

Evaluación del comportamiento mecánico post-fuego de armaduras y aceros estructurales de altas prestaciones

Assessment of the post-fire mechanical behavior of high-performance rebars and structural steels

Andrés Lapuebla-Ferri^a, David Pons^b, Carmen Ibáñez^c, Ana Espinós^d y Manuel L. Romero^e

^a Dr. Ingeniero Industrial. Departamento de Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras. Universitat Politècnica de València. Valencia, España. Profesor Permanente Laboral. anlafer0@mes.upv.es

^b Dr. Ingeniero Industrial. Departamento de Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras. Universitat Politècnica de València. Valencia, España. Técnico Superior de Laboratorio. dpons@upv.es

^c Dra. Ingeniera Industrial. ICITECH. Universitat Politècnica de València. Valencia, España. Profesora Titular de Universidad. caribus@upv.es

^d Dra. Ingeniera Industrial. ICITECH. Universitat Politècnica de València. Valencia, España. Profesora Titular de Universidad. aespinos@mes.upv.es

^e Dr. Ingeniero Industrial. ICITECH. Universitat Politècnica de València. Valencia, España. Catedrático de Universidad. mromero@mes.upv.es

RESUMEN

Las propiedades residuales de los aceros al carbono tras un incendio han sido ampliamente estudiadas, no así las de los aceros de altas prestaciones. En este trabajo se presentan los resultados de una extensa campaña experimental en la que se obtuvieron las propiedades mecánicas post-fuego de armaduras y aceros estructurales de altas prestaciones (acero inoxidable 1.4362 y de alta resistencia S700, respectivamente), y se compararon con las de los aceros convencionales B500SD y S355. Las probetas se calentaron hasta alcanzar una temperatura elevada (300-1000 °C) y se enfriaron antes de ensayarse a tracción. Los resultados evidencian diferencias en las propiedades post-fuego de los aceros ensayados.

ABSTRACT

The residual properties of carbon steels after a fire have been widely studied, but not those of high-performance steels. This paper presents the results of an extensive experimental campaign in which the post-fire mechanical properties of high-performance reinforcements and structural steels (stainless steel 1.4362 and high-strength steel S700, respectively) were obtained and compared with those of conventional steels B500SD and S355. The specimens were heated to high temperatures (300-1000 °C) and cooled down before being submitted to tensile testing. The results show differences in the post-fire properties of the steels tested.

PALABRAS CLAVE: post-fuego, acero al carbono, acero de alta resistencia, acero inoxidable.

KEYWORDS: post-fire, carbon steel, high-strength steel, stainless steel.

1. Introducción

Después de que un incendio haya afectado una estructura, se plantea la disyuntiva de demolerla o repararla. En este último caso, y durante el

resto de su vida útil, deben cumplirse los requisitos de seguridad, funcionalidad y aspecto exigidos por los códigos estructurales. Como la

mayoría de ellos no incluye metodologías para evaluar el comportamiento post-fuego de una estructura, el destino final de la estructura depende de la labor de los equipos periciales [1]. En el caso de las estructuras de acero, un criterio asiduamente empleado es el grado de deformación de los elementos afectados [2]. Sin embargo, son las propiedades mecánicas residuales de los materiales las que determinarán la decisión última sobre la estructura. Los valores de estas propiedades deben obtenerse mediante ensayos, sometiendo a las probetas a unas condiciones de calentamiento y enfriamiento que simulen las acaecidas durante un incendio y su extinción. En este trabajo se presentan los resultados de una campaña experimental cuyo objetivo ha sido la obtención de los valores residuales de las principales propiedades mecánicas – límite elástico, resistencia a tracción, ductilidad y módulo de Young – de aceros de altas prestaciones empleados en la ejecución de estructuras (armaduras de acero inoxidable dúplex 1.4326 y acero estructural de alta resistencia S700). Los valores obtenidos, escasos en la literatura especializada, se comparan con los procedentes de ensayos análogos realizados en aceros convencionales (B500SD y S355).

2. Materiales y métodos

2.1 Montaje experimental

La Figura 1 muestra el montaje empleado en la campaña experimental. Estaba constituido por una prensa hidráulica para realizar ensayos de tracción de 200 kN de capacidad, con mordazas de apriete lateral en sus bloques superior e inferior. Junto a la prensa se situó un horno eléctrico con una temperatura máxima de funcionamiento de 1000 °C. Se dispuso asimismo de un extensómetro de pinza para determinar el módulo de Young de las probetas de acero. El extensómetro se retiraba de la probeta una vez alcanzada la zona plástica del material, para evitar un eventual daño del dispositivo.

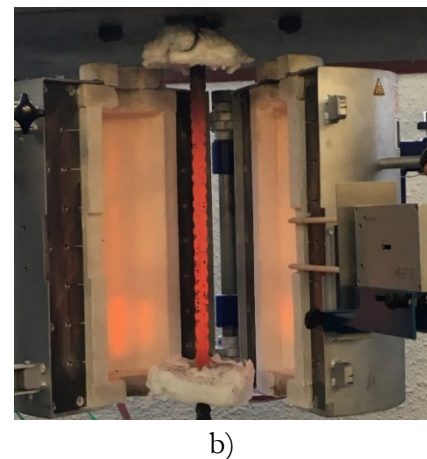
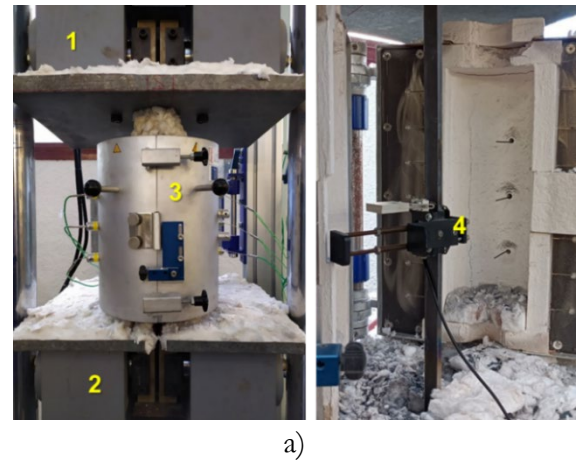


Figura 1. a) Montaje experimental. 1, bloque superior; 2, bloque inferior; 3, horno; 4, extensómetro. b) Calentamiento a 1000 °C.

