

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS

Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica



TESIS DOCTORAL

Análisis del comportamiento de aceros al carbono frente al fuego

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTORA

PRESENTADA POR

Irene Huertas González

Director

Juan Atonio Trilleros Villaverde

Madrid, 2014

**UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
DEPARTAMENTO DE CIENCIA DE LOS MATERIALES E
INGENIERÍA METALÚRGICA**



TESIS DOCTORAL

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE ACEROS AL
CARBONO FRENTE AL FUEGO**

IRENE HUERTAS GONZÁLEZ

Director:

Dr. JUAN ANTONIO TRILLEROS VILLAVERDE

Madrid, Julio 2013

A mi familia, en especial a mis padres,
un apoyo incondicional.

“El crecimiento es un proceso de prueba y error: es una experimentación.
Los experimentos fallidos forman parte del proceso en igual medida que el experimento
que funciona bien”
(Benjamin Franklin)

Agradecimientos

Después de cuatro años de trabajo, ha llegado el día de poner punto y aparte en mi proceso de crecimiento profesional y personal, termina una etapa y comienza otra, que espero que sea tan enriquecedora o más que esta.

Antes de empezar con el desarrollo de mi trabajo de investigación, me gustaría hacer un agradecimiento a todas las personas e instituciones que me han echado una mano durante este periodo para intentar hacerme el trabajo más fácil:

- A mi director de tesis, el Dr. Juan Antonio Trilleros Villaverde, un agradecimiento muy especial, por los consejos constantes para hacer las cosas bien y por el optimismo que intenta contagiar en todo momento.
- Al Dr. Luis Caballero Molano, a la Dra. Mihaela Iordachescu y al Dr. Andrés Valiente Cancho por permitirme trabajar con la Universidad Politécnica de Madrid en la Facultad de Caminos y poner a mi disposición todo aquello que he necesitado.
- Al Dr. Víctor López Serrano por abrirme las puertas del Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas y brindarme algo de su tiempo para aprender de su amplia experiencia y al Laboratorio de Rayos X (área de fluorescencia y emisión) de dicho organismo.
- A la Dra. M^a Jesús Bartolomé García del Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas, por brindarme ayuda con su profesionalidad y simpatía.
- A la Dra. M^a Cruz Alonso Alonso y Dra. Olga Río Suarez, del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, CSIC. Por darme la oportunidad de aumentar mis conocimientos en el tema de los hormigones.
- Al Dr. Sixto Álvarez Contreras del Dpto. de Matemática Aplicada de la Facultad de Ciencias Químicas, UCM. Un agradecimiento especial por su tiempo dedicado y la ayuda recibida para hacer más fácil el desarrollo de un modelo matemático.

- A todo el personal del ICTS Centro Nacional de Microscopía Electrónica, que me han tratado de manera excelente.
- A todos los componentes del Departamento de C.C. de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica de la Facultad de Ciencias Químicas, UCM.
- A Jesús Hoya Sánchez por construirnos esos hornos que tanto me han hecho de rabiar y que sin ellos nada de esto habría sido posible.
- En ámbito personal, a mis padres, Francisco y Araceli, que me han apoyado y aconsejado en toda decisión. A mi pareja que siempre está cuando la necesito y en conjunto a toda mi familia y amigos que me han escuchado en todo momento.

Este trabajo ha sido realizado gracias a la financiación proporcionada por el proyecto del Plan Nacional de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico BIA 2008-06705-C02-02 del Ministerio de Ciencia e Innovación.

ÍNDICE GENERAL

Índice General

Agradecimientos	2
Índice General	6
Índice de Tablas y Figuras	12
Abstract	24
1. Introduction	24
2. Content	25
3. Conclusions	28
4. References	30
Capítulo I: Introducción	33
1. Introducción.....	33
Capítulo II. Consideraciones previas. Aspectos de interés relacionados con el fuego y los materiales	45
1. Introducción.....	45
2. Fuego. Generalidades	46
3. Fundamentos del acero y tratamiento térmico.....	52
3.1. Metalurgia del acero.....	53
3.1.1. Aleaciones	54
3.2. Efectos del carbono sobre el hierro	55
3.3. Diagrama de fases hierro-carbono.....	55
4. El acero al carbono como material estructural	56
4.1. Acciones térmicas sobre los aceros estructurales.....	61
4.2. Dedución de los perfiles de temperatura de los aceros estructurales	65

5. Referencias	70
Capítulo III: Materiales, técnicas de ensayo e instalaciones experimentales.....	75
1. Materiales ensayados	75
1.1. Aceros al carbono S355NL, S460NL y S460N.....	75
1.2. Materiales aislantes	78
1.2.1. Lanas minerales.....	78
1.2.2. Escudos de radiación.....	79
1.3. Morteros	79
2. Técnicas de ensayo	81
2.1. Aceros al carbono.....	81
2.1.1. Caracterización Microestructural	82
2.1.2. Determinación del tamaño de grano.....	84
2.1.3. Ensayos mecánicos.....	85
2.1.3.1. Ensayos de dureza	85
2.1.3.2. Ensayos de tracción y fractografías.....	86
2.1.3.3. Ensayo de tracción a temperatura ambiente	86
2.1.3.4. Ensayo de tracción a temperatura elevada	88
2.2. Morteros	90
2.2.1. Caracterización del material.....	90
2.2.1.1. Acondicionamiento	90
2.2.1.2. Determinación de agua libre	90
2.2.1.3. Transformaciones ATP/TG.....	91
2.2.1.4. Porosidad y distribución de poros	91
2.2.2. Ensayos mecánicos.....	92

3.	Instalaciones experimentales	93
3.1.	Horno piloto para fuego por una cara.....	94
3.2.	Horno piloto para fuego envolvente.....	95
3.3.	Ensayo de tracción con cargas fijas y bajo curva de fuego ISO 834	97
4.	Referencias	100
Capítulo IV: Resultados experimentales y discusión.		102
1.	Introducción.....	102
2.	Análisis de los materiales estructurales ensayados.....	104
2.1.	Aceros al carbono a temperatura ambiente	104
2.1.1.	Microestructura de los aceros.....	104
2.1.2.	Ensayos de tracción y de dureza de los aceros	106
2.1.3.	Fractografías de los aceros ensayados a tracción	107
2.2.	Caracterización de los aceros al carbono a alta temperatura.....	108
2.2.1.	Microestructura	108
2.2.2.	Ensayos de tracción y dureza	110
2.2.2.1.	Estudio microestructural post ensayo de tracción a alta temperatura.....	114
2.2.2.2.	Fractografías de los ensayos de tracción	116
2.3.	Morteros	119
2.3.1.	Determinación de la pérdida de agua libre	119
2.3.2.	Transformaciones térmicas de los mortero ATD/TG.....	120
2.3.3.	Porosidad y distribución del tamaño de poros.....	123
2.3.4.	Propiedades mecánicas: resistencia a la compresión y a la flexotracción.....	124
3.	Ensayos de materiales bajo prueba de fuego	124

3.1.	Aceros al carbono.....	125
3.1.1.	Fuego incidente por una sola cara	126
3.1.1.1.	Curva ISO 834.....	126
3.1.1.2.	Curva Externa.....	131
3.1.2.	Fuego envolvente. Curva ISO 834	134
3.2.	Materiales aislantes	136
3.2.1.	Morteros	136
3.2.2.	Lanas	140
3.2.3.	Escudos de radiación.....	141
3.3.	Acero estructural al carbono junto con materiales aislantes	141
3.3.1.	Mortero con acero al carbono.....	141
3.3.2.	Lana con acero al carbono.....	143
3.3.3.	Escudos de radiación.....	144
4.	Ensayos posteriores a la acción del fuego	145
4.1.	Aceros al carbono.....	146
4.1.1.	Caracterización microestructural del material ensayado	146
4.1.1.1.	Fuego incidente por una sola cara. Curva ISO y curva externa	146
4.1.1.2.	Fuego envolvente. Curva ISO	149
4.1.1.3.	Oxidación superficial del acero al carbono. Alta temperatura.	150
4.1.2.	Propiedades Mecánicas	154
4.1.2.1.	Ensayos de tracción y dureza de los aceros tras la exposición a las curvas de fuego sin carga	154
4.1.2.1.1.	Fuego incidente por una sola cara. Curva ISO 834 y Curva Externa	154
4.1.2.1.2.	Fuego envolvente. Curva ISO 834.....	157

4.1.2.1.3.	Fractografías de los ensayos de tracción.....	158
4.1.2.2.	Ensayo de tracción con carga y sometido a fuego por una cara bajo curva ISO 834.	161
4.1.2.2.1.	Microestructura y fractografías del ensayo de tracción con carga y régimen transitorio de temperatura.....	171
4.2.	Morteros	176
4.2.1.	Propiedades mecánicas: resistencia a la compresión y flexotracción.....	176
5.	Obtención de los perfiles de las temperaturas en los aceros estructurales	177
5.1.	Modelo propuesto por la norma europea.....	177
5.2.	Resolución de la ecuación de transporte de calor por incrementos finitos	179
6.	Referencias	191
Capítulo V: Resumen General y Conclusiones		193
1.	Resumen General.....	193
1.1.	Comportamiento de los aceros a temperaturas elevadas y bajo la acción del fuego.....	196
1.2.	Comportamiento de los morteros a temperatura ambiente y bajo ensayo de fuego.	203
1.3.	Comportamiento de los aceros con materiales aislantes	205
1.4.	Modelo matemático para la predicción de los gradientes de temperatura en los materiales estructurales.	206
2.4.	Conclusiones	208
Capítulo VI: Futuras líneas de investigación		215

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

Índice de Tablas y Figuras

El índice de tablas y figuras se divide por capítulos, correspondiendo el primer dígito de la referencia con el capítulo en el que se encuentra dicha tabla o figura.

Índice de Tablas

Capítulo II

Tabla 2. 1. Composición química del análisis del producto para aceros normalizados.

Tabla 2. 2. Propiedades mecánicas a temperatura ambiente para aceros normalizados.

Tabla 2. 3. Valores mínimos de la energía de rotura por flexión por choque sobre probetas longitudinales con entalladura en V para acero en estado normalizado.

Tabla 2. 4. Valores mínimos de la energía de rotura por flexión por choque sobre probetas transversales con entalladura en V para acero en estado normalizado, cuando el ensayo por choque en probetas transversales haya sido acordado en el momento de hacer el pedido.

Tabla 2. 5. Factores de reducción para la relación tensión-deformación del acero a elevada temperatura.

Tabla 2. 6. Cálculo de los valores de hr para distintas temperaturas.

Tabla 2. 7. Tabla para el cálculo de transferencia de calor en piezas de acero no protegido.

Capítulo III

Tabla 3.1. Composición química de los aceros al carbono en % en peso.

Tabla 3 2. Propiedades técnicas indicadas por el fabricante de la lana ISOVER.

Tabla 3.3. Propiedades técnicas indicadas por el fabricante de la lana PROMAT.

Tabla 3.4. Dosificación de los morteros (Kg/m³ y % vol).

Tabla 3.5. Distribución de los pesos de las probetas de plomo y peso del conjunto cesta+barilla.

Capítulo IV

Tabla 4. 1. Propiedades mecánicas de los aceros S355NL y S460NL en el estado de recepción.

Tabla 4. 2. Propiedades mecánicas de los aceros S355NL y S460NL.

Tabla 4. 3. Valores de los parámetros ajustados para la ecuación 4.1.

Tabla 4. 4. Variación del tamaño de grano y dureza Rockwell B para los acero S355NL y S460NL después de los ensayos de tracción a elevada temperatura.

Tabla 4. 5. Pérdidas de peso en acondicionamiento a la atmósfera (%)

Tabla 4. 6. % en peso de las fases en el mortero con cemento Portland.

Tabla 4. 7. % en peso de las fases en el mortero con cemento aluminoso.

Tabla 4. 8. Valores experimentales de la resistencia a compresión y flexiotracción de los cuatro morteros ensayados.

Tabla 4. 9. Tamaño de grano de los aceros S355NL, S460NL y S460N antes y después de los ensayos de fuego con curva ISO 834 y cuerva externa por una cara y durante 3 horas.

Tabla 4. 10. Tamaño de grano de los aceros S355NL, S460NL antes y después de los ensayos de fuego envolvente con curva ISO 834 durante 16 min, 1 hora y 3 horas.

Tabla 4. 11. Propiedades mecánicas del acero S355NL, deducidas de los ensayos de tracción

Tabla 4. 12. Propiedades mecánicas del acero S460NL, deducidas de los ensayos de tracción.

Tabla 4. 13. Durezas de los acero S355NL y S460NL después del ensayo de fuego por una cara con curva ISO 834

Tabla 4. 14. Propiedades mecánicas de los aceros S355NL y S460NL, deducidas de los ensayos de tracción.

Tabla 4. 15. Durezas de los acero S355NL y S460NL después del ensayo de fuego envolvente con curva ISO 834.

Tabla 4. 16. Valores máximos de temperaturas y tiempo de los aceros S355NL y S460NL en los distintos ensayos de fuego ISO con carga.

Tabla 4. 17. Valores máximos de temperaturas, tiempo y deformaciones de los aceros S355NL y S460NL para las dos secciones elegidas para el ensayo de fuego ISO con carga.

Tabla 4. 18. Valores de los coeficientes y grado de significación para los acero S355NL y S460NL deducidos del ajuste de las ecuaciones 4.2 y 4.3.

Tabla 4. 19. Límite de las temperaturas y los tiempos entre el tramo A y B.

Tabla 4. 20. Valores de Q_c , A_t y grado de significación para los acero S355NL y S460NL hallados a partir del ajuste con la ecuación 4.5.

Tabla 4. 21. Deformación uniforme y reducción de área (%) de los aceros S355NL y S460NL después del ensayo de fuego normalizado con carga por una cara.

Tabla 4. 22. Durezas de los aceros S355NL y S460NL después del ensayo de fuego con carga.

Tabla 4. 23. Resistencia a compresión y a la flexotracción de los morteros después del ensayo ISO en MPa.

Índice de Figuras

Capítulo I

Figura 1. 1. Curva de fuego estándar ISO 834 y dos modelos de fuego.

Figura 1. 2. Determinación de la temperatura y tiempo críticos de resistencia al fuego.

Figura 1. 3. Determinación del tiempo máximo de exposición, según la carga térmica total.

Capítulo II

Figura 2. 1. Fases de un fuego natural comparando las temperaturas de un fuego natural con las de la curva estándar de fuego ISO 834.

Figura 2. 2. Curvas de fuego nominales comparadas con un fuego paramétrico.

Figura 2. 3. Curva paramétrica tiempo-temperatura considerando el efecto de ventilación.

Figura 2. 4. Curva paramétrica tiempo-temperatura considerando los efectos de la carga de fuego.

Figura 2. 5. Los modelos de zona dividen la geometría en las zonas las representadas en el dibujo: Zona superior, Zona inferior y penacho del incendio. (Fuente: NFPA Fire Protection Handbook, ed. 2003, [2.18]).

Figura 2. 6. Simulación computacional del crecimiento del incendio con un Modelo de Campo, recinto de oficinas, (fuente: Archivo GIDAI)

Figura 2. 7. Formas alotrópicas del hierro puro

Figura 2. 8. Soluciones sólidas: (a) de sustitución y (b) intersticial

Figura 2. 9. Diagrama de fases Fe-C

Figura 2. 10. Factores de reducción para la relación tensión-deformación del acero a elevada temperatura.

Figura 2. 11. Curvas tensión-deformación del acero S460NL (a) y S460N (b), a las temperaturas de ensayo.

Figura 2. 12. Elongación térmica del acero en función de la temperatura.

Figura 2. 13. Variación del calor específico del acero con la temperatura.

Figura 2. 14. Variación de la conductividad térmica del acero con la temperatura.

Figura 2. 15. Registro temperatura tiempo para un acero sometido a fuego envolvente bajo curva ISO según diferentes valores de masividad.

Figura 2. 16. Registro temperatura tiempo para piezas de acero, protegidas y no protegidas, sometidas a fuego envolvente bajo curva ISO con distinta masividad.

Capítulo III

Figura 3. 1. Probetas de mortero normalizadas.

Figura 3. 2. Probeta de mortero más acero para ensayo de fuego ISO 834.

Figura 3. 3. Microscopio electrónico de barrido.

Figura 3. 4. Difractómetro de Rayos X.

Figura 3. 5. Durómetro.

Figura 3. 6. Máquina de ensayos de tracción.

Figura 3. 7. Geometría de la probeta del ensayo de tracción a temperatura ambiente.

Figura 3. 8. Medidor de perfiles de la ETSI camino canales y puertos, UPM.

Figura 3. 9. Sistema horno más máquina de tracción para los ensayos de tracción a temperatura constante y elevada. Vista general (a), horno (b) y mordazas (c).

Figura 3. 10. Geometría de la probeta del ensayo de tracción a temperatura constante y elevada.

Figura 3. 11. Probetas de los 4 morteros ensayados.

Figura 3. 12. Fragmentos de la parte externa (dcha) e interna (izqda) usados para la determinación de agua libre.

Figura 3. 13. Porosímetro.

Figura 3.14. Esquema del ensayo a flexotracción (izquierda) y compresión (derecha).

Figura 3. 15. Fotografías reales de las máquinas para los ensayos de flexo-tracción y compresión.

Figura 3. 16. Esquema del horno.

Figura 3. 17. Fotografía real del horno para ensayos de fuego por una cara.

Figura 3. 18. Fotografía real del horno para ensayos de fuego envolvente.

Figura 3. 19. Registro de temperaturas del horno según un fuego ISO 834.

Figura 3. 20. Registro de temperaturas del horno según un fuego tipo curva externa.

Figura 3. 21. Fotografía real del montaje del horno para ensayos de fuego con carga constante.

Figura 3. 22. Dispositivo de captación de imágenes VIC, para la medida de deformaciones.

Figura 3. 23. Geometría de la probeta del ensayo de tracción bajo curva ISO 834 y carga constante.

Capítulo IV

Figura 4. 1. Micrografía obtenida por MO del acero S355NL: (a) 200x, (b) 500x.

Figura 4. 2. Micrografía obtenida por MO del acero S460NL: (a) 200x, (b) 500x.

Figura 4. 3. Micrografía obtenida por MO del acero S460N: (a) 200x, (b) 500x.

Figura 4. 4. Micrografías de la perlita de los aceros (a) S355NL a 5000x, (b) S460NL a 5000x y (c) S460N a 3000x, obtenidas por MEB.

Figura 4. 5. Gráficas tensión-deformación para los aceros S355NL, S460NL y S460N en el estado de recepción, sentido de laminación (izqda) y perpendicular (dcha).

Figura 4. 6. Fractografías de los aceros S355NL y S460NL tras el ensayo de tracción en el estado de recepción y en sentido de la laminación y perpendicular a ella.

Figura 4. 7. Micrografías a 620 °C (a), 820 °C (b) y 920 °C (c) del acero S355NL (sección longitudinal), x500.

Figura 4. 8. Micrografías a 620 °C (a), 820 °C (b) y 920 °C (c) del acero S460NL (sección longitudinal), x500.

Figura 4. 9. Curvas tensión-deformación de los aceros S355NL y S460NL a 25°, 500°, 650°, 800° y 950 °C.

Figura 4. 10. Gráficas comparativas entre los valores de los factores de reducción del campo de resistencia y del rango del límite elástico experimental y según la norma EN-1993-1-2.

Figura 4. 11. Resistencia estimada frente a la resistencia experimental para los aceros S355NL y S460NL según la expresión (4.1).

Figura 4. 12. Esquema de las zonas de la probeta tomadas para la observación micrográfica de los aceros S355NL y S460NL después de los ensayos a tracción a temperatura elevada.

Figura 4. 13. Micrografías de los aceros S355NL y S460NL tras el ensayo de tracción a alta temperatura, x500. (a, zona no deformada del S355NL a 22°, 500°, 650°, 800° y 950 °C. b, zona de mínima deformación del S355NL a 22°, 500°, 650°, 800° y 950 °C. c, zona de máxima deformación del S355NL a 22°, 500°, 650°, 800° y 950 °C. d, zona no deformada del S460NL a 22°, 500°, 650°, 800° y 950 °C).

Figura 4. 14. Macrografías del acero S355NL (arriba) y S460NL (abajo) a 22°C x20, 500°C x20, 650 °C x20, 800 °C x20 y 950 °C x15.

Figura 4. 15. Macrografías del acero S355NL (arriba) y S460NL (abajo) a 22°C x40, 500°C x40, 650°C x40, 800 °C x27 y 950 °C x27.

Figura 4. 16. Macrografías del acero S355NL (arriba) y S460NL (abajo) a 22°C x400, 500°C x400, 650°C x400, 800°C x400 y 950°C x20.

Figura 4. 17. % de pérdida de peso de los 4 morteros referida a peso total en acondicionamiento.

Figura 4. 18. ATD y TG del mortero OPC (izqda.) y OPC-P+V (dcha).

Figura 4. 19. ATD y TG del mortero Al-P+V (izqda.) y Al+HS-P+V (dcha).

Figura 4. 20. % Pérdida de peso referida a la cantidad de cemento de los cuatro morteros ensayados.

Figura 4. 21. Volumen y Distribución de la porosidad para los morteros OPC, OPC-P+V, AL-P+V y AL+HS-P+V.

Figura 4. 22. Situación de los termopares para la medida de temperatura en las probetas de acero

Figura 4. 23. Registros de temperaturas en la probeta de acero S355NL, a) en los puntos 5 y 6 (centrales), b) en los puntos 1, 3, 2 y 4 (superiores), y c) en los puntos 7, 9, 8 y 10 (inferiores), sometido a un fuego estándar bajo curva ISO.

Figura 4. 24. Registros de temperaturas en la probeta de acero S460NL, a) en los puntos 5 y 6 (centrales), b) en los puntos 1, 3, 2 y 4 (superiores), y c) en los puntos 7, 9, 8 y 10 (inferiores), sometido a un fuego estándar bajo curva ISO.

Figura 4. 25. Registros de temperaturas en la probeta de acero S460N, a) en los puntos 5 y 6 (centrales), b) en los puntos 1, 3, 2 y 4 (superiores), y c) en los puntos 7, 9, 8 y 10 (inferiores), sometido a un fuego estándar bajo curva ISO.

Figura 4. 26. Análisis comparativo del registro de temperaturas de los aceros S355NL, S460NL y S-460-N sometido a un fuego estándar bajo curva ISO 834.

Figura 4. 27. Registros T-t y correspondientes perfiles de T-profundidad del acero S460NL a 1h, 2h y 3h de ensayo de fuego bajo curva ISO 834.

Figura 4. 28. Registros de temperaturas en la probeta de acero S355NL, a) en los puntos 5 y 6 (centrales), b) en los puntos 1, 3, 2 y 4 (superiores), y c) en los puntos 7, 9, 8 y 10 (inferiores), sometido a un fuego bajo curva externa.

Figura 4. 29. Registros de temperaturas en la probeta de acero S460NL, a) en los puntos 5 y 6 (centrales), b) en los puntos 1, 3, 2 y 4 (superiores), y c) en los puntos 7, 9, 8 y 10 (inferiores), sometido a un fuego bajo curva externa.

Figura 4. 30. Análisis comparativo del registro de temperaturas de los aceros S355NL y S460NL sometido a un fuego bajo curva externa.

Figura 4. 31. Cara interna y externa de los tres aceros después del ensayo de fuego.

Figura 4. 32. Registro T-t de los aceros S355NL y S460NL para el ensayo de fuego envolvente con curva ISO 834 durante 16 min, 1 h y 3 h.

Figura 4. 33. Situación de los termopares para la medida de temperatura en las probetas de mortero.

Figura 4. 34. Registros T-t y correspondientes perfiles de T-profundidad de los morteros OPC, OPC-P+V, Al-P+V y Al+HS-P+V a 3h de ensayo de fuego bajo curva ISO 834.

Figura 4. 35. Fotografías de la cavidad del horno y del estado de la probeta de mortero OPC después del efecto de “spalling”.

Figura 4. 36. Fotografía de las probetas de los morteros después de 3 horas de ensayo de fuego ISO 834.

Figura 4. 37. Registros T-t y correspondientes perfiles de T-profundidad de los morteros OPC y Al-P+V a 3h de ensayo de fuego bajo curva ISO 834, 2º ensayo.

Figura 4. 38. Registros T-t y correspondientes perfiles de T-profundidad de las lanas ISOVER y PROMAT a 3h de ensayo de fuego bajo curva ISO 834.

Figura 4. 39. Registros T-t y correspondientes perfiles de T-profundidad de los morteros OPC-P+V y Al-P+V como material aislante junto al acero S460NL, a 3h de ensayo de fuego bajo curva ISO 834.

Figura 4. 40. Registros T-t y correspondientes perfiles de T-profundidad de las lanas ISOVER y PROMAT como elementos aislantes junto con el acero S460NL, durante 3h de ensayo bajo curva de fuego ISO 834.

Figura 4. 41. Registros T-t y correspondientes perfiles de T-profundidad de las lanas del acero S460NL con los escudos de radiación como elemento aislante, durante 3h de ensayo bajo curva de fuego ISO 834.

Figura 4. 42. Micrografía obtenida por MO del acero S355NL a x500: (a) zona fría, (b) zona media y (c) zona caliente, tras el ensayo bajo curva ISO por una cara durante 3 horas.

Figura 4. 43. Micrografía obtenida por MO del acero S460NL a x500: (a) zona fría, (b) zona media y (c) zona caliente, tras el ensayo bajo curva ISO por una cara durante 3 horas.

Figura 4. 44. Micrografía obtenida por MO del acero S460N a x500: (a) zona fría, y (b) zona caliente, tras el ensayo bajo curva ISO por una cara durante 3 horas

Figura 4. 45. Micrografía obtenida por MO del acero S460NL a x500 de la zona media, tras el ensayo bajo curva ISO por una cara durante 3 horas.

Figura 4. 46. Micrografía obtenida por MEB del acero S355NL a x500: (a) zona fría, (b) zona media y (c) zona caliente, tras el ensayo bajo curva externa por una cara durante 3 horas.

Figura 4. 47. Micrografía obtenida por MO del acero S460NL a x500: (a) zona fría, (b) zona media y (c) zona caliente, tras el ensayo bajo curva externa por una cara durante 3 horas.

Figura 4. 48. Micrografía obtenida por MO del acero S355NL a x500: (a) 16 min, (b) 1 hora y (c) 3 horas, tras el ensayo de fuego envolvente bajo ISO 834.

Figura 4. 49. Micrografía obtenida por MO del acero S460NL a x500: (a) 16 min, (b) 1 hora y (c) 3 horas, tras el ensayo de fuego envolvente bajo ISO 834.

Figura 4. 50. Difractograma de Rayos X de la capa de óxido en el acero S355NL (a) y en el S460NL (b), después del ensayo de fuego ISO por un cara, durante 3 horas.

Figura 4. 51. Análisis con microsonda del acero S355NL de la cara no expuesta (a) y la cara expuesta (b) al fuego ISO por un cara, durante 3 horas.

Figura 4. 52. Análisis con microsonda del acero S460NL de la cara no expuesta (a) y la cara expuesta (b) al fuego ISO por un cara, durante 3 horas.

Figura 4. 53. Micrografías del acero S355NL, (a) cara no expuesta y (b) cara expuesta al fuego respectivamente x1000 en MEB, electrones secundarios. (c) MEB, electrones retrodispersados x200.

Figura 4. 54. Micrografías del acero S460NL, cara expuesta al fuego x500 (a) y x1000 (b) en MEB, electrones secundarios. (c) MEB, electrones retrodispersados x200

Figura 4. 55. Curvas tensión-deformación del acero S355NL después del ensayo de fuego ISO, en sentido de la laminación y perpendicular.

Figura 4. 56. Curvas tensión-deformación del acero S460NL después del ensayo de fuego ISO, en sentido de la laminación y perpendicular.

Figura 4. 57. Curvas tensión-deformación del acero S460NL después del ensayo de fuego con curva externa, en sentido de la laminación y perpendicular.

Figura 4. 58. Curvas tensión-deformación de los aceros S355NL y S460NL después del ensayo de fuego envolvente con curva ISO

Figura 4. 59. Macrografía x12 y micrografía x400 en MEB del acero S355NL dirección perpendicular cara fría y cara caliente. Fuego a una cara bajo curva ISO 834.

Figura 4. 60. Macrografía x12 y micrografía x400 en MEB del acero S460NL dirección de laminación cara fría y cara caliente. Fuego a una cara bajo curva ISO 834.

Figura 4. 61. Macrografía x12 y micrografía x400 en MEB del acero S460NL, dirección de laminación cara fría y cara caliente. Fuego a una cara bajo curva externa.

Figura 4. 62. Inclusiones de sulfuro de manganeso.

Figura 4. 63. Macrografía en MEB x30 del acero S460NL antes y después del ensayo de fuego a una cara bajo curva ISO 834 (cara fría).

Figura 4. 64. Posiciones de los termopares para la medida de las temperaturas.

Figura 4. 65. Registros T-t para el ensayo de fuego por una cara bajo curva ISO 834 con una carga de 90 kg y sección central de 40mm².

Figura 4. 66. Registros T-t para el ensayo de fuego a una cara bajo curva ISO 834 con una carga de 180 kg con una sección central de 40mm².

Figura 4. 67. Registros T-t para el ensayo de fuego a una cara bajo curva ISO 834 con una carga de 360 kg con una sección central de 40mm².

Figura 4. 68. Registros T-t para el ensayo de fuego a una cara bajo curva ISO 834 con una carga de 360 kg con una sección central de 80mm².

Figura 4. 69. Gráficas ϵ -T (a) y T-t (b) de los aceros S355NL y S460NL con una sección de 40mm² después del ensayo de fuego con carga.

Figura 4. 70. Gráficas ϵ -T (a) y T-t (b) de los aceros S355NL y S460NL con una sección de 80mm² después del ensayo de fuego con carga.

Figura 4. 71. Gráficas T- ϵ de los aceros S355NL y S460NL con una sección de 40 y 80 mm² (a) y (b) después del ensayo de fuego con carga.

Figura 4. 72. Representación de los dos tramos de la curva ϵ -t para el acero S355NL con una sección de 40 mm².

Figura 4. 73. Representación del logaritmo neperiano de la velocidad de deformación frente a la inversa de la temperatura para el ensayo de fuego con carga del acero S460NL con una sección de 40 mm^2 .

Figura 4. 74. Mapas de los campos de deformación durante el ensayo de fuego con carga. Acero S355NL con una sección de 40 mm^2 (a) y 80 mm^2 (c). Acero S460NL con una sección de 40 mm^2 (b) y 80 mm^2 (d).

Figura 4. 75. Fractografías x20 en MEB, de las probetas de acero S355NL con una superficie útil de 40 mm^2 (a) y 80 mm^2 (b) con una carga de 88 y 44 MPa (360kg), después del ensayo con fuego ISO 834 por una cara.

Figura 4. 76. Superficie de la zona de la rotura en el acero S355NL con una sección útil de 40 mm^2 (a) y 80 mm^2 (b) con una carga de 88 y 44 MPa (360kg), después del ensayo con fuego ISO 834 por una cara.

Figura 4. 77. Fractografías x20 en MEB, de las probetas de acero S460NL con una superficie útil de 40 mm^2 con carga de 44 MPa (180kg), (a) y con 40 y 80 mm^2 con carga de 88 y 44 MPa (360kg), (b y c) después del ensayo con fuego ISO 834 por una cara.

Figura 4. 78. Superficie de la zona de la rotura en el acero S460NL con una sección útil de 40 mm^2 con carga de 44 MPa (a) y con 40 y 80 mm^2 con una carga de 88 y 44 MPa (360kg), (b y c) después del ensayo con fuego ISO 834 por una cara.

Figura 4. 79. Micrografía de la rotura del acero S355NL con una superficie 40 mm^2 después del ensayo a temperatura con una carga de 88 MPa x200 y detalle de las microestructuras en zona alejada y próxima a la fractura x500.

Figura 4. 80. Micrografía de la rotura del acero S355NL con una superficie 80 mm^2 después del ensayo a temperatura con una carga de 44 MPa x200 y detalle de las microestructuras en zona alejada y próxima a la fractura x500.

Figura 4. 81. Micrografía de la rotura del acero S460NL con una superficie 40 mm^2 después del ensayo a temperatura con una carga de 44 MPa x200 y detalle de las microestructuras en zona alejada y próxima a la fractura x500.

Figura 4. 82. Micrografía de la rotura del acero S460NL con una superficie 40 mm^2 después del ensayo a temperatura con una carga de 88 MPa x200 y detalle de las microestructuras en zona alejada y próxima a la fractura x500.

Figura 4. 83. Micrografía de la rotura del acero S460NL con una superficie 80 mm^2 después del ensayo a temperatura con una carga de 44 MPa x200 y detalle de las microestructuras en zona alejada y próxima a la fractura x500.

Figura 4. 84. Análisis comparativo entre el perfil de temperatura del acero S355NL bajo una curva ISO y tres modelos matemáticos.

Figura 4. 85. Esquema de la probeta considerando el flujo de calor nulo en las superficies adiabáticas.

Figura 4. 86. Curvas temperatura-tiempo, experimentales y teóricas ajustadas eliminando las zonas oxidadas.

Figura 4. 87. Curvas temperatura-tiempo, experimentales y teóricas ajustadas incluyendo las zonas oxidadas.

Figura 4. 88. Ajuste del gradiente de temperatura en función de la posición a lo largo del espesor de la probeta de acero.

Figura 4. 89. Curvas temperatura-tiempo, experimentales y teóricas ajustadas por el modelo para el mortero de base cemento Portland (OPC).

Figura 4. 90. Ajuste del gradiente de temperatura en función de la posición en el interior de la probeta de mortero, modificando las posiciones de los termopares.

Figura 4. 91. Curvas temperatura-tiempo, experimentales y teóricas ajustadas por el modelo para la lana aislante.

Figura 4. 92. Ajuste del gradiente de temperatura en función de la posición en el interior de la lana ISOVER.

Figura 4. 93. Conductividad teórica y deducida del mortero ensayado a partir de 300 °C de temperatura.

RESUMEN EN INGLÉS

Abstract

1. Introduction

Over the years, due to important fires occurred in tunnels and structures (English Channel in France-England in 1996, Windsor Building in Spain in 2005...), has been shown that fire is an extremely complex phenomenon and represents one of the most severe situations which a structure can find. Also in the last decades, the changes in building systems, such as windows, or combustible materials, make risks that did not exist. Thus, in recent decades, the level of the studies increased considerably, both in the improvement in building materials, and publication of requirements for Fire Safety, required at the national or international standards, such as by the technical Building Code [1].

The most important structural materials are concrete and steel and they are the focus of most of the studies when the fire is involved. Throughout the second half of last century and so far this century, carbon steel has taken an important role of both in civil and in industrial work, and all due to their excellent mechanical properties at room temperature [2], but not so when the steel subjected to elevated temperature, like a fire situation. The behavior of structural materials against fire action implies that they have to meet requirements that set out in the legislation, [3, 4] and they are summarized below.

Materials have to satisfy, when exposed to fire action [5, 6], a standard of thermal insulation that prevents an excessive heat transfer of the structural element, the integrity criterion, which prevents the passage of flame and hot gases, and finally the strength criterion, which ensures the ability of the structure to withstand loads during fire action [7]. Depending on the functions of the structural element it would be required one or another criterion to ensure the fire resistance.

The fire resistance of materials in accordance with the standard [8], relate to test performance when heated according to an internationally agreed time-temperature curve defined in ISO 834, which does not represent any type of natural building fire. This

standard curve involves an ever-increasing air temperature in a test furnace [9]. This curve has been around since 1903, it was adopted in 1918 by the American Society for Testing Materials (ASTM) and it was subsequently incorporated into the testing standards at European level.

There are other types of curves to be used depending on the type of fire involving each situation [3]. In cases where the structure for which the fire resistance is being considered is external, and the atmosphere temperatures are therefore likely to be lower at any given time (which means that the temperatures of the building materials will be closer to the corresponding fire temperatures), a similar “External Fire” curve may be used, shows a variation to less than 60 seconds time coincident with the ISO curve, remaining almost constant at around 680 °C [4, 10]. Finally where storage of hydrocarbon materials makes fires extremely severe a “Hydrocarbon Fire” curve is also given [4, 10]. It has a very rapid rise in temperature reaching an asymptotic value of 1100 °C in 20 minutes. There are also the parametric curves [11], these curves are suitable for using as alternatives of nominal curve of internal members of a compartment, which try to model a natural fire with different parameters such as: the thermal properties of materials, the fire load density (amount of fuel that is burned) and ventilation in the compartments.

Due to the importance of steel as a structural material and with the knowledge about the ability to simulate a fire situation using the standard curves, it was thought appropriate to initiate a pilot study **BEHAVIOR ANALYSIS OF CARBON STEEL UNDER FIRE**.

2. Content

The most important points that have been developed in this experimental investigation, are presented below:

Two pilot furnaces have been set-up, designed and operated to test structural carbon steel and insulating materials, (mortar and glass wool), under the fire action. One of them to simulate localizing fire and the other one operate as fully engulfed compartment.

A structural and mechanical characterization of selected steels before fire test has been developed. The microstructure of the steel selected (S355NL, S460NL and S460N), have been analyzed, using an optical and electronic microscope, the grain size was measured by Heyn's method from 2D images, the mechanical properties resulting from the tensile tests and hardness too.

Three steels adopt a ferrite/pearlite band structure and the steel samples show a small size and equiaxed grains. The mechanical properties results showed that S460N steel presented a slightly higher resistance, a higher yield and greater plastic deformation before of the steel S460NL and S355NL rupture. S460N steel showed the highest penetration resistance followed of S460NL and S355NL.

A structural and mechanical analysis at high temperature was done with S355NL and S460NL steels. Three temperatures were used to structural study, at 620 °C, according to the equilibrium diagram Fe-C, steels did not show a significant difference respect to the initial state, the band structure and the grain size remained. At 820 °C the ferritic-pearlitic bands start to disappear, ferrite and some of pearlite has transformed in austenite, the grain size was still remained. Reaching at 920°C, the steel is in a monophasic field where there has been a complete the transformation to austenite, the ferritic-pearlite bands distribution further lost and it was observed in both steels there was a slight grain growth.

The tensile tests at 22°, 500°, 650°, 800° and 950° C and fractographic study (SEM) were carried out. For both steels were observed that the strength, modulus and the limit elastic decrease with the temperature. For the temperature interval of 500° and 650 °C, a plastic deformation developed with formation of neck and a elongation of the grain along load direction in the nearest area of the rupture, to 800° and 950 °C a plastic deformation was developed along the total length and there was not neck formation due to the effect of thermal creep.

It can see that for temperatures of 450 and 650°C, experimental reduction factors of yield strength for both steel, were of the same order which predicted the standard, EN 1993-1-2. The experimental values of reduction factor of elastic range were greater than the standard values, the tested steels would suffer a greater deformation in the

development of a fire. This fact is of interest and must be taken into account in the structures design.

Empirical equation was correlated to experimental data of the tensile tests to try to find its reliability, ($R_m = a \epsilon_m^b * T^c$, where, $R_m(\text{MPa})$ = maximum strength, ϵ_m = maximum stress and $T(^{\circ}\text{K})$ = temperature).

The structure of the four mortars formulated (two with Portland base OPC, OPC-P+V, and two with aluminous base, Al-P+V and Al+HS-P+V) has been characterized with DTA / TG technique, porosimetry measurements and weight loss, before fire test. Mechanical tests have been made to measure compressive and flexural strength.

OPC-P+V and Al+HS-P+V mortars were lost to higher water followed by the other two, the DTA/TG gave results consistent with its composition. Aluminous base mortars showed more and larger pore. The mortar with greater resistance to tension and compression was OPC followed to OPC-P+V, Al-P+V and Al+HS-P+V.

Temperature-time records have been generated and the temperature gradients developed have been analyzed in the different materials (steels and insulating materials) under localized and fully ISO 834 fire test and localized fire with external curve. The ISO fire tests to steels were developed during one, two and three hours and the external fire test was during three hours. The time to ISO fire test to mortars, rock wool and steel plates was three hours.

The insulating effect of possible materials that could play steel protection against the fire action has been checked. It was verified that both mortars, such as glass wool as radiation shields (steel plates) were good insulating materials. The best behavior between the mortars was to OPC-P+V and Al-P+V.

The oxide layer developed on the steel surfaces, due to high temperatures, was analyzed using X-Ray, microprobe and SEM. The layer observed was porous and its main compound was Fe_3O_4 .

A structural characterization of selected steels after fire test has been developed. The structure of the three steels generated after the fire test with ISO curve during two and three hours was similar to structure given from 820°C in high temperature constant study. The ferritic-pearlite bands distribution was blurred and it was observed in both steels there was a slight grain growth. The grain growth in steel S460N is more significant after three hours under fire. To fully fire there was a situation appeared. And the three steels structure after external fire test was similar to structure at 620°C in high temperature constant study. The ferritic-perlitic bands and grain size remained.

A mechanical characterization of selected steels after fire test has been developed (S355NL and S460NL). The tensile and hardness tests and fractographic study were made for all fire situations. The residual mechanical properties of both steels after fire tests under ISO and external curves, decrease slightly but not significantly. This is a general trend for all cases, thus proving that the steel is recovering well but not completely. Macrographs in both steels and for both directions (rolling and perpendicular) showed a break like cup and cone shape with fibrous texture that creates a roughness appearance, there was also a section reduction generated by the test related to plastic deformation. In the case of the micrographs showed that the failure was due to transgranular growth and coalescence of voids during the deformation.

A tensile test under constant load under ISO fire was carried out, until failure or for 3 hours. Three loads with a weight of 90, 180 and 360 kilos and specimens of both steels with two different sections 40 and 80 mm² were used. To measure the deformation an advanced extensometry technique was used (VIC-2D).

A thermal model for the materials tested, in order to verify the standard predicted results has been implemented.

3. Conclusions

The main conclusions can be drawn from this study based on data obtained and presented in the report are listed below:

1. Pilot furnaces have been designed, built and operated to simulate the conditions of standard curves of fire. It has selected the ISO 834 fire curve and the external fire curve. It has more practical application in real life.
2. The non-alloy structural steel S355NL and alloy steels S460NL and N were the steels selected according to UNE to use in the experimental test. All these steels are ferritic-pearlitic nature and are used in both civil and industrial works.
3. It has been assessed, for each case and situation, the maximum temperature levels reached at the time, according to ISO 834 and external curve, to find the actual change in temperature in different parts of the specimens tested steel with dimensions of 200x100x20 mm. The same situation has been developed to the mortars but only with ISO fire curve.
4. It has been obtained the time-temperature profiles for all steels and mortars. The specimens are tested both the side exposed to the heat source, fire zone, as the face that is out of fire, as structural elements are tested in the trial by fire.
5. It has been analyzed the evolution of time-temperature profiles obtained, proving the importance of positioning in the thermal response of the test materials.
6. It has also been deduced the effect of different temperature profiles in the development of microstructure of the steels tested and in the evolution of mechanical properties in steels. It is noted that the ISO curve remains the composition but the structure undergoes a change as opposed to when using the external curve where it maintains structure and composition. The mechanical property values deduced from the tensile tests and hardness are slightly modified but in general terms steels tend to recover.

4. References

- [1] DB SI: Seguridad en caso de incendio, Código Técnico de la Edificación, Ed. Ministerio de Fomento, Febrero 2010.
- [2] “Properties and Selection: Irons Steel and High Performance Alloys”. ASTM Handbook, vol. 1.
- [2] UNE-EN-1991-1-2, Norma española, Eurocódigo 1: Acciones en estructuras, Parte 1-2: Acciones generales, Acciones en estructuras expuestas al fuego.
- [3] EN-1993-1-2, European standard, Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design.
- [4] Patrick Bamonte, Roberto Felicetti. “Fire scenario and structural behavior of underground parking lots exposed to fire” Proceedings of International Conference, Applications of structural fire engineering. Session 2, Fire Modeling. Prague, 19-20 February 2009.
- [5] Konstantinos Gkoumas, Chiara Crosti, Luisa Giuliani, franco Bontempi. “Definition and selection of design fire scenarios”. Proceedings of International Conference, Applications of structural fire engineering. Session 2, Fire Modeling. Prague, 19-20 February 2009.
- [6] R. H. R. Tide. “Integrity of Structural Steel After Exposure to Fire”. Engineering journal / first quarter /1998.
- [7] UNE-EN 1363-1:1999, Ensayos de resistencia al fuego. Parte 1: Requisitos generales
- [8] C.R. Barnett. “Replacing international temperature–time curves with BFD curve”. Fire Safety Journal 42 (2007) 321–327.
- [9] C. R Barnett, G. C Clifton. “Examples of fire engineering design for steel members, using a standard curve versus a new parametric curve”.

[10] N.D. Pope, C.G. Bailey.” Quantitative comparison of FDS and parametric fire curves with post-flashover compartment fire test data”. Fire Safety Journal 41 (2006) 99–110.

INTRODUCCIÓN

Capítulo I: Introducción

1. Introducción

Es un hecho bien conocido desde los atentados terroristas del 11 de Septiembre del 2001 y el colapso de las torres gemelas del World Trade Center en Nueva York, como a nivel mundial se ha aumentado la preocupación por el entendimiento sobre la vulnerabilidad de los edificios en situaciones de incendio y el papel de la ingeniería civil, la arquitectura y las demás áreas involucradas en estos temas.

El proceso normal de diseño y dimensionamiento de estructuras suele realizarse considerando una serie de acciones ordinarias (“estado límite de servicio”) y acciones extraordinarias (“estado límite último”). Para ambos tipos de acciones, que están perfectamente determinadas, se considera que las propiedades mecánicas de los materiales y elementos estructurales que integran dicha estructura son las que se obtendrían en condiciones estáticas (baja velocidad de deformación) y a temperatura de servicio (generalmente, en torno a los 20 °C). De esta manera, algunas situaciones excepcionales pero no improbables, en las que se producen acciones de carácter singular, el comportamiento mecánico de los elementos y materiales estructurales se ve notablemente alterado por las altas temperaturas y/o por la velocidad de la sollicitación, como por ejemplo en caso de incendio, explosión o impacto, no son normalmente tenidas en cuenta. Todo ello, a pesar de que la realidad muestra cómo éste tipo de acciones excepcionales no son tan infrecuentes como podría parecer, ya sea en sucesos de carácter accidental, como en ataques intencionados.

El conocimiento sobre el comportamiento de las estructuras ante un incendio se ha venido desarrollándose desde los años 90 hasta la fecha, englobándose dentro de los conocimientos que definen la “ingeniería de seguridad en caso de incendio”, disciplina conocida en la terminología anglosajona como (Structural Fire Engineering), en dónde se considera el comportamiento en servicio de cada estructura como situación singular; estos conocimientos quedan englobados dentro de lo que se conoce como “Ingeniería de Protección Contra Incendios”, (Fire Protection Engineering).

La ingeniería de estructuras en situación de incendio, es multidisciplinar y estudia el comportamiento del incendio, determinando el calor que este transfiere a la

estructura y calculando la respuesta mecánica de dicha estructura al estar sometida a las cargas reales del edificio y a las cargas térmicas procedentes del incendio. Como resultado, se determinará si la estructura necesitaría o no protección estructural para mantener su capacidad portante. Y en caso de que así fuese, permitirá conocer qué elementos de la estructura son necesarios proteger y cuáles no, así como el tipo de protección más adecuado para cada caso. Para ello, es necesario utilizar un software específico de cálculo térmico y mecánico.

El fuego es un proceso físico-químico exotérmico, con desprendimiento de calor y luz. Es en definitiva el resultado de la combinación de: combustible, calor y oxígeno. Las llamas son la evidenciación del inicio de una rápida oxidación y propagación al resto de enseres que presenten un comportamiento como combustibles.

La ingeniería de seguridad en caso de incendio abarca un campo multidisciplinar donde se encuentran la ciencia, la tecnología, la gestión y las leyes. Las principales materias que abarca son: la ciencia del fuego, la ingeniería de protección activa y pasiva, el control del humo y el calor, el comportamiento humano, la evaluación del riesgo de incendio, el diseño de sistemas y la gestión de los recursos humanos y materiales en situación de incendio. Su aplicación afecta en mayor o menor medida a la mayoría de las disciplinas que se utilizan en el desarrollo de un proyecto de edificación, desde la arquitectura, la ingeniería de obra civil y de estructuras, la ingeniería de instalaciones mecánicas y eléctricas hasta la propia gestión operativa del edificio. El Instituto de Ingenieros de Incendio del Reino Unido define la ingeniería de seguridad en caso de incendio como “la aplicación de la ciencia, la ingeniería, las leyes, los códigos de diseño y el criterio procedente de un experto en la materia, para la protección de las personas, el patrimonio y el medio ambiente, de los efectos destructivos de un incendio, todo ello basado en un entendimiento del fenómeno del incendio y sus efectos así como del comportamiento de las personas en situación de incendio”.

El acero es, junto con el hormigón, el material estructural de construcción más utilizado en el mundo, y además, es el material preferido cuando se busca llevar las estructuras a nuevos límites, ya sea en altura o en longitud y todo ello bajo la definición, el diseño, la construcción y ensamblaje de diferentes elementos estructurales; entendiendo como tal un cuerpo o conjunto de cuerpos cuya misión principal consiste en transmitir o resistir los esfuerzos o acciones recibidas, constituyendo la parte esencial

de cualquier edificación, obra civil, obra de ingeniería o construcción industrial, siendo responsables de la transmisión de cargas y de mantener la forma del conjunto bajo una determinada tolerancia, trabajando como elementos aislados sirviendo a su vez como sustento del resto de componentes del sistema.

Si lo anterior expuesto es importante, mucho más los materiales estructurales ya que son los que dan forma real a los elementos constructivos. El abanico de materiales que pueden ser utilizados es muy amplio, pero como se acaba de indicar el acero es uno de los que con más frecuencia se utiliza, y ello se debe entre otras cosas a:

- ❖ Su relación resistencia/peso, que presenta un valor sensiblemente elevado.
- ❖ Los elementos que forman la estructura en cualquier construcción podrán tener una sección transversal mucho menor que en el caso del hormigón, ocupando por tanto menos espacio.
- ❖ Una estructura metálica permite disponer de grandes espacios diáfanos.
- ❖ Pueden construirse edificaciones de gran altura, en las que el espacio ocupado por la estructura sea menor.
- ❖ Las estructuras pueden prepararse en taller, lo que se traduce en que los elementos llegan a la obra prácticamente elaborados, necesitando un mínimo de ajustes para estar operativos.
- ❖ Al término del periodo de vida útil, la estructura metálica puede ser desmontada y posteriormente utilizada en nuevos usos.
- ❖ Puede ser reaprovechada con un fácil reciclaje.
- ❖ Las estructuras de acero son, en general, más ligeras.

No obstante lo anterior, también suelen presentar los siguientes inconvenientes:

- ❖ La necesidad de proteger la estructura metálica contra el fuego.
- ❖ La necesidad de protección contra la corrosión.
- ❖ El aumento del coste.
- ❖ La necesidad de que las estructuras de acero han de resistir la acción del fuego durante un período de tiempo suficiente para facilitar la evacuación y las tareas de extinción, antes de que las altas temperaturas deformen el material e invaliden su capacidad resistente.

La ciencia del fuego comprende, la química del fuego y la dinámica del fuego, siendo la cantidad de calor generado y el comportamiento del humo los temas más críticos. El calor deteriora la resistencia y la rigidez de la mayoría de los materiales de construcción, además de favorecer el alargamiento por dilatación de los mismos, en una estructura que habitualmente no lo permite. Los efectos térmicos del incendio sobre los materiales y/o estructuras han de ser tenidos en cuenta en todo proceso de ingeniería de diseño de los elementos estructurales y de las estructuras. La Ingeniería de Protección Contra Incendios comprende el diseño de sistemas de protección activa y protección pasiva para proporcionar un nivel de protección satisfactorio de los edificios y sus contenidos en caso de incendio. La protección activa de edificios incluye sistemas de detección y alarma, rociadores y otros sistemas automáticos y manuales de lucha contra incendios. La protección pasiva trata el diseño del edificio para que la capacidad portante del mismo sea suficiente para resistir la acción del incendio así como para limitar su propagación.

La elevación de la temperatura que se produce como consecuencia de un incendio en un edificio afecta a su estructura de dos formas diferentes. Por un lado, las propiedades de los materiales se ven afectadas, modificándose de forma importante su capacidad mecánica. Por otro, aparecen acciones indirectas como consecuencia de las deformaciones de los elementos, que generalmente dan lugar a tensiones que se suman a las debidas a otras acciones.

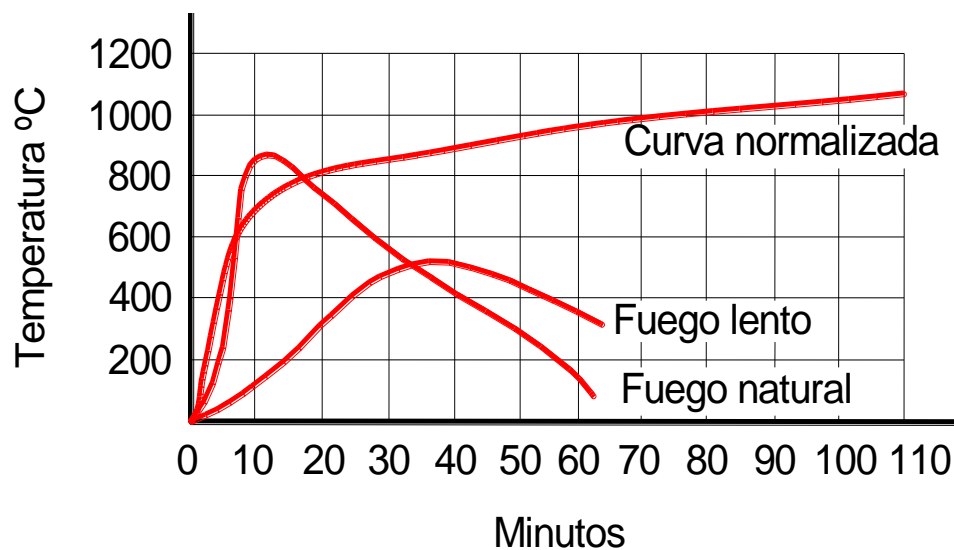


Figura 1. 1. Curva de fuego estándar ISO 834 y dos modelos de fuego.

Pues bien, en el Código Técnico de la Edificación se indican únicamente métodos simplificados de cálculo suficientemente aproximados para la mayoría de las situaciones habituales. Estos métodos sólo recogen el estudio de la resistencia al fuego de los elementos estructurales individuales ante la curva normalizada tiempo temperatura (ISO 834). En dicho código, también se tiene en cuenta otras curvas nominales para fuego exterior o para incendios producidos por combustibles de gran poder calorífico, como hidrocarburos, también incluyen métodos para el estudio de los elementos externos situados fuera de la envolvente del sector de incendio y a los que el fuego afecta a través de las aberturas en fachada. El código también contempla otros modelos de incendio para representar la evolución de la temperatura durante el incendio, tales como las denominadas curvas paramétricas o, para efectos locales, los modelos de incendio de una o dos zonas o de fuegos localizados o métodos basados en dinámica de fluidos, tales como los que se contemplan en la norma UNE-EN 1991-1-2: 2004. En la Figura 1.1 se representan tres situaciones diferentes correspondiente a la curva de fuego ISO, junto a dos modelos de fuego, uno natural y otro lento.

Para realizar este tipo de análisis conforme a normativa, hay que utilizar los Eurocódigos pudiéndose partir de un modelo de incendio nominal o de un modelo natural. Determinado el modelo de incendio, el análisis estructural se puede realizar para un único elemento, para una subestructura o para toda la estructura. Dependiendo de lo que se haya decidido calcular, se podrán utilizar modelos simplificados, avanzados o cualquiera de los dos.

Un dato importante a considerar es que se admite que un elemento tiene suficiente resistencia al fuego si, durante la duración del incendio, el valor de cálculo del efecto de las acciones, en todo instante de tiempo, no supera el valor de la resistencia de dicho elemento. En general, basta con hacer la comprobación en el instante de mayor temperatura que, con el modelo de curva normalizada tiempo-temperatura, se produce al final del mismo. En el caso de sectores de riesgo mínimo y en aquellos sectores de incendio en los que, por su tamaño y por la distribución de la carga de fuego, no sea previsible la existencia de fuegos totalmente desarrollados, la comprobación de la resistencia al fuego puede hacerse elemento a elemento mediante el estudio por medio de fuegos localizados, según se indica en el Eurocódigo 1 (UNE-EN 1991-1-2: 2004) situando sucesivamente la carga de fuego en la posición previsible más

desfavorable. En dicho Documento Básico no se considera la capacidad portante de la estructura tras el incendio.

En efecto, debido a que es un hecho conocido, la disminución de la resistencia de los aceros al carbono estructurales de construcción con la temperatura, definido el valor de la resistencia que no se puede rebajar fácilmente, se determina, junto a las temperaturas en los elementos estructurales sin y con protección cuando se emplea tanto la curva de fuego normalizada ISO en el Eurocódigo, para el supuesto de estructura interior conductiva que es como lo aplica la norma europea, fácilmente se pueden deducir los valores de las resistencias de dichos elementos como los tiempos que pueden soportar la acción del fuego en cada caso, ver Figura 1. 2. También se puede tener en consideración un fuego natural aplicando el criterio de igualdad de carga térmica total, tal como se indica en la Figura 1. 3, de donde se deduce el tiempo de máxima exposición aplicando la norma ISO de fuego, procediéndose a continuación de la misma forma que en el caso anterior.

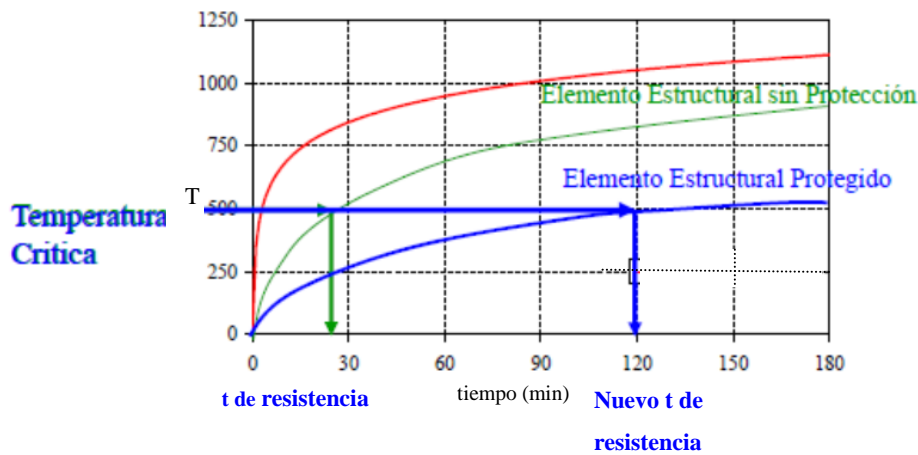


Figura 1. 2. Determinación de la temperatura y tiempo críticos de resistencia al fuego.

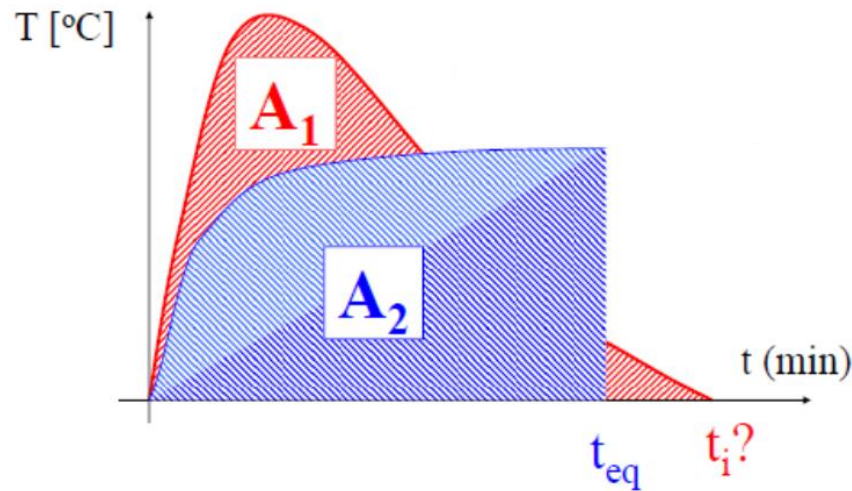


Figura 1. 3. Determinación del tiempo máximo de exposición, según la carga térmica total.

Finalmente existe la posibilidad de utilizar una metodología de realizar un cálculo avanzado, consiste en emplear tres modelos diferenciados: modelo de fuego, modelo de transferencia de calor y modelo de cálculo de respuesta estructural. De esta forma, a partir de la información del combustible, de la geometría del recinto y la actividad (carga de fuego), se calcula el campo de las temperaturas a las que está expuesta la estructura con el modelo de incendio. Con el campo de las temperaturas calculado, la geometría de la estructura y otros parámetros, se utiliza un modelo de transferencia de calor para calcular los gradientes de las temperaturas en el interior de los elementos estructurales. Con los gradientes de las temperaturas calculados y las cargas aplicadas en la estructura se utilizará un modelo estructural para calcular la respuesta mecánica. En definitiva, se aplicaran los tres modelos indicados y que están interrelacionados entre sí tal como se ha expuesto. La aplicación de la ingeniería de estructuras en situación de incendio mediante el cálculo estructural avanzado, requiere el uso de software de simulación computacional, así como la identificación de posibles escenarios de incendio y modelos de fuego.

La presente Memoria de tesis doctoral, trata sobre el comportamiento de los aceros al carbono bajo la acción del fuego y constituye el núcleo principal de la investigación realizada dentro del proyecto de investigación del Plan Nacional de Investigación y Desarrollo e Innovación Tecnológica, BIA 2008-06705-C02-02 y que tuvo por título “ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE ACEROS AL CARBONO FRENTE A FUEGO”, y que se desarrolló en la UCM, bajo la dirección del Dr. J.A. Trilleros en la Facultad de CC. QQ.; y que estuvo coordinado con otro más amplio

titulado: “Seguridad de estructuras de acero bajo acciones extraordinarias, fuego y explosiones” y que se desarrolló en la UPM, bajo la dirección del Dr. V. Sánchez Gálvez en la ETSICCP.

Tal como se indicó anteriormente, el punto de partida a considerar en el comportamiento en servicio de los componentes estructurales empleados en toda construcción lo constituye la selección de los materiales, ya que sobre ellos gira el diseño, ingeniería y puesta en servicio de los elementos constructivos que se utilicen. Dentro de este contexto, se consideraron los aceros al carbono, que tal como queda recogido en el Código Técnico de la Edificación, en donde se hace referencia a la norma UNE-EN-10025, los aceros que se emplean son los S235, S275, S355 y S450, en donde el número se refiere a la tensión del límite elástico en N/mm^2 , a cada acero le correspondería una tensión de rotura de 260, 410, 470 y 550 N/mm^2 , respectivamente. Para la realización de los ensayos bajo fuego, se seleccionaron dos aceros que presentaran una buena resistencia no solo a la temperatura ambiente sino también a temperatura elevada, uno fue el S355 y el otro el S460, este último no incluido en la norma, pero que se conocía su buen comportamiento a temperaturas elevadas en trabajos anteriores de la UPM.

