

Análisis termomecánico frente al fuego

Capacidad residual de la sección calentada

Tutorial de SectionPro · Resistencia residual de una sección en situación de incendio, mediante el método de la isoterma 500 °C de la EN 1992-1-2

BridgeKernel · 2026

I Introducción

El cálculo al fuego se realiza en dos etapas sucesivas. La primera etapa es térmica, como se describió en el artículo anterior: SectionPro resuelve el problema de transferencia de calor sobre la sección real y devuelve el campo de temperatura en el hormigón, las armaduras y cualquier perfil de acero embebido en cada instante solicitado.

La segunda etapa es mecánica. Para cada duración de fuego seleccionada, los módulos mecánicos parten del campo de temperatura correspondiente y derivan la sección resistente utilizada en la verificación. La contribución del hormigón se reduce según la región calentada de la sección, mientras que las barras de armadura y el perfil de acero embebido reciben propiedades mecánicas dependientes de la temperatura. La sección calentada resultante se analiza entonces con el mismo espíritu que una sección a temperatura ambiente: verificación de casos de carga, curvas y superficie de interacción, distancias, curvas de rigidez y tiempo hasta el fallo.

El método de la isoterma 500 °C

Para el hormigón, SectionPro sigue el método de la isoterma 500 °C de la EN 1992-1-2. El hormigón calentado por encima de 500 °C se descarta; el hormigón que se ha mantenido por debajo de 500 °C se conserva con su resistencia total a temperatura ambiente y su ley parábola-rectángulo habitual ($\varepsilon_{c2} = -2\text{‰}$, $\varepsilon_{cu2} = -3.5\text{‰}$). La geometría resistente se reduce por tanto a la región delimitada por la isoterma 500 °C, que se contrae a medida que aumenta la exposición.

Cada barra de armadura se reduce a su propia temperatura: su límite elástico y su módulo pasan a ser $f_y(\theta) = k_s(\theta) \cdot f_{yk}$ y $E_s(\theta) = k_E(\theta) \cdot E_s$, con los factores de reducción de la EN 1992-1-2 (Tablas 3.2a y 3.2b). Una barra situada fuera de la isoterma 500 °C no se elimina; sigue contribuyendo con su resistencia reducida.

El mismo tratamiento se aplica a un perfil estructural embebido cuando se malla en la etapa térmica: cada elemento de acero se lee a su temperatura, se reduce mediante $k_y(\theta)$ y $k_E(\theta)$, y el hormigón que ocupa se retira para que no se contabilice dos veces. Una vez construida la sección calentada, la verificación mecánica se desarrolla como un análisis de sección estándar, con el fuego afectando a

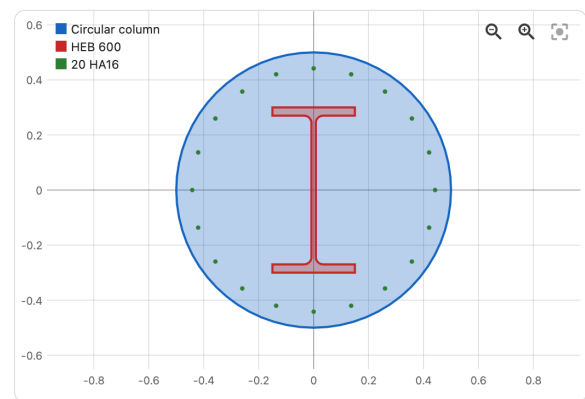
la geometría resistente y a las leyes de materiales utilizadas en el instante seleccionado. Sobre esta sección reducida, SectionPro ejecuta:

- Verificación de la sección: el equilibrio de un caso de carga, con el campo completo de tensiones y deformaciones en un instante dado.
- Curva de interacción: la frontera de resistencia en un plano de esfuerzos elegido, con una componente fija.
- Superficie de interacción: el dominio de resistencia 3D completo en (N, M_z, M_y) .
- Distancias: la utilización de cada carga por proyección sobre esa superficie.
- Rigidez: la respuesta momento–curvatura y la rigidez flexional secante y tangente.
- Tiempo hasta el fallo: el tiempo de exposición en el que la carga abandona el dominio de resistencia.

