

El acero inoxidable EN 1.4301 sometido a altas temperaturas: rendimiento térmico y mecánico comparado con el acero al carbono B500SD

Alberto Leal Matilla¹; M^a Isabel Prieto Barrio¹; Daniel Ferrández Vega¹; Alfonso Cobo Escamilla¹

¹Departamento de Tecnología de la Edificación, Universidad Politécnica de Madrid, 28040 Madrid, Spain

1. Introducción

Las estructuras de hormigón armado desempeñan un papel fundamental en la seguridad de edificaciones críticas como hospitales, aeropuertos, túneles o infraestructuras industriales. Uno de los factores más determinantes en su comportamiento estructural es la adherencia entre el acero y el hormigón. Cuando una estructura se ve expuesta a un incendio, esta adherencia puede verse gravemente comprometida por efectos térmicos que alteran tanto la geometría como las propiedades mecánicas de las armaduras [1], [2], [3].

En este contexto, el presente estudio compara el comportamiento térmico y mecánico de dos tipos de acero comúnmente utilizados como armaduras pasivas: el acero al carbono B500SD y el acero inoxidable austenítico EN 1.4301. Las muestras han sido expuestas a temperaturas de hasta 1150 °C, simulando condiciones críticas propias de un incendio estructural, y posteriormente sometidas a dos tipos de enfriamiento: uno lento, a temperatura ambiente, y otro rápido, mediante inmersión en agua [4], [5].

El objetivo del presente trabajo es analizar comparativamente los efectos del calor y del tipo de enfriamiento sobre parámetros clave como la pérdida de masa, la estabilidad dimensional, la resistencia residual y la ductilidad post-incendio, evaluando así la idoneidad de cada tipo de acero para aplicaciones donde la seguridad estructural tras el fuego resulta crítica.

2. Metodología

Los materiales empleados son armaduras de diámetro 12mm de acero al carbono B500SD [6] y de acero inoxidable EN 1.4301 [7], [8]. Se sometieron en horno a temperaturas de 20 °C, 450 °C, 800 °C y 1150 °C. y se sometieron a dos tipos de enfriamiento: lento (aire) y rápido (agua). La tabla 1 muestra la composición química de los aceros empleados.

Tabla 1. Composición de los aceros empleados en esta investigación

Acero al carbono B500SD						
Elementos (%)	C	P	S	N	Cu	C Equivalente
	≤ 0.22	≤ 0.05	≤ 0.05	≤ 0.012	≤ 0.8	≤ 0.5

Acero Inoxidable EN 1.4301								
Elementos (%)	C	P	S	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
	0.04	0.032	0.002	0.351	1.45	18.145	8.045	0.344

*Normas: EN 10080 (B500SD) y ASTM A955 / A955M AISI 304 (EN 1.4301)

El procedimiento se realizó siguiendo los pasos descritos a continuación y que se resumen en la imagen del final del mismo (Fig.1):

1. **Escaneo 3D:** se realizó un escaneo de las barras antes y después del calentamiento con un escáner CREAFORM 3D (alta resolución y precisión), usando el software VX Elements© para analizar la morfología y los cambios por temperatura.

2. **Calentamiento:** las barras se calentaron en un horno mufla (J.P. Selecta) a 450 °C, 800 °C y 1150 °C durante 1 hora, además de ensayarse a temperatura ambiente. Se registró la masa antes y después del proceso con una balanza de alta precisión (EUROPE 6300 RS).

3. **Enfriamiento:** se aplicaron dos métodos, uno rápido (inmersión en agua a 9 °C) y otro lento (enfriamiento al aire en laboratorio), bajo condiciones controladas.

4. **Ensayo a tracción:** se usó una máquina IBERTEST MIB-60/AM, siguiendo la norma UNE-EN ISO 15630-1:2019 [9], con control por carrera (0.34 kN/s) y medición de deformaciones mediante extensómetro MFA 2 (50 mm).