Para mejorar la resistencia en los ensayos al fuego de los aceros, se seleccionaron, de una parte materiales aislantes empleados por los sectores industriales y a tal efecto se eligieron uno a base de fibra de vidrio y otro a base de silicatos alcalinotérreos que se emplean en la construcción de hornos industriales, junto a la utilización de chapas de acero al carbono como escudos de radiación. También se seleccionaron morteros como material aislante, formulados sobre dos cementos uno portland y otro aluminoso, junto con diferentes adiciones para mejorar su respuesta a temperatura elevada, de acuerdo con las indicaciones de la Dra. O. Rio del Instituto Eduardo Torroja. Antes de su aplicación como materiales aislantes, se realizaron los correspondientes ensayos de fuego bajo norma ISO 834, con objeto de tener los comportamientos de cada uno de ellos, frente al ensayo de fuego normalizado.

En los ensayos de fuego se consideran tanto la reacción como la resistencia al fuego de los materiales a estudiar. Para el caso de los materiales indicados anteriormente, el tipo de ensayo que había que realizar era el de resistencia al fuego, ya que todos ellos tenían un comportamiento como inertes, es decir, que no ardían. Por el

contrario en los ensayos de resistencia al fuego, se pretende evaluar el comportamiento frente al fuego de los elementos empleados en el ámbito de la construcción de los elementos estructurales, valorando para ello el tiempo que un elemento seguiría cumpliendo la función para la que estaba destinado cuando se desarrolla un incendio. Dado que los elementos estructurales a ensayar suelen tener dimensiones importantes, los hornos para realizar los ensayos de fuego bajo norma, también lo suelen tener, por lo que habitualmente se realiza en centros específicos de fuego que tiene la correspondiente acreditación y en donde se realizan pruebas discretas de resistencia de los elementos estructurales tanto cargados como sin cargar.

El objetivo del proyecto coordinado que se concibió, giraba bajo la premisa de poder disponer información del comportamiento de materiales estructurales frente a un fuego normalizado, sin necesidad de someter a ensayo la correspondiente estructura, para lo que se consideró de interés diseñar, construir y poner en marcha un horno piloto que operase bajo norma y que representara una parte específica reducida tanto del elemento como del horno, en donde se tuviera información suficiente del comportamiento de los materiales bajo ensayo de fuego. A tal efecto fue necesario diseñar, construir y operar sendos hornos piloto que operasen bajo norma cuando se consideraba fuego sobre una de las superficies y fuego envolvente.

En los ensayos de fuego realizados se obtuvieron los correspondientes registros de temperatura tiempo tanto de la atmosfera del horno como para diferentes posiciones de las probetas ensayadas, considerando siempre las superficies caliente y fría, deduciendo en cada situación los correspondientes diagramas de los gradientes de las temperaturas en cada material ensayado. Con esta información se elaboró conjuntamente con la Sección Departamental de Matemáticas de la Facultad de Ciencias Químicas un programa de cálculo para resolver la ecuación de transporte de calor en los materiales ensayados por medio de incrementos finitos, que permitiera evaluar las diferentes condiciones de contorno del supuesto estudiado para validar y/o mejorar tanto las propiedades de transporte de calor como las propiedades que se aportan en las Euronormas para deducir los perfiles de temperatura y estimar la resistencia de los materiales frente al campo de temperatura. Para ello, fue necesario introducir los gradientes de temperatura experimentales obtenidos y hacer que el conjunto resultante tuviera un error estadístico medio lo menor posible.

A partir de las muestras de los materiales ensayados, se procedió a la realización de los correspondientes ensayos de caracterización estructural y mecánica con objeto de informar de las respuestas de los materiales ensayados bajo prueba de fuego normalizado uno a uno, así como en estructura en capas cuando se ensayaron los aceros al carbono junto a materiales aislantes.

Todos los materiales que se utilizaron fueron comerciales y para el caso de los aceros, se eligió una partida de material correspondiente a la misma colada continua. Por ello, se estimó de interés hacer estudios complementarios para evaluar la caracterización mecánica y estructural de los mismos tanto a temperatura ambiente como a temperatura elevada, y poder tener en cada caso una referencia directa de las respuestas de los aceros bajo ensayo de fuego. Con objeto de poder evaluar la respuesta de la resistencia de los aceros a temperaturas elevadas, se realizaron los correspondientes ensayos de tracción isotérmicos a diferentes niveles de temperatura, junto con el estudio de la evolución de las correspondientes estructuras de los aceros. Finalmente se ha de indicar que en el caso de los aceros, se realizaron ensayos de fuego sin cargar y cargados llegando en muchos casos hasta rotura de los mismos.

Dicho lo anterior, ha constituido objetivo principal de la presente investigación el diseño, la construcción y la puesta en operación de dos hornos piloto para la realización de los ensayos de fuego de diferentes materiales operando bajo las curvas de temperatura tiempo normalizadas tanto para fuego exterior como para fuego estándar, teniendo en cuenta la situación de fuego envolvente y de fuego más habitual por una sola cara, de forma que permitiera reproducir un elemento de volumen correspondiente a una parte representativa de un elemento estructural cuando se le somete a una prueba de resistencia de fuego, pudiendo estar este cargado o no.

A partir de los ensayos de fuego realizados en dichos hornos, se han deducido diferentes consideraciones que constituyen también objetivos del presente trabajo.

- ❖ El comportamiento de los aceros al carbono S355 y S460 bajo la acción de fuego normalizado.
- ❖ El comportamiento de diferentes morteros portland y aluminoso bajo la acción de fuego normalizado.
- ❖ El comportamiento de diferentes materiales aislantes y de escudos de radiación bajo la acción de fuego normalizado.

- ❖ El comportamiento de los aceros junto a materiales aislantes y morteros bajo la acción de fuego normalizado
- ❖ El comportamiento de los aceros cargados bajo la acción de fuego normalizado, llegando en ocasiones hasta rotura.
- ❖ La consecución de propiedades y coeficientes térmicos de los materiales fiables que permitan la predicción de los perfiles y los gradientes de temperatura en los materiales sometidos a prueba de fuego.

**CONSIDERACIONES PREVIAS. ASPECTOS DE INTERÉS
RELACIONADOS CON EL FUEGO Y LOS MATERIALES**

Capítulo II. Consideraciones previas. Aspectos de interés relacionados con el fuego y los materiales.

1. Introducción

A lo largo de los años, debido a incendios importantes ocurridos en túneles [2.1] y estructuras (Canal de la Mancha en Francia-Inglaterra en 1996, Edificio Windsor en España en 2005...), ha quedado demostrado que el fuego es un fenómeno extremadamente complejo y representa una de las situaciones más severas con las que se puede encontrar una estructura. Además en las últimas décadas, las modificaciones en los sistemas constructivos, como la incorporación de vidrieras, o materiales de construcción combustibles, hacen que se introduzcan riesgos que anteriormente no existían. Por ello el nivel de los estudios relacionados se ha incrementado considerablemente en la últimas décadas, tanto en la mejora en los materiales de construcción, como en la publicación de requisitos para la Seguridad en caso de Incendios, exigidos a nivel nacional o internacional por estándares, como por ejemplo por el Código técnico de la Edificación [2.2].

Las diferentes normas europeas sobre incendios en túneles coinciden en aceptar que la evolución de la temperatura con el tiempo, difiere notablemente en un incendio en el interior de un túnel de la que puede ocurrir en un edificio sobre rasante. En éste último caso, los estudios de evolución de la temperatura han llevado a implantar internacionalmente un modelo matemático reproducible en laboratorio denominado *Curva de Fuego Estándar*, está definido por la Norma internacional ISO 834, además de otros modelos que en el capítulo de fuego se desarrollarán. Sin embargo, en el caso de incendios en túneles, no se ha llegado a un grado de consenso semejante, por lo que cada país ha desarrollado diferentes modelos de *Curva de Fuego*, de acuerdo a sus propias experiencias y peculiaridades [2.3].

Los materiales estructurales por excelencia son el hormigón y el acero y como tal, son el foco de la mayoría de los estudios en los que se ve implicado un incendio. El comportamiento de los materiales estructurales frente a la acción del fuego implica que han de satisfacer unas necesidades, tal y como quedan recogidas en la normativa correspondiente, [2.4, 2.5] y que se resumirán a continuación.

En el caso de los incendios como es norma habitual hay que considerar dos tipos de acciones sobre los materiales estructurales como son, la reacción a la temperatura y el comportamiento mecánico, con objeto de que los materiales presenten un comportamiento seguro durante el tiempo en el que ocurre dicho fuego [2.6]. Resumiendo, los materiales han de satisfacer, cuando están expuestos a la acción del fuego [2.7, 2.8], un criterio de aislamiento térmico por el que el elemento estructural evita un exceso de la transmisión de calor; el criterio de integridad, por el que se previene el paso de las llamas y de los gases calientes; y finalmente el criterio de resistencia, por el que se asegura la capacidad de la estructura para soportar cargas durante la acción del fuego [2.9]. Dependiendo de las funciones del elemento estructural se le va a requerir el cumplimiento de unos criterios u otros para asegurar la resistencia al fuego.

2. Fuego. Generalidades

Un fuego real en un edificio o en una instalación industrial, varía según el balance de materia y de energía dentro del local en donde se produce. La energía que se desprende depende de la cantidad, del tipo de combustible y de las condiciones de ventilación presentes. Es usual definir tres fases en el comportamiento de todo incendio que son, la de crecimiento, la de desarrollo máximo y por último la del cese del incendio. El aumento más rápido de la temperatura se produce en un periodo posterior al punto de inflamación, punto en el que todos los materiales se queman espontáneamente, ver Figura 2. 1.

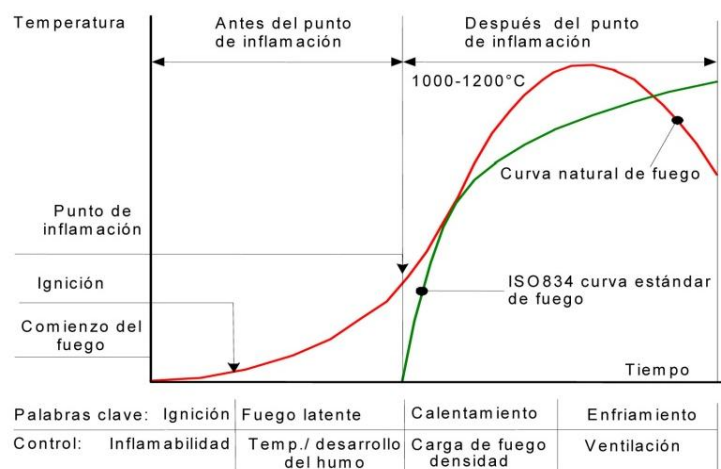


Figura 2. 1. Fases de un fuego natural comparando las temperaturas de un fuego natural con las de la curva estándar de fuego ISO 834.

La fase inicial se limita a un foco, en esta fase la temperatura ambiente crece gradualmente. En la segunda fase se ve envuelto la mayoría del material combustible y la temperatura sube de manera acentuada. En la fase de extinción el material combustible se ha consumido prácticamente y la temperatura entra en descenso.

La resistencia al fuego de los materiales de acuerdo con la norma [2.10], se basa en una prueba de comportamiento frente al calor según una curva acordada internacionalmente de temperatura-tiempo, definida en la norma ISO 834, que no representa ningún tipo de fuego natural. La norma ISO aceptada internacionalmente es una curva de elevación de la temperatura en un horno de ensayo [2.11]. Esta curva existe desde el año 1903, fue adoptada en 1918 por la American Society for Testing Materials (ASTM) y posteriormente fue incorporada en las normas de ensayo a nivel europeo. Presenta una subida de temperaturas bastante rápida al principio, fenómeno que se produce efectivamente en el momento de una deflagración. La finalidad de esta curva no fue la de reproducir las condiciones reales de un incendio cualquiera, sino la de permitir una comparación del comportamiento frente al fuego de los diferentes materiales estructurales y poder establecer una clasificación relativa con relación a un fuego de referencia fácilmente reproducible en el laboratorio [2.12].

Esta curva ha sido estandarizada [2.5, 2.13] y tiene la forma que se indica en la ecuación (2.1), en donde la temperatura se expresa en grados centígrados y el tiempo en minutos, se acepta que la temperatura ambiente sea igual a 20 °C. Es logarítmica e infinitamente creciente, lo que permite en primer lugar alcanzar el colapso de los materiales. Es habitual indicar por tanto que un elemento estructural fallará después de un cierto periodo de tiempo, así R20 significa que un material estructural, puede soportar carga cuando se calienta por un tiempo no superior a 20 minutos según el fuego ISO estándar.

$$T = 20 + 345 \log (8t + 1) \quad (2.1)$$

Existen otros tipos [2.4] de curvas que se usarán según el tipo de fuego que intervenga para cada situación a considerar. Así se tiene la curva de fuego por hidrocarburos [2.5, 2.13] que se emplea cuando la carga de fuego es muy importante y en las plantas industriales, presenta una elevación muy rápida de la temperatura alcanzando un valor asintótico de 1100 °C en 20 minutos, su expresión matemática se recoge en la ecuación (2.2). Finalmente está la curva de fuego exterior que presenta una

variación para tiempos inferiores a 60 segundos coincidentes con la curva ISO, permaneciendo prácticamente constante alrededor de los 680 °C, [2.5, 2.13]; la expresión matemática para este tipo de fuego es la ecuación (2.3). En la Figura 2. 2 se presenta una comparativa de las diferentes curvas de fuego frente a una curva de fuego paramétrica.

$$T = 1080(1 - 0.325e^{-0.167t} - 0.675e^{-2.5t}) + 20 \quad (2. 2)$$

$$T = 660(1 - 0.687e^{-0.32t} - 0.313e^{-3.8t}) + 20 \quad (2. 3)$$

En estas expresiones también la temperatura se ve expresada en grados centígrados y el tiempo en minutos.

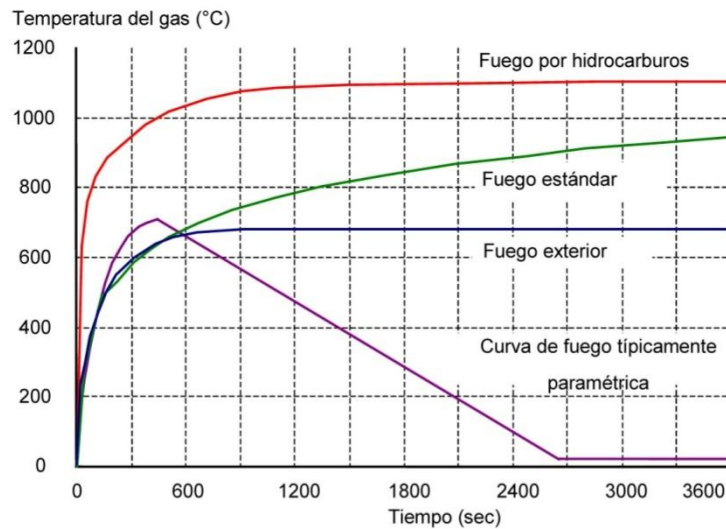


Figura 2. 2. Curvas de fuego nominales comparadas con un fuego paramétrico.

Un método alternativo al empleo de curvas nominales de fuego, es la utilización de curvas de fuego paramétricas [2.14], que intentan modelar un fuego natural mediante diferentes parámetros como son: las propiedades térmicas de los materiales, la densidad de carga del combustible y las salidas de ventilación tanto en paredes como en tejados. Como puede verse en la Figura 2. 2 las curvas paramétricas tiene un comportamiento parecido a la curva ISO para tiempos pequeños, alcanzan un valor de la temperatura máxima que es superior a la curva estándar y a partir de este instante la temperatura decrece con el tiempo. Los modelos de fuego paramétrico se basan en la hipótesis de que la temperatura del compartimento del incendio es uniforme, por lo que se limita su aplicación a áreas de hasta 100 m² sin huecos en el techo y una altura máxima de 4 metros, para la localización de la carga de fuego. Estas curvas paramétricas se

emplean cuando la densidad de los materiales combustibles es baja, y cuando el uso de las curvas de fuego aporta resultados conservadores.

En las Figura 2. 3 y Figura 2. 4, se recogen las curvas paramétricas de fuego, temperatura-tiempo, teniendo en cuenta el factor de ventilación y la carga de fuego para una superficie de ventilación de $0,1 \text{ m}^2$, una inercia térmica de $1000 \text{ J/m}^2\text{s}^{0,5} \text{ K}$, una superficie de suelo de 100 m^2 y un área total de paredes de 300 m^2 , [2.15].

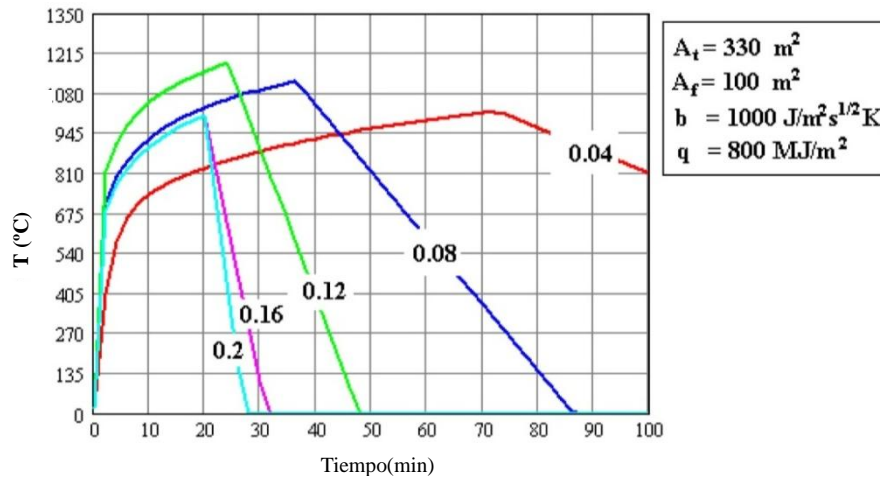


Figura 2. 3. Curva paramétrica tiempo-temperatura considerando el efecto de ventilación.

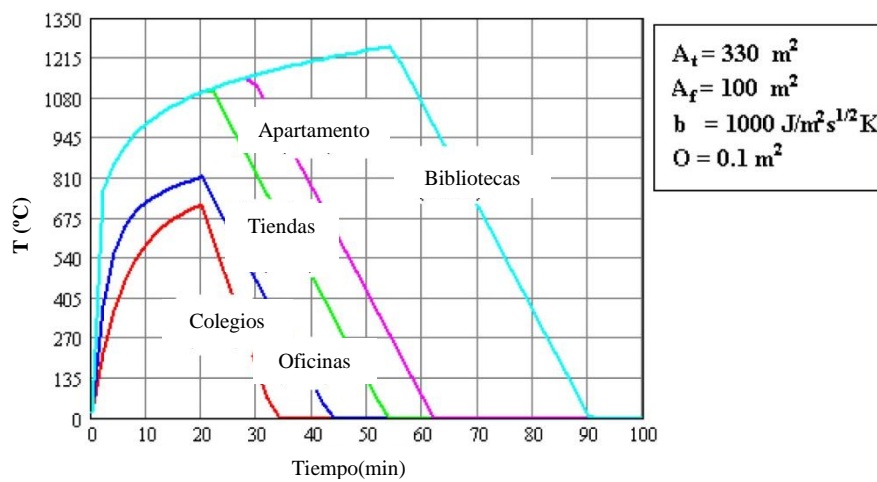


Figura 2. 4. Curva paramétrica tiempo-temperatura considerando los efectos de la carga de fuego.

El Modelo y Simulación Computacional de Incendios (MSCI) [2.16], aplicando modelos multi-zonas o herramientas de fluido-dinámica computacional (CFD) [2.17], constituye la técnica más avanzada para la determinación de la agresión térmica sobre los elementos componentes de una estructura durante un incendio.

Un Modelo de Zona es una herramienta computacional que tiene como propósito predecir los resultados de una combustión dentro de un volumen cerrado, ver Figura 2. 5. Para ello se descompone el volumen en varias zonas características: una zona superior en la cual se encontrarían los gases calientes producidos por la combustión y otra zona inferior, la cual es la fuente de aire para la combustión y que es normalmente donde se desarrolla el incendio.

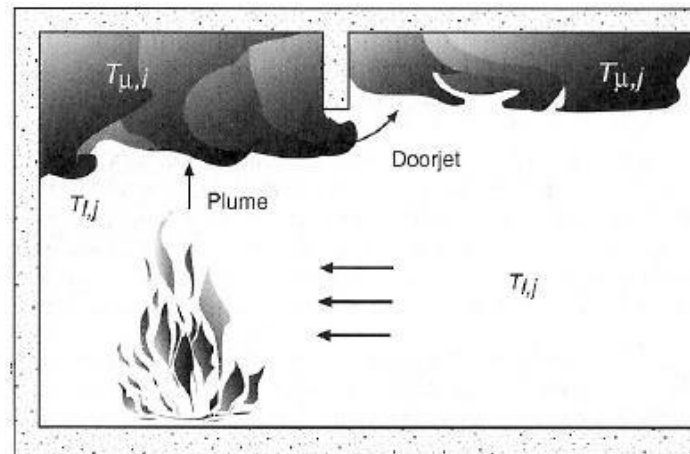


Figura 2. 5. Los modelos de zona dividen la geometría en las zonas las representadas en el dibujo: Zona superior, Zona inferior y penacho del incendio. (Fuente: NFPA Fire Protection Handbook, ed. 2003, [2.18]).

Por último habrá una tercera zona que se corresponderá con el penacho del incendio, donde se producen las reacciones de inflamación de los gases, humos y llamas. A lo largo del transcurso de la combustión, la zona superior puede expandirse hasta ocupar prácticamente todo el espacio de la habitación.

Algunos modelos evalúan las condiciones de la capa inferior, mientras otros asumen que se mantiene en las condiciones ambientales. La masa se conserva, contando la masa que entra o sale del volumen de control. Además, se asumen que las condiciones de temperatura, presión y densidad son uniformes para cada zona. La suma de las zonas debe dar como resultado el volumen total que se estudia y se resuelven las leyes de conservación necesarias dentro de cada zona. El volumen puede no estar totalmente cerrado, y a tal efecto, se pueden simular la presencia de puertas, ventanas, etc.

El uso de los modelos CFD, son la técnica más avanzada y sofisticada para el modelado del crecimiento y evolución de un incendio. Permite describir el desarrollo de

un fuego en geometrías complejas y poder incorporar una gran variedad de fenómenos físicos.

Los modelos típicos de CFD [2.15] analizan sistemas que incluyen movimiento de flujos, transferencia térmica y fenómenos de transporte asociados mediante la resolución de las ecuaciones fundamentales de conservación de la física:

- Leyes de Conservación de la masa.
- Segunda Ley de Newton.
- Primera ley de la Termodinámica.

Un modelo CFD básicamente resuelve las ecuaciones diferenciales parciales de la termodinámica y la aerodinámica (ecuaciones de Navier-Stokes) con bajo número de Match, para un gran número de puntos dentro del dominio computacional, lo cual lo hace apropiado para flujos lentos, guiados térmicamente, con énfasis en el movimiento de los humos y el transporte de la energía dentro del recinto del incendio.

Aunque mediante estos modelos es posible reproducir la evolución del incendio dentro del recinto con un gran lujo de detalles, posibilitando obtener variables del comportamiento en numerosos puntos del dominio computacional (temperaturas, velocidades de flujo, concentración de especies químicas, etc.), la entrada de datos a los modelos requiere numerosos parámetros, lo cual lo vuelve una tarea muy exigente y se requiere el criterio de expertos en la definición de los mismos y en la evaluación y la factibilidad de uso de los resultados.

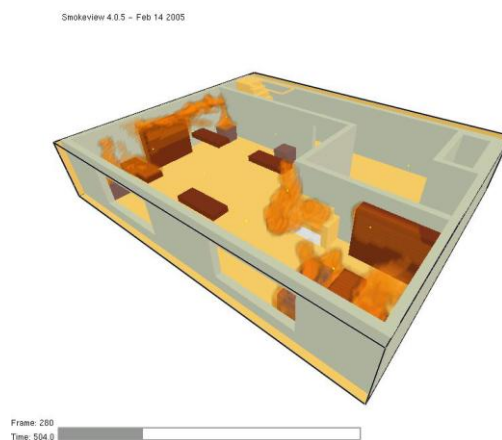


Figura 2. 6. Simulación computacional del crecimiento del incendio con un Modelo de Campo, recinto de oficinas, (fuente: Archivo GIDAI).

3. Fundamentos del acero y tratamiento térmico

Las aplicaciones científicas e industriales de los metales y aleaciones se determinan a partir de las propiedades de los mismos. Estas propiedades pueden verse alteradas mediante tratamientos termo-mecánicos, por variaciones controladas del tamaño de grano, usando aleantes o sometidos a temperatura. Estos tratamientos térmicos hacen variar las propiedades mecánicas ya sea debido a una transformación alotrópica o por un cambio de la solubilidad relativa de los elementos del metal base. A continuación discutiremos los fundamentos del acero y de los tratamientos térmicos usados para el control del tamaño de grano.

El acero es básicamente una aleación de hierro y carbono, pero hay una gran cantidad de elementos que se añaden en distintas proporciones que hacen que el acero sea la aleación más importante y versátil en la industria. Existen tres fases que forman parte de todos los aceros, ferrita, cementita y austenita y que forman muchas estructuras según los tratamientos térmicos. En general la resistencia del acero depende de su naturaleza y de la distribución y el tamaño de grano de las fases involucradas.

Dichos tratamientos térmicos forman parte de una gran cantidad de procesos metalúrgicos que usan las industrias para generar aceros enfocados a diversas aplicaciones. Esto conlleva a que se tenga mucho cuidado al elegir las temperaturas de calentamiento y enfriamiento, las velocidades de las mismas y la aplicación o no de tensiones externas. Con los tratamientos termo-mecánicos (endurecimiento, recocido, normalizado, temple...) se modifican las propiedades de los aceros como por ejemplo endurecer el material mediante un calentamiento y posterior enfriamiento rápido (temple), o con un enfriamiento lento para reducir la dureza y aliviar las tensiones residuales internas...

Esta característica del acero, proviene como se ha indicado anteriormente, de la gran variedad de microestructuras que resultan de los tratamientos térmicos, mecánicos y combinación de éstos, a parte de la naturaleza alotrópica del hierro y del tamaño de los átomos de carbono en relación con los del hierro. Todo ello en conjunto hace que el acero tenga infinitas aplicaciones en la industria.

3.1. Metalurgia del acero

El hierro como tal, tiene una aplicación industrial muy limitada, sin embargo, el acero como aleación de hierro y carbono junto con pequeñas cantidades de otros elementos, es la aleación más usada y más versátil de la industria.

El hierro como elemento, tiene dos formas cristalinas distintas según la temperatura, cúbica centrada en el cuerpo (bcc, según las siglas en inglés) y cúbica centrada en las caras (fcc). En el intervalo entre los 1535° y 1390 °C, el hierro tiene la red cristalina "cúbica centrada en el cuerpo", con sus distancias interatómicas iguales a 2,93°A (ángstrom, 1 °A =10⁻⁸ cm), y se denomina hierro δ (Fe δ). A los 1390 °C, se realiza la reestructuración de la red cúbica centrada en el cuerpo, en la red "cúbica centrada en las caras" (cristalización secundaria), con sus parámetros más grandes e iguales a 3,65 ángstrom, llamado hierro γ (Fe γ). En el intervalo entre 1390° y 910 °C, el hierro se encuentra en dicha forma alotrópica. A la temperatura de 910 °C, la red cúbica centrada en las caras Fe, se transforma en la red cúbica centrada en el cuerpo Fe β con el parámetro de red menor que las otras dos e igual a 2,90 °A; esto nos da a entender que el hierro, al igual que todas las sustancias, al enfriarse se contrae. A la temperatura de 768 °C, la red del hierro es cúbica centrada en el cuerpo, pero con su parámetro de red aún más pequeño, 2,88°A, denominado hierro α (Fe α), [2.19].

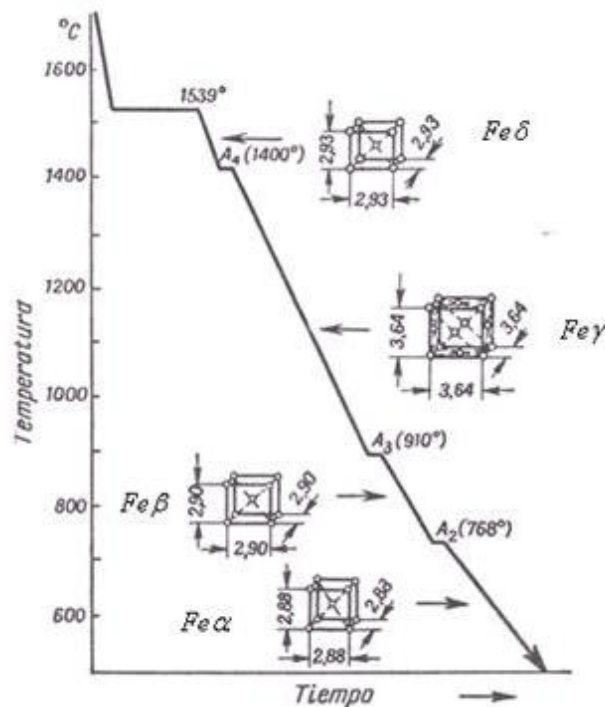


Figura 2. 7. Formas alotrópicas del hierro puro.

3.1.1. Aleaciones

Como solución sólida

Una aleación es una solución sólida, cuando los átomos del elemento soluto se introducen en la red cristalina del elemento disolvente sin modificar su forma. Se tiene dos tipos de soluciones sólidas: Las *soluciones sólidas de sustitución*, que son aquellas en las que los átomos del elemento disuelto (soluto) ocupan los nudos de los átomos del elemento disolvente en su red cristalina, sin modificarla, siendo ambos casi del mismo tamaño, y las *soluciones sólidas intersticiales* las cuales son aquellas en las que los átomos del elemento soluto se sitúan en los intersticios, entre los átomos del elemento disolvente, siendo el tamaño de los átomos del elemento disuelto aproximadamente de la mitad del tamaño de los átomos de este último, Figura 2. 8. Las aleaciones hierro carbono se presentan siempre como soluciones sólidas intersticiales, y ellas son la *Ferrita* que es hierro α , con carbono intersticial y la *Austenita*, que es hierro γ , con carbono intersticial.

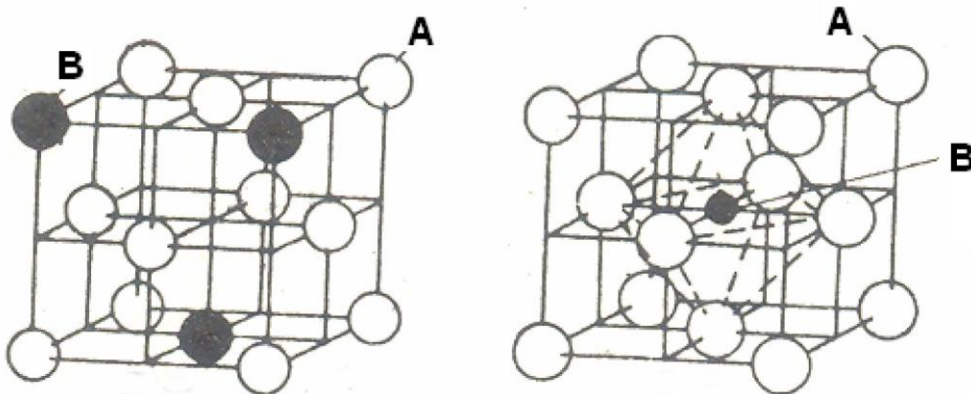


Figura 2. 8. Soluciones sólidas: (a) de sustitución y (b) intersticial

Como compuestos químicos

La particularidad característica de un compuesto químico es la formación de una red cristalina distinta a las de los elementos constituyentes y la modificación notable de todas las propiedades. En el caso de las aleaciones hierro carbono, el compuesto químico que se forma es la *Cementita o Carburo de Hierro*; fórmula química Fe_3C , la cual se presenta cuando la concentración del carbono en el hierro es de 6,67%.

Como mezclas mecánicas

Si los elementos que entran en la composición de la aleación no se disuelven el uno en el otro en estado sólido, y no reaccionan químicamente dando lugar a la formación de un compuesto químico, entonces dichos elementos forman mezclas mecánicas. En este caso, los átomos de cada elemento forman redes cristalinas separadas y por lo tanto granos separados y las propiedades de la aleación resultan intermedias entre las de los elementos que la constituyen; de tal manera que si se tiene más abundancia de un elemento que de otro, las propiedades de la aleación se parecen más a las del elemento más abundante y viceversa. Las mezclas mecánicas que se forman en las aleaciones hierro-carbono son: la *perlita* y la *ledeburita*; la perlita se forma durante el enfriamiento lento a partir de la austenita a la temperatura constante de 727 °C; ya en estado sólido, en el área de los aceros, denominándose estos como aceros eutectoides cuando el contenido de carbono es de 0,8%, el grano de perlita está constituido por una estratificación alternada de ferrita y cementita.

3.2. Efectos del carbono sobre el hierro

El carbono es casi insoluble en el hierro cuando está en la fase alfa (ferrita), sin embargo es bastante soluble en la fase gamma (austenita). Esta solubilidad depende de la temperatura. El diámetro atómico del carbono es menor que los intersticios entre los átomos de hierro y por lo tanto formará una solución sólida con el hierro, distorsionando su red. Cuando el carbono excede del 0,025% tiene dos efectos importantes:

- Disminuye el valor de las temperaturas de transformación
- Y amplía el rango de temperatura de la transformación.

3.3. Diagrama de fases hierro-carbono

El diagrama de fases de hierro-carbono se presenta en la Figura 2. 9. Según el diagrama de fases hay tres tipos de aceros:

- Hipoeutectoides, aceros con contenido en carbón desde el punto eutectoide hacia la izquierda.

- Hipereutectoides, aceros con contenido en carbono del punto eutectoide hacia la derecha
- Eutectoides, aceros con un contenido en carbono del 0,8%

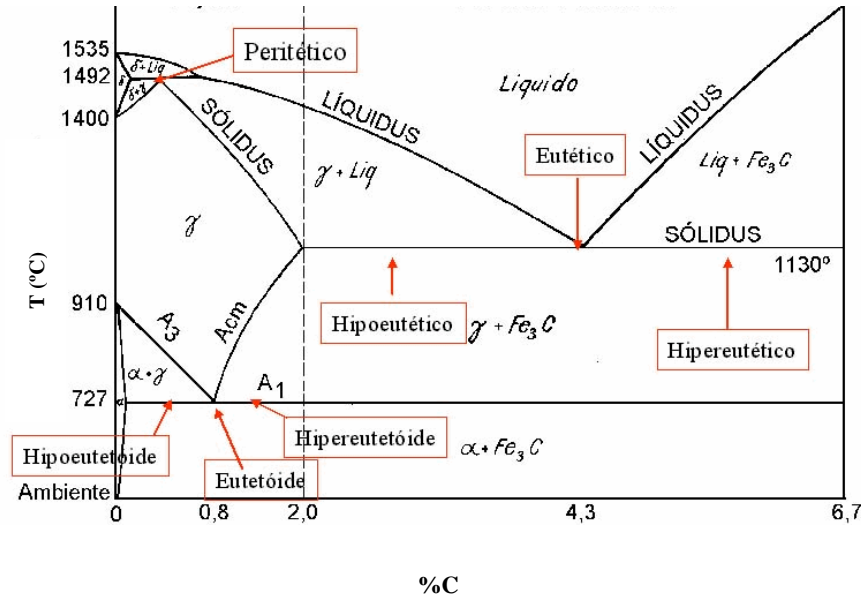


Figura 2. 9. Diagrama de fases Fe-C.

4. El acero al carbono como material estructural

A lo largo de la segunda mitad del siglo pasado y en lo que va del presente siglo, el acero al carbono ha tomado plena carta de naturaleza tanto en obra civil como en obra industrial, y todo ello debido a sus magníficas propiedades mecánicas a temperatura ambiente [2.20]. No ocurre así cuando el acero se encuentra a temperatura elevada, circunstancia que se presenta cuando se produce un fuego en dichas instalaciones.

La norma UNE-EN-10025-3 [2.21], hace referencia a productos laminados en caliente para construcciones metálicas. Aceros soldables de grano fino que se suministran en estado normalizado o laminado de normalización. Los aceros a los que hace referencia esta norma, no sólo son importantes las propiedades de resistencia a la tracción y la tenacidad, sino que también presentan una buena soldabilidad obtenida a partir de un reducido nivel de carbono equivalente. Mediante el proceso de normalizado se afina y homogeneiza la estructura del acero calentando a unos 900 °C y dejándolo enfriar lentamente, obteniéndose en este proceso aceros de mayor dureza.

Los grados y las calidades de los aceros que se emplean para la construcción son los que se designan como S275, S355, S420, S460. Los dos primeros, de acuerdo con la norma se clasifican como aceros de calidad no aleados y los dos últimos como aceros especiales aleados. El número que aparece en la denominación de los aceros indica el valor mínimo especificado del límite elástico en megapascales (MPa) para el menor intervalo de espesor, la letra N se refiere a normalizado o laminado de normalización y la letra L se refiere a baja temperatura. Los grados, las calidades, la composición química y las propiedades mecánicas de estos aceros se recogen en las Tabla 2. 1, 2.2, 2.3 y 2.4, [2.22]. La diferencia entre los aceros N y NL radica en la tenacidad ya que la temperatura de transición Charpy exigida es de -20 °C para el N (tenacidad media) y de -50 °C para el NL (tenacidad alta).

Tabla 2. 1. Composición química del análisis del producto para aceros normalizados.

Designación según		C % máx	Si % máx	Mn %	P % máx a	S % máx a, b	Nb % máx	V % máx	Al ^{total} Min c	Ti % máx	Cr % máx	Ni % máx	Mo % máx	Cu % máx d	N % máx
UNE EN 10027-1 y CR 10260	UNE EN 10027-2														
S275N	1.0490	0,20	0,45	0,45 - 1,60	0,035	0,030	0,06	0,07	0,15	0,06	0,35	0,35	0,13	0,60	0,017
S275NL	1.0491	0,18	0,45	0,45 - 1,60	0,030	0,025	0,06	0,07	0,15	0,06	0,35	0,35	0,13	0,60	0,017
S355N	1.0545	0,22	0,55	0,85 - 1,75	0,035	0,030	0,06	0,14	0,15	0,06	0,35	0,55	0,13	0,60	0,017
S355NL	1.0546	0,20	0,55	0,85 - 1,75	0,030	0,025	0,06	0,14	0,15	0,06	0,35	0,55	0,13	0,60	0,017
S420N	1.8902	0,22	0,65	0,95 - 1,80	0,035	0,030	0,06	0,22	0,15	0,06	0,35	0,85	0,13	0,60	0,027
S420NL	1.8912	0,22	0,65	0,95 - 1,80	0,030	0,025	0,06	0,22	0,15	0,06	0,35	0,85	0,13	0,60	0,027
S460N ^e	1.8901 ^e	0,22	0,65	0,95 - 1,80	0,035	0,030	0,06	0,22	0,15	0,06	0,35	0,85	0,13	0,60	0,027
S460NL ^e	1.8903 ^e	0,22	0,65	0,95 - 1,80	0,030	0,025	0,06	0,22	0,15	0,06	0,35	0,85	0,13	0,60	0,027

- a Para productos largos, el contenido en P y S puede ser un 0,005% superior
b Para aplicaciones ferroviarias, se puede acordar un contenido máximo de azufre de 0,012% en el pedido. Ver opción 32
c Si existen suficientes elementos fijadores de nitrógeno, no se aplica la limitación del Al total.
d Contenidos de Cu por encima de 0,45% pueden producir fragilidad durante el conformado en caliente.
e $V + Nb + Ti \leq 0,26\%$ y $Mo + Cr \leq 0,38\%$

Tabla 2. 2. Propiedades mecánicas a temperatura ambiente para aceros normalizados.

Designación según		Límite elástico de cedencia R_{eH} ^a , en MPa para un espesor nominal del producto, en mm								Resistencia a la tracción R_m ^a , en MPa para un espesor nominal de producto, en mm			Porcentaje de alargamiento mínimo Tras la fractura, en % $L_g = 5,65\sqrt{S_0}$ Espesor nominal en mm					
EN 10027-1 y CR 10260	EN 10027-2	≤ 16	> 16 ≤ 40	> 40 ≤ 63	> 63 ≤ 80	> 80 ≤ 100	> 100 ≤ 150	> 150 ≤ 200	> 200 ≤ 250	≤ 100	> 100 ≤ 200	> 200 ≤ 250	≤ 16	> 16 ≤ 40	> 40 ≤ 63	> 63 ≤ 80	> 80 ≤ 200	> 200 ≤ 250
S275N S275NL	1.0490 1.0491	275	265	255	245	235	225	215	205	370 a 510	350 a 480	350 a 480	24	24	24	23	23	23
S355N S355NL	1.0545 1.0546	355	345	335	325	315	295	285	275	470 a 630	450 a 600	450 a 600	22	22	22	21	21	21
S420N S420NL	1.8902 1.8912	420	400	390	370	360	340	330	320	520 a 680	500 a 650	500 a 650	19	19	19	18	18	18
S460N S460NL	1.8901 1.8903	460	440	430	410	400	380	370	-	540 a 720	530 a 710	-	17	17	17	17	17	-

- a Para chapas, bandas y planos de anchura ≥ 600 mm, aplica a la dirección perpendicular "t" a la de laminación. Para cualquier otro producto los valores aplican para la dirección paralela "l", a la de laminación.
b 1 MPa = 1 N/mm²

Tabla 2. 3. Valores mínimos de la energía de rotura por flexión por choque sobre probetas longitudinales con entalladura en V para acero en estado normalizado.

Designación según		Valores mínimos de energía de rotura, en J, a la temperatura de ensayo, °C						
UNE EN 10027-1 y CR 10260	UNE EN 10027-2	- 20	0	- 10	- 20	- 30	- 40	- 50
S275N S355N S420N S460N	1.0490 1.0545 1.8902 1.8901	55	47	43	40 ^a	-	-	-
S275NL S355NL S420NL S460NL	1.0491 1.0546 1.8912 1.8903	63	55	51	47	40	31	27

a Este valor corresponde a 27J a -30°C (ver Eurocódigo 3)

Tabla 2. 4. Valores mínimos de la energía de rotura por flexión por choque sobre probetas transversales con entalladura en V para acero en estado normalizado, cuando el ensayo por choque en probetas transversales haya sido acordado en el momento de hacer el pedido.

Designación según		Valores mínimos de energía de rotura, en J, a la temperatura de ensayo, °C						
UNE EN 10027-1 y CR 10260	UNE EN 10027-2	- 20	0	- 10	- 20	- 30	- 40	- 50
S275N S355N S420N S460N	1.0490 1.0545 1.8902 1.8901	31	27	24	20	-	-	-
S275NL S355NL S420NL S460NL	1.0491 1.0546 1.8912 1.8903	40	34	30	27	23	20	16

Vemos que el grado de estos aceros se designa por N cuando se suministran con un valor mínimo especificado de energía de flexión por choque a temperaturas superiores o iguales a -20°C; y NL a temperaturas superiores o iguales a -50°C

Dentro de los aceros estructurales, la norma europea EN-1993-1-1 [2.23], se recogen los valores de las propiedades mecánicas de dichos aceros a temperatura ambiente.

Por otro lado en la norma europea EN-1993-1-2 [2.10], hay un apartado que hace referencia a la variación de las propiedades mecánicas con la temperatura, agrupándose como factores de reducción de la resistencia, el límite elástico y el módulo de elasticidad tal como se recoge en la Tabla 2. 5. Dichos factores [2.24] también se visualizan en la Figura 2. 10 en la que se puede apreciar como hasta los 400 °C la resistencia de los aceros prácticamente se mantiene constante. Entre 400° y 600 °C se produce una merma o reducción de la resistencia que puede ser superior al 50%, [2.25].

Tabla 2. 5. Factores de reducción para la relación tensión-deformación del acero a elevada temperatura.

Tª acero(°C)	Factores de reducción a una temperatura relativa de 20°C		
	Para rendimiento efectivo de resistencia $k_{y,\theta} = f_{y,\theta} / f_y$	Para limite proporcional $k_{p,\theta} = f_{p,\theta} / f_y$	Para la pendiente en un rango lineal elástico $k_{E,\theta} = E_{a,\theta} / E_a$
20	1,000	1,000	1,000
100	1,000	1,000	1,000
200	1,000	0,807	0,900
300	1,000	0,613	0,800
400	1,000	0,420	0,700
500	0,780	0,360	0,600
600	0,470	0,180	0,310
700	0,230	0,075	0,130
800	0,110	0,050	0,090
900	0,060	0,0375	0,0675
1000	0,040	0,025	0,045
1100	0,020	0,0125	0,0225
1200	0,000	0,000	0,000

Nota: Para valores intermedios de la temperatura del acero se puede usar una interpolación lineal

¿Cómo ha de evaluarse la resistencia de los acero bajo la acción del fuego?

Según los Eurocódigos, son varios los métodos simples de cálculo que pueden utilizarse para evaluar la resistencia al fuego de las estructuras en situación de incendio. Uno de ellos es la temperatura crítica, que se aplica fundamentalmente en el análisis de los elementos estructurales de acero. La temperatura crítica se calcula teniendo en cuenta las acciones mecánicas aplicadas, la resistencia de cálculo a temperatura normal

y la pérdida de resistencia del acero a temperaturas elevadas. Esta temperatura crítica normalmente varía entre 500° y 800 °C. Se puede calcular siguiendo las sencillas expresiones que se dan en la norma EN- 1993-1-2 [2.5]. De conformidad con el método de la temperatura crítica, transcurrido un tiempo determinado se satisface la resistencia al fuego de un elemento de acero, si la temperatura del acero no supera la temperatura crítica del elemento estructural. De otra parte el código ASME [2.26], da valores ponderados de la temperatura crítica que son de 538 °C para aceros estructurales y 593 °C para aceros reforzados.

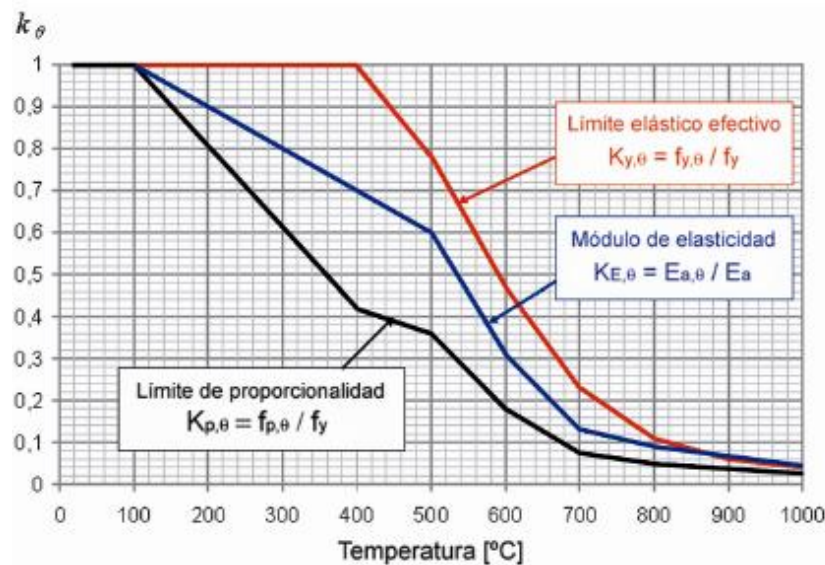


Figura 2. 10. Factores de reducción para la relación tensión-deformación del acero a elevada temperatura.

Por otra parte A. Valiente y colaboradores [2.27], han realizado un estudio de la ductilidad a temperatura elevada de los aceros estructurales tipo, S275, S460, habiendo realizado ensayos de tracción [2.28, 2.29] para esos materiales a 300° y 500 °C en régimen isotérmico [2.30]. En la Figura 2. 11 se recogen los registros de los ensayos para el acero S460NL y S460N, en ambas figuras se puede observar una pérdida de la resistencia mecánica de los aceros al aumentar la temperatura, poniendo de manifiesto que la rotura de ambos aceros se produjo dúctilmente cosa que no ocurrió con el S275. También se analiza la disminución del límite elástico, de modo que dicha disminución lo hace bruscamente para el caso de los aceros tipo 460.

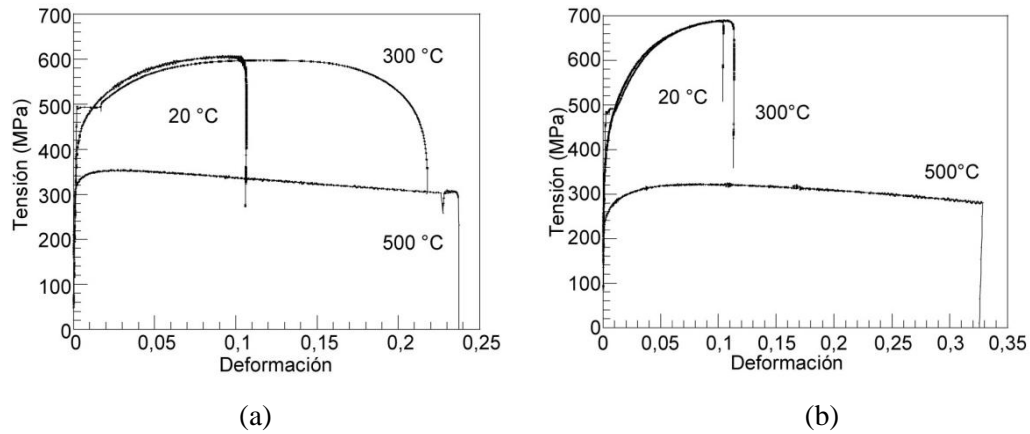


Figura 2. 11. Curvas tensión-deformación del acero S460NL (a) y S460N (b), a las temperaturas de ensayo.

De dicho estudio y de los resultados obtenidos se pone de manifiesto el comportamiento dúctil de los aceros tipos 460 a la temperatura de 500 °C, mientras que se tiene un comportamiento frágil para el acero 275 a dicha temperatura.

4.1. Acciones térmicas sobre los aceros estructurales

Para ello, habría que considerar la evolución de las propiedades de los aceros estructurales con la temperatura, según recoge la norma EN-1993-1-2 [2.5]. En primer lugar se considera la elongación de dichos aceros con la temperatura desde la ambiente hasta 1200 °C. Como puede observarse en la Figura 2. 12, la elongación presenta una variación casi lineal con la temperatura hasta los 750 °C, mantiene un valor constante de 0,011 entre 750° y 860 °C y a partir de 860 °C hasta los 1200 °C presenta una variación totalmente lineal. En la Euronorma [2.5] se recogen las ecuaciones ajustadas para la predicción de la elongación de forma mecánica.

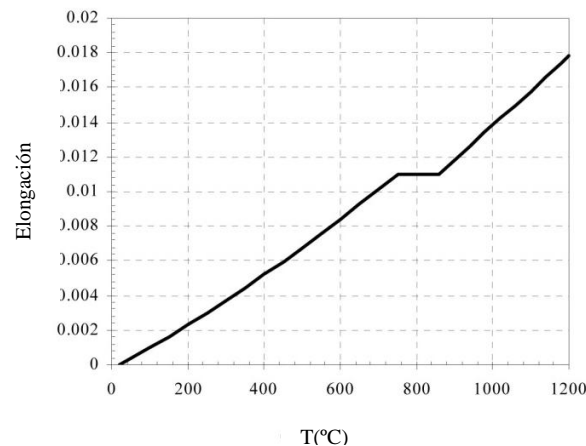


Figura 2. 12. Elongación térmica del acero en función de la temperatura.

Otra de las propiedades térmicas a considerar es el calor específico que presenta una dependencia creciente con la temperatura bastante lineal hasta los 600 °C, a partir de esta temperatura y hasta los 735 °C presenta una variación muy brusca del calor específico decreciendo también muy bruscamente entre 735° y 900 °C, manteniéndose a partir de este nivel constante e igual 650 J/kg °K, ver Figura 2. 13. A la hora de obtener valores del calor específico del acero al carbono estructural, se han propuesto diferentes ecuaciones ajustadas con la temperatura para distintos intervalos tal como se indica en la ecuación (2.4a, b, c y d).

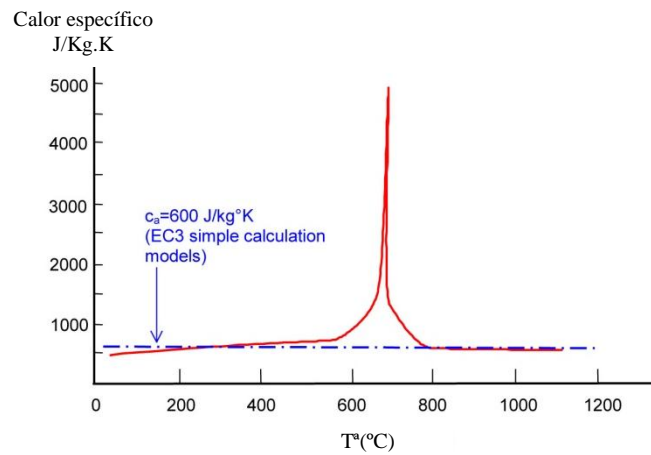


Figura 2. 13. Variación del calor específico del acero con la temperatura.

$$C_{ps} = 425 + (0.733T_m - 1.69 \cdot 10^{-3}T_m^2 + 2.22 \cdot 10^{-6}T_m^3) \text{ J/kg } ^\circ\text{K} \quad (2.4a)$$

$$20 \text{ } ^\circ\text{C} < T_m < 600 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$C_{ps} = 666 + 13002/(738-T_m) \text{ J/kg } ^\circ\text{K} \quad (2.4b)$$

$$600 \text{ } ^\circ\text{C} < T_m < 735 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$C_{ps} = 545 + 17820/(T_m - 731) \text{ J/kg } ^\circ\text{K} \quad (2.4c)$$

$$735 \text{ } ^\circ\text{C} < T_m < 900 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$C_{ps} = 650 \text{ J/kg } ^\circ\text{K} \quad (2.4d)$$

$$900 \text{ } ^\circ\text{C} < T_m < 1200 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Otra de las propiedades que también hay que considerar es la de la conductividad térmica que evoluciona desde los 54 W/m °K hasta un valor de 27,3 W/m °K a 800 °C, manteniéndose constante a partir de esta temperatura en

adelante, tal y como se presenta en la ecuación (2.5). Entre 20° y 800 °C la conductividad del acero estructural disminuye linealmente con la temperatura como se indica en la Figura 2. 14.

$$k = 54 - 3.33 \cdot 10^{-2} T_a \text{ (W/m}^\circ\text{K)} \quad 20^\circ\text{C} \leq T_a \leq 800^\circ\text{C} \quad (2.5)$$

$$k = 27,3 \text{ W/m}^\circ\text{K} \quad T_a \geq 800^\circ\text{C}$$

siendo T_a la temperatura del acero.

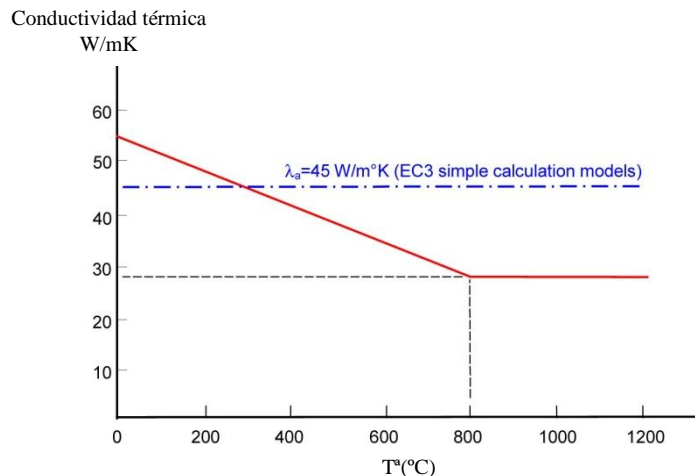


Figura 2. 14. Variación de la conductividad térmica del acero con la temperatura.

En todo fuego ha de considerarse tanto el transporte interno, es decir, en el interior de las estructuras sólidas y que es de tipo conductivo y que está dado por la ecuación de Fourier, como el transporte externo al elemento estructural, en donde predominan los mecanismos convectivos y radiativos de la transmisión de calor, predominando la radiación térmica a medida que la temperatura del recinto crece.

La contribución convectiva de la transmisión de calor, viene dada por la ecuación (2.6), en donde h_c , es el coeficiente convectivo que depende de la mayor o menor velocidad de movimiento del fluido (gas) en el ambiente, así como las propiedades térmicas y de transporte, que son función de la temperatura.

En la norma europea EN-1991-1-2 [2.4], se le asigna al coeficiente convectivo del lado de la zona caliente un valor de $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ para el caso de utilizar en el ensayo una curva temperatura-tiempo de fuego exterior o la curva estándar ISO, por el contrario si se utilizara la curva de hidrocarburos, el coeficiente de calor por convección debe aumentarse a $50 \text{ W/m}^2\text{K}$.

$$q_c = h_c \cdot \Delta T \quad (\text{W/m}^2) \quad (2.6)$$

El coeficiente de calor por convección de la superficie que no ve el fuego, se mantiene constante a $4 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{K}$ aunque puede incrementarse hasta un valor de $9 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{K}$ cuando se incluyen los efectos combinados de la transmisión de calor por radiación y convección.

El flujo de calor por radiación entre la llama y la superficie que lo recibe viene dado por la ecuación (2.7) en donde ha de evaluarse el factor de forma, de acuerdo con el anexo G de dicha norma. Cuando la llama ve totalmente a la superficie del acero estructural que recibe el flujo de calor el factor de forma es igual a la unidad. En dicha ecuación hay también que introducir los valores de las emisividades del foco y de la superficie que recibe el flujo de calor. Suele ser práctica habitual tomar como emisividad del fuego la unidad y un valor promedio de 0.8 para la superficie que recibe el calor.

$$q_r = \emptyset \varepsilon_m \varepsilon_f \sigma [(T_f + 273)^4 - (T_s + 273)^4] = h_r (T_f - T_c) \quad (\text{W/m}^2) \quad (2.7)$$

En donde, \emptyset es el factor de forma, ε_m es la emisividad de la superficie del elemento, ε_f es la emisividad del fuego y σ la constante de Boltzman ($5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{K}^4$).

Para evaluar específicamente tanto la contribución convectiva y conductiva en un fuego, se pueden calcular los valores del coeficiente de radiación h_r , para diferentes valores de las temperaturas, tanto del fuego, T_f , como de la superficie del material estructural, T_m , tomados de cualquier ensayo realizado bajo norma ISO y que se agrupan en la Tabla 2. 6 y en donde los valores de h_r son superiores al valor constante que asigna la norma europea para el coeficiente de convección, h_c , de $25 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{K}$, de forma que la contribución de la radiación térmica pasa de 74% cuando el fuego tiene $600 \text{ }^\circ\text{C}$ al 93% a $1000 \text{ }^\circ\text{C}$.

Tabla 2. 6. Cálculo de los valores de h_r para distintas temperaturas.

T_f (°C)	T_m (°C)	h_r (W/m ² K)	% Radiación
600	440	72	74
800	680	182	88
1000	930	345	93

4.2. Deducción de los perfiles de temperatura de los aceros estructurales

La norma EN-1993-1-2 [2.10] indica tanto para los aceros estructurales desnudos como los aceros estructurales con protección térmica, un método sencillo para la obtención del perfil de temperatura [2.31, 2.32] con el tiempo para cuando los aceros presentan una resistencia térmica prácticamente nula lo que presupone un perfil horizontal de la temperatura en el interior del acero [2.33, 2.34]. Estos supuestos dan por hecho que el acero estructural está sometido a un fuego envolvente, que la resistencia térmica que ofrece el acero es pequeña, lo que sucede cuando el espesor del perfil son unos pocos milímetros y cuando la temperatura de la llama es superior a 600 °C lo que supone que el transporte por radiación es muy superior al transporte convectivo [2.35].

Realizando un balance de energía a un elemento estructural de volumen V y una sección exterior de transmisión de calor A , se tiene que la cantidad de calor almacenada en el sólido en un tiempo determinado ha de ser igual al caudal de calor que fluye a través de la superficie del elemento, ecuación (2.8).

$$V \rho_s c_p \Delta T_s / \Delta t = h_{(r+c)} A (T_f - T_s) \quad (2.8)$$

Reagrupando los términos se puede despejar la variación de la temperatura en el interior del sólido para intervalos de tiempos definidos, por lo que la ecuación finalmente quedaría como la ecuación (2.9). Esta ecuación es la fuente para diseñar una hoja de datos iterativa en la que los intervalos de tiempo tienen que ser pequeños ya que en la expresión (2.9) aparecen la conductividad y el calor específico del acero y ambos son función de la temperatura. La variación es más acusada para el calor específico del

acero cuando las temperaturas son próximas a la temperatura de transición Ac_1 en el acero.

$$\Delta T_s = h_{(r+c)} / \rho_s c_p (A/V) (T_f - T_s) \Delta t \quad (2.9)$$

Donde $h_{(r+c)}$, dada por La ecuación (2.7), se transforma, teniendo en cuenta que $\emptyset = 1$, $\epsilon_f = 1$ y se expresará como

$$h_{(r+c)} = 25 + \sigma \epsilon_m [(T_f - T_s)^4 / (T_f - T_s)] \quad (2.10)$$

$$\sigma = \text{cte de Boltzman } 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$$

En esta ecuación, se puede comprobar que independientemente que los coeficientes de transporte y de las propiedades, ambas variables son función de la temperatura, también aparece un término geométrico como es la masividad (A/V) del material estructural, por lo que independientemente de campo de temperatura obtenido en un fuego, la masividad es un parámetro que modifica el perfil de temperatura que se obtiene, ya que a medida que aumenta la masividad de la estructura, se tendrá un alejamiento del nivel térmico del material frente a la curva de fuego.

La forma de proceder para deducir el perfil de temperatura de la estructura, sería mediante una hoja de cálculo en la que se tomará un intervalo de tiempo determinado, el acero estructural estará inicialmente a la temperatura T_s , el horno emitiría calor a una temperatura promedio T_f que es la que corresponde a la temperatura de fuego seleccionada para la mitad de intervalo de tiempo. A continuación se dispondrá de la diferencia de temperatura entre el fuego y la superficie del cuerpo, se evaluará a continuación el coeficiente combinado de convección más radiación dando la ecuación (2.10) y se determinará el salto de las temperaturas en el acero estructural por medio de la ecuación (2.9). A continuación se vuelve a introducir un nuevo intervalo de tiempo y se procede de forma análoga, tal como se indica en la Tabla 2.7.

Tabla 2. 7. Tabla para el cálculo de transferencia de calor en piezas de acero no protegido.