La sección de ejemplo

Los cálculos se ilustran sobre el pilar mixto que se incluye con los ejemplos de SectionPro:

- Sección circular, $\varphi = 1000$ mm, C30/37.
- Perfil HEB 600 embebido de acero S235.
- 20 barras Ø16 B500B en el perímetro.
- Exposición al fuego normalizado ISO 834.



Verificación de la sección

Para una carga (N, M_z, M_y) especificada para la verificación, SectionPro determina el estado de deformación $(\varepsilon_0, \kappa_y, \kappa_z)$, una deformación axial y dos curvaturas, que satisface el equilibrio interno con los esfuerzos impuestos. Lo resuelve de forma iterativa, integrando las tensiones sobre la sección calentada en cada paso: el hormigón conservado sobre sus contornos, las barras y el perfil mallado como fibras, cada uno gobernado por su ley reducida.

A partir del estado de deformación convergido, SectionPro extrae las tensiones y deformaciones en cada fibra, la posición del eje neutro y una utilización definida como la relación entre la deformación de la fibra determinante y la deformación última de ese material. Una utilización inferior a 1 significa que la carga se soporta; un valor igual o superior a 1 significa que la sección reducida ya no puede equilibrarla.

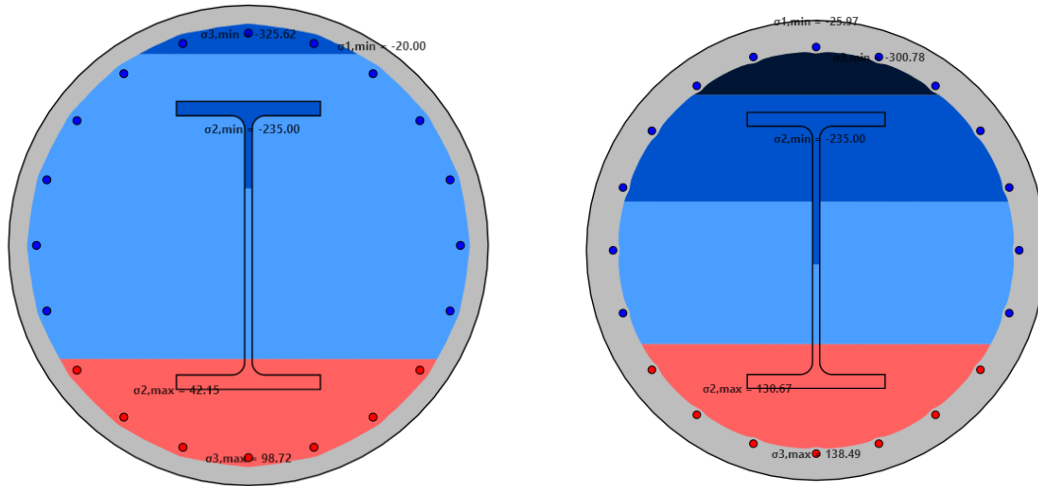


Figura 1: Estado de tensiones y deformaciones convergido a R120 y R240 bajo la carga $(N, M_z, M_y) = (15000, 2900, 0)$, en kN y $\text{kN} \cdot \text{m}$.

En el ejemplo la carga es $(N, M_z, M_y) = (15000, 2900, 0)$, en kN y $\text{kN} \cdot \text{m}$. Las vistas R120 y R240 sitúan la misma carga sobre una sección cuya área resistente se reduce con la exposición: el hormigón situado dentro de la isoterma 500°C soporta la compresión, mientras que las barras y el perfil embebido, aún fríos, equilibran la flexión. A R240, la sección alcanza el fallo por aplastamiento del hormigón conservado.

Curva de interacción N-Mz

La curva de interacción $N-M_z$ es la frontera de resistencia de la sección en flexión uniaxial: el conjunto de pares de fuerza axial y momento flector que puede soportar respecto al eje en estudio. Recalculadas para cada duración de fuego sobre la sección reducida, las curvas superpuestas ofrecen una visión directa de la capacidad perdida por el calentamiento.