Figura 1. a) Escaneo de las barras



Figura 1. b) Proceso de calentamiento



Figura 1. c) Ensayo de tracción

3. Resultados y discusión

Los ensayos realizados sobre las armaduras de acero B500SD y EN 1.4301 revelan diferencias significativas en su comportamiento frente al fuego y al posterior proceso de enfriamiento.

A continuación, se describen los principales hallazgos morfológicos y mecánicos derivados del calentamiento a temperaturas de hasta 1150 °C y los dos tipos de enfriamiento aplicados.

3.1 Análisis visual y dimensional

Tras la exposición térmica, se observa un cambio evidente en la apariencia superficial de ambas armaduras. En el acero B500SD se produce una pérdida de brillo, apareciendo una capa opaca grisácea atribuible a la formación de óxidos férricos. El acero inoxidable EN 1.4301, por su parte, desarrolla una tonalidad dorada especialmente visible tras el enfriamiento lento, asociada a óxidos de hierro y cromo (Fig. 2)

3.3 Propiedades mecánicas: resistencia y deformación

Las curvas de tensión-deformación (Fig. 4) obtenidas nos permiten analizar cómo se ven afectadas las propiedades mecánicas de las varillas de refuerzo al ser expuestas a temperaturas elevadas y a una amplia gama de tratamientos de enfriamiento. Según Liu et al. (2024) [10], las temperaturas de incendio rara vez superan los 350 °C. Sin embargo, cuando se produce corrosión o spalling (desprendimiento del recubrimiento), las varillas experimentan una llama directa, a 800 °C o incluso más, según análisis térmicos, como por ejemplo en el análisis de Kültür et al. [11]. En circunstancias tan severas, una fase de enfriamiento posterior (rápida o lenta) puede modificar considerablemente las características mecánicas del material.

Estos ensayos revelan que, a 450 °C, tanto el acero al carbono como el acero inoxidable presentan un aumento notable de la resistencia máxima (f^s) con respecto a sus condiciones de pretratamiento térmico. Esta mejora se produce con enfriamientos rápidos y lentos, y se hace especialmente evidente en el acero inoxidable. Con el acero al carbono, también se observa una ligera mejora en la resistencia en el límite elástico (f^y). Las condiciones térmicas intermedias provocan una reorganización interna de la microestructura para aumentar la resistencia sin desarrollar fallas frágiles ni transiciones abruptas en las características.

A temperaturas más altas, de 800 °C, se observa una pérdida gradual de f^y en ambos aceros. En algunos casos, se mantiene un valor inicial alto de f^s , pero la pérdida de flexibilidad inicial indica una pérdida de capacidad estructural. A 1150 °C, la pérdida es significativa en ambos materiales: tanto f^y como f^s disminuyen significativamente, aunque el acero inoxidable conserva valores de resistencia última relativamente altos, especialmente con enfriamiento lento. En cuanto a la deformación, lo que se observa aquí es que el tratamiento a 450 °C no causa un cambio de fragilidad en ninguno de los dos aceros. Aunque, generalmente, la deformación varía ligeramente, la formación de una curva de tensión-deformación permanece estable y uniforme hasta el fallo. Por otro lado, el acero al carbono, a temperaturas más altas, presenta una mayor pérdida de deformabilidad, principalmente cuando se combina con un enfriamiento rápido. En cambio, el acero inoxidable se mantiene más estable, aunque también con pérdida de rigidez.

En general, el tratamiento térmico a 450 °C muestra resultados prometedores con ambos aceros, reforzándolos sin comprometer su respuesta mecánica general. Sin embargo, el acero inoxidable presenta una reacción más estable y menos sorprendente a temperaturas extremas, mientras que el acero al carbono presenta una reacción más sensible a la exposición a temperaturas muy altas y un enfriamiento rápido, con el potencial de provocar reacciones más frágiles o menos estables en escenarios de alta temperatura.