2.2 Metodología de ensayo post-fuego

La metodología de ensayo para obtener las propiedades mecánicas residuales post-fuego de un acero se describe a continuación (Figura 2).

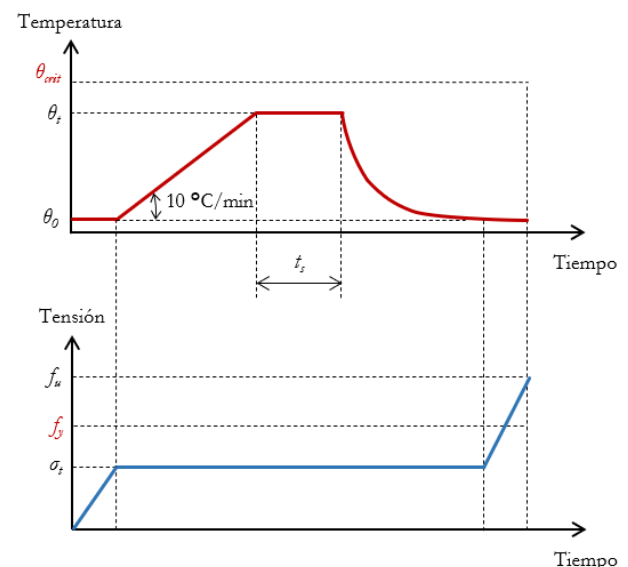


Figura 2. Metodología para los ensayos post-fuego.

Los extremos de cada probeta se sujetaron por las mordazas de la prensa hidráulica y se cerraron a su alrededor los dos semicilindros que componen el horno (Fig 1a). A temperatura ambiente θ_0 , la probeta se sometió a una tensión de tracción $\sigma_t < f_y$ (siendo f_y el límite elástico del material). La tensión σ_t se mantuvo constante al tiempo que la probeta se calentó a $10\text{ }^\circ\text{C/min}$ hasta alcanzar una temperatura objetivo $\theta_t < \theta_{crit}$, donde $\theta_{crit}(\sigma_t)$ es la *temperatura crítica* para la cual la probeta experimenta el fallo cuando está sometida simultáneamente a la misma tensión de tracción σ_t y a una temperatura creciente $\theta(t)$. Una vez alcanzada la temperatura objetivo θ_t , esta se mantuvo constante durante un tiempo t_s para garantizar el calentamiento uniforme de la masa de la probeta. Transcurrido t_s , la probeta se dejó enfriar al aire hasta alcanzar nuevamente la temperatura ambiente θ_0 . Finalmente, la tensión axial σ_t se incrementó hasta alcanzar la resistencia a tracción f_u , y así la rotura de la probeta.

Esta metodología se ha empleado en trabajos previos, bien para $\sigma_t = 0$ [3–5] o $\sigma_t > 0$ [6–8]. En este trabajo se optó por la primera opción, ya que es una manera muy directa de estudiar el comportamiento post-fuego de un material. Además, si $\sigma_t = 0$ no es necesario conocer previamente el valor de θ_{crit} .

2.2 Probetas

En la Tabla 1 se indican las características geométricas de las probetas ensayadas.

Tabla 1. Características geométricas de las probetas:
 $\varnothing$, diámetro; b, ancho; e, espesor (en mm).

Acero	Tipo	Sección transversal	
		Forma	Dimensiones ($\varnothing$, b $\times$ e)
Armaduras	B500SD	Circular	$\varnothing 16$
	1.4362	Circular	$\varnothing 16$
Estructural	S355	Rectangular	23×6
	S700	Rectangular	20×8

Las probetas ensayadas procedían de distintos productos y rutas de producción, dependiendo del tipo de acero. La longitud de todas las probetas era de 800 mm, con el fin de exceder la altura del horno y sujetarse convenientemente por las mordazas.

Respecto a las armaduras, se ensayaron barras corrugadas laminadas en caliente de 16 mm de diámetro, tanto de acero B500SD como de acero inoxidable dúplex – de estructura austenítico-ferrítica – designado como 1.4362 según la norma UNE-EN 10088-1 [9]. Por otro lado, las probetas de acero estructural S355 se obtuvieron cortando longitudinalmente tubos cilíndricos, conformados a partir de una chapa laminada en caliente, arrollada en frío y soldada longitudinalmente. Como puede observarse en la Figura 3, las probetas se curvaban durante el corte a causa de las tensiones residuales acumuladas en los tubos durante el proceso de fabricación. En cuanto a las probetas de acero S700, estas se obtuvieron mediante el corte por láser de chapas laminadas en caliente.



Figura 3. Corte de probetas a partir de tubos de acero estructural S355.

