxima Q_{max} de 28,8 MW y una HRRPUA de 2400 KW/m^2 obteniéndose temperaturas mayores a las del ensayo.

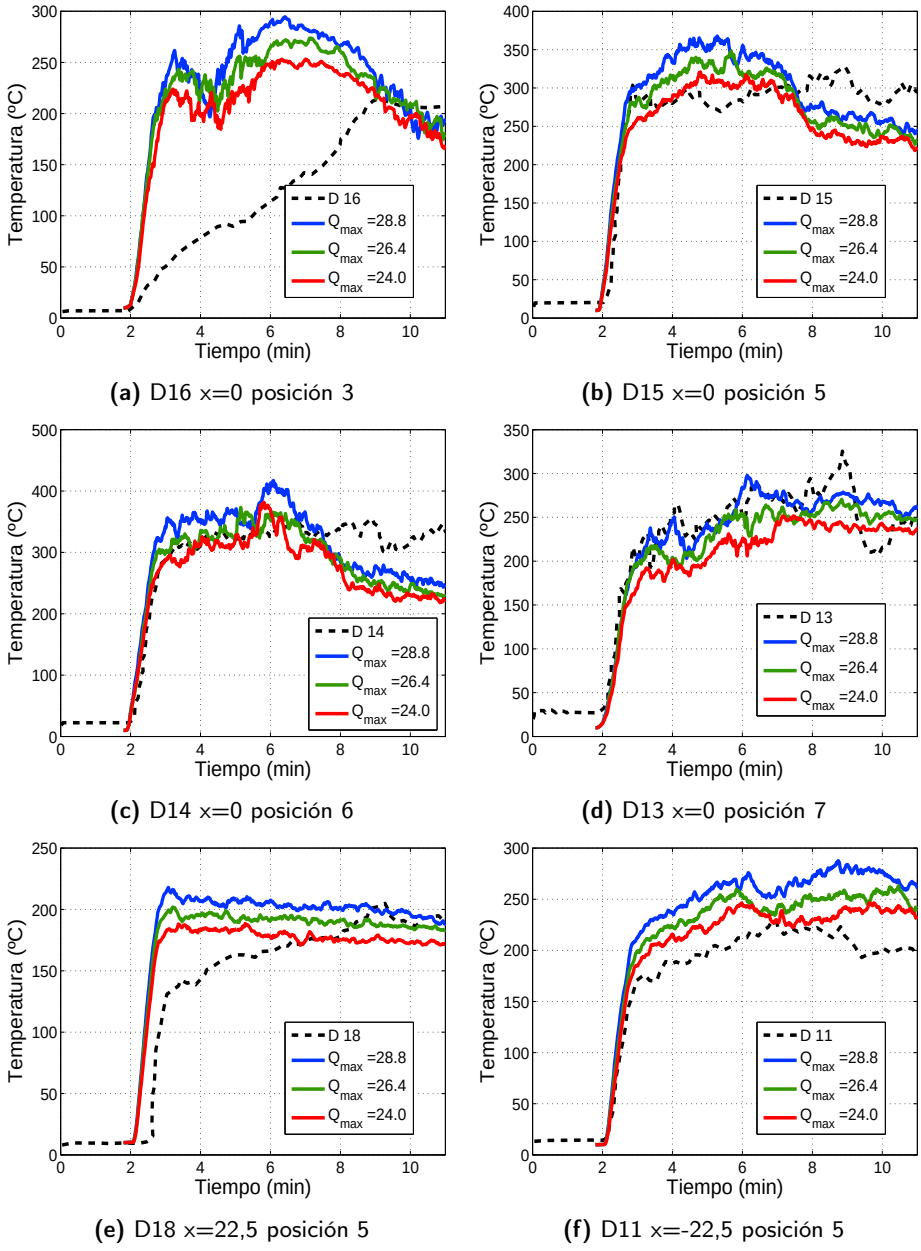
Se plantean variaciones en las HRRPUA para acercarnos a las temperaturas máximas de los datos y a la Q_{batea}. Se plantean dos nuevos modelos con valores de HRRPUA de 2200 y 2000 KW/m^2, resultando valores de Q_{max} de 26,4 y 24 MW respectivamente.

La tabla 6.2 resume los parámetros de los modelos estudiados.

Tabla 6.2: Resumen de los modelos variando la tasa de liberación de calor máxima

Nombre	$i[\%]$	Q_{max} [MW]	Q(t)	h [m]	L_{long} [m]	L_{trans} [m]	s [m]	d [m]
V_860_i10	1,0	28,8	f1	0,6	2	1	1,2	2
V_860_Q26	1,0	26,4	f1	0,6	2	1	1,2	2
V_860_Q24	1,0	**24,0**	f1	0,6	2	1	1,2	2

En la figura 6.12 se comparan las curvas temperatura tiempo registradas por los termopares del ensayo con las obtenidas por los modelos en seis de los puntos estudiados.



(a) D16 x=0 posición 3

(b) D15 x=0 posición 5

(c) D14 x=0 posición 6

(d) D13 x=0 posición 7

(e) D18 x=22,5 posición 5

(f) D11 x=-22,5 posición 5

Figura 6.12: Comparación de temperaturas obtenidas por los modelos de FDS variando la tasa de liberación de calor máxima

Se observa que las curvas temperatura tiempo de los modelos tiene la misma forma entre sí, diferenciándose por las temperaturas máximas alcanzadas.

En el punto D13 se observa que la curva del modelo con Q_{max}=28.8 MW es la que mejor se ajusta a la curva registrada. Por el contrario en los puntos D15, D14, D18 y D11 la curva del modelo con Q_{max}=24 MW es la que mejor se ajusta a las temperaturas datos.

Por tanto, se concluye que de los modelos estudiados el que tiene mejor comportamiento es el de menor tasa de liberación de calor V_860_Q24.

6.3.4 Análisis de la altura de las bateas

La altura de la carga de fuego, en el modelo representada por la altura de las bateas, es un factor muy importante ya que las temperaturas máximas alcanzadas dependen de la distancia del fuego al techo del túnel.

Los modelos planteados en este apartado mantienen las características del modelo V_860_Q24 , variando la altura de las bateas (y consecuentemente la altura del fuego).

El modelo V_860_Q24 tiene un valor de h=0,6 m. Se plantean dos nuevos modelos con valores de h de 0,4 y 0,8 m. La tabla 6.3 resume los parámetros de los modelos estudiados.

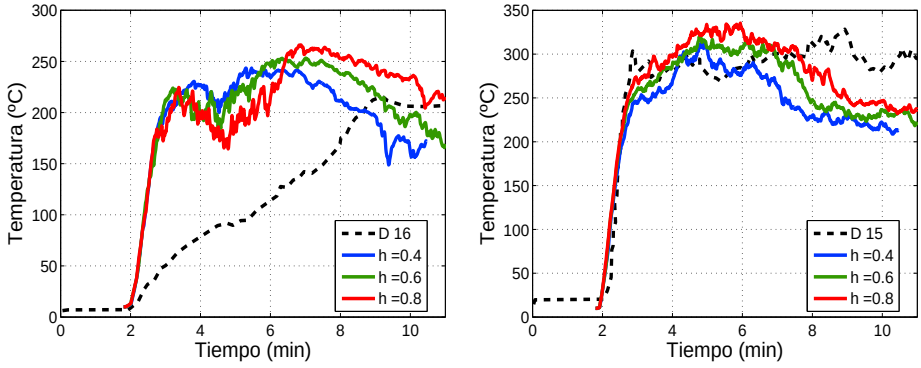
Es importante destacar que se plantean alturas que sean múltiplos de la altura de las celdas (0,2 m). Esto es necesario porque FDS internamente adapta las dimensiones de los sólidos a las dimensiones de las celdas.

Tabla 6.3: Resumen de los modelos variando la altura de las bateas

Nombre	$i[\%]$	Q_{max} [MW]	Q(t)	h [m]	L_{long} [m]	L_{trans} [m]	s [m]	d [m]
V_860_Q24	1,0	24,0	f1	0,6	2	1	1,2	2
V_860_h4	1,0	24,0	f1	0,4	2	1	1,2	2
V_860_h8	1,0	24,0	f1	**0,8**	2	1	1,2	2

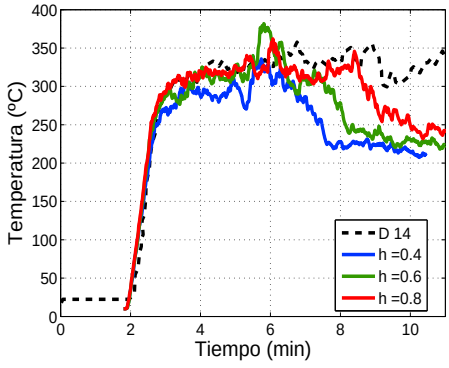
En la figura 6.13 se muestran las curvas temperatura tiempo registradas por los termopares del ensayo y las obtenidas por los modelos en seis de los puntos estudiados.

Se observa que los modelos con mayor altura de batea producen temperaturas mayores, sin embargo la forma de las curvas no es constante entre modelos. En los puntos D14, D15 y D16 se observa que a partir de un determinado instante de tiempo las temperaturas empiezan a descender. Esta disminución se da en los tres modelos, pero

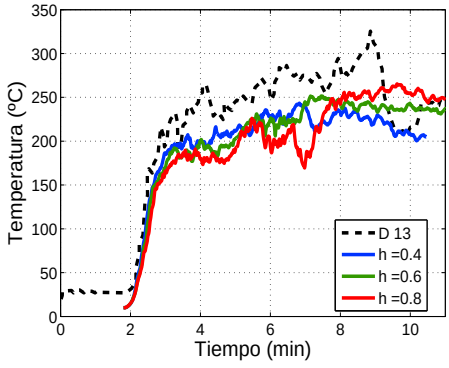


(a) D16 x=0 posición 3

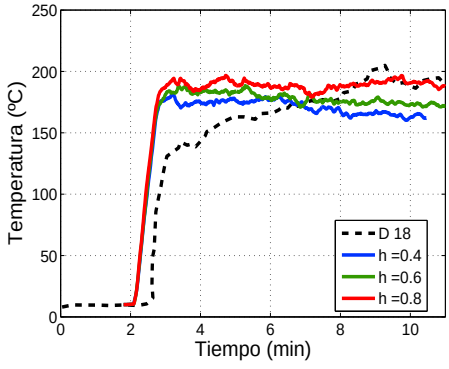
(b) D15 x=0 posición 5



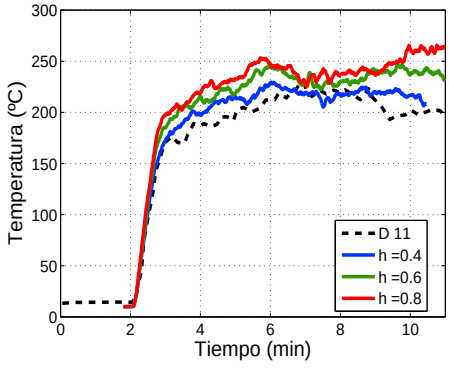
(c) D14 x=0 posición 6



(d) D13 x=0 posición 7



(e) D18 x=22,5 posición 5



(f) D11 x=-22,5 posición 5

Figura 6.13: Comparación de temperaturas obtenidas por los modelos de FDS variando la altura de las bateas

empieza antes en el modelo con altura de bateas 0,4 m. Este efecto parece ser local y está relacionado con la inclinación de las llamas. En los puntos D18 y D11 (fuera de la zona de las bateas) no se observan descensos de temperaturas.

En los puntos D16 y D15 los tres modelos presentan una disminución de temperaturas alrededor del minuto 7, siendo la pendiente mayor para el modelo de h=0,4m. En el punto D14 el modelo con altura 0,4 m la curva de temperaturas empieza a descender alrededor del minuto 6, mientras que el modelo con h=0,6 empieza en el minuto 7 y el modelo con h=0,8 empieza a descender su temperatura después del minuto 8. En el punto D13 solo el modelo con h=0,4 presenta una pendiente decreciente al final de la simulación, presentando los tres modelos temperaturas inferiores a las del ensayo.

En los puntos D11 y D18 las curvas tienen formas similares entre sí, alcanzando valores máximos levemente mayores a medida que se aumenta la altura de las bateas.

Se concluye que la altura del fuego que proporciona resultados más similares a los del ensayo es h=0,8 m (modelo V_860_h8), ya que es el que más retarda el fenómeno de disminuciones de temperatura en las posiciones con x=0.

6.3.5 Análisis de la función de crecimiento de la tasa de liberación de calor

En túneles los incendios son usualmente controlados por el combustible (Ingason, 2012). En este apartado se analiza si el incendio modelado es controlado por combustible o por ventilación y si la energía liberada en el modelo es compatible con la disponible en las bateas del ensayo.

La siguiente ecuación nos permite hacer una simple estimación para evaluar si el fuego es controlado por el combustible o por ventilación: $\Phi = 3000\frac{\dot{m}_a}{Q_{max}}$, donde $\dot{m}_a$ es la velocidad de flujo de masa de aire y Q_{max} la tasa de liberación de calor máxima. Si $\Phi > 1$ el incendio es controlado por combustible.

La velocidad de flujo de masa de aire puede ser calculada por:

$$\dot{m}_a = \rho_a \,.\, v \,.\, A \cong 1{,}2\frac{kg}{m^3}\ 0{,}5\frac{m}{s}\ 54m^2 = 32{,}4\frac{kg}{s} \tag{6.4}$$

Donde $\rho_a = 1{,}2\frac{kg}{m^3}$ es la densidad del aire, v es la velocidad longitudinal del túnel y A es el área de la sección transversal del túnel. Considerando los valores de velocidad del modelo, se estima un promedio de 0,5 $\frac{m}{s}$

Con un valor de tasa de liberación de calor máxima del modelo V_860_h4 de 24000 KW la ecuación nos queda:

$$\Phi = 3000\frac{\dot{m}_a}{Q_{max}} = 3000\,\frac{32,4\frac{kg}{s}}{24000KW} = 4,05 > 1 \tag{6.5}$$

Por lo tanto el fuego es controlado por combustible. Es decir, hay suficiente oxígeno para quemar todo el combustible. Para calcular la velocidad mínima necesaria para que el incendio sea controlado por combustible reemplazando la Ecuación 6.4 en la Ecuación 6.5 e igualando a 1. Se obtiene:

$$\Phi = 3000\frac{\rho_a\,.\,v\,.\,A}{Q_{max}} \rightarrow v > \frac{Q_{max}}{3000.\,\rho_a.\,A} = \frac{24000KW}{3000.\,1,2\frac{kg}{m^3}.\,54m^2} = 0,12\frac{m}{s} \tag{6.6}$$

Por lo tanto el incendio será controlado por combustible para velocidades longitudinales mayores a $0,12\frac{m}{s}$.

Habiendo comprobado que el fuego es controlado por combustible, se estudia si la energía liberada por el combustible en el modelo puede ser generada por las bateas del ensayo.

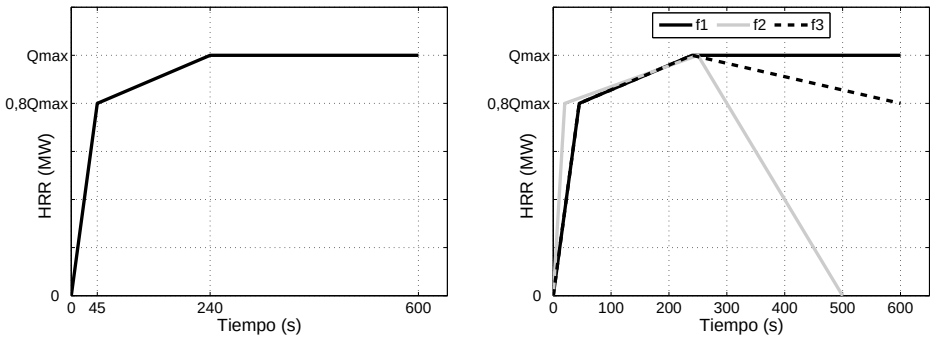
La energía disponible en el combustible de las bateas del ensayo puede ser estimada a partir de la cantidad de material combustible (m_c) y el potencial calorífico neto del combustible (ΔH_c). Luego la cantidad de energía disponible por cada batea (E_{batea}) puede ser calculada por la siguiente ecuación:

$$E_{batea} = m_c.\Delta H_c = (70\,l.\,0,85\frac{kg}{l})44,4\frac{MJ}{kg} = 2641,8MJ \tag{6.7}$$

La energía disponible de las seis bateas será $E_{total} = 6\,E_{batea} = 15850,8MJ$.

La energía liberada en el modelo será el área bajo la curva de la tasa de liberación del calor en función del tiempo. La figura 6.14a muestra ésta curva para el modelo V_860_h8 (la escala de tiempo en esta figura es la del modelo) y la tabla 6.4 resume el cálculo del área bajo la curva resultando una energía total de **13284 MJ**. Luego la energía liberada por el modelo durante los 600 segundos modelados es menor que la energía disponible por el combustible en las bateas.

A continuación se plantean dos modelos que utilizan como funciones de liberación de calor las funciones f2 y f3, mostradas en la figura 6.14b. Estas curvas son introducidas en el modelo y por lo tanto el eje de tiempo utilizada es la del modelo (t=0 coincide con el inicio del fuego). Las tres curvas de crecimiento de la tasa de liberación de calor



(a) Función f1 **(b)** Funciones f1, f2 y f3

Figura 6.14: Tasa de liberación de calor en función del tiempo para el modelo V_860_h8

Tabla 6.4: Cálculo de la Energía del modelo

Forma	tiempo [s]	HRR [MW]	Área [MJ]
Triángulo	(45-0)=45	$0,8Q_{max}$=19,2	432
Rectángulo	(240-45)=195	$0,8Q_{max}$=19,2	3744
Triángulo	(240-45)=195	$0,2Q_{max}$=4,8	468
Rectángulo	(600-240)=360	Q_{max}=24	8640
		Total=	13284

alcanzan el máximo a los 240 s. Las funciones f1 y f3 son iguales hasta los 240s y luego f1 mantiene una tasa de liberación constante mientras que f3 presenta un descenso lineal hasta un valor $0,8Q_{max}$ a los 600 s. La función f2 tiene una pendiente inicial mayor, alcanzando el 80 % de Q_{max} a los 20 segundos y el valor máximo a los 240 segundos, luego presenta un descenso lineal hasta un valor cero de tasa de liberación de calor a los 500 segundos.

El objetivo de estos modelos es estudiar el efecto de funciones de crecimiento de la tasa de liberación de calor sobre las temperaturas registradas. La tabla 6.5 resume los modelos estudiados.

En la figura 6.15 se muestran las curvas temperatura tiempo registradas por los termopares del ensayo y las obtenidas por los modelos en seis de los puntos estudiados.

Se observa que la variación de la función de la tasa de liberación de calor se refleja en los resultados de los modelos. Claramente se evidencia que el modelo con la función f2 tiene una pendiente más pronunciada en el crecimiento y un descenso de las tem-

Tabla 6.5: Resumen de los modelos variando la función de crecimiento de la tasa de liberación de calor

Nombre	$i[\%]$	Q_{max} [MW]	Q(t)	h [m]	L_{long} [m]	L_{trans} [m]	s [m]	d [m]
V_860_h8	1,0	24	**f1**	0,8	2	1	1,2	2
V_860_f2	1,0	24	f2	0,8	2	1	1,2	2
V_860_f3	1,0	24	f3	0,8	2	1	1,2	2

peraturas a partir del momento en que empieza a descender la tasa de liberación de calor. Es importante destacar que si bien las temperaturas descienden, este descenso es con una pendiente menor que la del descenso de la función f2.

Las diferencias en los resultados de los modelos con las funciones f1 y f3 son menos marcadas. Se distingue que las diferencias entre las funciones empiezan a los 5,8 minutos (del eje de tiempo del ensayo) y se manifiestan en los resultados a partir del minuto 7-8 aproximadamente.

Las formas de las curvas temperatura tiempo del modelo con la función f1 son las que mejor se adaptan a las curvas datos, particularmente en el punto D11 se observa un muy buen ajuste de la forma de la curva.

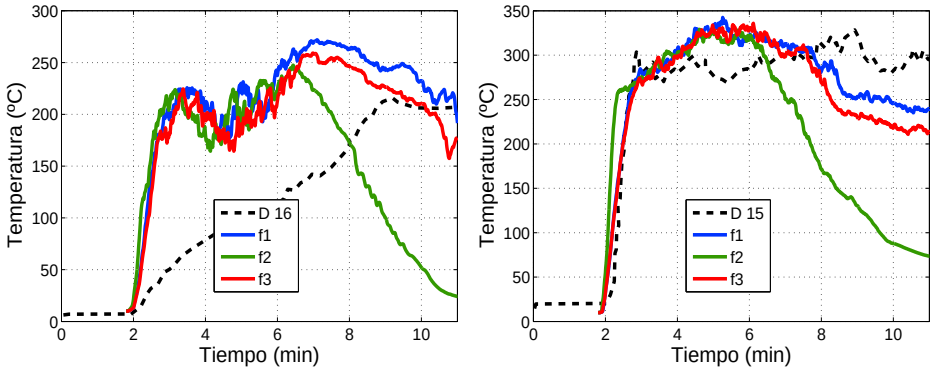
Se comprueba que las temperaturas registradas por los termopares son sensibles a la función utilizada como función de crecimiento de la tasa de liberación de calor. Se considera que la función f1 es la que proporciona mejores resultados.

Se concluye que el fuego es controlado por combustión y que energía liberada por el modelo puede ser emitida por las bateas del ensayo. Hay dos indicios de que probablemente las bateas del ensayo tengan una Q_{max} menor a la planteada en el modelo. Por un lado con HRR planteada las bateas no tendrán suficiente combustible para liberar la HRR modelada y el fuego se apagaría antes del tiempo que duró el ensayo y por otro lado las temperaturas registradas en D11 son mayores a las registradas.

6.3.6 Análisis de la geometría de las bateas

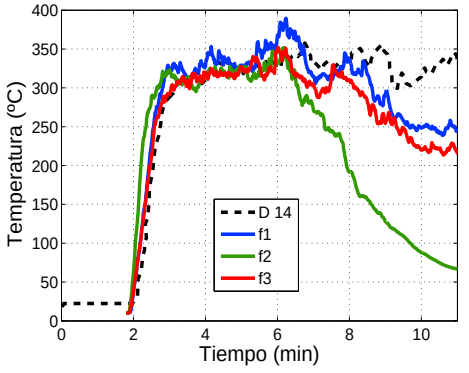
Como se explicó en la subsección 6.3.3 la tasa de liberación de calor de la batea depende del tipo de combustible y del área. La geometría de las bateas define la extensión y la altura de la carga de fuego en el modelo. En la subsección 6.3.4 se estudió la altura de las bateas y en esta subsección se estudia el área de las mismas.

La bibliografía que hace referencia al ensayo es contradictoria respecto a este punto. Bergmeister, 2008 dice que el área de las bateas es de $2m^2$ y Bergmeister, 2006 que

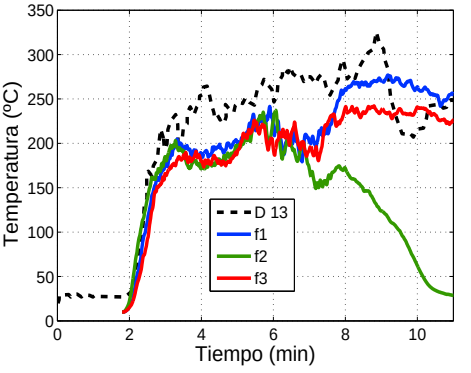


(a) D16 x=0 posición 3

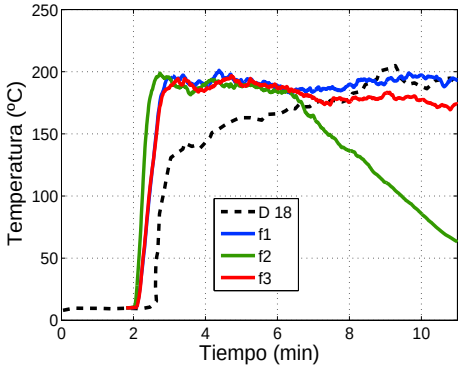
(b) D15 x=0 posición 5



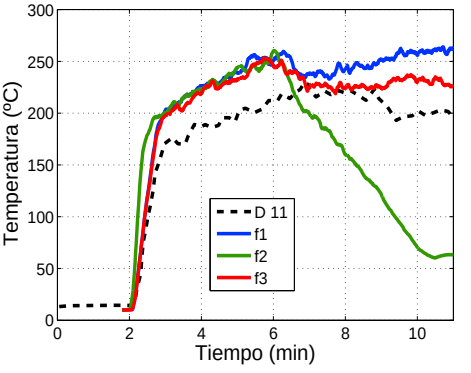
(c) D14 x=0 posición 6



(d) D13 x=0 posición 7



(e) D18 x=22,5 posición 5



(f) D11 x=-22,5 posición 5

Figura 6.15: Comparación de temperaturas obtenidas por los modelos de FDS variando la función de crecimiento de la tasa de liberación de calor

es de $1,5m^2$. Las referencias mencionadas tampoco especifican la relación entre los lados de las bateas.

Se plantean modelos con áreas de bateas entre $2,25m^2$ y $1,4m^2$ (ver figura 6.16). La carga de fuego del modelo es función de la HRRPUA por lo tanto al variarse el área, se debe variar la HRRPUA para mantener la HRR resultante. A su vez se plantean dos posibilidades: variar la separación entre bateas (s) para mantener la distancia entre ejes de batas constante (ver figura 6.17a); y mantener la separación entre bateas constante y por lo tanto variar la distancia entre ejes de bateas (ver figura 6.17b). La tabla 6.6 resume los modelos estudiados.

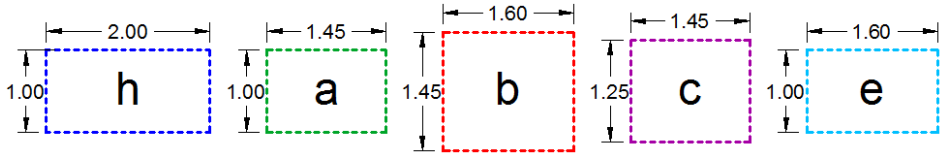
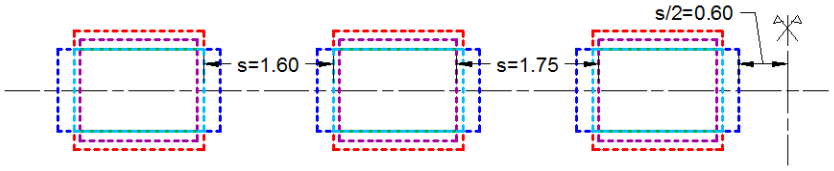
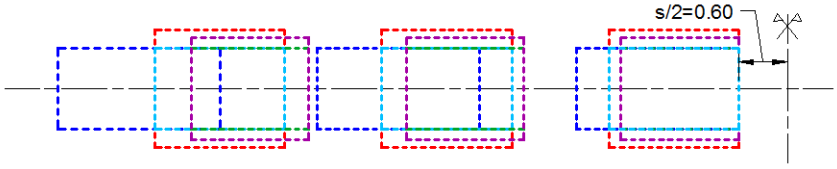


Figura 6.16: Geometrías de las bateas estudiadas



(a) Distancia entre ejes de bateas constante



(b) Distancia entre bateas constante (s=1,2 m)

Figura 6.17: Posición de las bateas estudiadas

En la figura 6.18 se comparan las curvas temperatura tiempo registradas por los termopares del ensayo y las obtenidas por los modelos en los que se mantiene constante la distancia entre ejes de bateas y la figura 6.19 para los modelos en los que se mantiene constante la distancia entre bateas.

Se observa que en el punto D16 los modelos que tienen mayor separación entre bateas tienden a la forma de la curva del ensayo. Para los modelos que tienen distancia entre bateas constante, se observa que los modelos con menor área tienen menores temperaturas hasta el minuto 7.