Tiempo	T _{acero} , T _s	T _{fuego} , T _f	T _f -T _s	H _t	ΔT _s
t1 = Δt	T _{so} , T inicial del acero	T del fuefo a Δt/2	T _f - T _{so}	Ecuación 9 con T _s y T _f	Ecuación 8
t2 = t1+Δt	T _s + ΔT _s anterior	T del fuefo a t1+Δt/2	T _f - T _s	Ecuación 9 con T _s y T _f	Ecuación 8
etc	etc	Etc	etc	Etc	etc

La norma europea indicada propone utilizar un valor de la emisividad para evaluar el coeficiente de radiación mas convección de 0,5, no obstante hay otros autores como, Kay [2.36], que proponen un valor de la emisividad de 0,8 o Wong [2.37], que propone una variación de la emisividad con la temperatura según la ecuación (2.11),

$$\epsilon_{eq} = a + bT_s + cT_s^2 + dT_s^3 + eT_s \quad (2.11)$$

Donde, a = 0.4050, b = -0.0003909, c = 1.235.10⁻⁶, d = -2.421.10⁻⁹ y e = 1.3968.10⁻¹²

En efecto, tal como se puede ver en la Figura 2. 15, se presentan los datos obtenidos por V. Pignatta [2.35], de los perfiles de temperatura-tiempo deducidos, para un acero al carbono, en donde se sigue los valores de las propiedades y los coeficientes indicados en la norma europea, para diferentes valores de la masividad de la estructura, también se presentan perfiles de temperatura-tiempo para piezas con y sin protección por materiales refractarios, ver Figura 2. 16.

La situación descrita de fuego envolvente, no suele ser la situación habitual de un fuego desarrollado en escenarios reales, por lo que la opción de suponer perfiles isotermos en las estructuras con el tiempo, dista mucho de la situación real. La forma de obtener la evolución de los campos de temperatura en el tiempo, pasa por contar con la ecuación de transmisión de calor en régimen no estacionario, cuando no hay fuentes ni suministros de calor, junto a las condiciones de contorno de transmisión de calor en las superficies limitantes de la estructura, las correlaciones de las propiedades térmicas y de los diferentes coeficientes de transmisión de calor con la temperatura. Evidentemente, aunque por las condiciones geométricas se pudiera considerar que la temperatura fuese

función de una posición y del tiempo, la ecuación de transmisión de calor, no tiene solución analítica y por tanto, ha de recurrirse a la técnica de incrementos finitos para deducir los diferentes campos de las temperaturas en el tiempo en elemento estructural.

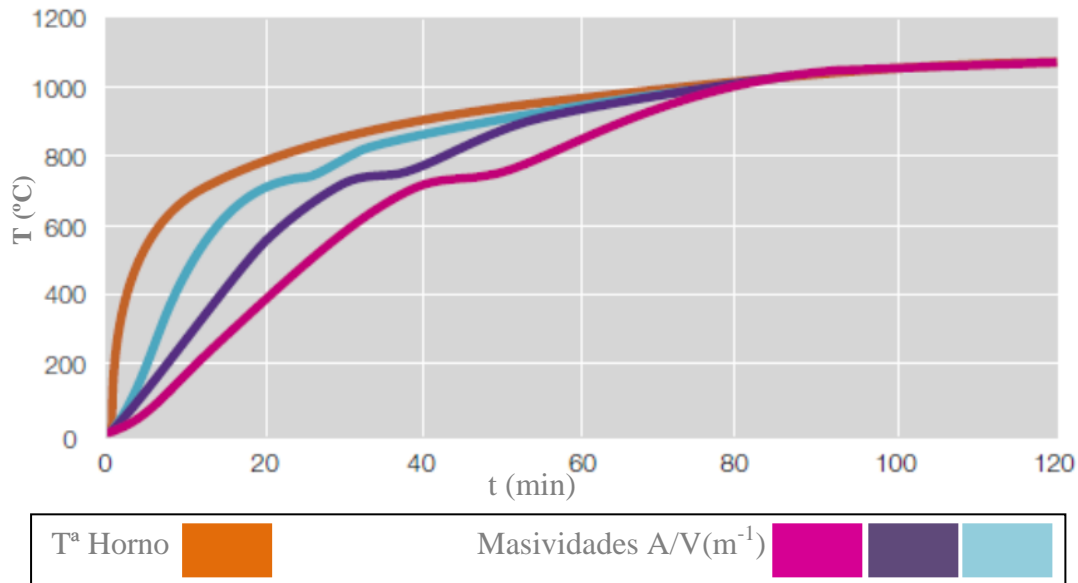


Figura 2. 15. Registro temperatura tiempo para un acero sometido a fuego envolvente bajo curva ISO según diferentes valores de masividad.

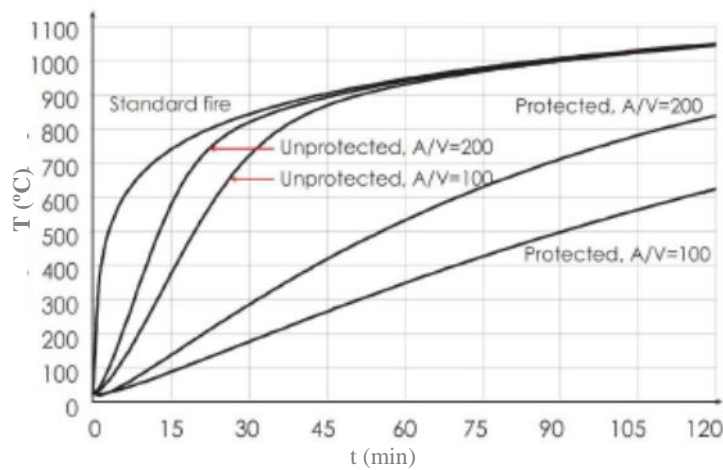


Figura 2. 16. Registro temperatura tiempo para piezas de acero, protegidas y no protegidas, sometidas a fuego envolvente bajo curva ISO con distinta masividad.

La obtención del perfil de temperaturas que se deducirá depende del fenómeno de transmisión de calor entre el foco y la superficie [2.38], en donde las ecuaciones utilizadas en la transmisión de calor por radiación, hay diferentes parámetros de difícil determinación como son los factores de visión, las emisividades del foco y de la superficie. El coeficiente de transmisión de calor por convección tampoco permanece

constante con la temperatura como indica la Euronorma. Finalmente está la transmisión de calor en el interior del acero estructural en donde la emisividad del mismo no permanece constante con la temperatura. Si además se tiene en cuenta que hay que considerar la transmisión de calor en régimen no estacionario se tiene que la ecuación de transporte a resolver no tiene solución analítica, por lo que tiene que hacerse mediante técnicas de incrementos finitos utilizando un ordenador. La ecuación de transporte teniendo en cuenta coordenadas cartesianas es la siguiente, (2.12):

$$\frac{\partial}{\partial x} (K(T)\frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K(T)\frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K(T)\frac{\partial T}{\partial z}) + h_{(r+c)} = \rho_s(T) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.12)$$

Por todo ello, se estima el interés de obtener por vía experimental los perfiles de temperaturas en los aceros estructurales, siguiendo una curva de fuego seleccionada con objeto de poder comprobar la bondad de todos los supuestos, que se hacen en la normativa referente a los ensayos bajo fuego de materiales tal como se han indicado anteriormente.

5. Referencias

- [2.1] Rafael Sarasola Sánchez-Castillo. La protección de los túneles en España. Revista de Obras Públicas/Marzo 2006/Nº 3.464.
- [2.2] DB SI: Seguridad en caso de incendio, Código Técnico de la Edificación, Ed. Ministerio de Fomento, Febrero 2010.
- [2.3] Revista de Obras Públicas/Marzo 2006/Nº 3.464
- [2.4] UNE-EN-1991-1-2, Norma española, Eurocódigo 1: Acciones en estructuras, Parte 1-2: Acciones generales, Acciones en estructuras expuestas al fuego
- [2.5] EN-1993-1-2, European standard, Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design.
- [2.6] APTA, Temas monográficos, “La protección contra el incendio”. Traducción parcial del libro: “Convevoir et Construire en acier” Bertraïnd Lemoire Arcelor, Luxembourg, 2005.
- [2.7] Patrick Bamonte, Roberto Felicetti. “Fire scenario and structural behavior of underground parking lots exposed to fire” Proceedings of International Conference, Applications of structural fire engineering. Session 2, Fire Modeling. Prague, 19-20 February 2009.
- [2.8] Konstantinous Gkoumas, Chiara Crosti, Luisa Giuliani, franco Bontempi. “Definition and selection of design fire scenarios”. Proceedings of International Conference, Applications of structural fire engineering. Session 2, Fire Modeling. Prague, 19-20 February 2009.
- [2.9] R. H. R. Tide. “Integrity of Structural Steel After Exposure to Fire”. Engineering journal / first quarter /1998.
- [2.10] UNE-EN 1363-1:1999, Ensayos de resistencia al fuego. Parte 1: Requisitos generales.
- [2.11] C.R. Barnett. “Replacing international temperature–time curves with BFD curve”. Fire Safety Journal 42 (2007) 321–327.

- [2.12] Wei Lu, Pentti Makeläinen, “Advance steel structures”. Helsinki University of Technology Laboratory of Steel Structures. Publication 29. Espoo 2003.
- [2.13] C. R Barnett, G. C Clifton. “Examples of fire engineering design for steel members, using a standard curve versus a new parametric curve”.
- [2.14] N.D. Pope, C.G. Bailey.” Quantitative comparison of FDS and parametric fire curves with post-flashover compartment fire test data”. Fire Safety Journal 41 (2006) 99–110.
- [2.15] Von Wingerde, A.M., Packer, J.A. and Wardenier, J. (1995). “Criteria for the Fatigue Assessment of Hollow Structural Section Connections”. Journal of Constructional Steel Research, Vol. 35, No.1, pp.71-115.
- [2.16] Alvear D., Rein G., Capote J.A., et al. —Modelado y Simulación Computacional de Incendios en la Edificación||, Ed. Díaz de Santos, 2007.
- [2.17] L. Razdolsky. Mathematical Modeling of Fire Dynamics. Proceedings of the World Congress on Engineering 2009 Vol II.WCE 2009, July 1 - 3, 2009, London, U.K.
- [2.18] —Fire Protection Handbook||, 2003 Edition, NFPA
- [2.19] Callister W.D. Introducción a la Ciencia e Ingeniería de Materiales. Limusa Wiley. México, 2009.
- [2.20] “Properties and Selection: Irons Steel and High Performance Alloys”. ASM Handbook, vol. 1.
- [2.21] UNE-EN-10025-3: 2006. Productos laminados en caliente de aceros para estructuras. Parte 3: Condiciones técnicas de suministro de los aceros estructurales soldables de grano fino en la condición de normalizado/laminado de normalización.
- [2.22] APTA, el acero en la construcción. <http://www.apta.com.es/pdf/aceros.pdf>.
- [2.23] EN-1993-1-1, Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-1, General rules and rules for buildings. English version.
- [2.24] Thanuja Ranawaka, Mahen Mahendran. “Experimental study of the mechanical properties of light gauge cold-formed steels at elevated temperaturas”. Fire Safety Journal 44 (2009) 219–229.

[2.25] APTA, Nomogramas, Método gráfico para determinar la resistencia al fuego de las estructuras de acero según EN 1993-1-2:2005.

[2.26] “Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials.” American society of testing materials 1998. ASTM E119.

[2.27] O. Imedio, F. J. Gómez, L. Caballero y A. Valiente, “Ductilidad a alta temperatura de aceros estructurales de construcción de los tipos S460 y S275”, Universidad Politécnica de Madrid Departamento de Ciencia de Materiales, E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos. c/ Profesor Aranguren s/n, 28040 Madrid.

[2.28] Ju Chen, Ben Young. “Stress–strain curves for stainless steel at elevated temperaturas”. Engineering Structures 28 (2006) 229–239.

[2.29] Ju Chen, Ben Young, M.ASCE and Brian Uy, M.ASCE. “Behavior of High Strength Structural Steel at Elevated Temperatures”. Journal of structural engineering © ASCE / December 2006.

[2.30] Wei Sha. “Mechanical properties of structural steels with fire resistance”. The Fourth Pacific Rim International Conference on Advance Materials and Processing (PRICM4). Tha Japan Institute of Metals, 2001.

[2.31] Proceedings of International Conference, Applications of structural fire engineering. Session 5, Steel Structures. Prague, 19-20 February 2009.

[2.32] Kate Anderson, Martin Gillie. “ Investigation into methods for predicting conection temperatures”. Proceedings of International Conference, Applications of structural fire engineering. Session 5, Steel Structures. Prague, 19-20 February 2009.

[2.33] C.R. Barnett. “BFD curve: a new empirical model for fire compartment temperaturas”. Fire Safety Journal 37 (2002) 437–463.

[2.34] L. Razdolsky. “Mathematical Modeling of Fire Dynamics”. Proceedings of the World Congress on Engineering 2009 Vol II.

[2.35] Valdir, Pignatta e Silva. “Determination of the temperature of thermally unprotected steel members under fire situations. Considerations on the section factor”, Latin American Journal of Solids and Structures 3 (2006) 149-161.

[2.36] T. R. Kay, B. R. Kirby & R. R. Preston, “Calculation of the heating Rate of an Unprotected Steel Member in a Standard Fire Resistance Test”, 1996.

[2.37] J.I. Ghajel, M.B. Wong, “Heat transfer model for unprotected steel members in a standard compartment fire with participating medium”, Journal of Constructional Steel Research 61 (2005) 825–833.

[2.38] Du Young, Li Guo-qiang. “Effects flame radiation on temperature elevation”. Proceedings of International Conference, Applications of structural fire engineering. Session 5, Steel Structures. Prague, 19-20 February 2009.

**MATERIALES, TÉCNICAS DE ENSAYO E INSTALACIONES
EXPERIMENTALES**

Capítulo III: Materiales, técnicas de ensayo e instalaciones experimentales

1. Materiales ensayados

En este apartado se hará referencia a los materiales estructurales que se eligieron para realizar los ensayos de fuego y analizar su comportamiento. Los materiales sobre los que principalmente se enfocó la tesis fueron los aceros de construcción al carbono, S355NL, S460NL y S460N. También se estudió el comportamiento de materiales aislantes que actualmente pueden formar sistema con los aceros al carbono, en este caso se escogieron, morteros, lanas de vidrio y el propio acero actuando como un escudo frente a la radiación térmica.

1.1. Aceros al carbono S355NL, S460NL y S460N

Para llevar a cabo el trabajo experimental de la presente tesis se eligió probetas de 200x100x20 mm de los aceros al carbono tipo S355NL, S460NL y S460N suministrados por la compañía Materiales Siderúrgicos S.A. La caracterización química de los tres aceros se realizó en el laboratorio de rayos X (área de fluorescencia y emisión) del CENIM, por el método de emisión por chispa y su composición se detalla a continuación en la siguiente tabla.

Tabla 3.1. Composición química de los aceros al carbono en % en peso.

PARÁMETRO MUESTRA	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)	Al (%)	Cu (%)	Co (%)	Fe (%)
S355NL	0,169	0,310	1,140	0,018	0,006	0,046	0,244	0,008	0,040	0,216	0,019	97,7
S460NL	0,127	0,286	1,40	0,019	0,006	0,029	0,510	0,008	0,028	0,013	0,018	97,3
S460N	0,087	0,301	1,270	0,017	0,005	0,026	0,053	0,010	0,044	0,015	0,015	98,0

Cada uno de los elementos encontrados aporta distintas propiedades a los aceros; a continuación se menciona la influencia de alguno de estos elementos en las propiedades de la aleación:

- El contenido de carbono no supera el 0.2%, tal y como especifica la norma UNE-EN 10025-3:2006 [3. 1] para los aceros de construcción
- El silicio aumenta moderadamente la templabilidad. Se usa como elemento desoxidante.
- El manganeso aparece prácticamente en todos los aceros, debido principalmente, a que se añade como elemento de adición para neutralizar la perniciosa influencia del azufre y del oxígeno, que siempre suelen contener los aceros cuando se encuentran en estado líquido en los hornos durante los procesos de fabricación. El manganeso actúa también como desoxidante y evita, en parte, que en la solidificación del acero se desprendan gases que den lugar a porosidades perjudiciales en el material. Si los aceros no tuvieran manganeso, no se podrían laminar ni forjar, porque el azufre que suele encontrarse en mayor o menor cantidad en los aceros, formarían sulfuros de hierro, que son compuestos de bajo punto de fusión (981 °C aproximadamente) fundiendo a las temperaturas de trabajo en caliente (forja o laminación), y al encontrarse contorneando los granos de acero crearan zonas de debilidad a las piezas y a las barras y se abrirían en las operaciones de transformación.
- El límite máximo aproximado de fósforo es de 0,04%. El fósforo resulta perjudicial, ya sea al disolverse en la ferrita, pues disminuye la ductilidad, como también por formar FeP (fosfuro de hierro). El fosfuro de hierro, junto con la austenita y la cementita, forma un eutéctico ternario denominado esteadita, que es sumamente frágil y posee un punto de fusión relativamente bajo, por lo cual aparece en los bordes de grano, transmitiéndole al material su fragilidad. Aunque se considera un elemento perjudicial en los aceros, porque reduce la ductilidad y la tenacidad, haciéndolo quebradizo, a veces se agrega para aumentar la resistencia a la tensión y mejorar la maquinabilidad.
- El límite máximo aproximado del azufre es de 0,04%. El azufre con el hierro forma sulfuro, que conjuntamente con la austenita, da lugar a un eutéctico cuyo punto de fusión es bajo y que, por lo tanto, aparece en los bordes de grano. Cuando los lingotes de acero colado deben ser laminados en caliente, dicho eutéctico se encuentra en estado líquido, lo que provoca el desgranamiento del material.

- Se controla la presencia de sulfuro mediante el agregado de manganeso. El manganeso tiene mayor afinidad por el azufre que el hierro por lo que en lugar de FeS se forma MnS que tiene un alto punto de fusión y unas buenas propiedades plásticas. El contenido de Mn debe ser aproximadamente cinco veces la concentración de S para que se produzca la reacción. Aunque se considera un elemento perjudicial, su presencia es positiva para mejorar la maquinabilidad en los procesos de mecanizado. Cuando el porcentaje de azufre es alto puede causar poros en la soldadura.
- El cromo es uno de los elementos especiales más empleados para la fabricación de aceros aleados, usándose indistintamente en los aceros de construcción, en los de herramientas, en los inoxidable y en los de resistencia en caliente. Se emplea en cantidades diversas desde 0,30% a 30%, según los casos y sirve para aumentar la dureza y la resistencia a la tracción de los aceros, mejora la templabilidad, impide las deformaciones en el temple, aumenta la resistencia al desgaste, la inoxidable (con concentraciones superiores al 12%), etc. Forma carburos muy duros y comunica al acero mayor dureza, resistencia y tenacidad a cualquier temperatura.
- El níquel evita el crecimiento del grano en los tratamientos térmicos, lo que sirve para producir en ellos gran tenacidad. El níquel además hace descender los puntos críticos y por ello los tratamientos pueden hacerse a temperaturas ligeramente más bajas que la que corresponde a los aceros ordinarios. Experimentalmente se observa que con los aceros aleados con níquel se obtiene para una misma dureza, un límite de elasticidad ligeramente más elevado y mayores alargamientos y resistencias que con los aceros al carbono o de baja aleación. En la actualidad se ha restringido mucho su empleo, pero sigue siendo un elemento de aleación indiscutible para los aceros de construcción empleados en la fabricación de piezas para máquinas y motores de gran responsabilidad, se destacan sobre todo en los aceros cromo-níquel y cromo-níquel-molibdeno. Es el principal formador de austenita, que aumenta la tenacidad y resistencia al impacto.
- El molibdeno es un elemento habitual del acero y aumenta mucho la profundidad de endurecimiento de acero, así como su tenacidad.

- El aluminio como desoxidante se suele emplear frecuentemente en la fabricación de muchos aceros. Todos los aceros aleados en calidad contienen aluminio en porcentajes pequeñísimos.
- El cobalto es muy endurecedor. Disminuye la templabilidad. Mejora la dureza en caliente. Es un elemento poco habitual en los aceros. Aumenta las propiedades magnéticas de los aceros.

1.2. Materiales aislantes

Con objeto de ver el comportamiento frente al fuego de posibles materiales aislantes que pueden ser utilizados como protección frente a la acción de fuego, se decidió someter a dichos materiales, a la acción de la curva de fuego estándar, ISO 834. Los materiales elegidos fueron, lanas minerales, una serie de 5 chapas de acero de 1 mm de espesor colocadas en paralelo formando un escudo de radiación, separadas 1 mm y paralelas al material a proteger, y por último varios tipos de mortero.

Los ensayos se realizaron en las mismas condiciones para las que se ensayaron los aceros elegidos en el estudio. En primer lugar se ensayaron los materiales aislantes antes citados y en segundo lugar fueron ensayados como método de aislamiento junto con el acero al carbono. El fuego sólo incidió sobre una cara.

1.2.1. Lanas minerales

Se utilizaron dos lanas con las siguientes especificaciones determinadas por el proveedor:

Lana ISOVER

Lana para el aislamiento térmico, acústico y protección contra el fuego. No combustible, no hidrófilo, estable a la dilatación y contracción, no corrosivo frente a metales y con una densidad de 144 kg/m^3 .

Las propiedades técnicas de la lana de vidrio para un espesor de 30 mm y para una temperatura límite de $750 \text{ }^\circ\text{C}$ son las que se muestran a continuación:

Tabla 3 2. Propiedades técnicas indicadas por el fabricante de la lana ISOVER.

Propiedades	Valor
Conductividad térmica (W/mK)	0.036
Calor específico (kJ/kg K)	0.8
Resistencia térmica (m ² K/W)	0.65

Lana PROMAT

Lana de fibras de silicatos alcalinotérreos, con alta resistencia térmica y escasa acumulación de calor. Sus propiedades a la temperatura de prueba de entre 1100°-1250 °C son las siguientes:

Tabla 3.3. Propiedades técnicas indicadas por el fabricante de la lana PROMAT.

Propiedades	Valor
Conductividad térmica, f(T*) (W/mK)	0.05-0.27
Calor específico (kJ/kg K)	1.05-1.13

Para la lana ISOVER se usaron muestras de 200x100x30 mm. Para la lana PROMAT las muestras fueron de 200x100x20 mm. Las lanas se perforaron con los termopares en varios puntos y a diferentes profundidades, con la finalidad de tomar valores de temperatura a lo largo del perfil de la lana.

1.2.2. Escudos de radiación

Otro de los métodos que se decidió probar para aislar al acero del fuego, fue utilizar un escudo frente a la radiación térmica, ya que es éste el mecanismo dominante. Dicho escudo se compone de 5 placas de acero al carbono de 2x100x200 mm de tamaño, separada una de otra por 1 mm y sujetas a la placa de acero de 20x100x200 mm por medio de unos tornillos. Las placas fueron la cara expuesta directamente al fuego y mediante termopares tipo K, se tomó la temperatura del acero a distintas profundidades.

1.3. Morteros

El hormigón es uno de los materiales de construcción más ampliamente utilizado para la fabricación de estructuras civiles. También se usa como material de protección contra incendios, siendo el revestimiento de las estructuras a proteger. En esta última

década se han desarrollado múltiples investigaciones relacionadas con el comportamiento del hormigón frente al fuego, con el objetivo de conocer su reacción y comprender y controlar el llamado “spalling” y al mismo tiempo encontrar reglas para la seguridad de las estructuras cuando sufren un fuego y para controlar su comportamiento en los momentos posteriores a él.

Tabla 3.4. Dosificación de los morteros (Kg/m³ y % vol).

	OPC		OPC-P+V		AL-P+V		AL+HS-P+V	
	Kg/m ³	% Vol	Kg/m ³	% Vol	Kg/m ³	% Vol	Kg/m ³	% Vol
Cemento CEMI 52.5R	500	22	400	34				
Cemento Aluminoso					400	34	320	27
Filler	205	11	47.16	4	47.16	4	47.16	4
Agua	214		200		235		230	
Arena silicea	1372	54	669	57	669	57	669	57
VSC TSG 30	5	0,2	6	0,5	6	0,5	6	0,5
Humo de Sílice							80	7
Perlita			13.2	1	13.2	1	13.2	1
Vermiculita			42.44	4	42.44	4	42.44	4
Agua /cemento	0.47	0.43	0.5	0,5	0.53	0,5	0.71	0.6

Se desarrollaron cuatro composiciones de mortero (no hormigón, ya que no se añadió árido grueso), dichas composiciones se muestran en la Tabla 3.4.

Las mezclas de mortero indicadas en la Tabla 3.4 se ensayaron sin la placa de acero para analizar su comportamiento frente a un ensayo de fuego normalizado por una sola cara. Para ello, se diseñó un frontal para el horno, ya que se usaron probetas normalizadas para este ensayo que difieren de la forma de las probetas de acero, Figura 3. 1. El frontal permite ensayar dos probetas al mismo tiempo y las dimensiones de las muestras fueron de 40x40x160 mm. Cada una de las piezas de mortero fue perforada en distintos puntos para poder introducir termopares y así registrar la temperatura en el interior de la probeta para cada instante de tiempo.



Figura 3. 1. Probetas de mortero normalizadas.

A la vista de los primeros resultados de los ensayos de fuego se decidió seleccionar dos de las mezclas, OPC-P+V y Aluminoso-P+V, para ensayarlas junto con las placas de acero. Las probetas que se ensayaron junto con el acero S460NL, se componían de la placa de acero de dimensiones 20x100x200 mm adherida al mortero con dimensiones idénticas, ver Figura 3. 2.



Figura 3. 2. Probeta de mortero más acero para ensayo de fuego ISO 834.

2. Técnicas de ensayo

A continuación se describen las técnicas utilizadas para la caracterización realizada antes y después de los ensayos de fuego sobre los materiales, principalmente los aceros al carbono y los morteros citados anteriormente.

2.1. Aceros al carbono

Se citarán en este apartado las técnicas empleadas para la caracterización microestructural de los aceros al carbono, indicándose los métodos que se utilizaron. Dichas técnicas fueron la preparación metalográfica de las muestras y técnicas como el microscopio óptico, el microscopio electrónico de barrido o el difractor de rayos X.

2.1.1. Caracterización Microestructural

Para la caracterización metalográfica de los aceros estudiados, se escogieron muestras representativas antes y después de ser sometidos a pruebas de fuego, y se prepararon metalográficamente.

La preparación consistió, en todos los casos, primero, en obtener por corte muestras en las tres secciones, (paralela a la laminación, transversal y longitudinal a ella), dándolas un tamaño adecuado para ser embutidas en una resina de cobre conductora o en bakelita. Posteriormente se desbastaron usando piezas de papel de lija con abrasivo de carburo de silicio, empezando por una granulometría de 320, seguido de 600 y 1200. Para algunas piezas se realizó un desbaste automático con disco de diamante (dando un resultado similar). A continuación se llevó a cabo el pulido de la muestra utilizando paños, en algunos casos con alúmina de 1 y 0,3 μm en húmedo y durante el tiempo necesario hasta el pulido óptimo de la muestra y en otros casos, se usaron paños con pasta de diamante de 3 y 1 μm , diluida con disolvente. Por último se lavaron las muestras con etanol y posteriormente se introdujeron en un baño de ultrasonidos durante 5 minutos, también con etanol.

Con el fin de revelar la estructura de cada uno de los aceros se realizó un ataque químico durante 120 segundos con el reactivo de ataque, NITAL al 2% y diluido (8 ml de ácido nítrico al 60-62% de concentración y alcohol etílico al 99,5% hasta un volumen final de 250ml).

Para la identificación y caracterización microestructural de las muestras estudiadas y de sus componentes, se usaron técnicas como el microscopio óptico (MO), microscopio electrónico de barrido (MEB) y Rayos X, que se describen a continuación.

a) Microscopio óptico (MO)

El microscopio óptico es una de las técnicas más comunes, usadas para la caracterización microestructural de los aceros. Los aceros son opacos a la vista y por lo tanto sólo puede ser observada su superficie con esta técnica. El contraste que se produce en la imagen, se debe a la diferencia de reflectividad en las distintas regiones de la estructura. Las limitaciones de la técnica son la resolución del espaciado, en torno a 0,5 μm y su profundidad de campo. El microscopio usado fue un Nikon EPIPHOT

300 con un software para el análisis de imagen, del CENIM (Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas).

b) Microscopio electrónico de barrido (MEB)

Esta técnica se usa para generar imágenes de alta resolución, utilizando un haz de electrones en lugar de un haz de luz. La muestra debe ser conductora.

El microscopio electrónico de barrido que se usó para la observación micrográfica fue el modelo JEOL 6400 JSM del CNME (Centro Nacional de Microscopía Electrónica), ver Figura 3. 3, con una resolución de imagen de 35 kW, si la distancia de trabajo es de 8 mm esa resolución será de hasta 3,5 nm y con distancia de trabajo de 39 mm sería hasta 10 nm. La máquina estaba equipada con un detector de electrones secundarios, retrodispersados y análisis EDS (espectroscopía de energía dispersiva) con una resolución de 133 eV. Se utilizó un cátodo termoiónico de filamento con wolframio.



Figura 3. 3. Microscopio electrónico de barrido.

c) Rayos X

Dicha técnica se usa para el estudio y análisis de los materiales, basada en el fenómeno de difracción de rayos X por los sólidos en estado cristalino. En el presente estudio ayudó a la confirmación de la existencia de óxidos formados en la superficie del acero al someterlo a altas temperaturas.

El difratómetro utilizado fue Difratómetro Multi-propósito PANalytical modelo X'Pert MPD, del Centro de Asistencia a la Investigación de la Universidad Complutense

de Madrid (Facultad de C.C Químicas), ver Figura 3. 4. Equipado con tubo de rayos X de Cu y dos goniómetros en configuración vertical θ - 2θ , con óptica Bragg-Brentano (rendijas fijas, monocromador secundario curvo y detector proporcional sellado de Xe). Uno de los goniómetros cuenta con una plataforma portamuestras multi-propósito, que permite medir sobre muestras de hasta 1 kg y 10x10x10 cm. La plataforma portamuestras del segundo goniómetro es un dispositivo de rotación de muestras ("spinner") asociado a un cambiador automático de muestras de 21 posiciones. Este difractómetro se dedicó para el análisis de fases general.



Figura 3. 4. Difractómetro de Rayos X.

2.1.2. Determinación del tamaño de grano

También se determinó el tamaño de grano en los aceros y se calculó utilizando el método de intercepción lineal o método de Heyn, descrito en la norma UNE-EN ISO 643 [3.2]. Este método consiste en estimar el tamaño de los granos contando el número de granos interceptados por varias líneas rectas (mínimo tres), tanto de norte a sur como de este a oeste. Para que se considere una medida representativa se tienen que contar al menos 50 granos tanto en una dirección como en la perpendicular. Cada grano atravesado por la línea se cuenta como uno, mientras que aquellos no son cortados pero si tocados por el extremo de la recta se cuenta como medio grano. Luego se divide el tamaño del segmento usado en micrómetros entre el número de granos interceptados por ella, el resultado será el valor promedio del tamaño de los granos.

2.1.3. Ensayos mecánicos

A lo largo del trabajo experimental se realizaron ensayos de dureza y ensayos de tracción.

2.1.3.1. Ensayos de dureza

Los tres métodos de ensayo más comunes para medir durezas, son:

- Ensayo de dureza Brinell (HB)
- Ensayo de dureza Rockwell (HR)
- Ensayo de dureza Vickers

El ensayo elegido para medir la dureza de las muestras de los aceros estudiados, fue la medida de la dureza Rockwell (teniendo en cuenta que entre todos los métodos existe una equivalencia). La medida se realizó siempre, sobre el material en su estado inicial y tras el ensayo a alta temperatura.



Figura 3. 5. Durómetro.

Para la medida, se utilizó un durómetro Centauro RB2 (UPM, E.T.S.I de Caminos, Canales y Puertos, Departamento de Materiales), Figura 3. 5, que cuantifica la dureza, en este caso dureza Rockwell, que se basa en la diferencia de penetración de un indentador cuando se le aplica una precarga de 10 kg. La medida se efectúa tras retirar la carga de ensayo previamente aplicada mientras sigue la precarga de 10 kg.

El indentador utilizado fue de bola de acero duro de 1/16 pulgadas y la carga de 100 kg dando así una medida de dureza Rockwell B.

2.1.3.2. Ensayos de tracción y fractografías

El ensayo de tracción es uno de los ensayos más utilizados para evaluar las propiedades mecánicas de un material, UNE-EN ISO 10002-1 [3.3]. En su forma más sencilla, el ensayo consistió en fijar una muestra de material, con geometría adecuada, por uno de sus extremos y por el otro tirar ejerciendo una fuerza de tracción por una máquina. Durante el ensayo, la fuerza aplicada y la elongación de la muestra se midieron para diferentes intervalos de tiempo, previamente establecido. Estos datos de fuerza-elongación se usaron para obtener las curvas de tensión deformación y de ahí cuantificar algunas de las propiedades mecánicas características de los materiales:

- Campos de tensión-deformación, resistencia a la tracción.
- Propiedades de ductilidad, elongación y estricción
- Propiedades de deformación elástica y plástica, módulo de Young.

En el presente estudio se han llevado a cabo distintos ensayos de tracción que difieren debido al cambio de algunas variables, como la geometría de las muestras a ensayar, la temperatura, el uso de carga fija o variable...

Mediante el uso del microscopio electrónico de barrido se llevó a cabo el estudio de la zona de fractura de todas las probetas ensayadas a tracción. Las fractografías realizadas permitieron hacer una observación de la superficie de la probeta por donde se produjo el fallo.

2.1.3.3. Ensayo de tracción a temperatura ambiente

Dichos ensayos se realizaron con una máquina de ensayos mecánicos de $F=100\text{KN}$ de las instalaciones de la UPM, E.T.S.I de Caminos, Canales y Puertos, Departamento de Materiales. Se hicieron por duplicado. Las deformaciones se midieron con un extensómetro sujeto a la probeta mediante cuchillas y gomas cuya base es de 12,5 mm y su máximo alargamiento es de 25 mm. La velocidad de alargamiento fue de 0,025 mm/s. Al igual que en el ensayo anterior, la carga y la deformación se registraron

en continuo para luego obtener las curvas de tensión-deformación y con ellas deducir las principales propiedades mecánicas, ver Figura 3. 6.

Las muestras que se ensayaron fueron mecanizadas a partir de los aceros en su estado de recepción, de los aceros sometidos previamente a fuego incidente en una cara y envolvente bajo la curva ISO 834 y también se ensayaron muestras de acero sometidas previamente a fuego por una cara bajo curva externa.



Figura 3. 6. Máquina de ensayos de tracción.

Geometría de la probeta

Para este ensayo la probeta que se utilizó tenía una geometría cilíndrica (ver Figura 3. 7) según norma UNE- EN ISO 6892-1:2010 [3.4].

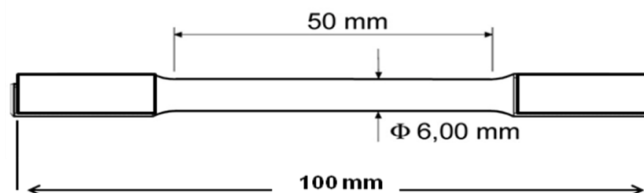


Figura 3. 7. Geometría de la probeta del ensayo de tracción a temperatura ambiente.

Para la medida de la estricción formada en las probetas cilíndricas del ensayo de tracción, se usó un medidor de perfiles (Figura 3. 8), que sirve para generar una imagen ampliada del contorno de la pieza sobre una pantalla y así poder medir de manera más exacta.



Figura 3. 8. Medidor de perfiles de la ETSI camino canales y puertos, UPM.

2.1.3.4. Ensayo de tracción a temperatura elevada

El ensayo se realizó según UNE-EN ISO 6892-2 [3.5], en una máquina universal de ensayos mecánicos SERVOSIS, S.A de 100KN (célula de carga Microtest e Interface, controlador de datos por ordenador programa PCD 1065-W), que pertenece a las instalaciones del CENIM, Departamento de Metalurgia Física, ver Figura 3. 9. Las muestras estudiadas fueron calentadas hasta un temperatura específica de 500°, 650°, 800° y 950 °C, en un horno eléctrico acoplado a la máquina de ensayo, a excepción de la muestra ensayada a temperatura ambiente. Después de alcanzar dichas temperaturas, a una velocidad en torno a 21°C/min, se dejaron 10 min aproximadamente para conseguir la estabilización de la temperatura, tras esto el ensayo se llevó a cabo. La velocidad de carga fue de 0,025 mm/s. La carga y la deformación se registraron en continuo para obtener las curvas de tensión-deformación, a partir de las cuales se dedujeron los datos de carga máxima, módulo elástico, límite elástico, resistencia, estricción y deformación uniforme.

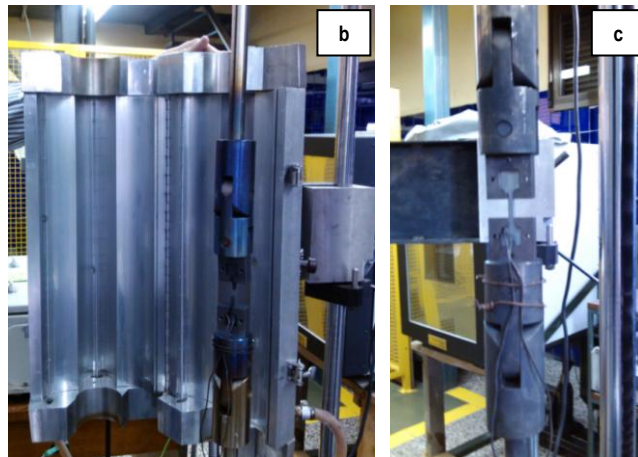


Figura 3. 9. Sistema horno más máquina de tracción para los ensayos de tracción a temperatura constante y elevada. Vista general (a), horno (b) y mordazas (c).

Geometría de la probeta

Para este ensayo la probeta que se utilizó se mecanizó con una geometría plana (ver Figura 3. 10) según norma UNE- EN ISO 6892-1:2010 [3.4].

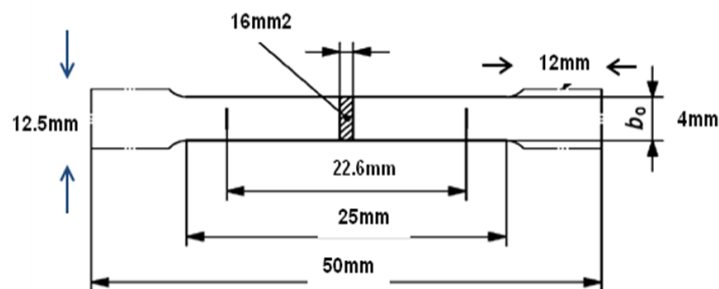


Figura 3. 10. Geometría de la probeta del ensayo de tracción a temperatura constante y elevada.

Para la medida de la estricción formada en las probetas planas se usó un calibre digital y se midió la reducción de las dos secciones.

2.2. Morteros

Las probetas se prepararon y se caracterizaron en el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETcc), Centro del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, siguiendo la norma UNE-EN 1015-2 [3.6]. Se realizó una caracterización previa de los morteros seleccionados para el desarrollo del presente estudio, dicha caracterización consta de un acondicionamiento, mediante el cual se asegura la perfecta madurez del material, determinación del agua libre, transformaciones ATP/TG, porosidad y distribución de poros y finalmente ensayos mecánicos.

2.2.1. Caracterización del material

Las técnicas que se usaron para la caracterización de los morteros se presentan a continuación.

2.2.1.1. Acondicionamiento

Se realizaron probetas normalizadas con dimensiones de 40x40x160 mm de cada material indicado en la Tabla 3.4 como se muestran en la Figura 3. 11. Las probetas se curaron en cámara húmeda durante 28 días al $50\% \pm 5$ HR y 22 °C. Posteriormente se mantuvieron en la atmosfera del laboratorio hasta cumplir 90 días de madurez y reducir la cantidad de agua en los poros.

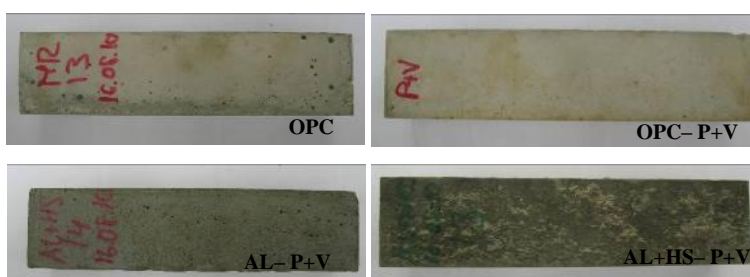


Figura 3. 11. Probetas de los 4 morteros ensayados.

2.2.1.2. Determinación de agua libre

El agua libre de los morteros se determinó mediante la diferencia de peso antes y después del calentamiento a 105 °C, seleccionándose tanto zonas de la parte externa de

la probeta, (esquina de la probeta a aproximadamente 1cm), como para la interna, tomado a partir de 2 cm del centro, como se observa en la Figura 3. 12.

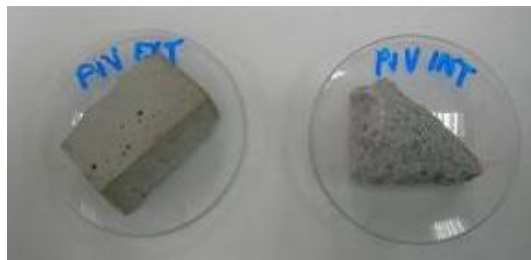


Figura 3. 12. Fragmentos de la parte externa (dcha) e interna (izqda) usados para la determinación de agua libre.

2.2.1.3. Transformaciones ATP/TG

La técnica de ATD mide la diferencia de temperatura entre una muestra y un material de referencia, ambos sometidos al mismo proceso de calentamiento.

En un análisis termogravimétrico se registra continuamente la masa de una muestra en una atmosfera continuamente controlada, en función de la temperatura o del tiempo, al ir aumentando la temperatura de la muestra (normalmente de forma lineal con el tiempo). La representación de la masa o del porcentaje de masa en función del tiempo nos da como resultado el termograma.

Tanto el análisis térmico diferencial (ATD), como la termogravimetría (TG) se realizaron en una atmósfera de N_2 y con una velocidad de calentamiento de $4\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$. Los cuatro materiales, se sometieron a dichos análisis obteniéndose las transformaciones correspondientes en cada muestra del material ensayado.

2.2.1.4. Porosidad y distribución de poros

Se utilizó la técnica de porosimetría por intrusión de mercurio. El funcionamiento de un porosímetro de mercurio se basa en el principio físico de que un líquido no reactivo (en este caso, mercurio), que no moja la superficie del material sobre el que se aplica, penetra en los poros de dicho material cuando se aplica una presión. La relación entre la presión aplicada y el tamaño de los poros se define por medio de la ecuación de Washburn, en donde el diámetro de poro es inversamente proporcional a la

presión aplicada, a mayor presión, menores son los poros posibles que invaden el líquido. El aparato puede ser utilizado para dos direcciones de medida, intrusión y extrusión.



Figura 3. 13. Porosímetro.

2.2.2. Ensayos mecánicos

Los ensayos realizados fueron de resistencia a compresión y a flexo-tracción, según la norma UNE-EN 1015-11 [3.7]. Se midieron las resistencias antes del ensayo de fuego ISO y en residual, después del ensayo de fuego en frío. La rotura se realizó de forma transversal al calentamiento, como se explica en el esquema de la Figura 3.14 y en máquinas como las que se observan en las fotografías de la Figura 3. 15.

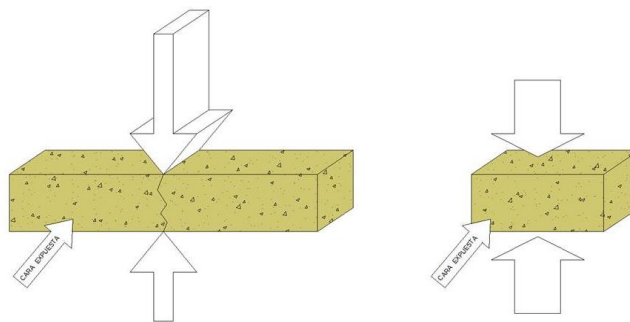


Figura 3.14. Esquema del ensayo a flexotracción (izquierda) y compresión (derecha).

La máquina para el ensayo de flexo-tracción debe estar provista de dos rodillos de apoyo en acero, con una longitud comprendida entre 45 y 50 mm y un diámetro de 10 mm +/- 0,5 mm, espaciados entre sí 100 mm +/- 0,5 mm y de un tercer rodillo de carga de la misma longitud y diámetro instalado centralmente entre los rodillos de

apoyo. La carga se aplicó con una velocidad uniforme comprendida entre 10 y 50 N/s, de tal modo que la rotura se produjera entre 30 y 90s aproximadamente.

La resistencia a compresión de un mortero se determinó en cada una de las dos mitades (semiprismas) resultantes del ensayo de la resistencia a flexión. Para determinar la resistencia a la compresión se utilizó la misma máquina usada en los ensayos de flexión pero cambiando el adaptador. La preparación de las muestras fue el mismo procedimiento que el utilizado para los ensayos de flexión. Se deben colocar las caras que han estado en contacto con los moldes de fabricación de las probetas, en contacto con las superficies de los platos de acero de los dispositivos de la máquina y en dirección perpendicular a la aplicación de la carga. Todos los ensayos se realizaron una vez realizados los ensayos de flexión.



Figura 3. 15. Fotografías reales de las máquinas para los ensayos de flexo-tracción y compresión.

3. Instalaciones experimentales

La norma UNE-EN 1363-1:1999 [3.8] indica que los equipos que deben utilizarse para llevar a cabo los ensayos de fuego deben cumplir las siguientes condiciones:

- Un horno diseñado para someter a las muestras a las condiciones de ensayo utilizándose combustibles líquidos o gaseosos y que el conjunto sea capaz de someter a calentamiento por distintas caras a elementos de separación verticales u horizontales, vigas, paredes, pilares, es decir, diferentes estructuras.
- Un equipo de control para mantener la temperatura del horno y un equipo para la medida de temperaturas del horno y de las caras de la pieza. Los elementos que

indican la temperatura, tanto del horno como de las caras de la probeta serán termopares cromo/alumén tipo K calibrados, definidos en la Norma IEC 584-1.

- Un equipo para controlar y monitorizar los gases del horno, un bastidor en el que el conjunto de ensayo se acople al horno para cumplir las condiciones definidas, y en el caso de que se aplique una carga, un equipo para desarrollar las condiciones de dicha carga y un equipo para medir la flexión producida por la carga.

Para los ensayos de fuego que se desarrollaron en el presente estudio se diseñaron dos hornos que se detallan a continuación.

3.1. Horno piloto para fuego por una cara

Dado que los materiales a ensayar fueron aceros al carbono y como tales no se queman, no tiene sentido utilizar hornos de quemado de combustibles. El objetivo fue obtener los campos de temperaturas de los aceros ensayados, por lo que se sustituye la generación de calor por quemado de combustible por un horno de generación de calor de tipo eléctrico.

Para la realización de los ensayos de fuego de los diferentes aceros previstos, según nuestra línea de investigación, S355NL, S460NL y S460N, se diseñaron y construyeron dos hornos de volumen reducido para no tener inercia convectiva y que funcionara principalmente por radiación térmica, proporcionada por las resistencias eléctricas instaladas. Uno de ellos se diseñó con el fin de realizar ensayos de fuego por una sola cara y el otro para simular la acción de un fuego envolvente.

Dichos hornos van provistos de un sistema operativo tipo Data Logger que puede ser programado con valores de temperatura y las velocidades de calefacción de forma que sea capaz de generar un registro continuo de temperaturas controlado por un software de ordenador. El objetivo fundamental era diseñar un dispositivo de fuego correspondiente con el horno convencional de ensayo que indica la norma, pero seleccionando un elemento diferencial de superficie a ensayar, de forma que fuese representativo del ensayo

La parte del horno preparado para calentar por una cara, donde se ensayaron las probetas, estaba formado por una caja de material refractario atravesada por su parte posterior por termopares calibrados tipo K cromo/alumén, que medirán la temperatura

interna de la probeta, unas resistencias internas que calentarán el horno y una puerta formada por las propias probetas de los ensayos. Por la parte externa, un conjunto de termopares (tipo K) dispuestos sobre un bastidor que los sujetaba y los fijaba a la probeta en los puntos indicados, registrándose así las temperaturas exteriores. En la Figura 3. 16, se presenta un esquema que ayuda a plasmar la idea de diseño y la Figura 3. 17 muestra una fotografía real del horno.

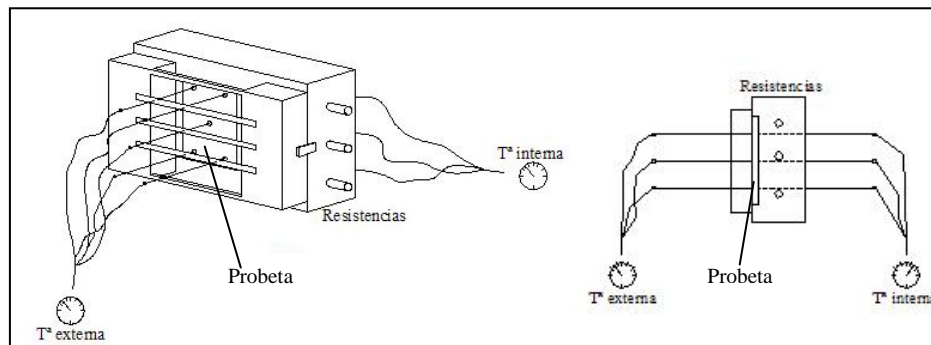


Figura 3. 16. Esquema del horno.



Figura 3. 17. Fotografía real del horno para ensayos de fuego por una cara.

3.2. Horno piloto para fuego envolvente

En el caso del horno para someter a las probetas a un fuego envolvente, la caja fue de geometría cilíndrica y se abría de arriba hacia abajo por la mitad mediante unas bisagras. Dicha caja estaba atravesada por una línea vertical de 5 termopares por un lado y 5 por otro lado. Las dimensiones de las probetas utilizadas fueron de 20x20x200 mm y se anclaron en la zona central de la caja mediante un sistema de muelles, ver Figura 3. 18.



Figura 3. 18. Fotografía real del horno para ensayos de fuego envolvente.

El controlador de ambos hornos fue programado para reproducir dos tipos de fuegos diferentes, definidos por las curvas ISO estándar y la curva de fuego externa.

Para cada tipo de curva utilizada, fue necesario programar los diferentes perfiles de tiempo-temperatura, generando registros para cada una de ellas tal y como se representa en las figuras siguientes, pudiéndose observar que las temperaturas programadas según norma y las conseguidas en el ambiente del horno son coincidentes.

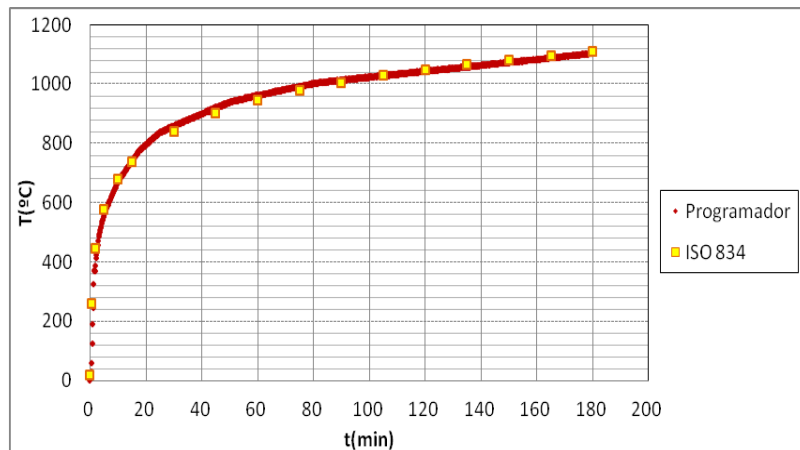


Figura 3. 19. Registro de temperaturas del horno según un fuego ISO 834.

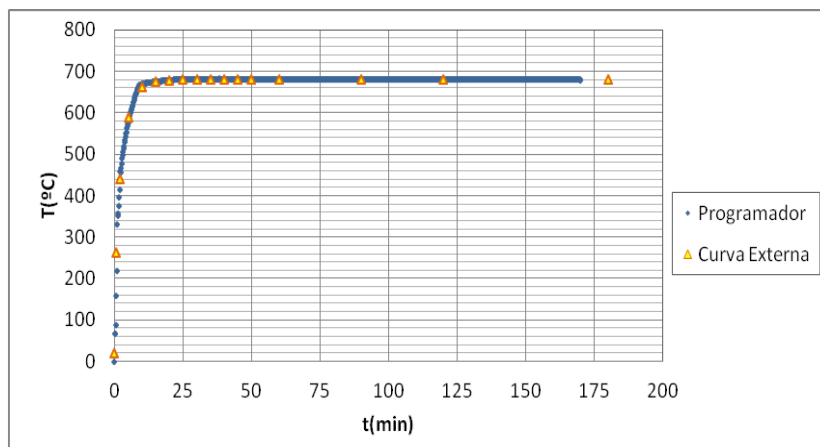


Figura 3. 20. Registro de temperaturas del horno según un fuego tipo curva externa.

La Figura 3. 19, muestra la curva normalizada tiempo-temperatura teórica y la registrada por el horno. La curva tiene forma logarítmica superando la temperatura de transformación austenítica de 723 °C y alcanzando un máximo de 1110 °C a 3 horas de exposición.

La curva de fuego exterior se representa en la Figura 3. 20, tanto la teórica como la registrada por el horno; y como en el caso anterior, también fueron coincidentes. En este caso la curva es asintótica a partir de los 680 °C por lo que no se alcanza la temperatura de transición austenítica. Esta curva se utilizó sólo para hacer ensayos de fuego por una cara.

3.3. Ensayo de tracción con cargas fijas y bajo curva de fuego ISO 834

Con la idea de poder ver la respuesta de los aceros al carbono, sometidos a la acción de un fuego ISO estándar y añadiendo una determinada carga, se diseñó un dispositivo que pudiera ir acoplado al horno que inicialmente se construyó para reproducir un ensayo de fuego bajo norma ISO y cargado. Dicho añadido, es una caja metálica abierta por la parte frontal y sujeta a la probeta por una barra roscada en donde se depositaron las cargas. El montaje quedó como se muestra en la Figura 3. 21.



Figura 3. 21. Fotografía real del montaje del horno para ensayos de fuego con carga constante.

Como carga se utilizaron probetas de plomo de 200x100x10 mm, cada una con un peso de unos 3 kg. Cada probeta de plomo fue numerada, se realizó una distribución en tandas de distinto número de probetas y se pesó cada tanda para tener un control de los kilos que luego se aplicarán a ensayo, a parte del peso del conjunto de la caja con la barra roscada, Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Distribución de los pesos de las probetas de plomo y peso del conjunto cesta+barilla

Elemento	N° probetas	Peso (Kg)
Probetas Pb	1-15 (15)	50,08
	16-30 (15)	50,15
	31-45 (15)	50,11
	46-60 (15)	50,18
	61-75 (15)	50,23
	76-85 (10)	33,29
	86-93 (8)	26,73
	94-100 (7)	23,2
Cesta + barilla		25,23

Se utilizaron tres cargas distintas de 90, 180 y 360 kg para las probetas con sección central, 40 mm² (22, 44 y 88 MPa) y 360 kg para las probetas con 80 mm² de sección (44 MPa).

En cada ensayo se obtuvo el registro de tiempo-temperatura por un lado y la deformación que sufre la probeta, con un sistema de extensometría avanzada [3.9]; en este caso un extensómetro óptico permitió medir desplazamientos desde el exterior de la cámara de ensayo sin entrar en contacto con la probeta, ver Figura 3. 22. Para ello inicialmente las probetas se pintaron con pintura resistente a altas temperaturas. El

dispositivo lo que analizó fue el desplazamiento de las motas de pintura. Este registro sólo se realizó para el ensayo aplicando una carga de 360 kg y 80 mm² de sección útil.

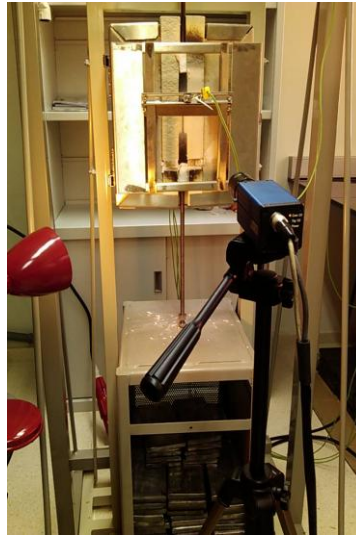


Figura 3. 22. Dispositivo de captación de imágenes VIC, para la medida de deformaciones.

Geometría de la probeta

Para el ensayo de fuego bajo la curva ISO 834 con carga constante, la probeta que se utilizó tuvo la geometría que se presenta en la Figura 3. 23:

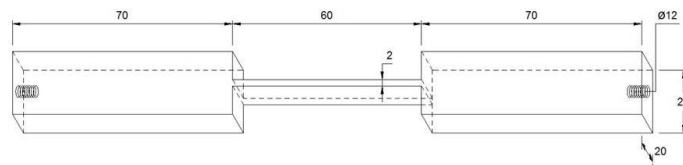


Figura 3. 23. Geometría de la probeta del ensayo de tracción bajo curva ISO 834 y carga constante.

4. Referencias

[3.1] UNE-EN 10025-3:2006, Productos laminados en caliente de aceros para estructuras. Parte 3: Condiciones técnicas de suministro de los aceros estructurales soldables de grano fino en la condición de normalizado/laminado de normalización.

[3.2] UNE-EN ISO 643:2003, Acero. Determinación micrográfica del tamaño de grano aparente.

[3.3] UNE-EN ISO 10002-1, Materiales metálicos. Ensayos de tracción. Parte 1: Método de ensayo a temperatura ambiente.

[3.4] UNE-EN ISO 6892-1:2010, Materiales metálicos. Ensayo de tracción. Parte 1: Método de ensayo a temperatura ambiente.(ISO 6892-1:2009).

[3.5] UNE-EN ISO 6892-2:2011, Materiales metálicos. Ensayo de tracción. Parte 2: Método de ensayo a temperatura elevada. (ISO 6892-2:2011).

[3.6] UNE-EN 1015-2:1999/A1:2007, Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 2: Toma de muestra total de morteros y preparación de los morteros para ensayo.

[3.7] UNE-EN 1015-11: 2000, Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido.

[3.8] UNE-EN 1363-1:1999, Ensayos de resistencia al fuego. Parte 1: Requisitos generales.

[3.9] M. Iordachescu, A. Valiente, L. Caballero, D. Iordachescu, J.L. Ocaña, J. A. Porro. "Laser Shock Processing influence on local properties and overall tensile behavior of friction stir welded joints. Surface and Coatings Technology 206 (2012) 2422-2429.

RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN

Capítulo IV: Resultados experimentales y discusión.

1. Introducción

En este capítulo, se presentan los resultados experimentales obtenidos en la presente Memoria de tesis, junto a la discusión que se hace de los mismos.

Como ya se ha indicado anteriormente, se ha trabajado con diferentes materiales estructurales, constituyendo el acero al carbono el punto principal de referencia en el trabajo desarrollado. Todos los aceros al carbono con los que se trabajó se adquirieron al inicio de la presente investigación, para garantizar que fueran de un mismo proceso de colada y conformación bajo Euronorma. A pesar de ello, se estimó de interés una valoración de las microestructuras de dichos aceros tanto a temperatura ambiente como cuando éstos fueron sometidos a calentamiento a temperaturas de 500°, 650°, 800° y 950 °C, seguido posteriormente de un proceso de enfriamiento a temperatura ambiente.

Es cierto que los aceros estructurales con los que se operaron, S355NL, S460NL y N son de naturaleza ferrítico-perlítica y están bien referenciados, no obstante se estimó de interés conseguir tener una información directa de los mismos para poder realizar posteriormente una comparación de las microestructuras de los aceros sometidos bajo ensayo de fuego normalizado.

En todas las situaciones los aceros fueron sometidos a ensayos mecánicos, como las determinaciones de las durezas y los ensayos de tracción, tanto a temperatura ambiente como después de los correspondientes ensayos de fuego.

Una situación análoga se obtuvo cuando los materiales que se ensayaron como aislantes de los aceros, fueron los morteros, en donde se realizaron los siguientes ensayos de caracterización de los mismos, determinación de agua libre, transformaciones ATP/TG, porosidad y distribución de poro. También se consideraron los ensayos mecánicos de compresión y flexo tracción antes y después de ser sometidos a la prueba de fuego.

Todos los materiales que se seleccionaron para la realización del presente estudio, fueron sometidos a ensayos de fuego normalizado, considerándose la posibilidad de empleo del modelo de fuego externo y de fuego estándar, distinguiéndose

en este último, la posibilidad de fuego por una cara y de fuego envolvente, tanto en los supuestos de utilización de forma individualizada como de forma combinada para el estudio del aislamiento de los aceros estructurales. En todas las situaciones se trabajó con los materiales sin cargar. Para el caso del acero al carbono, también se consideró el estudio del comportamiento de éstos en estado cargado, para lo que fue necesario utilizar un nuevo dispositivo para evaluar esta circunstancia y también registrar las deformaciones asociadas al fenómeno de carga cuando se considera un campo de temperatura en régimen transitorio.

En todos los casos se obtuvieron los correspondientes registros temperatura tiempo de los materiales ensayados en diferentes puntos de las probetas siguiendo el sentido del gradiente térmico del ensayo de fuego que siempre es en régimen transitorio. Con esta información, se dedujeron los correspondientes gradientes de las temperaturas en los materiales a diferentes instantes de tiempo, lo que permitió tener un mapa de las evoluciones de los campos de las temperaturas en cada material y circunstancia en cada ensayo.

Todo ello, sirvió para informar del fenómeno de oxidación severo que sufrieron los aceros ensayados, así como el deterioro de los morteros en las superficies. Por ello, en el caso de los aceros se estimó de interés el realizar los correspondientes análisis por difracción de rayos X para estudiar la morfología de las capas de óxido aparecidas.

La norma europea que trata del diseño de las estructuras de aceros cuando se produce un incendio considera que los diferentes elementos estructurales presentan una distribución uniforme de las temperaturas, lo que lleva a que los diferentes elementos no presenten gradiente de temperatura en su interior, aspecto este que tan solo compatible cuando los espesores son muy pequeños, de algunos pocos milímetros, lo que no se ajusta a la realidad del diseño de los elementos estructurales, salvo en los casos de fuego envolvente. Por ello, se consideró de interés que a partir de los datos experimentales temperatura tiempo en ensayos de fuego por una cara, se resolvieran las ecuaciones de transporte de calor con objeto de deducir los perfiles de temperatura en el interior de los materiales, lo que permitiría obtener los coeficientes de transmisión de calor por convección y las emisividades en la superficies para la transmisión de calor, compararlos con los valores que propone la norma y finalmente valorar el fenómeno de la aparición de capas de óxido sobre las superficies que tampoco trata la norma europea.