3. Resultados

Para cada tipo de acero ensayado y temperatura objetivo – o temperatura máxima de ensayo θ_t – se trazaron las curvas-tensión deformación (figuras 4-7), de las que se extrajeron los valores residuales de las principales propiedades mecánicas: límite elástico f_y , resistencia a tracción f_u , ductilidad (cuantificada a través de la

deformación porcentual a tensión máxima ϵ_u y la deformación porcentual de rotura ϵ_f) y módulo de Young E. También se calculó el *coeficiente de retención* r de cada propiedad, es decir, la relación entre el valor residual (retenido) de la misma con

el valor medido a temperatura ambiente θ_0 (tablas 2-5). En las gráficas y en las tablas se incluyen, a título comparativo, los resultados de probetas ensayadas a temperatura ambiente (por lo general, 20 °C).

3.1 Armaduras de acero B500SD

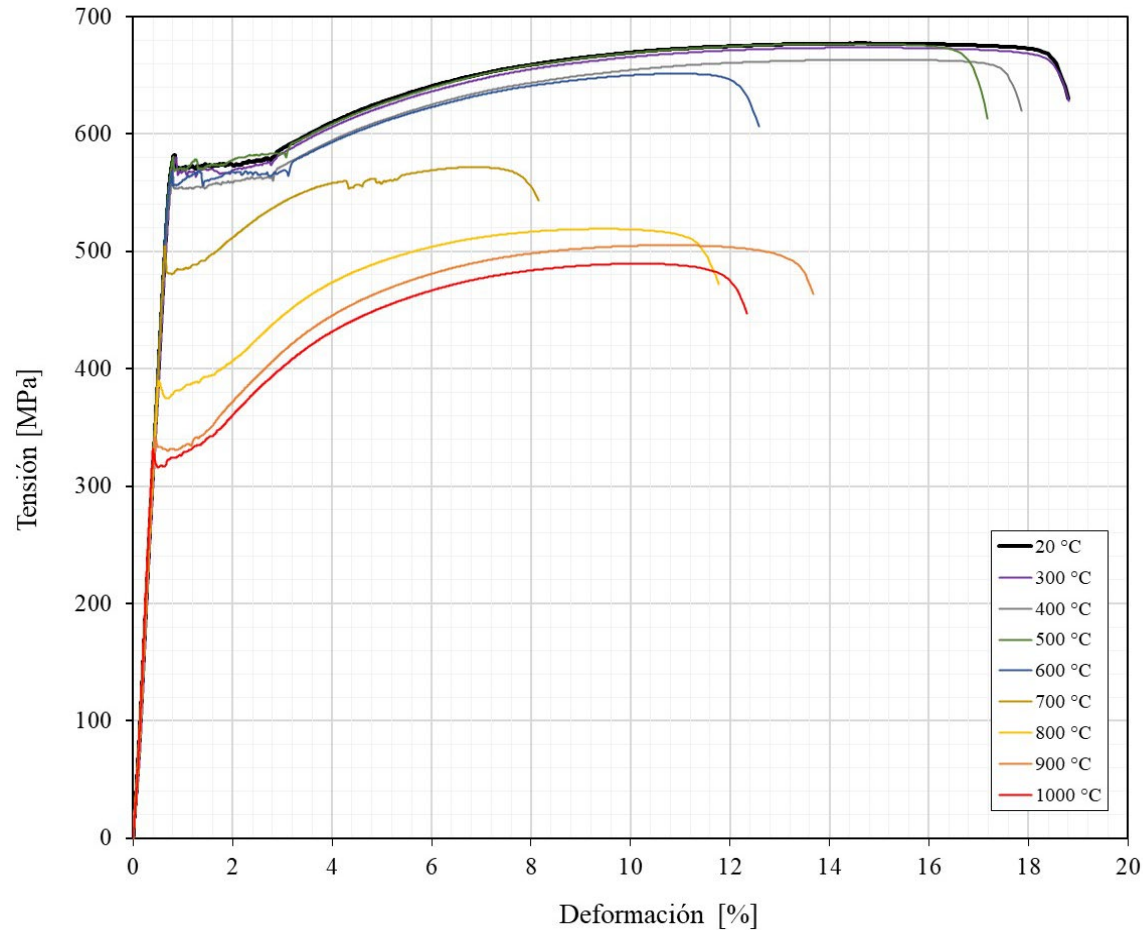


Figura 4. Armaduras de acero B500SD. Curvas tensión-deformación de ensayos post-fuego.

Tabla 2. Armaduras de acero B500SD. Valores residuales y coeficientes de retención post-fuego de las principales propiedades mecánicas.

θ_t [°C]	f_y [MPa]	$r_{y,\theta}$	f_u [MPa]	$r_{u,\theta}$	ϵ_u [%]	$r_{\epsilon u,\theta}$	ϵ_f [%]	$r_{\epsilon f,\theta}$	E [MPa]	$r_{E,\theta}$
20	571.23	1.00	677.25	1.00	14.41	1.00	17.67	1.00	202,100	1.00
300	567.92	0.99	673.67	0.99	14.39	1.00	17.86	1.01	194800	0.96
400	553.75	0.97	663.33	0.98	14.79	1.03	16.31	0.92	192700	0.95
500	570.18	1.00	676.81	1.00	14.03	0.97	15.53	0.88	191300	0.95
600	556.46	0.97	651.44	0.96	10.86	0.75	15.53	0.88	191700	0.95
700	480.78	0.84	571.81	0.84	6.81	0.47	8.35	0.47	202700	1.00
800	374.92	0.66	519.14	0.77	9.28	0.64	11.65	0.66	190200	0.94
900	331.64	0.58	505.27	0.75	10.59	0.73	13.59	0.77	194300	0.96
1000	319.01	0.56	489.55	0.72	10.05	0.70	13.20	0.75	190000	0.94