Tabla 6.6: Resumen de los modelos variando la geometría de las bateas

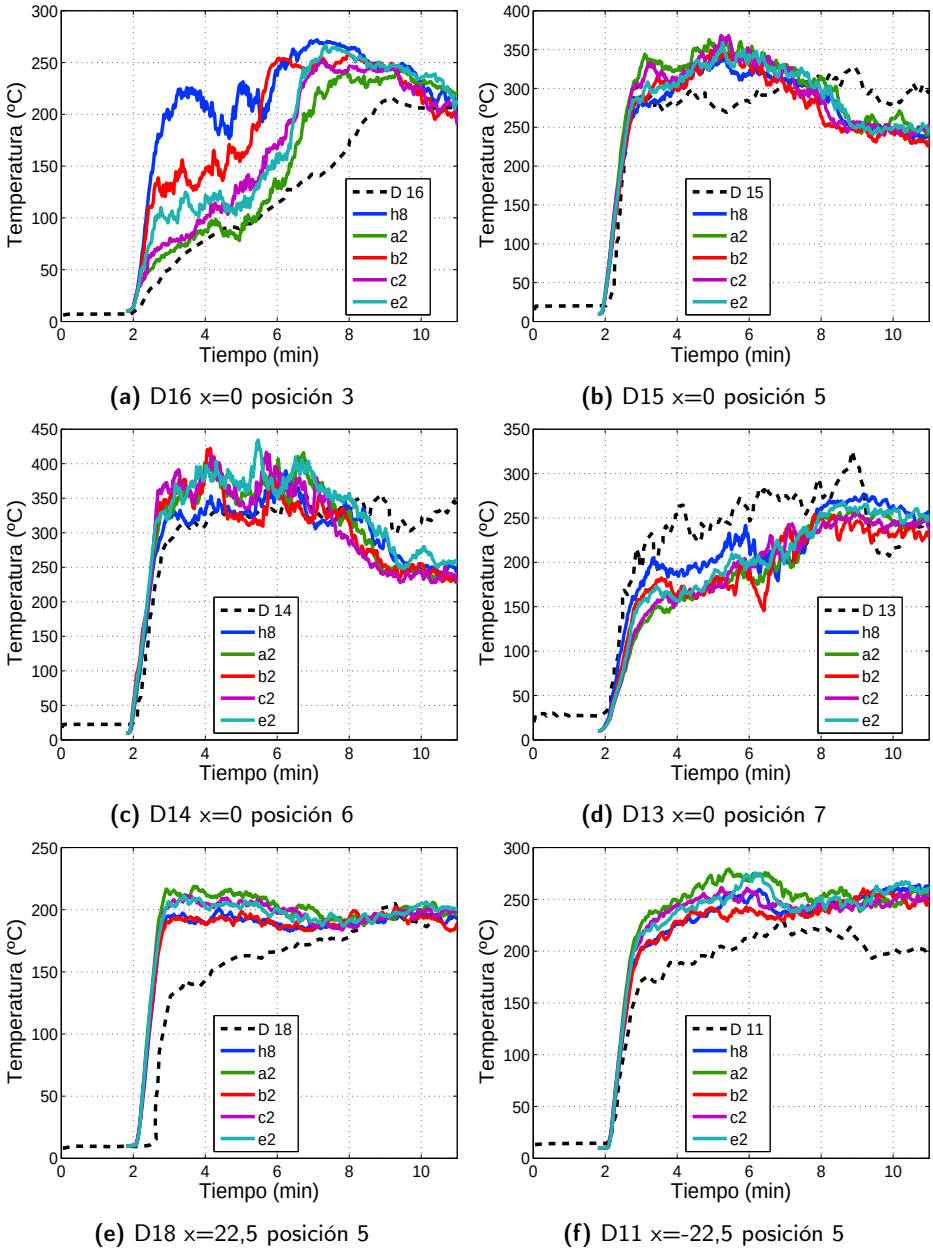
Nombre	$i[\%]$	Q_{max} [MW]	Q(t)	h [m]	L_{long} [m]	L_{trans} [m]	s [m]	d [m]
V_860_h8	1,0	24,0	f1	0,8	2	1,00	1,20	2
V_860_a2	1,0	24,0	f1	0,8	1,45	1,00	1,75	2
V_860_b2	1,0	24,0	f1	0,8	1,60	1,45	1,60	2
V_860_c2	1,0	24,0	f1	0,8	1,45	1,25	1,75	2
V_860_e2	1,0	24,0	f1	0,8	1,60	1,00	1,60	2
V_860_a4	1,0	24,0	f1	0,8	1,45	1,00	1,20	2
V_860_b4	1,0	24,0	f1	0,8	1,60	1,45	1,20	2
V_860_c4	1,0	24,0	f1	0,8	1,45	1,25	1,20	2
V_860_e4	1,0	24,0	f1	0,8	1,60	1,00	1,20	2

Para comprender mejor el motivo de las diferencias se representan en la figura 6.20 las temperaturas y las velocidades en la sección central del túnel en plano vertical x=0 de los modelos V_860_h8 y V_860_a2 para el intervalo de tiempo t=4 minutos.

Se observa que la carga de fuego está más concentrada en el modelo V_860_a2 generando temperaturas y velocidades más elevadas en la zona de las bateas y en la zona superior de la sección transversal del túnel. En cambio el modelo V_860_h8 presenta temperaturas más estratificadas. En cuanto a las velocidades, el modelo V_860_a2 muestra un comportamiento caracterizado por una fuerte componente vertical en la zona de las bateas que llega hasta el techo del túnel y luego desciende por las paredes. En el modelo V_860_h8 las velocidades tienen magnitudes uniformes, no se distingue un movimiento vertical, sino más bien un movimiento hacia el intradós del túnel.

Es decir las temperaturas en D16 tienen un crecimiento más lento en el modelo V_860_a2 debido a que el aire caliente realiza un recorrido más largo ya que sube al intradós del túnel y luego desciende por las paredes, mientras que en V_860_h8 el aire caliente tiene una trayectoria directa a las paredes del túnel.

En los puntos D14 y D15 se observa que para los modelos con distancia entre ejes de bateas constante, los modelos con menor área alcanzan antes la temperatura máxima, presentando luego del minuto 4 resultados muy similares. Para los modelos con separación entre bateas constante se observa que las curvas tienen formas muy similares y sus valores máximos alcanzados son mayores para los modelos con menores L_{long}.



(a) D16 x=0 posición 3

(b) D15 x=0 posición 5

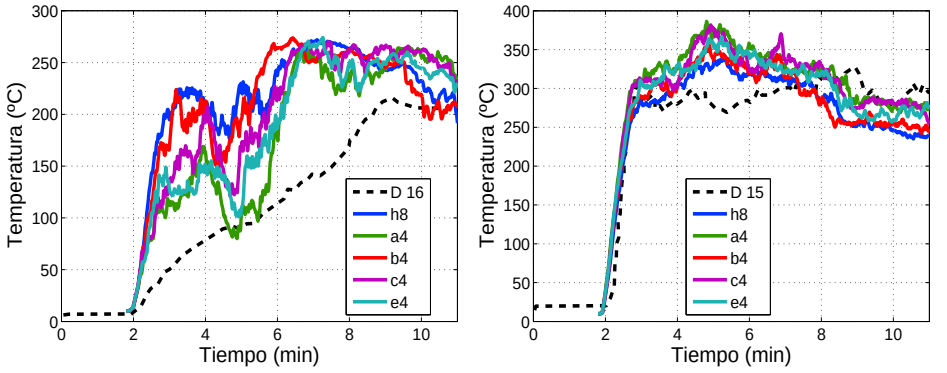
(c) D14 x=0 posición 6

(d) D13 x=0 posición 7

(e) D18 x=22,5 posición 5

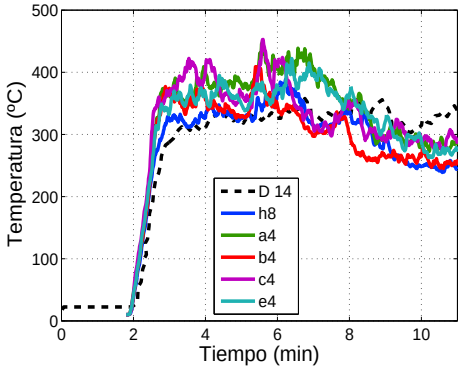
(f) D11 x=-22,5 posición 5

Figura 6.18: Comparación de temperaturas obtenidas por los modelos de FDS variando el área de las bateas para los modelos con la distancia entre ejes de bateas constante

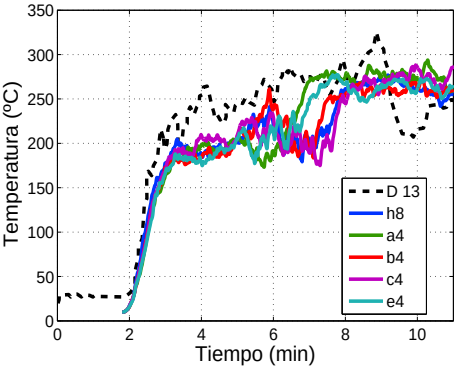


(a) D16 x=0 posición 3

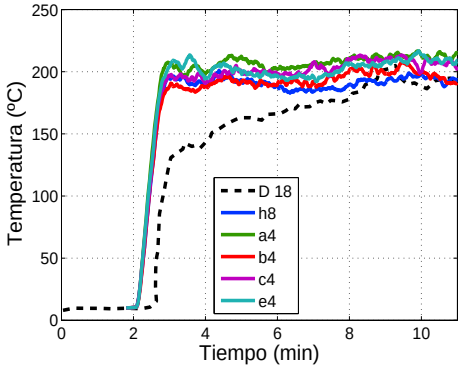
(b) D15 x=0 posición 5



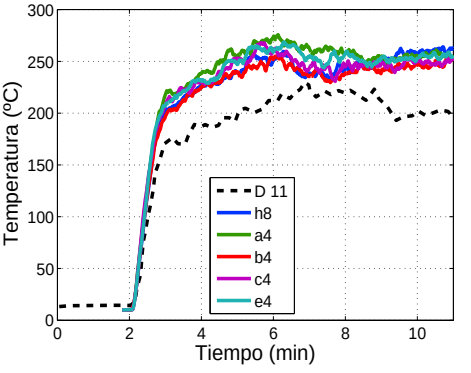
(c) D14 x=0 posición 6



(d) D13 x=0 posición 7

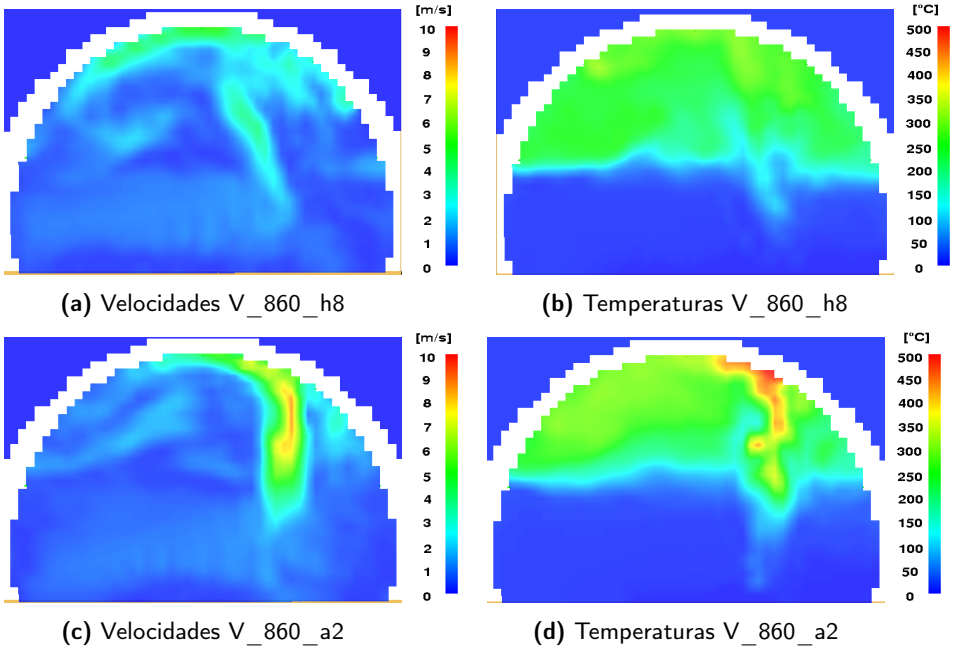


(e) D18 x=22,5 posición 5



(f) D11 x=-22,5 posición 5

Figura 6.19: Comparación de temperaturas obtenidas por los modelos de FDS variando el área de las bateas para los modelos con la separación entre bateas igual a 1,2m



(a) Velocidades V_860_h8 **(b)** Temperaturas V_860_h8

(c) Velocidades V_860_a2 **(d)** Temperaturas V_860_a2

Figura 6.20: Perfiles de velocidades y temperaturas en el plano vertical del túnel x=0, t=4 min

En cuanto al punto D13 se observa que a mayor separación entre bateas se obtiene una menor pendiente de crecimiento inicial. Los valores alcanzados son menores que los del ensayo.

En el punto D18 se observa que los modelos con menor área alcanzan temperaturas máximas mayores. En el punto D11 las temperaturas máximas aumentan a medida que la separación entre bateas aumenta, superándose en todos los casos las temperaturas máximas del ensayo.

Los modelos con área 'a' y 'c' son los que más se alejan de las formas de las curvas y de las temperaturas máximas. El modelo V_860_h8 es el que mejor se adapta a los puntos D11, D14 y D18, mientras que en los puntos D16 y D15 V_860_e4 y V_860_b4 presentan mejores formas. Por lo tanto, se concluye que las áreas 'h', 'b' y 'e' son las que brindan mejores resultados.

6.3.7 Estudio de la distancia entre bateas

En la subsección anterior se notó que la distancia entre bateas, s afecta significativamente los resultados. En la zona central del túnel se alcanzan los valores de temperaturas máximas antes para valores de s menores.

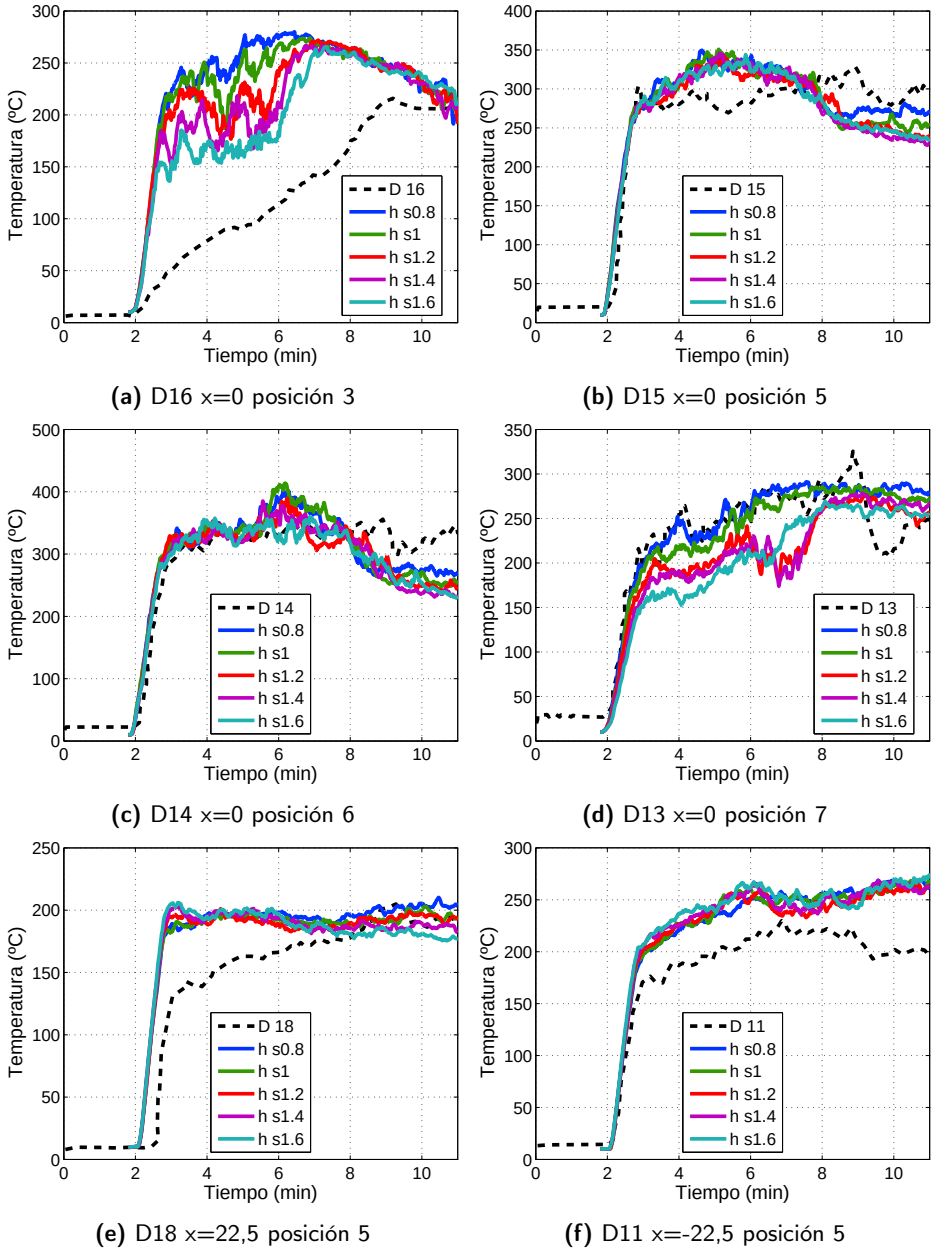
Para las tres áreas de bateas seleccionadas en la subsección anterior se plantean cinco modelos variando la separación entre bateas s entre 0,8 m y 1,6 m. La tabla 6.7 resume los modelos estudiados.

Tabla 6.7: Resumen de los modelos variando posición al eje del túnel bateas

Nombre	$i[\%]$	Q_{max} [MW]	Q(t)	h [m]	L_{long} [m]	L_{trans} [m]	s [m]	d [m]
V_860_sh0	1,0	24,0	f1	0,8	2	1	0,8	d
V_860_sh1	1,0	24,0	f1	0,8	2	1	1,0	2
V_860_h8	1,0	24,0	f1	0,8	2	1	1,2	2
V_860_sh4	1,0	24,0	f1	0,8	2	1	1,4	2
V_860_sh6	1,0	24,0	f1	0,8	2	1	1,6	2
V_860_sb0	1,0	24,0	f1	0,8	1,60	1,45	0,8	2
V_860_sb1	1,0	24,0	f1	0,8	1,60	1,45	1,	2
V_860_b4	1,0	24,0	f1	0,8	1,60	1,45	1,2	2
V_860_sb3	1,0	24,0	f1	0,8	1,60	1,45	1,4	2
V_860_b2	1,0	24,0	f1	0,8	1,60	1,45	1,60	2
V_860_se0	1,0	24,0	f1	0,8	1,60	1,00	0,8	2
V_860_se1	1,0	24,0	f1	0,8	1,60	1,00	1,	2
V_860_e4	1,0	24,0	f1	0,8	1,60	1,00	1,2	2
V_860_eb3	1,0	24,0	f1	0,8	1,60	1,00	1,4	2
V_860_e2	1,0	24,0	f1	0,8	1,60	1,00	1,60	2

En la figura 6.21 se muestran las curvas temperatura tiempo registradas por los termopares del ensayo y las obtenidas por los modelos en seis de los puntos estudiados para los modelos con área de bateas 'h'. En la figura 6.22 para los modelos con área de bateas 'b' y en la figura 6.23 para los modelos con área de bateas 'e'.

En el punto D11 se nota que las curvas de temperaturas obtenidas variando la distancia entre bateas no sufren prácticamente variaciones. En el punto D18 las variaciones



(a) D16 x=0 posición 3

(b) D15 x=0 posición 5

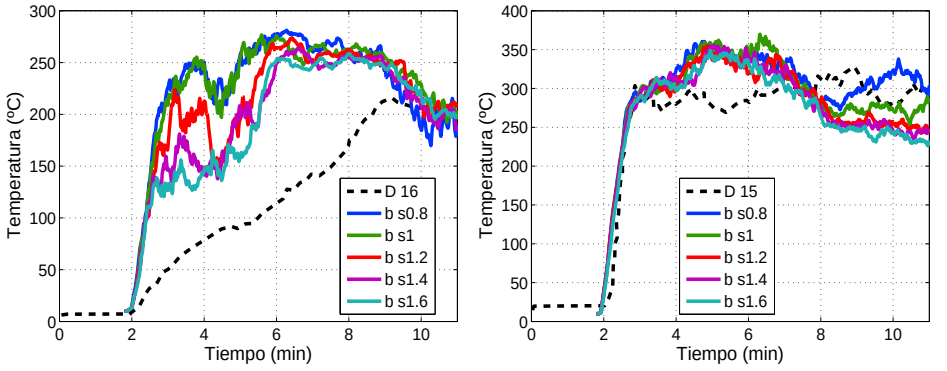
(c) D14 x=0 posición 6

(d) D13 x=0 posición 7

(e) D18 x=22,5 posición 5

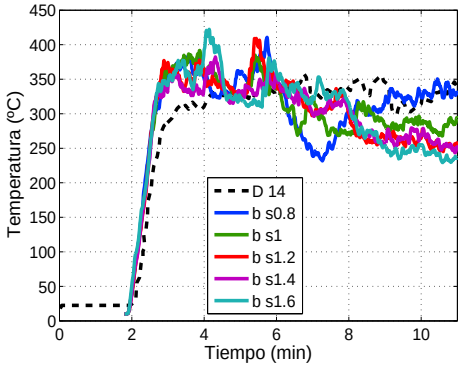
(f) D11 x=-22,5 posición 5

Figura 6.21: Comparación de temperaturas obtenidas por los modelos de FDS variando la sección de las bateas para el área 'h'

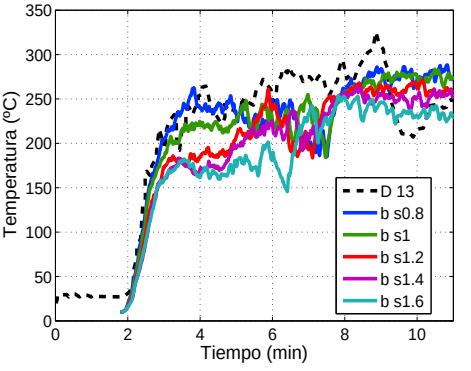


(a) D16 x=0 posición 3

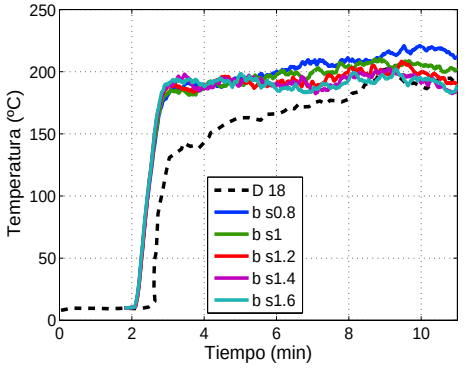
(b) D15 x=0 posición 5



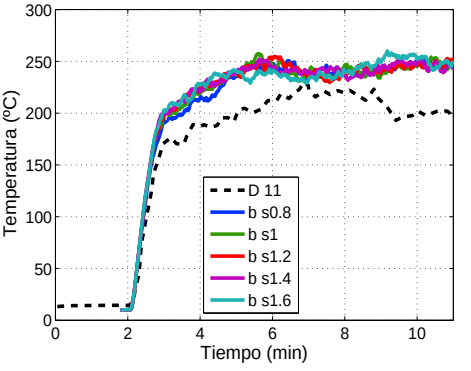
(c) D14 x=0 posición 6



(d) D13 x=0 posición 7

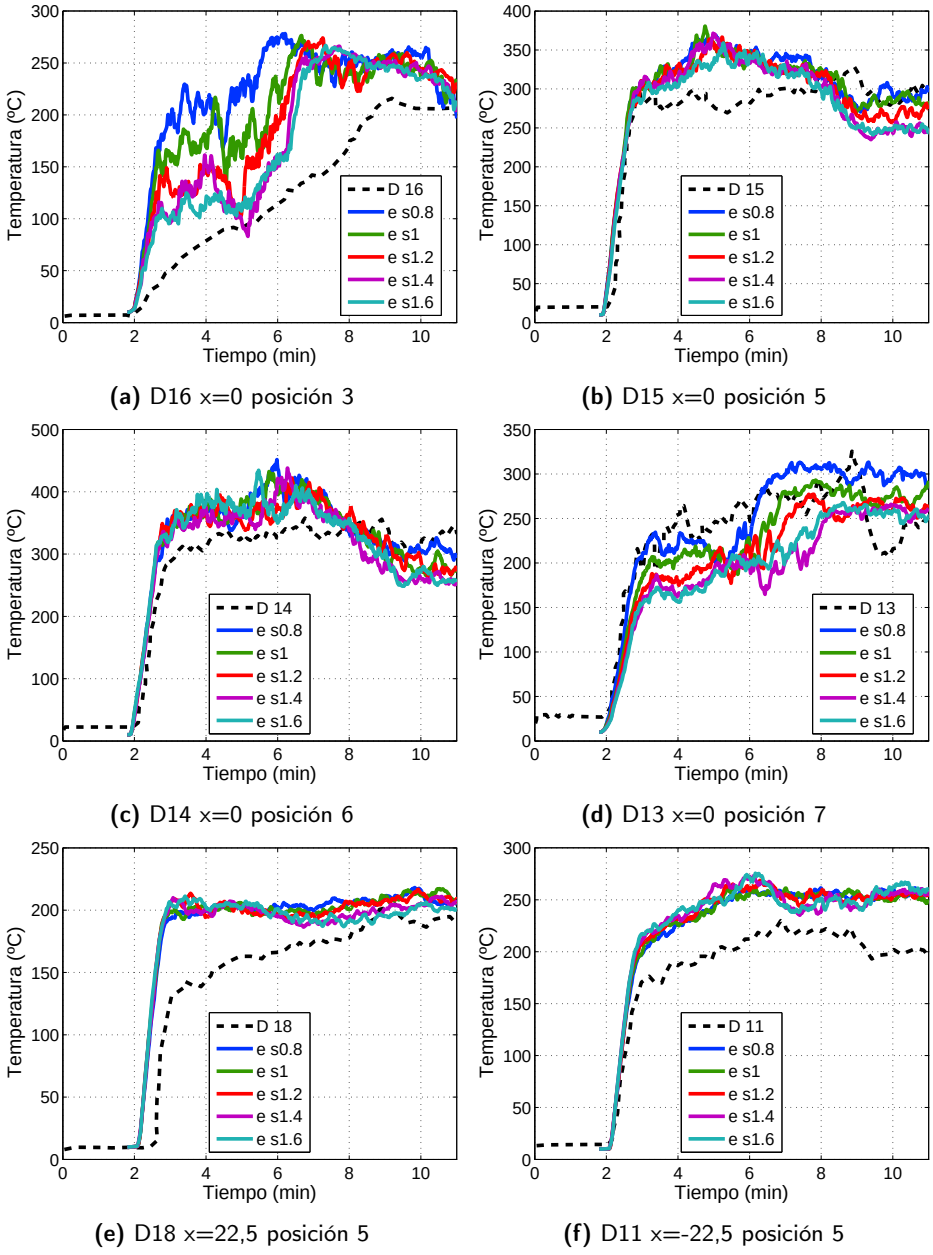


(e) D18 x=22,5 posición 5



(f) D11 x=-22,5 posición 5

Figura 6.22: Comparación de temperaturas obtenidas por los modelos de FDS variando la distancia libre entre bateas para el área 'b'



(a) D16 x=0 posición 3

(b) D15 x=0 posición 5

(c) D14 x=0 posición 6

(d) D13 x=0 posición 7

(e) D18 x=22,5 posición 5

(f) D11 x=-22,5 posición 5

Figura 6.23: Comparación de temperaturas obtenidas por los modelos de FDS variando la distancia libre entre bateas para el área 'e'

comienzan a partir del minuto 6, observándose un leve aumento de temperatura para los modelos con menor separación entre bateas.

Para los modelos con áreas de bateas 'h' se observa que en los puntos D14 y D15 no hay variaciones significativas de las temperaturas al variarse la distancia s. Sin embargo en los puntos D16 y D13 se observa que se alcanzan temperaturas mayores a medida que la distancia entre bateas disminuye y la forma de las curvas también se ve modificada. En el punto D13 se destaca el buen ajuste obtenido para el valor de $s = 0,8m$.

Para los modelos con áreas de bateas 'b' se observa que en los puntos D16 y D13 se alcanzan temperaturas mayores a medida que la distancia entre bateas disminuye. En los puntos D14 y D15 no se observan variaciones significativas en las temperaturas alcanzadas, pero se distinguen variaciones en las formas de las curvas, fundamentalmente en D14. Se destaca que para el modelo con $s = 0,8m$ la curva de temperaturas obtenida para el punto D14 no se ajusta a la forma de la curva registrada en el ensayo.

Para los modelos con áreas de bateas 'e' se observa que en los puntos D16 y D13 se alcanzan temperaturas mayores a medida que la distancia entre bateas disminuye. En ambos diagramas se observa una subida repentina de temperaturas a partir del minuto 6 la cual no se observa en los resultados del ensayo. En los puntos D14 y D15 los resultados de los distintos modelos son muy similares.

Se concluye que la separación entre bateas $s = 0,8m$ es la que brinda mejores resultados en los modelos con áreas de bateas 'h'. Mientras que en los modelos con áreas de bateas 'b' y 'e' la separación entre bates $s = 1m$ es la que brinda mejores resultados. A su vez el modelo V_860_sh1 es el que aparentemente brinda mejores resultados. Sin embargo se prefiere estudiar la variación del parámetro d en los modelos con los 3 tipos de áreas.

6.3.8 Análisis de la posición de las bateas respecto a la sección transversal

En esta sección se estudia la posición de las bateas en la sección transversal del túnel. Los datos del ensayo no hacen referencia a la posición de las bateas respecto a la sección transversal. Solo se sabe que las bateas están en un lateral.

Los modelos planteados en este apartado mantienen las características de los modelos V_860_sh1, V_860_sb0 y V_860_se0 variando la distancia del eje longitudinal del túnel al eje longitudinal del conjunto de bateas, d. La tabla 6.8 resume los modelos estudiados.

En la figura 6.24 se muestran las curvas temperatura tiempo registradas por los termopares del ensayo y las obtenidas por los modelos en seis de los puntos estudiados

Tabla 6.8: Resumen de los modelos variando la distancia d

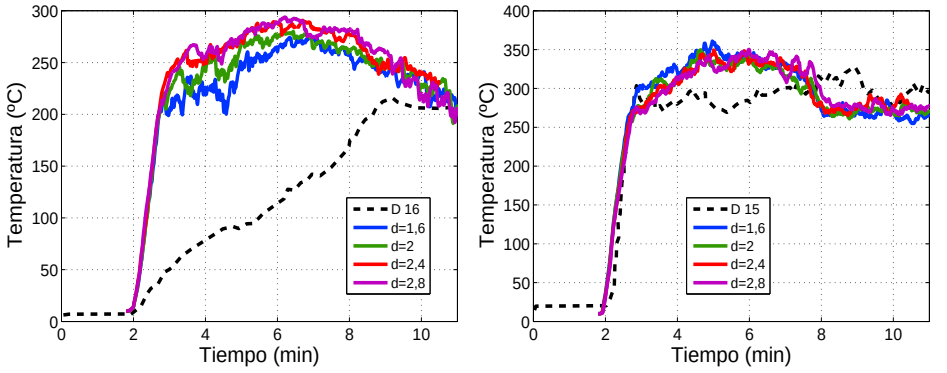
Nombre	$i[\%]$	Q_{max} [MW]	Q(t)	h [m]	L_{long} [m]	L_{trans} [m]	s [m]	d [m]
V_860_dh0	1,0	24,0	f1	0,8	2	1	1	1,6
V_860_sh1	1,0	24,0	f1	0,8	2	1	1	2
V_860_dh2	1,0	24,0	f1	0,8	2	1	1	2,4
V_860_dh3	1,0	24,0	f1	0,8	2	1	1	2,8
V_860_db0	1,0	24,0	f1	0,8	1,60	1,45	0,8	1,6
V_860_sb0	1,0	24,0	f1	0,8	1,60	1,45	0,8	2
V_860_db2	1,0	24,0	f1	0,8	1,60	1,45	0,8	2,4
V_860_db3	1,0	24,0	f1	0,8	1,60	1,45	0,8	2,8
V_860_de0	1,0	24,0	f1	0,8	1,60	1,00	0,8	1,6
V_860_se0	1,0	24,0	f1	0,8	1,60	1,00	0,8	2
V_860_de2	1,0	24,0	f1	0,8	1,60	1,00	0,8	2,4
V_860_de3	1,0	24,0	f1	0,8	1,60	1,00	0,8	2,8

para los modelos con área de bateas 'h'. En la figura 6.25 para los modelos con área de bateas 'b' y en la figura 6.26 para los modelos con área de bateas 'e'.