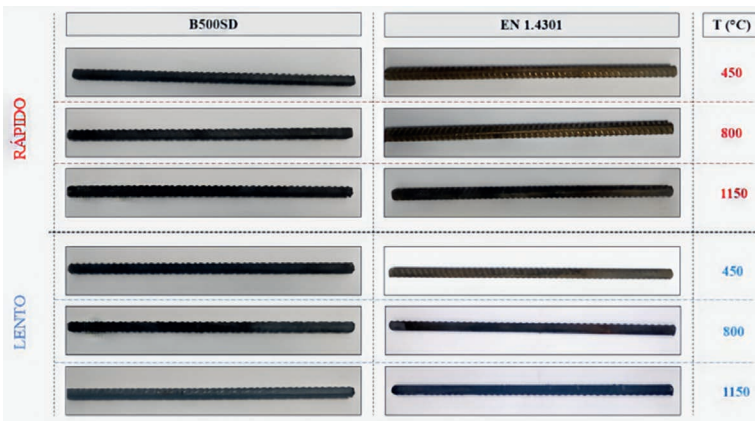


Figura 2. Apariencia superficial de armaduras B500SD y EN 1.4301

En cuanto a la estabilidad dimensional, los escaneos 3D antes y después del tratamiento evidencian deformaciones más marcadas en las barras de acero al carbono, con desviaciones longitudinales que alcanzan hasta 9 mm en el caso más extremo. La deformación es especialmente intensa bajo enfriamiento rápido. En cambio, el acero inoxidable muestra menor pérdida de linealidad, incluso tras la exposición a 1150 °C, reflejando una mayor estabilidad geométrica.

3.2 Pérdida de masa y degradación superficial

La pérdida de masa relativa aumenta con la temperatura en ambos materiales, pero el acero B500SD sufre una degradación más acentuada. Esta diferencia puede tener un impacto directo en la adherencia con el hormigón, ya que la presencia de óxidos frágiles compromete la interfaz acero-hormigón (Fig. 3).

B500SD		EN 1.4301		
	$\Delta\phi_{max}$ (mm) 0,539 $\Delta masa$ (%) 2,20		$\Delta\phi_{max}$ (mm) 0,252 $\Delta masa$ (%) 5,74	450 °C
	$\Delta\phi_{max}$ (mm) 0,803 $\Delta masa$ (%) 10,11		$\Delta\phi_{max}$ (mm) 0,747 $\Delta masa$ (%) 0,11	
	$\Delta\phi_{max}$ (mm) 3,095 $\Delta masa$ (%) 23,80		$\Delta\phi_{max}$ (mm) 0,995 $\Delta masa$ (%) 0,21	
	$\Delta\phi_{max}$ (mm) 8,191 $\Delta masa$ (%) 22,55		$\Delta\phi_{max}$ (mm) 3,066 $\Delta masa$ (%) 0,24	800 °C
	$\Delta\phi_{max}$ (mm) 9,027 $\Delta masa$ (%) 0,26		$\Delta\phi_{max}$ (mm) 0,988 $\Delta masa$ (%) 0,30	
	$\Delta\phi_{max}$ (mm) 4,035 $\Delta masa$ (%) 0,34		$\Delta\phi_{max}$ (mm) 9,027 $\Delta masa$ (%) 0,26	
RÁPIDO	LENTO	RÁPIDO	LENTO	