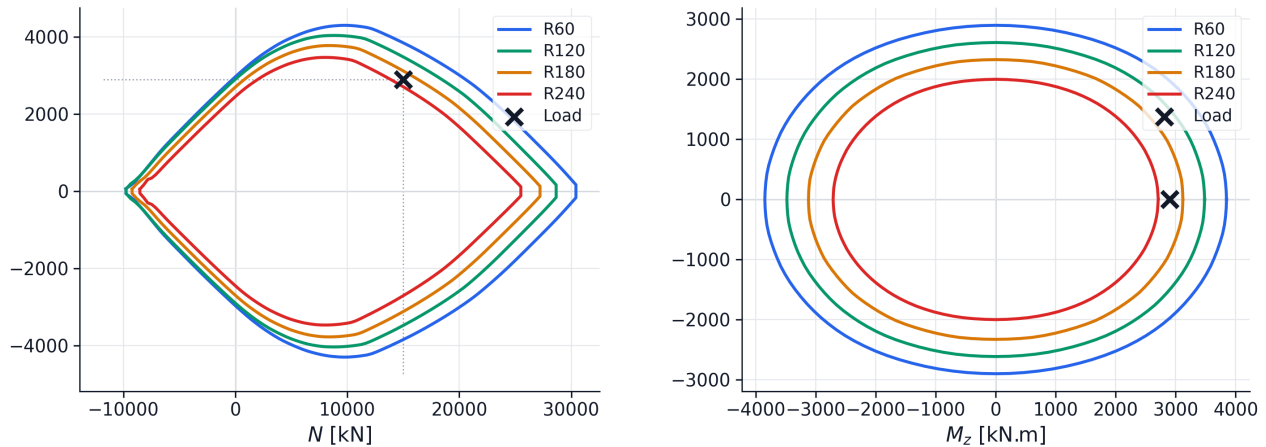


Figura 2: Curvas de interacción al fuego $N-M_z$ y M_y-M_z bajo ISO 834.

Las figuras muestran la pérdida de capacidad a medida que aumenta la temperatura: los dominios de resistencia se contraen progresivamente con la duración del fuego. Para la carga seleccionada, el fallo se produce entre R180 y R240.

Superficie de interacción 3D

En flexión esviada, la resistencia ya no puede describirse mediante una única curva plana: se convierte en una superficie cerrada en el espacio (N, M_z, M_y) , el dominio de resistencia de la sección. SectionPro calcula esta superficie directamente a partir de los estados de deformación última de la sección, tomados en cada dirección de flexión. Construida sobre la sección calentada, permite verificar directamente cualquier carga biaxial, sin reducirla a un eje preferente: una carga situada dentro de la superficie se soporta, una carga fuera supera la capacidad.

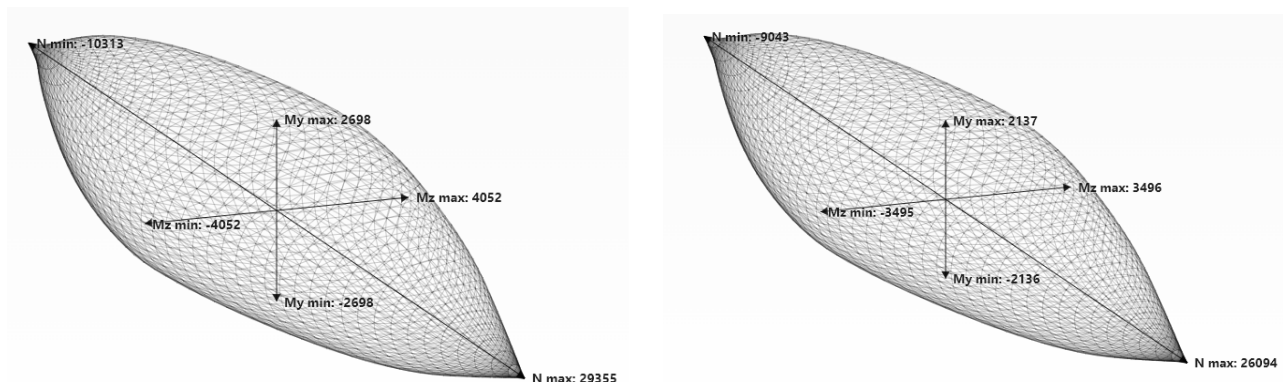


Figura 3: Superficie de interacción de resistencia al fuego $(N-M_z-M_y)$ a R120 y R240.

Distancias

El módulo de distancias verifica gráficamente varios casos de carga en flexión esviada frente a la misma superficie de interacción. Cada carga (N, M_z, M_y) se proyecta sobre la superficie y se devuelve con una utilización η , de modo que el ingeniero puede leer de inmediato qué cargas permanecen dentro del dominio de resistencia y cuáles lo superan.