Se observa que en los puntos D18 y D11 las curvas y las temperaturas alcanzadas por todos los modelos son muy similares. En el punto D15 se observan pequeñas variaciones pero tampoco son significativas. Los modelos con $d = 2,8$ son los que más se acercan a las temperaturas en D11 y en D15

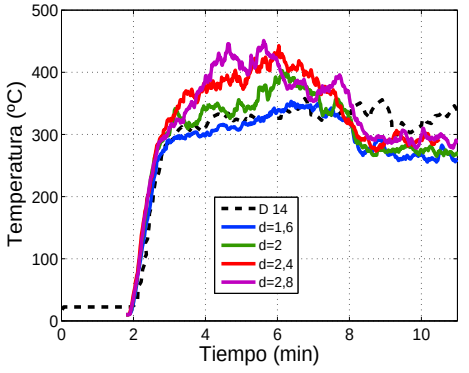
Los puntos D14 y D13 son los que más se ven afectados por la variación de d. Esto se debe a que a medida que el valor de d aumenta, el fuego se encuentra más cerca del punto D13 y del punto D14. El punto D14 está a una distancia de 2,6 m del centro del túnel por lo cual para valores de d de 2,4 y 2,8 m se dan los valores máximos de temperaturas en D14. Mientras que para valores de d de 1,6 y 2 m se dan valores menores.

En el punto D13 se observa que a medida que el valor de d aumenta, las temperaturas máximas registradas por D13 son mayores. Para el caso de los modelos con área 'h', el valor de d que genera mejores resultados es $d = 2,4m$ y el valor de $d = 2,8$ supera los valores del ensayo aunque presenta la forma de las temperaturas registradas. Mientras que para los modelos con área 'b', el valor de $d = 2,4$ no alcanza los valores registrados

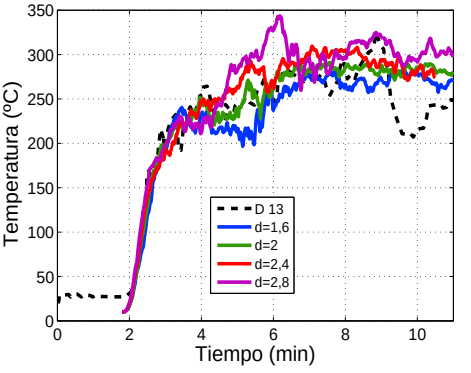


(a) D16 x=0 posición 3

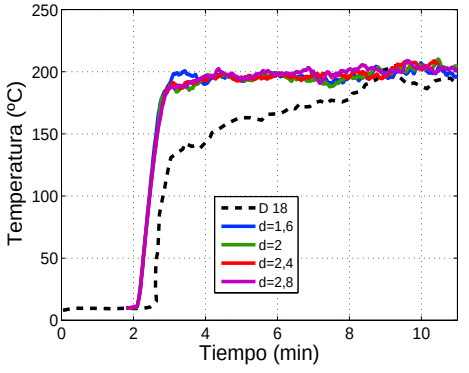
(b) D15 x=0 posición 5



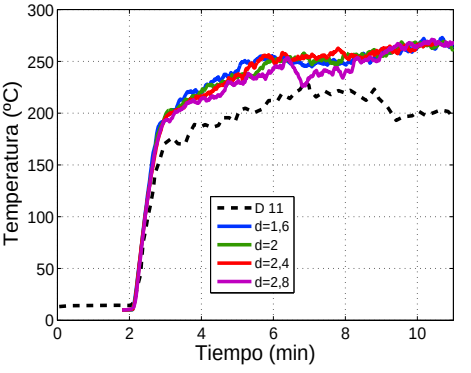
(c) D14 x=0 posición 6



(d) D13 x=0 posición 7

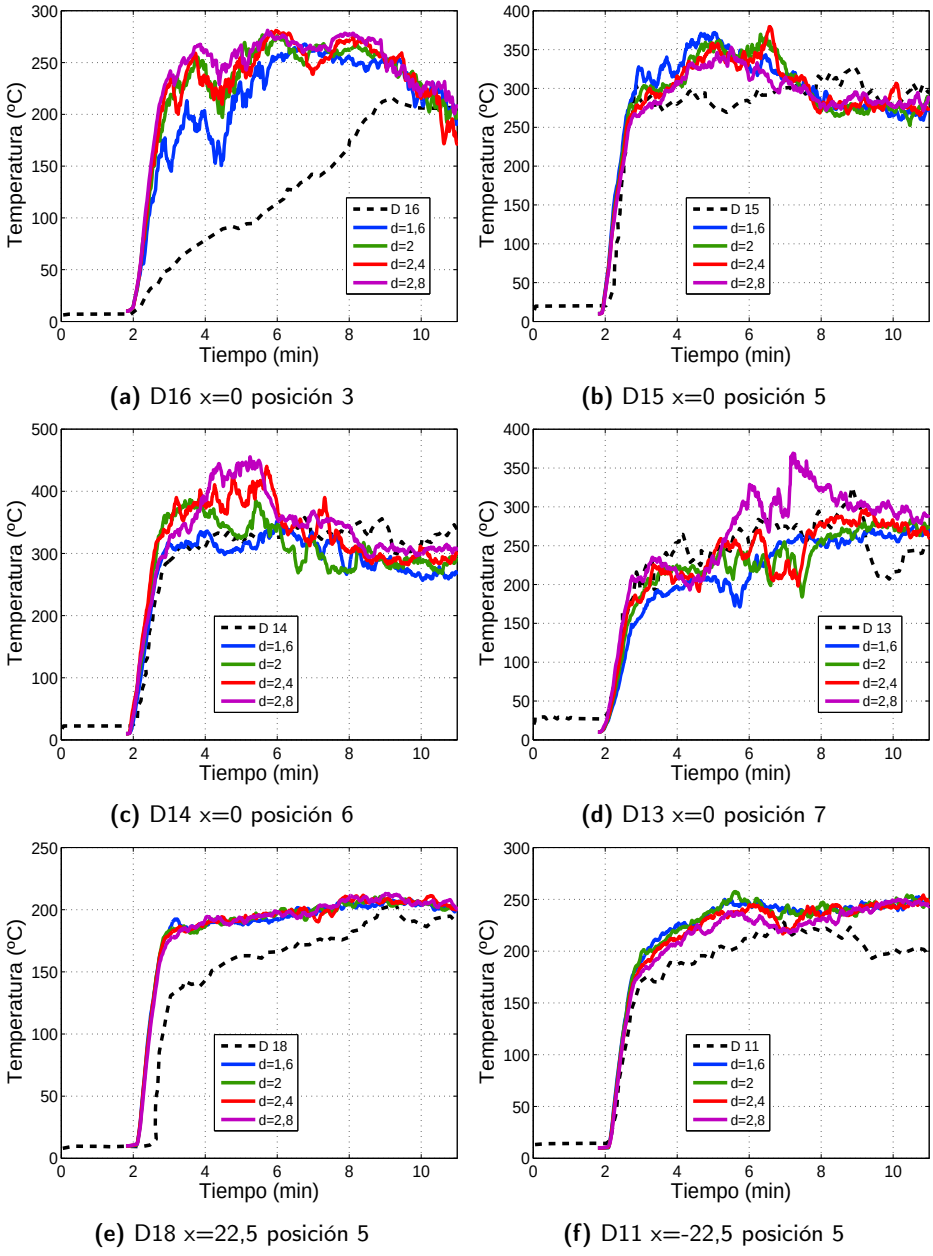


(e) D18 x=22,5 posición 5



(f) D11 x=-22,5 posición 5

Figura 6.24: Comparación de temperaturas obtenidas por los modelos de FDS variando la distancia al eje longitudinal para el área 'h'



(a) D16 x=0 posición 3

(b) D15 x=0 posición 5

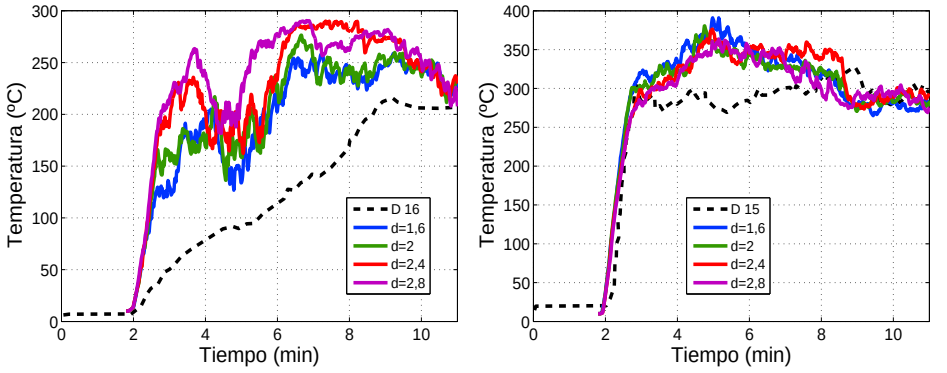
(c) D14 x=0 posición 6

(d) D13 x=0 posición 7

(e) D18 x=22,5 posición 5

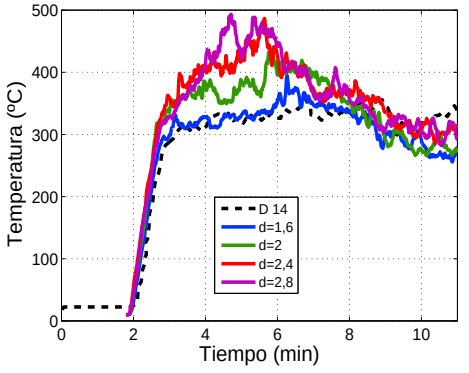
(f) D11 x=-22,5 posición 5

Figura 6.25: Comparación de temperaturas obtenidas por los modelos de FDS variando la distancia al eje longitudinal para el área 'b'

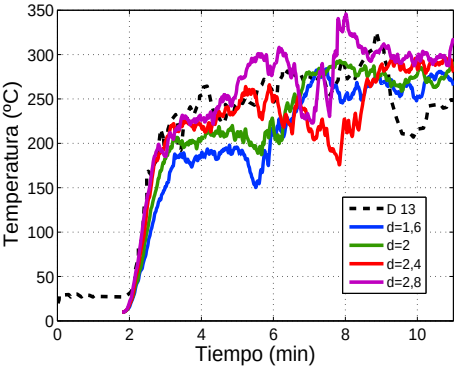


(a) D16 x=0 posición 3

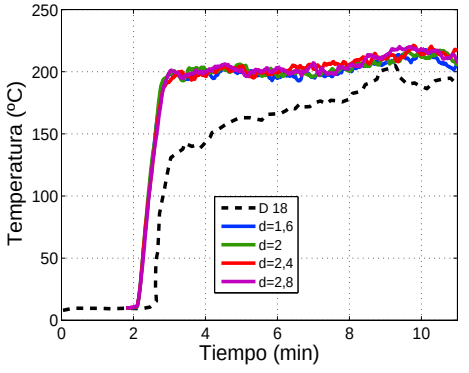
(b) D15 x=0 posición 5



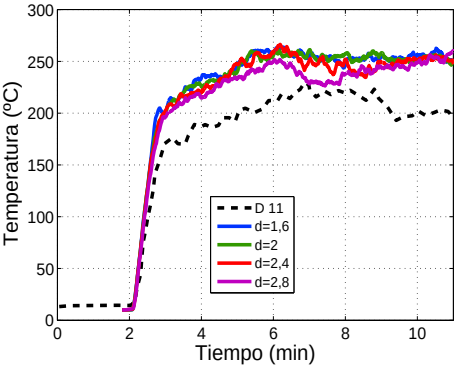
(c) D14 x=0 posición 6



(d) D13 x=0 posición 7



(e) D18 x=22,5 posición 5



(f) D11 x=-22,5 posición 5

Figura 6.26: Comparación de temperaturas obtenidas por los modelos de FDS variando la distancia al eje longitudinal para el área 'e'

por el ensayo y el valor de $d = 2,8$ los supera. En el caso de los modelos con área 'e', el valor de $d = 2,8$ es el que brinda mejores resultados.

En el punto D16 se observa que el crecimiento de las temperaturas es más rápido a medida que aumentan los valores de d. Para los modelos de área 'h', las curvas de los modelos variando la distancia d tienen la misma forma, mientras que en los modelos de áreas 'b' las formas de las curvas varían y en los modelos con áreas 'e' estas variaciones son más pronunciadas.

Entre los modelos estudiados se seleccionan los modelos que mejor se adaptan a las formas de las curvas en los puntos de coordenada x=0, y en particular los que mejor se adaptan a los puntos D14 y D13 que son los que más se ven afectados por la variación de la distancia d. Los modelos seleccionados con este criterio son V_860_sh1 y V_860_dh3.

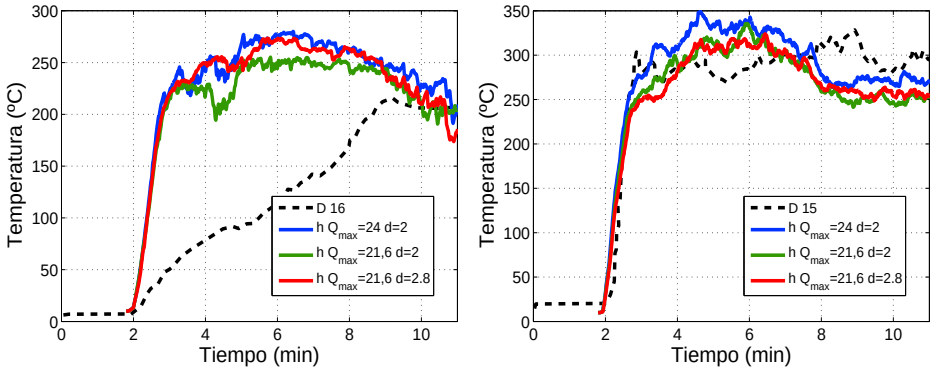
En todos los casos los valores alcanzados por los puntos aguas abajo y aguas arriba del túnel son superiores a los registrados. Por lo tanto se varía el valor de Q_{max} en los modelos seleccionados y se estudian los modelos con un valor de Q_{max} de 21,6 MW. La figura 6.27 muestra los resultados obtenidos.

Se observa que la variación de la HRRPUA se ve reflejada en todos los puntos y en particular en los puntos D11 y D18 que es donde se ven mayores variaciones. En cuanto a los puntos de la sección transversal se observa que los modelos con $Q_{max} = 21,6MW$ se adaptan mejor a la forma y a los valores de temperaturas alcanzados. En el punto D14 el modelo con $Q_{max} = 21,6MW$ y $d = 2m$ es el que mejor se adapta a la curva durante los primero 8 minutos del ensayo. En cambio en el punto D13 los modelos con $Q_{max} = 21,6MW$ y $d = 2,8$ y el modelo con $Q_{max} = 24MW$ son los que brindan mejores resultados.

La figura 6.28 compara las temperaturas registradas en el ensayo y las temperaturas simuladas en las posiciones en el intradós del túnel (posición 5) para distintos valores de x para los modelos con $Q_{max} = 21,6MW$ y valores de $d = 2$ y $d = 2,8$.

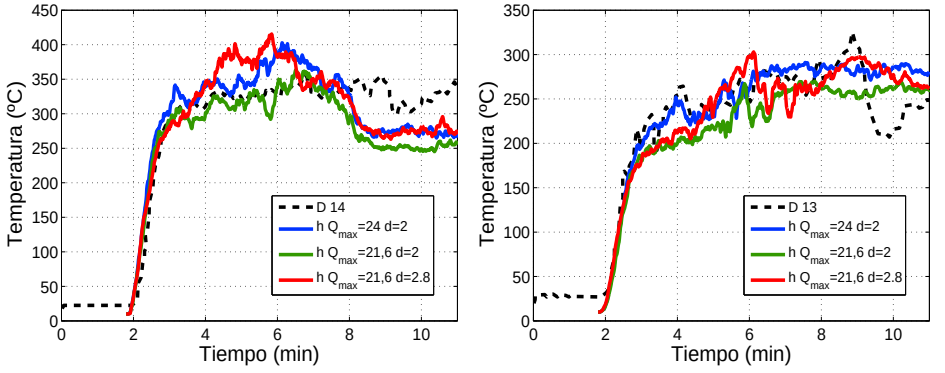
La figura 6.29 compara las temperaturas registradas en el ensayo y las temperaturas simuladas para las posiciones 3, 5, 6 y 7 de la sección transversal central del túnel (x=0) para los modelos con $Q_{max} = 21,6MW$ y valores de $d = 2$ y $d = 2,8$.

Finalmente se concluye que el modelo con $Q_{max} = 21,6MW$ y $d = 2,8m$ es el que en forma global mejor se adapta en todos los puntos y particularmente el que mejores resultados proporciona aguas arriba del fuego.



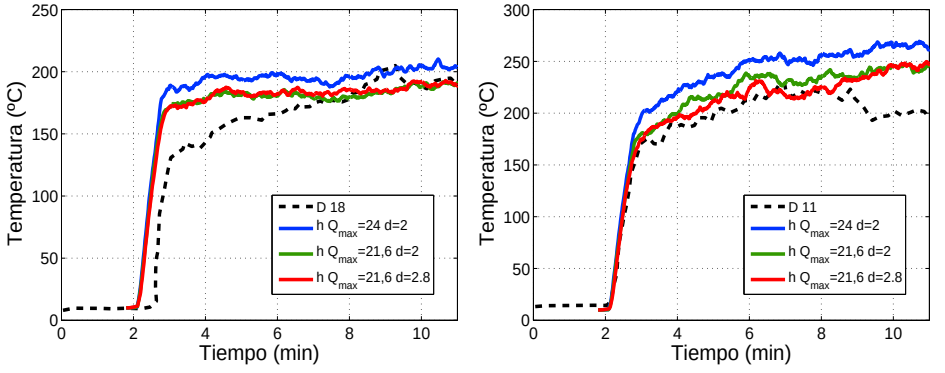
(a) D16 x=0 posición 3

(b) D15 x=0 posición 5



(c) D14 x=0 posición 6

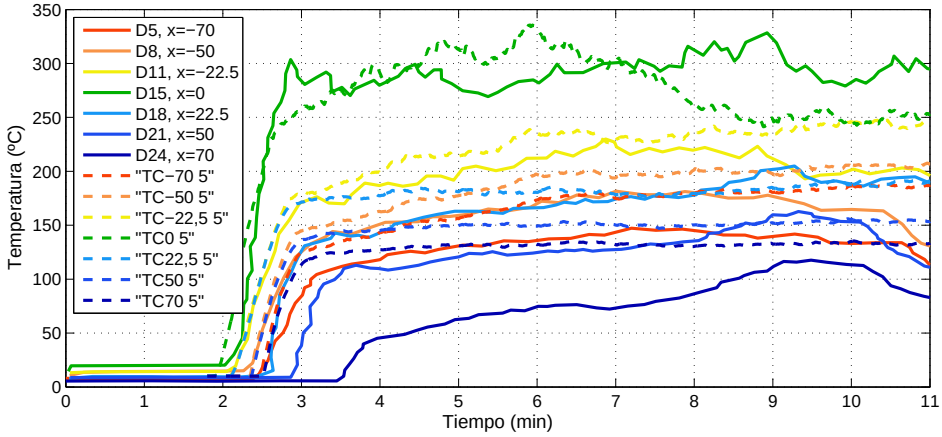
(d) D13 x=0 posición 7



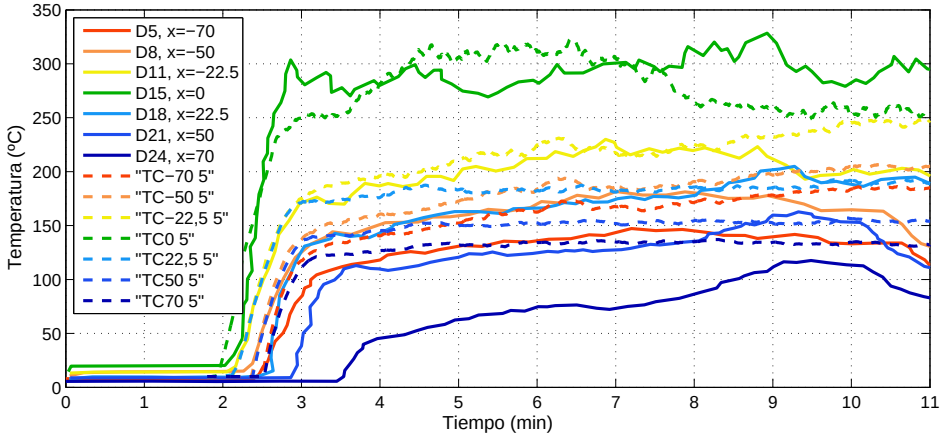
(e) D18 x=22,5 posición 5

(f) D11 x=-22,5 posición 5

Figura 6.27: Comparación de temperaturas obtenidas por los modelos de FDS variando la HRRPUA para los modelos seleccionados.



(a) Modelo con $Q_{max} = 21,6MW$ y $d = 2m$

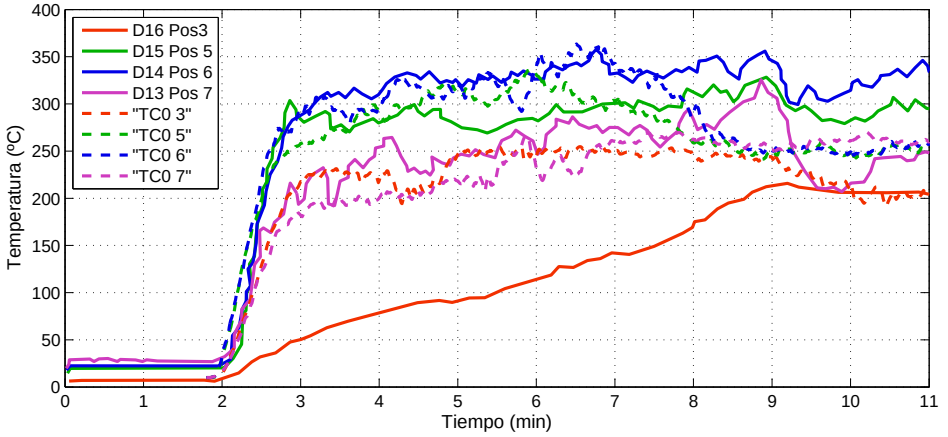


(b) Modelo con $Q_{max} = 21,6MW$ y $d = 2,8m$

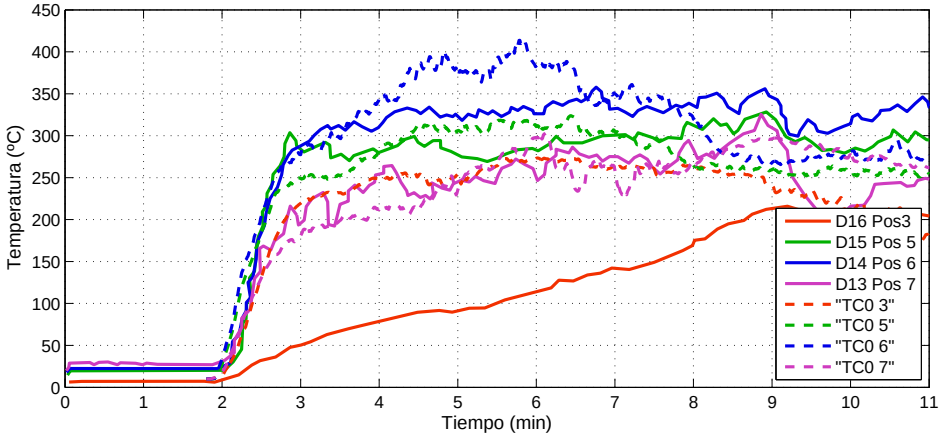
Figura 6.28: Comparación temperaturas registradas (líneas continuas) por los termopares a lo largo del intradós de túnel (posición 5) y temperaturas simuladas (líneas de trazos)

6.3.9 Limitaciones del modelo

Es muy importante tener en cuenta que en un modelo se realizan muchas aproximaciones. Los modelos modelan la realidad pero no lo son. En el caso en estudio existían varios parámetros que se desconocían y que por tanto no pudieron ser incluidos en el modelo. Sin embargo los resultados obtenidos y los parámetros del modelo final son coherentes con la información disponible en el ensayo.



(a) Modelo con $Q_{max} = 21,6MW$ y $d = 2m$



(b) Modelo con $Q_{max} = 21,6MW$ y $d = 2,8m$

Figura 6.29: Comparación temperaturas registradas (líneas continuas) por los termopares en la sección transversal de túnel para x=0 y temperaturas simuladas (líneas de trazos)

Fundamentalmente se trabajó con un material uniforme en todo el túnel lo cual se sabe que no es real, ya que en la parte central se colocaron distintos recubrimientos previos al ensayo. La variación de las propiedades térmicas del recubrimiento y de su contenido de humedad (por ser capas recientemente agregadas) generan que el material pueda absorber distintas cantidades de calor y se generen variaciones entre las temperaturas registradas por el ensayo y las modeladas.

La temperatura al inicio del ensayo se consideró como uniforme en el modelo, sin embargo en el ensayo se registraron valores diferentes en distintos puntos, siendo unos grados mayor en la zona donde se generó el fuego.

A su vez en la sección transversal del túnel de coordenada x=0 se obtienen buenos resultados. En otras secciones no se obtienen tan buenos resultados, aunque también hay dudas sobre los datos del ensayo.

Si bien hay puntos donde no se logra encajar los resultados, lo importante es que en términos generales se logra que los resultados reproduzcan adecuadamente las temperaturas a lo largo del intradós del túnel (posición 5).

6.4 Conclusiones

En este capítulo se plantea una metodología para **deducir el escenario de fuego a partir de datos de temperaturas registrados durante un evento de fuego** y se aplica a un caso concreto, en este caso a un ensayo de fuego.

De los modelos de FDS realizados se puede concluir:

- Los modelos de FDS brindan mucha información que puede ser de gran utilidad para comprender las **causas del incendio** y las **anomalías en el registro de datos**. Por ejemplo los datos de temperatura del gas y en superficie obtenidos en FDS pueden servir para comprobar errores de medición o de funcionamiento de sensores en la realidad.
- Los modelos de FDS permiten obtener las temperaturas de los puntos de la superficie monitorizada con **mayor precisión**.
- En la **definición de los parámetros de un modelo** es importante tener en cuenta la **definición del tamaño de las celdas** ya que FDS adapta las dimensiones de todos los objetos definidos a los puntos del mallado del modelo. Por ejemplo si el tamaño de las celdas en la zona de fuego es de 20 cm de lado y se define la superficie de fuego con una altura de 30 cm, FDS la colocará a una altura de 20 o 40 cm debido a que serán los puntos más cercanos definido por el mallado.
- La validación de un modelo y el estudio de su volumen de control y tamaño de celda son muy importantes.
- La **complejidad del problema** se incrementa por la presencia de varias cargas de fuego (varias bateas). En un caso de un incendio que involucre solo un vehículo se elimina la variable de distancia entre las cargas de fuego lo cual simplifica el problema.

Los modelos de FDS reproducen adecuadamente, aunque con sus limitaciones, las pautas de comportamiento de un incendio en un túnel, por lo que pueden ser empleados como base para la **generación de escenarios de fuego** que permitan estudiar las **pautas de monitorización** en un túnel determinado. Este capítulo permite **validar el modelo** de mecánica de los fluidos, el cual se utilizará en el Capítulo 7.

La metodología planteada permite utilizar los datos obtenidos de una monitorización de temperaturas en túneles para deducir el escenario de incendio en términos de HRR en función del tiempo. Por lo tanto facilita la comprensión de las causas del incendio.

Capítulo 7

Aplicación de las pautas de diseño de configuraciones de sensores para la monitorización de temperatura al caso del túnel Virgolo

7.1 Introducción

En este capítulo se aplican las pautas para el diseño de una configuración de sensores para la monitorización de temperaturas en túneles al caso del túnel Virgolo. La elección de este túnel se debe a que se dispone de suficiente información del mismo y se cuenta con un modelo de mecánica de los fluidos ya validado (ver Capítulo 6).

7.2 Paso 1: Recopilación de información

La descripción geométrica del túnel se realizó en la subsección 6.2.1.

Es importante destacar que el túnel cuenta con un sistema de radio, teléfono y extinguidores de incendio. Sin embargo no cuenta con sistemas de ventilación forzada, sistemas de detección de vehículos ni sistema de alarma de incendios.

El túnel posee un tráfico de 9300 vehículos por día. Respecto a la composición del tráfico hay que destacar que tiene un 10 % de vehículos de cargas pesadas y un 2-5 % de vehículos de cargas peligrosas. Además el túnel es de peaje (Kelly, 2008).