3.2 Armaduras de acero inoxidable 1.4362

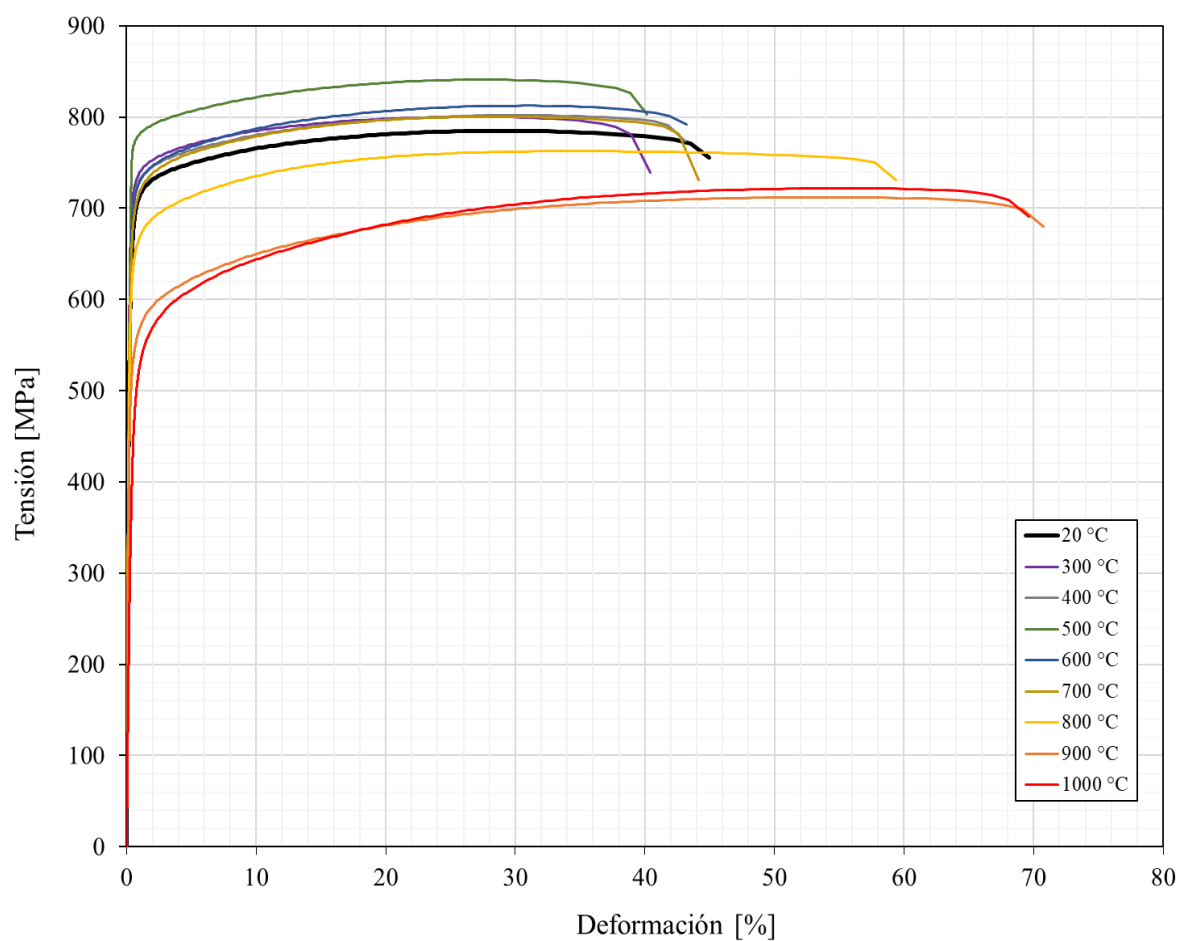


Figura 5. Armaduras de acero inoxidable 1.4362. Curvas tensión-deformación de ensayos post-fuego.

Tabla 3. Armaduras de acero inoxidable 1.4362. Valores residuales y coeficientes de retención post-fuego de las principales propiedades mecánicas.

θ_t [°C]	f_y [MPa]	$r_{y,\theta}$	f_u [MPa]	$r_{u,\theta}$	ϵ_u [%]	$r_{\epsilon u,\theta}$	ϵ_f [%]	$r_{\epsilon f,\theta}$	E [MPa]	$r_{E,\theta}$
20	643.48	1.00	767.38	1.00	21.63	1.00	35.00	1.00	164000	1.00
300	693.44	1.08	800.10	1.04	26.14	1.21	33.75	0.96	171400	1.05
400	696.44	1.08	801.79	1.04	30.45	1.41	30.00	0.86	176000	1.07
500	758.34	1.18	840.79	1.10	27.29	1.26	22.50	0.64	183300	1.12
600	680.58	1.06	812.34	1.06	30.63	1.42	35.00	1.00	173500	1.06
700	681.59	1.06	800.05	1.04	28.25	1.31	18.75	0.54	185700	1.13
800	607.46	0.94	762.50	0.99	33.95	1.57	37.50	1.07	166300	1.01
900	506.39	0.79	711.97	0.93	52.62	2.43	50.00	1.43	*	*
1000	461.14	0.72	721.87	0.94	55.41	2.56	42.50	1.21	172900	1.05

* valores indeterminados a causa de errores durante los ensayos.

