



Estudio del Comportamiento Ante Incendios de Paredes Entre Viviendas

Juan Ferrer Subirá
Director Técnico de Pixeling

ÍNDICE

- INTRODUCCIÓN
- INVESTIGACIÓN DE INCENDIOS
- NORMATIVA APLICABLE
- MÉTODO DE TRABAJO
 - BLOQUE 01: INVESTIGACIÓN DE INCENDIOS
 - BLOQUE 02: ANÁLISIS CONSTRUCTIVO
 - BLOQUE 03: SIMULACIÓN COMPUTACIONAL
 - BLOQUE 04: ENSAYOS A ESCALA REAL

INTRODUCCIÓN

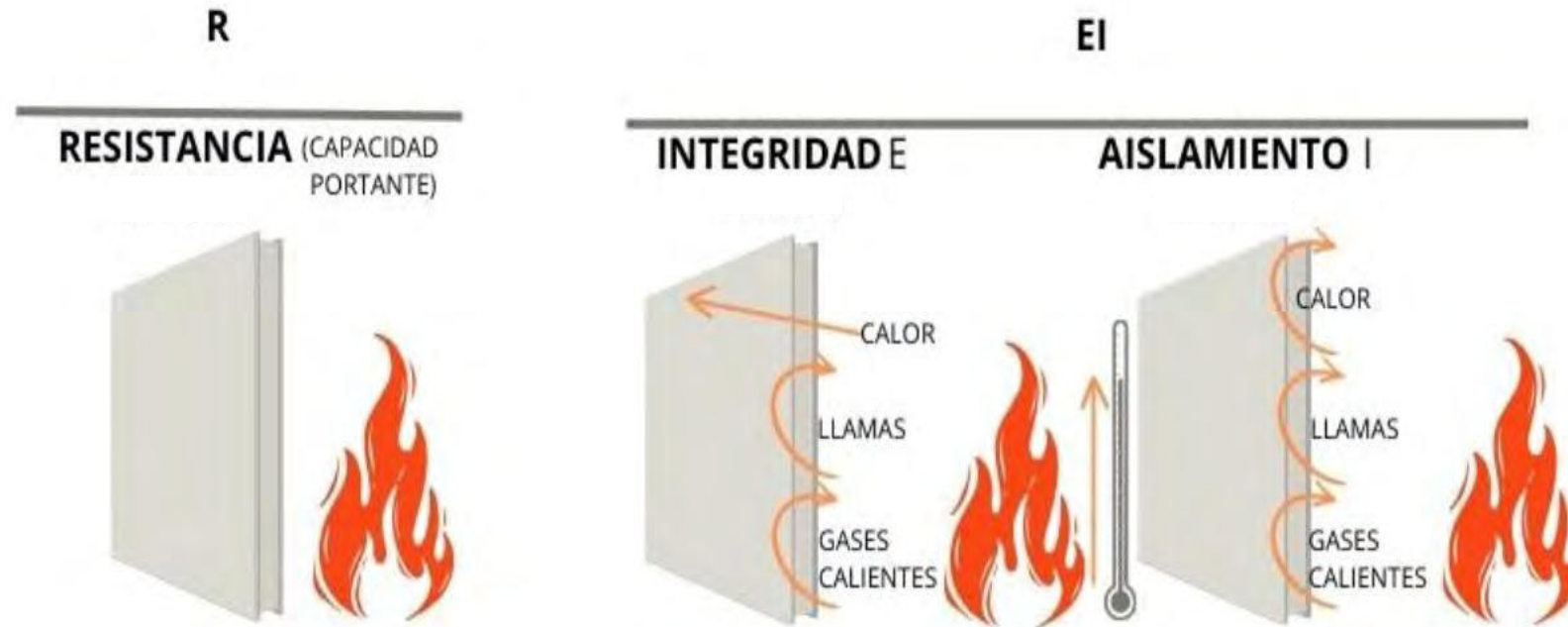
- La seguridad contra incendios es un aspecto esencial en edificios residenciales.
- Los tabiques separadores entre viviendas son clave para la compartimentación.
- La estrategia de actuación de Bomberos ha quedado en entredicho por la propagación de los incendios en los edificios.