7.3 Paso 2: Definición de los Escenarios de fuego

Para definir los escenarios de fuego se adoptan las nueve cargas de fuego propuestas por Marlair et al., 2004. La figura 7.1 muestra la forma de las curvas propuestas y los parámetros que la caracterizan. Éstas curvas tienen tres fases: una fase inicial de crecimiento lineal caracterizada por su pendiente $\alpha_{g,L}$, seguida por una fase de meseta caracterizada por el valor máximo de la tasa de liberación de calor Q_{max} y finalmente una fase de decrecimiento lineal caracterizada por su pendiente $\alpha_{D,L}$.

El tiempo t_{max} es el tiempo necesario para alcanzar la tasa de liberación de calor máxima Q_{max} y se obtiene por la siguiente ecuación:

$$t_{max} = \frac{Q_{max}}{\alpha_{g,L}}$$

Con $\alpha_{g,L}$ igual a 10 MW/min para valores de $Q_{max} \leq 30MW$ e igual a 20 MW/min para el resto de los casos. El tiempo t_D marca el inicio de la fase de decrecimiento y el tiempo t_d la duración total del fuego. Su valores están adoptados las recomendaciones francesas (PIARC, 1999). La tabla 7.1 resume los valores característicos de cada una de las funciones de HRR utilizadas y las dimensiones de la carga de fuego, éstos fueron adoptados de (Caliendo et al., 2012).

Se adopta un tiempo de simulación del fuego 30 minutos. La figura 7.2 muestra las curvas de HRR planteadas durante el tiempo de simulación. Este tiempo se elige debido a que antes de llegarse a éste se alcanzarán las temperaturas máximas, ya que estas tienden a estabilizarse luego de que las funciones de HRR alcancen la zona de meseta.

Además, en un lapso de tiempo menor a 30 minutos debería empezar la intervención del cuerpo de bomberos lo cual cambiaría las condiciones del incendio, por tanto simular más de 30 minutos no aporta resultados de utilidad.

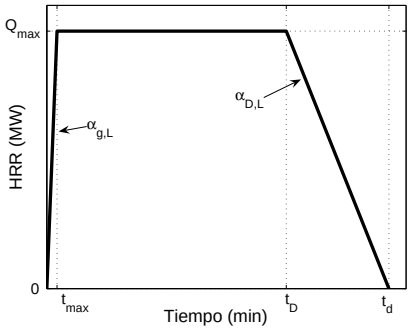


Figura 7.1: Curva típica de la HRR en función del tiempo

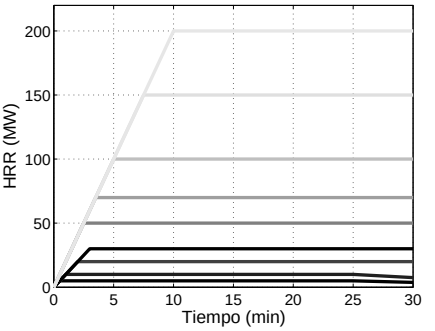


Figura 7.2: Escenarios de fuego estudiados. HRR en función del tiempo

Tabla 7.1: Cargas de fuego propuestas

Nombre de la carga de fuego	Función HRR(t)				Geometría de la carga de fuego		
	Q_{max} [MW]	t_{max} [min]	t_D [min]	t_d [min]	Long. [m]	Ancho [m]	Altura[1] [m]
HRR 5	5	0.5	25	45	6	2	0.2
HRR 10	10	1	25	45	12	2	0.2
HRR 20	20	2	35	55	12	2.5	0.2
HRR 30	30	3	70	100	12	2.5	0.4
HRR 50	50	2.5	70	100	12	2.5	0.4
HRR 70	70	3.5	70	100	12	2.5	0.4
HRR 100	100	5	70	100	12	2.5	0.4
HRR150	150	7.5	70	100	12	2.5	0.4
HRR 200	200	10	70	100	12	2.5	0.4

[1] Altura de la carga de fuego medida desde el pavimento del túnel.

Los escenarios de fuego quedarán definidos por las curvas de HRR (cargas de fuego) y por su posición en el túnel. Se propone para cada una de las cargas de fuego dos posiciones en el túnel. La primera considera la carga de fuego en el centro de la longitud del túnel y en el centro de la sección transversal; y la segunda considera la carga en el centro de la longitud del túnel y en el centro de un carril. Por lo tanto se deberán realizar 18 modelos de mecánica de los fluidos.

7.4 Paso 3: Modelos de mecánica de los fluidos

Los modelos de mecánica de los fluidos que se realizan en este apartado están basados en el modelo realizado y validado en la sección 6.3. Se mantendrá la geometría y los materiales del túnel y se modificarán los escenarios de fuego y los datos de salida.

También se mantendrá el volumen de control y el mallado utilizado. En este caso como el objetivo de los modelos es obtener temperaturas en toda la longitud del túnel es necesario modelar toda su longitud independientemente que sea necesario o no por las condiciones de contorno, por lo cual no sería necesario el estudio del volumen de control.

Como se explica en sección B.2 la resolución de malla puede cuantificarse a través del parámetro adimensional $D^*/\delta x$, donde δx es el tamaño de celda y D^* es el diámetro característico de la llama:

$$D^* = \left(\frac{Q_{max}}{\rho_a c_p T_\infty \sqrt{g}}\right)^{\frac{2}{5}}$$

Donde ρ_a es la densidad del aire, c_p es el calor específico del aire, T_∞ es la temperatura ambiente a tiempo infinito y g es la gravedad.

Luego a medida que la tasa de liberación máxima Q_{max} aumenta, se pueden utilizar tamaños de celda mayores. El mallado del modelo anterior se definió teniendo en cuenta una carga de fuego Q_{max} de 30 MW. Como los escenarios de fuego planteados tienen cargas de fuego en el rango de 5 a 200 MW, deberá verificarse si el tamaño de celda utilizado es válido para los modelos de 5, 10 y 20 MW.

La tabla 7.2 muestra los tamaños de celda necesarios para valores de Q_{max} de 5, 10 y 20 MW considerando valores del parámetro $D^*/\delta x$ de 4, 10 y 16. Se puede observar que el mallado del modelo anterior, con un tamaño de celda δx de 0,20 m en la zona del fuego, cumple con el tamaño de celda necesario para una tasa de liberación máxima de 20 MW para las tres relaciones de $D^*/\delta x$ planteadas. Para Q_{max} igual a 10 MW el tamaño de celda de 0,20 m resulta adecuado para valores del parámetro $D^*/\delta x$ iguales a 4 y 10 y para Q_{max} igual a 5 MW cumple para el valor de $D^*/\delta x$ igual a 4 y queda muy cerca de cumplir para el valor de 10.

Tabla 7.2: Tamaño de celda necesario para los modelos con Q_{max} menores a 30 MW

Q_{max} [MW]	D^*	$\delta x(4)$	$\delta x(10)$	$\delta x(16)$
5	1.83	0.46	0.18	0.11
10	2.41	0.6	0.24	0.15
20	3.18	0.8	0.32	0.20

Por lo tanto podríamos decir que el mallado propuesto cumple con los tamaños de celda necesarios para relaciones de $D^*/\delta x$ iguales a 4 y 10. Teniendo en cuenta que para cumplir con la relación de 16 habría que aumentar los tiempos de modelado y que son solo dos cargas de fuego las que no verifican esta ecuación, se optó por mantener el mallado utilizado anteriormente.

La carga de fuego se modela como un sólido prismático, para cada caso sus dimensiones son definidas por la tabla 7.1. En la cara superior del prisma se asigna la carga de fuego por metro cuadrado ($HRRPUA = \frac{Q_{max}}{A_f}$) y se define una función de crecimiento con los parámetros de la tabla 7.1.

Es importante remarcar que para facilitar la introducción de las cargas de fuego se colocó el origen del eje x del modelo en el centro del túnel, luego el centro de las cargas de fuego tendrán coordenada x igual a cero. Cómo el túnel tiene una pendiente longitudinal del 1 % los valores de x positivos están aguas abajo del fuego y los de x negativos aguas arriba del fuego.

Como condiciones iniciales del modelo se plantea una temperatura constante en todo el túnel de 20°C.

Se define una cuadrícula de puntos con distancia ente puntos de 1 m en el eje longitudinal. Para definir los puntos de la cuadrícula a lo largo del perímetro de la sección transversal se lo divide en 18 partes iguales resultando 17 puntos con una separación de 1,04 m como muestra la figura 7.3. En la figura también se indica la nomenclatura utilizada para cada punto de la sección transversal.

Por lo tanto la cuadrícula de puntos queda definida por 14603 puntos (859x17). En cada uno de éstos a una distancia de 5 cm hacia el interior de la superficie del túnel se modelan elementos que registran la temperatura del gas, llamados termopares en FDS.

Es fundamental para el posterior manejo de los datos utilizar una nomenclatura apropiada para los sensores. En este caso se los llamo siguiendo la forma T_a_sXXX donde la primer letra indica que se registran valores de temperatura, la letra minúscula luego del primer guión bajo indica la posición del sensor en la sección transversal y luego del segundo guión bajo se indica la coordenada en el eje longitudinal con su signo con tres cifras. En el caso en que la coordenada tenga menos de tres cifras significativas

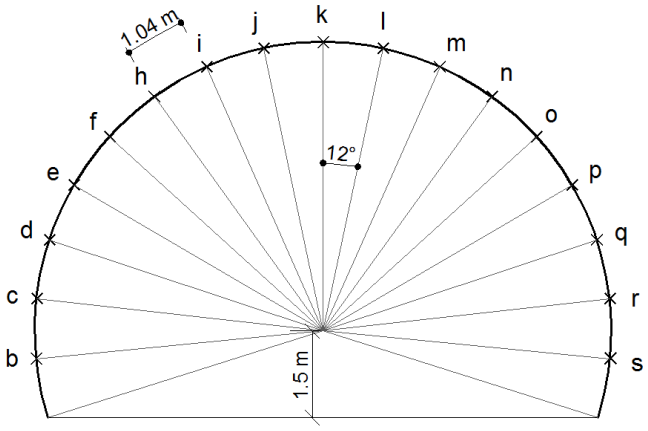


Figura 7.3: División del perímetro de la sección transversal del túnel y nomenclatura de los puntos

se completan con ceros las cifras restantes delante del valor para obtener 3 cifras. Por ejemplo el sensor llamado T_k_-050 representa al sensor colocado en correspondencia con la letra "k" de la sección transversal y a 50m aguas arriba del centro del túnel.

Como recurso computacional para calcular los modelos se ha utilizado el cluster para proceso paralelo masivo Rigel (ver sección 6.3). Los tiempos de modelado variaron entre 66 y 112 horas, siendo los modelos con mayores cargas de fuego los de mayores tiempos de modelados.

7.5 Paso 4: Planteo de las configuraciones de sensores

Se plantean configuraciones de sensores regulares. Cada configuración estará definida por la cantidad de sensores de cada sección transversal monitorizada N_y y su distribución en la sección transversal y el número de secciones monitorizadas en el túnel N_x definido por su separación longitudinal n_x.

Se adoptan valores de N_y de 3 a 7 y para cada valor de N_y se plantean 5 distribuciones distintas de los sensores en la sección transversal. Estas distribuciones se plantean teniendo en cuenta los puntos de mayores temperaturas. La figura 7.4 muestra las 25 distribuciones de sensores en la sección transversal planteadas. En la figura cada fila representa las configuraciones de un determinado valor de N_y.

Se adoptan valores de n_x de 5, 10, 15 y 20 m, resultando valores de N_x de 171, 85, 57 y 42 respectivamente. Por lo tanto se tiene un total de 100 configuraciones, éstas se pueden agrupar teniendo en cuenta las configuraciones que tienen igual N_y e igual n_x. Resultando 20 grupos cada uno con 5 posibles distribuciones de sensores en la sección transversal. Cada grupo tendrá la misma cantidad de sensores, sin embargo debido a las diferencias en la distribución de los sensores en la sección transversal se obtendrán comportamientos diferentes. El objetivo de separar las configuraciones de sensores por grupos es poder seleccionar de cada grupo la configuración que tiene mejor comportamiento.

A cada configuración se le asigna un nombre teniendo en cuenta la distribución de sensores en la sección transversal y la separación longitudinal entre sensores. Por ejemplo una configuración con 3 sensores en la sección transversal colocados en las posiciones 'c', 'k' y 'r' y con una separación longitudinal de 5 m se llama 'ckr 5'.

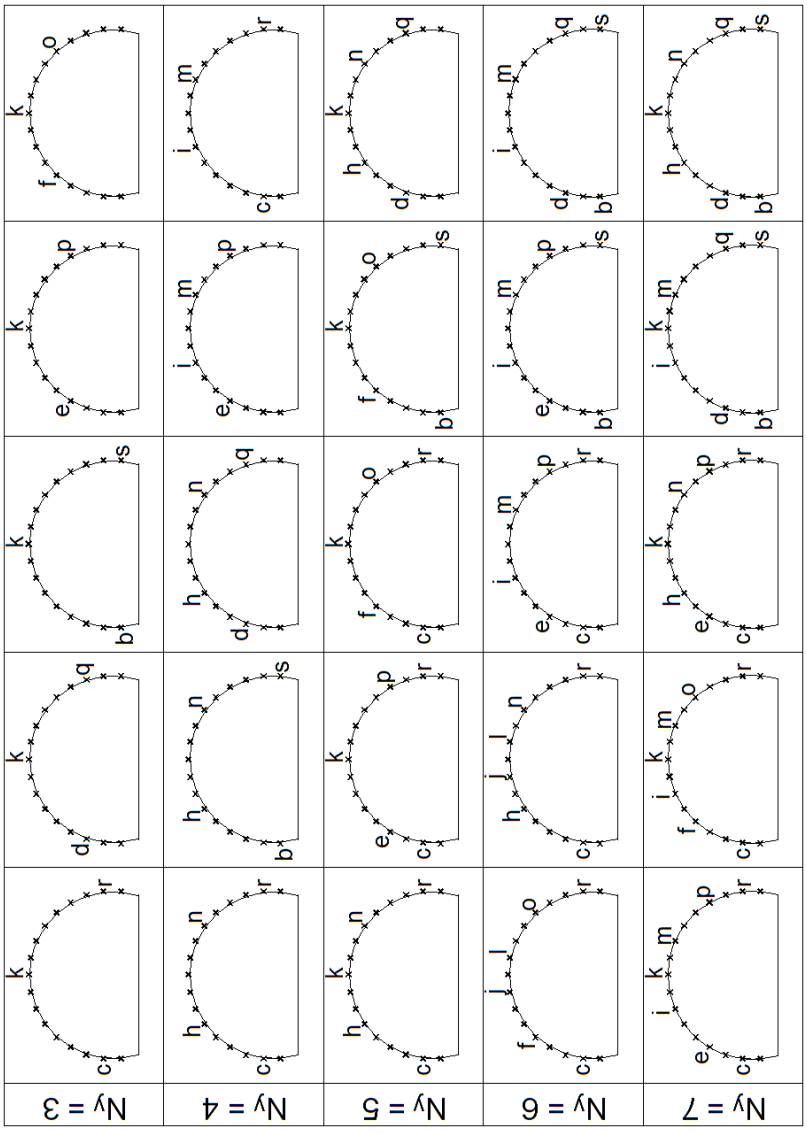
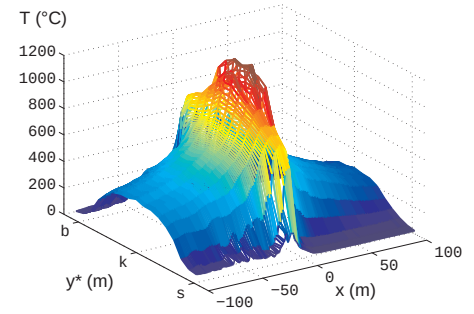


Figura 7.4: Distribución de sensores en la sección transversal. En cada fila se representan 5 distribuciones diferentes de una misma cantidad de sensores.

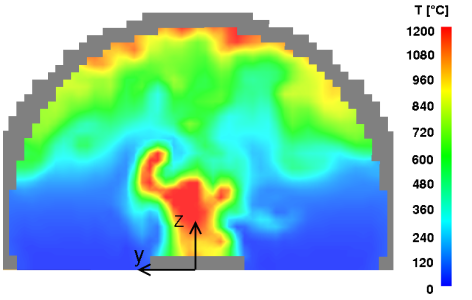
7.6 Paso 5: Evaluación de las configuraciones propuestas

Cada uno de los modelos de FDS da como resultado las temperaturas del gas en función del tiempo en cada uno de los 14603 puntos de la cuadrícula de la superficie monitorizada. Éstas temperaturas son llamadas de ahora en adelante *temperaturas reales* debido a que se asume que son las que ocurrirían en caso de un incendio real.

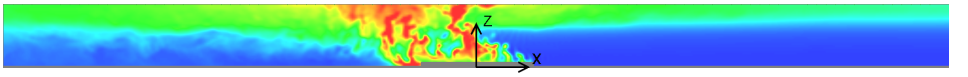
La figura 7.5 muestra un ejemplo de temperaturas reales para el caso de un incendio provocado por un vehículo de cargas pesadas (HRR = 100 MW) ubicado en el centro de la sección transversal y en la mitad de la longitud del túnel, luego de 15 minutos de iniciado el incendio. La figura 7.5a muestra una representación de las temperaturas reales en la superficie monitorizada en función de sus coordenadas (x, y^*) en los 200 m centrales del túnel. En cambio, la figura 7.5b y la figura 7.5c muestran las temperaturas en la sección transversal del túnel para la coordenada $x = 0$ y en la sección longitudinal del túnel para la coordenada $y = 0$ respectivamente.



(a) Superficie monitorizada desarrollada $(-100m < x < 100m)$



(b) Plano x=0



(c) Plano y=0 $(-50m < x < 50m)$

Figura 7.5: Resultados de un modelo de FDS. Temperaturas reales para el intervalo de tiempo t=15 min para el escenario de fuego HRR=100 en el centro del túnel y en el centro de la sección transversal

7.6.1 Cálculo de las temperaturas en todos los puntos de la cuadrícula

En un túnel real, si se instala un sistema de monitorización, los sensores estarán colocados en posiciones específicas. Por lo tanto se registrarán las temperaturas en determinados puntos de la cuadrícula y en el resto de los puntos de la cuadrícula deberán calcularse por interpolación. Estas temperaturas las llamaremos *temperaturas calculadas*.

En este estudio se consideran 100 configuraciones de sensores y 18 escenarios de fuego. Para cada escenario de fuego se consideran a su vez 2 posibles posiciones de los sensores respecto al fuego. Por lo tanto deberán calcularse las temperaturas en función del tiempo en los 14603 puntos de la cuadrícula para las 360 situaciones posibles (100x18x2).

En este caso trabajaremos con los siguientes métodos de interpolación:

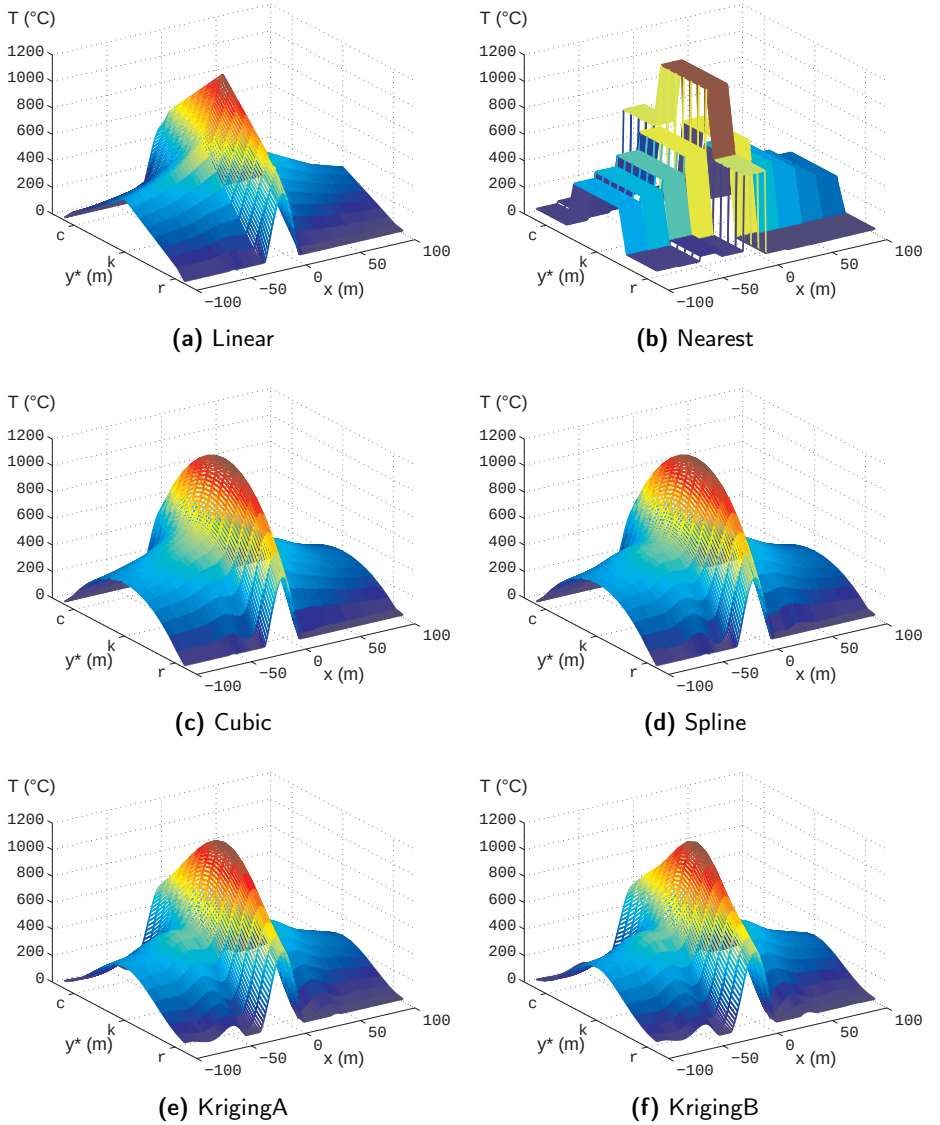
- Interpolación lineal a trozos, a la que llamaremos **Linear**.
- Vecino más cercano, a la que llamaremos **Nearest**.
- Interpolación cúbica a trozos con polinomios de hermite, a la que llamaremos **Cubic**.
- Iterpolación cúbica spline, a la que llamaremos **Spline**.
- Kriging, para este método definimos una función de regresión constante (polinómica de orden cero) y una función de correlación cúbica-spline. A su vez se definieron dos conjuntos de coeficientes distintos dando origen a dos interpolaciones diferentes a las que llamaremos **KrigingA** y **KrigingB**.

En todos los casos las interpolaciones se realizaron utilizando funciones de Matlab (MATLAB, 2011). Para los cuatro primeros métodos se utilizó la función *intep2* (Moler, 2008), mientras que para las interpolaciones tipo Kriging se utilizó el paquete DACE (Lophaven et al., 2002).

La figura 7.6 muestra un ejemplo de las temperaturas interpoladas a partir de los datos de la configuración de sensores 'ckr 20' para el escenario de fuego con HRR igual a 100 MW ubicado en el centro de la longitud del túnel, en el centro de la sección transversal y considerando que el incendio ocurre exactamente entre dos secciones monitorizadas, para el intervalo de tiempo t=15 minutos.

El comportamiento de los métodos de interpolación se evalúa a través de índices (ver subsección 7.6.2). Si se da el caso de que varios métodos tengan un comportamiento similar, no encontrándose diferencias significativas entre ellos con el criterio de los índices, se deberá tener en cuenta la velocidad de cálculo del método, dándose preferencia

a los métodos más rápidos. Siguiendo este criterio, el método Nearest es el mejor, seguido por los métodos Spline, KrigingA y Kriging B, Linear y por último Cubic.



(a) Linear **(b)** Nearest

(c) Cubic **(d)** Spline

(e) KrigingA **(f)** KrigingB

Figura 7.6: Métodos de interpolación para la configuración 'ckr 20'

7.6.2 Definición y evaluación de errores

Para evaluar las configuraciones y los métodos de interpolación, se definen cuatro índices. Éstos deberán calcularse para todas las configuraciones, todos los escenarios de fuego y las dos posiciones relativas de los sensores respecto al fuego.

Para obtener errores que no sean dependientes del tiempo y considerando que cuando las temperaturas se estabilizan en el túnel, los errores también, se decide trabajar con errores promedio para el intervalo de tiempo comprendido entre 600 y 1800 segundos. Éste intervalo es elegido debido a que a partir de los 600 segundos todas las curvas de HRR propuestas están en la fase de meseta y por lo tanto los errores no tendrán una gran variación, siendo el promedio de los errores en el tiempo una buena aproximación.

Se trabajará con los índices RMSE (Raíz del error cuadrático medio, *Root Mean Square Error* en inglés) y MAE (Error absoluto medio, *Mean Absolute Error* en inglés) debido a que han sido utilizados previamente para evaluar interpolaciones de la temperatura del gas por otros autores (ver por ejemplo Willmott y Matsuura, 2006; Saz-Sánchez et al., 2010). Estos errores quedan definidos por las siguientes expresiones:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(T_{cal_i} - T_{FDS_i}\right)^2} \tag{7.1}$$

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|T_{cal_i} - T_{FDS_i}\right| \tag{7.2}$$

Donde T_{FDS_i} es la *temperatura real*, obtenida por el modelo de FDS en el punto i y T_{cal_i} es la *temperatura calculada* por interpolación en el punto i. Se decide contemplar en la definición de este error solo los 200 m centrales del túnel debido a que es dónde está la carga de fuego, y consecuentemente las mayores temperaturas y mayores errores, por esto, n es la cantidad de puntos de cuadrícula en los 200 m centrales del túnel. Así los índices serán mayores y facilitarán la comparación de los resultados.

Los índices MAE y RMSE dan una estimación del error medio y su dispersión respectivamente, teniendo como unidades las de las temperaturas (°C).

Por otro lado interesa cuantificar el error relativo. Éste error se expresa en porcentaje y por lo tanto es importante cuantificar este error asociado a intervalos de temperatura, ya que por ejemplo un error relativo del 50 % en un punto que tiene una temperatura de 30°C no es representativo.

Se definen los índices MAE(RE300) y MAE(RE600). Éstos índices son el Error absoluto medio del Error relativo para los puntos con temperaturas mayores a 300°C y el Error

absoluto medio del Error relativo para los puntos con temperaturas mayores a 600°C y están definidos por las siguientes expresiones:

$$MAE(RE300) = \frac{1}{n_{300}} \sum_{i=1}^{n_{300}} \left| \frac{T_{cal_i} - T_{FDS_i}}{T_{FDS_i}} \right| \tag{7.3}$$

$$MAE(RE600) = \frac{1}{n_{600}} \sum_{i=1}^{n_{600}} \left| \frac{T_{cal_i} - T_{FDS_i}}{T_{FDS_i}} \right| \tag{7.4}$$

Donde n_{300} y n_{600} son la cantidad de puntos de la cuadrícula que tienen temperaturas mayores a 300 y 600°C respectivamente.

7.6.3 Elección del método de interpolación

Una vez definidos y evaluados los índices, se comparará para cada configuración los errores de los distintos métodos de interpolación utilizados. Esto es necesario debido a que no necesariamente el mismo método de interpolación será el que brinde mejores resultados para todas las configuraciones.

Se comparan los datos de los diferentes métodos para elegir el método de interpolación que estadísticamente muestre un mejor comportamiento. Para esto utilizamos diagramas de cajas y bigotes y reglas de decisión.

Para una de las configuraciones propuestas se realizan cuatro **diagramas de cajas y bigotes** (ver subsección 5.2.5), uno por cada índice definido. En cada diagrama se representan los valores que toma el índice teniendo en cuenta los seis métodos de interpolación para las 36 posibilidades estudiadas (9 HRR x 2 posiciones x 2 posiciones relativas del fuego a los sensores). La figura 7.7 muestra un ejemplo de los diagramas de cajas y bigotes para la configuración 'cimr 5'. La figura muestra que los métodos Cubic y Spline son los que presentan valores menores para los cuatro índices. Sin embargo estos diagramas no indican si existen diferencias significativas entre los métodos desde un punto de vista estadístico.

Por esto, se utiliza la **prueba no paramétrica de Kruskal Wallis** para detectar si existen diferencias significativas entre los métodos de interpolación estudiados. Por ejemplo, para la configuración 'cimr 5' esta prueba indicó que para los cuatro índices existen diferencias significativas entre los métodos de interpolación.