2. Análisis de los materiales estructurales ensayados

Se tendrá en cuenta en primer lugar los aceros al carbono estudiados antes y después de ser sometidos a temperatura elevada, valorándose tanto las propiedades mecánicas como la caracterización estructural de los mismos. En segundo lugar, se tendrán en consideración los morteros estudiados, valorándose los ensayos de caracterización y las propiedades mecánicas de los mismos.

2.1. Aceros al carbono a temperatura ambiente

A continuación se presenta el estudio que se realizó a los aceros estudiados, S355NL, S460NL y S460N, teniéndose en consideración las observaciones micrográficas realizadas y la obtención de algunas de sus propiedades mecánicas, como fueron la dureza y aquellas que se dedujeron de los ensayos de tracción.

2.1.1. Microestructura de los aceros

En las Figura 4. 1, Figura 4. 2 y Figura 4. 3 se muestran las micrografías obtenidas mediante microscopía óptica de los distintos aceros con los que se trabajó. Se obtuvieron micrografías de las tres secciones, en sentido de laminación y perpendicular a la laminación (longitudinal y transversal). Con objeto de no hacer una carga excesiva de información, se ofrecen los resultados obtenidos en posición perpendiculares a la laminación debido a que la estructura fue similar.

Se observó que la microestructura de las muestras de partida estaba constituida por granos equiaxiales de ferrita, característicos de un recristalizado, cuyo tamaño promedio se determinó usando el método de intercepción lineal o de Heyn, y en el caso del acero S355NL fue de 10 μ m, en el S460NL de 8 μ m y en el S460N de 7 μ m.

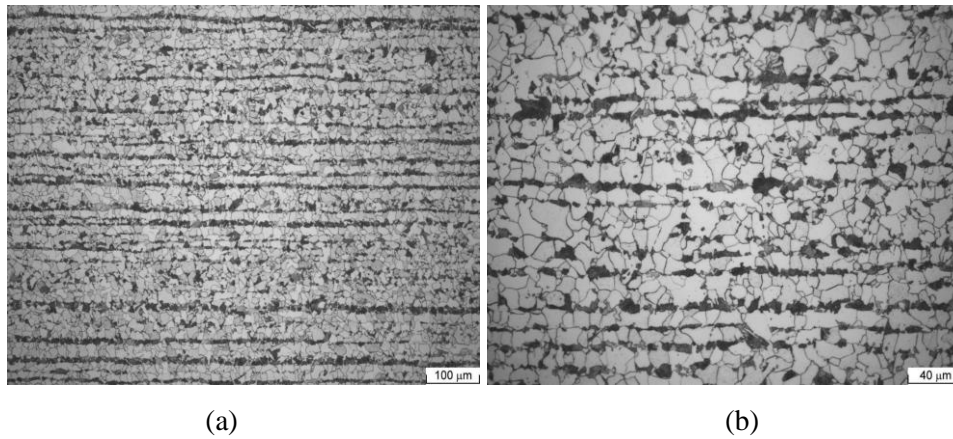


Figura 4. 1. Micrografía obtenida por MO del acero S355NL: (a) 200x, (b) 500x.

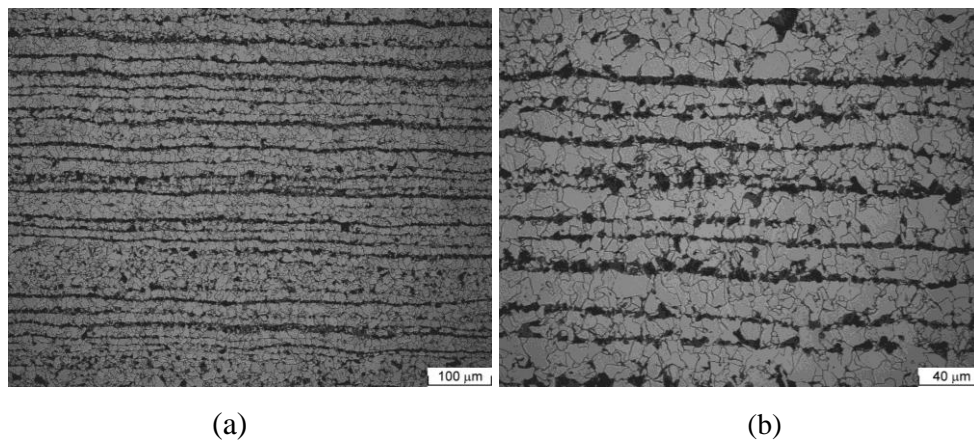


Figura 4. 2. Micrografía obtenida por MO del acero S460NL: (a) 200x, (b) 500x.

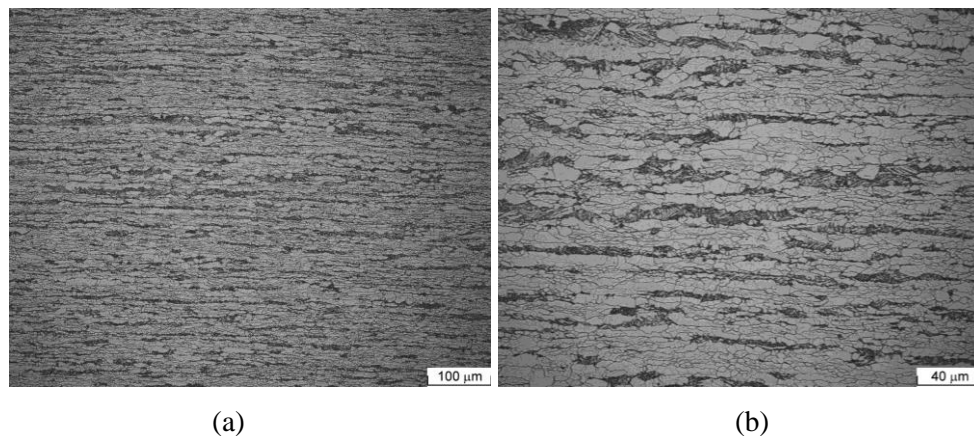


Figura 4. 3. Micrografía obtenida por MO del acero S460N: (a) 200x, (b) 500x.

Se pudo observar que los aceros S355NL y S460NL presentaban una distribución en bandas unidireccionales que seguían la dirección de corte de las probetas, constituidas por perlita fina (bandas oscuras), formada por ferrita más

cementita (Fe_3C), y ferrita (bandas claras), microestructura característica de los aceros hipoeutectoides ($\text{C} < 0.8\%$). El acero S460N tenía la misma estructura en bandas de ferrita y perlita, ligeramente más fina y se observó que además de la perlita y de los granos de ferrita, había zonas de bainita acicular (banda oscura), posiblemente debido a que la colada de la cual provino dicho acero se enfrió con una velocidad superior a $10\text{ }^\circ\text{C/s}$, [4.1].

Las siguientes micrografías obtenidas por microscopio electrónico de barrido revelaron las colonias de perlita para cada uno de los aceros, ver Figura 4. 4. En este caso, tal y como se indica en el párrafo anterior, se observaron las bandas de perlita fina, en donde las zonas claras son cementita y las bandas oscuras ferrita.

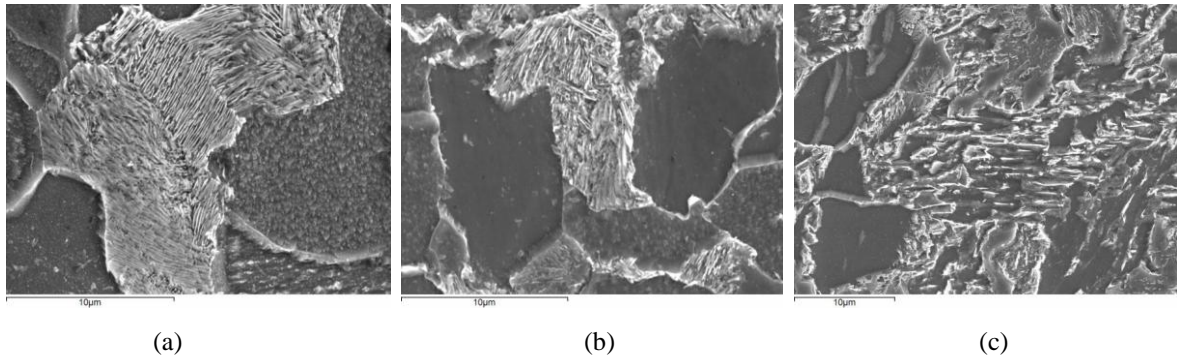


Figura 4. 4. Micrografías de la perlita de los aceros (a) S355NL a 5000x, (b) S460NL a 5000x y (c) S460N a 3000x, obtenidas por MEB.

2.1.2. Ensayos de tracción y de dureza de los aceros

A partir de los datos de los ensayos de tracción que se realizaron se dedujeron los siguientes gráficos de tensión-deformación y de ellas se obtuvieron las propiedades mecánicas que se presentan en la Tabla 4. 1, dicha información se obtuvo para los tres aceros en sentido de la laminación y para el acero S355NL y el S460NL perpendicular a ella, ver Figura 4. 5.

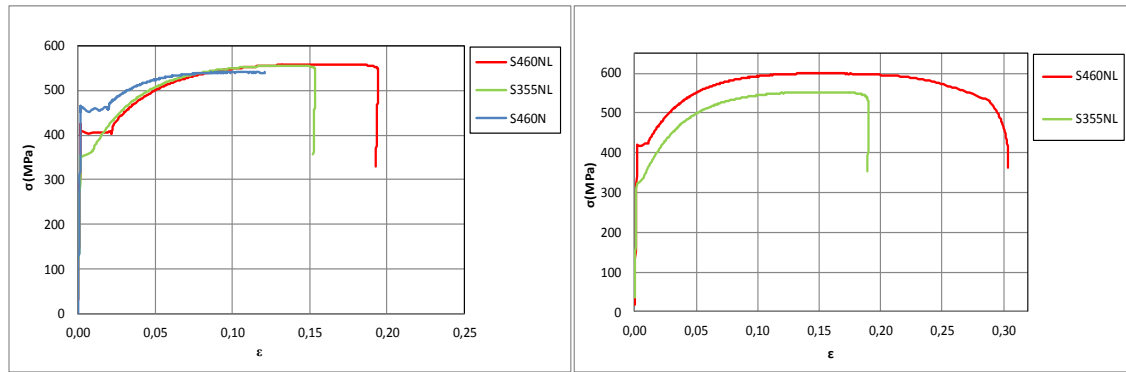


Figura 4. 5. Gráficas tensión-deformación para los aceros S355NL, S460NL y S460N en el estado de recepción, sentido de laminación (izqda) y perpendicular (dcha).

Se observó diferencia entre el comportamiento de los tres aceros, aunque ésta no fue muy acusada. Posteriormente se demostrará que tampoco difieren en exceso en su comportamiento cuando se ven sometidos a la acción del fuego. El acero S460NL presentó una resistencia máxima ligeramente superior a los otros dos.

También se midieron las durezas Rockwell B de cada uno de los aceros antes de someterlos al ensayo de las curvas de fuego, mediante un durómetro Centauro RB2, generando los resultados que se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 4. 1. Propiedades mecánicas de los aceros S355NL y S460NL en el estado de recepción.

Acero	Resistencia máxima (MPa)	Módulo elástico (GPa)	Límite elástico 0.2%(MPa)	Estricción (%)	Dureza Rockwell B
S355NL	556	203	353	75	82
S460NL	561	218	407	77	86
S460N	544	197	450	76	89

A la vista de los resultados de dureza se puede deducir que la variación de las mismas entre los aceros no fue superior al 10 %, siendo la de menor valor para el acero S355NL y la de mayor resistencia a la penetración para el acero S460N.

2.1.3. Fractografías de los aceros ensayados a tracción

Las siguientes fotografías, Figura 4. 6, muestran los perfiles de rotura de las probetas de los aceros S355NL y S460NL después de realizarse los ensayos de tracción tal y como se recibió el material. Las fractografías se hicieron para ambas direcciones, la dirección de laminación y su perpendicular.

Se observó que la rotura fue similar, entre las direcciones y entre los aceros. Fue una rotura en forma de copa-cono, se formó cuello debido a la estricción y dejó una macroestructura porosa formada por huecos donde posiblemente se generaron los puntos de rotura.

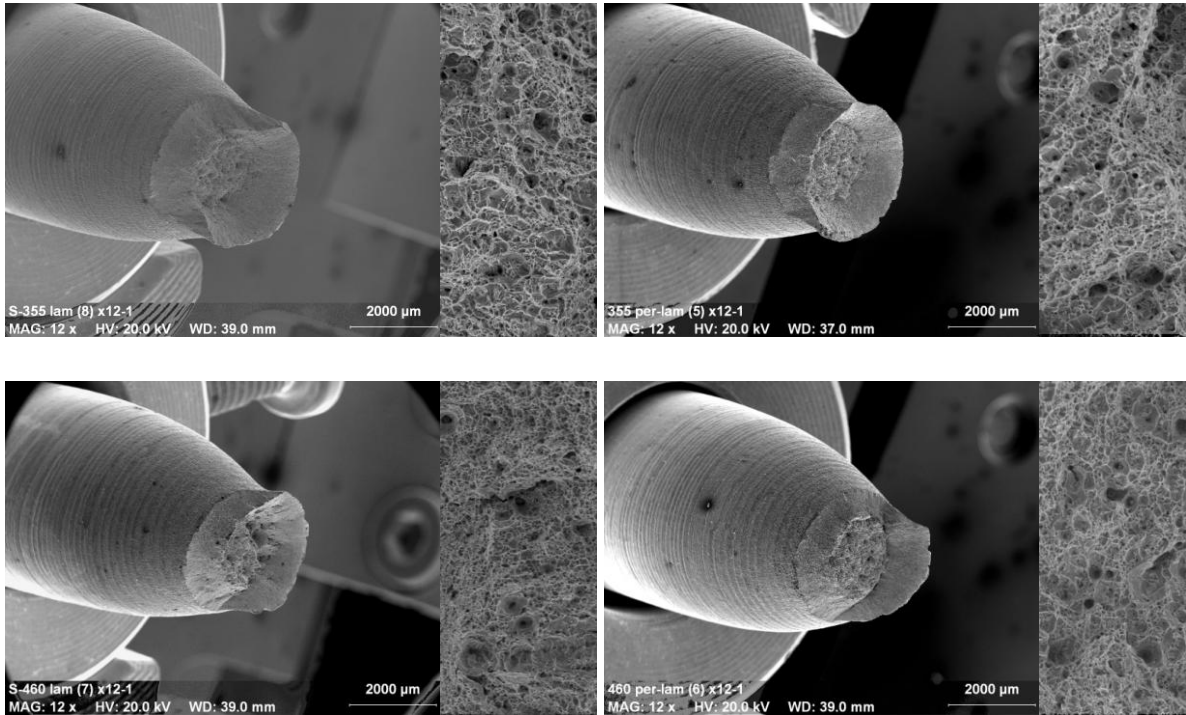


Figura 4. 6. Fractografías de los aceros S355NL y S460NL tras el ensayo de tracción en el estado de recepción y en sentido de la laminación y perpendicular a ella.

2.2. Caracterización de los aceros al carbono a alta temperatura

Los ensayos de caracterización de los aceros seleccionados a temperatura elevada, se hicieron con objeto de tener una referencia para ver cómo era realmente la microestructura y las propiedades físico-mecánicas, al aumentar la temperatura y así, poder comparar el comportamiento de los materiales después de haber sido sometido a la acción del fuego. Todo ello quedará referenciado en las siguientes páginas.

2.2.1. Microestructura

Para la observación de la microestructura de los aceros objeto de estudio en la presente tesis, se escogió un proceso isotérmico a las temperaturas de 620°, 820° y 920 °C, que son significativas para las transformaciones de la estructura de los aceros al

carbono ensayados [4.2]. Se ensayaron unas muestras de tamaño de 20x100x20 mm, cortadas a partir de las probetas iniciales de 200x100x20 mm. Inicialmente se precalentó una mufla hasta que se alcanzaron cada una de las temperaturas. Cuando el acero se mantuvo durante el tiempo programado (30min/pul) a alta temperatura, los cristales de austenita tendieron a crecer y aumentar de tamaño. El tamaño de los cristales del acero después del enfriamiento al aire, dependerá del tamaño alcanzado por los cristales de austenita durante el tiempo de calentamiento por encima de la temperatura de dicha transformación. La observación microestructural se realizó utilizando microscopía óptica.

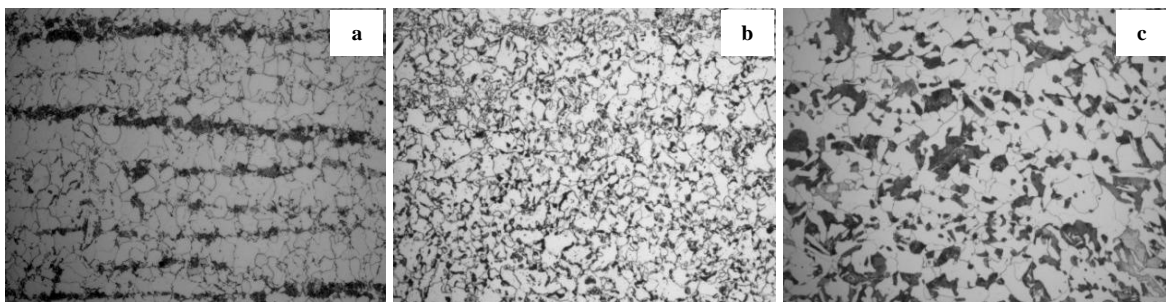


Figura 4. 7. Micrografías a 620 °C (a), 820 °C (b) y 920 °C (c) del acero S355NL (sección longitudinal), x500.

A la temperatura de 620 °C el acero S460NL, no presenta diferencias significativas con respecto a su estado inicial a temperatura ambiente tal y como cabía esperar según el diagrama de fases. Esto se debió a que no se superó la temperatura de austenización, que se sitúa en torno a los 723 °C, en donde la perlita empieza su transformación en austenita. Además la estructura en bandas se mantuvo y el tamaño de grano siguió en torno a los 8 μm , Figura 4. 8a. El acero S355NL mostró la misma tendencia y su tamaño de grano se mantuvo en los 10 μm Figura 4. 7a.

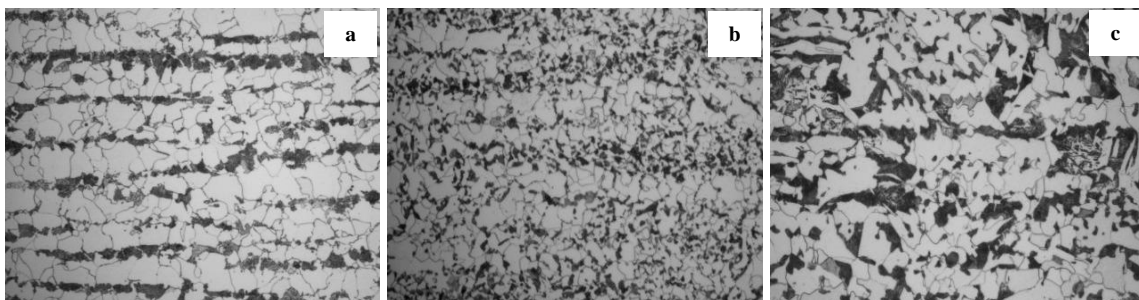


Figura 4. 8. Micrografías a 620 °C (a), 820 °C (b) y 920 °C (c) del acero S460NL (sección longitudinal), x500.

A 820 °C las bandas de ferrita-perlita empezaron a desaparecer. Para esta temperatura el diagrama de equilibrio Fe-C presenta una zona bifásica donde existió ferrita y parte de la perlita se ha transformado en austenita. Después del enfriamiento, la perlita se redistribuye, se globuliza y forma conglomerados con la ferrita, iniciándose así la pérdida de la distribución en bandas. El tamaño de grano del acero S460NL se mantuvo en 8 μm , Figura 4. 8b y 10 μm para el acero S355NL, Figura 4. 7b. También se pudo observar la aparición de algunas segregaciones de manganeso, debido a la composición química de los aceros.

Cuando se alcanzó la temperatura de 920 °C, el acero, según el diagrama de fases, se encuentra en el campo monofásico donde la transformación de perlita a austenita es completa. En el enfriamiento al aire se produjo la transformación inversa, la austenita pasa a ferrita y perlita. Las bandas de ferrita-perlita se desdibujaron más que a 820 °C. En algunas zonas del material, apareció una estructura acicular, grosera, que en algunos casos, se forman a partir de la existencia de austenita, tras un enfriamiento rápido de ésta, al transformarse en ferrita y después de haberse superado al menos los 850 °C, dichas estructuras se denominan Widmanstätten [4.3] y son indeseables ya que fragilizan al material. En las micrografías se observó que ambos aceros experimentaron un ligero aumento en el tamaño de grano, esto se debió a que la temperatura que alcanzó el material fue mayor y por lo tanto la transformación a austenita fue más duradera y sus granos crecieron en mayor medida que a 820 °C. Para el acero S460NL el tamaño de grano pasó a ser de 9 μm , Figura 4. 8c y para el acero S355NL de 11 μm , ver Figura 4. 7c.

2.2.2. Ensayos de tracción y dureza

El ensayo de tracción se llevó a cabo para los aceros S355NL y S460NL a distintas temperaturas, según el protocolo indicado en el apartado 2.1.4.4 del capítulo III. Las gráficas que se obtuvieron se muestran en la Figura 4. 9 y los resultados de los ensayos se recogen en la Tabla 4. 2.

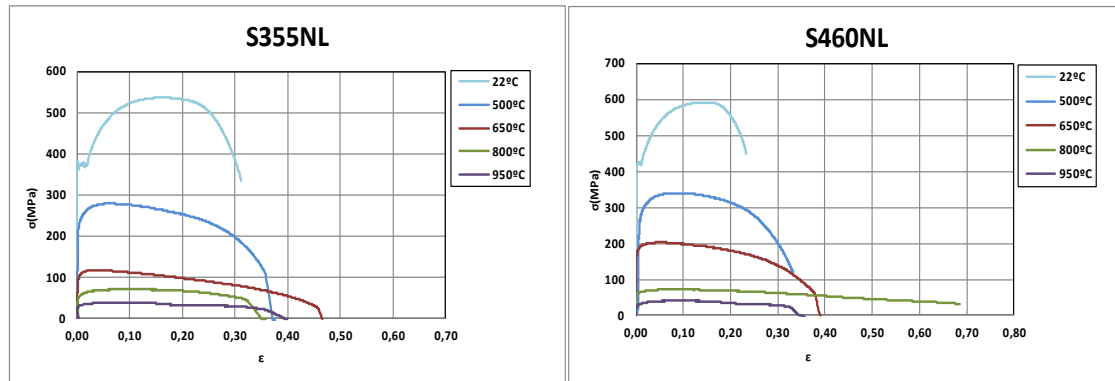


Figura 4. 9, Curvas tensión-deformación de los aceros S355NL y S460NL a 25°, 500°, 650°, 800° y 950 °C.

Tabla 4. 2. Propiedades mecánicas de los aceros S355NL y S460NL.

Acero/ Temperatura	Resistencia máxima (MPa) / Factor de reducción	Módulo elástico (GPa) / Factor de reducción	Límite proporcional 0.2%(MPa)	Estricción (%)	Def. Uniforme (%)	Tamaño de grano medio(μm)	Rockwell HB
S355NL (22°C)	535 / 1	908 / 1	372	62	14	10	82
S355NL (500°C)	283 / 0,53	668 / 0,74	265	82	18	10	82
S355NL (650°C)	119 / 0,22	420 / 0,46	118	83	23	10	81
S355NL (800°C)	71 / 0,13	257 / 0,28	64	42	16	11	80
S355NL (950°C)	38 / 0,07	154 / 0,17	35	40	16	11	80
S460NL (22°C)	580 / 1	1003 / 1	416	70	11	8	87
S460NL (500°C)	339 / 0,58	794 / 0,79	310	81	16	8	86
S460NL (650°C)	203 / 0,35	575 / 0,57	198	81	19	8	86
S460NL (800°C)	69 / 0,12	251 / 0,24	66	50	39	9	81
S460NL (950°C)	40 / 0,07	291 / 0,29	35	40	31	9	81

Para ambos aceros se observó que la resistencia, el módulo y el límite elástico disminuyeron considerablemente con el aumento de la temperatura. El valor de la deformación uniforme aumentó con la temperatura hasta 800 °C, a partir de los cuales se observó que el alargamiento varió en menor grado. La estricción fue notable en los aceros para las temperaturas de 500° y 600 °C debido a la formación de un cuello de menor sección, pero a 800° y 950 °C la estricción no siguió aumentando sino que permaneció prácticamente constante, ello se debió al efecto de fluencia que dio lugar a una reducción de área a lo largo de toda la probeta y sin formación de cuello.

A partir de los registros de tensión deformación para ambos aceros con la temperatura, ver Figura 4. 9, se puede comprobar cómo la morfología de la zona de deformación plástica se modifica con la temperatura, de modo que para 500° y 650 °C la zona de deformación elástica aún permanecía y la zona de deformación plástica con

endurecimiento se mantiene hasta alcanzar el valor de la resistencia máxima de los aceros, que se reduce drásticamente, creciendo en gran medida la zona con deformación plástica por reducción de la sección y estricción hasta la rotura. El comportamiento mecánico de ambos aceros a 800° y 950 °C fue parecido y difiere de la situación anterior, ya que se tuvo una deformación plástica sin apenas estricción y con menor reducción de sección del material y sin que apareciera aumento de la tensión por deformación con endurecimiento.

En la Figura 4. 10 se muestran los valores del factor de reducción experimental de la resistencia frente a los valores que aparecen en la norma EN-1993-1-2, [4.4]. Se pudo observar que entre 450° y 650 °C los valores del factor de reducción fueron del mismo orden que los que predicen la norma. Por extrapolación de los valores experimentales se dedujo que la resistencia de los aceros permanecería constante hasta los 390 °C.

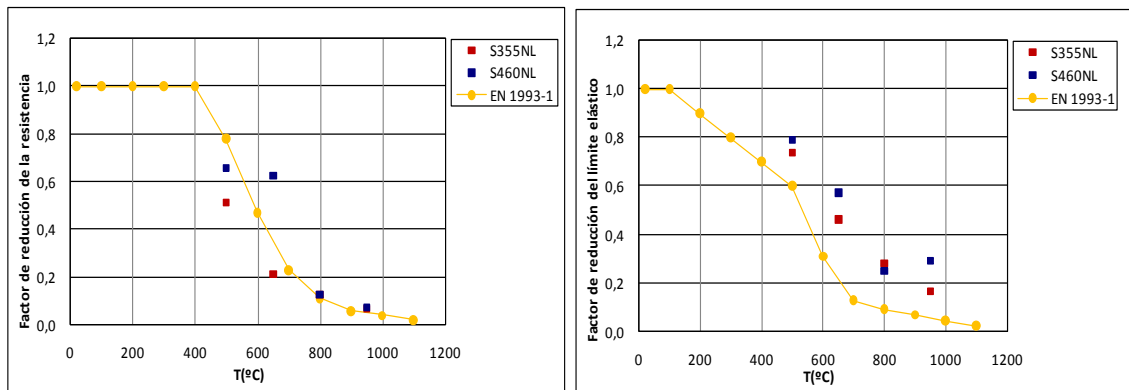


Figura 4. 10. Graficas comparativas entre los valores de los factores de reducción del campo de resistencia y del rango del límite elástico experimental y según la norma EN-1993-1-2.

En el segundo gráfico de la Figura 4. 10, se presentan los valores experimentales para el factor de reducción del límite elástico, pudiéndose observar que se superan a los valores que predice la norma, eso se traduce en una mayor deformación de los aceros mientras se propaga el fuego, aspecto a tener en cuenta, cuando se analice el comportamiento en servicio de los elementos estudiados en un fuego.

A partir de los registros de los ensayos de tracción a temperatura elevada en régimen isotérmico, se observó que la resistencia de los aceros tiene relación con la temperatura del ensayo y con la deformación sufrida, por lo que se estimó de interes,

relacionar todas ellas por medio de la ecuación (4.1). En la Tabla 4. 3 se agrupan los valores de los parámetros de dicha ecuación, junto al resultado del ajuste estadístico de los mismos. En dicho ajuste se ha tenido en consideración que la resistencia máxima permanece sin reducción desde temperatura ambiente hasta los 390 °C, tal como ya se ha enunciado y no hasta los 400 °C que predice la norma EN-1993-1-2, [4.4]

$$R_m = a \varepsilon^b * T^c \quad (4.1)$$

Tabla 4. 3. Valores de los parámetros ajustados para la ecuación 4.1.

	S355NL	S460NL
a	4,924E+14	1,182E+16
b	0,100	-0,534
c	-4,217	-4,877
R²	0,999	0,993

En la gráfica de la Figura 4. 11, se representan los valores de las resistencias experimentales y estimadas para los dos aceros, se observó que el ajuste realizado con la expresión anterior se ajustó correctamente tal y como se indicó anteriormente. Se observa que la resistencia de los aceros está muy influenciada por la temperatura, (varía con una potencia superior a cuatro), siendo esta relación algo menor en el acero S460NL. El peso de la deformación alcanzada es mucho menor en la resistencia de los aceros, observándose que apenas tiene significación para el acero S355NL y variando inversamente para el acero S460NL.

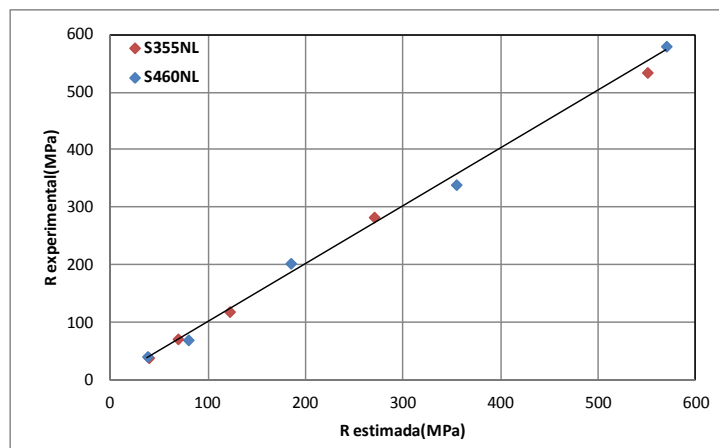


Figura 4. 11. Resistencia estimada frente a la resistencia experimental para los aceros S355NL y S460NL según la expresión (4.1).

2.2.2.1. Estudio microestructural post ensayo de tracción a alta temperatura

Se seleccionaron tres partes diferentes de las probetas ensayadas a tracción para observar la microestructura después del ensayo, Figura 4. 12. Una zona de no deformación que se situó en la parte de la probeta que quedaba en la mordaza. Dentro, en la parte útil de la probeta se seleccionó una zona de mínima deformación situada lo más lejos de la fractura y otra zona de máxima deformación tomada de la parte más cercana a la rotura. Las micrografías obtenidas se presentan a continuación para los aceros S355NL y S460NL después de enfriarse tras los ensayos de tracción realizados a 22°, 500°, 650°, 800° y 950 °C.

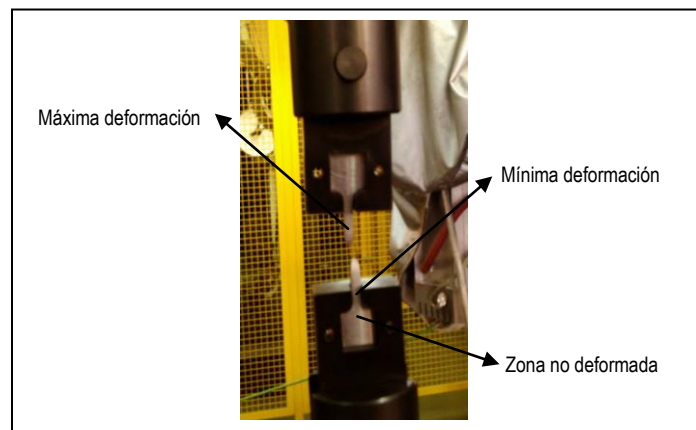


Figura 4. 12. Esquema de las zonas de la probeta tomadas para la observación micrográfica de los aceros S355NL y S460NL después de los ensayos a tracción a temperatura elevada.

En las micrografías de la Figura 4. 13, se observó que tanto para el acero S355NL, como para el S460NL a las temperaturas de 22°, 500° y 650 °C, la zona no deformada y de mínima deformación coincidieron, se mantuvo la distribución en bandas de ferrita y perlita y los granos de ferrita fueron equiaxiales. En las zonas más cercanas a la rotura, es decir, las zonas en donde la deformación fue máxima, se produjo un alargamiento de los granos en la dirección de la carga aplicada en el ensayo, motivado principalmente por la aparición de una estricción muy acusada, ver Tabla 4. 2. Para las temperaturas de 800° y 950 °C, las zonas de no deformación y deformación mínima, se mantuvieron casi como en el estado inicial del material. Para dichas temperaturas en la zona cercana a la zona de rotura no se observó un alargamiento de los granos, como ocurrió a temperaturas menores, ello fue ocasionado principalmente porque para estas temperaturas la estricción producida en los aceros fue de menor intensidad que en el

caso comentado anteriormente, ver Tabla 4. 2, además la deformación uniforme sufrida, no fue definitiva. Solamente a 950 °C se observó un pequeño aumento del tamaño de los granos, efecto que coincidió para ambos aceros después del proceso de enfriamiento a temperatura ambiente, Tabla 4. 4.

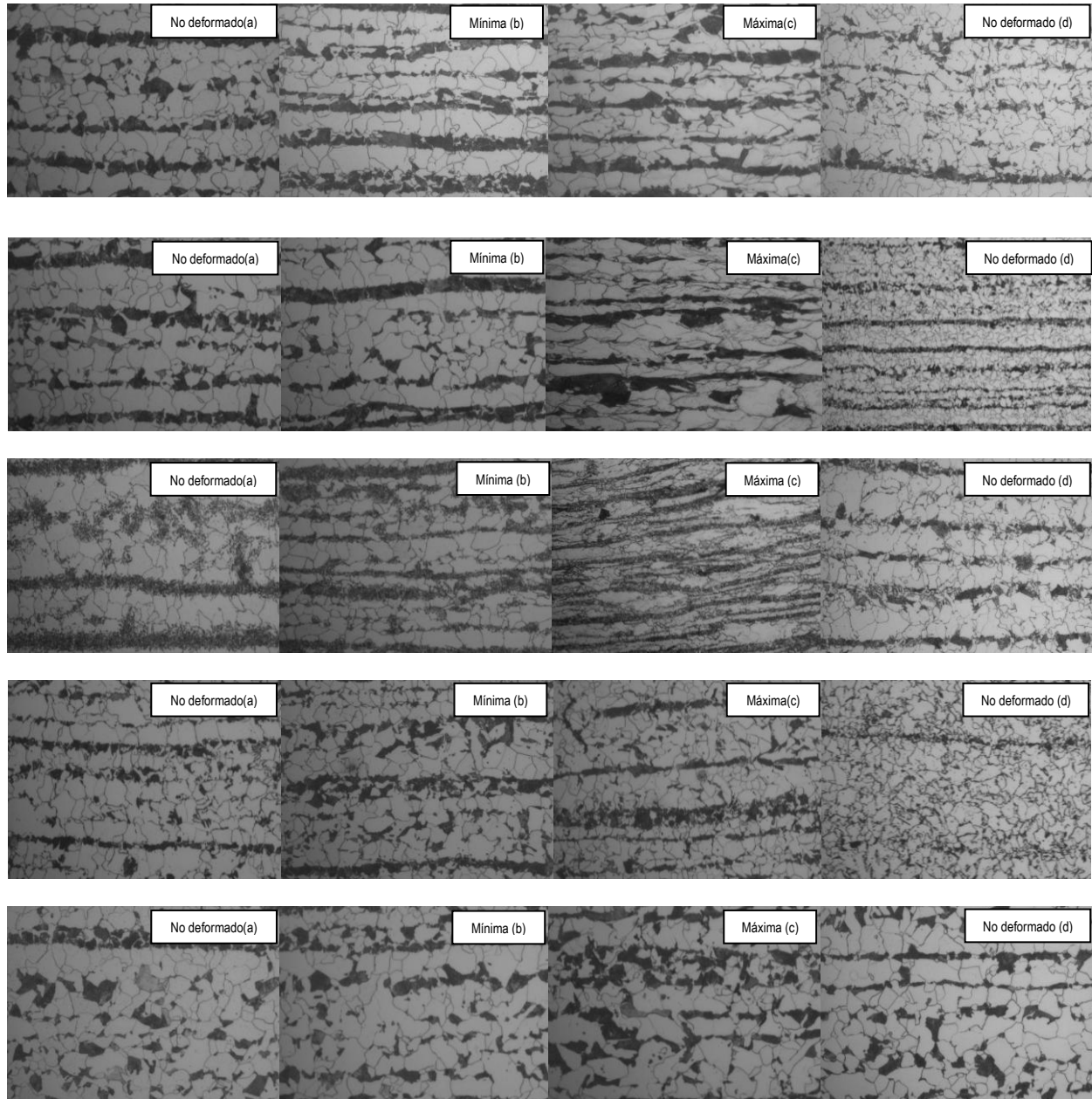


Figura 4. 13. Micrografías de los aceros S355NL y S460NL tras el ensayo de tracción a alta temperatura, x500. (a, zona no deformada del S355NL a 22°, 500°, 650°, 800° y 950 °C. b, zona de mínima deformación del S355NL a 22°, 500°, 650°, 800° y 950 °C. c, zona de máxima deformación del S355NL a 22°, 500°, 650°, 800° y 950 °C. d, zona no deformada del S460NL a 22°, 500°, 650°, 800° y 950 °C).

2.2.2.2. Fractografías de los ensayos de tracción

Se realizaron las macrografías de las zonas de ruptura en los aceros S355NL y S460NL después de los ensayos de tracción a elevada temperatura. Las fotografías que se presentan en las Figura 4. 14, Figura 4. 15 y Figura 4. 16, muestran una comparativa entre los aceros y para los cinco niveles de temperatura a los que se ensayaron los materiales.

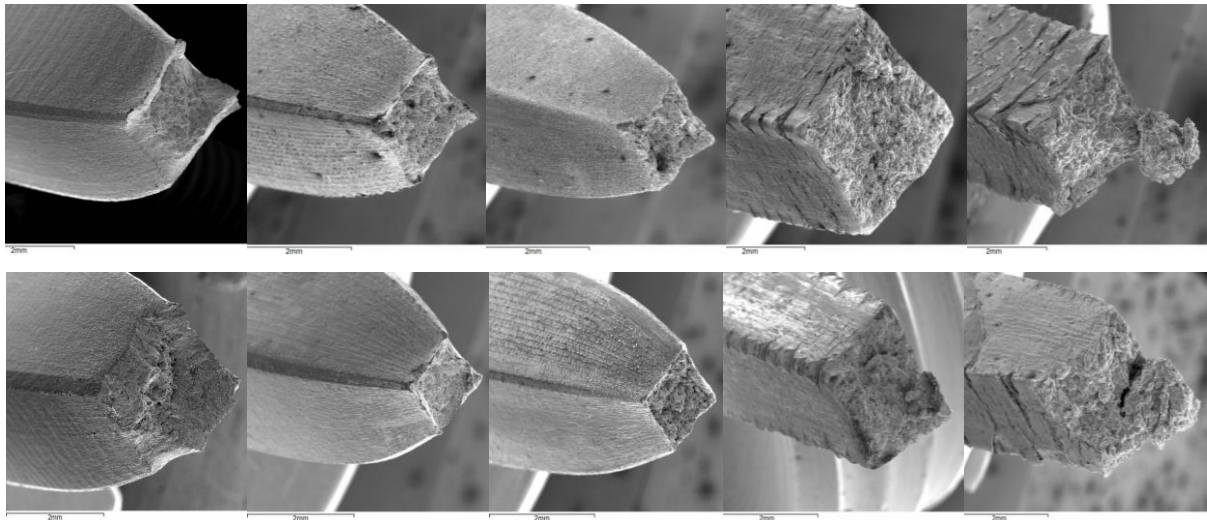


Figura 4. 14. Macrografías del acero S355NL (arriba) y S460NL (abajo) a 22°C x20, 500°C x20, 650 °C x20, 800 °C x20 y 950 °C x15.

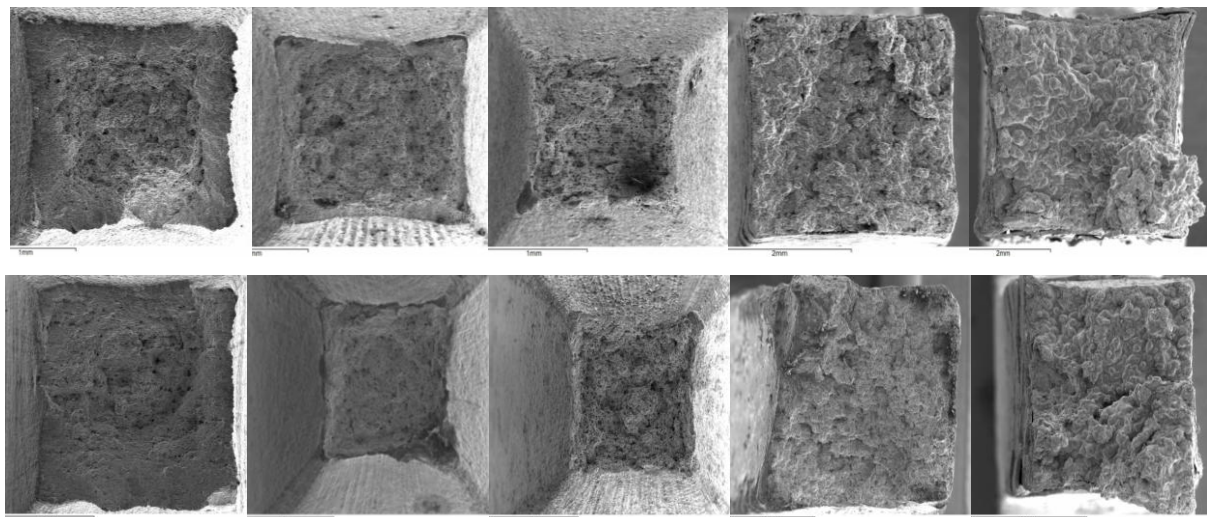


Figura 4. 15. Macrografías del acero S355NL (arriba) y S460NL (abajo) a 22°C x40, 500°C x40, 650°C x40, 800 °C x27 y 950 °C x27.

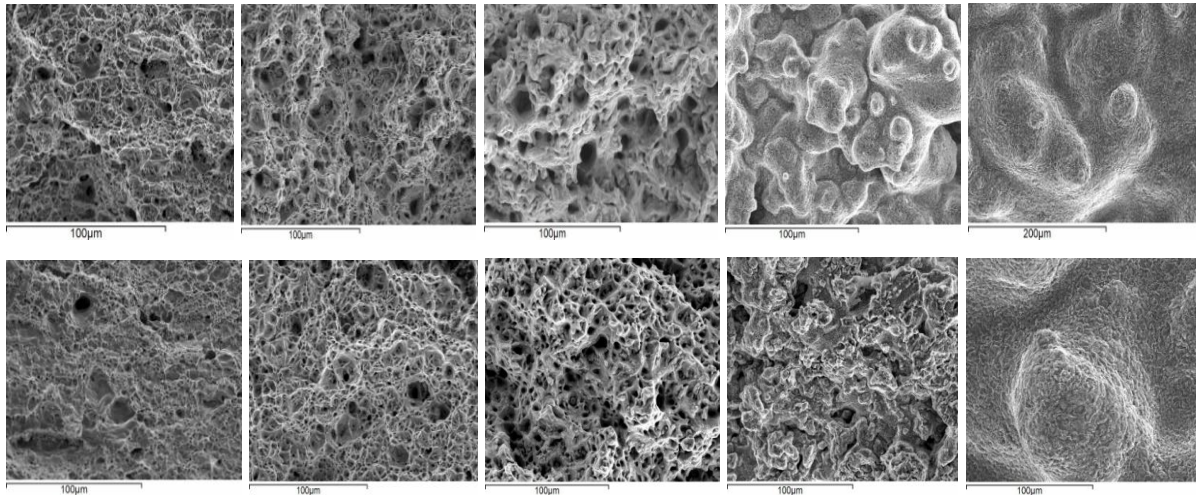


Figura 4. 16. Macrográficas del acero S355NL (arriba) y S460NL (abajo) a 22°C x400, 500°C x400, 650°C x400, 800°C x400 y 950°C x20.

Los dos aceros experimentaron un ligero aumento en su tamaño de grano a la temperatura de 950 °C, pero ésta variación no fue significativa, frente al resto de las temperatura que se mantuvo constante. La dureza también disminuyó ligeramente, pero no más de un 5%, lo que significa que los aceros recuperaron las propiedades durante el proceso de enfriamiento por convección natural y casi en estado de equilibrio.

Tabla 4. 4. Variación del tamaño de grano y dureza Rockwell B para los acero S355NL y S460NL después de los ensayos de tracción a elevada temperatura.

Temperatura (°C)	Tamaño de grano medio(µm)		Dureza (Rockwel B)	
	S355NL	S460NL	S355NL	S460NL
22	10	8	82	87
500	11	8	82	87
650	11	8	81	86
800	11	9	80	81
950	12	11	80	81

Los valores de la dureza que se indican en la Tabla 4. 4, se midieron después de los ensayo y tras el enfriamiento al aire, se observó una ligera reducción de la misma con la temperatura, para el acero S355NL no disminuyó más de un 2% y para el acero S460NL no se redujo su valor en más de un 7%. También se consideró la valorización de la dureza en la zona más cercana posible a la rotura, a pesar de que la zona quedó muy limitada y con una superficie muy reducida tras el ensayo, por ello se deben tomar los valores como meramente orientativos. Para el acero S355NL los valores de dureza Rockwell B que se obtuvieron fueron 70, 63, 68, 66 y 25 a 20°, 500°, 650°, 800° y

950 °C respectivamente y para el acero S460NL fueron 61, 63, 68, 66 y 45 a las mismas temperaturas. Los valores de las durezas determinadas fueron inferiores a los obtenidos en zonas no deformadas de los aceros. En ambos casos hay una ligera tendencia de disminuir con la temperatura, pero no hay una ley clara que las relacione, comprobándose que se produce una disminución importante de la dureza a 950 °C, siendo más importante en el acero S355NL. Dichos valores han de tomarse a modo de orientación debido a la dificultad de selección de la zona y de la determinación de la medida.

En las macrografías de las Figura 4. 14 a Figura 4. 16 se observó que el comportamiento de ambos aceros fue similar. Tanto a temperatura ambiente como a 500° y 650 °C las dimensiones de la base del cuello formado fueron casi del mismo valor. Durante los ensayos se formaron estricciones que generaron un cuello y posterior rotura de la probeta a causa de una nucleación y coalescencia de huecos. La distribución interna de cómo quedó el material tras el fallo, se puede ver en la Figura 4. 16, pudiéndose comprobar cómo la ruptura fue dúctil y que la superficie de fractura tenía un aspecto fibroso.

A 800 °C la reducción de la sección de la zona útil para el ensayo de tracción, fue menor que a temperaturas más bajas, la superficie de fractura presentó una menor porosidad. Un hecho a considerar, fue como al final del ensayo, el aparato detectó el fallo del material, pero al observar la probeta, ésta no mostró una separación nítida, fue preciso el transcurso de varios segundos para que la probeta se separara en dos partes. Todo ello indica que los aceros sufrieron una gran deformación plástica lo que apunta al proceso de fluencia que tuvo lugar, aparecieron múltiples grietas en sentido transversal al tallado de la probeta, ver Figura 4. 14. A 950 °C tanto el proceso de rotura como los cambios en la morfología del material fueron similares, pero algo más pronunciados que a 800 °C.

El proceso de fluencia es de interés y por tanto dominante cuando la temperatura que alcanza el material se encuentra entre el 30 y el 60 % de su temperatura de fusión, circunstancia que ocurre en los aceros ensayados a 800° y 950 °C lo que se corrobora experimentalmente por medio de los ensayos realizados, y se pone de manifiesto por medio de las correspondientes curvas de tensión-deformación y en las imágenes de las estructuras internas de los aceros que realizadas por microscopía óptica. Este fenómeno

de fluencia ocurre por el movimiento de dislocaciones inducido por el alto valor de las temperaturas, lo que condujo a una deformación plástica del material con la aparición de numerosas grietas y sin la estricción de la sección transversal de los aceros ensayados.

2.3. Morteros

A continuación se presentan los diferentes ensayos que se hicieron para caracterizar a los morteros seleccionados antes de someterlos a la acción del fuego. Dichos morteros fueron, uno convencional de base cemento Portland (OPC) y a partir de ese, para poder analizar la respuesta de comportamiento frente al fuego, se adicionó una cantidad de perlita y vermiculita (OPC-P+V). Por otro lado se eligió un mortero de base aluminosa, para poder comparar con respecto a los de base de cemento Portland, también con perlita y vermiculita (Al-P+V) y un último mortero de base aluminosa con perlita y vermiculita donde se sustituyó una pequeña cantidad de cemento aluminoso por humo de sílice (Al+HS-P+V). Los morteros se caracterizaron mediante la determinación de la pérdida de agua y de las transformaciones térmicas mediante la técnica ATD/TG, la determinación de la porosidad y la distribución del tamaño de poros así como la evaluación de las propiedades mecánicas.

2.3.1. Determinación de la pérdida de agua libre

Se realizaron diferentes pesadas de las probetas preparadas, calculando el porcentaje de pérdida de peso correspondiente con la evaporación de agua libre en cada mortero. La eliminación de ésta agua, está relacionado con la porosidad y la distribución porosa. En la Figura 4. 17 se muestra la pérdida de peso referida al peso total de la probeta, se observó que los morteros OPC y Al-P+V fueron los que menos agua perdieron y los morteros con OPC-P+V y Al+HS-P+V fueron los que más fácilmente liberaron el agua en forma de vapor. Se podría decir que no porque haya una base aluminosa o de cemento Portland se sigue un comportamiento similar.

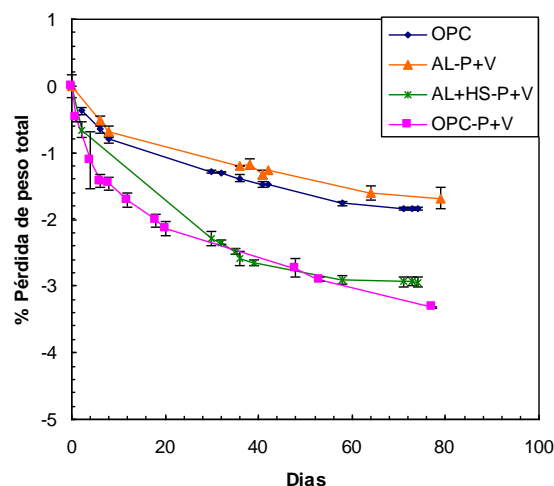


Figura 4. 17. % de pérdida de peso de los 4 morteros referida a peso total en acondicionamiento.

Los porcentajes de pérdida de agua total para los cuatro morteros se muestran en la Tabla 4. 5. En la gráfica de la Figura 4. 17, se presenta la evolución de la pérdida de peso total en función del tiempo para los cuatro morteros preparados, en ella se puede ver dos tendencias bien diferenciadas. Así, la mayor pérdida de agua la experimentó el mortero de cemento Portland con perlita y vermiculita, seguido del mortero aluminoso con humo de sílice con un valor parecido. Los otros dos morteros siguieron una tendencia similar entre ellos y con menor pérdida de peso que los anteriores.

Tabla 4. 5. Pérdidas de peso en acondicionamiento a la atmósfera (%).

Morteros	Días	Pérdida de peso(% peso total)
OPC	74	$1,84 \pm 0,02$
OPC-P+V	90	$3,42 \pm 0,01$
Al-P+V	79	$1,68 \pm 0,17$
Al+HS-P+V	74	$2,94 \pm 0,07$

2.3.2. Transformaciones térmicas de los mortero ATD/TG

Los cuatro morteros se sometieron a dichos análisis obteniendo las transformaciones que tienen lugar al calentar la muestra. En la Figura 4. 18 se presentan los gráficos de los ensayos ATD/TG para los morteros OPC y OPC-P+V. Para el mortero de cemento Portland (OPC) se observaron las siguientes transformaciones:

- a 81°C apareció un pico endotérmico debido a la evaporación del agua libre y de la descomposición de la etringita, se considera hasta 100 °C, con una pérdida de un 2 % en peso.
- de 100° a 390 °C, se produjo la deshidratación del gel CSH, que corresponde con una pérdida del 2% en peso.
- a 410 °C se vio la transformación de la portlandita, Ca(OH)_2 en CaO y H_2O , éste constituye el 1,17% de pérdida de peso del total del mortero.
- a 571 °C se produjo el cambio de fase del SiO_2 de la fase α a la fase β , al ser un cambio cristalino no se observó pérdida de masa.
- a 700 °C el CaCO_3 del filler se descarbonata, formando CaO y CO_2 , con una pérdida de peso del 4,7%.

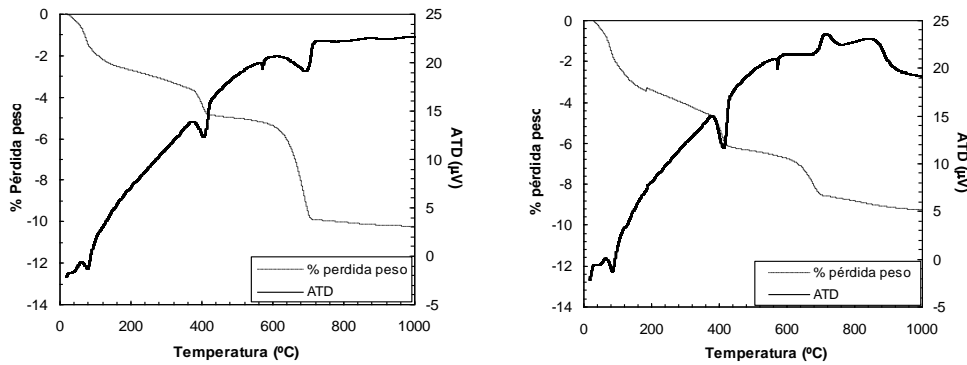


Figura 4. 18. ATD y TG del mortero OPC (izqda.) y OPC-P+V (dcha).

Cuando se introduce perlita y vermiculita en el mortero de cemento Portland (OPC-P+V), los cambios ocurridos fueron los mismos y a las mismas temperaturas que en el caso del OPC, las diferencias fueron debidas al contenido en cemento y en áridos.

En la Tabla 4. 6 se presentan los valores en porcentaje, de la pérdida de peso de las diferentes transformaciones térmicas de las fases de las que se componen los morteros con cemento Portland como base.

Tabla 4. 6. % en peso de las fases en el mortero con cemento Portland.

	H_2O	Gel CSH	Ca(OH)_2	CaCO_3
Temperaturas(°C)	<100°C	100-390	380-437	600-722
OPC	2	2.05	1.17	4.5
OPC-P+V	2.1	2.69	1.51	1.84

En la Figura 4. 19 se presentan los gráficos que se generaron a partir de la técnica ATDs de los dos morteros de cemento aluminoso (Al-P+V y Al+HS-P+V) y que presentaron picos endotérmicos a las mismas temperaturas:

- a 60 °C, ocurrió la deshidratación de $Al_2O_3 \cdot xH_2O$, se considera hasta 100 °C, incluyendo el agua libre.
- el pico a 170 °C se atribuyó a la deshidratación de aluminato cálcico hexagonal hidratado CAH_{10} o C_2AH_8 .
- el pico endotérmico más ancho se relacionó con la deshidratación de C_3AH_6 en el caso de AL-P+V, y de $C_3AS_{3-x}H_{2x}$ para el AL+HS-P+V.
- A 573 °C apareció el pico endotérmico sin pérdida de peso presente en el TG, que corresponde al cambio de fase del cuarzo.
- a 680 °C tuvo lugar la descarbonatación del árido calizo.

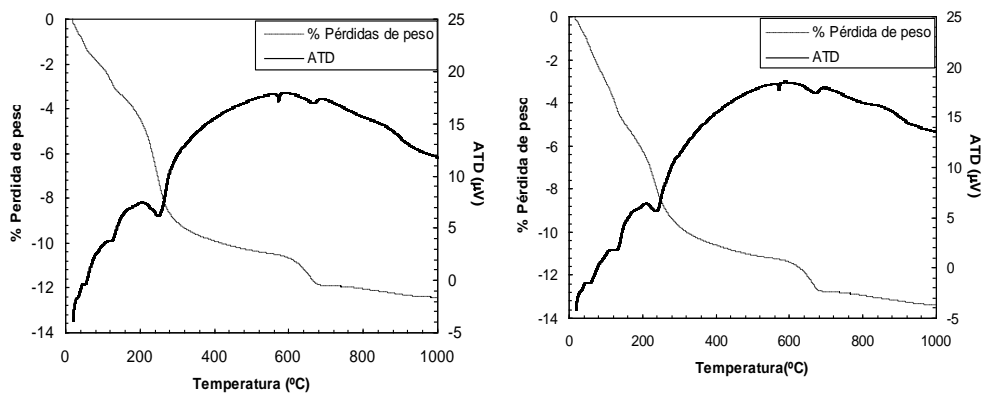


Figura 4. 19. ATD y TG del mortero Al-P+V (izqda.) y Al+HS-P+V (dcha).

A continuación en la Tabla 4. 7 se recogen los valores en porcentaje de la pérdida de peso de las diferentes transformaciones térmicas de las fases que componen a los morteros aluminosos.

Tabla 4. 7. % en peso de las fases en el mortero con cemento aluminoso.

	H ₂ O	CAH ₁₀	AH ₃	C ₃ AH ₆	CaCO ₃
				C ₃ AS _{3-x} H _{2x}	
Temperatura (°C)	<100°C	100-200	220-280	280-350	569-722
Al-P+V	2.17	2.25	3.49	0.95	1.26
Al+HS-P+V	2.99	3.30	2.45	0.93	1.39

En la Figura 4. 20 se comparan las pérdidas de peso referidas a peso en cemento, observándose que la pérdida fue similar para los morteros con cemento Portland hasta 600 °C, ya que el OPC tiene mayor cantidad de filler y las pérdidas de peso a partir de 600 °C son mayores por la descarbonatación del CaCO_3 . Los morteros de cemento aluminoso tuvieron entre ellos una diferencia en la pérdida de peso de un 3%.

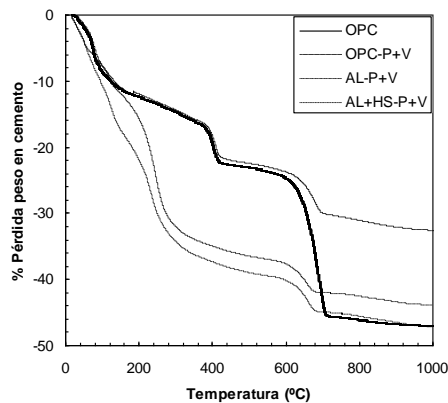


Figura 4. 20. % Pérdida de peso referida a la cantidad de cemento de los cuatro morteros ensayados.

2.3.3. Porosidad y distribución del tamaño de poros.

De las gráficas que se generaron mediante la técnica de la porosimetría por intrusión de mercurio, Figura 4. 21, se dedujo que la porosidad fue mayor para los morteros de cemento aluminoso que para los que se formularon con cemento Portland. En los morteros con base de cemento Portland la sustitución de áridos por áridos de perlita y vermiculita hizo que se aumentara la porosidad, la distribución de los poros de tamaño inferior a $0,05 \mu\text{m}$ fue parecido en ambos, pero en el OPC-P+V se encontró una distribución que contenía poros de mayor tamaño.

Entre los morteros con la base de cemento aluminoso, la sustitución de dicho cemento por humo de sílice hizo que la distribución de tamaño de poros aumentase, para todos los tamaños comprendidos.

Los morteros de cemento aluminoso presentaron unos poros con una proporción mayor de poros entre $0,1$ y $1 \mu\text{m}$, mientras que los de cemento Portland la distribución principal fue de poros de tamaño comprendido entre $0,01$ y $0,1 \mu\text{m}$.

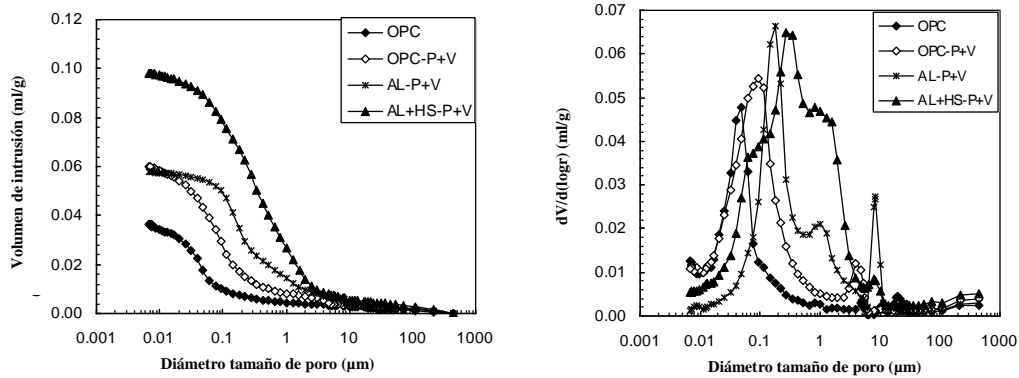


Figura 4. 21. Volumen y Distribución de la porosidad para los morteros OPC, OPC-P+V, AL-P+V y AL+HS-P+V.

2.3.4. Propiedades mecánicas: resistencia a la compresión y a la flexotracción

Los valores de resistencias a la compresión y a la flexotracción se muestran en la Tabla 4. 8. El mortero más resistente a temperatura ambiente fue el que llevaba cemento Portland sin ningún aditivo (OPC), con una resistencia de 90,54 MPa. El mortero con menor resistencia fue el cemento aluminoso con humo de sílice, con un valor de 39,64 MPa. Los morteros tanto de cemento Portland y aluminoso con árido de perlita y vermiculita tuvieron unas resistencias iniciales similares con un valor de 61 MPa.

Tabla 4. 8. Valores experimentales de la resistencia a compresión y flexiotracción de los cuatro morteros ensayados.

	OPC	OPC-P+V	AL-P+V	AL+HS-P+V
Resistencia compresión (90días)	90.54±2.89	61.19±3.21	61.96±1.48	39.64±1.29
Resistencia flexotracción (90 días)	11.3±0.22	12.43±0.84	10.46±0.25	6.87±0.30

3. Ensayos de materiales bajo prueba de fuego

El objetivo de este tipo de ensayo fue obtener los campos de las temperaturas en los aceros ensayados tanto en la cara expuesta al fuego como en la cara en contacto con el ambiente, para lo que fue preciso obtener un registro temperatura-tiempo en diferentes puntos de las superficies de las probetas. Junto con esto se midieron también la temperatura en el ambiente del horno con el fin de comprobar si se ajustaba a la curva de fuego seleccionada según la normativa existente para ensayos de fuego. Un registro

de puntos en diferentes posiciones en ambas caras de la probeta, permitió obtener los gradientes de temperatura, en los ensayos. Para la medida de la temperatura del material ensayado se utilizan termopares calibrados cromo/alumén tipo K.