INTRODUCCIÓN

El objetivo del estudio es comprobar el comportamiento de las diferentes soluciones de tabiquería entre viviendas y su relevancia. Evaluando las prestaciones de integridad (E) y aislamiento (I) como barreras para la propagación de un incendio en un edificio de viviendas.

¿QUÉ ES LA INTEGRIDAD Y EL AISLAMIENTO?



NORMATIVA APLICABLE

Se aplica el DB-SI del Código Técnico de la Edificación.

Tabla 1.1 del SI – 1 Propagación Interior _____

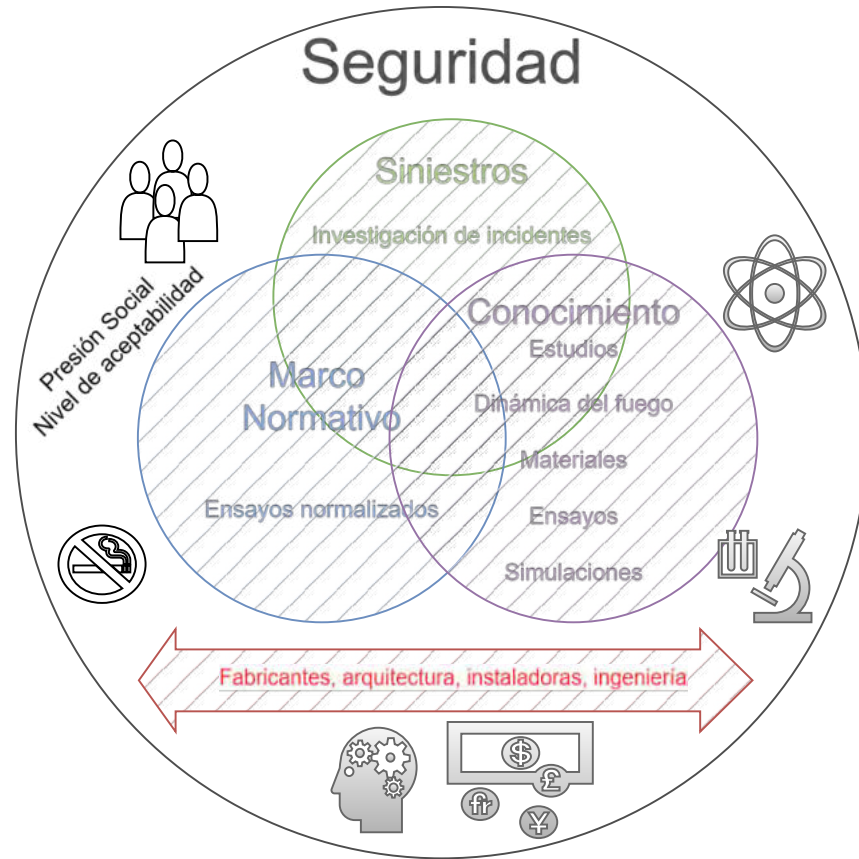
- Residencial Vivienda*
- La superficie construida de todo *sector de incendio* no debe exceder de 2.500 m².
 - Los elementos que separan viviendas entre sí deben ser al menos EI 60.

Tabla 1.2 del SI – 1 Propagación Interior _____

Tabla 1.2 Resistencia al fuego de las paredes, techos y puertas que delimitan sectores de incendio^{(1) (2)}

Elemento	Resistencia al fuego			
	Plantas bajo rasante	Plantas sobre rasante en edificio con <i>altura de evacuación</i> :		
		$h \leq 15 \text{ m}$	$15 < h \leq 28 \text{ m}$	$h > 28 \text{ m}$
Paredes y techos ⁽³⁾ que separan al sector considerado del resto del edificio, siendo su <i>uso previsto</i> : ⁽⁴⁾				
- Sector de riesgo mínimo en edificio de cualquier uso	(no se admite)	EI 120	EI 120	EI 120
- Residencial Vivienda, Residencial Público, Docente, Administrativo	EI 120	EI 60	EI 90	EI 120
- Comercial, Pública concurrencia, Hospitalario	EI 120 ⁽⁵⁾	EI 90	EI 120	EI 180
- Aparcamiento ⁽⁶⁾	EI 120 ⁽⁷⁾	EI 120	EI 120	EI 120
Puertas de paso entre sectores de incendio	EI ₂ t-C5 siendo t la mitad del tiempo de <i>resistencia al fuego</i> requerido a la pared en la que se encuentre, o bien la cuarta parte cuando el paso se realice a través de un <i>vestíbulo de independencia</i> y de dos puertas.			