Para evaluar cuáles son los métodos que presentan diferencias significativas se aplicaron **pruebas de comparaciones múltiples**. Los resultados de estas pruebas, para la configuración 'cimr 5' indican que para los índices RMSE y MAE el método Nearest presenta diferencias significativas con los métodos Cubic y Spline. Para los índices MAE(RE300) y MAE(RE600), los métodos Cubic y Spline presentan diferencias significativas con los demás métodos. De acuerdo con estos resultados los métodos Cubic

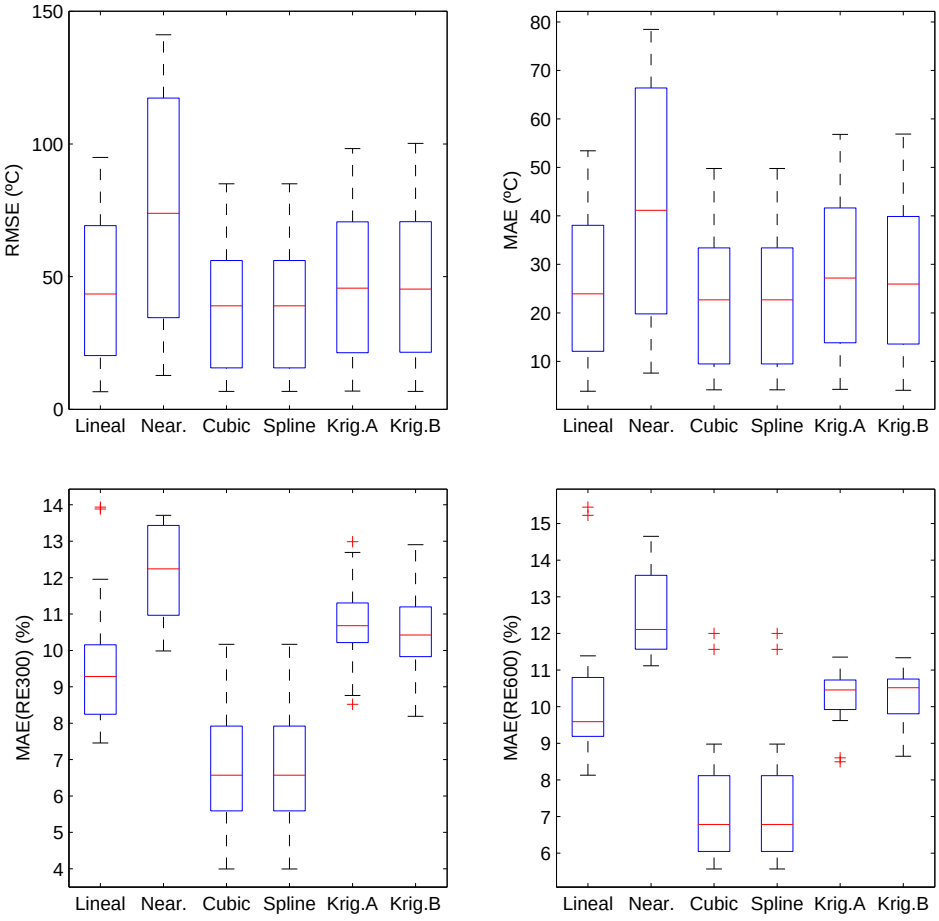


Figura 7.7: Diagrama de cajas y bigotes para los 4 índices para la configuración 'cimr 5' considerando las 36 situaciones posibles

y Spline son los que tienen mejor comportamiento y no presentan diferencias significativas entre ellos en ninguno de los cuatro índices estudiados. Luego para elegir entre uno de ellos se utiliza el segundo criterio, que contempla la velocidad de cálculo del método. Finalmente el método Spline fue seleccionado debido a que requiere menor tiempo computacional que el método Cubic.

Este procedimiento se repitió para todas las configuraciones de sensores. En todos los casos se encontró que el método Nearest presenta diferencias significativas con los demás métodos, especialmente para los índices MAE(RE300) y MAE(RE600). Los métodos KrigingA y KrigingB mejoran su comportamiento a medida que se aumenta el número de sensores de las configuraciones. Sin embargo, para ninguna configuración

éstos métodos llegaron a ser significativamente mejores que los métodos Cúbic o Spline. Por lo tanto para todas las configuraciones se eligió el método de interpolación Spline debido a que en ningún caso otro método resultó significativamente mejor y en todos los casos resultó ser significativamente mejor que el método Nearest (siendo este método el más rápido).

7.7 Paso 6: Comparación de los errores de las configuraciones y sus costos

En este paso se comparan las configuraciones entre sí, teniendo en cuanta la cantidad total de sensores de cada una. Este paso se dividirá en dos etapas. En la primera se compararán las configuraciones que tienen igual N_y e igual n_x y se seleccionará la mejor de ellas. En la segunda etapa se representarán los índices máximos de cada una de las configuraciones seleccionadas en la etapa anterior y se obtendrán las fronteras de Pareto (ver subsección 5.2.6).

7.7.1 Selección de una configuración para cada grupo

El objetivo de este paso es seleccionar las configuraciones que tienen una mejor distribución de los sensores en la sección transversal para una cantidad fija de sensores en la sección transversal y una determinada separación entre secciones monitorizadas. En el caso en estudio, hay 20 grupos cada uno de ellos con 5 configuraciones como se explicó en la sección 7.5.

Para evaluar la configuración de cada grupo que minimiza los índices para la mayoría de los escenarios de fuego se representan los índices de cada configuración versus las HRR estudiadas. Por cada índice y por cada configuración tendremos 4 valores, que representan las dos posibles posiciones del fuego en el túnel y las dos posiciones relativas entre los sensores y el fuego. Por ejemplo, la figura 7.8 muestra los resultados para el grupo formado por las configuraciones con $N_y = 3$ y $n_x = 5$.

En la figura 7.8 se observa que RMSE y MAE incrementan al incrementarse la HRR, mientras que MAE(RE300) y MAE(RE600) tienden a decrecer cuando la HRR crece. Esto ocurre porque a medida que la HRR aumenta, se incrementa la zona de la superficie que se ve afectada por el fuego y los puntos que tienen temperaturas elevadas. Para calcular RMSE y MAE se usan siempre la misma cantidad de puntos, a mayores HRR resultan mayores RMSE y MAE.

Sin embargo, la cantidad de puntos usados para calcular MAE(RE300) y MAE(RE600) aumentan a medida que aumenta la HRR. Esto resulta en un aumento en la cantidad de valores utilizados para calcular MAE(RE300) y MAE(RE600) y como consecuencia, de acuerdo a la Ecuación 7.3 y a la Ecuación 7.4 en una tendencia en estos errores a decrecer. Este patrón se observó en los 20 grupos de configuraciones analizados.

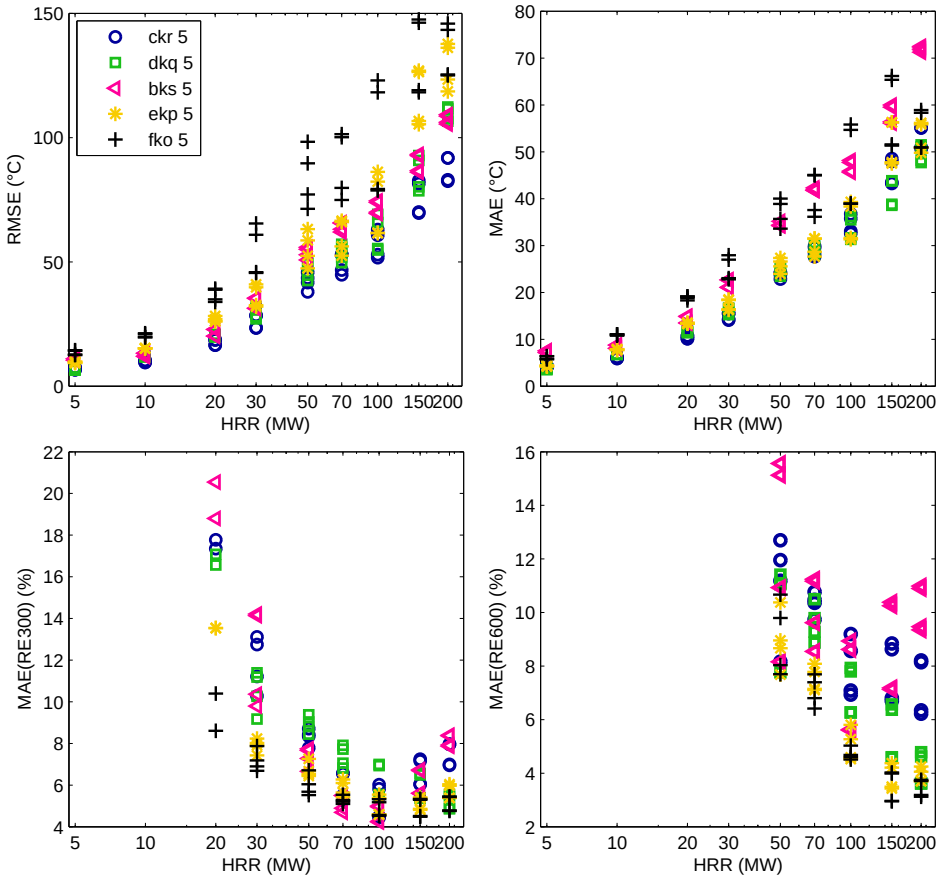


Figura 7.8: Evaluación de los errores para las 5 configuraciones con $N_y = 3$ y $nx = 5$

Algunas configuraciones tienen los sensores concentrados fundamentalmente en la parte superior del túnel, como 'fko 5'. Éste tipo de configuraciones muestran un mejor comportamiento para MAE(RE300) y MAE(RE600) que para RMSE y MAE . Esto puede resultar contradictorio, sin embargo su explicación radica en que para este tipo de configuraciones las mayores diferencias entre las temperaturas reales y calculadas se dan aproximadamente en la mitad inferior de los laterales del túnel y en estas zonas las temperaturas son menores a 300°C, por lo que estos puntos no forman parte de MAE(RE300) y MA(RE600).

Para este grupo, los menores valores de RMSE se dan para la configuración 'ckr 5' variando entre 7.5 y 91.9 °C dependiendo de la HRR. Para la configuración 'dkq 5' varían entre 6.58 y 112.3 °C, para 'bks 5' entre 10.39 y 109.2 °C, para 'ekp 5' entre 9.3 y 137.7 °C y para 'fko 5' entre 12.76 y 146.2 °C.

Respecto a MAE se observan menores diferencias en los resultados, presentando las configuraciones 'ckr 5', 'dkq 5' y 'ekp 5' valores similares. Los valores máximos de MAE para estas configuraciones resultaron 55.2 °C, 51.5 °C y 56.2 °C.

Es importante destacar que MAE(RE300) tiene valores a partir de HRR=20 y MAE(RE600) para HRR=50, esto es porque para HRR menores no se alcanzan temperaturas de 300 y 600°C respectivamente.

Los valores de MAE(RE300) son similares para las cinco configuraciones estudiadas. La configuración 'bks 5' es la que tiene mayores variaciones de MAE(RE300), presentando valores entre 4.2 % y 20.5 %, mientras que la configuración 'fko 5' es la que tiene menores variaciones, presentando valores entre 4.5 % y 10.4 %. Los valores de MAE(RE300) varían entre 4.5 % y 17.5 % para 'ckr 5' y entre 4.9 % y 17.1 % para 'dkq 5'.

Los valores de MAE(RE600) presentan aún menores diferencias. Al igual que para MAE(RE300), la configuración 'bks 5' es la que presenta mayores valores (entre 5.6 % y 13.5 %) y 'fko 5' es la que presenta menores valores (entre 2.9 % y 10.7 %). Mientras que para 'ckr 5' el índice varía entre 6.2 % y 12.7 % y para 'dkq 5' entre 3.6 % y 11.4 %.

Finalmente, la configuración 'ckr 5' es seleccionada como la mejor configuración de este grupo porque presenta en la mayoría de los casos de HRR los menores valores de RMSE y MAE. Ésta configuración no es la que minimiza los valores de MAE(RE300) y MAE(RE600), sin embargo las diferencias con los valores mínimos de estos índices es pequeña.

Para los otros 19 grupos se realizó un proceso similar. Las tablas 7.3, 7.4, 7.5 y 7.6 muestran las 20 configuraciones seleccionadas y los valores máximos de RMSE, MAE, MAE(RE300) y MAE(RE600) para cada HRR. Estas tablas también presentan la cantidad total de sensores de cada una de las configuraciones, estando las mismas ordenadas en orden ascendente según este valor.

Tabla 7.3: RMSE máximos

	Total de sensores	RMSE								
		HRR 5	HRR 10	HRR 20	HRR 30	HRR 50	HRR 70	HRR 100	HRR 150	HRR 200
'ckr 20'	129	**9.2**	**13.4**	**26.7**	**41.2**	**68.8**	**82.2**	**102.8**	**120.1**	**128.6**
'ckr 15'	171	**8.4**	**12.5**	**24.1**	**38.4**	**61.8**	**71.7**	**80.5**	**100.9**	**105.9**
'chnr 20'	172	9.9	13.5	24.7	39	64.4	82.2	94.9	109.8	115.2
'cfkor 20'	215	8.8	**12.4**	**23.5**	**36.2**	62.2	77.0	88.3	**100**	102.8
'chnr' 15'	228	9.0	12.5	22.9	37.6	**58.5**	**71.4**	**77.6**	**91.2**	**103.0**
'ckr 10'	258	**7.8**	**11.1**	**19.8**	**32.1**	**48.5**	**55.7**	**67.7**	**86.2**	**97.5**
'ceimpr 20'	258	8.7	12.6	23.3	35.7	62.7	74.8	89.9	99.0	106.4
'cfkor 15'	285	8.1	11.6	21.1	35.6	58.5	66.4	71.7	**79.6**	**83.9**
'bdhknqs 20'	301	8.0	12.4	22.0	34.3	55.8	71.3	82.4	92.5	99.9
'ceimpr 15'	342	8.0	11.2	21.6	33.4	59.5	67.0	72.3	**78.1**	**83.8**
'cimr 10'	344	7.9	**10.7**	**19.0**	**30.8**	**47.8**	56.4	**61.3**	**77.4**	92.6
'bdhknqs 15'	399	**7.1**	10.9	20.5	31.0	51.0	61.1	65.8	**72.8**	**73.4**
'cfkor 10'	430	7.4	**9.9**	**17.5**	**27.2**	**43.3**	**53.2**	**54.7**	**64.3**	**71.7**
'ckr 5'	516	7.5	10.4	18.6	28.4	45.8	53.0	63.0	82.7	91.9
'ceimpr 10'	516	**7.1**	**9.7**	**17.1**	**26.4**	**43.0**	**48.2**	**51.7**	**61.9**	**68.5**
'bdhknqs 10'	602	**6.2**	**9.5**	**16.4**	**24.2**	**37.6**	**42.8**	**46.7**	**52.0**	**55.0**
'cimr 5'	688	7.4	9.5	17.0	26.5	42.2	51.1	56.5	73.7	85.0
'cfkor 5'	860	6.9	**8.5**	**15.0**	**22.5**	37.9	46.2	50.2	57.5	62.0
'ceimpr 5'	1032	6.4	**8.3**	**14.6**	**20.7**	**34.5**	**41.4**	**45.3**	53.7	59.2
'bdhknqs 5'	1204	**5.2**	**7.8**	**13.1**	**18.1**	**28.7**	**34**	**38**	**41.8**	**42.4**

Tabla 7.4: MAE máximos

	Total de sensores	MAE								
		HRR 5	HRR 10	HRR 20	HRR 30	HRR 50	HRR 70	HRR 100	HRR 150	HRR 200
'ckr 2'0	129	**5.1**	**7.6**	**14.4**	**21**	**34.6**	**42.7**	**54.7**	**67.8**	**73.3**
'ckr 15'	171	**4.9**	**7.2**	**13.1**	**19.3**	**30.8**	**37.1**	**45.3**	**58.2**	**63.7**
'chnr 20'	172	5.9	7.9	14.1	21.8	35.3	45.7	52.8	62.9	67.4
'cfkor 20'	215	5.1	**6.9**	**12.4**	**18.7**	**30.6**	39	45.6	**50.5**	**52.5**
'chnr 15'	228	5.4	7.3	13.2	20.8	32.4	40	45.9	54.9	61.8
'ckr 10'	258	**4.6**	**6.6**	**11.4**	**17**	**25.8**	**31.8**	**39.8**	51.7	59.9
'ceimpr 20'	258	4.9	7	12.1	18.5	30.2	38.1	44.7	**49.8**	53.3
'cfkor' 15	285	4.7	**6.4**	**11.3**	18.1	28.3	33.4	**38.3**	**41.1**	**43.3**
'bdhknqs 20'	301	**3.9**	6.9	11.8	17.3	26.6	33.4	40.1	44.1	44.9
'ceimpr 15'	342	4.7	**6.2**	**11.1**	17.1	27.3	32.6	**38.1**	**39.8**	43.6
'cimr 10'	344	4.8	6.4	**11.1**	**17**	26.7	32.8	**36.8**	46.6	54.8
'bdhknqs 15'	399	**3.6**	**6.1**	**10.7**	**15.2**	**23.1**	**27.5**	**31.7**	**34.7**	**34.7**
'cfkor 10'	430	4.2	**5.7**	**9.7**	**14.6**	**23**	28.3	**30.6**	**33.6**	37
'ckr 5'	516	4.4	6.2	10.7	15.5	24.2	29.9	36.7	48.6	55.2
'ceimpr 10'	516	4.1	**5.6**	**9.3**	**14**	**21.9**	**26.2**	**29**	**33.1**	36.3
'bdhknqs 10'	602	**3.1**	**5.4**	**8.9**	**12.2**	**18**	**21**	**23.6**	**26**	**26.5**
'cimr' 5	688	4.5	5.8	9.9	15	23.5	29.2	33.7	43.4	49.8
'cfkor 5'	860	3.9	**5**	**8.4**	12.5	20.1	24.4	26.6	29.2	31.3
'ceimpr 5'	1032	3.7	**4.7**	7.9	**11.5**	18.1	22.2	25	27.8	30.4
'bdhknqs 5'	1204	**2.7**	**4.5**	**7.2**	**9.7**	**14.2**	**16.6**	**18.8**	**20.7**	**20.2**

Tabla 7.5: MAE(RE300) máximos

	Total de sensores	MAE(RE300)								
		HRR 5	HRR 10	HRR 20	HRR 30	HRR 50	HRR 70	HRR 100	HRR 150	HRR 200
'ckr 20'	129	-	-	**31.1**	**22.6**	**13.2**	**10.3**	**9.2**	**9.7**	**9.7**
'ckr 15'	171	-	-	**29.7**	**19.1**	**11.5**	**8.6**	**7.4**	**8.4**	**8.8**
'chnr 20'	172	-	-	**18.9**	**17.8**	13.5	10.7	9	9	9.3
'cfkor 20'	215	-	-	27.7	**13.7**	**9.9**	**8.3**	7.5	**6.7**	**7**
'chnr 15'	228	-	-	**17.1**	15.4	12	9.4	7.5	8	8.7
'ckr 10'	258	-	-	21.5	14.8	**9**	**6.9**	**6.4**	7.6	8.5
'ceimpr 20'	258	-	-	25.2	**13.6**	10.6	9.6	8.1	6.7	**6.6**
'cfkor 15'	285	-	-	24.5	**11.8**	**8.4**	**6.9**	**5.9**	**5.6**	**6.2**
'bdhknqs 20'	301	-	-	20.5	13.9	10.3	9.1	7.7	6.9	**5.3**
'ceimpr 15'	342	-	-	23.8	**11.2**	9.3	8.2	6.9	5.6	5.7
'cimr 10'	344	-	-	**11.4**	12.8	9.1	6.9	**5.6**	6.8	7.8
'bdhknqs 15'	399	-	-	19.9	11.8	8.7	7.2	6.2	5.8	**4.4**
'cfkor 10'	430	-	-	**10.7**	**8.5**	**6.3**	**5.3**	**4.4**	**4.6**	5.5
'ckr 5'	516	-	-	17.8	13.1	8.7	6.6	6	7.2	8
'ceimpr 10'	516	-	-	11.6	8.6	7.2	6.5	5.4	4.7	4.9
'bdhknqs 10'	602	-	-	**9.5**	**8.4**	6.6	5.8	5	4.7	**3.4**
'cimr 5'	688	-	-	**8.7**	10.2	7.9	6.1	5.2	6.3	7.2
'cfkor 5'	860	-	-	8.1	**6.5**	**5.1**	**4.2**	**3.7**	**3.9**	4.9
'ceimpr 5'	1032	-	-	**8**	6.8	6.2	5.6	4.7	4	4.2
'bdhknqs 5'	1204	-	-	**6.6**	**6.2**	5.5	4.7	4.2	4	**2.8**

Tabla 7.6: MAE(RE600) máximos

	Total de sensores	MAE(RE600)								
		HRR 5	HRR 10	HRR 20	HRR 30	HRR 50	HRR 70	HRR 100	HRR 150	HRR 200
'ckr 20'	129	-	-	-	-	**27.5**	**21.7**	**17.7**	**14.5**	**12**
'ckr 15'	171	-	-	-	-	**24.2**	**16.8**	**12.4**	**11.1**	**9.6**
'chnr 20'	172	-	-	-	-	**15.8**	16.9	16.6	12.6	10.4
'cfkor 20'	215	-	-	-	-	23.3	**14.3**	12.6	**9.6**	**8.2**
'chnr 15'	228	-	-	-	-	**13.9**	15.2	**12.1**	10.1	9.3
'ckr 10'	258	-	-	-	-	15.3	**11.3**	**10**	9.7	9
'ceimpr 20'	258	-	-	-	-	21.6	14.7	13.3	9.6	8.7
'cfkor 15'	285	-	-	-	-	18.7	11.9	**9**	**6.8**	**6.1**
'bdhknqs 20'	301	-	-	-	-	19.8	15.5	12.6	9.7	8
'ceimpr 15'	342	-	-	-	-	21	12.9	10.1	**6.8**	6.2
'cimr 10'	344	-	-	-	-	15.5	**10.6**	**8.1**	7.7	7.5
'bdhknqs 15'	399	-	-	-	-	17	11.5	9.1	7.1	**5.7**
'cfkor 10'	430	-	-	-	-	14.9	**9.4**	**5.4**	**4.6**	**4.8**
'ckr 5'	516	-	-	-	-	**12.7**	10.8	9.2	8.8	8.2
'ceimpr 10'	516	-	-	-	-	16.6	**8**	5.8	4.7	**4.6**
'bdhknqs 10'	602	-	-	-	-	15.9	**7.6**	5.9	4.8	**3.8**
'cimr 5'	688	-	-	-	-	**12**	9	7.2	6.9	6.5
'cfkor 5'	860	-	-	-	-	**9.1**	**6.7**	**4.1**	**3.4**	**3.8**
'ceimpr 5'	1032	-	-	-	-	13.8	**6.7**	4.5	3.6	**3.7**
'bdhknqs 5'	1204	-	-	-	-	**8.2**	**5.8**	4.4	3.7	**2.8**

7.7.2 Comparación de las configuraciones seleccionadas

Las 20 configuraciones seleccionadas en la subsección 7.7.1 serán comparadas entre si teniendo en cuenta los dos objetivos del problema: disminuir los índices y disminuir el costo de la monitorización. Luego se representan los valores de cada uno de los índices versus la cantidad total de sensores de cada configuración. Éste parámetro se utiliza debido a que es proporcional al costo del sistema de monitorización.

Las soluciones encontradas son analizadas según el criterio de los óptimos de Pareto, siendo este criterio usual en los problemas de optimización multiobjetivo (ver por ejemplo Paya et al. (2008) y Orcesi y Frangopol (2011)).

Las figuras 7.9, 7.10, 7.11 y 7.12 representan para cada una de las HRR estudiadas los valores de los índices versus la cantidad total de sensores. Cada HRR es representada por un color diferente. Las 20 configuraciones representadas están agrupadas en función de la cantidad de sensores en la sección transversal, luego las configuraciones con el mismo N_y están representadas con el mismo tipo de marcador. Para cada valor de HRR y de N_y se representan cuatro puntos, estos corresponden a los cuatro valores de n_x (5, 10, 15 y 20).

Las configuraciones que forman parte de la frontera de Pareto estas unidas por una línea de trazo, la cual es la frontera de Pareto.

A su vez, para una mejor comprensión y análisis de los resultados se contabilizan la cantidad de veces que cada configuración resulta ser un óptimo de Pareto y se expresan como porcentajes de la cantidad máxima de veces que podrían serlo. Por ejemplo la configuración 'cfkor 20' resulto ser 18 veces óptimo de Pareto del total de las 30 situaciones, por lo tanto es en un 60 % de los casos parte de la frontera de Pareto. Cuanto mayor sea el porcentaje mejor es la configuración.

Estos resultados se muestran gráficamente utilizando un diagrama de burbujas en la figura 7.13. En el cuál el eje x representa la cantidad de sensores en la sección transversal N_y y el eje y representa la separación entre secciones monitorizadas n_x. El diámetro de las burbujas es proporcional a la cantidad de veces que la configuración es óptima de Pareto y en el centro de las burbujas se indica el porcentaje de veces que la configuración forma parte de la frontera de Pareto. Además en los casos en que la configuración presenta muy buenos resultados se indica el nombre de la misma.

De los resultados en las tablas 7.3 a 7.6 y en las figuras 7.9 a 13 se puede observar que:

- Las fronteras de Pareto muestran que un incremento de la cantidad de sensores hasta 400 reduce significativamente los errores. En el rango comprendido entre 400 y 600 sensores la reducción de los errores es menor y para valores de cantidad total de sensores mayores a 600 la reducción de los errores es prácticamente