3.3 Acero estructural S355

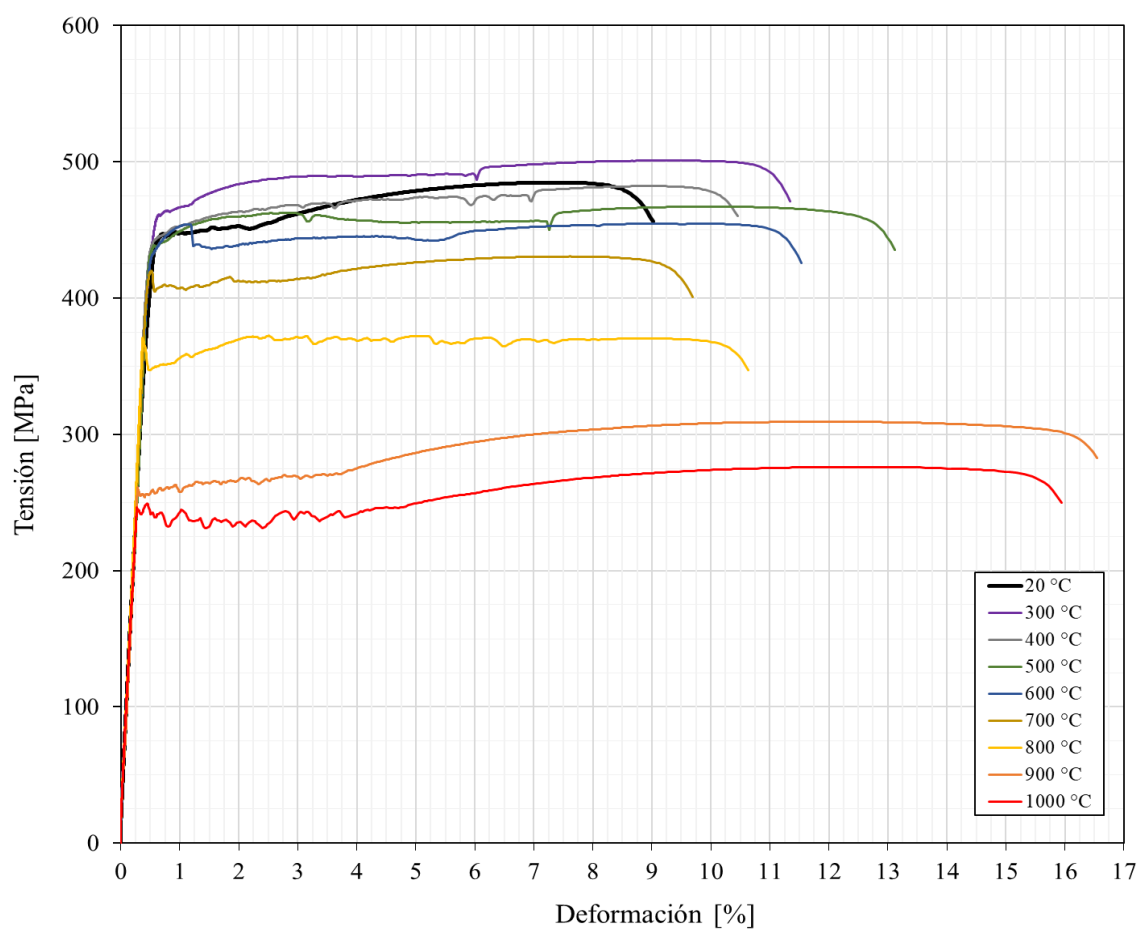


Figura 6. Acero estructural S355. Curvas tensión-deformación de ensayos post-fuego.

Tabla 4. Acero estructural S355. Valores residuales y coeficientes de retención post-fuego de las principales propiedades mecánicas.

θ_t [°C]	f_y [MPa]	$r_{y,\theta}$	f_u [MPa]	$r_{u,\theta}$	ϵ_u [%]	$r_{\epsilon u,\theta}$	ϵ_f [%]	$r_{\epsilon f,\theta}$	E [MPa]	$r_{E,\theta}$
20	446.84	1.00	484.86	1.00	7.18	1.00	9.31	1.00	208500	1.00
300	461.84	1.03	500.91	1.03	8.99	1.25	11.60	1.25	200000	0.96
400	445.43	1.00	482.12	0.99	8.83	1.23	10.65	1.14	207108	0.99
500	441.03	0.99	467.03	0.96	9.65	1.34	13.19	1.42	207000	0.99
600	441.06	0.99	454.79	0.94	9.70	1.35	11.71	1.26	203000	0.97
700	407.32	0.91	430.58	0.89	7.62	1.06	9.60	1.03	184000	0.88
800	349.03	0.78	372.32	0.77	*	*	11.13	1.20	208900	1.00
900	255.73	0.57	309.28	0.64	12.00	1.67	18.30	1.97	180000	0.86
1000	246.23	0.55	276.01	0.57	12.34	1.72	*	*	193117	0.93

* valores indeterminados a causa de errores durante los ensayos.