- $\eta < 1$: la carga permanece **interna** y la sección tiene capacidad de reserva.
- $\eta = 1$: la carga se sitúa en la frontera, en el límite exacto.
- $\eta > 1$: la carga pasa a ser **externa** y se supera la capacidad.

Bajo el fuego, el dominio se contrae con la exposición, de modo que el estado de una misma carga puede cambiar de interior a exterior a medida que aumenta la duración.

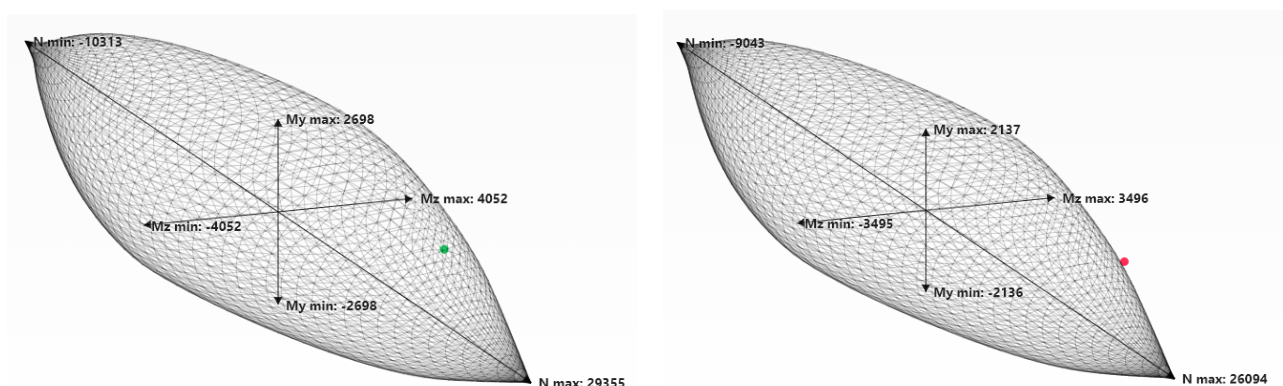


Figura 4: Verificación por distancias de una carga de fuego sobre el dominio de resistencia 3D, a R120 (izquierda) y R240 (derecha). El dominio se contrae con la exposición; la distancia normalizada η indica si la carga permanece **interna** ($\eta \leq 1$) o pasa a ser **externa** ($\eta > 1$).

La carga pasa de **interna** a R120 a **externa** a R240, lo que es coherente con los resultados de la verificación de la sección y de la curva de interacción.

Rigidez al fuego

El calentamiento reduce también la rigidez flexional de los pilares. A medida que aumenta la curvatura, esta pérdida de rigidez puede amplificar los efectos de segundo orden incluso antes de alcanzar la resistencia última.