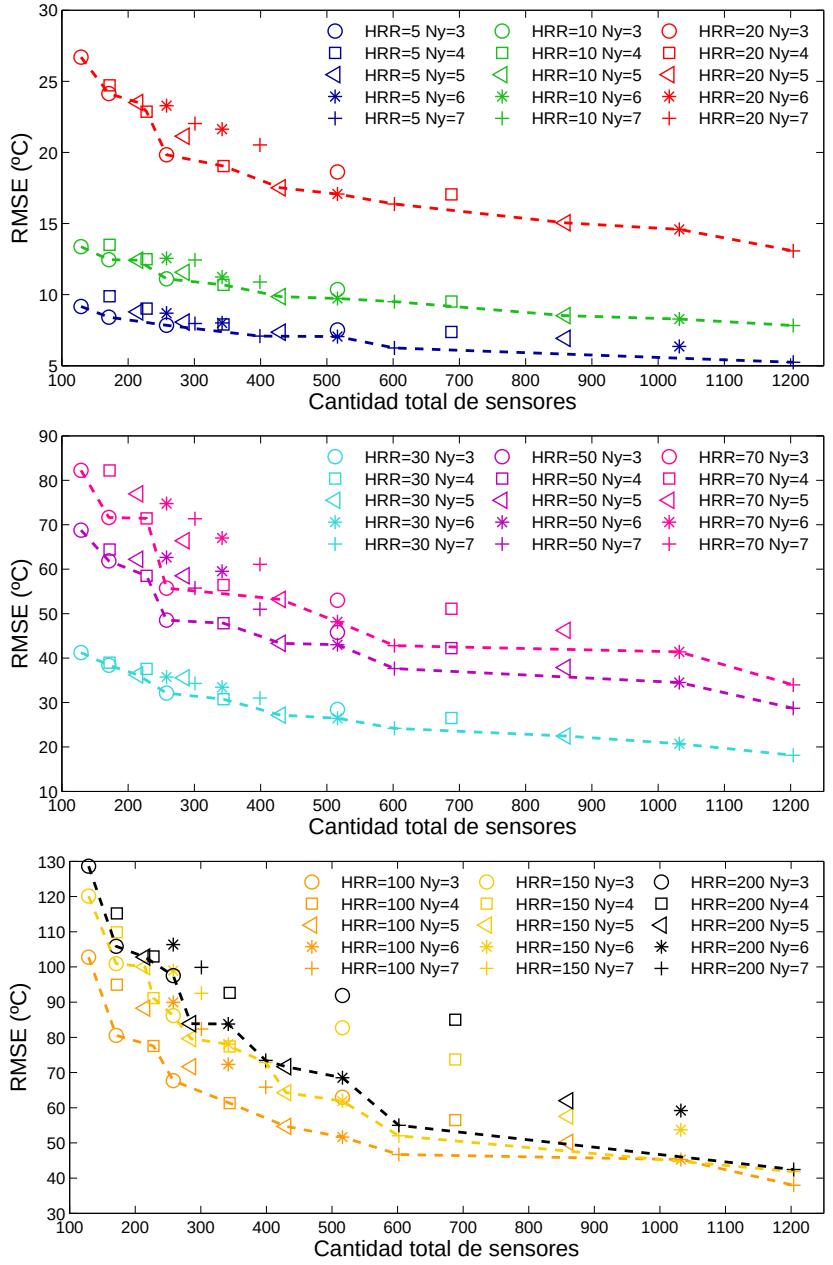


Figura 7.9: diagramas de pareto RMSE

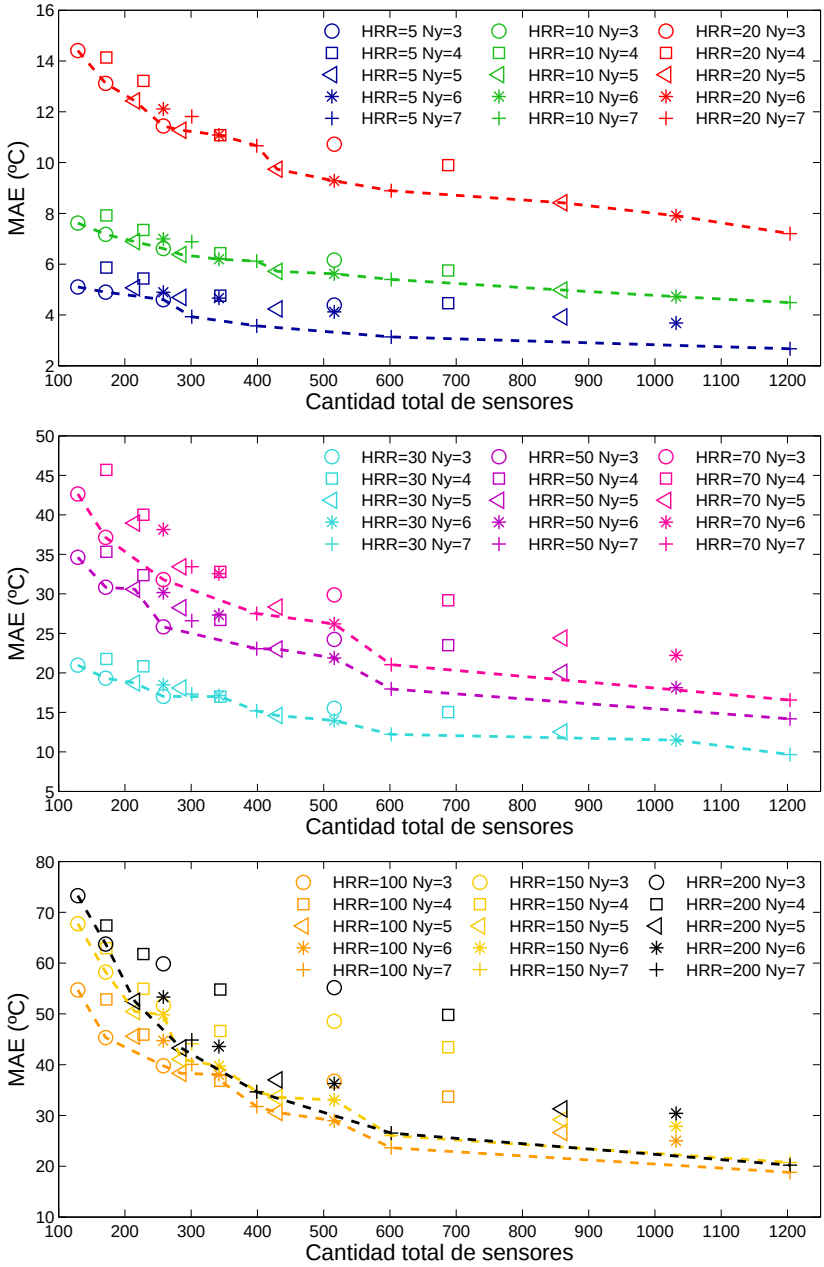


Figura 7.10: diagramas de pareto MAE

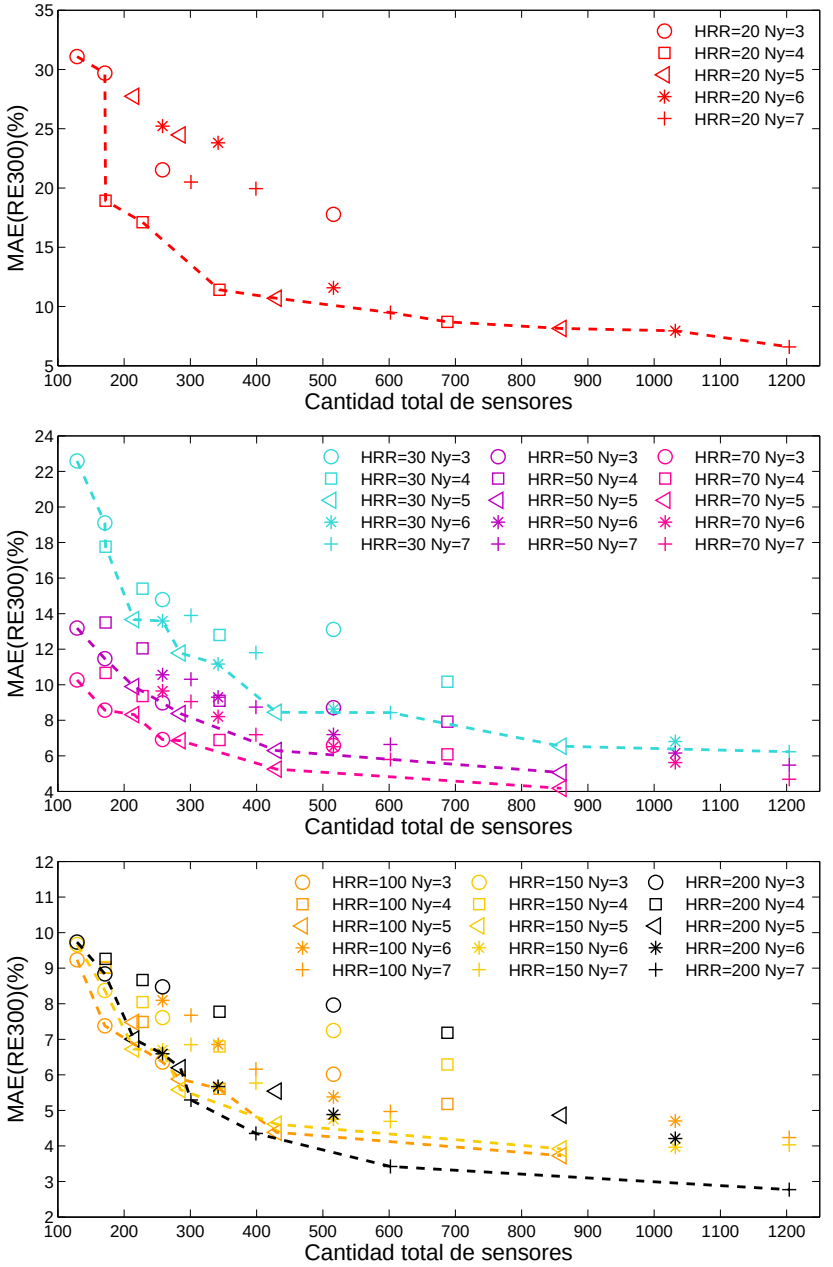


Figura 7.11: diagramas de pareto MAE(RE300)

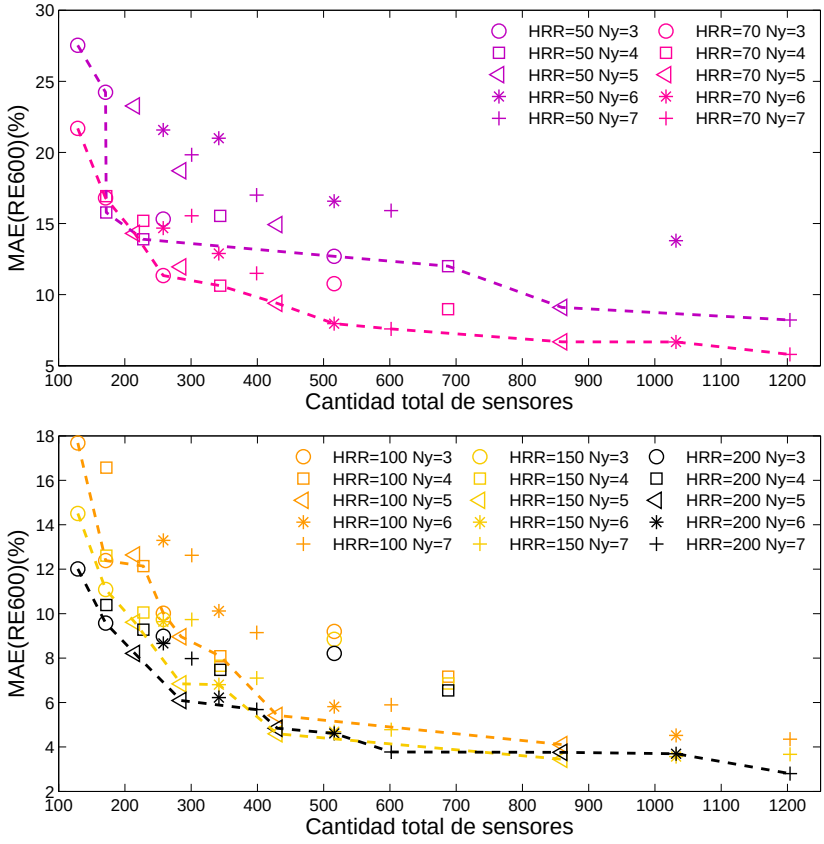


Figura 7.12: diagramas de pareto MAE(RE600)

despreciable. Las mejores configuraciones en el rango entre 400 y 600 sensores resultan 'cfkor 10' y 'bdhknqs 10'.

- Los errores asociados a las estimaciones de temperaturas pueden variar significativamente dependiendo de la configuración de sensores seleccionada. Por ejemplo, las configuraciones 'ckr 10' y 'ceimpr 20' tienen 258 sensores, sin embargo la configuración 'ckr 10' tiene errores menores que la configuración 'ceimpr 20'. Siendo los errores de 'ckr 10' para el valor de HRR de 70 MW un 34.2 %, 19.9 %, 39.4 % y 29.4 % menores para los errores RMSE, MAE, MAE(RE300) y MAE(RE600) respectivamente.

- En el caso en el que solo puedan instalarse una cantidad reducida de sensores se recomienda seleccionar las configuraciones 'ckr 20', 'ckr 15' o 'ckr 10' debido a que estas son óptimos de Pareto en el 100 %, 100 % y 70 % de los casos

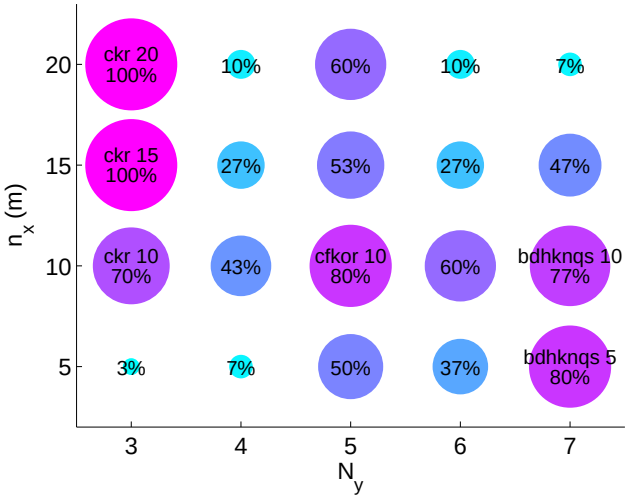


Figura 7.13: Diagrama de burbuja representando el porcentaje de los casos en los cuales una configuración forma parte de la frontera de pareto.

respectivamente. Estas configuraciones requieren de 129, 171 y 258 sensores respectivamente y tienen un sensor en el punto más alto de la bóveda (posición 'k') y un sensor a cada lateral a una altura de aproximadamente 2 m desde el pavimento del túnel (sensores 'c' y 'r').

- En el caso en el que se pueda instalar una mayor cantidad de sensores se recomienda adoptar la configuración 'bdhknqs 10' (602 sensores) debido a que cantidades mayores de sensores no reducen significativamente el error.
- Es muy importante colocar un sensor en en el punto más alto de la bóveda (sensor 'k') ya que en esta posición es donde se dan las temperaturas máximas. La importancia de colora el sensor en esta posición se ve reflejada en la figura 7.13 donde se observa que todas las configuraciones que son parte de la frontera de Pareto en al menos el 70 % de los casos lo tienen y las configuraciones que no lo tienen (configuraciones con N_y=4 y N_y=6) forman parte de la frontera de Pareto en pocos casos.

Las limitaciones económicas y la importancia del túnel, que limitará el error que puede ser asumido, serán factores determinantes para la selección final de la configuración de sensores.

7.8 Comparación de las configuraciones óptimas con cantidad total de sensores entre 400 y 600

A continuación se muestran algunas gráficas comparativas entre las configuraciones que tienen una cantidad total de sensores entre 400 y 600 y que son óptimas de Pareto de una cantidad de casos significativos ('cfkor 10', 'ceimpr 10' y 'bdhknqs 10'). Es decir, la configuración 'ckr 5' (516 sensores) no fue incluida en la comparación porque es parte de la frontera de Pareto en solo el 3 % de los casos.

A modo de ejemplo se representan las temperaturas obtenidas por estas configuraciones a lo largo del perímetro de la sección transversal en el centro del túnel (x=0) en el intervalo de tiempo t=600 segundos para HRR=100MW. La figura 7.14 representa la situación en la que el fuego está en el centro de la sección y la figura 7.15 la situación en que el fuego está en el centro de un carril. A los fines prácticos en las figuras se llama '0' y '1' a estas dos situaciones respectivamente.

En cada figura se representan las *temperaturas calculadas* obtenidas por las tres configuraciones en las dos posiciones relativas de los sensores respecto al fuego, donde la línea continua representa la situación más favorable (llamada 'B' en la figura) y la línea de trazo representa la situación más desfavorable (llamada '2' en la figura).

También se representan las *temperaturas reales* obtenidas del modelo de FDS. Éstas están representadas por una línea de trazo negra. Como era de esperarse cuando el fuego está en la posición más favorable respecto a los sensores (líneas continuas) se obtienen mejores resultados, estas diferencias se hacen mayores cuando el fuego está ubicado en el centro de un carril (figura 7.15). Es importante notar que en las posiciones donde las configuraciones tienen sensores, coinciden las temperaturas calculadas con las reales.

La figura 7.16 muestra las temperaturas a lo largo de la posición 'l' en toda la longitud del túnel para un escenario de fuego con HRR=100 y el fuego en el centro de la longitud del túnel y en el centro de la sección transversal. La figura 7.17 representa el caso en el que el fuego está en el centro de un carril. Ambas figuras tienen en la esquina superior derecha un detalle de la zona central del túnel (donde está ubicado el fuego).

Se opta por representar la posición 'l' ya que no forma parte de ninguna de las configuraciones, por lo tanto las temperaturas representadas son todas calculadas. En cambio, si se representa una posición que está monitorizada por alguna de las configuraciones esta configuración tendrá menores errores, ya que se estarían representando algunos valores de temperaturas registradas.

Se observa que las temperaturas calculadas muestran un muy buen ajuste respecto a las temperaturas reales, presentándose las mayores diferencias en una zona a +/- 10 m del centro del fuego. Es importante destacar que, en las dos posiciones relativas estudiadas no se aprecian diferencias importantes entre las temperaturas obtenidas por

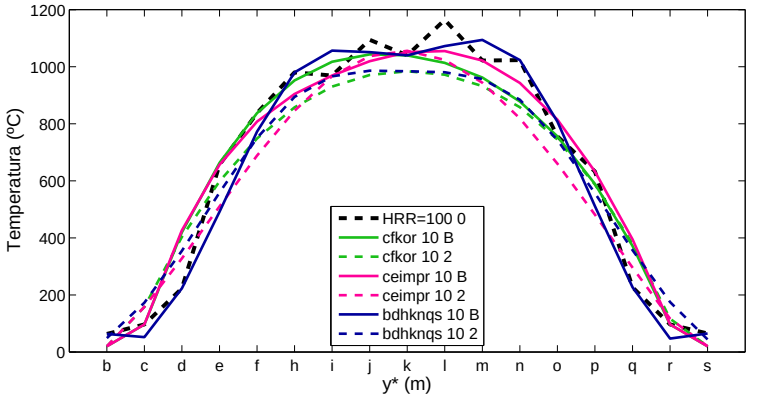


Figura 7.14: Sección transversal x=0. Escenario de fuego con HRR 100 ubicado en el centro de la longitud del túnel y en el centro de la sección, t=600 s

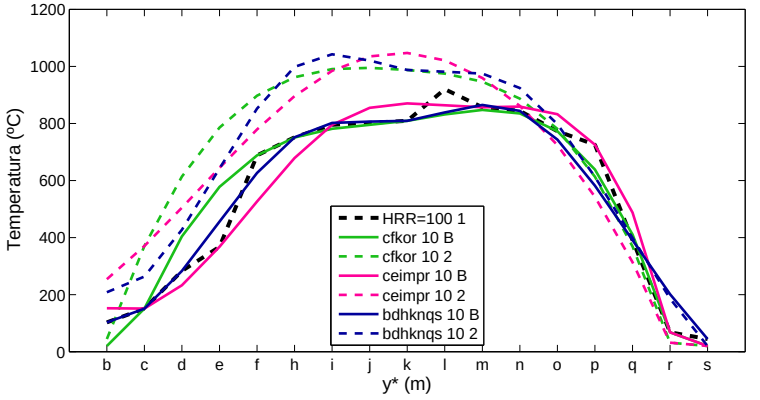


Figura 7.15: Sección transversal x=0. Escenario de fuego con HRR 100 ubicado en el centro de la longitud del túnel y en el centro de un carril, t=600 s

las tres configuraciones. Sin embargo la configuración 'ceimpr 10' es la que presenta errores algo mayores.

En el Apéndice C se encuentran las mismas gráficas para todos los escenarios de fuego estudiados.

Finalmente, para las tres configuraciones en estudio se realizan gráficas de **curvas de nivel** para las temperaturas calculadas; el error obtenido como la diferencia entre las temperaturas reales y las calculadas; y el error relativo. Las curvas de nivel son representaciones en planta de una función tridimensional, donde cada curva tiene un mismo valor. En los dos primeros casos las curvas de nivel son de temperaturas por lo cual serán isotermas, es decir curvas de temperatura constante.

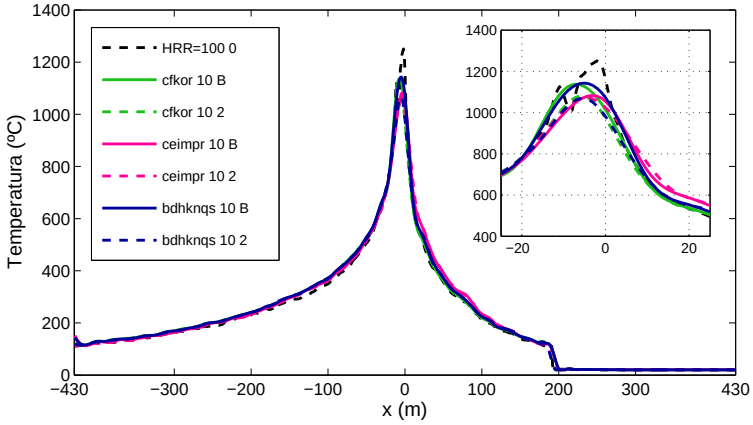


Figura 7.16: Sección longitudinal, posición 'l'. Escenario de fuego con HRR 100 ubicado en el centro de la longitud del túnel y en el centro de la sección, t=600 s

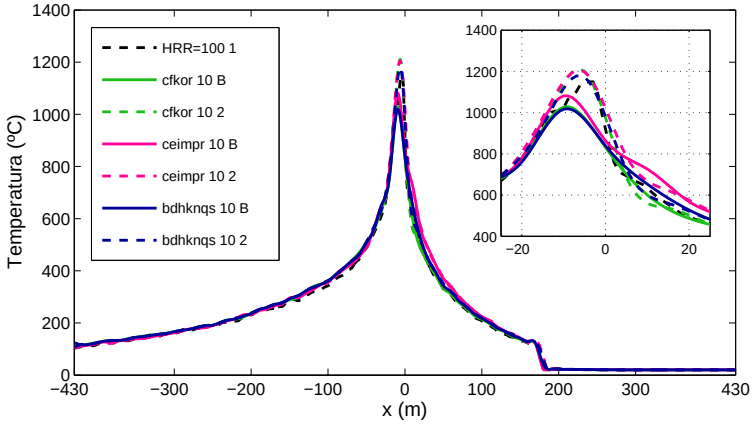


Figura 7.17: Sección longitudinal, posición 'l'. Escenario de fuego con HRR 100 ubicado en el centro de la longitud del túnel y en el centro de un carril, t=600 s

Éstas representaciones se realizan para el intervalo de tiempo t=600 segundos y el escenario de fuego HRR=100 en la posición donde se observaron mayores errores, es decir cuando el fuego está ubicado en el centro del túnel y en el centro de un carril (HRR=100 1) y considerando la posición más desfavorable de los sensores respecto al fuego ('2').

La figura 7.18 presenta las nueve curvas de nivel resultantes. En cada fila se agrupan las curvas de nivel de una misma configuración, en la primer columna se representan las isotermas de las temperaturas calculadas, en la segunda columna las isotermas de la diferencia entre las temperaturas reales y las calculadas y en la tercera columna

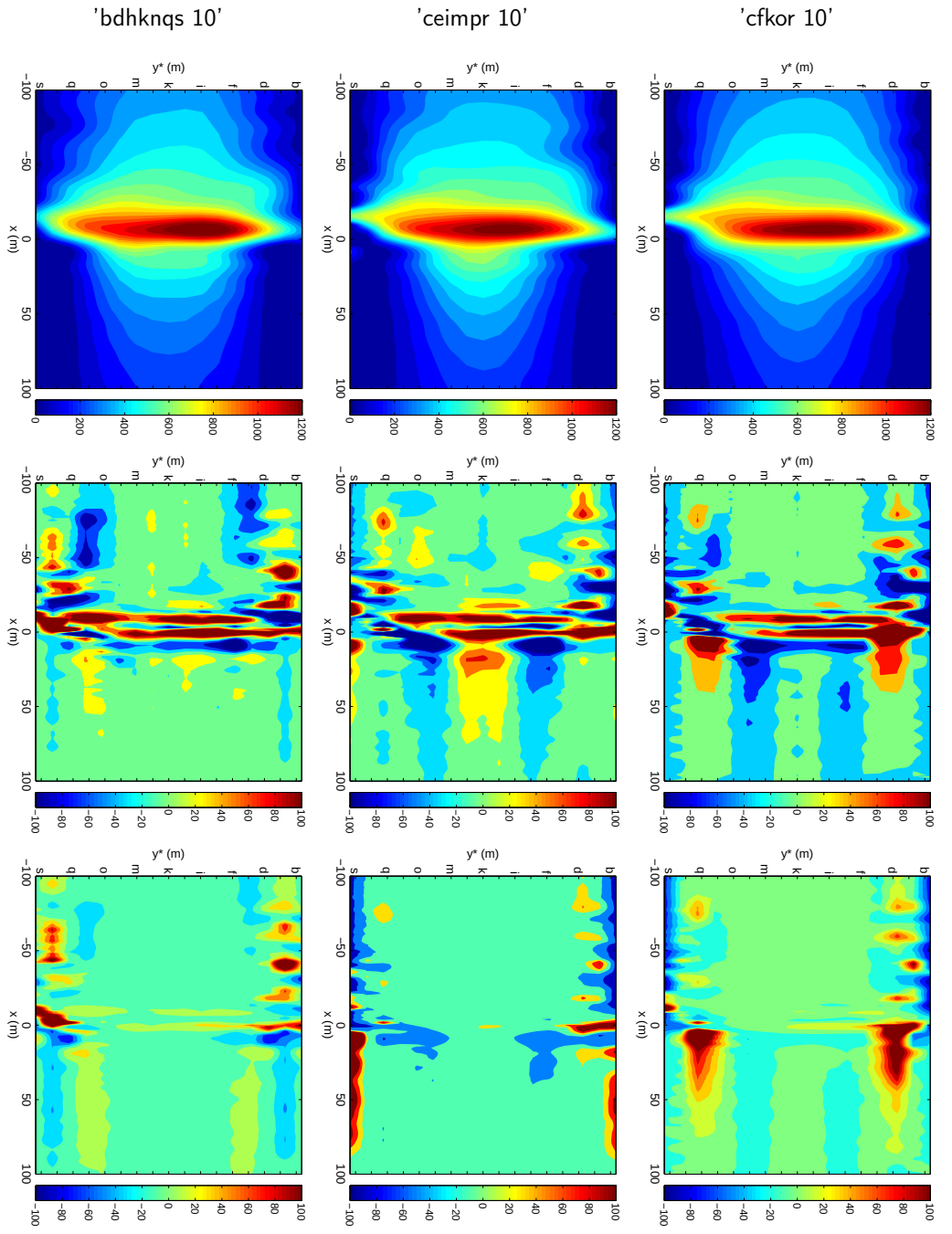


Figura 7.18: Curvas de nivel de las Temperaturas calculadas (°C), Diferencia entre las Temperaturas reales y las calculadas (°C) y Error relativo (%) para las configuraciones 'cfkor 10', 'ceimpr 10' y 'bdhknqs 10'

las curvas de nivel del error relativo. En todos los casos, con el objetivo de facilitar la comprensión de los resultados, los espacios entre líneas de nivel son coloreados de acuerdo a la escala que se indica a la derecha de cada figura.

Para facilitar las comparaciones, la figura 7.19 presenta las isotermas de las *temperaturas reales* para el escenario de fuego con HRR 100 ubicado en el centro de la longitud del túnel y en el centro de la sección en el intervalo de tiempo t=600 s.

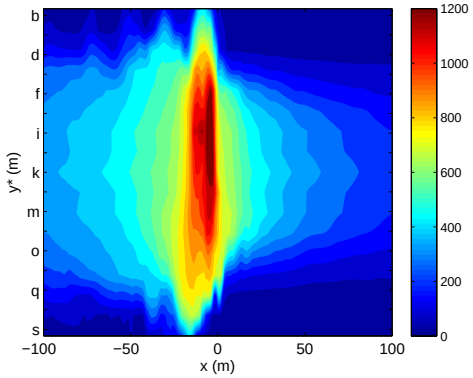


Figura 7.19: Isotermas de las Temperaturas reales obtenidas para el escenario de fuego con HRR 100 ubicado en el centro de la longitud del túnel y en el centro de la sección, t=600 s

Las isotermas de las *temperaturas calculadas* muestran que a medida que la configuración tiene más sensores se marcan más los gradientes de temperatura y la zona de temperaturas máximas se localiza más en la zona del fuego.

En términos del error definido como la diferencia entre las temperaturas reales y calculadas, en las tres configuraciones se distinguen valores de errores máximos en los 20 m centrales aproximadamente. Para la configuración 'cfkor 10' se observa que en la zonas entre 'b' y 'e' y entre 'o' y 's' también se dan errores mayores, sin embargo estos errores no son significativos debido a que las temperaturas en esas zonas no son lo suficientemente altas como para generar daños.

Para la configuración 'ceimpr 10' se observa en las curvas de nivel de la diferencia entre las temperaturas reales y calculadas una franja definida entre 'i' e 'm' donde se alcanzan diferencias del orden de los 40°C, si bien estas diferencias pueden no ser significativas, destaca que en las otras dos configuraciones no aparecen. El aumento del error en esta zona se debe a que la posición 'k' no forma parte de la configuración. En esta configuración se observa que los errores relativos son uniformes con una tendencia a calcular temperaturas menores a las reales.

Para la configuración 'bdhknqs 10' se distingue que las diferencias entre las temperaturas calculadas y reales están localizadas en zonas muy puntuales debido a la mayor

cantidad de sensores. En cuanto a los errores relativos se observa una gran uniformidad siendo de entre -10 y +20 % en una gran extensión de la zona estudiada. Se destaca que esta configuración presenta valores de errores relativos positivos y menores al 20 % para la zona de temperaturas máximas.

Finalmente se puede decir que las tres configuraciones presentan buenos resultados y que los errores relativos máximos se dan en las zonas donde las temperaturas calculadas presentan valores bajos. En particular la configuración 'ceimpr 10' presenta errores relativos algo mayores en las zonas de temperaturas máximas. Las otras dos configuraciones presentan errores relativos menores al 20 % en las zonas de temperaturas máximas.

7.9 Envolvente de temperaturas para cada linea de sensores

Para finalizar se evalúan las temperaturas máximas que puede alcanzar cada sensor durante los 30 minutos estudiados y para todos los escenarios planteados. La figura 7.20 muestra los resultados obtenidos, donde cada color representa una HRR. Las líneas continuas representan los escenarios de fuego localizados en el centro de la sección transversal y las líneas de trazo los escenarios de fuego localizados en el centro de uno de los carriles.

Cabe destacar, que el fuego podría estar en cualquiera de los dos carriles, sin embargo a los fines de presentar los resultados se optó por no aplicar la simetría de las temperaturas.

Tabla 7.7: Temperaturas máximás (°C)

Esc. fuego	HRR 5	HRR 10	HRR 20	HRR 30	HRR 50	HRR 70	HRR 100	HRR 150	HRR 200
0	198	199	320	578	947	1204	1314	1381	1382
1	235	238	410	626	992	1276	1325	1355	1385

7.10 Conclusiones

En este capítulo se mostró una aplicación de las pautas de diseño de configuraciones de sensores de temperatura para la monitorización de temperaturas al caso del túnel Virgolo.

Es importante destacar que el problema del diseño de una configuración de sensores de un sistema de monitorización es un problema con dos objetivos (minimizar el costo de la instalación y minimizar los errores del sistema), por lo tanto no existe una única

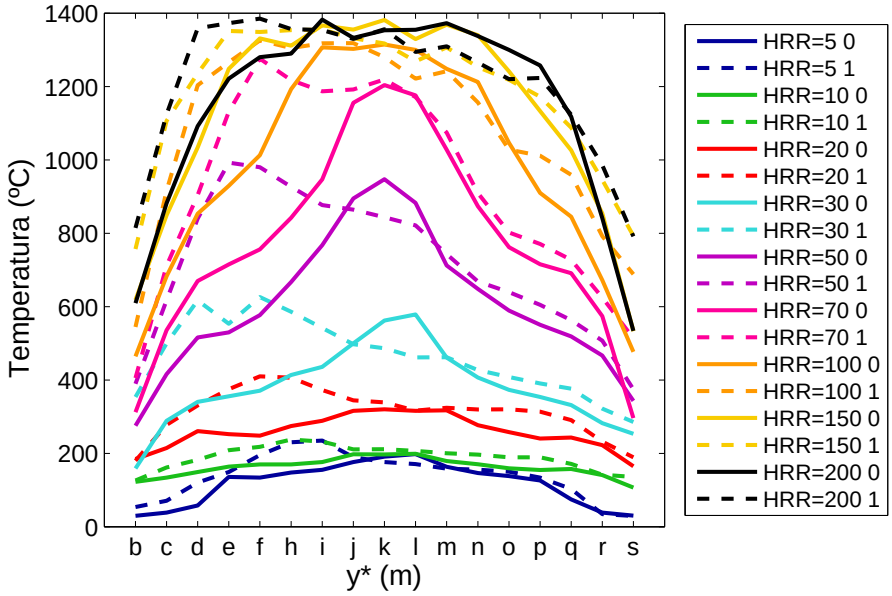


Figura 7.20: Temperaturas máximas alcanzadas por cada escenario de fuego en función de su posición en la sección transversal

solución. En este capítulo se presentó un ejemplo de cómo a partir de la interpretación de las fronteras de Pareto se pueden seleccionar las soluciones que están en equilibrio entre los dos objetivos. Así, por ejemplo se encontró que las soluciones entre 400 y 600 sensores son las recomendables para este caso.

Se mostró que tanto la cantidad de sensores utilizada en una configuración como la distribución de los mismos son importantes, ya que para configuraciones con el mismo número de sensores se encontraron soluciones con errores muy diferentes.

En el caso del túnel Virgolo se mostró que una reducción de la separación de los sensores de 20 a 10 m mejora significativamente los resultados, sin embargo una reducción de 10 a 5 m no mejora significativamente los resultados. La separación longitudinal de sensores recomendada para este caso es de 10 m.