Figura 3. Pérdida de masa y diámetro de las barras B500SD y EN 1.4301

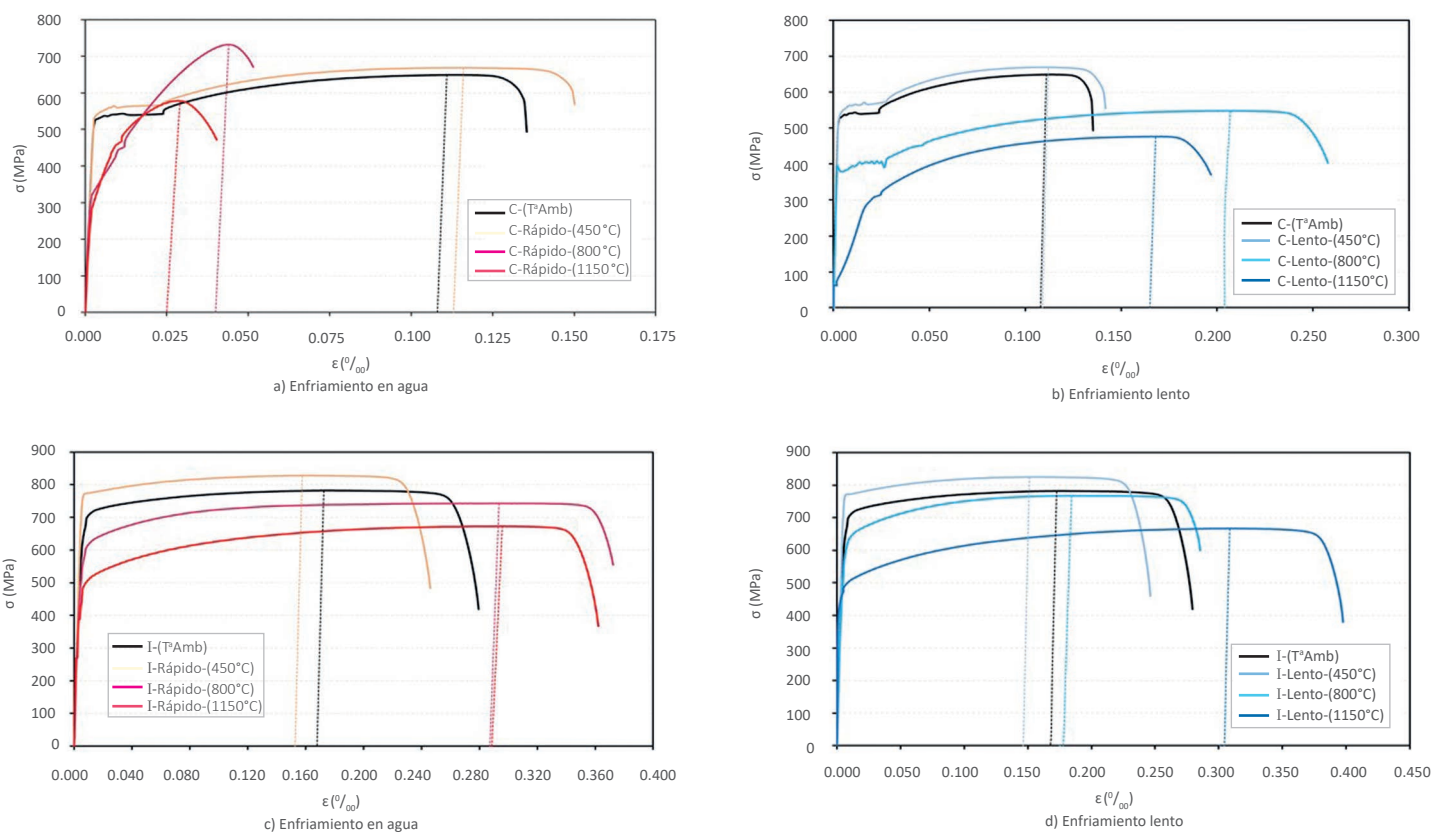


Figura 4. Gráficas Tensión-Deformación (σ - ϵ) para el acero B500SD (imagen superior) y EN 1.4301 (imagen inferior): (a), (c) Enfriamiento rápido en agua; y, (b), (d) Enfriamiento lento al aire

3.4 Deformación residual y comportamiento post-incendio

Tras un incendio, es importante evaluar la capacidad estructural del acero. Además de la resistencia residual, también debe considerarse si, con su capacidad de deformación residual, un material podría soportar fallos frágiles o redistribuir las tensiones internas. En esta sección se analiza tras ser sometidos a 1150 °C (una condición muy extrema que podría resultar si alguna armadura queda descubierta por desconchado de la cubierta de hormigón), el acero al carbono B500SD y el acero inoxidable EN 1.4301 tras un incendio. Estas mediciones muestran diferencias significativas entre ambos materiales, principalmente en función del tipo de enfriamiento aplicado:

- El enfriamiento lento generó una deformación máxima de 0.197 para el acero al carbono, pero el doble, 0.398, para el acero inoxidable. La diferencia refleja una mayor capacidad de deformación residual del acero inoxidable para soportar condiciones térmicas extremas.
- El enfriamiento acelerado aumenta aún más las desigualdades. El acero al carbono redujo bruscamente su capacidad de deformabilidad a un mínimo del 0.0403, pero el acero inoxidable

mantuvo un valor muy elevado de 0.362, lo que confirma una mayor estabilidad estructural a pesar del endurecimiento brusco.

El acero inoxidable presenta una respuesta más estable y menos sorpresiva, con menor pérdida de deformabilidad y sin evidencia de colapso frágil. Por otro lado, el acero al carbono reacciona de forma menos positiva al enfriamiento rápido, lo que podría reducir su capacidad estructural en situaciones reales, suponiendo que el acero al carbono no haya sido protegido adecuadamente por la cubierta de hormigón durante el incendio. Por lo tanto, cuando la seguridad tras un incendio se convierte en un factor determinante, como en túneles, infraestructuras críticas u hospitales, el acero inoxidable EN 1.4301 ofrece una solución más resistente y fiable, tanto por su resistencia residual como por su mayor capacidad de deformación durante eventos extremos.

4. Conclusiones

A continuación se muestran las conclusiones obtenidas en el presente trabajo de investigación:

- El acero inoxidable EN 1.4301 presenta mejor comportamiento post-incendio que el B500SD.

- Su resistencia residual y ductilidad tras calentamiento extremo son superiores.

- Sufre menor pérdida de masa y conserva mejor su forma, lo que reduce riesgos de fallo estructural.

- Es ideal para estructuras críticas donde la seguridad tras incendio es clave, como hospitales, aeropuertos o túneles.

5. Bibliografía

[1] A. Leal Matilla, D. Ferrández, M. I. Prieto Barrio, and H. Varum, "Systematic Review on the Behaviour of Carbon and Stainless Steel Reinforcing Bars in Buildings Under High Temperatures," May 2025, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). doi: 10.3390/buildings15091539.

[2] A. Cobo, I. Martínez, M. I. Prieto, and E. Moreno, "Mechanical behaviour of thermally activated building structures," *Magazine of Concrete Research*, vol. 67, pp. 271–281, Mar. 2015, doi: 10.1680/macr.14.00237.

[3] T. Kiran et al., "Investigation on improving the residual mechanical properties of reinforcement steel and bond strength of concrete exposed to elevated temperature," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 16, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01128.

[4] J. Bošnjak, A. Das, and A. Sharma, "Influence of concrete cover and transverse reinforcement on residual post-fire bond performance of reinforcement in concrete," *Eng Struct*, vol. 314, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.engstruct.2024.118191.

[5] M. Yağan, F. M. Özkal, M. O. Öztürk, and M. Polat, "Investigation of the Structural Behavior of Reinforced Concrete Beams at Elevated Temperatures," *ACS Omega*, vol. 9, no. 8, pp. 9593–9602, Feb. 2024, doi: 10.1021/acsomega.3c09403.

[6] "EN 36065:2011," <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0046928>.

[7] "Specification for Deformed and Plain Stainless-Steel Bars for Concrete Reinforcement."

[8] "UNE-EN 10088-1:2024," <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0073437>.

[9] "UNE-EN ISO 15630-1:2019," <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0062934>.

[10] S. Liu, W. Zheng, X. Hou, Y. Wang, and P. Sun, "Effect of sustained thermal exposure on the bonding characteristics of plain bars in concrete," *Constr Build Mater*, vol. 469, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2025.140488.

[11] Ö. F. Kültür, A. Al-Masri, and B. Sayin, "Effect of high temperature exposure on design parameters and collapse behavior of reinforced concrete and steel-framed buildings," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 17, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01263.