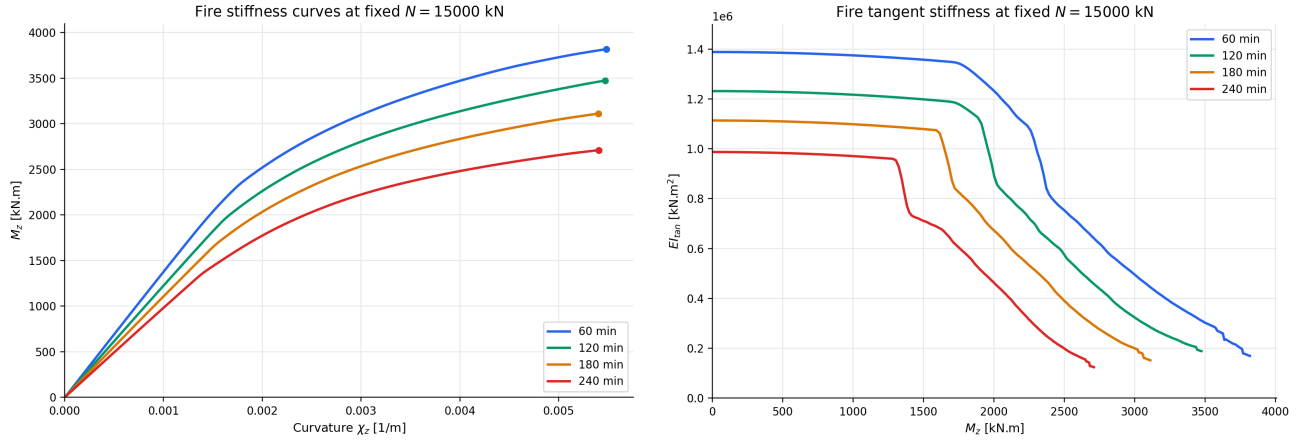


Figura 5: Rigidez al fuego con $N = 15000$ kN y $M_y = 0$. A la izquierda, la respuesta momento–curvatura M_z – χ . A la derecha, la rigidez tangente EI_{tan} frente a M_z .

Las curvas muestran una degradación acusada de la rigidez con la duración del fuego: la respuesta momento–curvatura se aplana y la rigidez tangente cae bruscamente a medida que la sección calentada se aproxima al fallo.

Tiempo hasta el fallo

El tiempo hasta el fallo es el cálculo más específico del fuego. Para una carga de servicio fija, SectionPro reconstruye la sección reducida en cada instante de salida térmica y resuelve el equilibrio sobre ella. La capacidad disminuye a medida que la isoterma 500 °C se contrae y las temperaturas del acero aumentan; el tiempo hasta el fallo es el instante en el que la carga abandona el dominio de resistencia, cuando la sección reducida ya no puede equilibrarla dentro de los límites de deformación de los materiales.

A continuación se realiza un ensayo de aislamiento sobre la misma sección para comprobar si una protección pasiva resuelve este problema concreto de resistencia al fuego. La misma carga se evalúa primero sobre la sección desnuda y después con una capa aislante continua sobre el perímetro de hormigón.

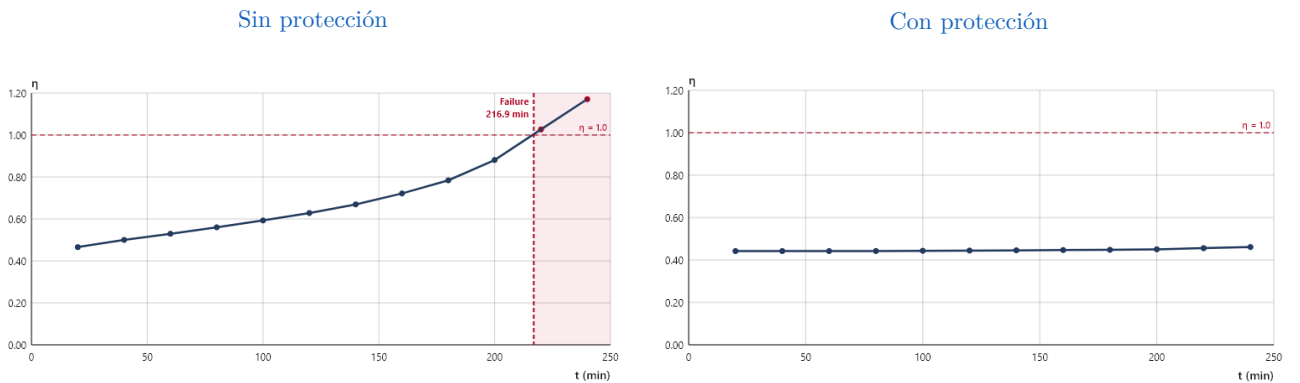


Figura 6: Tiempo hasta el fallo bajo la carga $(N, M_z, M_y) = (15000, 2900, 0)$, en kN y kN · m. La protección pasiva desplaza la salida del dominio de resistencia más allá de R240 en este caso.

La protección se modela como una capa pasiva continua descrita por cuatro parámetros térmicos. Para este ensayo de aislamiento se emplearon los siguientes valores:

d	λ	ρ	c_p
20 mm	0,2 W/(m · K)	700 kg/m ³	1000 J/(kg · K)