En cuanto a los métodos de interpolación estudiados en este caso, la interpolación cúbica *spline* resultó ser la que brindó mejores resultados.

Además, los modelos de FDS desarrollados brindan información que permiten comprender el comportamiento de diversos escenarios de fuego en el túnel estudiado.

Finalmente, es importante destacar que sería deseable acompañar el estudio de la implementación de un sistema de monitorización de temperaturas asociado a un análisis de riesgos para poder evaluar el impacto del mismo tanto en términos económicos como en daños a las personas en caso de incendio.

Capítulo 8

Conclusiones y futuras líneas de investigación

8.1 Conclusiones

El rápido crecimiento de las urbanizaciones y la necesidad de nuevas vías de transporte han llevado a la congestión de las carreteas y al aumento del número de túneles y de su longitud. Los túneles son cada vez más necesarios. Sin embargo, eventos recientes de incendios en túneles ponen de manifiesto la necesidad de mejorar la seguridad en los mismos y de reducir las consecuencias asociadas a este tipo de eventos, tanto en términos económicos como en términos de vidas humanas.

En este contexto general, la presente Tesis Doctoral propone como medida de protección de túneles con alto riesgo de incendios la instalación de un **sistema de monitorización de temperaturas**. Este sistema requiere un sistema de sensores de altas temperaturas y pautas para el diseño de la red de sensores que faciliten la evaluación y comparación entre configuraciones de sensores.

Los sistemas de medición de altas temperaturas convencionales no son adecuados para la monitorización de estructuras sometidas a fuego y las pautas de monitorización de estructuras sometidas a fuego son inexistentes. Por lo tanto en esta Tesis Doctoral se desarrollaron sensores de fibra óptica multiplexables con sus encapsulados para la medida de altas temperaturas y se establecieron pautas de monitorización de túneles frente la acción del fuego que guían sobre el diseño de la red de sensores.

En esta Tesis se estudió el comportamiento de un **sensor de altas temperaturas de fibra óptica basado en la tecnología de RFBGs**. Este sensor se desarrolló con

el objetivo de utilizarlo para la monitorización de altas temperaturas en estructuras sometidas a fuego, sin embargo tiene múltiples aplicaciones adicionales como en la industria y en la ingeniería aeroespacial.

Se elige monitorizar la **temperatura** debido a que es un parámetro fundamental para estudiar el desarrollo y las consecuencias de un incendio. Disponer de los medios adecuados para poder medirla tanto en ensayos de fuego como en estructuras sometidas a esta acción es vital.

En este contexto, las referencias bibliográficas referentes al desarrollo de sensores ópticos para altas temperaturas no desarrollan el encapsulado del sensor. Este encapsulado es fundamental para que el sensor pueda aplicarse porque la fibra óptica es muy frágil y puede romperse fácilmente. Por este motivo, en esta tesis se estudia un sensor con **tres tipos de encapsulados** diferentes y sus propiedades resultantes ya que cada encapsulado le brinda al sensor determinadas características, como por ejemplo temperaturas máximas. Las temperaturas máximas que pueden alcanzar los sensores desarrollados son para el encapsulado A de 800°C en forma permanente y de 1000°C en tiempos cortos de composición, para el encapsulado B de 1200°C y para el encapsulado C de 1050°C. La elección del encapsulado a utilizar dependerá de cada aplicación.

Una de las novedades que aporta el estudio de los encapsulados desarrollados en esta Tesis Doctoral es su validación en **ensayos de fuego** donde los sensores se expusieron a condiciones de llama directa y a gradientes de temperatura del orden de los 200°C/min similares a los que se dan en incendios reales. Esto presenta un avance importante para su utilización en la monitorización de estructuras sometidas a fuego y en ensayos de laboratorio debido a que la mayoría de los sensores de alta temperatura que se desarrollan se validan solo en hornos eléctricos de laboratorio donde las condiciones son mucho más favorables. En los ensayos presentados se expone al sensor a condiciones severas y además se expone a altas temperaturas al cableado y los elementos de fijación.

Dentro de las ventajas que presentan los sensores desarrollados, destaca su **capacidad de multiplexación**, la cual ha sido demostrada he incluso dos sensores multiplexados han formado parte de uno de los ensayos a fuego realizados. La capacidad de multiplexación es muy importante debido a que en los casos donde se requiera instalar una gran cantidad de sensores, como puede ser el caso de una monitorización de un túnel, permite disminuir significativamente la cantidad de cableado necesaria.

El uso de sensores ópticos de altas temperaturas resulta competitivo frente a los termopares, especialmente en los casos donde los termopares no son fiables debido a la presencia de interferencias magnéticas o eléctricas, como son los túneles de trenes eléctricos, o en los casos donde es necesario instalar un gran cantidad de sensores y por lo tanto emplear sensores multiplexados facilita la instalación y reduce significativamente la cantidad de cableado necesario.

A lo largo del estudio de las propiedades de los sensores con sus respectivos encapsulados se ha detectado la necesidad de plantear una metodología para evaluar los **tiempos de respuesta** de sensores de alta temperatura de fibra óptica. En esta tesis se presentó una metodología para evaluar los tiempos de respuesta de los sensores desarrollados en forma experimental. Los resultados fueron comparados con los obtenidos por un modelo numérico alcanzándose un muy buen ajuste. Se demostró que el tiempo de respuesta de un determinado sensor no es constante y que varía en función del gradiente de temperaturas al que es sometido, siendo el tiempo de respuesta menor cuanto mayor es el gradiente de temperaturas. El tiempo de respuesta también depende de si se evalúa en la etapa de enfriamiento o de calentamiento, siendo menor en la etapa de calentamiento.

Por otro lado, se han desarrollado **pautas para el diseño de una configuración de sensores para la monitorización de temperaturas en túneles**. El diseño de una red de sensores tiene infinitas soluciones y se plantea como un problema con dos objetivos: minimizar el costo de la instalación (condicionado por la cantidad de sensores) y minimizar los errores generados por las interpolaciones de los datos. Las pautas establecen un procedimiento para comparar diversas configuraciones y establecer criterios para seleccionar las más favorables. Este procedimiento consta de las siguientes etapas:

1. Recopilación de información
2. Definición de los escenarios de fuego
3. Modelos de mecánica de los fluidos
4. Planteamiento de configuraciones de sensores
5. Evaluación de las configuraciones propuestas
    a) Cálculo de las temperaturas en todos los puntos de la cuadrícula
    b) Definición y evaluación de errores
    c) Elección del método de interpolación
6. Comparación de los errores de las configuraciones y sus costos

La estrategia de monitorización estudiada plantea colocar sensores en forma externa a la estructura para permitir ser instalada tanto en túneles nuevos como existentes. Puede aplicarse tanto a túneles de carretera como ferroviarios. En el caso de aplicarse a túneles ferroviarios se deberá estudiar previamente los escenarios de fuego correspondientes.

La presente metodología permite además de evaluar cuales son las distribuciones y cantidades de sensores óptimas, evaluar cuál es el **método de interpolación** de los datos que minimiza los errores para cada configuración.

Es importante destacar que los **modelos de mecánica de los fluidos** que se realizan como parte de este procedimiento brindan una gran cantidad de información que permiten comprender el comportamiento de los distintos escenarios de fuego planteados y las consecuencias asociadas a los mismos.

Esta metodología ha sido aplicada al caso del túnel Virgolo. Para este caso el método de interpolación cubica tipo spline es el que brindó mejores resultados en todas las configuraciones estudiadas. El análisis de las fronteras de Pareto obtenidas muestra que configuraciones de más de 600 sensores no son recomendables debido a que aumentan el costo de la instalación del sistema pero no generan una reducción significativa de los errores. Para el caso de configuraciones óptimas entre 400 y 600 sensores y el escenario de fuego de HRR=100MW se observa que las temperaturas calculadas tienen un error menor al 20 %.

La monitorización de temperaturas en túneles permite conocer las temperaturas en una superficie monitorizada a los largo del túnel. Conocer esta historia de temperaturas es muy importante para poder evaluar el estado de la estructura y consecuentemente disminuir el tiempo de cierre de un túnel y las consecuencias económicas.

A su vez, conocer la historia de temperaturas cercanas a la superficie del túnel facilita la **deducción del escenario de incendio**, es decir su ubicación y la función HRR en función del tiempo. En esta Tesis Doctoral se presentó un ejemplo en el cuál a partir de los datos obtenidos en un ensayo de fuego en el túnel Virgolo se aplicó un procedimiento iterativo para deducir el escenario de fuego.

8.2 Futuras líneas de investigación

La presente Tesis Doctoral muestra la importancia de **monitorizar altas temperaturas** tanto en estructuras sometidas a la acción del fuego como en ensayo de fuego. A continuación se plantean las líneas por las que la investigación puede seguir avanzando:

8.2.1 Sensores de alta temperatura

- Estudio en profundidad los *métodos de fijación* de los sensores de fibra óptica desarrollados para su implementación en estructuras sometidas a la acción del fuego.
- Estudio de alternativas para proteger los sistemas de *cableado* que conectan los sensores con los sistemas de adquisición de datos.
- Estudio de la cantidad máxima de sensores basados en RFBGs que pueden ser multiplexados en serie.

- Estudio del desarrollo de encapsulados que permitan utilizar las RFBGs como *sensores de deformaciones* a altas temperaturas. Estos sensores requerirán incorporar un sensor de temperatura para poder compensar los desplazamientos de longitud de onda debidos a la temperatura.

8.2.2 Monitorización de estructuras a fuego

- Estudio de la influencia de las dimensiones y tipos de secciones transversales, longitud del túnel y de la planimetría del túnel en los resultados de las pautas de monitorización.
- Ampliación y modificación de las pautas para el caso de túneles nuevos donde se pueden colocar sensores embebidos.
- Evaluación de la reducción del riesgo de incendio en túneles al aplicarse el sistema de monitorización de temperaturas propuesto.

Apéndice A

Listado de publicaciones del autor ligadas a la tesis

Publicaciones en revistas:

- Rinaudo P., Torres B., Paya-Zaforteza I., Calderón P. A. y Sales, S. (2015). "Evaluation of new regenerated fiber Bragg grating high-temperature sensors in an ISO 834 fire test". En: *Fire Safety Journal*, 71, págs. 332-339.
- Rinaudo P., Paya-Zaforteza I. y Calderón P. A. "A new methodology for the optimal monitoring of temperatures in tunnels during fire events". Enviado para su publicación en *Tunneling and Underground Space Technology*.

Publicaciones en congresos:

- Rinaudo P., Torres B., Payá-Zaforteza I. y Calderón P. A. (2012) "Aplicación de sensores de fibra óptica para la monitorización de temperaturas en estructuras sometidas a la acción del fuego". En: *Workshop II Fire Engineering Conference*
- Rinaudo P., Torres B. , Barrera D., Sales Maicas S., Calderón P. A. y Payá-Zaforteza I. (2013) "Fiber Optic Sensors for High Temperature Monitoring". En: *Nanotechnology 2013: Electronics, Devices, Fabrication, MEMS, Fluidics and Computational Technical Proceedings of the 2013 NSTI Nanotechnology Conference and Expo* 2, págs.737-740.
- Rinaudo P., Torres B., Barrera D., Payá-Zaforteza I., Calderón P. A., Sales Maicas S. y Lloris J. M. (2014) "Monitorización de estructuras sometidas a la acción del fuego mediante sensores fotónicos". En: *Congreso Latinoamericano REHABEND 2014* págs. 861-876.

- Rinaudo P., Torres B., Barrera D., Payá-Zaforteza I., Sales Maicas S. y Calderón P. A. (2014) "Desarrollo de sensores de alta temperatura para su uso en la monitorización de estructuras ante la acción del fuego". En: *VI Congreso Trienal de la Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural*.

- Rinaudo P., Torres Górriz B., Barrera Villar D., Payá Zaforteza I., Calderon Garcia P. y Sales Maicas S. (2014) "Application of fiber optic high temperature sensors for structural monitoring of structures submitted to fire". En: *IABSE Symposium Report* 102, 7, págs. 2932-2938. International Association for Bridge and Structural Engineering.

- Rinaudo P., Payá Zaforteza I. y Calderón P.A. (2014) "Estrategia para la monitorización de temperaturas en túneles sometidos a la acción del fuego". En: *Workshop III Fire Engineering Conference*.

- Rinaudo P., Payá Zaforteza I., Calderón P.A. y Loma-Osorio E. (2015) "Use of temperature monitoring to estimate fire loads in tunnel fires. A case study on the Virgolo Tunnel". En: *7th International Conference on Strcutural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure*.

- Rinaudo P., Torres Górriz B., Payá Zaforteza I., Calderón P.A. y Sales S. (2015) "Evaluation of the response time of fast fibre optic high temperature sensors for structural monitoring of structures submitted to fire." En: *7th International Conference on Strcutural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure*.

Patente:

- Procedimiento de fabricación de RFBG y sensor que incorpora una RFBG obtenida mediante dicho procedimiento. Numero de publicación ES 2479916 A1. Inventores: David Barrera, Pedro A. Calderón, Ignacio Payá-Zaforteza, Paula Rinaudo, Salvador Sales, Benjamín Torres.

Otros:

- Rinaudo P. (2014) "Desarrollo de sensores de fibra óptica y pautas para la monitorización de altas temperaturas en túneles sometidos a fuego". *I encuentro de doctorandos UPV*, Primer Premio modalidad póster.

Apéndice B

Estudio del volumen de control y del tamaño de celda del modelo de FDS del túnel Virgolo

B.1 Estudio del Volumen de control

La longitud del túnel a modelarse es un parámetro a definir en función de la longitud real de túnel, la longitud de influencia del ensayo y la longitud del túnel en la cual se quieren registrar datos.

Modelar una longitud de túnel menor a la real suele reducir el tiempo de modelado, aunque debe prestarse atención a no cambiar las condiciones de contorno del incendio.

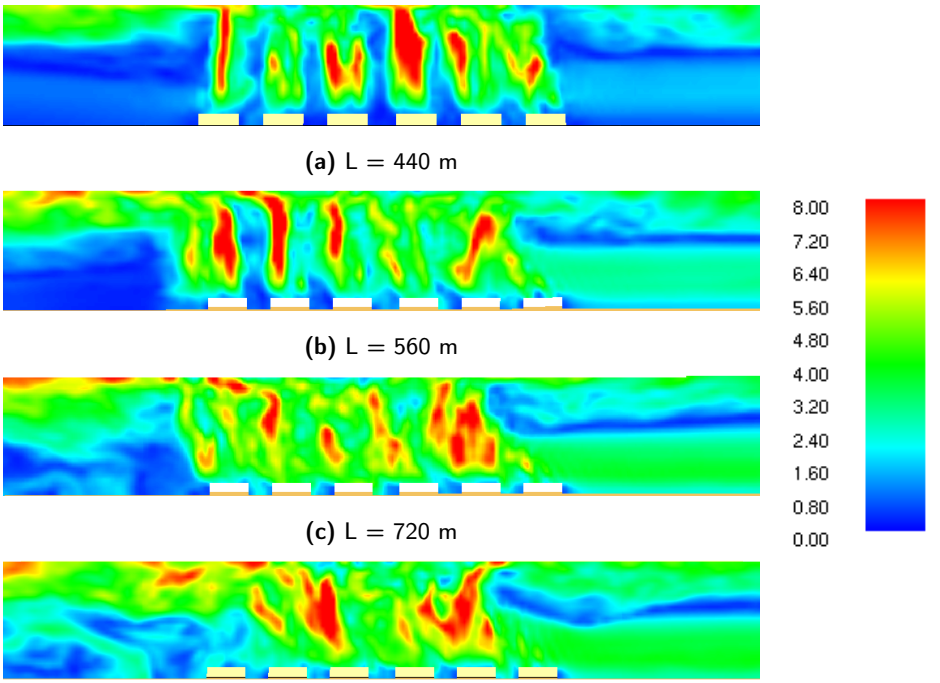
En el caso en estudio para definir el volumen de Control, que en el caso de un túnel coincide con la longitud del túnel que se va a modelar, se plantean cuatro modelos donde el único parámetro que se varía es la longitud de túnel modelada. Estos modelos tienen las características y el escenario de fuego inicial detallados en subsección 6.3.1. La tabla B.1 resume las particularidades de los modelos estudiados y el tiempo de cálculo de los mismos.

La figura B.1 muestra la velocidad en el plano vertical que pasa por el eje de las bateas en los 40 m centrales del túnel para el intervalo de tiempo 450 segundos para las cuatro longitudes de volumen de control estudiadas.

Tabla B.1: Modelos estudiados para definir el volumen de control

Modelo	Longitud(m)	Cant. de mallas	Tiempo de cálculo[1](horas)
V_440_30_M1	440	7	$27:25$
V_580_30_M1	580	9	$27:08$
V_720_30_M1	720	11	$28:39$
V_860_30_M1	860	13	$29:22$

[1] Tiempo de cálculo para 600s de simulación de incendio.



(a) L = 440 m

(b) L = 560 m

(c) L = 720 m

(d) L = 860 m

Figura B.1: Velocidades en el plano en plano vertical que pasa por eje de las bateas en los 40 m centrales del túnel [m/s]. Intervalo de tiempo t=450 s

La ventilación natural generada por las diferencias de temperaturas del aire varía en función de la longitud del túnel modelada, lo cual afecta a las temperaturas registradas y al desarrollo del incendio.

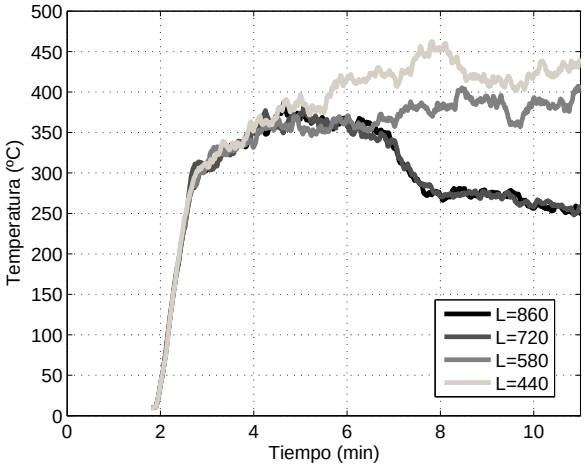


Figura B.2: Comparación de temperaturas obtenidas por los modelos de FDS variando la longitud total del modelo. Resultados para el punto x=0 posición 5 (D15)

A modo de ejemplo, la figura B.2 muestra las temperaturas obtenidas por los cuatros modelos en un punto significativo (x=0 posición 5).

Se observa que trabajar con una longitud menor a 720 m altera significativamente las condiciones de contorno afectando los resultados. Modelar 720 m del túnel o su longitud total (860 m) no presenta diferencias significativas en los resultados.

Sin embargo como el tiempo de modelado resulta similar para ambos modelos se decide trabajar con la longitud total del túnel.

B.2 Estudio del mallado y tamaño de celda

Una vez definido el Volumen de control se debe estudiar el mallado y el tamaño de celda. En FDS se le llama mallas a las subdivisiones del volumen de control. A su vez cada malla se subdivide en una determinada cantidad de celdas.

El tamaño de la celda de la malla define la precisión del mallado y determina el número de celdas del modelo, incidiendo directamente en el tiempo y en la memoria necesaria para calcular la simulación. Para un volumen de control fijo, una correcta distribución de mallas y de tamaño de celda permitirá reducir el tiempo de cálculo sin perjudicar la calidad de los resultados.

La resolución de malla se puede cuantificar a través del parámetro adimensional $D^*/\delta x$, donde δx es el lado menor de la celda y D^* es el diámetro característico de la llama:

$$D^* = \left(\frac{Q_{max}}{\rho_a c_p T_\infty \sqrt{g}}\right)^{\frac{2}{5}} = \left(\frac{30000KW}{1,204\ \frac{kg}{m^3}\ 1\frac{kJ}{kg.K}\ 293K\ \sqrt{9,8\frac{m}{s^2}}}\right)^{\frac{2}{5}} = 3,75$$

En la ecuación ρ_a es la densidad del aire, c_p es el calor específico del aire, T_∞ es la temperatura ambiente a tiempo infinito y g es la gravedad.

La resolución del modelo es mejor cuando mayor sea la relación $D^*/\delta x$. Hill et al., 2007 proponen y validan valores de 4, 10 y 16 para este parámetro. Despejando se obtienen los siguientes valores de tamaño de celda:

$$\frac{D^*}{\delta x} = 4 \rightarrow \delta x = \frac{3,75}{4} = 0,93m$$

$$\frac{D^*}{\delta x} = 10 \rightarrow \delta x = \frac{3,75}{10} = 0,37m$$

$$\frac{D^*}{\delta x} = 16 \rightarrow \delta x = \frac{3,75}{16} = 0,23m$$

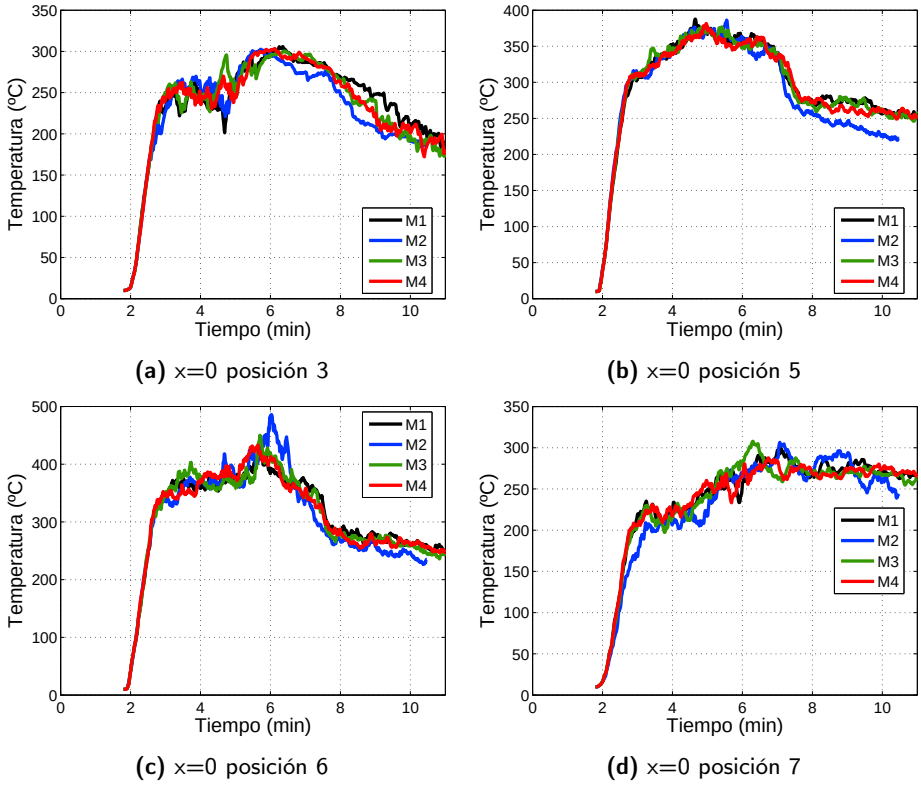
Tomando de base estos valores se plantean cuatro modelos. Los modelos planteados tienen 13 mallas siendo la longitud de las mallas y el tamaño de celdas las variables que se modifican entre los modelos. La tabla B.2 resume las configuraciones de mallados y celdas estudiados.

Tabla B.2: Modelos estudiados para definir el mallado

Modelo	Dimensión celdas centrales(m)	Dimensión resto de celdas (m)	Cant. total de celdas	Tiempo de cálculo[1](horas)
V_860_30_M1	(0,2x0,2x0,2)	-	7.741.800	$29:22$
V_860_30_M2	(0,1x0,1x0,1)	(0,2x0,2x0,2)	8.798.400	120[2]
V_860_30_M3	(0,2x0,2x0,2)	(0,3x0,2x0,2)	5.974.200	$27:38$
V_860_30_M4	(0,2x0,2x0,2)	(0,4x0,2x0,2)	5.099.400	$20:59$

[1] Tiempo de cálculo para 600s de simulación de incendio.

[2] Se fijo 120 horas como tiempo de cálculo máximo. En ese tiempo se pudo modelar 520 s de incendio.



(a) x=0 posición 3

(b) x=0 posición 5

(c) x=0 posición 6

(d) x=0 posición 7

Figura B.3: Comparación de temperaturas obtenidas por los modelos de FDS variando la el mallado del modelo.

A modo de ejemplo, en la figura B.3 se muestran las temperaturas obtenidas por los termopares modelados en x=0, para las posiciones 3, 5, 6 y 7 por los modelos estudiados variando el mallado.

Se observa que los modelos con menor cantidad de celdas reducen significativamente el tiempo de cálculo sin afectar a los resultados. Se concluye que trabajar con el mallado M4, que es el modelo con menor cantidad de celdas, brinda exactitud en los resultados y permite una reducción del tiempo de modelado y de memoria.

Apéndice C

Gráficas complementarias Pautas túnel Virgolo

Debido a la extensión de este Apéndice se encuentra disponible solo en la versión digital.

Bibliografía

Abraham, O. y X. Dérobert (2003). "Non-destructive testing of fired tunnel walls: the Mont-Blanc Tunnel case study". En: *NDT & E International* 36.6, págs. 411-418.

Amberg, F. y M Wietek (2008). "L-surF: large scale underground research facility on safety and security". En: *SP RAPPORT* 2008: 11.

Amon, F., N. P. Bryner, A. Lock y A. Hamins (2008). *Performance Metrics for Fire Fighting Thermal Imaging Cameras-Small-and Full-scale Experiments*. National Institute of Standards, Technology. Building y Fire Research Laboratory. Fire Research Division.

Ansari, F. (2005). *Sensing issues in civil structural health monitoring*. Vol. 10. Springer.

Ansari, F. (2007). "State-of-the-art in the applications of fiber-optic sensors to cementitious composites". En: *Cement and Concrete Composites* 19.1, págs. 3-19.

AP Sensing. `http://www.apsensing.com/`. Visitado el 01.04.15.

Aralt, T. y A. Nilsen (2009). "Automatic fire detection in road traffic tunnels". En: *Tunnelling and Underground Space Technology* 24.1, págs. 75-83.

Arioz, O. (2007). "Effects of elevated temperatures on properties of concrete". En: *Fire Safety Journal* 42.8, págs. 516-522.

ASHRAE (2007). "HVAC applications". En: *ASHRAE Handbook. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*.

Baker, S. R., H. N. Rourke, V. Baker y D. Goodchild (1997). "Thermal decay of fiber Bragg gratings written in boron and germanium codoped silica fiber". En: *Lightwave Technology, Journal of* 15.8, págs. 1470-1477.

Bandweaver. `http://www.bandweaver.co.uk/`. Visitado el 01.04.15.

Bao, X. y L. Chen (2012). "Recent progress in distributed fiber optic sensors". En: *Sensors* 12.7, págs. 8601-8639.

Barrera, D, V Finazzi, G Coviello, A Bueno, S Sales y V Pruneri (2010). "Wavelength encoded fiber sensor for extreme temperature range". En: *(EWOFS 10) Fourth European Workshop on Optical Fibre Sensors*. International Society for Optics y Photonics, 76530E-76530E.

Barrera, D. (2010). "Fiber optic sensors for high temperature applications". En: *SPIE Newsroom Top Ten Hot Papers in Optics and Photonics*.

Barrera Vilar, D. (2013). "Diseño, fabricación y caracterización de FBGs e interferómetros en fibra óptica para la monitorización en ambientes adversos". Tesis doct.

Bergmeister, K (2006). "Real scale tunnel fire tests Virgl/Virgolo tunnel; Bozen/Bolzano, Italy". En: *UPTUN. Workpackage 6: Fire effects and tunnel performance: System response D62*.

Bergmeister, K. (2008). "Innovative technologies to upgrade fire safety of existing tunnels". En: *Beton-und Stahlbetonbau* 103.S1, págs. 2-9.

Bisby, L. A. y M. Briglio (2004). "ISIS Canada Educational Module No. 5: An Introduction to Structural Health Monitoring". En: *Prepared by ISIS Canada* 3.

Bova, A. S. y M. B. Dickinson (2008). "Beyond fire temperatures: calibrating thermocouple probes and modeling their response to surface fires in hardwood fuels". En: *Canadian Journal of Forest Research* 38.5, págs. 1008-1020.

Brand Rex. `http://www.brand-rex.com/sites/default/files/Documents/brand-rex-fibreplus-optical-fire-survival-cable.pdf`. Visitado el 14.02.14.

Brohez, S., C. Delvosalle y G. Marlair (2004). "A two-thermocouples probe for radiation corrections of measured temperatures in compartment fires". En: *Fire Safety Journal* 39.5, págs. 399-411.

Brousse, B., N. P. Höj, G. Micolotti, D. Gabay y A. Marchais (2005). "Fire Safe Design". En: *FIT. Technical report Part 2*.

Bueno, A., B. Torres, D. Barrera, P. A. Calderón, J. M. Lloris, M. J. López y S. Sales (2011). "Optical fiber sensors embedded in concrete for measurement of temperature in a real fire test". En: *Optical Engineering* 50.12, págs. 124404-124404-7.

Burrough, P. A., R. McDonnell, P. A. Burrough y R. McDonnell (1998). *Principles of geographical information systems*. Vol. 333. Oxford university press Oxford.

Butov, O., E. Dianov y K. Golant (2006). "Nitrogen-doped silica-core fibres for Bragg grating sensors operating at elevated temperatures". En: *Measurement Science and Technology* 17.5, pág. 975.

Calavera, J. (2005). *Patología de estructuras de hormigón armado y pretensado*. INTEMAC, Instituto Técnico de Materiales y Construcciones.

Calavera, J., E. Gonzáles Valle, J. L. Cano, J. Díaz Lozano, J. Fernández-Gomez, J. Ley y J. M. Izquierdo (2005). *Fire in the Windsor building, Madrid. Survey of the fire resistance and residual bearing capacity of the structure after the fire*. INTEMAC.