3.4 Acero estructural de alta resistencia S700

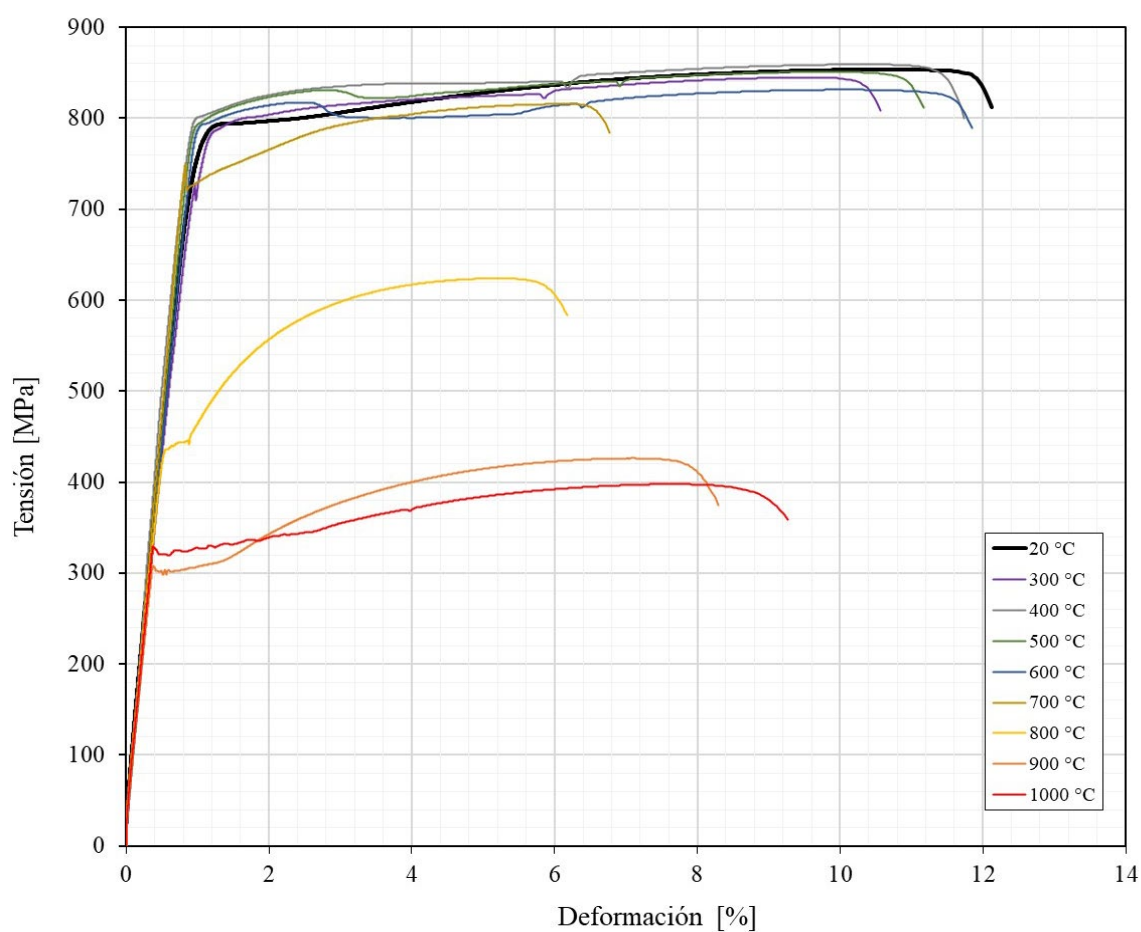


Figura 7. Acero estructural de alta resistencia S700. Curvas tensión-deformación de ensayos post-fuego.

Tabla 5. Acero estructural de alta resistencia S700. Valores residuales y coeficientes de retención post-fuego de las principales propiedades mecánicas.

θ_t [°C]	f_y [MPa]	$r_{y,\theta}$	f_u [MPa]	$r_{u,\theta}$	ε_u [%]	$r_{\varepsilon u,\theta}$	ε_f [%]	$r_{\varepsilon f,\theta}$	E [MPa]	$r_{E,\theta}$
20	777.18	1.00	853.51	1.00	11.11	1.00	12.35	1.00	205000	1.00
300	776.07	1.00	844.75	0.99	9.42	0.85	10.02	0.81	210000	1.02
400	801.28	1.03	859.06	1.01	10.18	0.92	11.50	0.93	217000	1.06
500	798.25	1.03	850.94	1.00	9.71	0.87	11.02	0.89	210500	1.03
600	795.04	1.02	831.31	0.97	9.88	0.89	11.41	0.92	208400	1.02
700	728.15	0.94	815.75	0.96	6.10	0.55	6.68	0.54	198500	0.97
800	442.75	0.57	623.94	0.73	5.16	0.46	6.50	0.53	200100	0.98
900	300.33	0.39	426.13	0.50	7.02	0.63	8.03	0.65	227000	1.11
1000	320.64	0.41	397.75	0.47	7.57	0.68	9.27	0.75	*	*

* valores indeterminados a causa de errores durante los ensayos.

Para ilustrar mejor las diferencias en el comportamiento post-fuego de los distintos aceros, en las gráficas de la Figura 8 se han representado los coeficientes de retención de

cada una de las propiedades mecánicas estudiadas en función de la máxima temperatura θ_t alcanzada durante el ensayo.