Las posiciones de los termopares sobre la superficie de las probetas de acero para la medida de las temperaturas se muestran en la Figura 4. 22 como puntos de color verde. Los polígonos numerados como 1, 3, 7, 9, 2, 4, 8 y 10 son a la vez los puntos donde se situaron los termopares, las caras superiores e inferiores miden 2,3 cm y las caras laterales 3,5 cm. El punto 5, se situó en una posición cercana al centro de la probeta y el punto 6 ligeramente desplazado hacia la izquierda y hacia abajo del centro de la probeta. El punto rojo indica el punto donde se situó el termopar dentro del horno y que registró la temperatura en el interior y que estaba separado de la superficie de la probeta 4 cm.

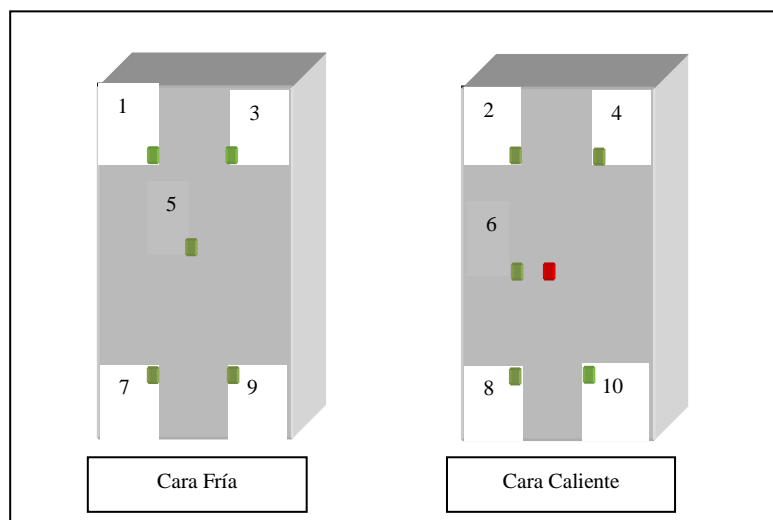


Figura 4. 22. Situación de los termopares para la medida de temperatura en las probetas de acero.

3.1. Aceros al carbono

A continuación se presenta el estudio que se realizó con los aceros S355NL, S460NL y S460N tras someterlos a la acción de fuego por una sola cara y con fuego envolvente, bajo la curva ISO 834 y la curva externa. En las páginas que siguen, se exponen las curvas temperatura tiempo, registradas durante los ensayos y los perfiles de temperatura en función de la posición de los termopares a lo largo del espesor de la probeta.

3.1.1. Fuego incidente por una sola cara

3.1.1.1. Curva ISO 834

En las Figura 4. 23, Figura 4. 24, y Figura 4. 25 se presentan los perfiles de temperatura que se registraron durante la operación del horno bajo un fuego estándar definido por la curva ISO 834, cuando se ensayaron las probetas de los aceros, S355NL, S460NL y S460N. Se puede comprobar que el horno reproduce bien la curva de fuego programada y la correspondiente al modelo dado por la norma.

En cada una de las curvas se incluyen también las temperaturas medidas por los termopares en los puntos indicados anteriormente y sobre las superficies de las probetas, ver Figura 4. 22.

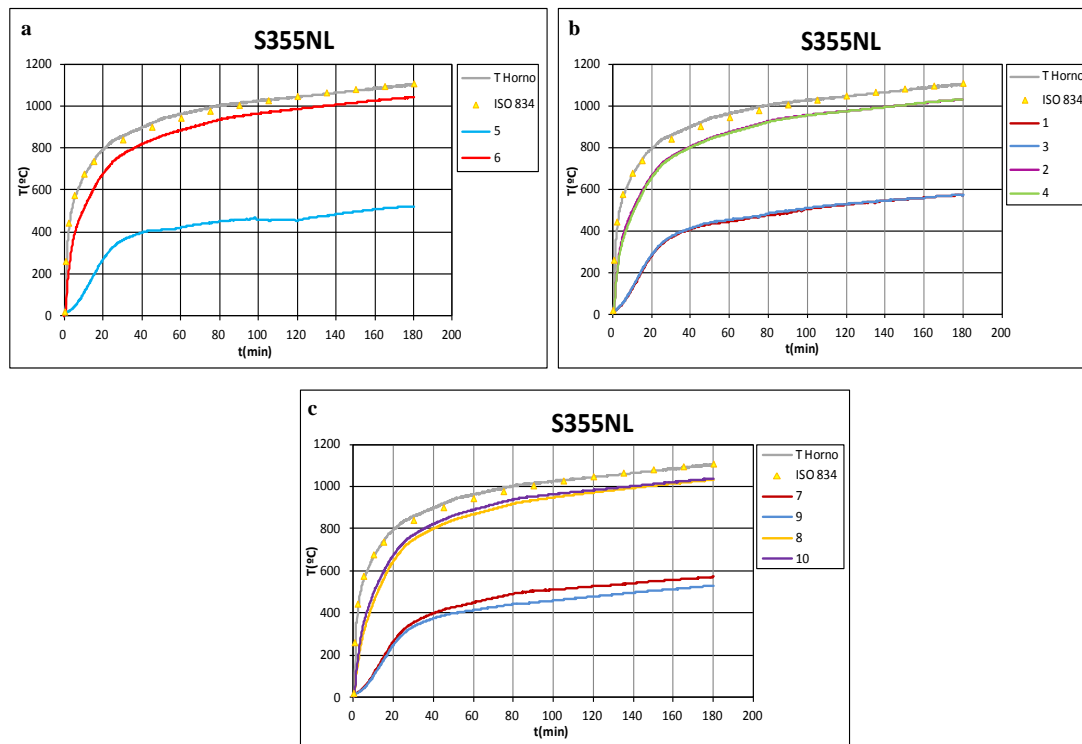


Figura 4. 23. Registros de temperaturas en la probeta de acero S355NL, a) en los puntos 5 y 6 (centrales), b) en los puntos 1, 3, 2 y 4 (superiores), y c) en los puntos 7, 9, 8 y 10 (inferiores), sometido a un fuego estándar bajo curva ISO.

En la Figura 4. 23a se representan los perfiles de las temperaturas en los puntos 5 y 6 de la cara interna y externa del acero S355NL, junto a la temperatura del ambiente del horno y los valores de la temperatura previstos por la curva ISO. Se puede observar una rápida subida de las temperaturas de las caras interna y externa durante los 40

primeros minutos estabilizándose a continuación para terminar con una variación casi lineal de las temperaturas. También se observa una diferencia casi constante entre las temperaturas de la cara interna y externa del acero a partir de los 80 minutos, por lo que se podría indicar que bajo el punto de vista del flujo de calor se ha llegado a un régimen pseudo estacionario.

En la Figura 4. 23b, se han registrado los perfiles de las temperaturas de la cara interna y externa de la probeta de acero en la parte superior, observando que no hay desviación de las temperaturas según la posición medida. Ambos perfiles son coincidentes con los de la Figura 4. 23a. Análoga situación se presenta en la Figura 4. 23c, pero para las temperaturas de la cara interna y externa, en la parte inferior de la probeta, se observó como en la cara externa empieza a haber una desviación entre ambos puntos a partir de los 40 minutos de ensayo, que puede llegar a suponer una diferencia de unos cuarenta grados centígrados. Ello se puede deber a la forma de inicio de la corriente convectiva sobre la vaina del termopar. No obstante dicha diferencia no es significativa, frente a las temperaturas que se registran, que están comprendidas entre 500 y 600 °C.

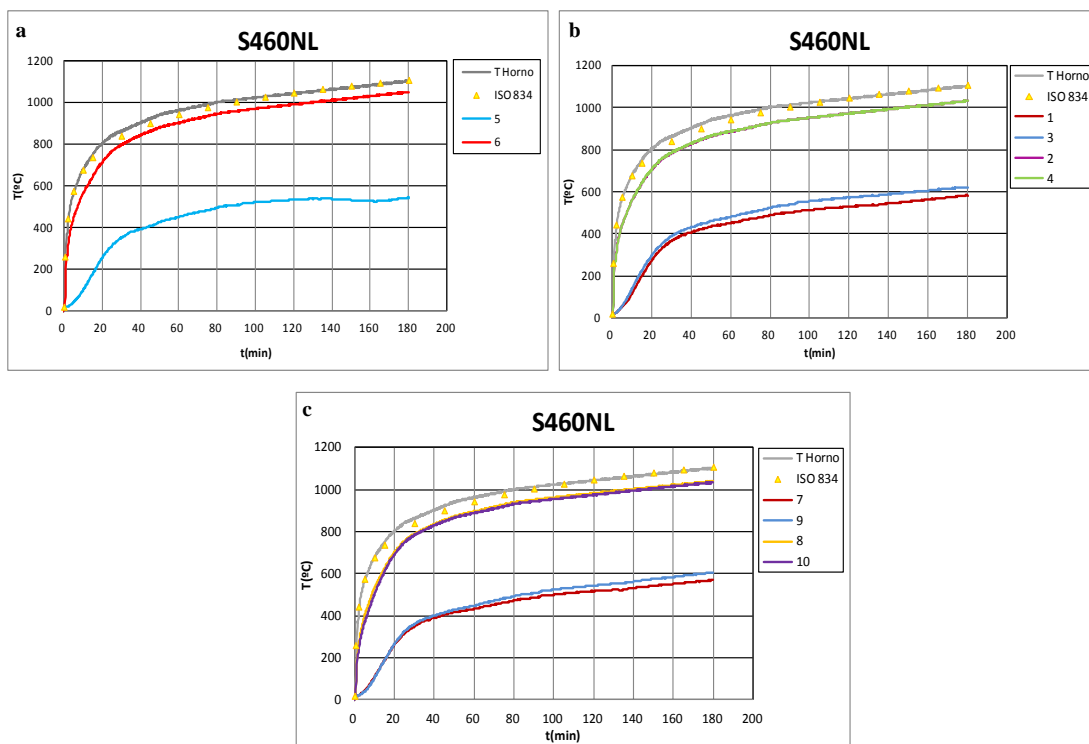


Figura 4. 24. Registros de temperaturas en la probeta de acero S460NL, a) en los puntos 5 y 6 (centrales), b) en los puntos 1, 3, 2 y 4 (superiores), y c) en los puntos 7, 9, 8 y 10 (inferiores), sometido a un fuego estándar bajo curva ISO.

Una situación totalmente paralela se observa en las figuras siguientes, en las que las Figura 4. 24 a, b y c se corresponden al acero S460NL y las Figura 4. 25 a, b y c, al acero S460N. En este último caso, también se han incluido las curvas de enfriamiento de las probetas de acero una vez finalizado el ensayo de fuego y apagado el horno. El enfriamiento se realizó por convección natural tanto en la cara interna como en la cara externa.

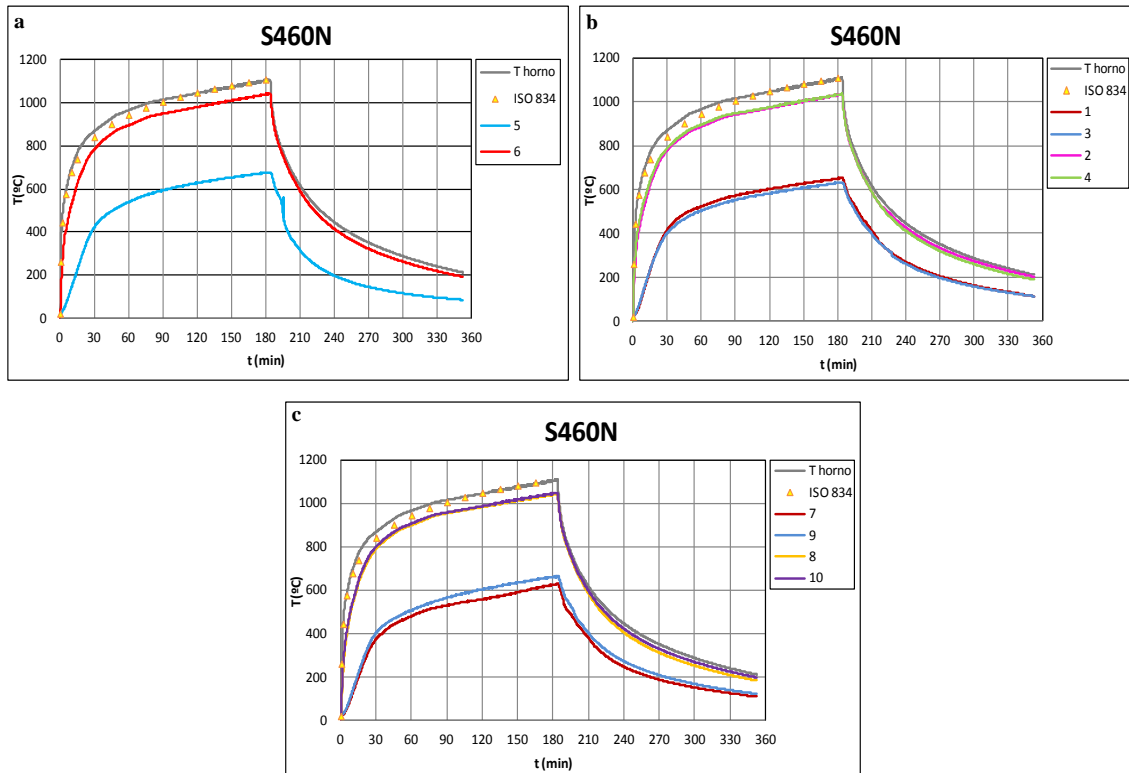


Figura 4. 25. Registros de temperaturas en la probeta de acero S460N, a) en los puntos 5 y 6 (centrales), b) en los puntos 1, 3, 2 y 4 (superiores), y c) en los puntos 7, 9, 8 y 10 (inferiores), sometido a un fuego estándar bajo curva ISO.

En la Figura 4. 26, se presenta un análisis comparativo de todos los ensayos anteriores, bajo curva ISO, donde se pone de manifiesto la coincidencia de los perfiles de temperatura en las caras internas, por lo que se puede concluir que ello se debe a que el fenómeno controlante en la transferencia de calor es por radiación, manteniéndose constante las emisividades de radiación de los aceros a las temperaturas del foco caliente. No ocurre lo mismo en la cara externa, en donde los perfiles no son coincidentes justo en la zona de régimen pseudoestacionario, por lo que se puede sugerir, que ello se puede deber a pequeñas variaciones de la conductividad del medio, que no debe confundirse con la de los aceros, debido a las zonas fuertemente oxidadas que aparecieron en las superficies fría y caliente y que provocan la aparición de dos

resistencias conductivas más importantes que la del acero. Según se indica en el gráfico el acero S460N fue el que sufrió menos oxidación de sus superficies ya que la diferencia de temperaturas entre la cara caliente y fría fue la menor, seguido del S460NL y S355NL. No obstante, las diferencias no son muy acusadas, pero es suficiente para indicar que la conductividad no es constante en los diferentes aceros al carbono, a pesar de que en las normas se da un valor promediado de esta propiedad para las estimaciones en ingeniería.

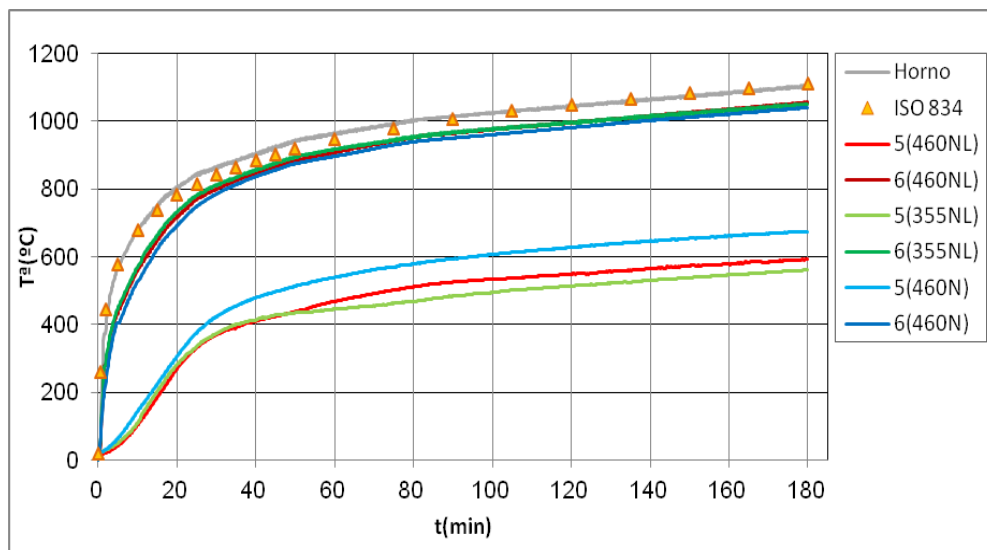


Figura 4. 26. Análisis comparativo del registro de temperaturas de los aceros S355NL, S460NL y S-460-N sometido a un fuego estándar bajo curva ISO 834.

Se realizaron otros ensayos bajo las mismas condiciones de fuego por una cara, usando la curva ISO 834, pero en este caso se tomaron medidas de temperatura a distintas profundidades de las probetas sólo para el acero S460NL. Dichos ensayos generaron un registro de temperaturas a lo largo del espesor de la probeta. Las distancias se tomaron a partir de la cara fría y fueron a 0, 2, 4, 10, 16, 19 y 20 mm de profundidad, siendo 0 mm la cara fría y 20 mm la cara caliente. Se realizaron ensayos a 1 hora, 2 horas y 3 horas, con el fin de poder hacer un estudio del material a tiempos menores de 3 horas de exposición al fuego. En la Figura 4. 27 se pueden ver los registro temperatura tiempo y el gradiente de temperatura a lo largo del grosor de cada probeta para diferentes tiempos.

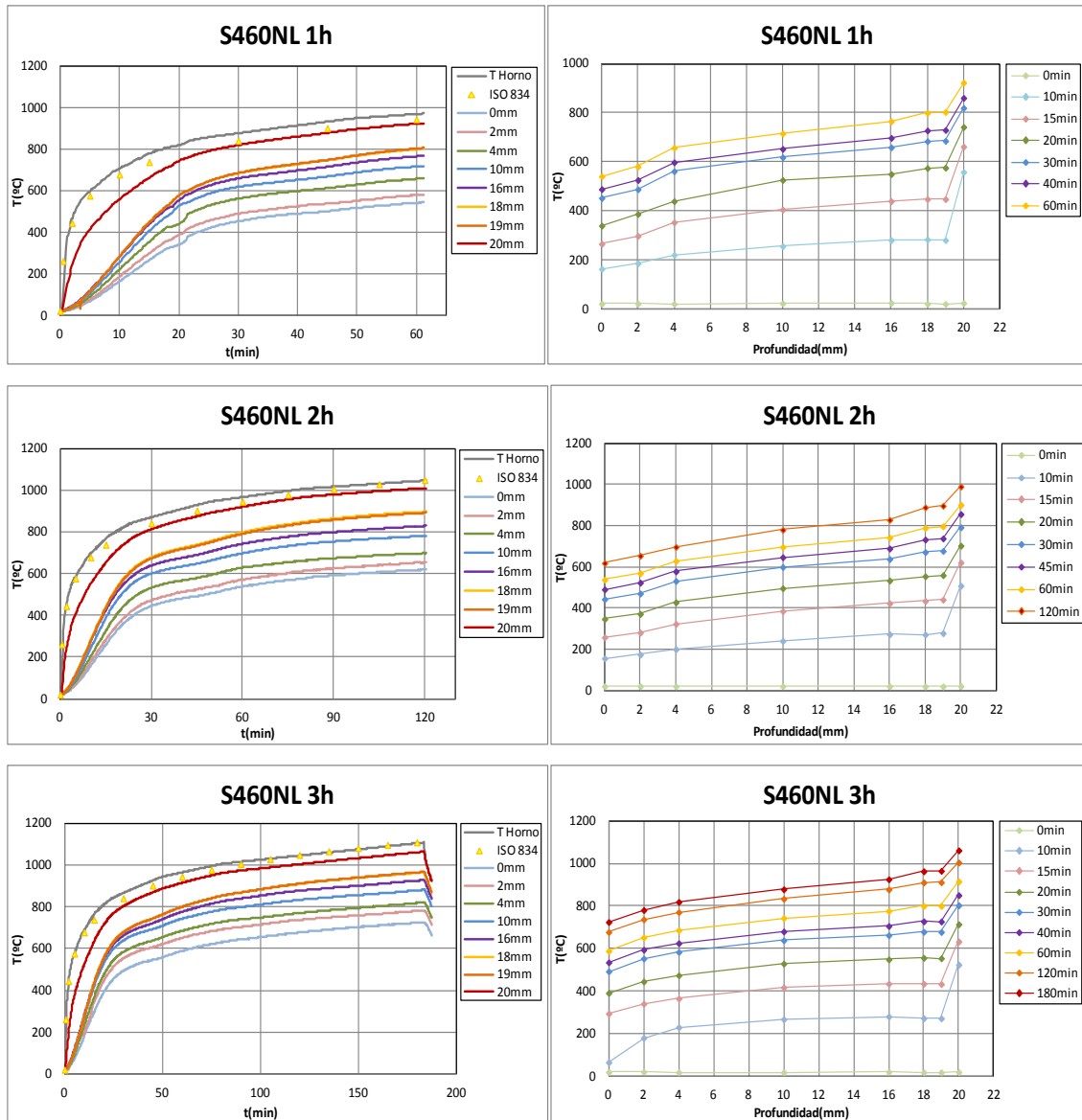


Figura 4. 27. Registros T-t y correspondientes perfiles de T-profundidad del acero S460NL a 1h, 2h y 3h de ensayo de fuego bajo curva ISO 834.

Se puede observar que cada una de las curvas representadas en los registros de temperatura tiempo, corresponden a mayores valores de temperatura según aumenta la profundidad del termopar desde la cara fría. A cada uno de los registros temperatura tiempo le corresponde un gráfico donde se muestra el gradiente de temperatura a lo largo del perfil de la probeta. Dichas curvas representan cada una, mayor temperatura registrada a medida que aumentó el tiempo del ensayo y también con la cercanía del termopar al foco. Se observó un incremento brusco en la zona más próxima a la superficie caliente, y más pronunciado al principio del ensayo cuando el acero aún estaba frío. El Eurocódigo establece que la conductividad del acero decrece entre 20° y

800 °C, a partir de esta temperatura la conductividad se mantiene constante e igual a la mitad de su valor y su resistencia térmica se dobla. Además es importante considerar la fuerte oxidación que se generó en las superficies de las caras fría y caliente del acero, teniendo en cuenta que la oxidación de la cara caliente es mucho mayor. Esta capa de óxido lo que provocó es que la conductividad en dicha zona disminuyese y la resistencia térmica aumentara, tal y como se observa en las gráficas de los gradientes de temperatura de las muestras ensayadas. Este fenómeno es menor en la cara fría de la probeta debido al menor espesor de la capa óxido formada.

3.1.1.2. Curva Externa

En las gráficas de las Figura 4. 28 y Figura 4. 29, se presentan los perfiles de temperatura obtenidos al tomar el registro del horno bajo un fuego definido por la curva externa. Estos perfiles de temperatura corresponden a cada uno de los aceros estudiados, en este caso fueron los aceros tipo S355NL y S460NL.

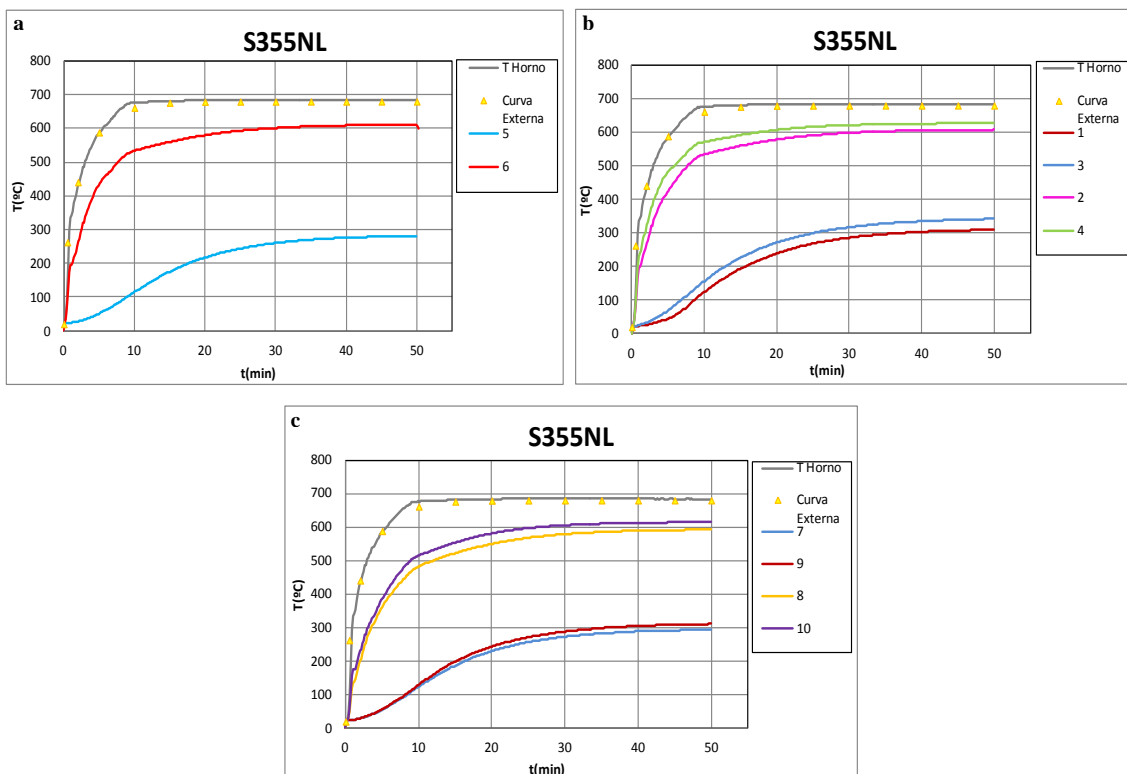


Figura 4. 28. Registros de temperaturas en la probeta de acero S355NL, a) en los puntos 5 y 6 (centrales), b) en los puntos 1, 3, 2 y 4 (superiores), y c) en los puntos 7, 9, 8 y 10 (inferiores), sometido a un fuego bajo curva externa.

La temperatura alcanzada por el horno cuando se operó bajo una curva externa, en la que se puede observar que no superó los 700 °C y en donde a partir de los 25 minutos de ensayo prácticamente se alcanzó la condición de régimen estacionario para el transporte de calor. Las curvas de temperatura registradas fueron prácticamente coincidentes para los aceros y para las posiciones inferiores de los termopares y las superiores de la cara caliente. Se observa también una pequeña discrepancia en algún caso para las posiciones de la cara fría tal como se refleja en las gráficas, ello se pudo deber a la existencia de pequeñas corrientes convectivas alrededor de la vaina del termopar de medida, fenómeno inevitable y que aparece como en los ensayos de fuego ISO.

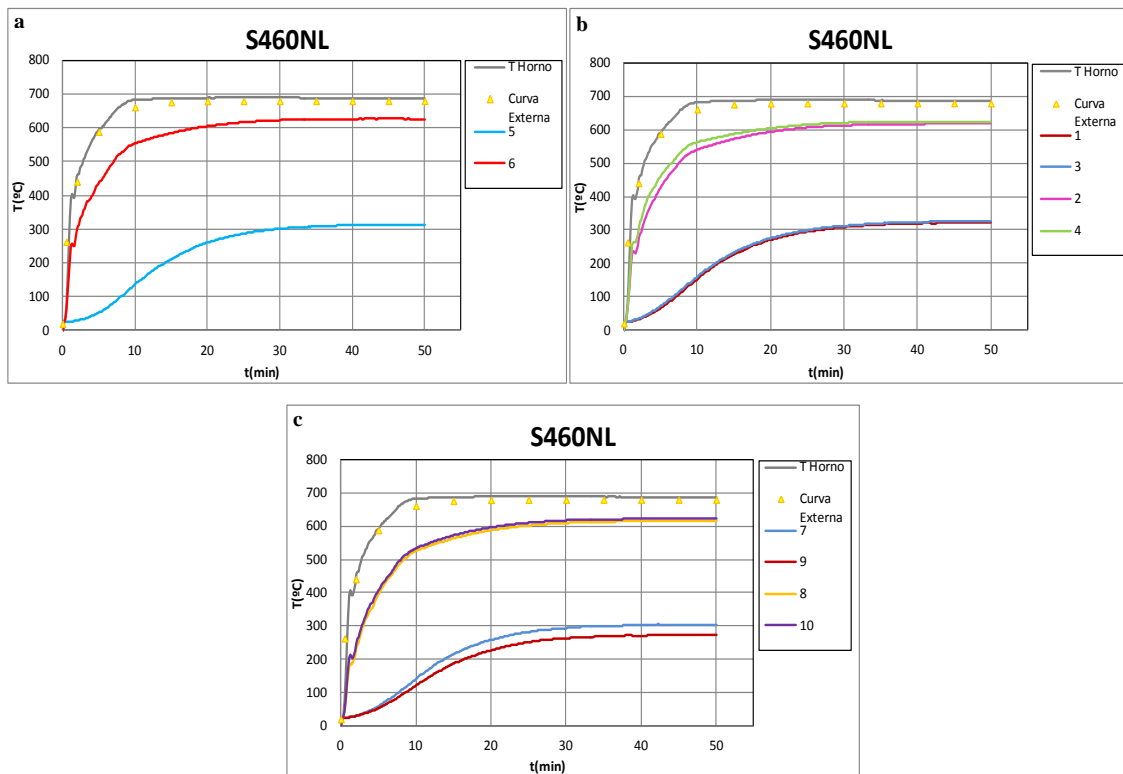


Figura 4. 29. Registros de temperaturas en la probeta de acero S460NL, a) en los puntos 5 y 6 (centrales), b) en los puntos 1, 3, 2 y 4 (superiores), y c) en los puntos 7, 9, 8 y 10 (inferiores), sometido a un fuego bajo curva esterna.

En la Figura 4. 30, se presenta un análisis comparativo de todos los ensayos anteriores, bajo curva externa, donde se observa una pequeña discrepancia entre los perfiles de temperatura tanto en la cara interna como en la cara externa, casi despreciable en la cara interna, pudiendo ser a que debido a la temperatura del foco es

bastante menor que en la curva ISO, la convección natural, puede tener alguna pequeña influencia sobre la transmisión de calor por radiación y más acusada en la cara externa, posiblemente por la misma razón que cuando se trabaja con la curva ISO, pequeñas variaciones en la conductividad de los aceros por su distinta composición.

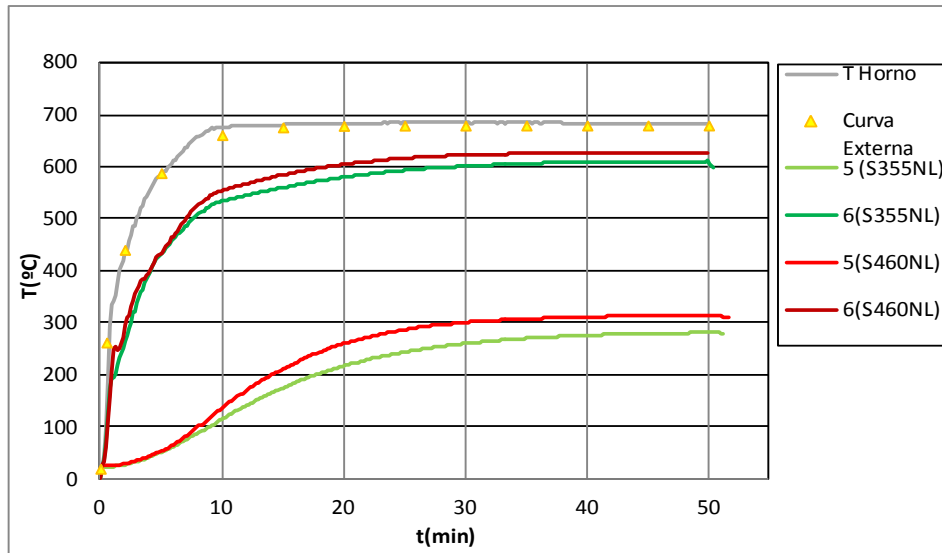


Figura 4. 30. Análisis comparativo del registro de temperaturas de los aceros S355NL y S460NL sometido a un fuego bajo curva externa.

Una vez finalizados los ensayos, se observaron tanto la cara interna como la cara externa de las probetas de los tres aceros ensayados, y aparecía una fuerte oxidación para las dos curvas de fuego, con mayor efecto al usar la curva ISO 834, ver Figura 4. 31, pudiéndose comprobar la aparición de varias capas de óxido. El grado de oxidación hizo que se formara una capa de óxido de mayor espesor en la cara expuesta al foco, ya que la temperatura fue más elevada. En el apartado 4.1.1.3, se presentará el análisis de dicha capa de óxido.

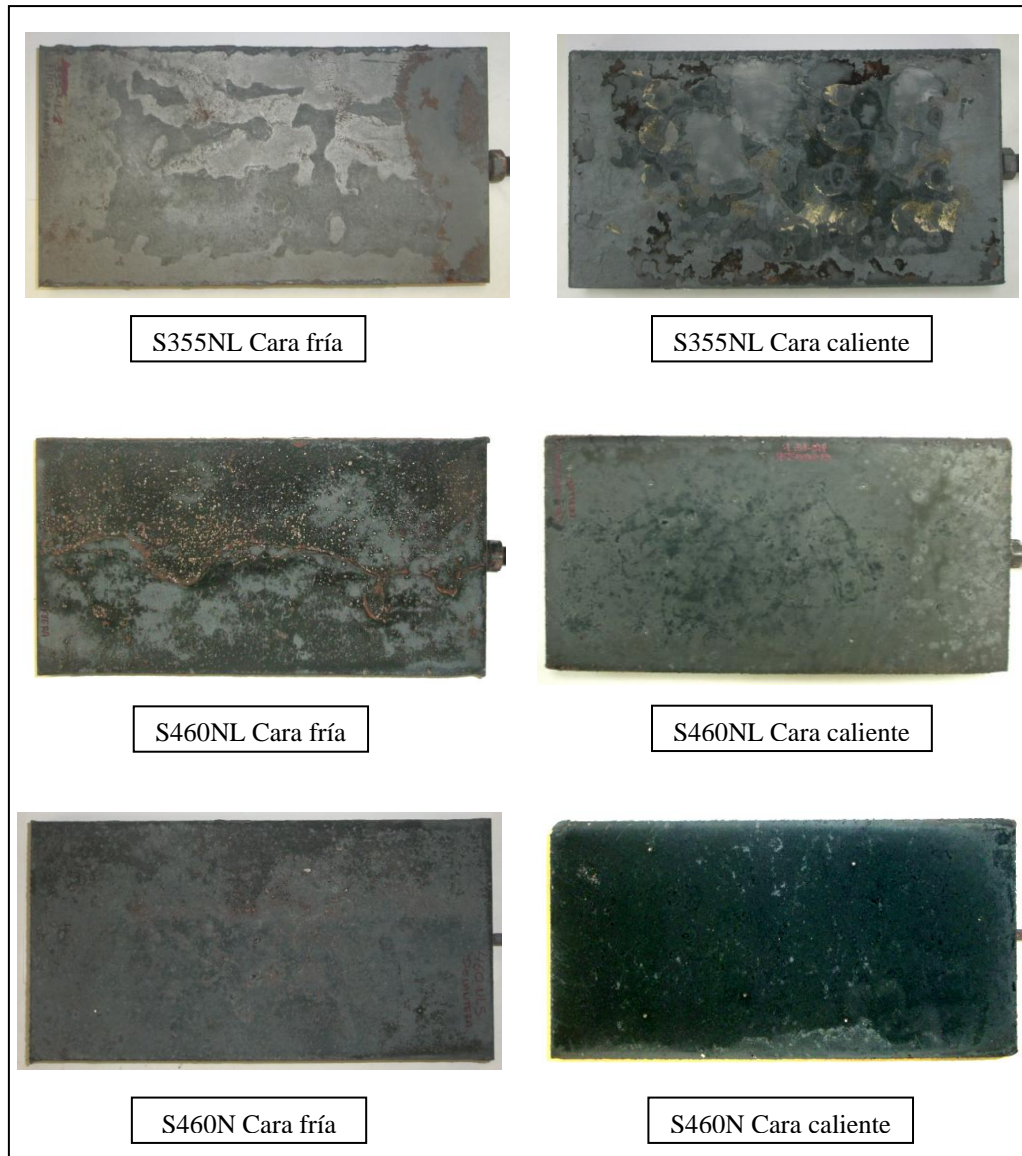


Figura 4. 31. Cara interna y externa de los tres aceros después del ensayo de fuego.

3.1.2. Fuego envolvente. Curva ISO 834

Se ensayaron probetas de los aceros S355NL y S460NL con unas dimensiones de 200x20x20 mm. A continuación se presentan los registros temperatura-tiempo obtenidos durante el ensayo de fuego envolvente bajo un fuego estándar definido por la curva ISO 834.

En las gráficas que se exponen a continuación, Figura 4. 32, se incluyen las temperaturas medidas por los termopares en distintos puntos de las caras de las probetas ensayadas durante un tiempo de 16 minutos, 1 hora y 3 horas. Para el ensayo de 3 horas las temperaturas se midieron únicamente en la superficie, ya que tres horas fueron

suficiente tiempo como para que la probeta alcanzase una temperatura homogénea en todas sus partes. En los ensayos realizados durante 1 hora y 16 minutos se tomaron datos de temperaturas a 10 mm, 5 mm y 0 mm de la superficie.

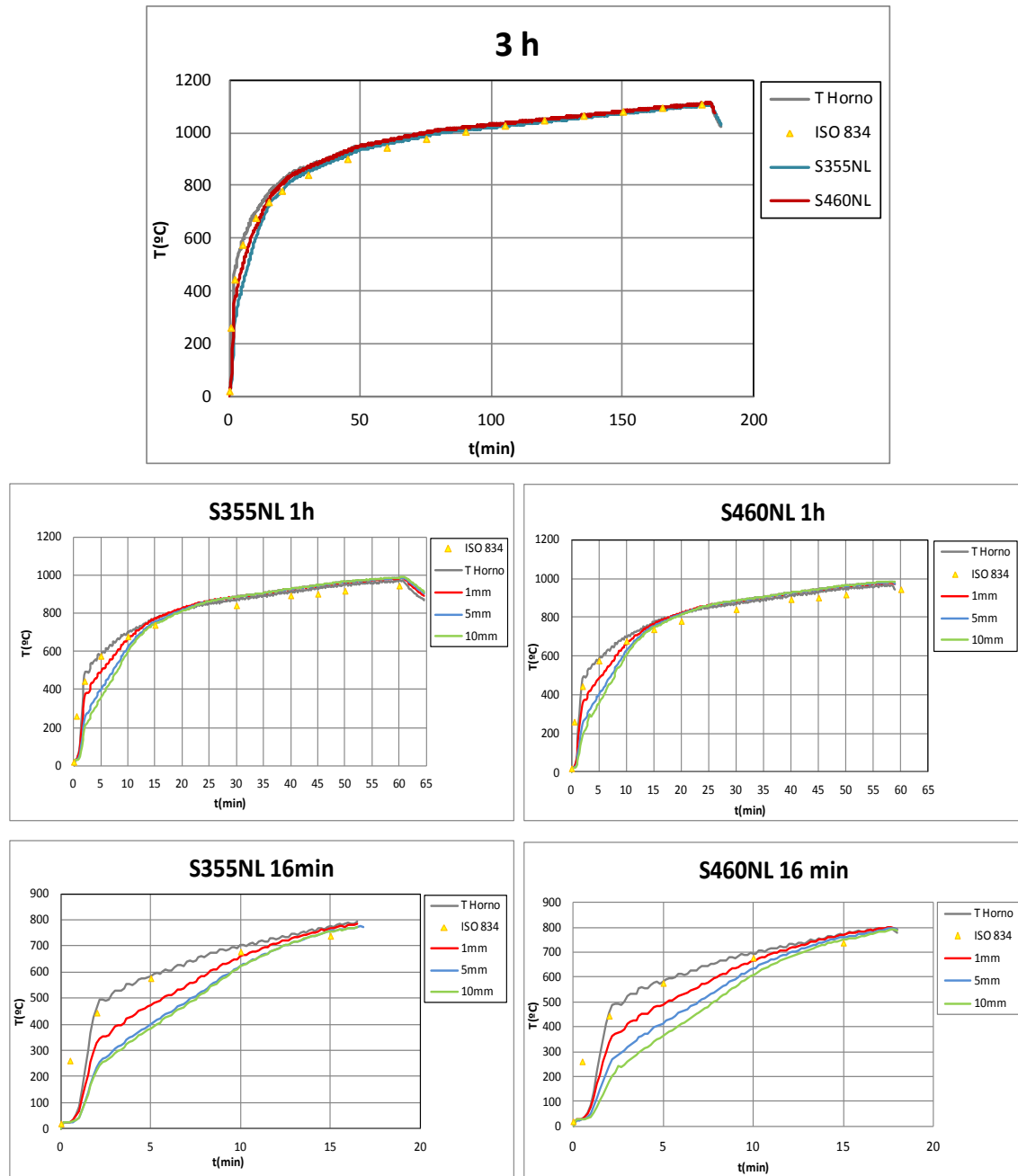


Figura 4. 32. Registro T-t de los aceros S355NL y S460NL para el ensayo de fuego envolvente con curva ISO 834 durante 16 min, 1 h y 3 h.

De las gráficas anteriores se puede observar como la temperatura aumenta desde el exterior hacia el interior de la probeta y que para unos 15 minutos de ensayo, la temperatura que alcanzó la probeta en todos los puntos medidos comenzó a igualarse, es

decir, a partir de ese instante la probeta no ofreció resistencia interna conductiva, alcanzando la misma temperatura en todos los puntos. Ésta situación se reproduce de igual forma en los dos aceros.

3.2. Materiales aislantes

En los siguientes apartados se presentan los resultados de los ensayos de fuego a los que se sometieron los materiales aislantes seleccionados para el estudio.

3.2.1. Morteros

Se hicieron ensayos de fuego por una sola cara, bajo norma ISO 834 a los diferentes morteros seleccionados como material de protección contra el fuego para los aceros de construcción. Se hicieron ensayos por duplicado para cada uno de los morteros. Se hicieron perforaciones a una de las probetas de mortero ensayadas, para poder tomar el registro de temperatura a distintas profundidades. Las posiciones fueron a 0, 5, 20, 35 y 40 mm de la cara fría, siendo 0 mm la cara fría y 40 mm la cara caliente, ver Figura 4. 33.

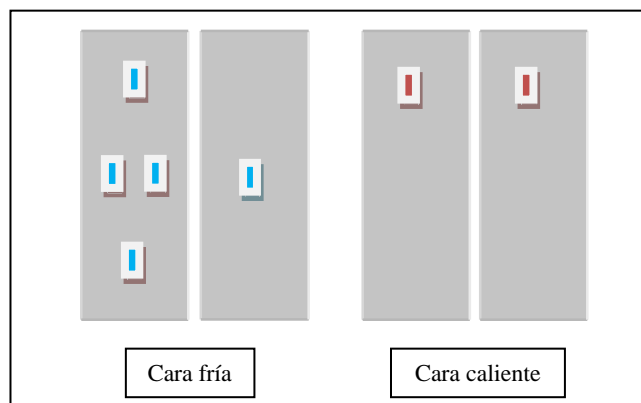


Figura 4. 33. Situación de los termopares para la medida de temperatura en las probetas de mortero.

De los ensayos realizados con los morteros se tomaron los registros de temperatura-tiempo y sus correspondientes perfiles en función de la profundidad a la que se midió la temperatura en el interior de las probetas, a continuación se presenta dicha información, ver Figura 4. 34.

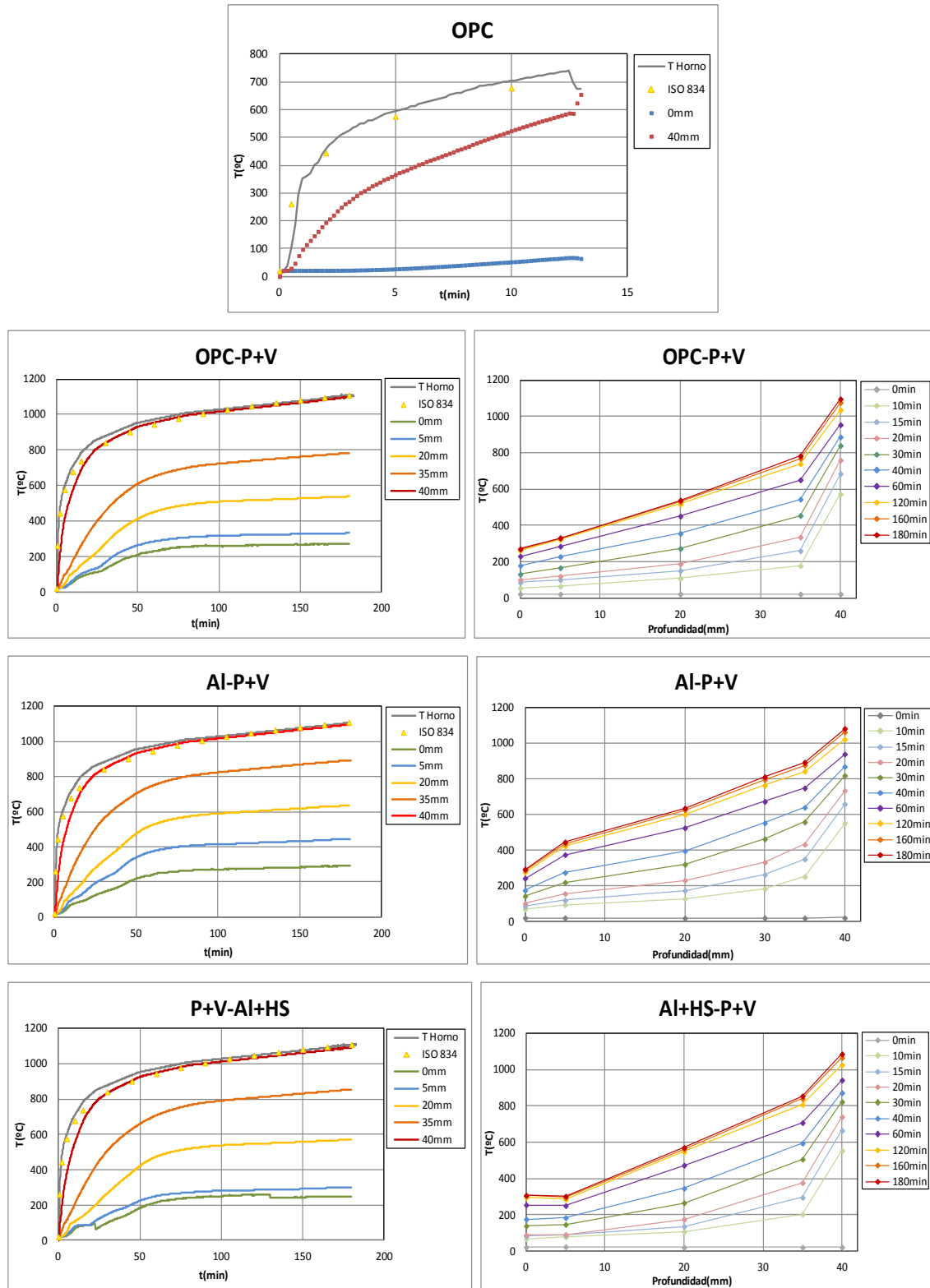


Figura 4. 34. Registros T-t y correspondientes perfiles de T-profundidad de los morteros OPC, OPC-P+V, Al-P+V y Al+HS-P+V a 3h de ensayo de fuego bajo curva ISO 834.

De los ensayos de fuego que se realizaron con los cuatro morteros formulados, se obtuvieron las respuestas siguientes: En primer lugar se produjo un efecto de

“spalling” cuando se ensayó el mortero con cemento Portland (OPC), dicho efecto se produjo para un tiempo de 14 minutos en las dos probetas ensayadas (tal y como se indica en la Figura 4. 34), produciéndose en la probeta una fractura longitudinal equidistante un centímetro de espesor de la cara expuesta al fuego, éste efecto se ve reflejado en la fotografía de la Figura 4. 35. El resto de los morteros tuvieron una buena respuesta después de las 3 horas de ensayo de fuego; el gradiente de temperatura entre la cara fría y la cara caliente de los morteros fue muy parecido y superior en todos los casos a 850 °C, además dicho gradiente fue bastante lineal excepto en la zona cercana a la superficie caliente en donde se produjo un ligero aumento en la pendiente, provocado por la descarbonatación del árido calizo, lo que dio lugar a una zona en donde existió gas, que actuó como barrera térmica debido a una menor conductividad, inferior a la del mortero. También se observó un cambio en la coloración de los mismos, la formación de grietas en la superficie interna de las probetas y la aparición de una curvatura siendo la superficie cóncava la cara caliente de la probeta, tal como se puede observar en la Figura 4. 36.



Figura 4. 35. Fotografías de la cavidad del horno y del estado de la probeta de mortero OPC después del efecto de “spalling”.

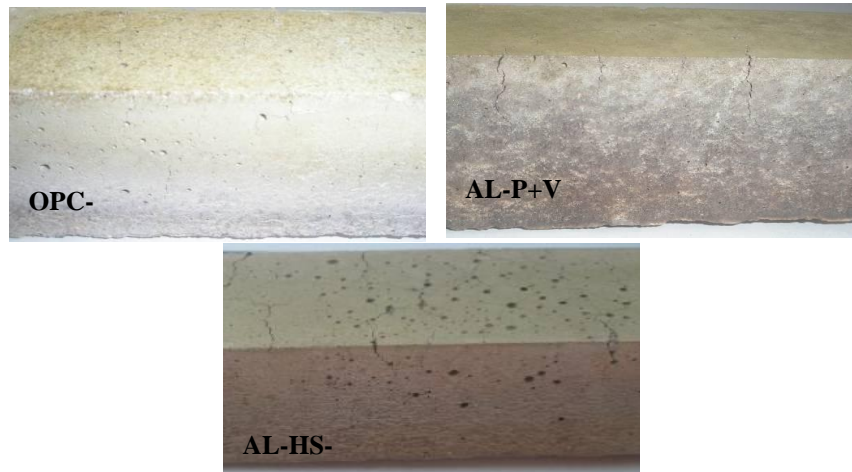


Figura 4. 36. Fotografía de las probetas de los morteros después de 3 horas de ensayo de fuego ISO 834.

Tras los primeros ensayos, debido al “spalling” que sufrió el mortero OPC, se decidió repetir el ensayo para dicho mortero junto a uno de los morteros aluminosos, se eligió el Al-P+V debido a que su comportamiento fue bueno y parecido al que contenía humo de sílice (Al+HS-P+V) pero su coste de fabricación sería menor. En la Figura 4. 37 se presentan las gráficas correspondientes a los registros de temperatura tiempo.

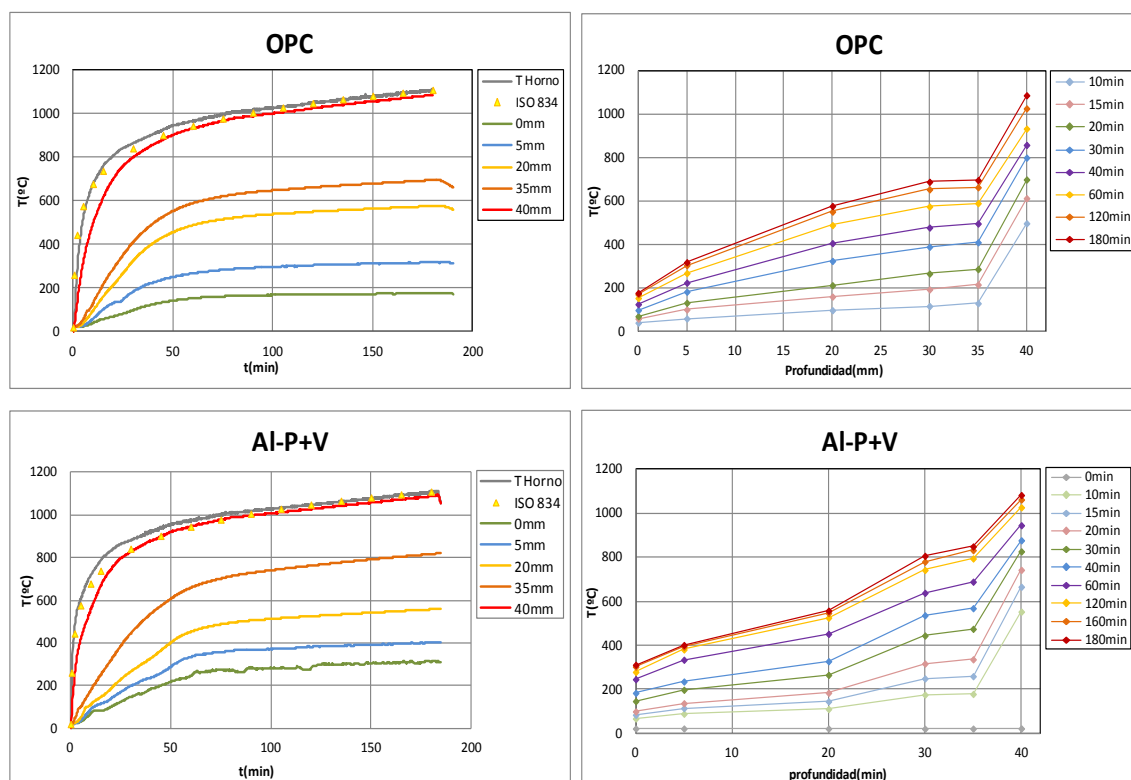


Figura 4. 37. Registros T-t y correspondientes perfiles de T-profundidad de los morteros OPC y Al-P+V a 3h de ensayo de fuego bajo curva ISO 834, 2º ensayo.

En la repetición del ensayo se observó como el mortero de cemento Portland (OPC), en esta segunda ocasión sí que aguantó el ensayo, posiblemente porque la cantidad de agua retenida de la probeta, fuese menor. El segundo ensayo del mortero aluminoso con perlita y vermiculita, fue acorde con el anterior, dentro de la heterogeneidad de las probetas ensayadas.

3.2.2. Lanás

A continuación se presentan los resultados experimentales obtenidos por medio de los registros T-t y los perfiles de temperatura en función de la profundidad del termopar, que se registraron de los ensayos de las lanas de fibra de vidrio elegidas bajo curva de fuego ISO durante 3 horas y por una cara, Figura 4. 38. Del mismo modo que en los aceros y en los morteros, los termopares se introdujeron en el interior de la fibra para poder conocer la temperatura no sólo en la superficie del material.

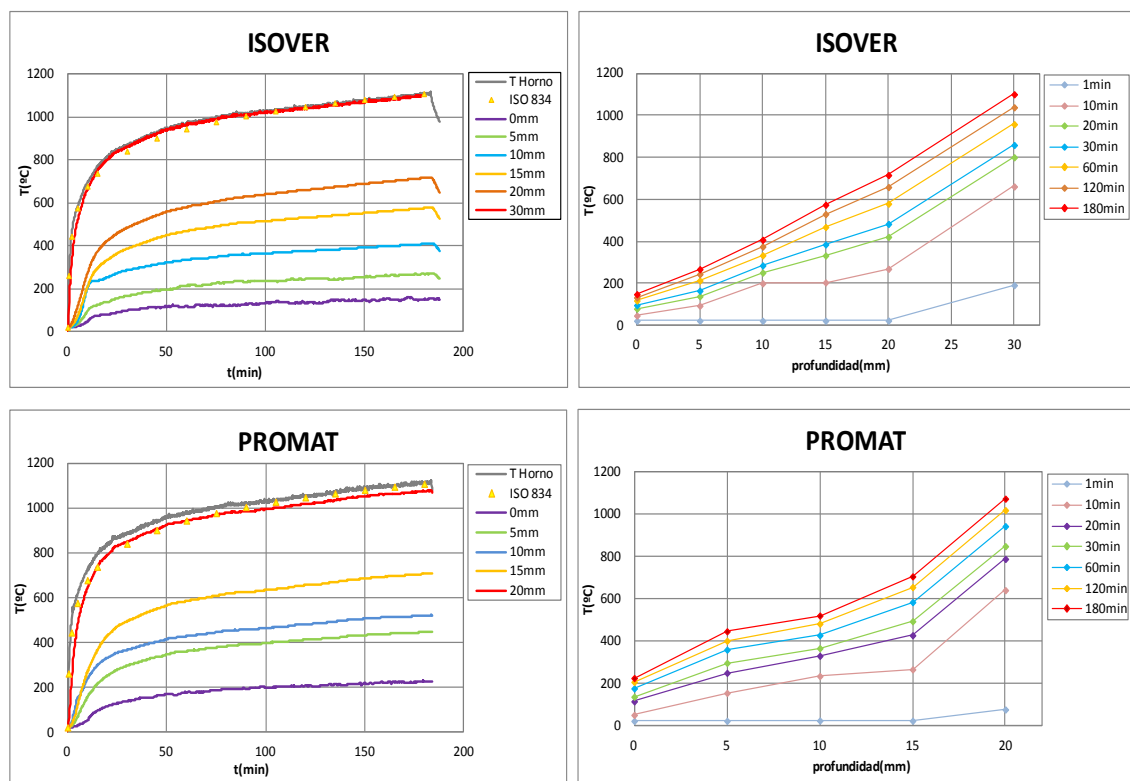


Figura 4. 38. Registros T-t y correspondientes perfiles de T-profundidad de las lanas ISOVER y PROMAT a 3h de ensayo de fuego bajo curva ISO 834.

Las lanas que se ensayaron fueron comerciales y por tanto los ensayos se adaptaron a las condiciones de comercialización. Así para la lana tipo ISOVER el espesor seleccionado fue de 3 cm y para la lana PROMAT de 2 cm. Las respuestas de dichos materiales frente a los ensayos de fuego se pueden observar en las gráficas de la Figura 4. 38, en donde se observó que la diferencia de temperatura entre la superficie fría y la caliente fue suficientemente elevada para que se consideren materiales aptos para aislar los aceros, ya que la superficie fría del material no superó los 230 °C en ninguno de los casos. El gradiente que se generó entre las caras cuando se ensayó la lana ISOVER fue algo mayor debido a su mayor espesor, en torno a los 950 °C, entre una cara y otra, frente a los 850 °C con la lana PROMAT.

3.2.3. Escudos de radiación

Los escudos de radiación que se utilizaron como aislante con la función de proteger al acero estructural frente a la acción del fuego, no se sometieron al ensayo sin la probeta de acero, ya que se construyeron junto con dicha probeta y de acero S460NL. En el apartado 3.3.3 se presentarán los registros que se obtuvieron del ensayo de fuego del conjunto formado por la probeta de acero S460NL con las placas que formaron el escudo de radiación.

3.3. Acero estructural al carbono junto con materiales aislantes

A continuación se presentarán los ensayos de fuego bajo la curva estándar de fuego, para cada uno de los materiales elegidos como elemento protector junto al acero estructural al carbono S460NL.

3.3.1. Mortero con acero al carbono

Dentro de este apartado, se presentan los resultados experimentales obtenidos, tanto los registros de temperatura-tiempo como los perfiles temperatura según la posición de los termopares en el interior de la probeta de acero, para el conjunto formado por mortero y acero, ver Figura 4. 39. Como se puede observar se ensayaron con dos tipos de mortero, uno aluminoso y otro no, ambos con perlita vermiculita (OPC-P+V y el Al-P+V), ya que a priori y en función de las respuestas de los ensayos

previos ambos serían los que presentaron un mejor comportamiento como aislante junto con el acero S460NL. El conjunto de ambos materiales presentó una buena adherencia inicial.

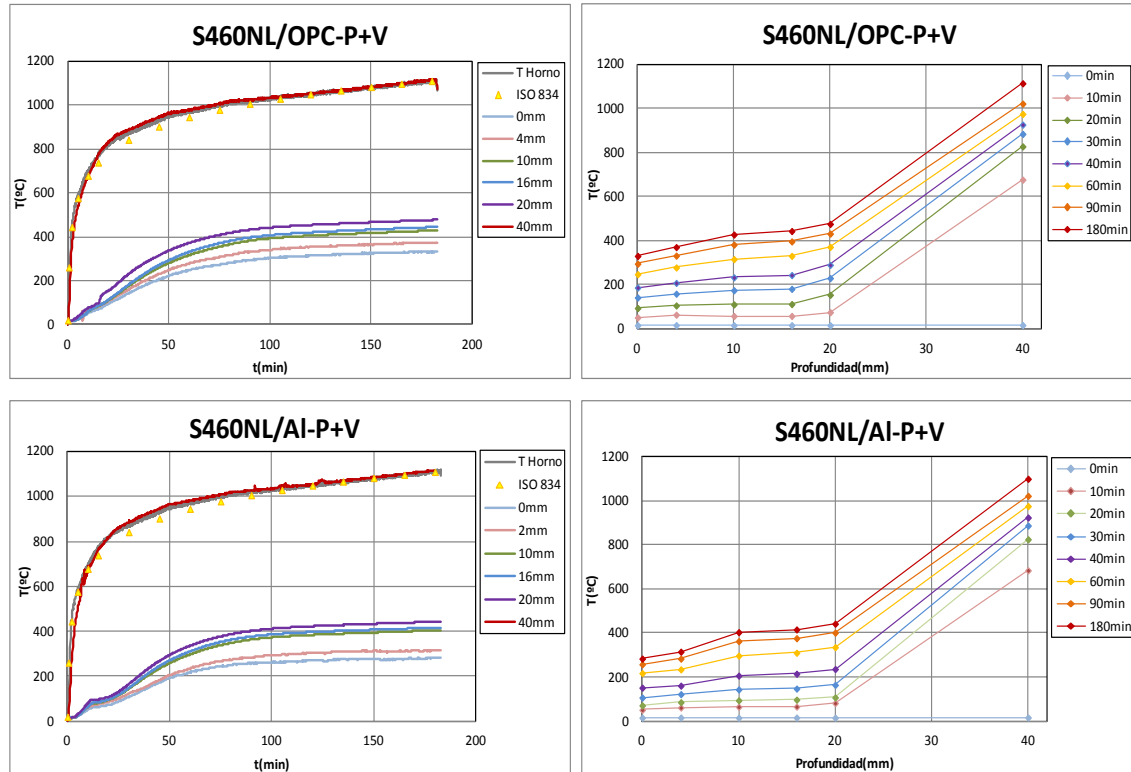


Figura 4. 39. Registros T-t y correspondientes perfiles de T-profundidad de los morteros OPC-P+V y Al-P+V como material aislante junto al acero S460NL, a 3h de ensayo de fuego bajo curva ISO 834.