Caliendo, C., P. Ciambelli, M. L. De Guglielmo, M. G. Meo y P. Russo (2012). "Numerical simulation of different HGV fire scenarios in curved bi-directional road tunnels and safety evaluation". En: *Tunnelling and Underground Space Technology* 31, págs. 33-50.

Canales, A. y J. Peñafiel (2004). "Control Automático de Deformaciones. Medición de Convergencias en el túnel de la M-111". En: *Topografía y cartografía: Revista del Ilustre Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos en Topografía* 21.124, págs. 6-11.

Canning, J, M Stevenson, K Cook, M Aslund, W Ecke, R Willsch, H Bartelt, H. Kalinowski, L Grabarski, V Oliveira et al. (2009). "Optical fibre Bragg gratings for high temperature sensing". En: *20th International Conference on Optical Fibre Sensors*. International Society for Optics y Photonics, 75032N-75032N.

Canning, J., M. Stevenson, S. Bandyopadhyay y K. Cook (2008). "Extreme silica optical fibre gratings". En: *Sensors* 8.10, págs. 6448-6452.

Carvel, R, A Beard y P Jowitt (2001). "How much do tunnels enhance the heat release rate of fires?" En: *Procedings of the fourth international conference on safety in road and rail tunnels, Madrid, Spain, 2-6 April 2001*.

Carvel, R. y A. Beard (2012). *The handbook of tunnel fire safety*. 2.ª ed. ICE Publishing.

Carvel, R. y G. Marlair (2012). "Hanbook of Tunnel fire Safety". En: 2nd. ICE. Cap. A history of fire incidents in tunnels, págs. 3-23.

CEN-EN 1-1-2 (2004). *Eurocode 1: Actions on structures: Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire*. European Committee for Standardisation.

CEN-EN 2-1-1 (2004). *Eurocode 2: Design of Concrete Structures: Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings*. European Committee for Standardisation.

CEN-EN 2-1-2 (2004). *Eurocode 2:design of concrete structures. Part 1.2: general rules, structural design.* European Committee for Standardisation.

CEN-EN 3-1-2 (2005). *Eurocode 3:design of steel structures. Part 1.2: general rules, structural design.* European Committee for Standardisation.

CETU (2003). *Reference Points. Guide to road tunnel safety documdocument.Booklet 4 Specific Hazard Investigations*.

Cheong, M., M. Spearpoint y C. Fleischmann (2009). "Calibrating an FDS simulation of goods-vehicle fire growth in a tunnel using the runehamar experiment". En: *Journal of Fire Protection Engineering* 19.3, págs. 177-196.

Chiral Photonics. `http://www.chiralphotonics.com/`. Visitado el 23.03.15.

Cochard, S. (2003). "Validation of the freeware Fire Dynamics Simulator Version 2.0 for simulating tunnel fires". En: *Tunnel Management International* 6.

Colombo, M. y R. Felicetti (2007). "New NDT techniques for the assessment of fire-damaged concrete structures". En: *Fire Safety Journal* 42.6, págs. 461-472.

Concrete Society (2008). *Assessment, design and repair of fire-damaged concrete structures*. Inf. téc. 68. Concrete Society, Working Group.

Corsi, F. (2008a). "After fire tunnel refurbishment". En: *UPTUN. Workpackage 4 Fire effects and tunnel performance: system structural response D430*.

Corsi, F. (2008b). "Damage to concrete in tunnels after fire exposure - Evaluation report". En: *UPTUN. Workpackage 4 Fire effects and tunnel performance: system structural response M43*.

Cowlard, A., W. Jahn, C. Abecassis-Empis, G. Rein y J. L. Torero (2010). "Sensor assisted fire fighting". En: *Fire Technology* 46.3, págs. 719-741.

DARTS (2004). *Durable and Reliable Tunnel Strucutres*. Inf. téc.

Deb, K. (2001). *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms*. Vol. 16. John Wiley & Sons.

Dwaikat, M., V. Kodur, S. Quiel y M. Garlock (2011). "Experimental behavior of steel beam–columns subjected to fire-induced thermal gradients". En: *Journal of Constructional Steel Research* 67.1, págs. 30-38.

EGOLF (2008). "Determination of the response time of thermocouples to be used for the measurement of air or gas phase temperature in reaction to fire testing". En: *Egolf Agreement (European Group of Organisations for Fire testing Inspection and Certification)*.

Erdogan, T, V Mizrahi, P. Lemaire y D Monroe (1994). "Decay of ultraviolet-induced fiber Bragg gratings". En: *Journal of Applied Physics* 76.1, págs. 73-80.

Erlin, B., W. G. Hime y W. H. Kuenning (1972). "Evaluating fire damage to concrete structures". En: *Concrete Construction* 17.4, págs. 154-159.

Esparza, F. (2002). *Extinción de Incendios: El fuego*. Inf. téc. Bomberos de Navarra.

Espinos, A., M. L. Romero y A. Hospitaler (2010). "Advanced model for predicting the fire response of concrete filled tubular columns". En: *Journal of Constructional Steel Research* 66.8, págs. 1030-1046.

Felicetti, R. (2008). "Damage investigation methods in real tunnel configurations". En: *UPTUN. Workpackage 4 Fire effects and tunnel performance: system structural response D431*.

Felicetti, R. (2012). "Assessment of Deteriorated Concrete Cover by Combined While-Drilling Techniques". En: *Journal of Infrastructure Systems* 18.1, págs. 25-33.

Felicetti, R. (2013). "Assessment methods of fire damages in concrete tunnel linings". En: *Fire technology* 49.2, págs. 509-529.

FHWA (2006). *Underground Transportation Systems in Europe: Safety, Operations, and Emergency Response Report FHWAPL-06-016, International Technology Scanning Program*. Inf. téc. Federal Highway Administration.

Fokine, M. (2002). "Formation of thermally stable chemical composition gratings in optical fibers". En: *JOSA B* 19.8, págs. 1759-1765.

Forney, G. P. y K. B. McGrattan (2007). "Smokeview Version 5 Technical Reference Guide". En: *NIST Special Publication* 1072.

FOS&S. `http://foss.browsbox.be/website/foss/assets/files/productdownloads/tp-01_-_temperature_probe.pdf`. Visitado el 23.03.15.

García García, E. M., E. Loma-Osorio, C. Gonzáles-Oduña y F. Esparaza Fernández (2014). *Contribución del pavimento de hormigón a la seguridad en los incendios en túneles de carretera. simulación y criterios de intervención.* Inf. téc. APTB. IECA.

Georgali, B. y P. Tsakiridis (2005). "Microstructure of fire-damaged concrete. A case study". En: *Cement and Concrete Composites* 27.2. Cement and Concrete Research in Greece, págs. 255 -259.

Ghorbani, M, M. Sharifzadeh, S Yasrobi y M Daiyan (2012). "Geotechnical, structural and geodetic measurements for conventional tunnelling hazards in urban areas–The case of Niayesh road tunnel project". En: *Tunnelling and Underground Space Technology* 31, págs. 1-8.

Glisic, B. y D. Inaudi (2007). *Fibre optic methods for structural health monitoring*. John Wiley & Sons.

Gopalakrishnan, S., M. Ruzzene y S. Hanagud (2011). *Computational techniques for structural health monitoring*. Springer Science & Business Media.

Grattan, K. T. y B. Meggitt (2000). *Optical Fiber Sensor Technology: Advanced Applications-Bragg Gratings and Distributed Sensors*. Vol. 5. Springer.

Grobnic, D., S. J. Mihailov, C. W. Smelser y H. Ding (2004). "Sapphire fiber Bragg grating sensor made using femtosecond laser radiation for ultrahigh temperature applications". En: *Photonics Technology Letters, IEEE* 16.11, págs. 2505-2507.

Gu, X., Z. Chen y F. Ansari (2000). "Embedded fiber optic crack sensor for reinforced concrete structures". En: *ACI Structural Journal* 97.3.

Han, L., S. Potter, G. Beckett, G. Pringle, S. Welch, S.-H. Koo, G. Wickler, A. Usmani, J. L. Torero y A. Tate (2010). "FireGrid: an e-infrastructure for next-generation emergency response support". En: *Journal of Parallel and Distributed Computing* 70.11, págs. 1128-1141.

Hill, K., J. Dreisbach, F. Joglar, B. Najafi, K. McGrattan, R. Peacock y Hamins.A. (2007). *Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications Volume 7: Fire Dynamics Simulator (FDS)*. Ed. por D. United States Nuclear Regulatory Commission Washington. NUREG 1824.

Hu, L., R. Huo, W. Peng, W. Chow y R. Yang (2006). "On the maximum smoke temperature under the ceiling in tunnel fires". En: *Tunnelling and Underground Space Technology* 21.6, págs. 650-655.

Inaudi, D., N. Casanova, G Steinmann, J. Mathier y G Martinola (1998). "SOFO: Tunnel monitoring with fiber optic sensors". En: *Reducing Risk in Tunnel Design and Construction, Basel*.

Ingason, H (2005a). "Fire Development in large tunnel fires". En: *8 th IAFFS conference, Beijing*.

Ingason, H. (2005b). "Design fires in tunnels". En: *Conference Proceedings of Asiaflam*, págs. 77-86.

Ingason, H. (2006). "Design fires in tunnels". En: *Conference Proceedings of Asiaflam*. Vol. 95, págs. 77-86.

Ingason, H. (2009). "Design fire curves for tunnels". En: *Fire Safety Journal* 44.2, págs. 259 -265.

Ingason, H. (2012). "Hanbook of Tunnel fire Safety". En: 2nd. ICE. Cap. Fire dynamics in tunnels, págs. 329-345.

Ingason, H. y A. Lönnermark (2012). "Hanbook of Tunnel fire Safety". En: 2nd. ICE. Cap. Heat release rates in tunnels fires: a summary, págs. 309-327.

Ingason, H. y U. Wickström (2011). "Tunnel fire safety research". En: *Industrial fire journal, http://www. hemmingfire.com*.

Ingason, H., Y. Z. Li y A. Lönnermark (2015). "Runehamar tunnel fire tests". En: *Fire Safety Journal* 71, págs. 134-149.

International survey of computer models for fire and smoke. `http://www.firemodelsurvey.com/`. Visitado el 02.04.15.

International Tunnelling Association (2004). "Guidelines for structural fire resistance of road tunnels". En: *Working Group 6*.

ISO (1975). *ISO-834, Fire Resistance Tests. Elements of Building Construction*. International Organization for Standardization. Geneva.

Jahn, W., G. Rein y J. L. Torero (2011). "A posteriori modelling of the growth phase of Dalmarnock Fire Test One". En: *Building and environment* 46.5, págs. 1065-1073.

Jamée, P., W. Favoreel, J. Versavel e I. Roelants (2006). "Use of video image processing for early fire detection in tunnels". En: *UPTUN. Workpackage 1 Prevention, detection and monitoring D14*.

Kannan, S., J. Z. Guo y P. J. Lemaire (1997). "Thermal stability analysis of UV-induced fiber bragg gratings: Fiber gratings, photosensitivity, and poling". En: *Journal of lightwave technology* 15.8, págs. 1478-1483.

Kelly, M. (2008). "Tunneldata". En: *UPTUN. Workpackage 1 Prevention, detection and monitoring D11c*.

Khoury, G. A. (2000). "Effect of fire on concrete and concrete structures". En: *Progress in Structural Engineering and Materials* 2.4, págs. 429-447.

Khoury, G. A. (2003). "EU tunnel fire safety action: Focus on Europe". En: *T & T international* 35.4, págs. 20-23.

Khoury, G. A. y M. Molag (2006). *SAFE T Final Report WP7 Harmonised EuEurope Guidelines for Tunnel Safety*. Inf. téc.

Kikuchi, K., T. Naito y T. Okoshi (1988). "Measurement of Raman scattering in single mode optical fiber by optical time-domain reflectometry". En: *Quantum Electronics, IEEE Journal of* 24.10, págs. 1973-1975.

Kim, H. K., A. Lönnermark y H. Ingason (2010). "Effective firefighting operations in road tunnels". En: *SP Report* 10, págs. 1-89.

Kodur, V. y M. Sultan (2003). "Effect of temperature on thermal properties of high-strength concrete". En: *Journal of materials in civil engineering* 15.2, págs. 101-107.

Kontogianni, V. A. y S. C. Stiros (2005). "Induced deformation during tunnel excavation: evidence from geodetic monitoring". En: *Engineering geology* 79.1, págs. 115-126.

Kopp, V. I., V. M. Churikov, G. Zhang, J. Singer, C. W. Draper, N. Chao, D. Neugroschl y A. Z. Genack (2007). "Chiral fiber gratings: perspectives and challenges for sensing applications". En: *Third European Workshop on Optical Fibre Sensors*. International Society for Optics y Photonics, 66190B-66190B.

Kuzmin, D. (2011). *Introduction to Computational Fluid Dynamics*. http://www.mathematik.uni-dortmund.de/. Visitado el 01.04.15.

Kyriakos, P. (2004). "Evaluation of present technology and design systems. Fires design in tunnels". En: *UPTUN. Workpackage 4 Fire effects and tunnel performance: system structural response M411*.

Lai, H.-p., S.-y. Wang e Y.-l. Xie (2014). "Experimental research on temperature field and structure performance under different lining water contents in road tunnel fire". En: *Tunnelling and Underground Space Technology* 43, págs. 327-335.

Leitner, A (2001). "The fire catastrophe in the Tauern Tunnel: experience and conclusions for the Austrian guidelines". En: *Tunnelling and Underground Space Technology* 16.3, págs. 217-223.

Lemaire, P. J., R. Atkins, V Mizrahi y W. Reed (1993). "High pressure H2 loading as a technique for achieving ultrahigh UV photosensitivity and thermal sensitivity in GeO2 doped optical fibres". En: *Electronics Letters* 29.13, págs. 1191-1193.

Li, C., Y.-G. Zhao, H. Liu, Z. Wan, C. Zhang y N. Rong (2008). "Monitoring second lining of tunnel with mounted fiber Bragg grating strain sensors". En: *Automation in Construction* 17.5, págs. 641-644.

Li, H.-N., D.-S. Li y G.-B. Song (2004). "Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering". En: *Engineering structures* 26.11, págs. 1647-1657.

LIOS Technology Gmbh. http://www.lios-support.com/LIOS_DE_TECT_Fire_Detection_EN.pdf. Visitado el 01.04.15.

Liu, Z., A Kashef, G. Lougheed, J. Su, N Bénichou y K. H. Almand (2006a). "An Overview of the international road tunnel fire detection research project". En: *10th fire suppression and detection research application symposium, Orlando, FL., USA February*. Vol. 1.

Liu, Z., G. Crampton, A. Kashef, G. Lougheed, E Gibbs, J. Su y N Benichou (2006b). "International Road Tunnel Fire Detection Research Project. Phase II: Task 1, Fire Detectors, Fire Scenarios and Test Protocols". En: *NRCC Client Report (B-4179.1)*.

Liu, Z., G. Crampton, A. Kashef, G. Lougheed, E Gibbs y S Muradori (2007). "International Road Tunnel Fire Detection Research Project–Phase II: Task 2, Full-Scale Fire Tests in A Laboratory Tunnel". En: *NRCC Client Report (B-4179.2)*.

Liu, Z., A Kashef, G Crampton, G Lougheed, Y Ko, G Hadjisophocleous y K. H. Almand (2010). "Findings of the international road tunnel fire detection research project". En: *Fire technology* 46.3, págs. 697-718.

Lönnermark, A., P. O. Hedekvist y H. Ingason (2008). "Gas temperature measurements using fibre Bragg grating during fire experiments in a tunnel". En: *Fire Safety Journal* 43.2, págs. 119 -126.

Lophaven, S. N., H. B. Nielsen y J. Søndergaard (2002). *DACE-A Matlab Kriging toolbox, version 2.0*. Inf. téc.

Maciocia, S. (2012). "Hanbook of Tunnel fire Safety". En: 2nd. ICE. Cap. Fire detection systems, págs. 89-107.

Majumder, M., T. K. Gangopadhyay, A. K. Chakraborty, K. Dasgupta y D. K. Bhattacharya (2008). "Fibre Bragg gratings in structural health monitoring - Present status and applications". En: *Sensors and Actuators A: Physical* 147.1, págs. 150-164.

Marlair, G, T Lemaire y M Öhlin (2004). "Fire Scenarios and accidents in the past–Draft final report (1) task 2.1, part 1". En: *UPTUN. Workpackage 2: Fire development and mitigation measures*.

Masoudi, A, M Belal y T. Newson (2013). "A distributed optical fibre dynamic strain sensor based on phase OTDR". En: *Measurement Science and Technology* 24.8, pág. 085204.

MATLAB (2011). *version R2011a*. Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc.

McAllister, T., W. Luecke, M. Iadicola y M. Bundy (2012). *Measurement of Temperature, Displacement, and Strain in Structural Components Subject to Fire Effects: Concepts and Candidate Approaches*. US Department of Commerce, National Institute of Standards y Technology.

McGrattan, K. y A. Hamins (2006). "Numerical simulation of the Howard street tunnel fire". En: *Fire technology* 42.4, págs. 273-281.

McGrattan, K., S. Hostikka, J. Floyd, H. Baum, R. Rehm, W. Mell y R. McDermott (2004). "Fire dynamics simulator version 5 technical reference guide". En: *NIST special publication* 1018, pág. 5.

McGrattan, K. B., S. Hostikka y J. E. Floyd (2010). "Fire dynamics simulator version 5, user guide". En: *NIST special publication* 1019.5, págs. 1-186.

Medrano, S. (2002). "Termopares". En: *La gupia MetAs* 7.

Meléndez, J, A Foronda, J. Aranda, F Lopez y F. L. Del Cerro (2010). "Infrared thermography of solid surfaces in a fire". En: *Measurement Science and Technology* 21.10, pág. 105504.

Micro Materials. http://www.micromaterialsinc.com/images/OptoTemp_2000_V2.pdf. Visitado el 20.03.15.

Micron Optics, Sensing analysis software ENLIGHT. http://www.micronoptics.com/uploads/library/documents/datasheets/Micron_Optics_ENLIGHT.pdf. Visitado el 04.04.14.

Migoya, E, J García, A Crespo, C. Gago y A. Rubio (2011). "Determination of the heat release rate inside operational road tunnels by comparison with CFD calculations". En: *Tunnelling and Underground Space Technology* 26.1, págs. 211-222.

Migoya Valor, E. (2003). "Modelo zonal para la simulación del movimiento de humos y gases calientes en incendios: aplicación a túneles de carretera". Tesis doct. UPM.

Miles, S. (2008). "CFD Modelling of Tunnel Fires". En: *UPTUN. Workpackage 2: Fire development and mitigation measures*.

Moler, C. B. (2008). *Numerical computing with MATLAB*. Siam.

Moliner, V, A Espinos, M. Romero y A Hospitaler (2013). "Fire behavior of eccentrically loaded slender high strength concrete-filled tubular columns". En: *Journal of Constructional Steel Research* 83, págs. 137-146.

Muhasilovic, M. y J. Duhovnik (2012). "CFD-based investigation of the response of mechanical ventilation in the case of tunnel-fire". En: *Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering* 58.3, págs. 183-190.

NCHRP (2006). *Report 525. Volume 12: Making Transportation Tunnels Safe and Secure*. National Cooperative Highway Research Program, Parsons Brinckerhoff y Transit cooperative research program.

NCHRP (2011). *Design fires in road tunnels*. Vol. 415. National Cooperative Highway Research Program, American Association of State Highway y Transportation Officials. Transportation Research Board.

NFPA (2010). *NFPA 502, Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways*. National Fire Protection Association.

Niels Peter, H., W. Johannes, F. Joris, F. Werner, H. Horst, B. Arnoud, B. Jan, S. Andre y F. Celini (2008). "Critical Structural and Functional Components". En: *UPTUN. Workpackage 4 Fire effects and tunnel performance: system structural response D411*.

Nijland, T. G. y J. A. Larbi (2001). "Unraveling the temperature distribution in fire-damaged concrete by means of PFM microscopy: Outline of the approach and review of potentially useful reactions". En: *Heron* 46.4, págs. 253-264.

O-Eland. http://www.o-eland.com/. Visitado el 20.03.15.

Olenick, S. M. y D. J. Carpenter (2003). "An updated international survey of computer models for fire and smoke". En: *Journal of Fire Protection Engineering* 13.2, págs. 87-110.

Omega. http://http://www.omega.com/. Visitado el 20.03.15.

Orcesi, A. D. y D. M. Frangopol (2011). "Optimization of bridge maintenance strategies based on structural health monitoring information". En: *Structural Safety* 33.1, págs. 26-41.

Ou, J. y H. Li (2010). "Structural health monitoring in mainland China: review and future trends". En: *Structural Health Monitoring* 9.3, págs. 219-231.

Overholt, K. y O. Ezekoye (2012). "Characterizing Heat Release Rates Using an Inverse Fire Modeling Technique". English. En: *Fire Technology* 48.4, págs. 893-909.

Özbek, A., S. Türkmen y M. Gül (2003). "The deformation evaluation of Kızlaç T3A Tunnel (Osmaniye, Turkey)". En: *Engineering geology* 67.3, págs. 309-320.

Paya, I., V. Yepes, F. González-Vidosa y A. Hospitaler (2008). "Multiobjective optimization of concrete frames by simulated annealing". En: *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 23.8, págs. 596-610.

Peter, F (2000). "The causes, effects & control of real tunnel fires". En: *International seminar on road traffic and accident data needs for the new century*.

PIARC (1999). *Fire and Smoke control in Road Tunnels*. Ed. por T. commitee on tunnel operations. Third International Conference on Safety In Road y Rail Tunnels ITC.

PIARC (2006). *Systems and Equipment for Fire and Smoke Control in Road Tunnels*. Ed. por T. commitee on tunnel operations. World Road Association.

PIARC (2012). *Recommendations on management of mantenance and technical inspection of road tunnel*. Ed. por T. commitee C.4. Road tunnel operations. World Road Association.

Pinet, É., C. Hamel, B. Glišić, D. Inaudi y N. Miron (2007). "Health monitoring with optical fiber sensors: from human body to civil structures". En: *The 14th International Symposium on: Smart Structures and Materials & Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*. International Society for Optics y Photonics, págs. 653219-653219.

Pitts, W. M. (2000). "Temperature measurements in fires". En: *Workshop on measurement need for fire safety*.

Pitts, W. M., E. Braun, R. D. Peacock, H. E. Mitler, E. Johnson, P. A. Reneke y L. G. Blevins (2003). "Temperature uncertainties for bare-bead and aspirated thermocouple measurements in fire environments". En: *ASTM Special Technical Publication* 1427, págs. 3-15.

Prysmian Draka Cables. `http://no.prysmiangroup.com/no/business_markets/markets/oil-and-gas/Downloads/Datablader/D91qfci_e32.pdf`. Visitado el 14.02.14.

Purkiss, J. A. y L.-Y. Li (2013). *Fire safety engineering design of structures*. CRC Press.

QOREX. `http://www.petrospec.com/qorex/extreme-duty-dts`. Visitado el 01.04.15.

RABT (1985). *Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, Ausgabe 1985*. Richtlinien für Ausstattung und Betrieb von Tunneln.

RDC Control. `http://www.rdccontrol.com`. Visitado el 14.04.14.

Reddy, P. N., P. Basarkod y S. Manvi (2011). "Wireless sensor network based fire monitoring and extinguishing system in real time environment". En: *Int. J. Advanced Networking and Applications* 3.02, págs. 1070-1075.

Rhodes, N. (2012). "Hanbook of Tunnel fire Safety". En: 2nd. ICE. Cap. CFD modelling of tunnel fires, págs. 329-345.

Roctest (2006). *Tunnel Instrumentation*. Inf. téc. APN-TI-AN-2006-03-2000.

Rodriguez, R. (2013). "Túneles urbanos de alta velocidad ejecutados con tuneladora en Cataluña". En: *I foro internacional ferroviario Bcnrail*.

Safe-Tunnel (2005). *Final Report - Document IST-2000-28099*. Inf. téc.

Salgado Díaz, P. (2013). "Estudio y desarrollo de sensores de fibra óptica para detección de vibraciones en ductos ascendentes submarinos". Tesis doct. Telecomunicacion.

Saz-Sánchez, M. A., R. Serrano-Notivoli, M. de Luis-Arrillaga y L. A. Longares-Aladrén (2010). "Comparación de métodos de interpolación y de regresión para la cartografía de temperaturas máximas y mínimas absolutas: el caso de navarra (Norte de españa) en 2009". En: *VII Congreso AEC: Clima, ciudad y ecosistemas*.

Schlichting, H., K. Gersten, E. Krause y H. Oertel (2003). *Boundary layer theory*. 8va. Springer.

Sensogeo Instrumentación y geotecnia. `http://http://www.sensogeo.com`. Visitado el 17.03.15.

SFPE (2002). *Handbook of fire protection engineering*. 3rd. Society of Fire Protection Engineers, National Fire Protection Association.

Shannon, K. y B. Butler (2003). "A review of error associated with thermocouple temperature measurement in fire environments". En: *Second international wildland fire ecology an fire management congress and fifth symposium on fire and forest meteorology. American Meteorological Society, Orlando, FL*, págs. 16-20.

Short, N., J. Purkiss y S. Guise (2001). "Assessment of fire damaged concrete using colour image analysis". En: *Construction and Building Materials* 15.1, págs. 9-15.

Shuai, W. y L. Lijun (2011). "The Applied Research of BOTDR Technology in Underground Engineering". En: *Photonics and Optoelectronics (SOPO), 2011 Symposium on*. IEEE, págs. 1-4.

Sibson, R. (1981). "A brief description of natural neighbour interpolation". En: *Interpreting multivariate data*.

Siemens (2010). *FibroLaser III reliable fire protection for long and widespread systems*. Inf. téc. Siemens Switzerland Ltd.

SIMULIA (2006). "Abaqus Standard 6.13". En: *Release Notes Release Notes*.

SIRTAKI (2004). *Safety Improvements in Road and Rail Tunnels using Advance ICT and Knowledge Intensive DSS - Final Report 2001 - 2004*. Inf. téc.

Sisgeo (2014). *Tunnel monitoring*. Inf. téc. TUNN-REV07.

Smart Fibres. `http://www.smartfibres.com/`. Visitado el 20.03.15.

SOLIT (2012). *Engineering Guidance for a Comprehensive Evaluation of Tunnels with Fixed Fire Fighting Systems. Fire Tests and Fire Scenarios for Evaluation of FFFS*. Inf. téc. SOLIT Safety of Life in Tunnels.

Spiegel, M. y L. Stephens (2002). *Estadística*. Schaum's outline series. McGraw-Hill.

Stein, M. L. (1999). *Interpolation of spatial data: some theory for kriging*. Springer.

Technicasa. `http://www.technicasa.com/`. Visitado el 20.03.15.

Torres Górriz, B. (2012). "Definición de las pautas y condiciones de monitorización, encapsulado y fijación de sensores de fibra óptica para la medida de deformación y temperatura en estructuras". Tesis doct. Editorial Universitat Politècnica de València.

Tu, Y., Y.-H. Qi y S.-T. Tu (2013). "Fabrication and thermal characteristics of multilayer metal-coated regenerated grating sensors for high-temperature sensing". En: *Smart Materials and Structures* 22.7, pág. 075026.

UNE–EN 50268-2 (2000). *Métodos de ensayo comunes para cables sometidos al fuego. Medida de la densidad de los humos emitidos por cables en combustión bajo condiciones definidas. Parte 2: Procedimiento*. Madrid: AENOR.

UNE–EN 60332-1-2 (2005). *Métodos de ensayo para cables eléctricos y cables de fibra óptica sometidos a condiciones de fuego. Parte 1-2: Ensayo de resistencia a la propagación vertical de la llama para un conductor individual aislado o cable. Procedimiento para llama premezclada de 1kW*. Madrid: AENOR.

UNE–EN 60332-3-22 (2009). *Métodos de ensayo para cables eléctricos y cables de fibra óptica sometidos a condiciones de fuego. Parte 3-22: Ensayo de propagación vertical de la llama de cables colocados en capas en posición vertical. Categoría A*. Madrid: AENOR.

UPTUN (2006). *Final Technical Report - Document UPTUN FTR v10 20061204*. Inf. téc.

Vallinas González, A. (2011). "Sensores de fibra óptica: fundamentos de medida y análisis de la oferta comercial". Tesis doct. Universidad pública de Navarra.

Vigne, G. y J. Jönsson (2009). "Experimental Research Large Scale Tunnel Fire Tests and the use of CFD modelling to predict Heat Flux and Thermal Behavior". En: *Fire Protection and Life Safety in Buildings and Transportation Systems*.

Virtual-Fires (2004). *Final Report IST 200029266*. Inf. téc.

Wang, G., C. Q. Y.Q. Li, L. Han, H. Yu y F. Xie. (2014). "Post-fire performance evaluation method of high-rise buildings and its application in the Television Cultural Center, CCTV." En: *8th International Conference on Structures in Fire SiF 14, Tongji University, Shanghai, China*.

Wickström, U., D. Duthinh y K. B. McGrattan (2007). "Adiabatic surface temperature for calculating heat transfer to fire exposed structures". En: *Proceedings of the Eleventh International Interflam Conference. Interscience Communications, London*. Vol. 167.

Willmott, C. J. (1982). "Some comments on the evaluation of model performance". En: *Bulletin of the American Meteorological Society* 63.11, págs. 1309-1313.

Willmott, C. J. y K. Matsuura (2006). "On the use of dimensioned measures of error to evaluate the performance of spatial interpolators". En: *International Journal of Geographical Information Science* 20.1, págs. 89-102.

Wright, W., B. Lattimer, M. Woodworth, M. Nahid y E. Sotelino (2013). *Highway Bridge Fire Hazard Assessment. Draft Final Report*. Inf. téc. Virginia Polytechnic Institute y State University Blacksburg, VA.

Zalosh, R. G. y P. Chantranuwat (2003). *International Road Tunnel Fire Detection Research Project: Review of Prior Test Programs and Tunnel Fires. Phase I*. Fire Protection Research Foundation.