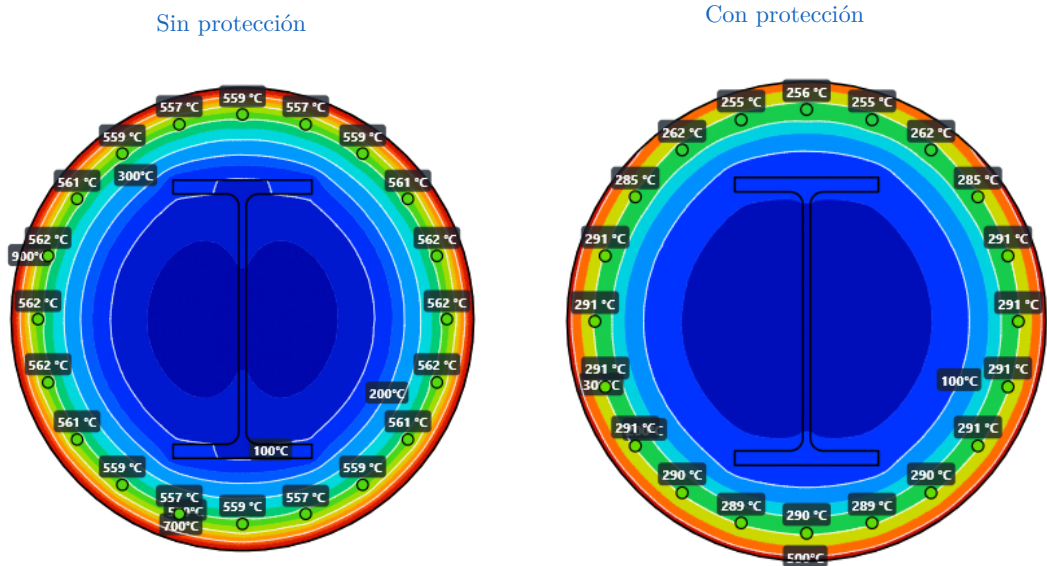


Figura 7: Campo de temperatura a R240, desnuda y protegida.

La protección es muy eficaz en este caso: las barras pasivas descienden de unos 560 °C a unos 300 °C, y el hormigón permanece por debajo de 500 °C incluso después de 240 min, de modo que toda la sección de hormigón se conserva mecánicamente.

Rendimiento del software

La tarea principal es el cálculo del campo térmico en las duraciones de fuego solicitadas. Una vez disponibles estos campos de temperatura, las verificaciones mecánicas son rápidas, y el flujo de trabajo completo se mantiene por debajo de un segundo en este ejemplo.

Cálculo	Tiempo
Campo térmico (2 etapas, R120/R240)	0,20 s
Verificación de la sección (tensión-deformación)	+ 4 ms
Curva de interacción N-Mz (160 puntos)	+ 31 ms
Dominio My-Mz con N fijo	+ 35 ms
Superficie de interacción 3D (50 × 50)	+ 134 ms
Curva de rigidez (momento-curvatura)	+ 11 ms
Tiempo hasta el fallo (barrido completo)	+ 52 ms

Pilar mixto del artículo, medido en un equipo de escritorio. Los tiempos mecánicos se dan tras la resolución del campo térmico.

Conclusión

El método de la isoterma 500 °C convierte el campo térmico en una sección resistente reducida: hormigón conservado con su resistencia dentro de la isoterma, barras y acero embebido debilitados por su temperatura local. A partir de este estado calentado, el análisis proporciona la resistencia de la carga impuesta, los dominios de interacción, las distancias de las cargas, la pérdida de rigidez y el instante en el que la carga abandona el dominio de resistencia.

En el pilar mixto estudiado, el perfil embebido permanece protegido por el hormigón circundante y conserva una parte significativa de la capacidad en las duraciones intermedias. La protección pasiva continua reduce notablemente las temperaturas a R240 y retrasa el tiempo hasta el fallo de la carga en estudio.

Los distintos cálculos son coherentes entre sí: todos apuntan a la misma pérdida de capacidad y al mismo rango de fallo. La verificación de la sección proporciona el estado detallado de tensiones y deformaciones para una carga. La curva de interacción es la vista de ingeniería preferida cuando se necesita un dominio de resistencia en un plano. La superficie de interacción proporciona el dominio biaxial global. La verificación por distancias proporciona un estado OK/KO rápido para varias cargas. Las curvas de rigidez muestran si la sección ha entrado en un régimen de fuerte degradación de la rigidez. El análisis del tiempo hasta el fallo proporciona finalmente un tiempo de exposición aproximado antes de que la carga ya no pueda soportarse. Cada vista tiene su propia fortaleza y, en conjunto, ofrecen una lectura coherente del comportamiento frente al fuego.