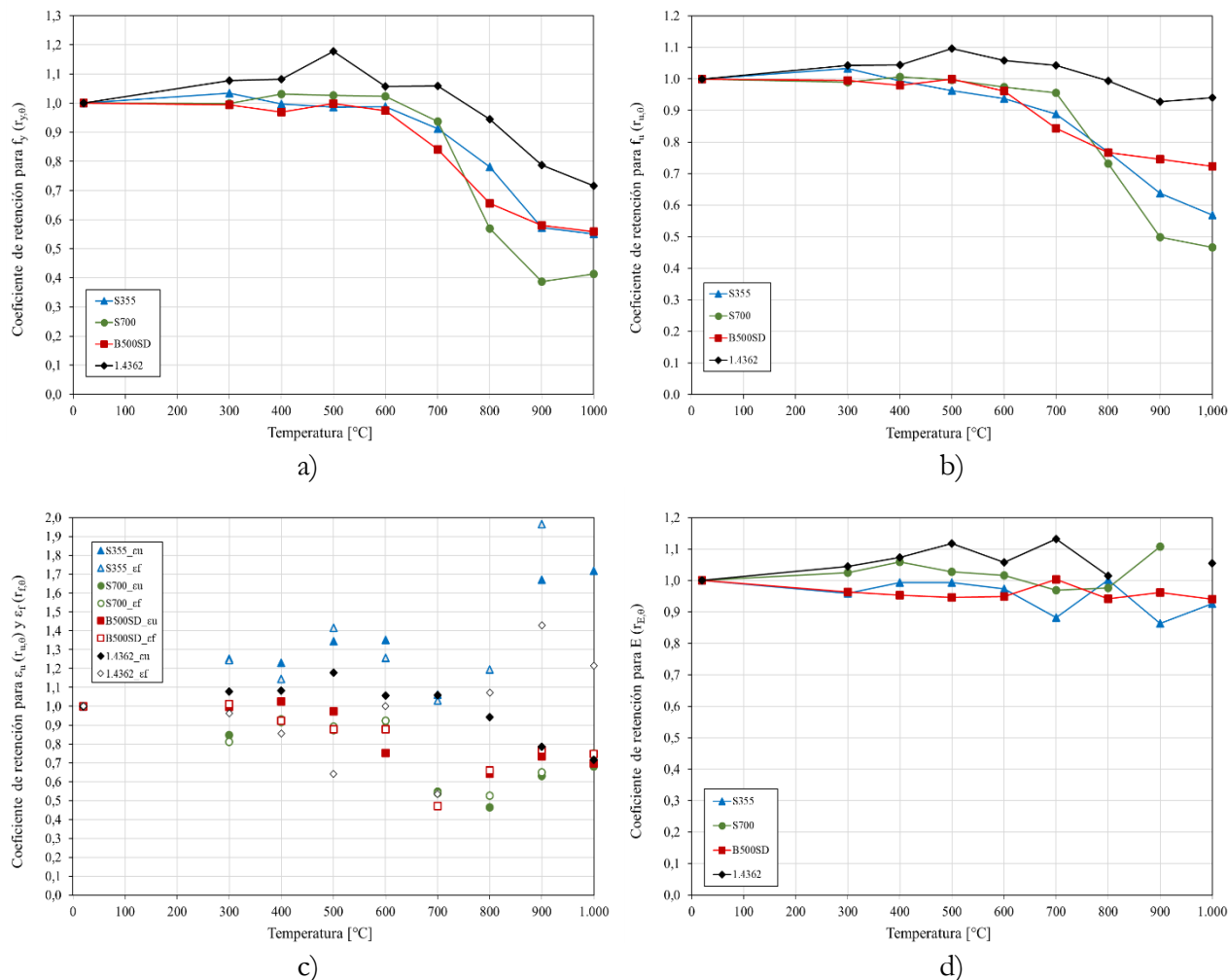


Figura 8. Coeficientes de retención de las principales propiedades mecánicas de los aceros ensayados en función de la máxima temperatura alcanzada θ_t . a) límite elástico, f_y ; b) resistencia a tracción, f_b ; c) ductilidad (caracterizada mediante la deformación última, ϵ_u , y la deformación de fractura, ϵ_f) y d) módulo de Young, E .

Las curvas tensión-deformación de las figuras 4-7 ponen de manifiesto la dependencia de la respuesta mecánica post-fuego, no sólo con la máxima temperatura θ_t alcanzada durante el ensayo, sino con el tipo de acero y su ruta de producción. Aun así, pueden observarse similitudes en la evolución de la curva tensión-deformación con la temperatura θ_t . El calentamiento hasta temperaturas moderadas (300-400 °C) y posterior enfriamiento, o bien se

traduce en una modificación poco significativa de la curva tensión-deformación a temperatura ambiente, o bien induce cierto endurecimiento, especialmente en el acero inoxidable 1.4362 (Figura 7). Para temperaturas objetivo de 500-600 °C seguidas de enfriamiento, las curvas tensión-deformación residuales evidencian una pérdida de capacidad resistente (disminución en altura de la curva) o de ductilidad (disminución del recorrido de la curva). Como excepción, el acero inoxidable retiene la mayor parte de su

resistencia y ductilidad después del enfriamiento. En todos los aceros, la pérdida de resistencia es evidente si se alcanzan 700-1000 °C y hay enfriamiento posterior. Pero la ductilidad, si bien disminuye tras enfriamientos desde 700-800 °C, aumenta con respecto a la medida a temperatura ambiente si se han alcanzado 900-1000 °C en su lugar. La Figura 9 ilustra el efecto de la temperatura en la ductilidad de las probetas.



Figura 9. Aspecto de las probetas de acero S355 tras los ensayos post-fuego.

3.5 Propiedades mecánicas residuales

Para cada propiedad ensayada, se comentan las observaciones más significativas.

3.5.1. Límite elástico

Los coeficientes de retención de los cuatro tipos de acero ensayados siguen una evolución similar (Figura 8a): a mayor temperatura alcanzada durante el ensayo, menor límite elástico residual tras el enfriamiento. El límite elástico residual decrece rápidamente para valores de temperatura de ensayo de 600 °C y superiores. La mayor pérdida de límite elástico con la temperatura se observa en el acero estructural de alta resistencia (S700), y la menor en el acero inoxidable (1.4362).