La probeta que se fabricó para el conjunto mortero y acero tuvo unas dimensiones de 200x100x40 mm, (ver figura 3.2), de forma que la posición del termopar a 20 mm se correspondía con la interfase mortero/acero. En los ensayos, se comprobó a partir de los registros de las temperaturas para la probeta de acero con el mortero aluminoso, que tenía un mejor comportamiento aislante ya que alcanzaron valores ligeramente inferiores que el mortero con base de cemento Portland, aunque la diferencia de las temperaturas no fue significativa. Otro dato de interés fue el que se deduce de los registros de las temperatura en el interior de la probeta de acero, desde la posición 0 mm hasta la posición de 20 mm, y fue que en ningún caso se superan, en el interior del acero, los 500 °C (por lo que las propiedades mecánicas del acero se mantuvieron sin reducción) ya que el gradiente de temperatura quedaba localizado en la zona de los morteros. Después del ensayo, tras el enfriamiento, al retirar el conjunto del

horno, los materiales se despegaron, debido a que le mortero sufrió una curvatura, siendo la parte cóncava la cara caliente del mismo. Aunque debido a su adherencia inicial, no se generó oxidación del acero en la superficie pegada al mortero y por lo tanto no hubo resistencia térmica conductiva debido al óxido de hierro, por lo que no se observó un aumento de la pendiente en el gradiente de temperatura de la zona cercana a la superficie caliente del acero, algo que si se observará en los ensayos con las lanas y en los escudos de radiación.

3.3.2. Lana con acero al carbono

A partir de los resultados que se obtuvieron en el ensayo del apartado 3.2.2 se decidió hacer un ensayo con lanas junto al acero, para poder registrar las temperaturas a distintas posiciones de los termopares, a lo largo de los 20 mm de espesor de la placa de acero, teniendo en cuenta el elemento aislante. Se eligió el acero S460NL para los ensayos y un espesor de 20 mm para ambas lanas. La lana se sostuvo adherida al acero por presión usando el bastidor del horno y los termopares del interior y el exterior del horno. En las gráficas de la Figura 4. 40 se presentan dichos ensayos.

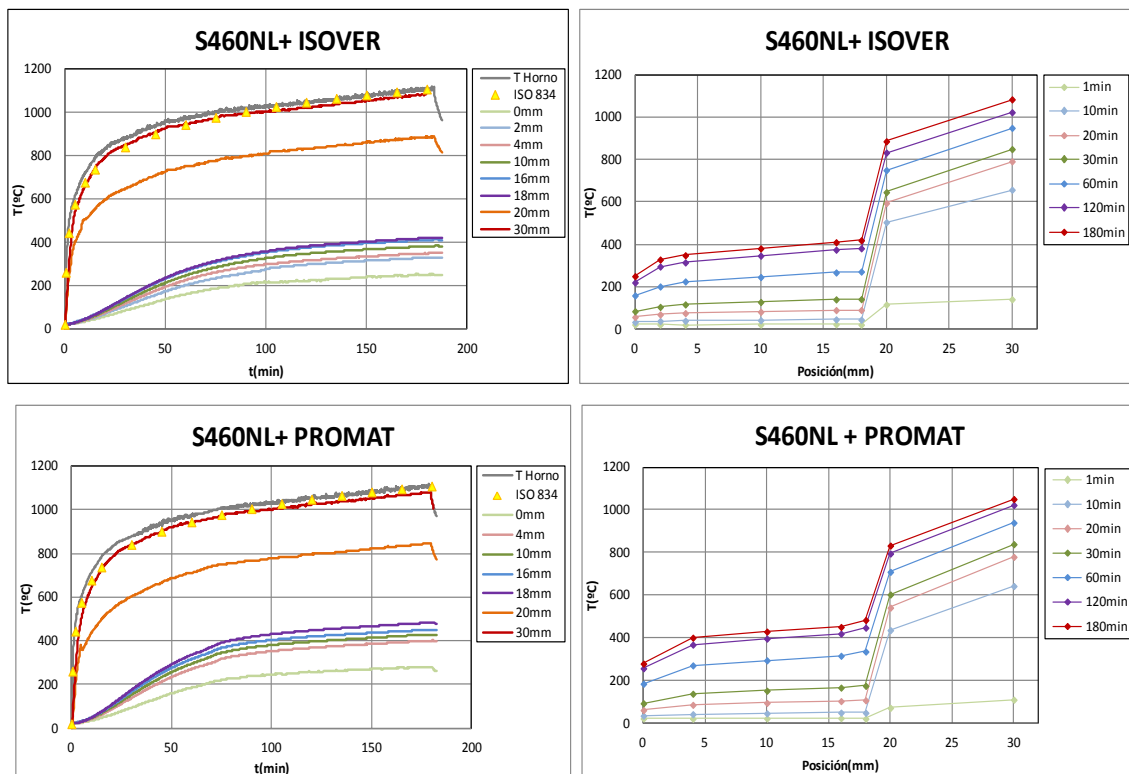


Figura 4. 40. Registros T-t y correspondientes perfiles de T-profundidad de las lanas ISOVER y PROMAT como elementos aislantes junto con el acero S460NL, durante 3h de ensayo bajo curva de fuego ISO 834.

De los anteriores registros se pudo deducir que el efecto aislante de ambas lanas fue muy similar. Las temperaturas que se alcanzaron en la interfase lana/acero con el elemento aislante del fabricante ISOVER que alcanzó 880 °C y con el de PROMAT que se alcanzó en torno a los 840 °C, y si se observa en las gráficas la temperatura a lo largo del espesor de las probeta de acero es menor cuando se ensayó con la lana ISOVER que con la lana PROMAT (los perfiles en el interior del acero fueron de la posición 0 mm a la posición 20 mm). En el ensayo con la lana ISOVER se produjo una diferencia de temperatura entre la superficie caliente de la lana y del acero, de unos 200 °C mientras que para la lana PROMAT fue de 235 °C y ambos valores permanecieron casi constante a partir de los 40 minutos de ensayo. También se observó una diferencia de temperatura muy fuerte entre la superficie caliente de la probeta de acero y a 2 milímetros de ella hacia el interior de la probeta, para ambos ensayos, esto puso de manifiesto la fuerte oxidación que se produjo en el acero, ya que entre los materiales ensayados hubo un hueco de aire oxidante que junto a la corriente convectiva propició dicho proceso. De todo lo anterior se puede decir que la lana del proveedor ISOVER tiene un poder aislante ligeramente mayor.

3.3.3. Escudos de radiación

En la Figura 4. 41, se presenta el registro de temperatura/tiempo y el perfil de temperaturas en el interior de la probeta del acero S460NL usando chapas de acero como elemento aislante (escudo de radiación).

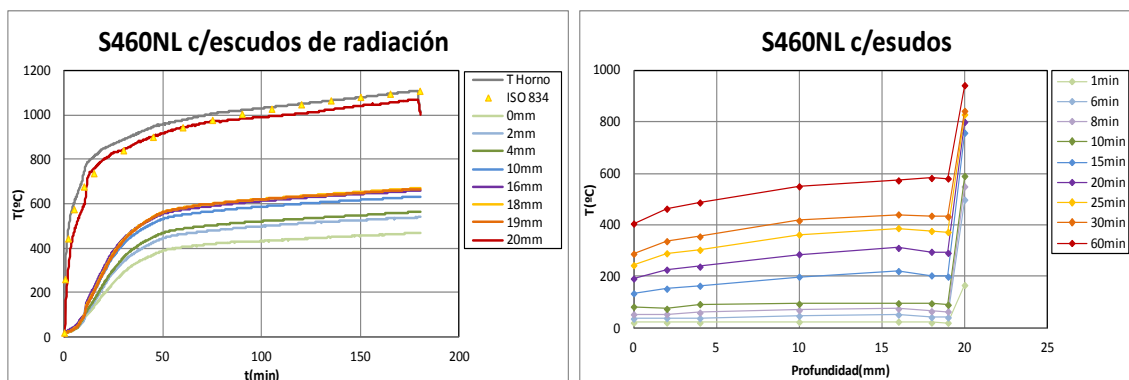


Figura 4. 41. Registros T-t y correspondientes perfiles de T-profundidad de las lanas del acero S460NL con los escudos de radiación como elemento aislante, durante 3h de ensayo bajo curva de fuego ISO 834.

De la misma manera que se llevaron a cabo los ensayos con los morteros y las lanas, se realizó el ensayo con los escudos de radiación. Se observó que las placas de acero actuaron como una barrera térmica y se produjo una caída de temperatura de unos 360 °C entre la superficie caliente de la última placa de acero que actuó como escudo y la superficie caliente de la placa de acero al carbono estudiado, permaneciendo dicha diferencia de temperatura constante a partir de los 40 minutos. En el interior del acero se registró una temperatura media de 600 °C, que supera la barrera de criticidad del acero, por lo que cabría considerar aumentar el número de escudos de radiación y analizar la situación tanto en cuanto a la penetración de la temperatura en los perfiles y estudiar si la situación sería crítica de acuerdo con la propuesta de la euronorma EN 1993-1-2. La oxidación de las capas de acero fue intensa, pero la caída de la temperatura fue por el efecto aislante radiactivo entre las chapas que actuaron como escudos de radiación, láminas paralelas con radiación múltiple con algo de incidencia de la componente convectiva, debido a que la propia temperatura de las mismas le hace ser más preponderante.

4. Ensayos posteriores a la acción del fuego

En este apartado se presentan todos los ensayos realizados después de haber sometido los materiales estudiados a la acción del fuego en cada una de las correspondientes situaciones. En primer lugar se presentan las caracterizaciones realizadas en los aceros estructurales, para lo que se analizó la microestructura de los mismos, se evaluó las propiedades mecánicas por los ensayos de tracción y se analizaron sus fractografías y finalmente se midieron las durezas. Se ha incluido un apartado en donde se presentan unos ensayos de tracción con carga constante y en régimen transitorio de temperatura para los aceros S355NL y S460NL junto con el correspondiente estudio fractográfico y la medida de las durezas.

Por último se analizará el comportamiento de los cuatro morteros elegidos en el presente estudio, tras haber sido sometidos a la acción del fuego. Se realizaron ensayos de resistencia a la compresión y a la flexotracción.

4.1. Aceros al carbono

En los siguientes apartados se presenta la caracterización de los aceros al carbono después de haber sido ensayados.

4.1.1. Caracterización microestructural del material ensayado

4.1.1.1. Fuego incidente por una sola cara. Curva ISO y curva externa

Las muestras de los aceros ensayados se caracterizaron microestructuralmente con microscopio óptico (MO) y microscopio electrónico de barrido (MEB). En las micrografías que se presentan a continuación se puede observar la microestructura de los aceros S355NL, S460NL y S460N tras haber sido ensayados bajo la acción del fuego solo por una cara.

De cada uno de los aceros citados se muestran imágenes de la microestructura cercana a la superficie de la probeta expuesta al fuego, de la zona intermedia de la probeta y de la superficie de la probeta en contacto con la atmosfera, tanto para los ensayos con la curva ISO como para los ensayos bajo la curva externa por una cara y durante un tiempo de 3 horas.

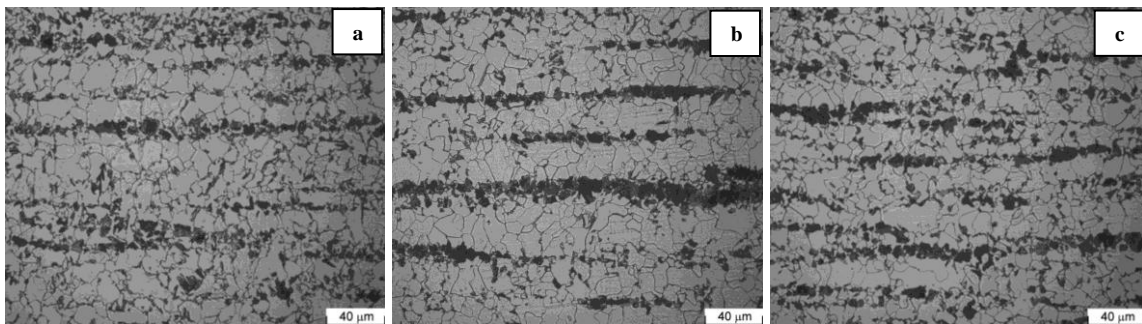


Figura 4. 42. Micrografía obtenida por MO del acero S355NL a x500: (a) zona fría, (b) zona media y (c) zona caliente, tras el ensayo bajo curva ISO por una cara durante 3 horas.

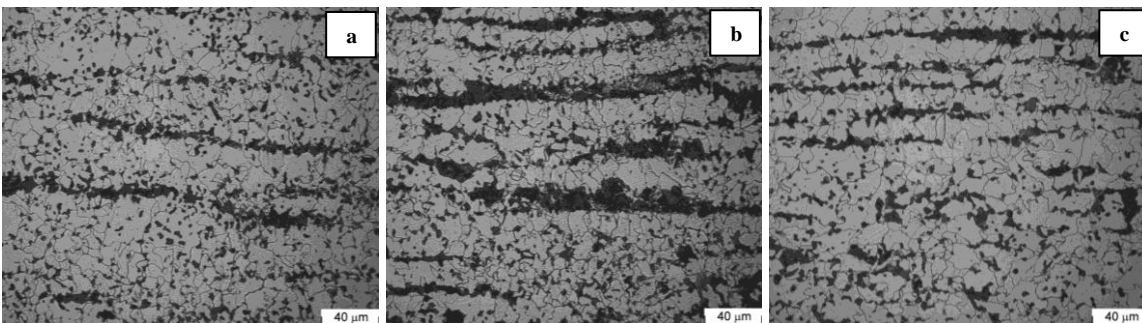


Figura 4. 43. Micrografía obtenida por MO del acero S460NL a x500: (a) zona fría, (b) zona media y (c) zona caliente, tras el ensayo bajo curva ISO por una cara durante 3 horas.

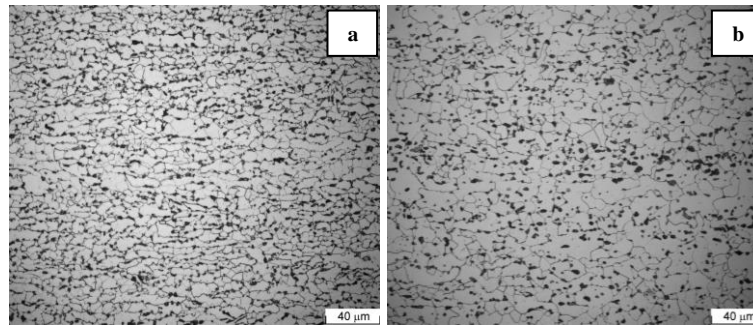


Figura 4. 44. Micrografía obtenida por MO del acero S460N a x500: (a) zona fría, y (b) zona caliente, tras el ensayo bajo curva ISO por una cara durante 3 horas.

Se pudo comprobar a partir de la observación microscópica, que la estructura de los aceros S355NL, S460NL y S460N sufrió una transformación debido a que durante el ensayo bajo curva ISO, se superó a lo largo de todo el espesor de la probeta la temperatura de 738 °C, de forma que la ferrita y la perlita se transformaron a austenita, ver Figura 4. 42 a Figura 4. 44. Las colonias de perlita, que aparecieron al enfriarse tras la transformación, se redistribuyen dando una estructura donde la definición de las bandas tendió a perderse.

De otro lado se pudo observar cómo en alguno de los ensayos, en la zona central de las probetas preparadas para la observación metalográfica, aparecieron bandas que se ensancharon, debido a una segregación de estructura martensítica, que de acuerdo con la composición química del acero, ver Tabla 3.1, que debe atribuirse fundamentalmente a un segregado de manganeso. Uno de los aspectos por los cuales se pudo deducir que aparecieron colonias de martensita, fue por el color crema de la zona que aparece en la micrografía, ver Figura 4. 45.

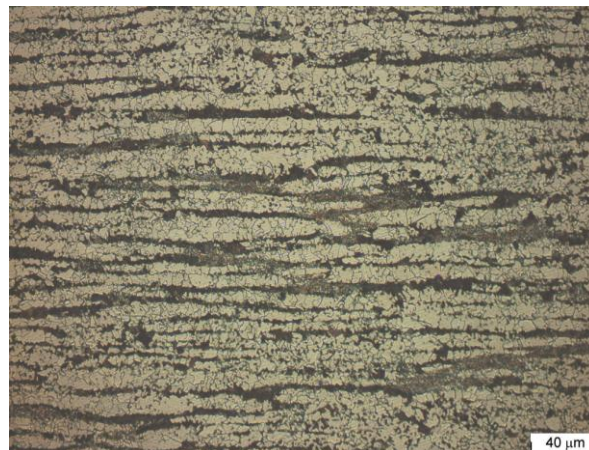


Figura 4. 45. Micrografía obtenida por MO del acero S460NL a x500 de la zona media, tras el ensayo bajo curva ISO por una cara durante 3 horas.

Ambos aceros tras los ensayos de fuego bajo la curva ISO 834, sufrieron un ligero cambio en el tamaño de grano. El acero S355NL experimentó una leve disminución del tamaño de grano y el acero S460NL sufrió un ligero aumento. Estos cambios no fueron llamativos debido a que los aceros después de enfriarse al aire recuperaron casi en su totalidad el estado inicial. Según el método de la intersección o Heyn se determinó que inicialmente el acero S355NL tenía un tamaño de grano de $10\mu\text{m}$ y tras el ensayo queda en torno a $9\mu\text{m}$. Para el S460NL y N se comprobó que el tamaño inicial de grano fue de $8\mu\text{m}$ y $7\mu\text{m}$ respectivamente y pasó a ser después del ensayo de $9\mu\text{m}$ y $11\mu\text{m}$, por lo que se puede deducir, que en todos ellos se produce de forma análoga la transformación en estado sólido de austenita a ferrita y ferrita/perlita y que el tamaño de grano no se ve afectado ni en el acero S355NL ni en el S460NL pero si algo más en el acero S460N.

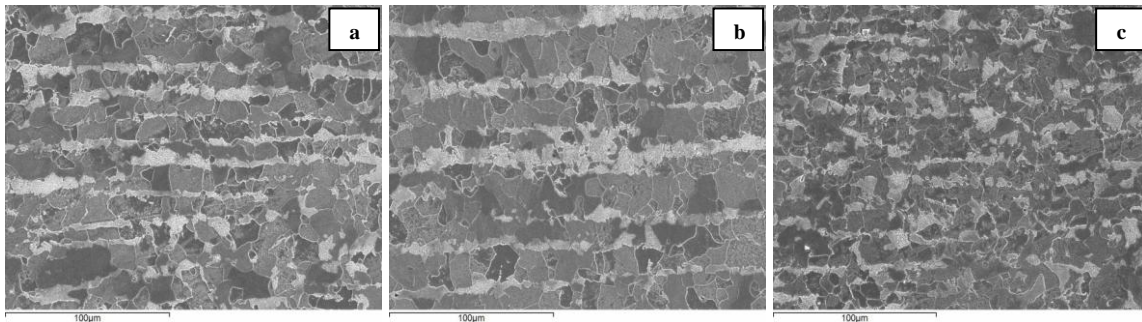


Figura 4. 46. Micrografía obtenida por MEB del acero S355NL a x500: (a) zona fría, (b) zona media y (c) zona caliente, tras el ensayo bajo curva externa por una cara durante 3 horas.

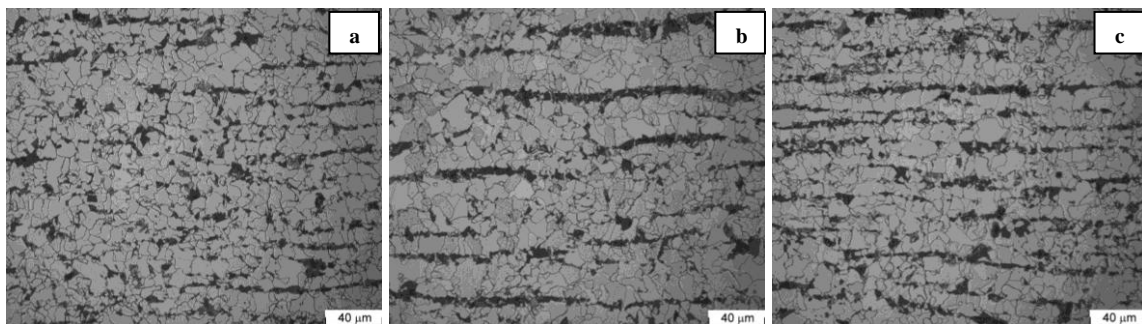


Figura 4. 47. Micrografía obtenida por MO del acero S460NL a x500: (a) zona fría, (b) zona media y (c) zona caliente, tras el ensayo bajo curva externa por una cara durante 3 horas.

En las Figura 4. 46 y Figura 4. 47 se presentan las micrografías de los aceros S355NL y S460NL después del ensayo de fuego bajo curva externa normalizada, por una cara y durante 3 horas. Se observó en todas ellas que la estructura no experimentó ningún cambio y que el tamaño de grano y las bandas no sufrieron variación alguna después de su medida. La variación de tamaño de grano se recoge en la Tabla 4. 9, para

los aceros después del ensayo bajo curva ISO se observó un ligero aumento en del mismo, siendo éste más pronunciado en el acero S460N, tal y como se apuntó anteriormente, a diferencia de lo que ocurrió con la curva externa en donde se aprecia una constancia en el tamaño después de los ensayos de fuego debido a la no transformación de la austenita durante el proceso de calentamiento del acero.

Tabla 4. 9. Tamaño de grano de los aceros S355NL, S460NL y S460N antes y después de los ensayos de fuego con curva ISO 834 y curva externa por una cara y durante 3 horas.

Tipo de acero	Tamaño de grano (μm)		
	Fuego por una cara		
	Antes	Curva ISO 834	Curva externa
S355NL	10	9	9
S460NL	8	9	8
S460N	7	11	x

4.1.1.2. Fuego envolvente. Curva ISO

Las siguientes micrografías muestran las microestructuras de los aceros S355NL y S460NL después de haberse sometido a la acción de un fuego envolvente bajo la curva ISO 834, durante 16 minutos, 1 hora y 3 horas, respectivamente. Se realizaron micrografías de las tres dimensiones de la probeta, en las siguientes micrografías sólo se muestra una de las direcciones perpendiculares a la laminación, ya que dicha dirección revela perfectamente la microestructura del acero. Se empleó para ello la técnica de microscopía óptica, suficiente para la observación, ver Figura 4. 48 y Figura 4. 49.

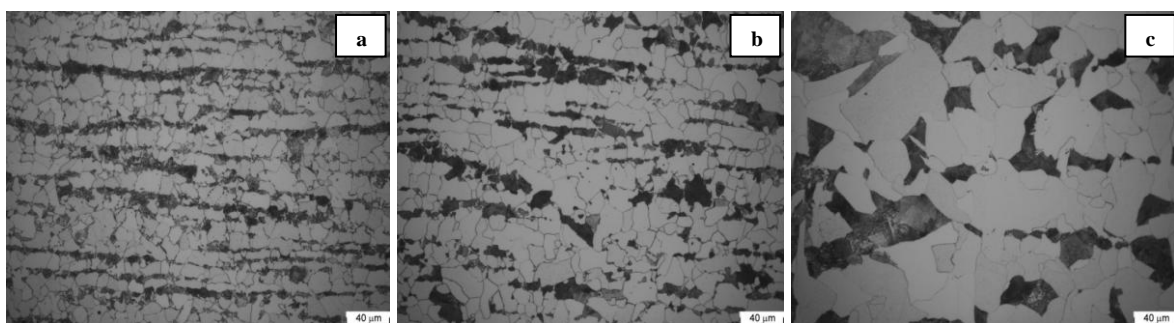


Figura 4. 48. Micrografía obtenida por MO del acero S355NL a x500: (a) 16 min, (b) 1 hora y (c) 3 horas, tras el ensayo de fuego envolvente bajo ISO 834.

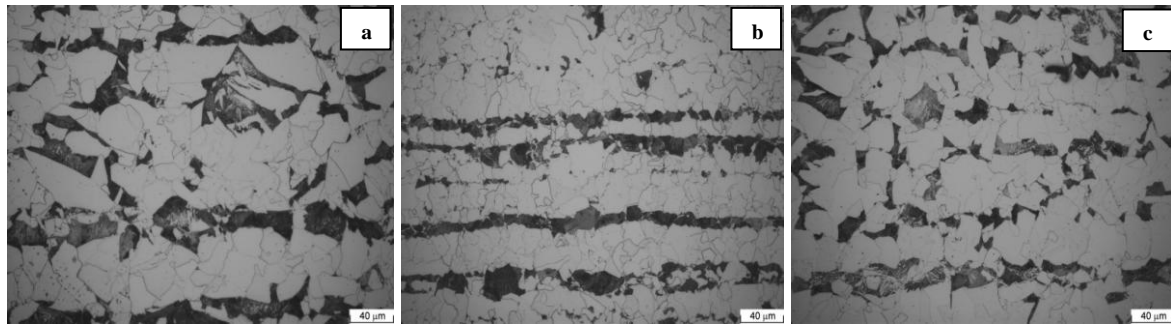


Figura 4. 49. Micrografía obtenida por MO del acero S460NL a x500: (a) 16 min, (b) 1 hora y (c) 3 horas, tras el ensayo de fuego envolvente bajo ISO 834.

A partir del estudio micrográfico realizado se determinó el tamaño de grano después del ensayo de fuego envolvente utilizando el método de Heyn. Se observaron modificaciones más acusadas que en el ensayo de fuego por una cara. A los 16 minutos del ensayo los aceros no se ven a penas afectados en términos de tamaño de grano, aspecto que cambia cuando la duración del ensayo alcanza 1 hora y 3 horas respectivamente, en donde el tamaño de grano se ve modificado hacia valores mayores, Tabla 4. 10. Este hecho se puede comprender ya que el tiempo que permanece el acero sometido al fuego envolvente, es suficiente como para que la temperatura en la totalidad de la probeta llegue a homogeneizarse, teniendo lugar la transformación en austenita, provocándose ese aumento en el tamaño de grano de la misma y por consiguiente el aumento de tamaño de grano de la ferrita. El enfriamiento se produce al aire después de abierto el horno pero en el interior de él, por lo tanto la temperatura es mayor durante dicho enfriamiento, tiene lugar una recristalización durante la transformación de austenita a ferrita de forma más lenta, todo ello da el origen a ese aumento de tamaño de grano.

Tabla 4. 10. Tamaño de grano de los aceros S355NL, S460NL antes y después de los ensayos de fuego envolvente con curva ISO 834 durante 16 min, 1 hora y 3 horas.

Tipo de acero	Tamaño de grano (μm)			
	Fuego envolvente, ISO 834			
	Antes	16 min	1 h	3 h
S355NL	10	9	12	18
S460NL	8	8	9	11

4.1.1.3. Oxidación superficial del acero al carbono. Alta temperatura.

A continuación se presentan los resultados de los ensayos que se llevaron a cabo para identificar la capa de óxido formada en la superficie de los aceros S355NL y

S460NL tras el ensayo de fuego ISO 834, por una sola cara y durante 3 horas. Se realizaron difractogramas de Rayos X, toma de imágenes con el microscopio electrónico de barrido y análisis con microsonda que se presentan en las Figura 4. 50 a Figura 4. 54.

La capa de óxido está formada por tres especies (FeO , Fe_3O_4 y Fe_2O_3), cuando el material está a $570\text{ }^\circ\text{C}$. Cuando la temperatura es inferior la wustita (FeO) se transforma en hierro y magnetita (Fe_3O_4). A los $1200\text{ }^\circ\text{C}$ se supone todo el óxido como wustita. [4.3].

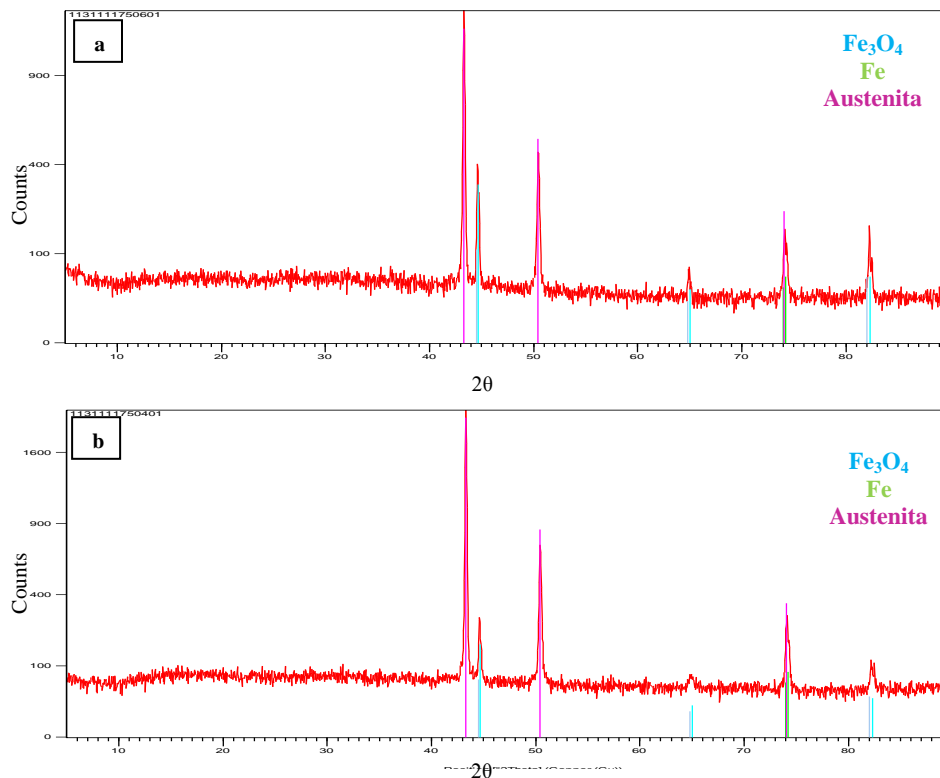


Figura 4. 50. Difractograma de Rayos X de la capa de óxido en el acero S355NL (a) y en el S460NL (b), después del ensayo de fuego ISO por un cara, durante 3 horas.

En los difractogramas de Rayos X, Figura 4. 50, aparecieron varios picos que se identificaron como los característicos de una estequiometría Fe_3O_4 (magnetita). La identificación es coincidente para ambos aceros. La aparición de éste óxido puede ser debido a que la muestra se dejó enfriar al aire desde los $1100\text{ }^\circ\text{C}$ y pudo desarrollarse una transformación durante ese enfriamiento de wustita (FeO) a magnetita (Fe_3O_4).

Las muestras también se analizaron por medio de microsonda (Figura 4. 51 y Figura 4. 52), para ver la posible difusión del oxígeno hacia el sustrato. Los análisis son cualitativos y en los gráficos obtenidos se observó, que en la capa de óxido analizada había gran cantidad de oxígeno y hierro y a medida que el análisis avanzó

hacia el interior el contenido en oxígeno disminuyó, hasta llegar al acero como material base, observándose una caída del contenido en oxígeno hasta desaparecer y la consiguiente subida de hierro.

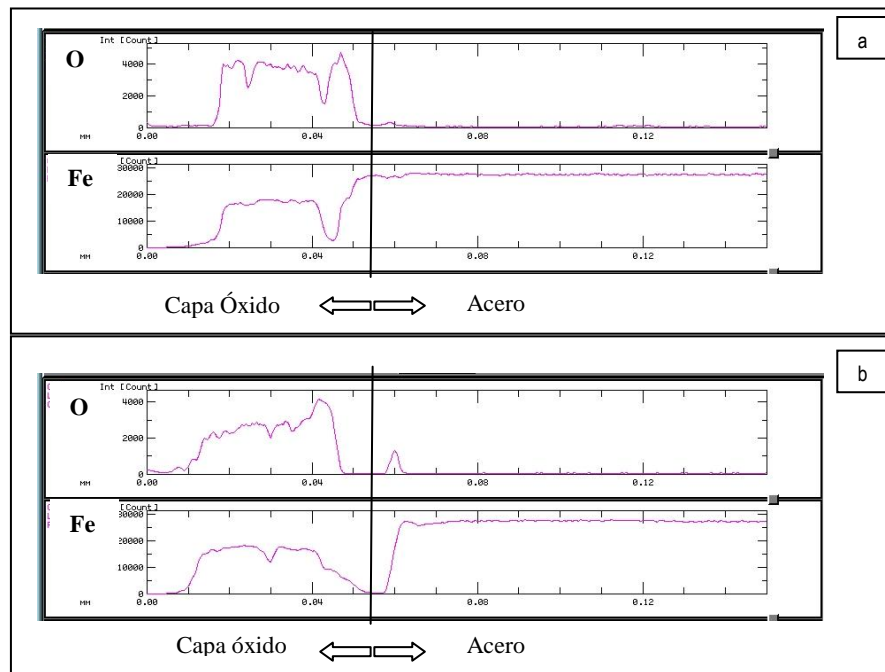


Figura 4. 51. Análisis con microsonda del acero S355NL de la cara no expuesta (a) y la cara expuesta (b) al fuego ISO por un cara, durante 3 horas.

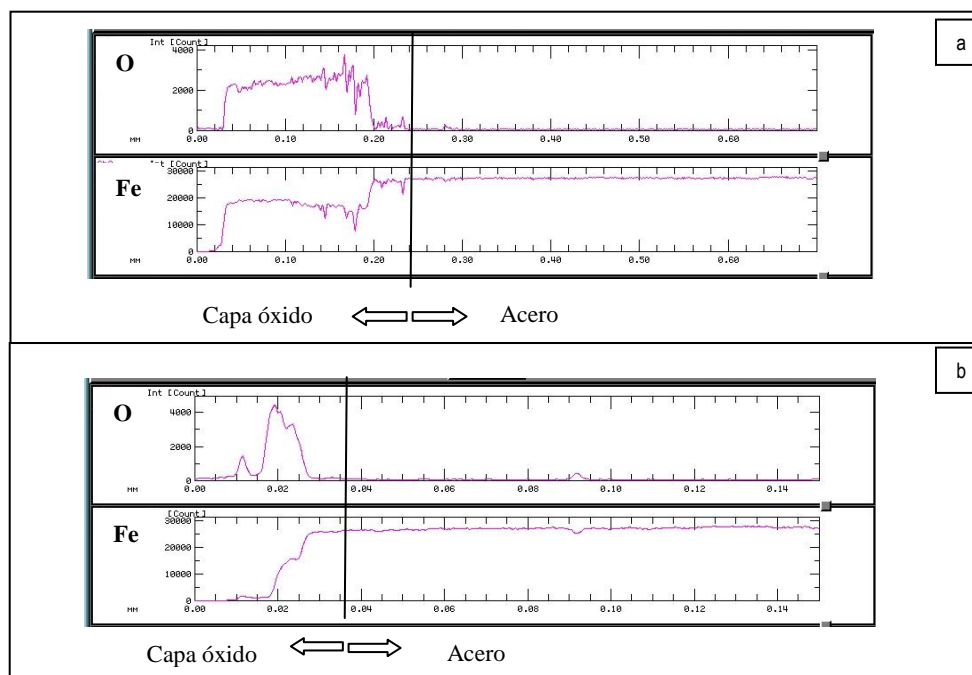


Figura 4. 52. Análisis con microsonda del acero S460NL de la cara no expuesta (a) y la cara expuesta (b) al fuego ISO por un cara, durante 3 horas.

El grosor de la película de óxido que se presentan en las micrografías de las Figura 4. 53 y Figura 4. 54 no corresponde con el total ni para el acero S355NL, ni para el S460NL, debido a que durante la preparación de las muestras el instrumental de corte dañó la capa y se perdió parte de ella. En ambos aceros, se observo una primera capa porosa de poco grosor adherida al material base. A continuación de esta capa se observó otra menos porosa, no pudiéndose determinar el grosor de la misma debido a que la capa de oxido no estaba completa. También se pudo apreciar como en la zona del material base que estaba más cerca de la capa de oxido, tenía algunas partes porosas, debido a la difusión del hierro desde el substrato para seguir reaccionando con el oxígeno de la superficie y así continuar aumentando el grosor de la capa de oxido.

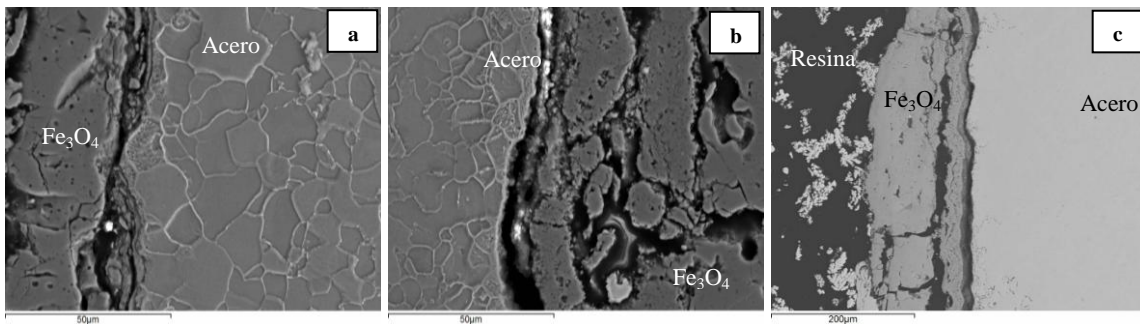


Figura 4. 53. Micrografías del acero S355NL, (a) cara no expuesta y (b) cara expuesta al fuego respectivamente x1000 en MEB, electrones secundarios. (c) MEB, electrones retrodispersados x200.

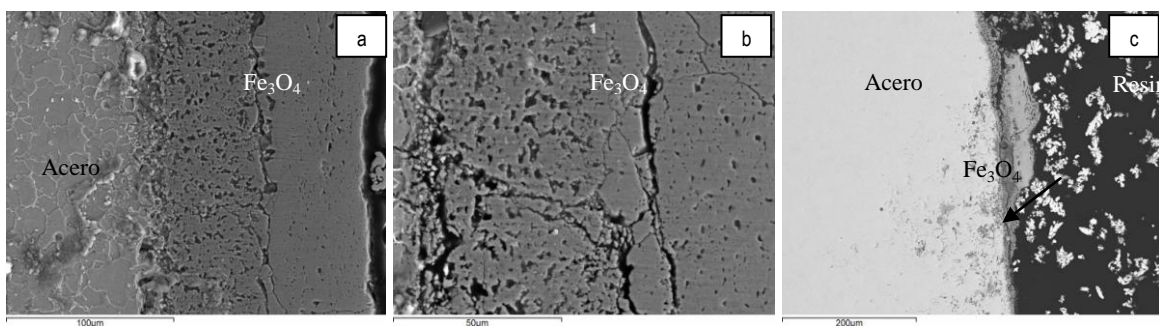


Figura 4. 54. Micrografías del acero S460NL, cara expuesta al fuego x500 (a) y x1000 (b) en MEB, electrones secundarios. (c) MEB, electrones retrodispersados x200.

4.1.2. Propiedades Mecánicas

4.1.2.1. Ensayos de tracción y dureza de los aceros tras la exposición a las curvas de fuego sin carga

A continuación se expondrán los resultados obtenidos de los ensayos de tracción y las medidas de dureza de los aceros después de haber sido sometidos a la acción del fuego con cada una de las diferentes condiciones seleccionas para el estudio.

4.1.2.1.1. Fuego incidente por una sola cara. Curva ISO 834 y Curva Externa

Los ensayos de tracción realizados se llevaron a cabo después del ensayo de fuego bajo la curva ISO 834 y la curva externa para los aceros S355NL y S460NL, tras la exposición por una cara durante tres horas. Las probetas que se mecanizaron se tomaron de la cara caliente y de la cara fría de la probeta ensayada, según la Figura 3. 7, y en sentido de la laminación y perpendicular a él. Las curvas tensión-deformación que se obtuvieron en los ensayos, se muestran a continuación en la Figura 4. 55 a Figura 4. 57.

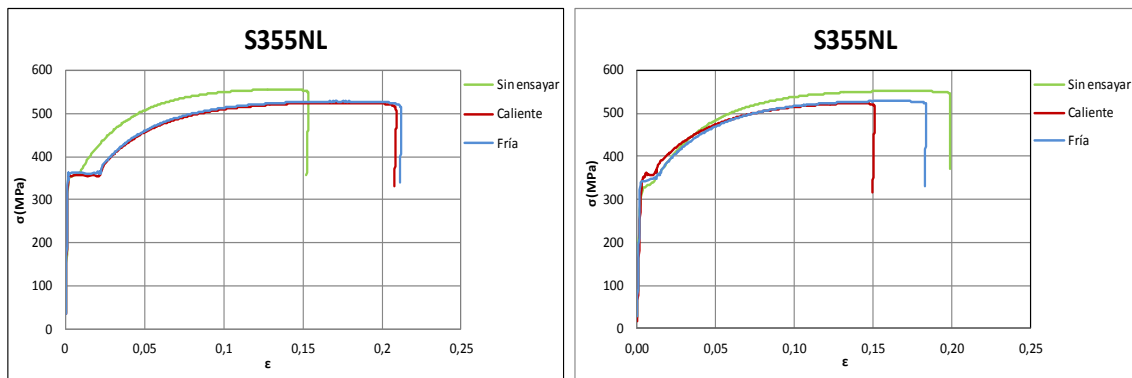


Figura 4. 55. Curvas tensión-deformación del acero S355NL después del ensayo de fuego ISO, en sentido de la laminación y perpendicular.

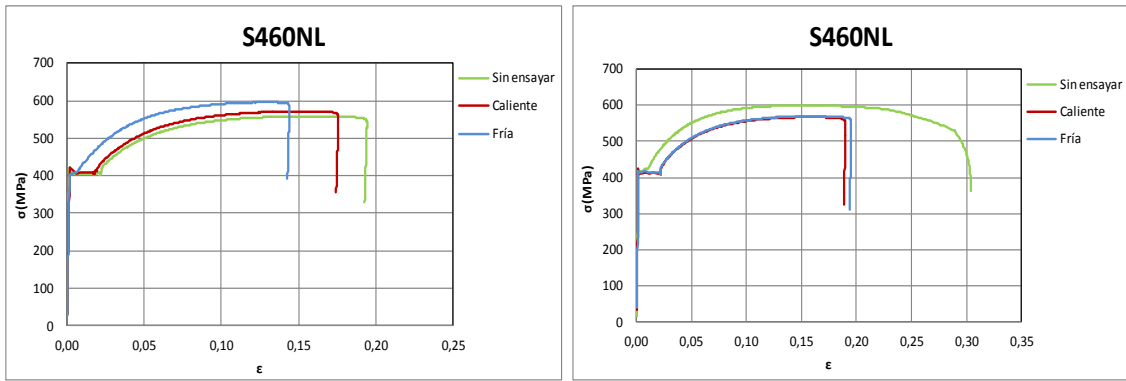


Figura 4. 56. Curvas tensión-deformación del acero S460NL después del ensayo de fuego ISO, en sentido de la laminación y perpendicular.

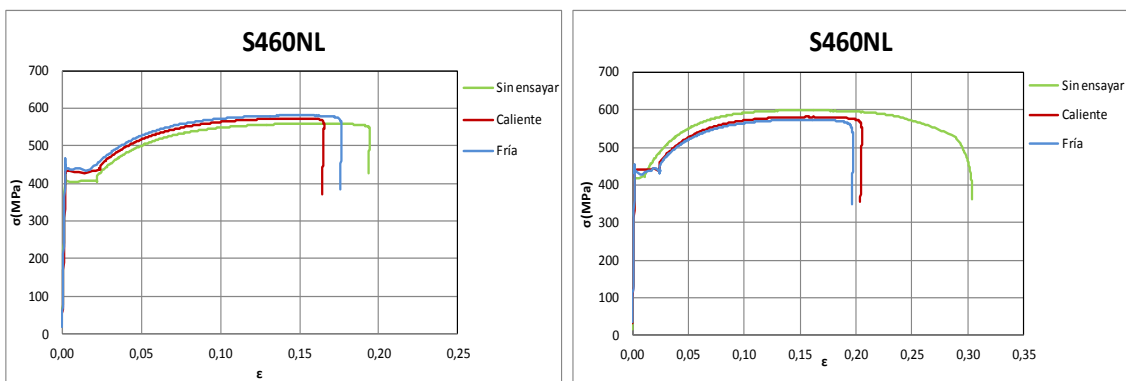


Figura 4. 57. Curvas tensión-deformación del acero S460NL después del ensayo de fuego con curva externa, en sentido de la laminación y perpendicular.

En la Tabla 4. 11 y la Tabla 4. 12 se presentan las propiedades mecánicas de ambos aceros ensayados, después de haber sido sometidos a la curva de fuego ISO 834, por una cara y durante 3 horas. En las tablas antes citadas, se presentan los valores de las propiedades mecánicas de los aceros en la dirección de laminación y perpendicular a ella tanto para la cara fría como para la cara caliente de las probetas ensayadas.

En líneas generales, los ensayos de tracción realizados para las probetas de los aceros S355NL y S460NL, no difieren mucho cuando se compara entre la dirección de laminación y una de las perpendiculares a ella, la resistencia fue del mismo orden y el módulo y el límite elástico también, incluso las deformaciones y las estricciones formadas.

Tabla 4. 11. Propiedades mecánicas del acero S355NL, deducidas de los ensayos de tracción

ACERO S355NL	Cara	Resistencia (MPa) / Factor de reducción	Módulo elástico (GPa) / Factor de reducción	Límite proporcional 0.2%(MPa)	Estricción (%)	Def.Uniforme (%)
Estado inicial/ Perpendicular Laminación	x	552/1	206/1	329	74	15
Laminación	x	556 / 1	203/ 1	335	73	12
Fuego por una cara/ISO 834 Perpendicular	Caliente	525/ 0,95	184/ 0,71	355	75	12
	Fría	526/ 0,95	205 /	345	75	12
Fuego por una cara/ISO 834 Laminación	Caliente	528 / 0,95	202 / 0,93	360	74	15
	Fría	526 / 0,95	218 / 0,97	355	76	15

Al compararse las propiedades mecánicas entre los aceros, se observó que sus valores en todas ellas fueron ligeramente superiores para el acero S460NL, excepto la estricción y la deformación uniforme que adquieren valores parecidos. Esto se puede traducir en un mejor comportamiento de dicho acero, aunque no con una diferencia importante.

Tabla 4. 12. Propiedades mecánicas del acero S460NL, deducidas de los ensayos de tracción.

ACERO S460NL	Cara	Resistencia (MPa) / Factor de reducción	Módulo elástico (GPa) / Factor de reducción	Límite proporcional 0.2%(MPa)	Estricción (%)	Def.Uniforme (%)
Estado inicial/ Perpendicular Laminación	x	595/1	217/1	404	75	14
Laminación	x	579 / 1	230 / 1	406	77	13
Fuego por una cara/ISO 834 Perpendicular	Caliente	560/ 0,94	192/ 0,71	401	79	11
	Fría	562/ 0,94	222 /	406	79	12
Fuego por una cara/ISO 834 Laminación	Caliente	570 / 0,98	213 / 0,93	410	76	13
	Fría	576 / 0,99	223 / 0,97	402	78	11
Fuego por una cara/Curva Externa-Perpendicular	Caliente	576 / 0,97	213 / 0,98	446	75	6
	Fría	582/ 0,98	203 / 0,93	436	75	6
Fuego por una cara/Curva Externa- Laminación	Caliente	574 / 0,99	207 / 0,9	431	72	11
	Fría	582 /	221 / 0,96	440	74	10

Las propiedades mecánicas que se dedujeron de los ensayos de tracción, después de que se sometiera al acero S460NL a la acción de fuego bajo curva externa, no se vieron modificadas con respecto al estado de recepción del mismo. La curva externa es menos severa que la curva ISO 834 y el material es capaz de recuperar en gran medida sus propiedades iniciales, después de ambos ensayos.

Las durezas medidas en los aceros ensayados bajo la curva ISO 834 y la curva externa se presentan en la Tabla 4. 13.

Tabla 4. 13. Durezas de los aceros S355NL y S460NL después del ensayo de fuego por una cara con curva ISO 834 y externa.

ACERO	DUREZA ROCKWELL B, HRB(Kg/mm ²)				
	Curva ISO 834 (3h)			Curva externa (3h)	
	Inicial	Caliente	Fría	Caliente	Fría
S355NL	82	79	80	x	x
S460NL	86	84	85	79	82
S460N	89	64	72	x	x
POSICIÓN	Inicial	Caliente	Fría	Caliente	Fría

Como puede apreciarse, tanto en el ensayo bajo curva ISO como para la curva externa, los valores de las durezas Rockwell B, entre la cara expuesta y no expuesta al fuego, son del mismo orden de magnitud, marcándose una ligera diferencia hacia valores algo más pequeños en la cara caliente. La disminución de la dureza de los aceros S355NL y S460NL no superó el 2%, mientras que para el acero S460N (sólo bajo curva ISO), la disminución de la dureza fue en torno al 30%, posiblemente relacionado con el aumento del tamaño de grano que sufrió dicho acero después del ensayo.

4.1.2.1.2. Fuego envolvente. Curva ISO 834

En la Figura 4. 58 se presentan las gráficas tensión-deformación obtenidas en los ensayos de tracción, de los aceros S355NL y S460NL después de sometidos a la acción de un fuego envolvente siguiendo curva ISO 834.

Lo más significativo que puede observarse en los gráficos es una variación en la deformación con respecto a la curva del material en su estado de recepción, posiblemente debido a una sensibilización del material después de las tres horas de ensayo. Los aceros aumentaron su comportamiento plástico antes de la rotura, excepto en el caso del acero S460NL después de una hora de ensayo de fuego, que falló incluso antes que el material en su estado inicial, posiblemente porque la pieza tuviera algún defecto.

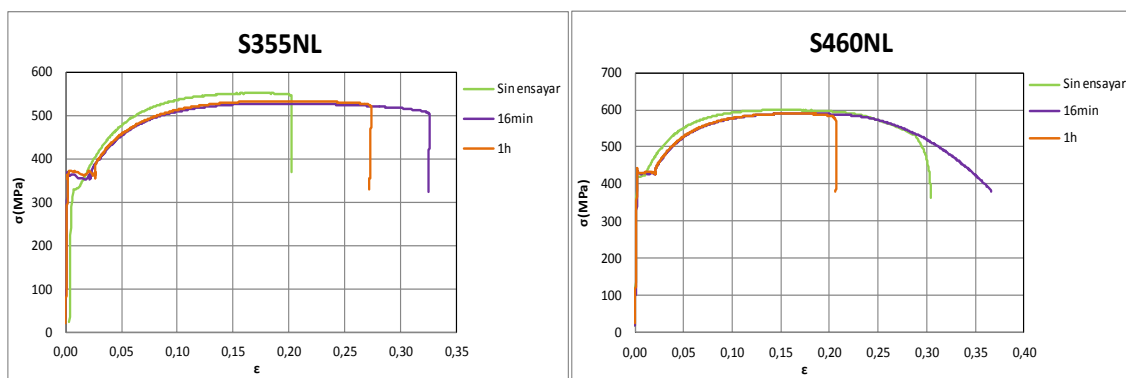


Figura 4. 58. Curvas tensión-deformación de los aceros S355NL y S460NL después del ensayo de fuego envolvente con curva ISO durante 16 minutos y 1 hora.

Las propiedades mecánicas después del ensayo con fuego envolvente se presentan en la Tabla 4. 14, en donde se observa que no hubo variaciones significativas, excepto en el módulo elástico que se redujo para el caso del acero S355NL y se mantuvo prácticamente constante para el S460NL. Las durezas no presentas variaciones importantes.

Tabla 4. 14. Propiedades mecánicas de los aceros S355NL y S460NL, deducidas de los ensayos de tracción.

ACERO	Tiempo	Resistencia (MPa) / Factor de reducción	Módulo elástico (GPa) / Factor de reducción	Límite proporcional 0.2%(MPa)	Estricción (%)	Alargamiento (%)
S355NL	Inicial	552/1	206/1	329	74	15
	16 min	531/0,96	140/0,68	365	78	18
	1 h	531/0,96	134/0,65	365	78	18
S460NL	Inicial	595/1	217/1	404	75	14
	16 min	561 / 0,94	218 / 0,99	396	73	16
	1 h	581/0,98	225	428	73	13

Tabla 4. 15. Durezas de los acero S355NL y S460NL después del ensayo de fuego envolvente con curva ISO 834.

ACERO	DUREZA ROCKWELL B, HRB(Kg/mm2)			
	Curva ISO 834			
S355NL	82	81	80	78
S460NL	86	88	86	84
TIEMPO	Inicial	16 min	1 h	3h

4.1.2.1.3. Fractografías de los ensayos de tracción

Las superficies de rotura de todos los ensayos de tracción, fueron estudiadas mediante microscopía electrónica de barrido.

Las imágenes tomadas correspondientes a los ensayos de fuego bajo curva ISO por una cara, de los aceros S355NL y S460NL, fueron en la dirección de laminación y en la perpendicular a ella, mostrando la rotura tanto de la cara fría de la probeta como de la cara expuesta al fuego, ver Figura 4. 59 y Figura 4. 60.

En las macrografías de ambos aceros y para ambas direcciones (laminación y perpendicular) se observó una rotura en forma de copa y cono con textura fibrosa que genera una apariencia de rugosidad, también se observó la estricción generada por el ensayo, relacionada con la deformación plástica de los mismos. En el caso de las

micrografías se observó que la rotura fue transgranular debida al crecimiento y coalescencia de huecos aparecidos durante la deformación.

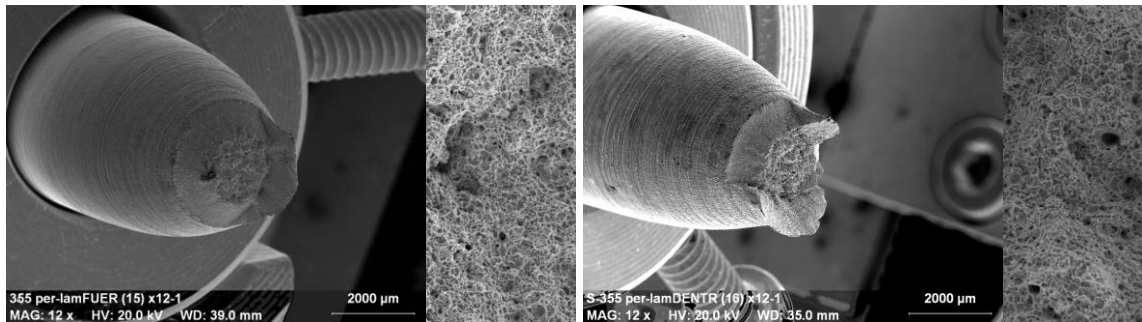


Figura 4. 59. Macrografía x12 y micrografía x400 en MEB del acero S355NL dirección perpendicular cara fría y cara caliente. Fuego a una cara bajo curva ISO 834.

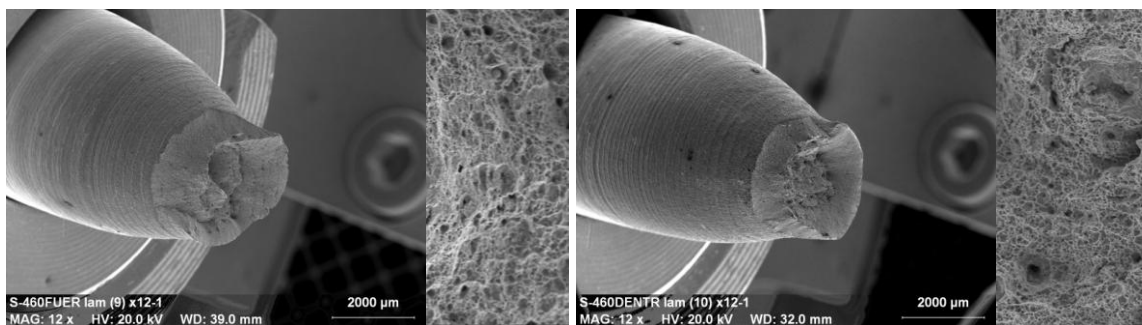


Figura 4. 60. Macrografía x12 y micrografía x400 en MEB del acero S460NL dirección de laminación cara fría y cara caliente. Fuego a una cara bajo curva ISO 834.

Las fractografías de las probetas que se llevaron a la rotura por tracción después del ensayo de fuego por una cara con la curva externa, presentaron las mismas características que cuando se sometieron a la curva ISO, así se puede observar en la Figura 4. 61.

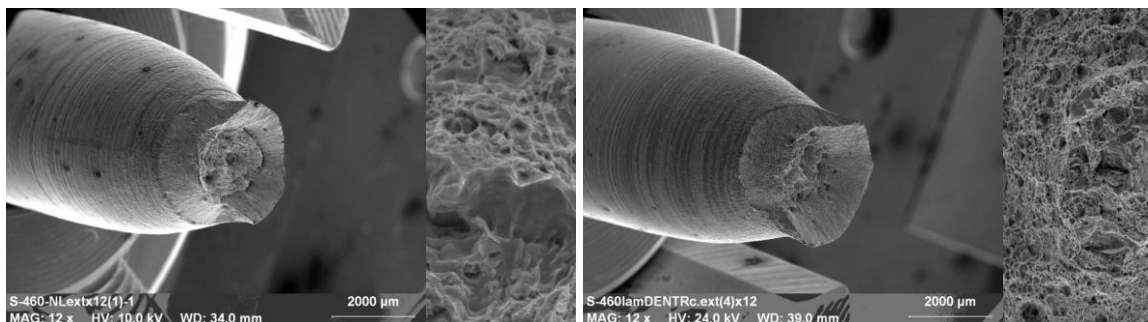


Figura 4. 61. Macrografía x12 y micrografía x400 en MEB del acero S460NL, dirección de laminación cara fría y cara caliente. Fuego a una cara bajo curva externa.

A lo largo de toda la superficie de rotura que se observó, en ambos aceros se encontraron unas inclusiones con forma cilíndrica tal como aparecen en la Figura 4. 62, que después de ser analizadas se dedujo que eran sulfuros de manganeso, cuya aparición se debió a la composición del material (Tabla 3.1) y se consideró un posible factor por el cual se produjo también el fallo del material.

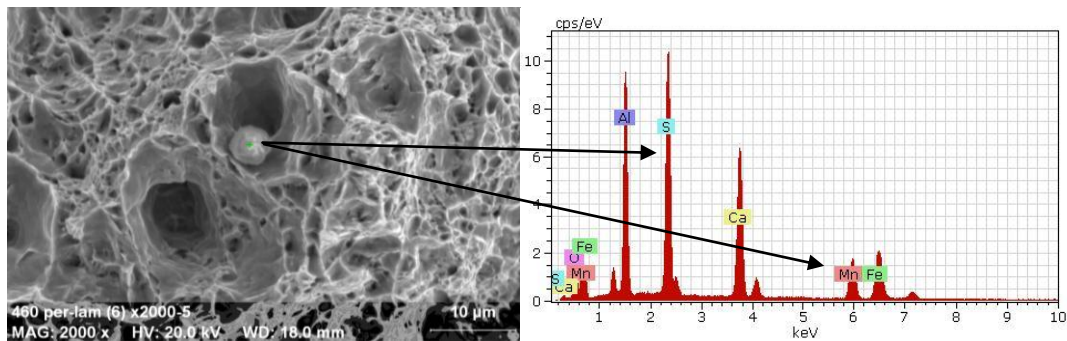


Figura 4. 62. Inclusiones de sulfuro de manganeso.

En las imágenes de la Figura 4. 63, se pueden observar unas líneas suavemente marcadas, que corresponden a la dirección de laminación del material, en este caso para el acero S460NL antes y después del ensayo de fuego por una cara bajo curva ISO. En la primera micrografía se pueden ver en la parte inferior izquierda y en la segunda imagen en la parte superior.

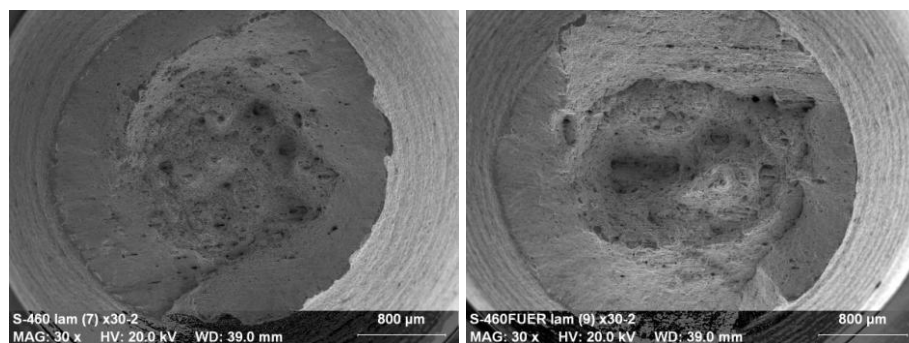


Figura 4. 63. Macrografía en MEB x30 del acero S460NL antes y después del ensayo de fuego a una bajo curva ISO 834 (cara fría).

4.1.2.2. Ensayo de tracción con carga y sometido a fuego por una cara bajo curva ISO 834.

Los ensayos se realizaron con unas probetas especialmente mecanizadas según la Figura 3. 23 con los dos aceros, S355NL y S460NL. En el esquema de la Figura 4. 64 se indican los puntos donde se situaron los termopares para la medida de las temperaturas durante el ensayo de fuego por una cara bajo curva ISO, durante 3 horas y con carga. La temperatura de la cara fría se tomó en dos puntos a 1 milímetro de profundidad y la temperatura de la cara expuesta al fuego, se tomó en un punto de la superficie (T2).

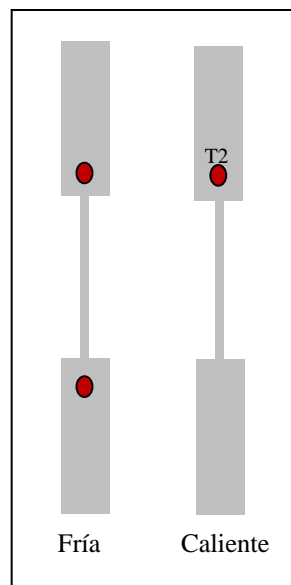


Figura 4. 64. Posiciones de los termopares para la medida de las temperaturas.

A continuación se presentarán las gráficas de los registros temperatura-tiempo, para los dos aceros, con tres cargas distintas de 90, 180 y 360 kg y para una sección central de la probeta de 40 mm² (22, 44, 88 MPa). También se presentan los ensayos realizados para una sección de 80 mm² sólo con la carga de 360 kg (44 MPa).

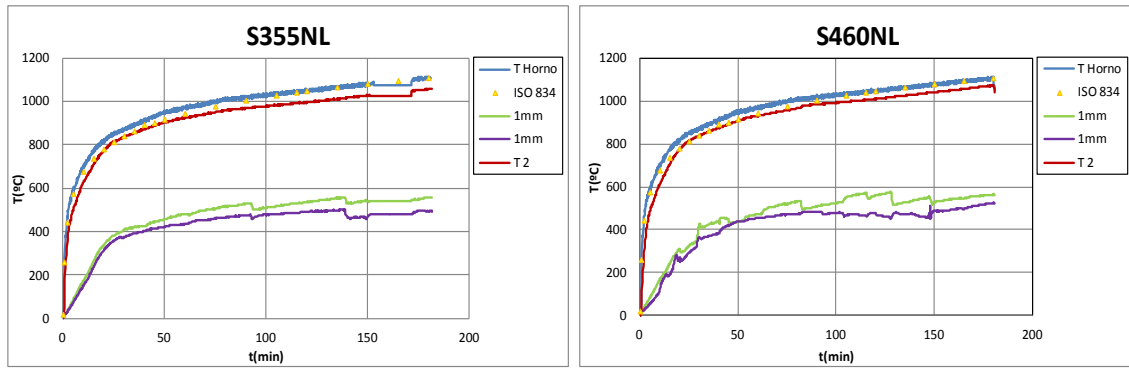


Figura 4. 65. Registros T-t para el ensayo de fuego por una cara bajo curva ISO 834 con una carga de 90 kg y sección central de 40mm².