3.5.2. Resistencia a tracción

De acuerdo con la Figura 8b, la pérdida de la resistencia residual a tracción con la temperatura sigue una tendencia similar a la observada en el límite elástico, si bien se inicia a temperaturas algo menores (500-600 °C). De nuevo, es el acero de alta resistencia el que registra mayores pérdidas de la resistencia residual a tracción con la máxima temperatura alcanzada, mientras que

el acero inoxidable muestra una mayor retención de esta propiedad en todo el rango de temperaturas de ensayo.

3.5.3. Ductilidad

En el contexto de este trabajo, la ductilidad del acero se cuantifica midiendo la deformabilidad de la probeta en el ensayo de tracción, con lo que las deformaciones porcentuales a tensión máxima (ϵ_u) y de rotura (ϵ_f) constituyen buenos indicadores.

En la Figura 8c se observa que la dispersión de los coeficientes de retención asociados a la ductilidad es notablemente superior a la de las demás propiedades, especialmente en caso del acero estructural S355. Cabe destacar el caso del acero inoxidable 1.4362, en el que los coeficientes de retención de la deformación última son cercanos (o superiores) a la unidad hasta que la temperatura máxima de ensayo es de 800 °C.

3.5.4. Módulo de Young

De acuerdo con la Figura 8d, todos los aceros ensayados retienen la mayor parte del valor del módulo de Young E después del ciclo de calentamiento y enfriamiento a carga nula. Con independencia de la máxima temperatura θ_t alcanzada, los coeficientes de retención son cercanos o superiores a la unidad.

4. Conclusiones y futuros desarrollos

De los resultados obtenidos pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- El comportamiento post-fuego de una armadura o de un acero estructural depende de su composición química y de su ruta de producción.
- Tras el calentamiento y posterior enfriamiento, todas las propiedades mecánicas se modifican con respecto a las medidas a temperatura ambiente, con la excepción del módulo de Young, que permanece prácticamente inalterado.

- El acero de alta resistencia (S700) es el que menos límite elástico y resistencia a tracción retiene tras calentarse a 600 °C o más. Por el contrario, este material presenta una buena retención de sus propiedades mecánicas si se expone a temperaturas inferiores a 500 °C.
- Las barras corrugadas de acero inoxidable 1.4362 son las más estables frente a la acción del fuego, ya que presentan los coeficientes de retención más elevados de todos los aceros ensayados.
- Si bien la metodología de ensayo utilizada es sencilla, no refleja de una manera del todo realista la situación de una estructura durante un incendio. El motivo es que se han empleado probetas descargadas ($\sigma_t = 0$), mientras que una estructura soporta cierto nivel de carga durante un incendio ($\sigma_t > 0$). Como futura línea de investigación, se pretende ensayar probetas sometidas a distintos niveles de tensión σ_t .

Agradecimientos

Los autores agradecen la colaboración de los profesores David Hernández Figueirido y Vicente Alberto Gabarda, de la Universitat Jaume I de Castellón, quienes han suministrado las probetas de acero inoxidable y han participado en los ensayos correspondientes. La investigación reflejada en este trabajo ha sido financiada por la Universitat Politècnica de València a través de la convocatoria de ayudas para primeros proyectos de investigación (PAID-06-23).

Referencias

- [1] V. Kodur, P. Kumar, M.M. Rafi, Fire hazard in buildings: review, assessment and strategies for improving fire safety, PSU Research Review 4 (2020) 1–23. <https://doi.org/10.1108/PRR-12-2018-0033>.
- [2] C.I. Smith, B.R. Kirby, D.G. Lapwood, K.J. Cole, A.P. Cunningham, R.R.

Preston, The reinstatement of fire damaged steel framed structures, Fire Saf J 4 (1981).

[https://doi.org/10.1016/0379-7112\(81\)90004-7](https://doi.org/10.1016/0379-7112(81)90004-7).

- [3] Z. Tao, X.Q. Wang, B. Uy, Stress-strain curves of structural and reinforcing steels after exposure to elevated temperatures, Journal of Materials in Civil Engineering 25 (2013) 1306–1316. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000676](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000676).
- [4] T. Molken, K.A. Cashell, B. Rossi, Post-fire mechanical properties of carbon steel and safety factors for the reinstatement of steel structures, Eng Struct 234 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.111975>.
- [5] Z. Tao, X.Q. Wang, M.K. Hassan, T.Y. Song, L.A. Xie, Behaviour of three types of stainless steel after exposure to elevated temperatures, J Constr Steel Res 152 (2019) 296–311. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.02.020>.
- [6] A. Lapuebla-Ferri, D. Pons, M.L. Romero, Load and temperature influence on the post-fire mechanical properties of steel reinforcements, J Constr Steel Res 185 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106866>.
- [7] D. Pons, A. Lapuebla-Ferri, M.L. Romero, Post-fire Residual Strength and Ductility of Structural Steels from Hollow Sections, Ce/Papers 5 (2022) 458–466. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/cepa.1777>.
- [8] A. Lapuebla-Ferri, D. Pons, M.L. Romero, L. Gardner, Influence of load and high temperature on the post-fire behaviour of high-strength structural steels, Ce/Papers 6 (2023) 2120–2126. <https://doi.org/10.1002/cepa.2491>.
- [9] AENOR, UNE-EN 10088-1: Aceros inoxidables. Parte 1: Lista de aceros inoxidables., Madrid, 2024. www.une.org.