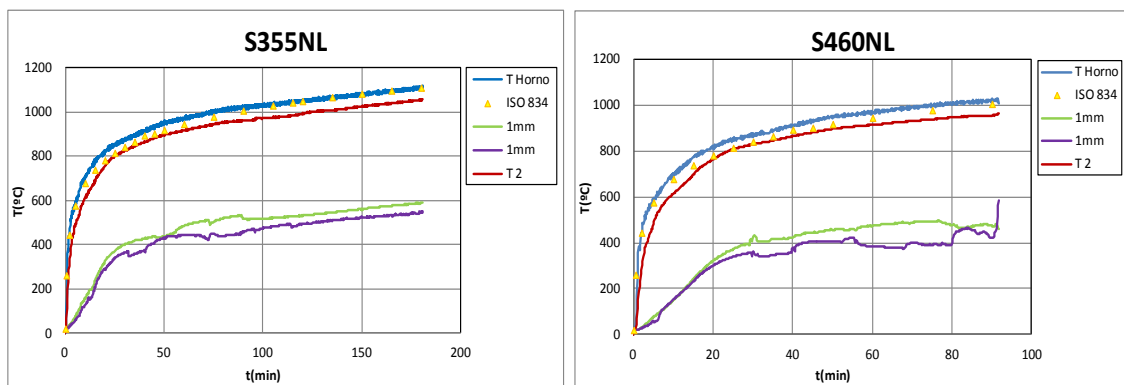


Figura 4. 66. Registros T-t para el ensayo de fuego a una cara bajo curva ISO 834 con una carga de 180 kg con una sección central de 40mm².

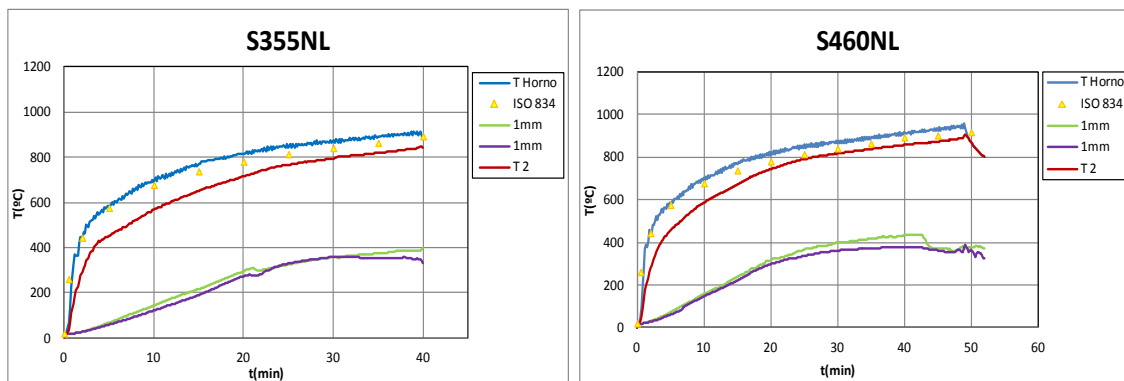


Figura 4. 67. Registros T-t para el ensayo de fuego a una cara bajo curva ISO 834 con una carga de 360 kg con una sección central de 40mm².

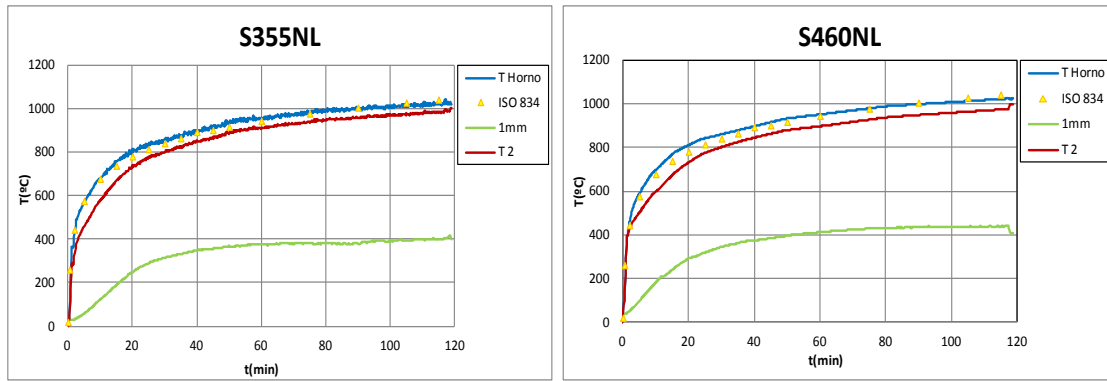


Figura 4. 68. Registros T-t para el ensayo de fuego a una cara bajo curva ISO 834 con una carga de 360 kg con una sección central de 80mm².

De los registros temperatura tiempo de las Figura 4. 65 a Figura 4. 68, se desprende que para los ensayos con probetas de sección útil de 40 mm², el acero S355NL sólo falló cuando se aplicó la carga mayor, a diferencia del S460NL que llegó a la rotura en todos los ensayos, excepto con la carga más baja, para esta última situación ambos aceros resistieron durante las tres horas del ensayo de fuego ISO por una cara.

En la Tabla 4. 16 se presentan los datos de las temperaturas y los tiempos alcanzados en los ensayos, tanto con rotura o sin ella. Ambos aceros no rompen con una tensión de 22 MPa y para la de 44 MPa solamente rompe el acero S460NL.

Tabla 4. 16. Valores máximos de temperaturas y tiempo de los aceros S355NL y S460NL en los distintos ensayos de fuego ISO con carga.

Acero	Sección (mm ²)	Carga (Mpa)	T ^a máx (C)	t máx (min)
S355NL	40	22	1050	180
		44	1050	180
		88	845	40 @
	80	44	960	118 @
S460NL	40	22	1060	180
		44	970	90@
		88	850	50 @
	80	44	960	118 @

Los ensayos realizados con la técnica VIC-2D se llevaron a cabo con probetas con una sección útil de 40 y 80 mm² y aplicando la carga de mayor peso, lo que supuso unas tensiones aplicadas de 88 y 44 MPa respectivamente. Los resultados obtenidos están de acuerdo con los obtenidos anteriormente cuando no se midieron las deformaciones.

A continuación se presentan las variaciones de las deformaciones en los aceros frente al tiempo, ver Figura 4. 69a, que cuando se combina con los registros experimentales de temperatura tiempo de la Figura 4. 69b, fácilmente se deducen los valores de las deformaciones en función de las temperaturas, Figura 4. 71a, que se corresponde con los ensayos de ambos aceros para la sección de 40 mm^2 . En las Figura 4. 70a y b, y en la Figura 4. 71b, se presenta una situación análoga pero cuando los aceros tenían una sección de 80 mm^2 .

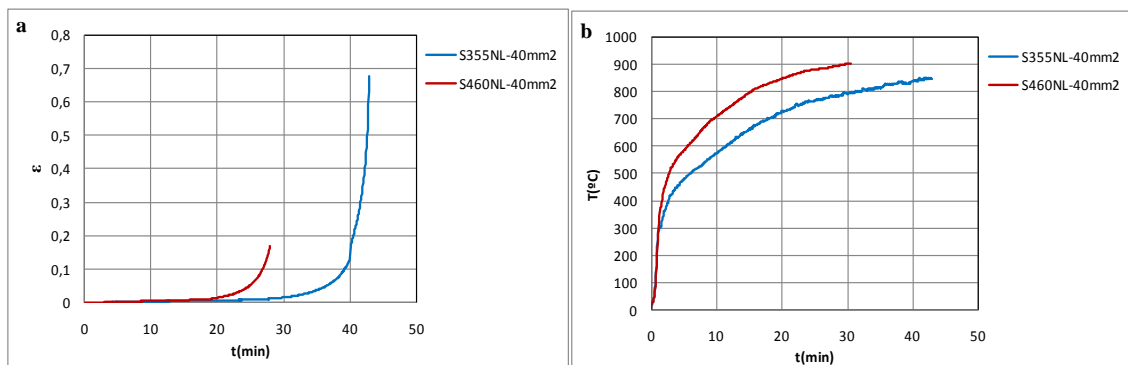


Figura 4. 69. Gráficas ϵ -T (a) y T-t (b) de los aceros S355NL y S460NL con una sección de 40mm^2 después del ensayo de fuego con carga.

Los cuatro ensayos se programaron de forma que tuviera lugar la fractura de los dos aceros. Los resultados obtenidos son acordes con los realizados anteriormente salvo para el acero S460NL y con una sección de 40 mm^2 , en donde la fractura se produjo antes de lo esperado, por lo que se estima que posiblemente el material presentase algún tipo de defecto que desencadenase la fractura antes del tiempo previsto en el ensayo. No se observó una diferencia significativa en el comportamiento del acero S355NL y S460NL, tal y como muestran los datos de la Tabla 4. 17.

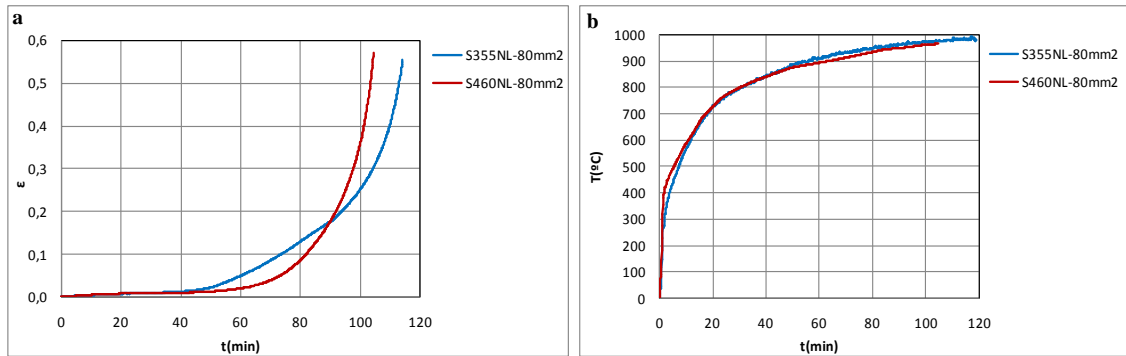


Figura 4. 70. Gráficas ϵ -T (a) y T-t (b) de los aceros S355NL y S460NL con una sección de 80mm^2 después del ensayo de fuego con carga.

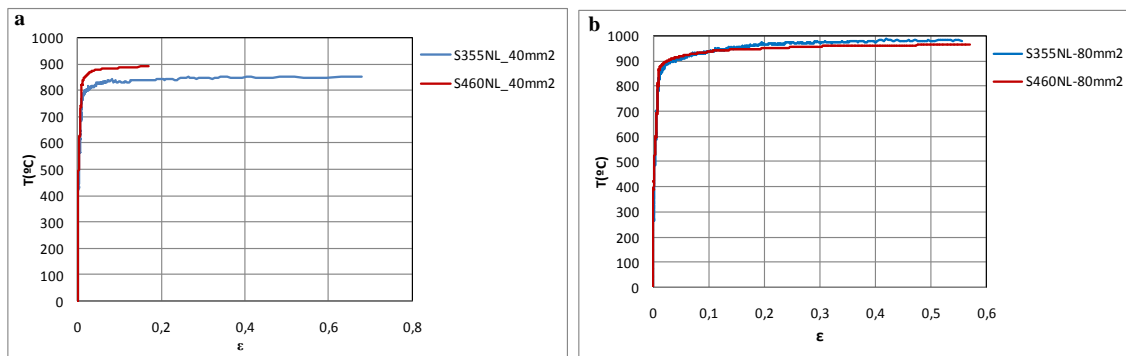


Figura 4. 71. Gráficas T- ϵ de los aceros S355NL y S460NL con una sección de 40 y 80mm^2 (a) y (b) después del ensayo de fuego con carga.

Tabla 4. 17. Valores máximos de temperaturas, tiempo y deformaciones de los aceros S355NL y S460NL para las dos secciones elegidas para el ensayo de fuego ISO con carga.

Acero-sección	T _{máx} (°C)	t _{rotura} (min)	ε _{máx}
S355NL-40mm ²	853	42,8	0,6779
S355NL-80mm ²	982	114,3	0,5552
S460NL-40mm ²	890	27,8	0,1697
S460NL-80mm ²	966	104,6	0,5706

De la observación de los datos experimentales deformación-tiempo de la Figura 4. 72, se puede deducir para cada material que inicialmente la deformación que sufren los aceros en el tiempo sigue una variación lineal, para finalmente y a medida que progresa el ensayo se produce una fuerte variación de la deformación con el tiempo. Es por ello que para cada material se han deducido dos etapas, una con velocidad de deformación constante y otra con variación de la deformación exponencial con el tiempo. La delimitación de cada zona se realizó atendiendo a criterio estadístico de la

regresión de las deformaciones en el tiempo, y los resultados se presentan en la Figura 4. 72, en donde recoge el comportamiento del acero S355NL con una sección de 40 mm²; y en la Tabla 4. 18 se agrupan los datos de las regresiones para todos los ensayos realizados.

$$\epsilon = \epsilon_{0A} + m_A t \quad (4.2)$$

$$\epsilon = \epsilon_{0B} + e^{m_B t} \quad (4.3)$$

Donde ϵ , es la deformación experimentada por el material en tanto por uno.

El primer tramo correspondería a una zona lineal, A, que se ajusta a la ecuación (4.2), con una variación de la velocidad de deformación constante en régimen transitorio del campo de las temperaturas en el material y un segundo tramo B, que se ajusta a la ecuación (4.3), con una variación acelerada de la deformación. Las temperaturas a partir de las cuales se puede considerar el comienzo del segundo tramo aparecen en la Tabla 4. 19. Los intervalos de tiempo con velocidad de deformación constante aumentaron cuando lo hizo la sección de la probeta, siendo más elevadas las velocidades de deformación constantes para el acero S355 que para el S460. Las deformaciones dentro del tramo B con velocidad de deformación variable y creciente hasta ruptura, el exponente m_B disminuye cuando aumenta la sección de carga del material, no apreciándose variación significativa con el tipo de acero ensayado.

Tabla 4. 18. Valores de los coeficientes y grado de significación para los acero S355NL y S460NL deducidos del ajuste de las ecuaciones 4.2 y 4.3.

Acero-sección	ϵ_{0A}	m_A	R^2	ϵ_{0B}	m_B	R^2
S355NL-40mm ²	$3,8 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$	0,9923	$6 \cdot 10^{-6}$	0,2562	0,968
S355NL-80mm ²	$2,7 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-4}$	0,9782	$2,5 \cdot 10^{-3}$	0,0472	0,973
S460NL-40mm ²	$5,9 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-5}$	0,9922	$5 \cdot 10^{-5}$	0,2815	0,9882
S460NL-80mm ²	$2,1 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	0,9289	$2 \cdot 10^{-4}$	0,0736	0,9987

Tabla 4. 19. Límite de las temperaturas y los tiempos entre el tramo A y B.

Acero-sección	T(°C)	t(min)
S355NL-40mm ²	782	28
S355NL-80mm ²	855	42
S460NL-40mm ²	839	19
S460NL-80mm ²	885	55

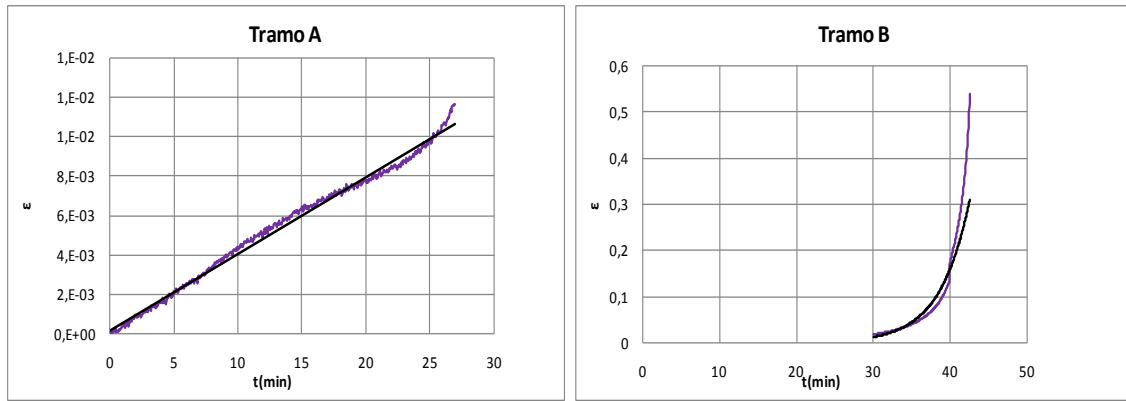


Figura 4. 72. Representación de los dos tramos de la curva ε -t para el acero S355NL con una sección de 40 mm^2 .

El proceso de fluencia lenta en un material trae consigo un aumento de la deformación que sufre en el tiempo, cuando el material está sometido a una carga (esfuerzo) constante, y el conjunto está en régimen isotérmico. La deformación por termofluencia frente al tiempo, se presenta en gráficas a temperatura y carga constante, pudiéndose observar que en ella hay tres zonas diferentes. En la etapa primaria o termofluencia transitoria, la velocidad crece en el tiempo hasta hacerse constante, iniciándose así, la denominada etapa secundaria o etapa estable de la termofluencia. Finalmente está la etapa terciaria, en donde la velocidad de deformación crece hasta que se produce la fractura. La etapa segunda se puede modelar matemáticamente, a partir de los ensayos realizados a carga constante y temperatura variable.

Por lo tanto la ecuación general que correlaciona la velocidad de deformación constante con la carga y la temperatura está dada por la ecuación (4.4), en donde se aprecia una variación potencial con la carga y otra variación exponencial con la temperatura, siendo Q_c la energía de activación de la velocidad de deformación. Los mecanismos de deformación de un material, tiene que ver con su naturaleza y caracterización, así como de la acción combinada de la carga aplicada y la temperatura de operación. En el proceso de fluencia lenta de los materiales metálicos, se distingue a su vez, dos mecanismos, uno de tipo difusional o de movimiento de dislocaciones, el caso primero es predominante a altas temperaturas y el coeficiente “A” de la ecuación (4.4) debe dividirse por una función potencial del tamaño de grano elevado al cuadrado, para el segundo mecanismo no es necesario.

En los ensayos realizados del comportamiento de los aceros bajo curva de fuego, se ha indicado como han aparecido fenómenos de fluencia, tal como se han presentado a partir de los registros de las deformaciones sufridas en los aceros en función del tiempo, debiendo indicar que dichos registros se han procesado mediante un registro de imágenes en cada instante y con el horno operando en régimen transitorio, por lo que también se registraron las variaciones de las temperaturas de los aceros con el tiempo, esto permitió deducir los gráficos de las deformaciones con la temperatura. En los gráficos deformación tiempo se observaron dos zonas, una con velocidad de deformación constante, seguida de otra con velocidad de deformación creciente en el tiempo y por lo tanto con la temperatura del material a lo largo del tiempo del ensayo de fuego.

Esta última circunstancia fue la que hizo pensar que la velocidad de deformación podría estar activada directamente por la evolución de la temperatura, por lo que se estimó oportuno establecer una relación de tipo exponencial entre ambas variables tal como se indica en la siguiente ecuación (4.5) y viendo la respuesta estadística que se tendría en la representación de ambas variables. Los valores de los parámetros de la función ajustada se dan en la Tabla 4. 20, en donde la energía de activación aparece de forma explícita. Dicha energía es la necesaria para que se produzca el mecanismo de fluencia progresivo que dio lugar al fallo de los materiales. Los valores de las energías de activación térmica que se recogen, fueron algo superiores a los usuales para los ensayos de fluencia en régimen estacionario a velocidad de deformación constante, ya que en esta situación no se habrían activado aun los mecanismos que darían lugar a la ruptura.

De los datos recogidos en la tabla anterior, se comprueba el fallo adelantado en el tiempo para el acero S460NL, y cómo la correspondiente energía de activación fue menor de lo que debiera, ya que la resistencia que opuso fue menor debido a posibles defectos accidentales que el material tenía de partida y que se desconocía.

$$d\varepsilon/dt = A \sigma^n \exp (-Q_c/RT) \quad (4. 4)$$

$$d\varepsilon/dt = A_t \exp (-Q_c/RT) \quad (4. 5)$$

Donde, $\dot{\epsilon} = d\epsilon/dt =$ velocidad de deformación (s^{-1}), $\sigma =$ carga (Pa), $Q_c =$ energía de activación para la fluencia (J/mol), $R =$ Cte. universal de los gases perfectos, A y $n =$ constantes del material para régimen estacionario y $A_t =$ constante de la fluencia del material cargado en régimen transitorio.

Tabla 4. 20. Valores de Q_c , A_t y grado de significación para los aceros S355NL y S460NL hallados a partir del ajuste con la ecuación 4.5.

Acero-sección	Q_c (KJ/mol)	A_t	R^2
S355NL-40mm ²	552,8	56,5	0,962
S355NL-80mm ²	306,9	25,2	0,922
S460NL-40mm ²	510,1	50,9	0,957
S460NL-80mm ²	504,9	45,2	0,982

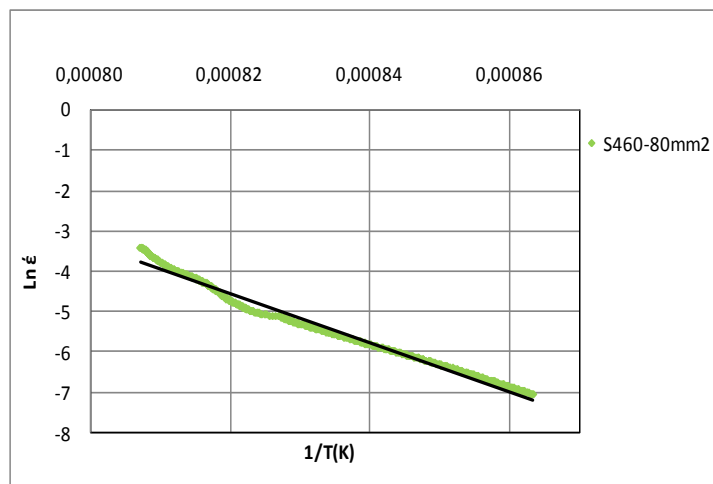


Figura 4. 73. Representación del logaritmo neperiano de la velocidad de deformación frente a la inversa de la temperatura para el ensayo de fuego con carga del acero S460NL con una sección de 40 mm².

En la Figura 4. 74 se presenta los campos de deformación medidos con la técnica VIC-2D, durante el ensayo de fuego con una carga de peso constante de 360kg. Las imágenes de la 1 a la 5 indican, en los cuatro casos, la localización de las zonas de máxima deformación a lo largo de la probeta en distintos instantes del ensayo (las nombradas como “a” corresponden al acero S355NL con una sección de 40 mm², las imágenes “b” son del acero S460NL con la misma sección, las imágenes “c” son del acero S355NL con una sección de 80 mm² y las imágenes “d” corresponden al acero

S460NL con la misma sección). Se adjunta en cada figura una leyenda de colores desde el fucsia hasta el rojo que indica de menor a mayor la deformación sufrida en la probeta, dicha leyenda está tomada en los instantes antes del fallo del material. Las imágenes a1, b1, c1 y d1 corresponden a los primeros instantes del ensayo. Las imágenes a5, b5, c5 y d5 están tomadas a unos 5 segundos antes de la rotura del material.

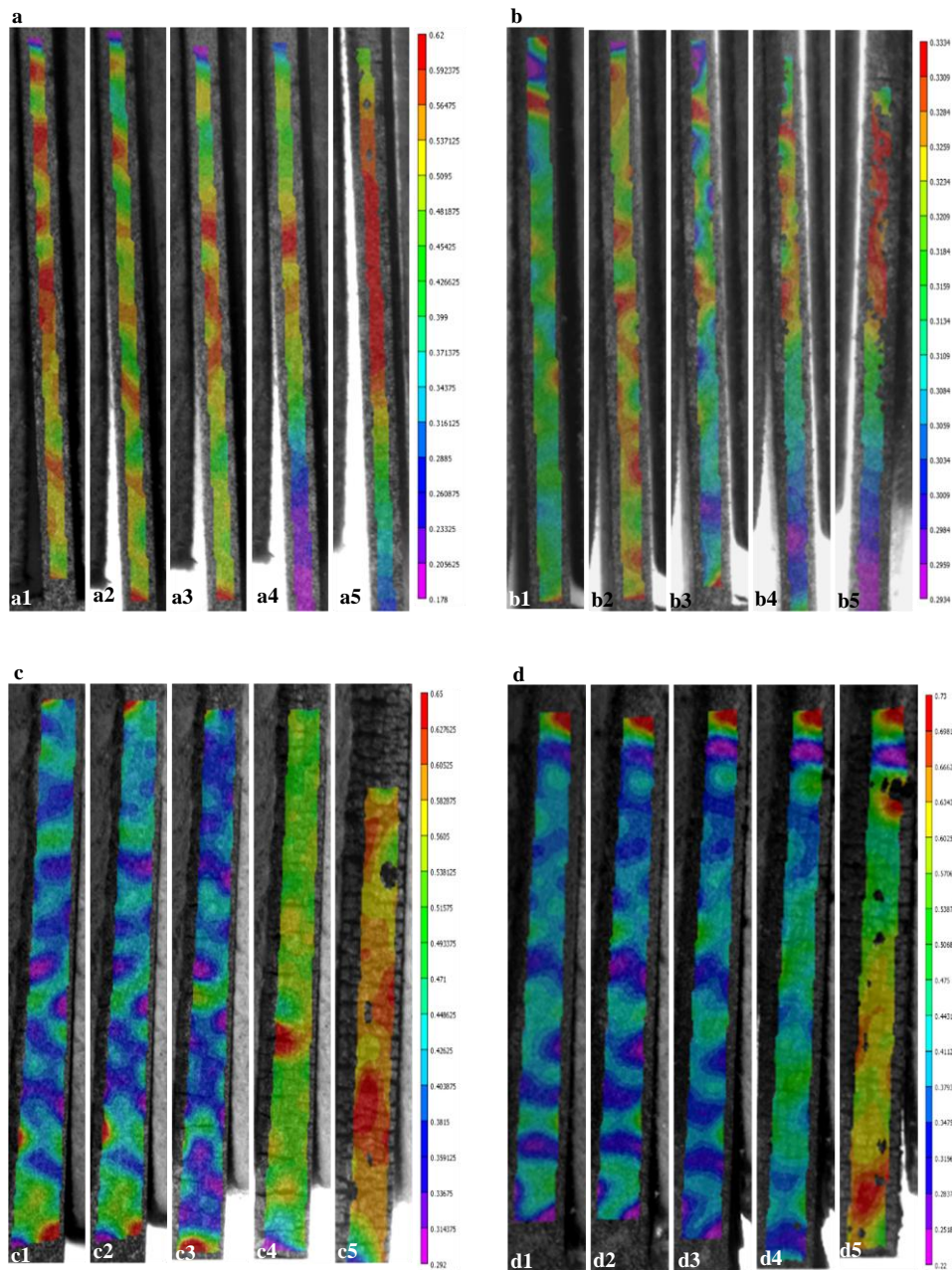


Figura 4. 74. Mapas de los campos de deformación durante el ensayo de fuego con carga. Acero S355NL con una sección de 40 mm^2 (a) y 80 mm^2 (c). Acero S460NL con una sección de 40 mm^2 (b) y 80 mm^2 (d).

Durante el progreso del ensayo se observó un movimiento constante de las zonas de máxima deformación (rojo). En las probetas de los aceros con una mayor sección, dichas zonas aparecieron a instantes superiores que en los ensayos que se hicieron con probetas de menor sección, lo que se tradujo en una mayor resistencia del material. En las imágenes correspondientes a los últimos instantes del ensayo se observó una zona donde se acumuló la mayor deformación y por lo tanto la zona por donde el material rompió. En el caso de las figuras “c” y “d”, dicha zona quedó, en parte, fuera de la adquisición de las imágenes debido a la colocación del dispositivo.

4.1.2.2.1. Microestructura y fractografías del ensayo de tracción con carga y régimen transitorio de temperatura

En primer lugar se presentaran las macrográficas de la zona de rotura, después del ensayo bajo curva ISO 834 por una cara y con carga, en las probetas de los aceros S355NL y S460NL.

La Figura 4. 75 muestra las imágenes de las probetas del acero S355NL con superficie útil de rotura de 40mm^2 y 80mm^2 y para una carga de 360 Kg (88 y 44 MPa), en estas condiciones las probetas del acero ensayado sufrió un proceso de fractura. La zona que se ha elegido se corresponde con la parte fría de la probeta, ya que la superficie caliente tuvo un comportamiento idéntico. En la Figura 4. 77 se presentan las macrográficas de la zona de rotura para las probetas del acero S460NL, con 40mm^2 de superficie útil y que fallaron cuando la carga que se usó fue de 44 y 88 MPa (180 y 360 kg); y para una sección de 80mm^2 y 44 MPa de carga (360kg).

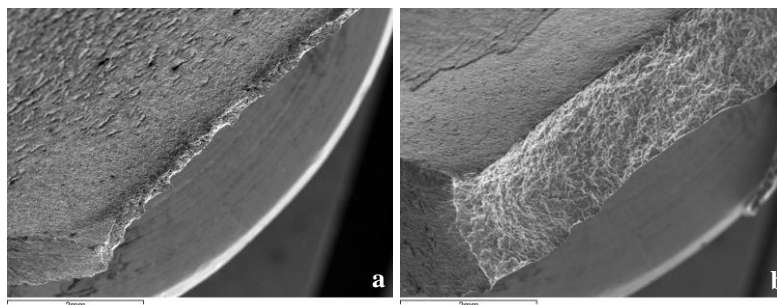


Figura 4. 75. Fractografías x20 en MEB, de las probetas de acero S355NL con una superficie útil de 40mm^2 (a) y 80mm^2 (b) con una carga de 88 y 44 MPa (360kg), después del ensayo con fuego ISO 834 por una cara.

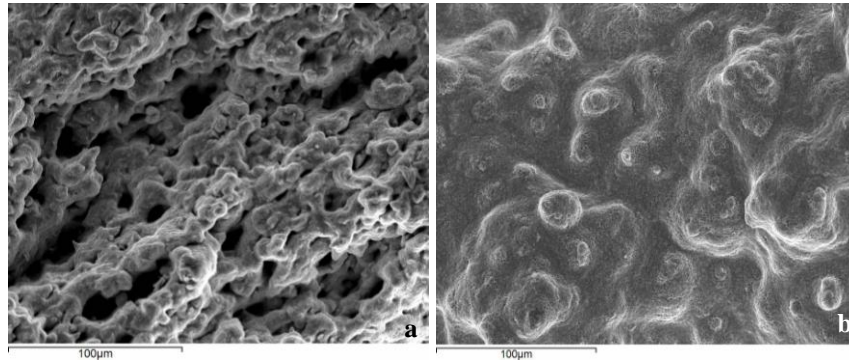


Figura 4. 76. Superficie de la zona de la rotura en el acero S355NL con una sección útil de 40mm^2 (a) y 80mm^2 (b) con una carga de 88 y 44 MPa (360kg), después del ensayo con fuego ISO 834 por una cara.

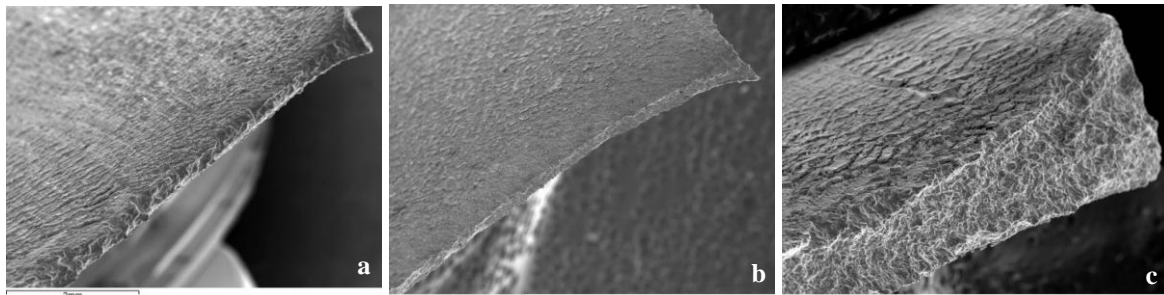


Figura 4. 77. Fractografías x20 en MEB, de las probetas de acero S460NL con una superficie útil de 40mm^2 con carga de 44 MPa (180kg), (a) y con 40 y 80mm^2 con carga de 88 y 44 MPa (360kg), (b y c) después del ensayo con fuego ISO 834 por una cara.

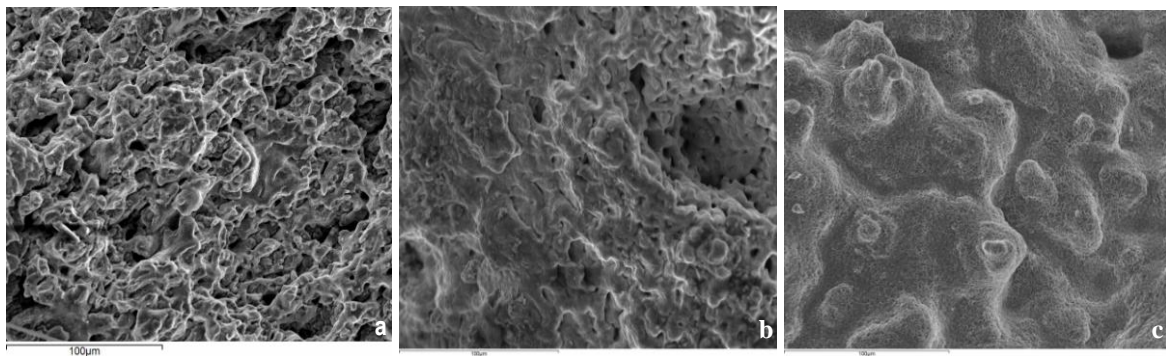


Figura 4. 78. Superficie de la zona de la rotura en el acero S460NL con una sección útil de 40mm^2 con carga de 44 MPa (a) y con 40 y 80mm^2 con una carga de 88 y 44 MPa (360kg), (b y c) después del ensayo con fuego ISO 834 por una cara.

En las Figura 4. 76 y Figura 4. 78, se presentas las micrografías de la superficie de rotura en las probetas de los acero ensayados. Se observa en la figura 4.76a y 4.78a y b, que la superficie quedó tras la rotura con una textura porosa, debido a la nucleación y coalescencia de huecos, dicha estructura se asemeja a las correspondientes micrografías de la Figura 4. 16 en donde los aceros sufrieron una rotura debida a esas oquedades formadas por los diversos defectos acumulados en el material. Las micrografías de las

Figuras 4.76b y 4,78c, presenta una superficie más homogénea, característica de una ruptura con un gran número de zonas de deformación plástica marcadas en color blanco en forma de telaraña, aparecen cuando existe un proceso de fluencia y dicha textura es comparable con las micrografías de los aceros ensayados a tracción presentadas en la Figura 4. 16.

En las todas las imágenes se puede observar como en las probetas de los aceros ensayados, tanto con 40 mm² y 80 mm² de sección útil y con todas las cargas que dieron lugar a rotura, se produjo una reducción de la sección y una fuerte oxidación de la superficie. También se evaluó la deformación uniforme que sufrieron los aceros ensayados y cuyo valor se presenta en la Tabla 4. 21.

Tabla 4. 21. Deformación uniforme y reducción de área (%) de los aceros S355NL y S460NL después del ensayo de fuego normalizado con carga por una cara.

Acero	Sección (mm ²)	Carga (Mpa)	Def. Uniforme(%)	Reducción de area (%)
S355NL	40	22	8	6
		44	33	24
		88	41	85 ®
	80	44	68	63 ®
S460NL	40	22	24	13
		44	59	67®
		88	44	86 ®
	80	44	79	77 ®

El comportamiento de los aceros ensayados con fuego bajo carga es el siguiente. Cuando la sección del material fue de 40 mm² ambos aceros experimentaron un aumento en la deformación uniforme con la carga aplicada, también se comprobó una reducción de área importante con la carga mucho más pronunciada que para las probetas con 80 mm². Esta tendencia se ve más potenciada en el acero S460NL, comprobando así la mayor capacidad de deformación que tiene este acero antes de la rotura. No obstante lo anteriormente indicado, se observa como el acero S355NL cargado con un peso de 180kg resistió el ensayo de fuego durante 3 horas mientras que el acero S460NL fracturo a los 90 minutos.

También se midieron las durezas Rockwell B en cada uno de los aceros después de haber sido sometidos al ensayo normalizado de fuego, mediante un durómetro Centauro RB2, los resultados se muestran en la Tabla 4. 22.

En la zona donde el acero no sufrió deformación, las durezas no se vieron afectadas, pero en la zona cercana a la rotura el valor de las durezas disminuyó

notablemente, estos datos no fueron relevantes porque la zona quedó afectada y con una superficie poco homogénea, pero sí sirvieron para poner de manifiesto la reducción importante que sufre la dureza en las zonas próximas a la fractura de los aceros.

Tabla 4. 22. Durezas de los aceros S355NL y S460NL después del ensayo de fuego con carga.

ACERO	DUREZA ROCKWELL B, HRB(Kg/mm2)				
	Curva ISO 834				
S355NL	82	40	75	x	x
S460NL	86	72	86	59	82
Deformación	Sin	Máx	Mín	Máx	Mín
PESO (Kg)	Inicial	360		180	

Después de los ensayos de tracción con carga, se analizó tanto la microestructura de la zona de rotura así como la de la zona cercana a la rotura pero donde la deformación no fue tan acusada. Las micrografías expuestas en las Figura 4. 79 a Figura 4. 83, corresponden a los aceros S355NL y S460NL con 40mm² y 80mm² de superficie útil y para las cargas con las cuales el material sufrió fallo.

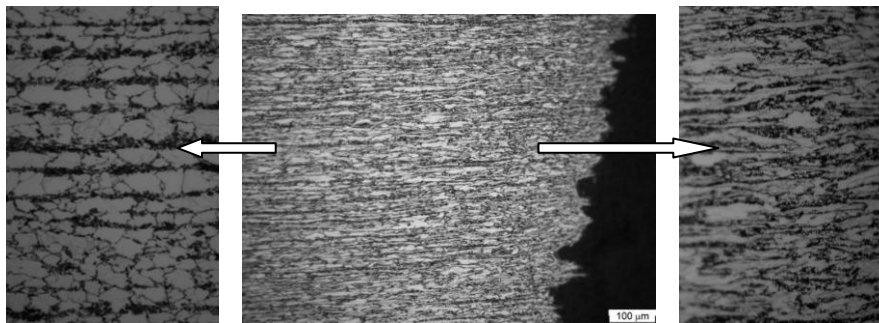


Figura 4. 79. Micrografía de la rotura del acero S355NL con una superficie 40mm² después del ensayo a temperatura con una carga de 88 MPa x200 y detalle de las microestructuras en zona alejada y próxima a la fractura x500.

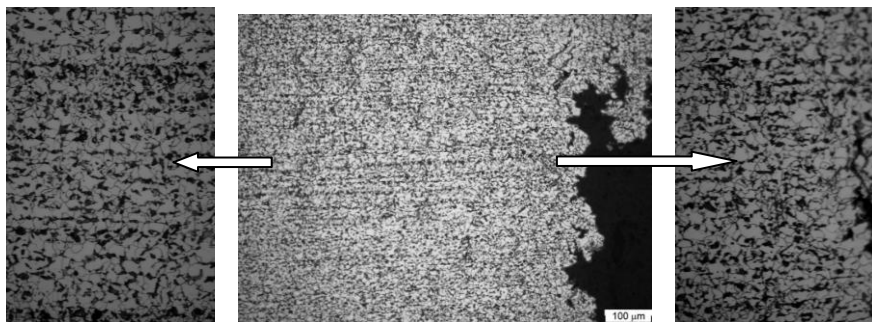


Figura 4. 80. Micrografía de la rotura del acero S355NL con una superficie 80mm² después del ensayo a temperatura con una carga de 44 MPa x200 y detalle de las microestructuras en zona alejada y próxima a la fractura x500.

En todas las micrografías centrales se observa como aparece la estructura en bandas de ferrita y de perlita alternadas. En los detalles izquierdo y derecho aparece la zona de máxima y mínima deformación respectivamente. Se comprobó cómo el grano del acero S355NL, para la zona próxima a la rotura, con máxima deformación, sufrió un alargamiento bien definido en la misma dirección en la que actuó la carga, esta situación no se aprecia en zonas más alejadas de la zona de fractura. Cuando se disminuyó la carga a la mitad, prácticamente el tamaño de grano no muestra variación, tal como se ha descrito anteriormente, ver Figura 4. 80.

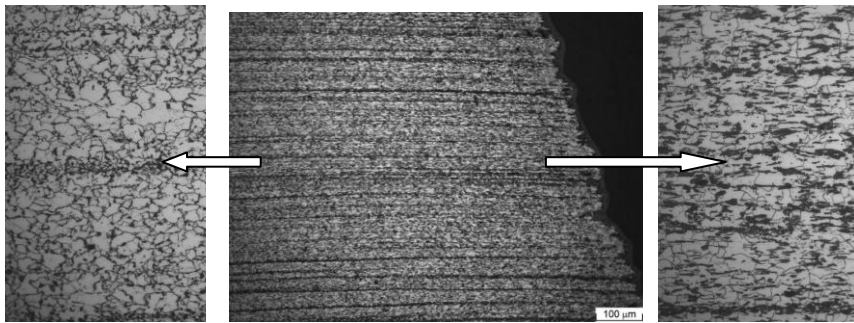


Figura 4. 81. Micrografía de la rotura del acero S460NL con una superficie 40mm^2 después del ensayo a temperatura con una carga de 44 MPa x200 y detalle de las microestructuras en zona alejada y próxima a la fractura x500.

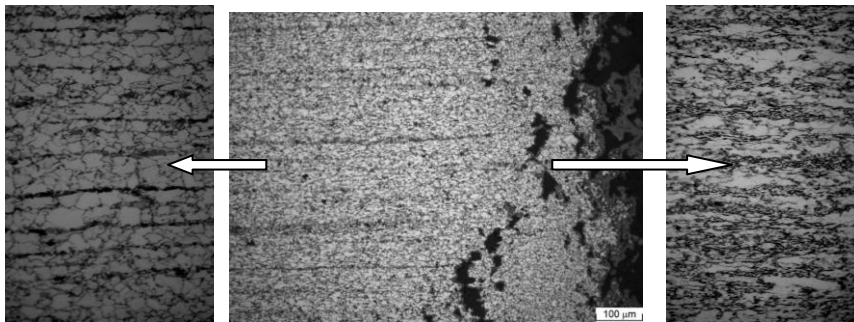


Figura 4. 82. Micrografía de la rotura del acero S460NL con una superficie 40mm^2 después del ensayo a temperatura con una carga de 88 MPa x200 y detalle de las microestructuras en zona alejada y próxima a la fractura x500.

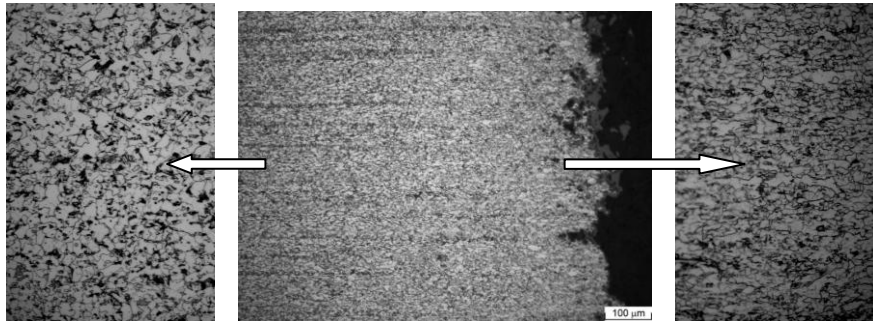


Figura 4. 83. Micrografía de la rotura del acero S460NL con una superficie 80mm^2 después del ensayo a temperatura con una carga de 44 MPa x200 y detalle de las microestructuras en zona alejada y próxima a la fractura x500.

Esta situación descrita para el acero S355NL es de utilidad y aplicación para el acero S460NL, por lo que el comportamiento de ambos aceros es muy similar, de forma que la deformación que sufren en la estructura para campos de temperaturas análogos, en donde se aprecia la contribución de la carga del material para que los aceros sufran una deformación plástica significativa en la microestructura de los mismos.

4.2. Morteros

En este apartado, se presenta los ensayos mecánicos que se realizaron después de las pruebas de fuego, siendo éstos los de resistencia a la compresión y a la flexotracción de los morteros.

4.2.1. Propiedades mecánicas: resistencia a la compresión y flexotracción

En el cuadro de la Tabla 4. 23 aparecen los valores de la resistencia a la compresión y a la flexotracción de los morteros después del ensayo de fuego ISO por una cara durante 3 horas. El dato del mortero con base de cemento Portland (OPC) no aparece porque no resistió el primer ensayo que se realizó.

Tabla 4. 23. Resistencia a compresión y a la flexotracción de los morteros después del ensayo ISO en MPa.

	OPC	OPC-P+V	AL-P+V	AL +HS-P+V
Resistencia compresión (90días)	90.54±2.89	61.19±3.21	61.96±1.48	39.64±1.29
Resistencia compresión	-	15.14±0.70	28.07±2.33	12.25±1.13
Resistencia flexotracción (90 días)	11.3±0.22	12.43±0.84	10.46±0.25	6.87±0.30
Resistencia flexotracción	-	0.75±0.14	1.10±0.27	0.88±0.05

Se observó como todos los valores de resistencia tanto a la compresión como a la flexotracción disminuyeron notablemente. La resistencia a la compresión disminuyó en todos los morteros más de un 50%, siendo el mortero aluminoso con perlita y vermiculita el que mejor comportamiento presentó. La resistencia a la flexotracción disminuyó más de un 85% en los tres morteros ensayados y se repitió el buen comportamiento que presentó el mortero Al-P+V. En líneas generales se dedujo que los morteros presentaron mejor resistencia a la compresión que a la flexotracción y que el mortero Al-P+V fue el más resistente en ambos ensayos.

5. Obtención de los perfiles de las temperaturas en los aceros estructurales

Para la deducción de los perfiles de temperatura en el tiempo para los aceros estructurales ensayados con fuego por una cara, se aportan los resultados obtenidos para los aceros al carbono siguiendo el modelo propuesto de la norma europea, para estructuras sin resistencia conductiva importante y perfil interior isotérmico. También se aportan los resultados obtenidos, resolviendo la ecuación de transporte de calor, junto a las condiciones de contorno, empleando técnicas de incrementos finitos, para los diferentes materiales ensayados, aceros, morteros y material aislante.

5.1. Modelo propuesto por la norma europea

En el apartado 4.2 del capítulo II, se ha hecho referencia a un modelo que permite obtener el perfil de temperatura en un acero estructural en el tiempo, suponiendo que no hay resistencia conductiva en el mismo, para lo que se utilizan las ecuaciones 2.9 y 2.10, junto con una hoja de cálculo, tal como se recoge en la Tabla 2.7, para lo que fue preciso realizar el cálculo con aumentos discretos de tiempo. De acuerdo con la norma europea, se mantuvo la emisividad de la superficie del acero en 0,5 y el coeficiente de convección permaneció constante e igual a $25 \text{ W/m}^2\text{K}$.

También se recoge la propuesta de dos autores al modelo, uno T. R. Kay, que fija un valor de la emisividad igual a 0,8, que se corresponde con la emisividad promedio de los aceros al carbono oxidados entre temperatura ambiente y $800 \text{ }^\circ\text{C}$. La

otra propuesta es de M. B. Wong, que hace variable la emisividad de la superficie con la temperatura, tal como quedó indicado en el apartado II de la memoria.

Se dedujeron los perfiles de las temperaturas en los tres supuestos apuntados anteriormente y en la Figura 4. 84 se muestra una comparativa de los resultados obtenidos, frente a los datos experimentales del perfil de temperatura de un ensayo de fuego, en este caso se ha seleccionado el acero tipo S355NL y para un intervalo de tiempo de una hora, ya que los otros dos aceros tienen un comportamiento similar. La gráfica incluye la curva ISO y los valores del ambiente del horno, las curvas de las temperaturas de las caras interna y externa del acero durante el ensayo, así como valores puntuales del perfil de temperaturas que se deduce siguiendo la Euronorma habiéndose incluido también las propuestas de Kay y Wong.

Puede comprobarse que para tiempos inferiores a 5 minutos, todos los modelos se ajustan al perfil de temperatura obtenido en la cara fría o exterior del acero. Para el intervalo de tiempos comprendido entre 10 y 45 minutos, en cada una de las propuestas ensayadas las emisividades del acero pueden distinguirse en valores muy diferentes según los modelos que proponen los autores indicados anteriormente, y por ello los perfiles de las temperaturas pueden oscilar hasta en 180 °C, como se puede observar en la Figura 4. 84. En conjunto se observa que los perfiles de las temperaturas, evolucionaron desde la superficie fría hacia la superficie caliente a medida que aumentaba el tiempo del ensayo, para ser coincidente con el perfil experimental de la superficie caliente para tiempos superiores a 45 minutos.

En definitiva el modelo propuesto por la Euronorma, permite obtener órdenes de magnitud de los perfiles de las temperaturas en un material estructural con modelo de fuego envolvente y en donde no hay resistencia térmica en el interior de los materiales ensayados. Las curvas que se deducen a partir de las condiciones indicadas anteriormente apuntan a que para tiempos pequeños, es cuando el gradiente de temperatura es mayor y por tanto, los datos se ajustan a las condiciones frías del acero; y cuando el gradiente de temperatura en el material es pequeño, lo hace para tiempos superiores a 50 minutos, los datos son coincidentes con la cara caliente del material. El modelo de Kay es el que proporciona un mayor gradiente de temperatura y la Euronorma la que presenta el menor diferencia de temperaturas.

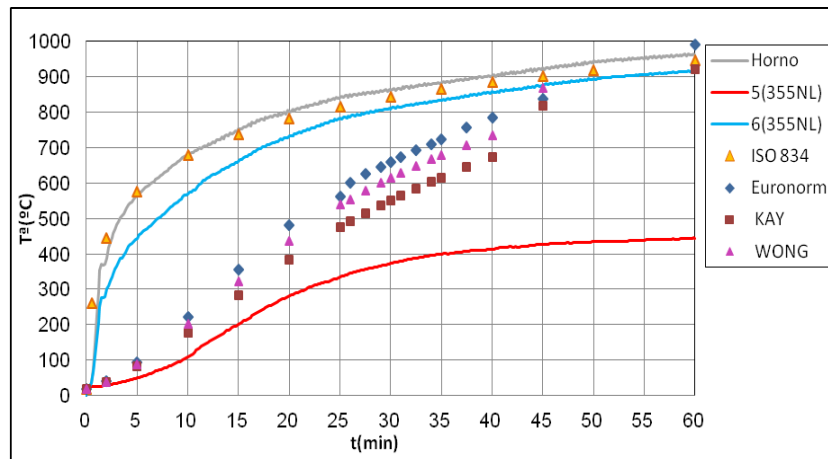


Figura 4. 84. Análisis comparativo entre el perfil de temperatura del acero S355NL bajo una curva ISO y tres modelos matemáticos.

5.2. Resolución de la ecuación de transporte de calor por incrementos finitos

En apartados anteriores se han presentado los valores de la temperatura-tiempo de las probetas ensayadas de materiales diferentes cuando se someten a la acción del fuego bajo norma ISO 834, tanto para las superficies caliente y fría, como para posiciones intermedias. La premisa principal de la que se ha partido fue tomar como referencia las condiciones que se indican en la norma EN 1991-1-2 [4.6], que hace referencia a estructuras expuestas al fuego y que ayudaran a definir las condiciones de contorno para la resolución de la ecuación de transporte de calor, que en ausencia de generación de energía por transformación química se define como:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (4.6)$$

A partir de los ensayos realizados en aceros al carbono sobre probetas de 200x100x20 mm, en donde se comprobó que las diferencias de temperaturas medidas en los puntos distantes de la posición central tanto en altura como a lo ancho, no fueron significativas, maxime para los niveles de temperaturas que se alcanza se puede perfectamente suponer que el flujo de energía a través de las probetas fuese unidireccional en el sentido del gradiente de temperatura, por lo que la ecuación (4.6) se simplifica en la ecuación (4.7).

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (4.7)$$

La suposición anterior lleva consigo, que las cuatro superficies de la probeta en contacto con la pared del horno no presentan discontinuidad térmica y por tanto su comportamiento es adiabático, ver Figura 4. 85, por lo que las ecuaciones de contorno serían:

$$q_y = q_z = 0 \quad (4.8)$$

$$q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x} = q_c + q_r \quad (4.9)$$

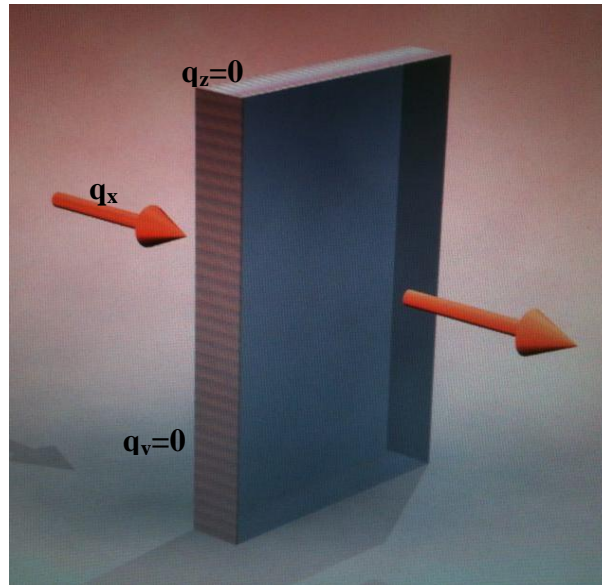


Figura 4. 85. Esquema de la probeta considerando el flujo de calor nulo en las superficies adiabáticas.

Esta última ecuación indica que en el sentido del flujo de calor, posición x , tanto para la cara caliente como para la fría, en la intercara fluido-sólido (superficie caliente) y la intercara sólido-fluido (superficie fría), la transmisión de calor en el fluido es convectiva más radiactiva.

a) Intercara caliente

$$q_{rc} = \sigma \varnothing \varepsilon_c \varepsilon_o [(T_o + 273)^4 - (T_c + 273)^4] \quad (\text{W/m}^2) \quad (4.10)$$

siendo:

$$\sigma = \text{constante de Boltzman} = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{K}^4$$

\emptyset = factor de forma, foco-pared caliente, ambas paralelas, e igual a 1, según norma.

$$\varepsilon_o = \text{emisividad del foco, igual a 1, según norma.}$$

$$\varepsilon_c = \text{emisividad de la superficie caliente, e igual a 0,8, según norma.}$$

$$q_{cc} = h_c (T_o - T_c) \quad h_c = 25 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{K} \quad (4. 11)$$

b) Intercara fría

$$q_{rf} = \sigma \emptyset \varepsilon_f \varepsilon_o [(T_f + 273)^4 - (T_a + 273)^4] \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (4. 12)$$

siendo:

$$\varepsilon_c = \text{emisividad de la superficie fría}$$

$$q_{cf} = h_f (T_f - T_a) \quad h_f = 4 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{K} \quad (4. 13)$$

Este valor de h_f es el que aporta la norma, en donde también se indica que la ecuación puede sustituirse por un valor promedio de $9 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{K}$, que se considera convección más radiación.

Finalmente falta por definir en la ecuación (4.7) , para cada tipo de material, los valores de las propiedades como densidad, capacidad calorífica y conductividad y su variación con la temperatura. Así para el acero la densidad es $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$, la capacidad calorífica queda definida en la ecuación (2.4a) y la conductividad se define con la ecuación (2.5). A parte para el mortero hay que definir los valores de las tres propiedades de acuerdo con la Euro norma y con los datos experimentales obtenidos en [4.7] y que se resumen en las siguientes expresiones (4.14, 4.15 y 4.16):

Calor específico (J/kg °K)

$$C_p = 900 \quad 20 < T < 100 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4. 14a)$$

$$C_p = 900 + (T - 100) \quad 100 < T < 200 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (b)$$

$$C_p = 1000 + (T - 200)/2 \quad 200 < T < 400 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (c)$$

$$C_p = 1100 \quad 400 < T < 1200 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (d)$$

Conductividad (W/m°K)

Limite superior

$$K = 2 - 0,2451 (T/100) + 0,0057 (T/100)^2 \quad 20 < T < 1200 \text{ °C} \quad (4. 15a)$$

Limite inferior

$$K = 1,36 - 0,136 (T/100) + 0,0057 (T/100)^2 \quad 20 < T < 1200 \text{ °C} \quad (b)$$

Densidad (kg/m³)

$$\rho = \rho(20\text{°C}) \quad 20 < T < 115 \text{ °C} \quad (4. 16a)$$

$$\rho = \rho(20\text{°C}) * (1 - 0,02(T-115)/85) \quad 115 < T < 200 \text{ °C} \quad (b)$$

$$\rho = \rho(20\text{°C}) * (0,98 - 0,03(T-200)/200) \quad 200 < T < 400 \text{ °C} \quad (c)$$

$$\rho = \rho(20\text{°C}) * (0,95 - 0,07(T-400)/800) \quad 400 < T < 1200 \text{ °C} \quad (d)$$

En la euronorma se indica que para simplificar los cálculos se tomen valores promedio de las propiedades, que para el caso del acero al carbono son $C_p = 600 \text{ J/kgK}$, $k = 45 \text{ W/m °K}$ y $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$.

Todo ello se consideró en el programa de cálculo utilizado, por incrementos finitos, buscando la obtención de los perfiles de temperatura en el interior de las probetas de acero para compararlo con los obtenidos experimentalmente. El resultado que se obtuvo no permitió optimar resultados, ya que en lo deducido había diferencias importantes entre los gradientes de temperatura en el interior de las probetas, siendo el comportamiento diferente en función del tiempo transcurrido, inicial, medio y final.

Se hizo una evaluación de las discrepancias encontradas, y todo a puntó al hecho experimental observado en los aceros, de que tanto en la cara caliente como en la fría, se producía una oxidación muy acusada de las capas próximas a la intercara, lo que suponía que el gradiente en el interior de las probetas, no pudiera suponerse lineal, ya que en dichas zonas se producía una variación importante de las temperaturas, con la consiguiente modificación de los gradientes en ambas partes, así como la concavidad y la convexidad de los perfiles de temperatura internos.

A tal efecto, se consideró estudiar solamente el flujo de calor por conducción en el interior de las probetas, teniendo en cuenta la modificación de los gradientes de temperatura por la oxidación del acero. Para ello se seleccionaron ensayos con

información de los perfiles en el interior de las probetas de acero, con valores experimentales de las temperaturas a 2 mm de las intercaras, ya que se podían considerar valores fiables medidos experimentalmente, para lo que se definieron tres zonas a considerar en transición de calor por conducción en los aceros. Dos zonas en las que los gradientes de temperatura, disminuirían por efecto de la oxidación, lo que supondría la aparición de dos resistencias conductivas adicionales, separadas por una zona intermedia de 16 mm de espesor en donde el gradiente de temperatura se consideraría lineal pero variando su perfil con el tiempo.

En primer lugar se consideró exclusivamente la transmisión de calor en el interior del acero sin oxidación, para toda posición $2 \leq x \leq 18$ mm, tomando como referencia los valores de las temperaturas, tiempo y posición, de forma que haciendo variar los valores de la conductividad en el acero, se evaluase el error cuadrático medio, deduciendo la conductividad de forma que el error fuera el menor. De la optimización estadística de las temperaturas deducidas se obtuvo que la conductividad del acero debía mantenerse constante e igual a $37 \text{ W/m}^\circ\text{K}$. Esta situación es análoga a la que propone la norma pero inferior al valor que se determina de la conductividad, que es igual a $45 \text{ W/m}^\circ\text{K}$, es decir, que para el acero S460NL ha de considerarse en caso de incendio un valor constante de la conductividad, pero un 18 % menor al valor que establece la norma de forma general. En la Figura 4. 86, se presentan los perfiles temperatura tiempo teóricos y experimentales, para las diferentes posiciones internas de la probeta de acero, siendo su respuesta totalmente satisfactoria.

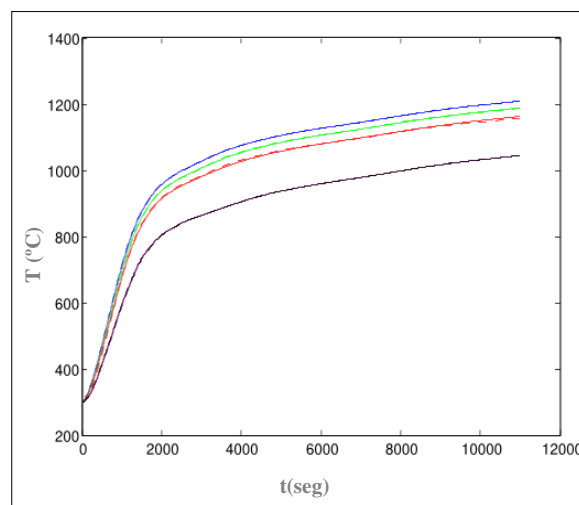


Figura 4. 86. Curvas temperatura-tiempo, experimentales y teóricas ajustadas eliminando las zonas oxidadas.

Una vez deducido el valor de la conductividad en el acero no oxidado, se estimó el valor de la conductividad en los extremos oxidados del acero y los límites de éstos, en función del tiempo. Para ello se creyó oportuno definir el crecimiento de las capas de oxido por medio de dos funciones tal como se indica a continuación:

a) Zona caliente

$$v(t) = H_c (1 - e^{-at}) \quad (4. 17)$$

Para todo espesor de oxido $0 \leq x \leq v(t)$, con conductividad K_c y siendo la máxima penetración del oxido H_c .

b) Zona fría

$$w(t) = H_f (1 - e^{-bt}) \quad (4. 18)$$

Para todo espesor de oxido $20 - w(t) \leq x \leq 20$, con conductividad K_f y máxima penetración del oxido H_f .

Para la resolución de los parámetros de estas dos funciones, se calculó el error cuadrático medio mínimo que dio como resultado en la zona caliente, $K_c = 2,4 \text{ W/m } ^\circ\text{K}$, $H_c = 0,00072 \text{ m}$ y $a = 0,8$ y en la zona fría, $K_f = 2,8 \text{ W/m } ^\circ\text{K}$, $H_f = 0,0006 \text{ m}$ y $b = 0,002$. El modelo deducido indicó que la conductividad de la zona oxidada caliente fue ligeramente inferior que la de la zona fría mientras que la penetración fue mayor. Los parámetros a y b corresponden a la velocidad de oxidación siendo la de la parte caliente la que presentó un valor superior. Dichos resultados fueron coincidentes con lo que se podía esperara del comportamiento de las capas de oxido en donde se aprecia un crecimiento exponencial en el tiempo.

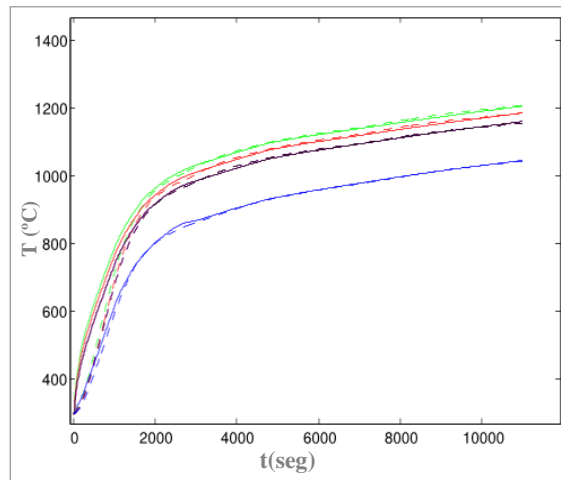


Figura 4. 87. Curvas temperatura-tiempo, experimentales y teóricas ajustadas incluyendo las zonas oxidadas.

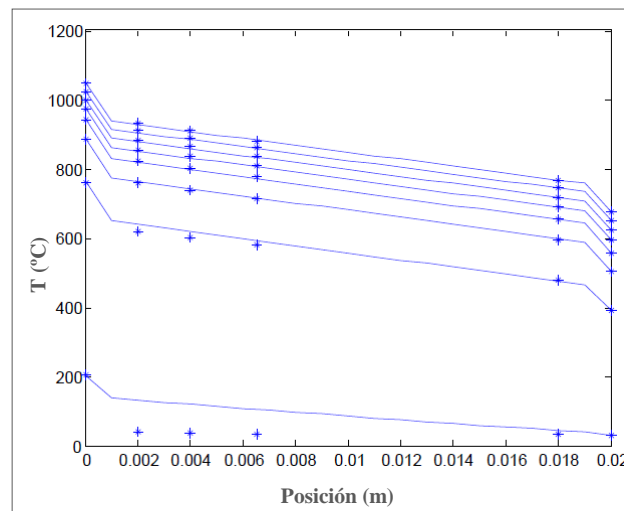


Figura 4. 88. Ajuste del gradiente de temperatura en función de la posición a lo largo del espesor de la probeta de acero.

Una vez introducido en el modelo, las ecuaciones deducidas para el crecimiento del oxido en las zonas de las superficies de las probetas de acero, y optimizados los parámetros de dichas ecuaciones, la representación de las curvas temperatura-tiempo se muestran en la Figura 4. 87 en donde las curvas con trazo discontinuo corresponderían a los datos registrados experimentalmente y se observó alguna desviación de las curvas estimadas, hasta haber transcurrido 30 minutos de ensayo. Esto puede ser debido a una mayor influencia de las capas de oxido durante ese tiempo, dichas capas de oxido introducen dos resistencias conductivas, que hasta no alcanzar casi el estado pseudoestacionario, producen que la temperatura en el interior del acero sea menor que la estimada por el modelo. En la Figura 4. 88 aparecen los perfiles de las temperaturas

para cada posición a lo largo del grosor de la probeta de acero para diferentes instantes en donde, se observa una ligera caída de la temperatura en las zonas cercana a la superficie, que corresponde a las capas de óxido generadas durante el ensayo de fuego, también se aprecia la desviación en los primeros instantes de tiempo

Una situación más sencilla es la que se dio en los morteros, ya que no presentaron variaciones en concavidad y en convexidad de los perfiles temperatura tiempo. Los perfiles de temperatura en función del tiempo de ensayo y de la posición de los termopares, generados por programa de cálculo por incrementos finitos para estos materiales, se presentan en las Figura 4. 89, (el mortero seleccionado para el desarrollo del modelo fue el OPC). El resultado que se obtuvo se optimizó comparando los datos experimentales con los obtenidos al resolver la ecuación 4.6, usando para ello el error cuadrático medio. Las curvas representadas en trazo discontinuo corresponden a los valores experimentales después de haber optimizado las posiciones en las que se tomaron dichas temperaturas. En la Figura 4. 90 se presentan los perfiles de las temperaturas para cada posición a lo largo del grosor de la probeta de mortero, se observa una ligera caída de la temperatura desde la zona caliente de la probeta, que se ajusta con las posiciones experimentales de los termopares y que se debe a la descomposición química del carbonato.

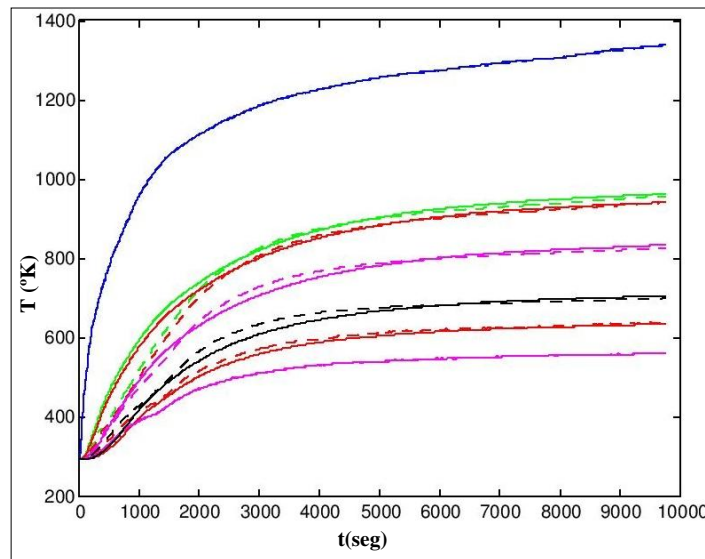


Figura 4. 89. Curvas temperatura-tiempo, experimentales y teóricas ajustadas por el modelo para el mortero de base cemento Portland (OPC).

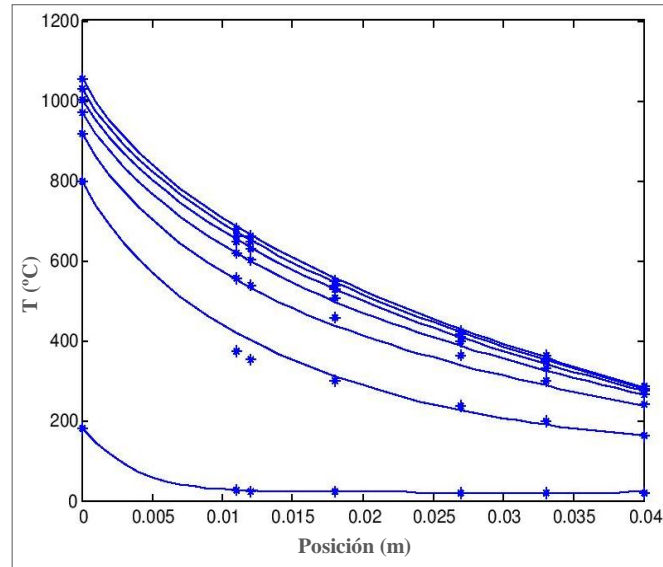


Figura 4. 90. Ajuste del gradiente de temperatura en función de la posición en el interior de la probeta de mortero, modificando las posiciones de los termopares.

Para el caso de las lanas de vidrio, se siguió el mismo procedimiento que se usó con el acero y los morteros, se dedujeron las curvas temperatura tiempo, Figura 4. 91 y los perfiles de temperatura según la posición de los termopares a lo largo del espesor de la lana, Figura 4. 92, a partir de la ecuación 4.6 y usando los datos del calor específico y la conductividad que vienen establecidos por el fabricante y que se recogen en la Tabla 3.2. El ajuste de los datos experimentales que se deducen del modelo, fueron satisfactorios, ya que para estos materiales aislantes no hay transformaciones en su interior lo que se traduce en gradientes de perfil lineal para condiciones pseudoestacionarias, ver Figura 4. 92.

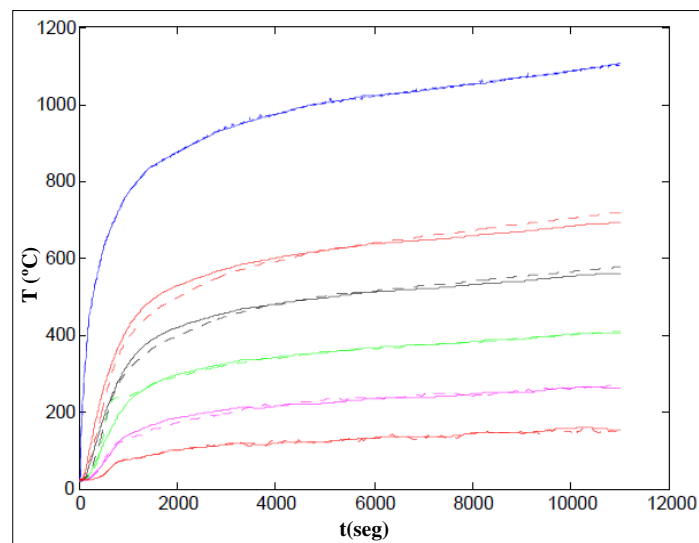


Figura 4. 91. Curvas temperatura-tiempo, experimentales y teóricas ajustadas por el modelo para la lana aislante.

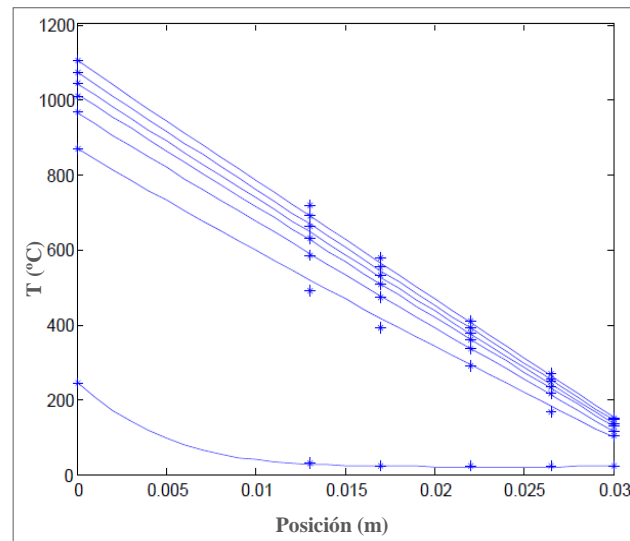


Figura 4. 92. Ajuste del gradiente de temperatura en función de la posición en el interior de la lana ISOVER.

Por tanto se puede afirmar, que se ha desarrollado un método fiable, que permite deducir los perfiles de temperatura tiempo en el interior de los materiales estructurales para diferentes posiciones, cuando son sometidos a ensayos de fuego bajo norma ISO 834. Esta situación se ha extendido para materiales que presentan un comportamiento diferente como son: lana de vidrio, morteros y aceros al carbono, habiéndose deducido la forma de operar en cada situación, así como la selección de las propiedades y coeficientes de interfase a utilizar en cada caso, tomando como referencia los datos experimentales de temperatura tiempo de cada material estructural que, como se ha podido comprobar, para la aplicación del acero al carbono, ha permitido deducir un valor promedio de la conductividad de éste, independiente de la temperatura y diferente al que se aconseja en la Euronorma, lo que pone de manifiesto como las etapas controlantes de la transmisión de calor, son el transporte externo, convectivo más radiactivo y la transmisión conductiva de la capa de óxido formada en la intercara caliente del acero.

Otro aspecto a considerar en el caso de fuego por una cara, es ver cómo se produce el intercambio de calor (convección más radiación) entre el foco, constituido por el fuego y el elemento estructural sobre el que se desea obtener el gradiente interno de las temperaturas en función del tiempo. Esta nueva situación supone desconocer la condición de contorno definida por las temperaturas en el tiempo, justo en la intercara ambiente superficie caliente que absorbe el calor y lo transmite a su interior. En el caso

que se expondrá, se tomará como referencia el comportamiento de un fuego bajo norma ISO 834, pero se podría hacer de forma análoga para la situación de un modelo de fuego de otro tipo que fuese a considerarse de interés.

Para presentar la forma de abordar esta nueva suposición, se ha tomado como referencia a los morteros ya que como puede observarse en la Figura 4. 90, los gradientes no son lineales y se asemejan a funciones exponenciales para los diferentes instantes de tiempo ensayados, tal como se indica en la siguiente expresión

$$T=c + a*e^{(-bx)} \quad (4. 19)$$

La estrategia que se siguió, consistió en realizar los ajustes estadísticos de las funciones de los gradientes de las temperaturas a diferentes intervalos de tiempo y a partir de las funciones estimadas, para pasar a disponer del gradiente de temperaturas en cada instante, en la intercara, sólido ambiente, es decir, $(dT/dx)_{x=0}$. En dicha intercara, se tiene los flujos de calor desde el foco, por convección más radiación, para cada instante según las ecuaciones 4.10 y 4.11, indicadas con anterioridad; optimizando los valores de los coeficientes de convección, h_c , y la emisividad de la intercara del mortero, de forma que cuando se aplica el modelo de cálculo por incrementos finitos, se analice la respuesta de forma que el valor de la conductividad del mortero deducida, presente la menor desviación estadística frente a los deducidos en el supuesto anterior, cuando se analizaba la transmisión de calor en el interior del mortero por conducción:

$$k = (q_{cc}+q_{rc}) / (dT/dx)_{x=0} \quad (4. 20)$$

Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 4. 93, en donde se aprecia una respuesta estadísticamente aceptable (trazo rojo) para un coeficiente de interfase, $h_{r+c} = 20 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{K}$ y una emisividad del mortero de 0,8.

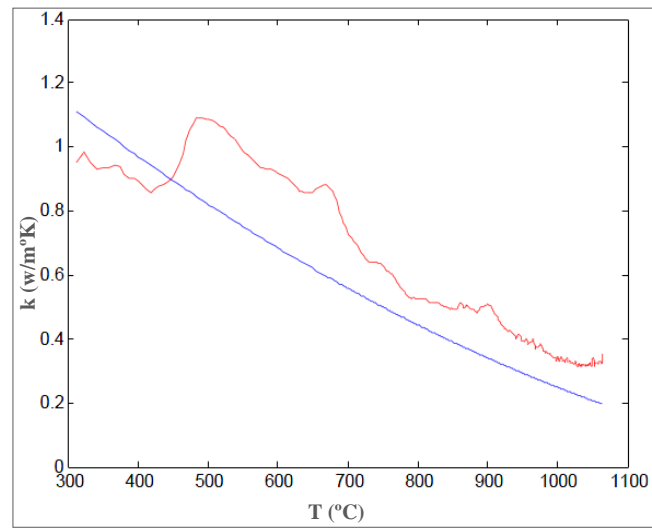


Figura 4. 93. Conductividad teórica y deducida del mortero ensayado a partir de 300 $^{\circ}\text{C}$ de temperatura

6. Referencias

- [4.1] Francisca García Caballero. “Modelización de las transformaciones de fase en calentamiento continuo de aceros con microestructura inicial de ferrita, perlita y ferrita-perlita”. Tesis Doctoral, Madrid 2003, UCM.
- [4.2] J. Markowski, M. Knapiński, B. Koczurkiewicz, H. Dyja, A. Kawałek “The analysis of the microstructure of steel S460NL in the conditions of thermo-mechanical treatment”. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. Volume 25, Issue 2, December 2007.
- [4.3] De ferri metallographia I, Presses Academiques europeennes S.C. Bruxelles, 1996.
- [4.4] EN-1993-1-2, European standard, Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design.
- [4.5] P. Zambrano, M.P. Guerrero Mata, M.I. Gómez de la Fuente, A. Artigas, A. Monsalve y R. Colás. “Modelación de fenómenos metalúrgicos en laminación en caliente de acero”. Revista de Metalurgia, 44 (1) (2008).
- [4.6] UNE-EN-1991-1-2, Norma española, Eurocódigo 1: Acciones en estructuras, Parte 1-2: Acciones generales, Acciones en estructuras expuestas al fuego.
- [4.7] Jean-Christophe Mindeguia. “Contribution expérimentale a la compréhension des risques d'instabilité thermique des bétons”. Thèse présentée à l'université de pau et des pays de l'adour. 2009.

RESUMEN GENERAL Y CONCLUSIONES

Capítulo V: Resumen General y Conclusiones

1. Resumen General

Como ya se ha indicado en los capítulos anteriores, el fuego es un fenómeno extremadamente complejo, en donde, independientemente de las circunstancias particulares en que éste se desarrolla, da lugar a que las situaciones a tener en cuenta sean muy drásticas, por lo que el comportamiento en servicio de los materiales estructurales que se han visto involucrados en el mismo, se suelen ver altamente modificadas, tanto por los niveles de las temperaturas alcanzados, la duración de los mismos, así como, las velocidades de calefacción alcanzadas. Todo ello, se traduce en una disminución de la aptitud en servicio de las estructuras, ya que la capacidad de resistencia de los mismos se ven fuertemente reducidas.

La posibilidad de utilizar junto a los elementos estructurales otros que se comportan como aislantes térmicos, es de interés ya que lo que se busca es que, de una parte, la capacidad resistente del conjunto no decaiga de un valor que se estime como límite inferior de la capacidad de resistencia, junto a la opción de que se produzca una disminución en el crecimiento de los niveles térmicos, de forma que se deduzca una ampliación en el tiempo para que se alcance el límite inferior de la capacidad resistente, dando tiempo para que tenga lugar la evacuación de las personas, antes de que el conjunto colapse de forma catastrófica.

Es evidente que a lo largo de los últimos años, tanto los aceros al carbono como los hormigones, se han perfilado como materiales ampliamente utilizados tanto en las construcciones civiles como industriales, es por ello, que se ha tomado ambos como punto de partida para la realización experimental del comportamiento de ambos bajo la acción del fuego, tomando a los morteros como posibilidad de actuar como materiales aislantes, junto con otros materiales convencionales utilizados para retardar los gradientes de las temperaturas en los aceros, junto al empleo de escudos de radiación en acero al carbono. En el capítulo III de la memoria se documenta tanto la selección de los aceros al carbono, como la dosificación de los morteros y del resto de los materiales aislantes utilizados.

El presente trabajo experimental ha girado alrededor del diseño, la construcción, la puesta a punto y la puesta en operación de dos hornos piloto, que reprodujeran

fielmente la evolución en el tiempo de las temperaturas de fuego normalizadas, de forma que el conjunto reprodujera fidedignamente los ensayos normalizados de fuego que se realizan a estructuras y elementos de construcción, pero a menor escala y con menor coste de los ensayos. Para ello fue preciso definir los hornos piloto de forma modular, de forma que hubiera cámara generadora de las condiciones de fuego normalizado, junto con elementos modulares en donde se alojasen los diferentes materiales estructurales a ensayar, sobre macro probetas que tendrían dimensiones diferentes, pero que no supusiera cambio alguno en cuanto al fenómeno de generación de calor bajo la norma de fuego que se hubiese seleccionado. Junto al horno piloto, también se diseñó, construyó y operó un sistema de control de las temperaturas para reproducir los modelos de fuego normalizados con los que se ha trabajado junto con la adquisición de datos de los campos de las temperaturas a lo largo de las geometrías de las probetas ensayadas.

Para la caracterización química, estructural y mecánica de los aceros se han utilizados las técnicas siguientes:

- Para la preparación metalográfica de muestras representativas del acero tanto antes de someter al material a fuego como después de ello, se siguieron técnicas convencionales de pulido y revelado tal como se indica en el apartado 2.1.1 del capítulo III.
- Para la identificación y caracterización microestructural de las muestras estudiadas y de sus componentes, se usaron las técnicas de microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido, apartado 2.1.1 del capítulo III.
- Para la determinación del tamaño de grano en los aceros se utilizó el método de intercepción lineal o método de Heyn, descrito en la norma UNE-EN ISO 643, tal y como se indica en el apartado 2.1.2 del capítulo III.
- Para la identificación de las capas de óxido formadas en la superficie de los aceros después del ensayo de fuego, se utilizaron las técnicas de Rayos X, microscopía electrónica de barrido y análisis con microsonda, tal como aparece en el apartado 2.1.1 del capítulo III.
- Para la medida de las durezas, se utilizó un durómetro que cuantificó las durezas Rockwell B, ver apartado 2.1.3.1 del capítulo III.

- Para los ensayos mecánicos de tracción a temperatura ambiente se usó una máquina de ensayo universal y para los mismos pero a temperatura elevada y constante, una máquina de tracción con un horno eléctrico acoplado, ambos según norma UNE-EN ISO 10002-1, como se indica en los apartados 2.1.3.3 y 2.1.3.4 del capítulo III.
- Para la medida de las estricciones se utilizó un medidor de perfiles y las fractografías se realizaron por medio de microscopia electrónica de barrido, ver apartado 2.1.3.3 del capítulo III.

Para la caracterización de los morteros, se han empleado las técnicas siguientes:

- Para la determinación del agua libre de los morteros mediante la diferencia de peso, ver apartado 2.2.1.2 del capítulo III
- Para el análisis de la composición de los morteros se estudiaron las transformaciones químicas mediante las técnicas ATP/TG, ver apartado 2.2.1.3 del capítulo III.
- Para la determinación de la porosidad y la distribución de los poros se utilizó la técnica de porosimetría por intrusión de mercurio, como se indica en el apartado 2.2.1.4 de capítulo III.
- Para los ensayos mecánicos se usaron máquinas específicas para el ensayo de flexo-tracción y de compresión, según norma UNE-EN 1015-11, ver apartado 2.2.2 del capítulo III.

Finalmente para la determinación del comportamiento de los aceros estructurales cargados y bajo curva de fuego se ha empleado la técnica de VIC-2D, que es un sistema de extensometría avanzada con un dispositivo de captación de imágenes, tal como se desarrolla en el apartado 3.3 del capítulo III.

Dentro de este resumen general a continuación se presenta una sinopsis de los aspectos principales que se refieren al comportamiento de los aceros a temperaturas elevadas y bajo la acción del fuego, tanto cuando estos estaban cargados o no, el comportamiento de los morteros bajo la acción del fuego, para a continuación presentar la respuesta de los aceros aislados bajo la acción del fuego, y finalmente presentar el modelo matemático que permitió predecir los gradientes de las temperaturas en el interior de los materiales estructurales bajo la acción del fuego.

1.1. Comportamiento de los aceros a temperaturas elevadas y bajo la acción del fuego.

En el trabajo experimental realizado se ha trabajado con los aceros al carbono S355NL, S460NL y S460N, provenientes todos ellos de una misma colada y conformación. Se estimó de interés hacer la caracterización de los mismos tanto a temperatura ambiente como a temperatura elevada con objeto de poder interpretar posteriormente los ensayos bajo fuego. En todos los aceros se observó que su microestructura presentó granos equiaxiales de ferrita cuyo tamaño de grano era de 9, 8 y 7 μm para cada uno de los aceros ensayados. Para los dos aceros NL apareció una distribución en bandas unidireccionales constituidas por perlita fina y ferrita. Para el acero N se observó que junto a la perlita aparecieron zonas de bainita acicular, posiblemente debido a que la colada de la cual provino dicho acero se enfrió con una velocidad superior a 10 $^{\circ}\text{C/s}$, ver Figuras 4.3 y 4.4.

También se realizaron ensayos de dureza y de tracción a temperatura ambiente tal y como se recogen en la tabla 4.1, de donde se deduce que el acero S460NL tiene una dureza algo superior a la de S355NL, mientras que el acero S460N es el que presenta una mayor resistencia a la penetración.

De la observación de las zonas de fractura se comprobó una ruptura en forma de copa cono, con cuello bien definido y una macroestructura porosa con proliferación de huecos, tal y como se observa en la Figura 4.6, típico de un comportamiento dúctil.

De los ensayos realizados a temperatura elevada entre 620 $^{\circ}$ y 920 $^{\circ}\text{C}$, se observó que la microestructura a 620 $^{\circ}\text{C}$ no presentó variación significativa frente a las que se observaron a temperatura ambiente, se mantuvo la estructura en bandas y el tamaño de grano. A partir de 820 $^{\circ}\text{C}$ la estructura en bandas del acero se empezó a desdibujar y ello se debió a una redistribución de la perlita que se globulizó formando conglomerados con la ferrita, tal como se indica en la Figura 4.8. También se pudo observar la aparición de pequeñas segregaciones de manganeso que formaba parte de la composición de los aceros.

A 920 $^{\circ}\text{C}$ se pudo comprobar casi una desaparición total de la estructura en bandas, apareciendo en algunas zonas una estructura acicular de Widmanstätten, Figuras 4.7 y 4.8. También se observó un ligero aumento del tamaño de grano, tanto

para el acero S355NL y S460NL. Todo esto se vio posteriormente corroborado cuando se hicieron las micrografías sobre las probetas de los ensayos de tracción a temperatura elevada, ver Figura 4.13.

En la Tabla 4. 2 han quedado recogidos los valores de la dureza y de las propiedades mecánicas de los aceros S355NL y S460NL, tanto a temperatura ambiente como a temperatura elevada, pudiéndose comprobar la disminución que presenta la resistencia, el módulo elástico y el límite elástico con la temperatura. También se comprobó cómo a 500 y 650 °C aparece en las probetas ensayadas un cuello bien definido circunstancia que no se presenta para las temperaturas de 800 y 950 °C en donde predomina el fenómeno de la fluencia. Una comparación entre el comportamiento de ambos aceros pone de manifiesto un comportamiento más resistente del acero S460NL, así como una mayor capacidad de deformación con la temperatura. En la Figura 4.10 se han presentado los factores de reducción de la resistencia y del límite elástico obtenidos experimentalmente para los aceros ensayados y los que aporta la norma EN- 1993-1-3, pudiéndose comprobar que a temperaturas comprendidas entre 500 y 800 °C los factores de reducción de resistencia experimentales son del mismo orden que los que predice la norma y los del límite elástico son mayores. Este hecho habrá que tenerlo en cuenta sobre todo a la hora de utilizar estos aceros en el diseño de estructuras.

En las curvas de tensión deformación recogidas en la Figura 4.9, se observa una variación importante en la resistencia de los aceros y el valor de la deformación en esas condiciones para cada una de las temperaturas ensayadas. Se pensó que podía haber una relación entre las tres variables, con lo que se propuso una expresión potencial que relacionara dichas variables, es decir resistencia máxima, con la deformación a la temperatura del ensayo. Se hizo una regresión estadística con los valores experimentales en la que aparecen los parámetros de la ecuación 4.1 en la Tabla 4. 3. Así se observó una gran dependencia de la disminución de la resistencia de los aceros con la temperatura, (varía con una potencia superior a 4) y una menor variación de la resistencia con la deformación, siendo menos importante para el caso del acero S355NL.

Finalmente, también se hizo una observación macrográfica de los ensayos de tracción a temperatura elevada tal como se recogen en las Figuras 4.14 a 4.16. Se

observó que la zona fracturada a 500 y 650 °C siguió la evolución que se había previsto a temperatura ambiente. A los 800 °C se comprobó que los aceros sufrieron una gran deformación plástica, ayudado por el fenómeno de fluencia que tuvo lugar apareciendo múltiples grietas en sentido transversal a la deformación, este fenómeno es aún más acusado a 950 °C.

Con relación a los ensayos bajo norma de fuego se indicará que se postularon los correspondientes a fuego exterior y a fuego bajo norma ISO 834 para situaciones de fuego por una cara. También se realizaron ensayos de fuego envolvente bajo norma ISO 834.

Dentro de los primeros, en los ensayos realizados bajo norma ISO 834 se pudo comprobar a partir de los registros experimentales temperatura-tiempo, que el comportamiento de los aceros fue muy similar, tal y como se puede ver en las Figuras 4.23, 4.24, 4.25. A partir de estos registros se comprobó la fidelidad de la evolución de la curva de fuego ISO en todos los ensayos realizados. También se comprueba una evolución bastante paralela y próxima de las superficies calientes comprobándose que había una caída importante de las temperaturas, a lo largo del espesor de la probeta. También se dedujo que a partir de los 80 minutos de ensayo existía una variación lineal de las temperaturas de la cara caliente y fría de las probetas lo que indicaba que se habían alcanzado condiciones de régimen pseudoestacionario. Un estudio comparativo de todos los aceros, ver Figura 4.26, puso de manifiesto una evolución similar de las temperaturas de todos los aceros para la superficie caliente cosa que no ocurría para la superficie fría en donde aparecían pequeñas variaciones de las temperaturas justo en la zona de régimen pseudoestacionario. Esta variación debe atribuirse aún valor diferente de la conductividad del medio, que no ha de confundirse con la conductividad del acero ya que como se valoró con posterioridad la aparición de zonas fuertemente oxidadas de la superficie caliente y fría hacía aparecer dos nuevas resistencias conductivas más importantes que la resistencia conductiva del acero y ello dio lugar a ese perfil temperatura-tiempo diferente.

A partir de los registro temperatura-tiempo de las curvas de fuego obtenidas para una, dos y tres horas se dedujeron los gradientes de temperatura en el interior de los aceros estructurales viéndose para diferentes posiciones y llegándose hasta puntos situados a 2 mm de cada una de las superficies externas en donde se pudieron registrar

temperaturas puntuales con fiabilidad. De dichos gradientes de temperatura que parecen en la Figura 4. 27, se comprobó como a medida que aumentaba el tiempo de ensayo de fuego se hizo más acusada la resistencia conductiva de la pared caliente debido a la aparición de óxido siendo menor para la pared fría.

En los ensayos realizados bajo fuego externo se siguió una evolución paralela a lo que se ha indicado para el ensayo bajo curva ISO 834, tal como se registra en las Figuras 4.28, 4.29 y 4.30. En esta última que es una comparativa de la evolución temperatura tiempo, se comprueba que las variaciones de la temperatura de la cara fría son menores que en el caso anterior.

También se realizaron ensayos de fuego envolvente bajo curva ISO 834, para tiempos de dieciséis minutos, una hora y tres horas. Tal como se coge en la Figura 4.32. En donde se observó cómo a partir de los quince minutos la evolución de los gradientes de temperatura presentaban un perfil totalmente plano con lo que fue adecuado solamente en esta circunstancia aplicar el supuesto de evolución de la temperatura independientemente de la posición de la estructura como recoge la norma. Por lo que los perfiles estructurales del acero no oponían resistencia térmica conductiva.

Después de haber sometido a los aceros a la acción del fuego en cada una de las situaciones ya indicadas, se realizó una caracterización microestructural y se analizaron las propiedades mecánicas por medio de ensayos de tracción y dureza.

Se obtuvieron imágenes de la microestructura de los aceros S355NL, S460NL y S460N, tras haber sido ensayados bajo la acción del fuego ISO sólo por una cara y de los aceros S355NL y S460NL, en el caso de la curva externa de fuego. De cada uno de los aceros citados se mostraron imágenes de la microestructura cercana a la superficie de la probeta expuesta al fuego, de la zona intermedia de la probeta y de la superficie de la probeta en contacto con la atmosfera, tanto para los ensayos con la curva ISO como para los ensayos bajo la curva externa por una cara y durante un tiempo de 3 horas. Se observó que estructura de los aceros sufrió una transformación debido a que durante el ensayo bajo curva ISO, se superó a lo largo de todo el espesor de la probeta la temperatura de austenización, Figuras 4.42 a 4.44, se empezaron a desdibujar las bandas de ferrita y perlita y se dio un ligero aumento de tamaño de grano en todos los aceros, siendo más acentuado en el S460N, tal y como se muestra en la Tabla 4. 9. Para la curva

de fuego externa no se observó ninguna variación ni en la estructura, ni en el tamaño de grano, ver Figuras 4.43 y 4.47.

Después del ensayo de fuego envolvente bajo curva ISO durante dieciséis minutos, una y tres horas, se realizaron las micrografías de los aceros S355NL y S460NL tal y como se presenta en la Figuras 4.48 y 4.49. A los dieciséis minutos no se observó ninguna modificación con respecto al estado inicial, después de una hora la estructura en bandas se empezó a perder y el tamaño de grano aumentó ligeramente, con mayor intensidad en el acero S355NL y después de tres horas dichos efectos fueron mucho más acusados en ambos aceros, Tabla 4. 10.

Durante todos los ensayos de fuego se observó la aparición de óxido en las superficies de los aceros. Dicho óxido fue analizado para el caso de los aceros s355NL y S460NL después del ensayo de fuego ISO, durante tres horas por una cara. El óxido que se identificó mediante la utilización de rayos X, como componente mayoritario de la capa fue la magnetita (Fe_3O_4), ver figura 4.50, que apareció por transformación a partir de wustita (FeO) durante el enfriamiento al aire después del ensayo, ya que a temperaturas superiores a los $1200\text{ }^\circ\text{C}$ se supone todo el óxido como wustita. En ambos aceros, se observó una primera capa de poco grosor adherida al material base y porosa, a continuación de esta capa se observó otra de menos porosidad. También se pudo apreciar como en la zona del material base que estaba más cerca de la capa de óxido, tenía algunas partes porosas, debido a la difusión del hierro desde el sustrato para seguir reaccionando con el oxígeno de la superficie, tal como se refleja en las Figuras 4.53 y 4.54.

Después de los ensayos de fuego con los aceros, se valoraron las propiedades mecánicas de dichos materiales, para ver como se vieron afectadas las propiedades, por medio de los ensayos de tracción y medida de las durezas. Se mecanizaron probetas para el ensayo de la cara caliente y de la cara fría de la probeta ensayada, en sentido de la laminación y perpendicular a él para todas las situaciones, para los ensayos de fuego por una cara.

En líneas generales, los ensayos de tracción realizados para las probetas de los aceros S355NL y S460NL, no difieren mucho cuando se compara entre la dirección de laminación y una de las perpendiculares a ella. Se observó que los valores de las propiedades mecánicas fueron ligeramente superiores para el acero S460NL, excepto

estricción y deformación uniforme que fueron similares. Para la curva externa sólo se ensayó el acero S460NL, debido a la similitud de resultados que se obtuvieron en ensayos anteriores. Las propiedades mecánicas no se vieron modificadas con respecto al estado de recepción, todos los datos se indican en las Tabla 4. 11 y Tabla 4. 12

La disminución de la dureza de los aceros S355NL y S460NL no superó en ninguno de los casos el 2%, mientras que para el acero S460N (sólo bajo curva ISO), la disminución de la dureza fue en torno al 30%, ver Tabla 4. 13

Los aceros S355NL y S460NL bajo la acción del ensayo de fuego envolvente siguiendo curva ISO 834 dieron como resultado los valores que se recogen en la Tabla 4. 14 y Tabla 4. 15 Los valores no sufren una variación significativa con respecto a los valores iniciales del material sin ensayar.

La rotura de las probetas de los aceros S355NL y S460NL en los ensayos de tracción correspondientes a los ensayos de fuego bajo curva ISO y curva externa por una cara, fue en forma de copa y cono con textura fibrosa que genera una apariencia de rugosidad, también se observó la estricción generada por el ensayo, relacionada con la deformación plástica de los mismos, tal y como aparece en las Figuras 4.59, 4.60 y 4.61.

También se estudió la respuesta de los aceros al carbono S355NL y S460NL, sometidos a la acción de un fuego ISO estándar por una cara y añadiendo una determinada carga tal como se indica en el apartado 4.1.2.2 del capítulo IV. El ensayo se llevó a cabo durante tres horas o hasta la rotura de las probetas. Se tomaron registros temperatura –tiempo tal y como se muestra en las Figuras 4.65 a la 4.68, para diferentes cargas y secciones útiles de las probetas. Las probetas con sección de 40 mm², se ensayaron con un peso se 90, 180 y 360 kg, (22, 44 y 88 MPa), ambos aceros resistieron el ensayo bajo una carga de 22 MPa, con 44 MPa el acero S355NL resistió el ensayo a diferencia del S460NL que falló y cargados con 88 MPa ningún acero soportó el ensayo. Las probetas con 80 mm² de sección sólo se ensayaron con un peso de 360kg (44 MPa).

Para completar el estudio durante el ensayo se usó un sistema de extensometría avanzado con un dispositivo de toma de imágenes a partir de las cuales se dedujeron las deformaciones sufridas por los aceros S355NL y S460NL, dichas deformaciones se relacionaron con la temperatura y el tiempo del ensayo, ver Figuras 4.69 a 4.71. A partir

de los datos experimentales de deformación tiempo se observó una variación lineal al inicio del ensayo, para finalmente producirse, una fuerte variación de la deformación con el tiempo es por ello que para cada material se dedujeron dos etapas que se ajustaron a las ecuaciones 4.2 y 4.3 y cuyos valores del ajuste se presentan en la Tabla 4. 18.

También se analizó el efecto de fluencia que experimentaron los materiales, teniendo en cuenta que se trabajó en régimen transitorio de temperaturas. La ecuación general que correlaciona la velocidad de deformación constante con la carga y la temperatura está dada por la ecuación 4.4, que derivó a la ecuación 4.5 debido a que las condiciones fueron de temperatura no constante. Los valores de los parámetros de la función ajustada se dan en la Tabla 4. 20, en donde la energía de activación aparece de forma explícita y que fue algo superior a la usual para los ensayos de fluencia en régimen estacionario.

También se presentan los campos de deformación medidos con la técnica VIC-2D en donde se pudo observar los puntos de máxima deformación a lo largo del ensayo e incluso la zona de rotura, tal y como lo refleja la Figura 4.74.

Se realizó una observación de la microestructura y de la zona de rotura de las probetas que se sometieron al ensayo citado en los párrafos anteriores. Se observó cómo el tamaño de grano en ambos aceros, para la zona de la rotura y con la máxima deformación, sufrió un alargamiento en la misma dirección en la que actuó la carga, pero no se observó ningún cambio a poca distancia de dicha zona; y todo ello para una sección de 40 mm². Cuando se aumentó dicha sección a 80 mm², el grano no experimentó ningún cambio significativo en ninguna zona, debido a la menor deformación que se produjo, tal como se puede apreciar en las Figuras 4.75 a 4.79. En las imágenes de las fractografías de las Figuras 4.80 y 4.81 se puede observar como en todas las probetas de los aceros ensayados, tanto con 40 mm² y 80 mm² de sección útil y para todas las cargas que dieron lugar a rotura, se produjo una reducción en la sección y una fuerte oxidación de la superficie. También se produjo una deformación uniforme cuyo valor se presenta en la Tabla 4.22. La reducción de sección y la deformación uniforme aumentaron con el valor de la carga aplicada. Se diferenciaron dos texturas en la superficie de la zona de rotura, una textura porosa, debido a la nucleación y coalescencia de huecos, dicha estructura aparece en la Figura 4.76a y 4.78 a y b; y una

superficie más homogénea, característica de una ruptura con un gran número de zonas de deformación plástica marcadas en color blanco en forma de telaraña tal y como se observa en las micrografías de la Figura 4.76b y 4,78c. En la zona donde el acero no sufrió deformación, las durezas no se vieron afectadas, pero en la zona cercana a la rotura el valor de las durezas disminuyó notablemente, tal como se indica en la Tabla 4.23.

1.2. Comportamiento de los morteros a temperatura ambiente y bajo ensayo de fuego.

En el trabajo experimental realizado se ha trabajado con cuatro morteros y dosificación diferente. Uno convencional de base cemento Portland (OPC) y a partir de él, para poder analizar la respuesta de comportamiento frente al fuego, se adicionó una cantidad de perlita y vermiculita (OPC-P+V). Por otro lado se eligió un mortero de base aluminosa, para poder comparar con respecto a los de base de cemento Portland, también con perlita y vermiculita (Al-P+V) y un último mortero de base aluminosa con perlita y vermiculita donde se sustituyó una pequeña cantidad de cemento aluminoso por humo de sílice (Al+HS-P+V), ver Tabla 3.4.

En todos ellos se determinó de la pérdida de agua libre, de donde se dedujo que los morteros OPC y Al-P+V fueron los que menos agua perdieron y los morteros con OPC-P+V y Al+HS-P+V fueron los que más fácilmente liberaron el agua en forma de vapor, según Figura 4.17.

El comportamiento frente a la temperatura se analizó las transformaciones térmicas mediante ATD/TG, cuyo resultado fue coherente con la dosificación de cada uno, ver Figuras 4.18 y 4.19. La porosidad y la distribución de los poros en los morteros se estudiaron según la técnica de la porosimetría. Los morteros de cemento aluminoso presentaron unos poros con una proporción mayor de poros entre 0,1 y 1 μm , mientras que los de cemento Portland la distribución principal fue de poros de tamaño comprendido entre 0,01 y 0,1 μm , tal y como se indica en la Figura 4.21.

Por último se realizaron ensayos mecánicos de compresión y flexotracción, El mortero más resistente a temperatura ambiente fue el constituido por cemento Portland sin ningún aditivo (OPC) y el de menor resistencia fue el cemento aluminoso con humo de sílice, los dos restantes tuvieron unas resistencias iniciales similares, Tabla 4. 8

En relación a los ensayos bajo norma de fuego se indicará que se postularon los correspondientes a fuego bajo norma ISO 834 para situaciones de fuego por una cara, tomando los registros de temperatura-tiempo para los cuatro morteros elegidos. Para el mortero ordinario Portland (OPC), se produjo un efecto de “spalling” a los catorce minutos, tal y como se muestra en la Figura 4.35. Para el resto de los morteros hubo una buena respuesta después de las tres horas de ensayo de fuego; el gradiente de temperatura entre la cara fría y la cara caliente de los morteros fue muy parecido y superior en todos los casos a 850 °C, además dicho gradiente fue bastante lineal excepto en la zona cercana a la superficie caliente en donde se produjo un ligero aumento en la pendiente, provocado por la descarbonatación del árido calizo, según se muestra en la figura 4.34.

Se decidió repetir el ensayo para el mortero OPC junto a uno de los morteros aluminosos eligiéndose el Al-P+V. En la repetición del ensayo se observó como el mortero de cemento Portland (OPC), en esta segunda ocasión sí que aguantó el ensayo, posiblemente porque la cantidad de agua retenida de la probeta, fuese algo menor. El segundo ensayo del mortero aluminoso con perlita y vermiculita, fue acorde con el inicial.

Después de las pruebas de fuego se llevaron a cabo los ensayos de compresión y flexotracción, excepto para el OPC, debido al proceso de “spalling” que sufrió. Se observó como todos los valores de resistencia tanto a la compresión como a la flexotracción disminuyeron notablemente, siendo a pesar de ello, el mortero Al-P+V el más resistente en ambos ensayos, ver Tabla 4. 23.

Una vez analizado el comportamiento de los morteros bajo la acción de un fuego normalizado ISO, se ensayo bajo las mismas condiciones el conjunto formado por mortero y acero, tal como aparece en la Figura 3.2, el conjunto presentó una buena adherencia que se corroborará debido a la no oxidación de la superficie caliente del acero durante el ensayo de fuego. Se ensayaron dos tipos de mortero, OPC-P+V y el Al-P+V. Se comprobó a partir de los registros de las temperaturas para la probeta de acero con el mortero aluminoso, que tenía un mejor comportamiento aislante ya que alcanzaron valores ligeramente inferiores que el mortero con base de cemento Portland, aunque la diferencia de las temperaturas no fue significativa, ver Figura 4.39. En ningún caso se superaron en el interior del acero, los 500 °C, por lo que no se alcanzó criticidad

en el acero y por otra parte, tras el enfriamiento, al retirar el conjunto del horno, los materiales se despegaron, debido a una curvatura que sufrieron ambos morteros, ya que el comportamiento de la dilatación con el tiempo fue diferente.

1.3. Comportamiento de los aceros con materiales aislantes

A parte de los morteros, se eligieron dos aislantes tal como se ha indicado en el apartado 1.2 del capítulo III. También se emplearon como aislante cinco placas de acero con dimensiones 200x100x1 mm situadas en paralelo actuando así como escudos de radiación.

En la Figura 4.38, se presentan los resultados experimentales obtenidos por medio de los registros T-t y los perfiles de las lanas comerciales que se ensayaron, en donde se observó que la diferencia de temperatura entre la superficie fría y la caliente fue suficientemente elevada para que se consideren materiales aptos para aislar los aceros, dicha diferencia es superior a 800 °C y los perfiles generados siguieron una tendencia lineal, por lo que se pudo concluir que el material se comportó de manera homogénea.

A partir de los resultados anteriores se ensayaron ambas lanas con un espesor de 20 mm junto al acero S460NL. Se dedujo que el efecto aislante de los materiales fue muy similar, pero si se observa en las gráficas la temperatura a lo largo del espesor de la probeta de acero fue menor cuando se ensayó con la lana ISOVER que con la lana PROMAT, según Figura 4.40. La temperatura alcanzada a lo largo del espesor de las probetas de acero, no superó en ningún caso los 450 °C, por lo que no se alcanzó el punto crítico a partir del cual las propiedades mecánicas del acero se ven afectadas. También se observó una diferencia de temperatura muy fuerte entre la superficie caliente de la probeta de acero y a 2 milímetros de ella hacia el interior de la probeta, para ambos ensayos, esto puso de manifiesto la fuerte oxidación que se produjo en el acero, ya que entre los materiales ensayados hubo un hueco de aire oxidante.

Cuando se utilizaron los escudos de radiación se observó que las placas de acero actuaron como una barrera térmica y se produjo una caída de temperatura de unos 360 °C entre la superficie caliente de la última placa de acero que actuó como escudo y la superficie caliente de la placa de acero al carbono estudiado. La oxidación de las

capas de acero, fue intensa, pero la caída de la temperatura fue mayor en la superficie, por el efecto aislante radiactivo entre las chapas, ver Figura 4.40.

1.4. Modelo matemático para la predicción de los gradientes de temperatura en los materiales estructurales.

El modelo que propone la norma, tal como se indicó en el apartado 4.2 del capítulo II, deduce un perfil de temperaturas en un acero estructural con el tiempo, suponiendo que no exista resistencia conductiva en el mismo, y manteniendo la emisividad de la superficie del acero en 0,5. Dicho modelo se comparó, con la propuesta de dos autores, ver Figura 4. 84, uno T. R. Kay, que fija un valor de la emisividad del acero igual a 0,8, que se corresponde con la emisividad promedio de los aceros al carbono oxidados entre temperatura ambiente y 800 °C, y otro de M. B. Wong, que hace variable la emisividad de la superficie con la temperatura. En conjunto se observó que los perfiles de las temperaturas, evolucionaron desde la superficie fría hacia la superficie caliente a medida que aumentaba el tiempo del ensayo, para ser coincidente con el perfil experimental de la superficie caliente para tiempos superiores a 45 minutos y con el de la superficie fría para tiempos inferiores a 5 minutos. Salvo para estas dos situaciones en el tiempo, los errores son de consideración para el supuestos de fuego a través de una cara.

Por estas circunstancias se pensó desarrollar un programa de cálculo para la resolución de la ecuación de transporte de calor por incrementos finitos tomando como referencia las condiciones que se indican en la norma EN 1991-1-2, apartado 5.2 del capítulo IV. Dicho proceso se llevó a cabo para el acero, el mortero y las lanas. A partir de los datos experimentales de temperatura tiempo tomados de los ensayos de fuego, se supuso que las cuatro superficies de las probetas de los materiales ensayados en contacto con la pared del horno no presentan discontinuidad térmica y por tanto su comportamiento fuese adiabático y junto con la condiciones de contorno dadas por la ecuación 4.7 para definir el flujo de calor se tomaron los valores de calor específico, conductividad y densidad en cada de uno de los casos según el material con el que se desarrolló el modelo y se usaron las ecuaciones 4.10 y 4.11 que definían el flujo de calor por convección y radiación. Todo ello se utilizó en el programa de cálculo utilizado, por incrementos finitos, buscando la obtención de los perfiles de temperatura

en el interior de las probetas de los materiales y compararlo con los obtenidos experimentalmente.

Para el caso de los aceros, se observaron algunas desviaciones en las temperaturas, y todo a puntó al hecho experimental observado, que tanto en la cara caliente como en la fría, se producía una oxidación muy acusada de las capas próximas a la intercara, lo que suponía que el gradiente en el interior de las probetas, no pudiera suponerse lineal, ya que en dichas zonas se producía una variación importante de las temperaturas, dando lugar a cambios de concavidad y convexidad en los extremos del perfil térmico. En la Figura 4. 86, se presentan los perfiles temperatura tiempo teóricos y experimentales eliminando las zonas oxidadas, para las diferentes posiciones internas de la probeta de acero, siendo su respuesta totalmente satisfactoria. A continuación se determinó la penetración de las capas de oxido según las ecuaciones 4.16 y 4.17, y los resultados obtenidos de los perfiles temperatura tiempo introduciendo las capas de oxido en el modelo fueron coincidentes con los datos experimentales, según la Figura 4. 87 y Figura 4. 88.

Se siguió el mismo procedimiento para deducir los perfiles temperatura tiempo y los gradientes de temperatura en función de la posición de los termopares para el caso del mortero ensayado, Figura 4. 89 y Figura 4. 90 y para la lana aislante, Figura 4. 91 y Figura 4. 92: el ajuste de los datos experimentales que se dedujeron para cada material, fueron satisfactorios.

Se ha visto, que se ha conseguido un resultado de los datos ajustados, que permitió deducir los perfiles de las temperaturas en régimen transitorio en el interior de los materiales estructurales bajo ensayo de fuego ISO 834, por medio de un programa de cálculo desarrollado, utilizando técnicas de incrementos finitos, tomando como referencia los gradientes de las temperaturas experimentales en el interior de los sólidos y optimándose los valores de las propiedades térmicas en los mismos. Para el caso de los aceros, se dedujo un modelo para el crecimiento de las capas de oxido y la conductividad de los mismos, lo que supuso una etapa controlante en la transmisión de calor, lo que llevó a la adopción de un valor constante de la conductividad en el interior del acero inferior en un 18% de lo que propone la Euro norma.

También se ha considerado el fenómeno de transmisión de calor interfase/ambiente, (cara caliente de los sólidos), para el caso de los morteros, lo que ha

permitido deducir los valores de el coeficiente de interfase en la cara caliente del material, $20 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{K}$, así como la emisividad de la superficie, teniendo un valor de 0,8, lo que hace que la respuesta de la variación de la conductividad en el material, sea acorde con lo que se había deducido para la conducción de calor en el interior del mortero. Por lo que se desprende que la técnica utilizada es correcta y posteriormente se procederá a su aplicación para el caso de los aceros al carbono.

2.4. Conclusiones

A partir de lo expuesto a lo largo de la presente Memoria, tanto en la aportación que se hace de la información experimental como de la discusión de los datos obtenidos, se extraen las siguientes conclusiones:

➤ Referente a las técnicas experimentales para ensayos de fuego.

Se han diseñado, construido y puesto en operación dos hornos piloto que permitieron trabajar con fuego envolvente y localizado. Ambos dispositivos reprodujeron fielmente la evolución en el tiempo de las temperaturas de las curvas de fuego normalizadas ISO 834 y la de fuego externo, por ser las que tienen una mayor coincidencia en la vida real.

Se han obtenido experimentalmente los perfiles temperatura tiempo de los materiales ensayados en las configuraciones ya indicadas en apartados anteriores, tanto para las caras externas como en puntos internos de los materiales ensayados, con tiempos de exposición al fuego variable hasta un máximo de tres horas.

Se han deducido los gradientes de las temperaturas en el interior de los materiales ensayados para instantes diferentes de tiempo, lo que ha permitido comprender el fenómeno del flujo de calor en el interior de los materiales ensayados para condiciones de régimen transitorio, así como deducir experimentalmente el comportamiento de los materiales bajo condiciones de fuego.

Se ha comprobado experimentalmente, que la información obtenida de la respuesta de los materiales bajo ensayos de fuego es fiable, rápida y sencilla, lo que permite evaluar el comportamiento de materiales bajo condiciones de fuego tanto sin carga como cargados.

➤ **Referente al comportamiento de los aceros ensayados bajo prueba de fuego sin carga.**

Se han operado con aceros estructurales comerciales, uno no aleado, S355NL y otros dos aleados S460NL y N, según norma europea. Todos estos aceros son de naturaleza ferrítico-perlítica y se emplean tanto en obra civil como industrial.

Se ha obtenido la respuesta del comportamiento de los aceros ensayados bajo la acción de fuego, evaluándose la evolución de la microestructura y de las propiedades mecánicas de los mismos, (ensayos de tracción y dureza Rockwell B). Dicha respuesta fue similar en ambos aceros.

Se ha comprobado que durante los ensayos bajo norma ISO, se produjo una fuerte oxidación en las superficies exteriores de los aceros. De los estudios microestructurales realizados en los aceros se desprende que en los ensayos bajo norma ISO 834, debido a que se superó la temperatura de austenización, se produjeron cambios en la estructura y en el tamaño de grano principalmente en el acero S460N que sufrió un aumento de tamaño de grano de 7 a 11 μm . Por el contrario en los ensayos bajo curva externa siempre se mantuvieron las propiedades de los aceros ensayados

Se ha deducido que las propiedades mecánicas en los aceros bajo fuego ISO 834 no sufrieron variaciones significativas con respecto al estado de recepción, excepto para el caso del acero S460N que la dureza sufrió una reducción del 30%. Al igual ocurrió en los ensayos bajo curva externa.

➤ **Referente al comportamiento de los aceros ensayados bajo prueba de fuego con carga.**

Se ha comprobado el diferente comportamiento mecánico de los dos aceros ensayados bajo carga, en régimen isotérmico para las temperaturas de 500°, 650°, 800° y 950 °C, observándose una variación importante en la disminución de la resistencia, módulo elástico y límite elástico de los aceros ensayados. También se comprobó el comportamiento diferente de los aceros frente a la temperatura, así se tuvo un comportamiento dúctil hasta la temperatura de 650 °C, mientras que a partir de este valor el comportamiento fue totalmente plástico. Ambos aspectos fueron corroborados también a partir del estudio de las fractografías obtenidas y del estudio de las estricciones deducidas.

Se ha obtenido una expresión que relaciona la resistencia máxima de los aceros con la temperatura y la deformación sufrida, dada por la ecuación 4.1, en donde se comprobó que la resistencia disminuye con la potencia 4 de la temperatura teniendo menos importancia la deformación, sobre todo para el acero S355NL en donde es casi imperceptible, la influencia de la deformación en la reducción de la resistencia máxima.

Se ha comprobado tal y como indica la Figura 4.10 que los valores del factor de reducción del límite elástico para los aceros ensayados, superan a los valores que predice la norma, eso se traduce en una mayor deformación de los aceros mientras se propaga el fuego, aspecto a tener en cuenta, cuando se analice el comportamiento en servicio de los elementos estudiados en un fuego.

Se ha comprobado el comportamiento mecánico diferente de los aceros ensayados, bajo curva ISO 834, cargados a 22, 44 y 88 MPa tal como queda recogido en la Tabla 4.17, a partir de ella se desprende que ambos aceros no rompieron para la menor carga y fracturaron con la mayor. Para la carga intermedia la respuesta fue diferente, el acero S460NL falló y el S355NL resistió el ensayo de tres horas.

Se ha deducido a partir de los registros de deformación tiempo para los aceros ensayados en régimen transitorio de temperaturas, dos comportamientos diferentes: uno inicial en donde la velocidad de deformación es constante y otro final, en donde la velocidad de deformación crece con el tiempo hasta rotura, tal como aparecen en las Figura 4.70 y en las Tabla 4.19.

Se han correlacionado las velocidades de deformación con la variación de la temperatura en régimen transitorio tal como se indica en la ecuación 4.5 y en la Tabla 4.21. Para régimen con velocidad de deformación constante, se tienen valores que son superiores a los que cabría suponer para los aceros en los ensayos en régimen isotérmico de fluencia.

Se ha comprobado como en los ensayos de fluencia de los aceros cargados hasta rotura, se tiene un comportamiento análogo al obtenido en los ensayos en régimen isotérmico, pero en este caso el comportamiento dúctil es en las probetas de menor sección mientras que el comportamiento plástico es para las probetas de menor sección.

➤ **Referente al comportamiento de los morteros ensayados bajo prueba de fuego.**

Se dedujeron las respuestas de los morteros frente a la acción del fuego y se comprobó que su respuesta en general fue adecuada, a pesar de haberse registrado en un mortero un fallo por “spalling”, que se corresponde con un mortero ordinario Portland. Este fallo no se volvió a reproducir en ensayos repetidos. La caída térmica en todos los morteros fue superior a superándose los 850 °C, lo que indica un magnífico comportamiento como material aislante. La respuesta mecánica de los morteros se vio notablemente reducida tal como se recoge en la Tabla 4.24, correspondiente a los ensayos mecánicos a compresión y flexo tracción post fuego, lo que indica la necesidad que tienen estos materiales de ser sustituidos, después de haber soportado un fuego como material aislante de un acero estructural.

➤ **Referente al comportamiento de los materiales aislantes bajo prueba de fuego.**

Se estudió el comportamiento de dos lanas de vidrio y en ambas se comprobó que la caída térmica a través de ellas fue elevada, y por encima de los 800 °C.

La utilización de estos materiales aislantes para proteger aceros al carbono en situación de fuego es de sumo interés ya que no presentan deterioro importante ni merma en sus propiedades mecánicas.

La utilización de material aislante de fibras de vidrio o mortero que proteja a los aceros al carbono ha de hacerse atendiendo a criterios de optimación económica para evaluar el peso económico que tiene en cada uno de ellos en cada caso particular

➤ **Referente al comportamiento de los aceros aislados bajo prueba de fuego.**

En primer lugar se evaluó la respuesta de los morteros OPC-P+V y AI-P+V comprobándose que ambos tuvieron una buena respuesta en los ensayos de fuego norma ISO 834 sobre acero S460NL, utilizándose una capa de mortero 20 mm en cada caso. En ambos morteros se consiguió que la temperatura del acero no superara los 500 °C, valor que se toma para evaluar el comportamiento crítico en la respuesta de las propiedades mecánicas de los aceros. Se comprobó en todos los casos como después del ensayo de fuego se produjo el desprendimiento de los morteros del acero estructural fenómeno que se debe al diferente coeficiente de dilatación del mortero y del acero estructural.

También se estudió la respuesta de las dos lanas de vidrio como material aislante con un espesor de 30 y 20 mm sobre estructuras de acero S460NL bajo prueba de fuego, comprobándose que en ningún caso la temperatura del acero superó los 450 °C, valor éste inferior al que se toma como crítico para el comportamiento del acero estructural.

Cuando se usaron los escudos de radiación, se observó que actuaron como barrera térmica y se produjo una caída de temperatura de 360 °C entre la superficie caliente del acero y la última placa exterior. En el interior del acero se registró una temperatura media de 600 °C, que supera la barrera mínima de criticidad del acero, por lo que cabría considerar aumentar el número de escudos de radiación o analizar la situación tanto en cuanto a la penetración de la temperatura en los perfiles y analizar si la situación sería crítica de acuerdo con la propuesta de la euronorma EN 1993-1-2.

➤ **Referente a la simulación de la transferencia de calor en los materiales sometidos a ensayos de fuego.**

Se ha analizado la evolución de los perfiles de temperatura tiempo obtenidos, comprobándose la importancia del posicionamiento en la respuesta térmica de los materiales ensayados, para todos los materiales seleccionados. A partir de los perfiles experimentales se hizo una comparación con el modelo de transmisión de calor que propone la Euronorma, comprobándose que los datos deducidos son coincidentes con el modelo propuesto por la norma para la superficie fría a tiempos inferiores a 5 minutos y con el perfil de la superficie caliente para tiempos superiores a 45 minutos, pero no en la zona intermedia, en donde para el caso de fuego exterior no es de aplicación.

Se ha presentado un modelo por incrementos finitos que permite obtener con fiabilidad, los gradientes de las temperaturas en el interior de los materiales estructurales sometidos a pruebas de fuego bajo norma ISO 834, lo que ha permitido deducir valores de las propiedades térmicas a considerar para cada material. Para el caso del acero, se ha deducido la cinética de las capas oxidadas en las intercaras y las conductividades a utilizar, ya que esta resistencia térmica es de interés a la hora de deducir los gradientes de las temperaturas, valores que se deducen empleando una conductividad térmica constante e inferior a la que recomienda la Euro norma.

El modelo se ha extendido teniendo en cuenta el transporte de calor en la interfase, por lo que los gradientes de temperaturas obtenidos consideran el fuego como foco de calor y la transmisión de este a través de una superficie exterior deduciéndose el

coeficiente de interfase convectivo, h_c , y la emisividad de la superficie para el ensayo de fuego con morteros. Este último supuesto produce un avance importante y de mayor exactitud en la deducción de los gradientes de temperatura en el interior de los materiales estructurales bajo la acción de un fuego, lo que podría utilizarse para la incidencia que tendría en la evaluación posterior del comportamiento mecánico de los mismos.

FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Capítulo VI: Futuras líneas de investigación

A partir de los resultados de los ensayos desarrollados durante la realización de la presente Tesis Doctoral, así como en la profundización del estudio en el campo del comportamiento de los materiales de construcción, como han sido aceros y morteros en caso de incendio, se ha dado pie a la sugerencia de diferentes líneas de investigación a seguir en futuros trabajos, que ayudarán a contribuir y complementar aún más dicho campo de investigación, algunas de las cuales ya se han iniciado al cierre de la presente memoria.

En los últimos años se ha empezado a dar mayor importancia a los ensayos de los materiales en condiciones de régimen transitorio de temperatura para simular situaciones reales de fuego y poder analizar y modelizar su comportamiento en servicio.

Se ha realizado sobre los aceros, un ensayo de fuego por una cara, con carga, en donde se presenta un modelo que se ha intentado adaptar al proceso de fluencia para condiciones de régimen transitorio, los resultados experimentales obtenidos dan una idea de la respuesta del material pero sería de sumo interés mejorar el comportamiento de los aceros en servicio, desarrollando con más profundidad dicho ensayo y así estudiar el efecto de fluencia producido debido a la combinación de la tensión térmica y mecánica que recibe el material. También se propone como seguir investigando en la misma línea pero en condiciones de fuego envolvente

En el trabajo presentado, se han ensayado cuatro tipos de morteros con adiciones de agregados ligeros, como son la perlita y la vermiculita, se propone estudiar el comportamiento de otros morteros que lleven otro tipo de agregados como las fibras de polipropileno, que en los últimos años están siendo utilizadas para reforzar a los morteros y hormigones, mejorando la resistencia y durabilidad de los mismos.

Debido a que los aceros de construcción en servicio presentan partes en donde existen zonas de soldadura, se propone estudiar el comportamiento frente al fuego de dichas zonas y desarrollar un análisis completo tanto de su microestructura como de sus propiedades mecánicas después de sufrir el impacto térmico de un incendio.

La técnica matemática utilizada para ver cómo se produce el intercambio de calor (convección más radiación) entre el foco, constituido por el fuego y el elemento estructural sobre el que se desea obtener el gradiente interno de las temperaturas en función del tiempo en el caso de los morteros fue correcta y por tanto da pie a su aplicación para comprobar la validez en el caso de los aceros al carbono y otros materiales estructurales.