MÉTODO DE TRABAJO



- **BLOQUE 01:** Investigación de incendios
- **BLOQUE 02:** Análisis del Sistema Constructivo.
- **BLOQUE 03:** Realización de simulaciones computacionales mediante la aplicación de PYROSIM.
- **BLOQUE 04:** Ensayos reales tanto a gran escala como en pruebas de laboratorio.

BLOQUE 1

INVESTIGACIÓN DE INCENDIOS

INVESTIGACIÓN DE INCENDIOS



La experiencia de inspeccionar un escenario de incendio real

INVESTIGACIÓN DE INCENDIOS



La experiencia de inspeccionar un escenario de incendio real

INVESTIGACIÓN DE INCENDIOS



La experiencia de inspeccionar un escenario de incendio real

BLOQUE 2

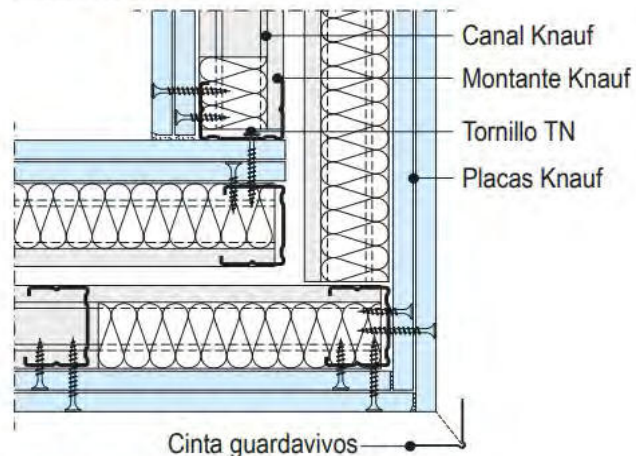
ANÁLISIS CONSTRUCTIVO

ALCANCE DEL ANÁLISIS

- Analizar los ensayos de resistencia al fuego en tabiques de yeso laminado.
- Estudiar el comportamiento de paredes divisorias en incendios.
- Evaluar la resistencia al fuego, propagación de calor y llamas.
- Analizar los materiales y su diseño.
- Valorar la importancia de la calidad y coordinación de la ejecución.

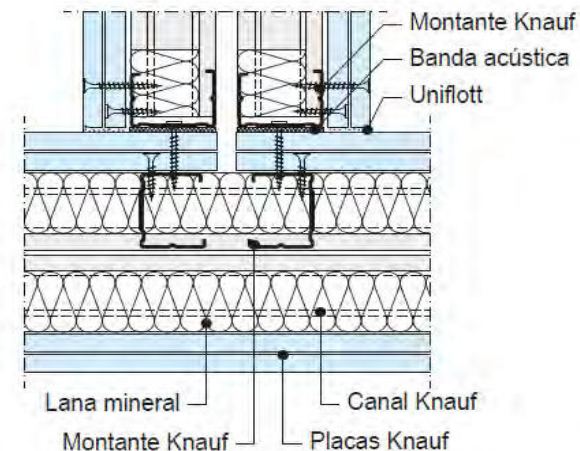
W115.es-D1 Esquina

Sección horizontal



W115.es-C1 Encuentro en T

Sección horizontal



SISTEMA DE YESO LAMINADO

Fallos típicos en ensayos

CLASIFICACIÓN	FALLOS MÁS COMUNES	EJEMPLOS TÍPICOS
EI 60	Juntas mal selladas, fijaciones débiles, aislamiento insuficiente	Fisuras verticales en juntas, desprendimiento de placa, perfiles transmiten calor
EI 90	Encuentros mal ejecutados, aislamiento desplazado o de baja densidad	Grieta en unión con forjado, fuga de gases en esquinas, el termopar supera límite por falta de lana
EI 120	Colapso del tabique, calor acumulado en perfiles y tornillos	Fisuras en cruz, caída de cara completa, puntos calientes en tornillos

Soluciones constructivas recomendadas

CLASIFICACIÓN	SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS	
EI 60	Placas de 15 mm + lana de roca	Sellados intumescentes, juntas escalonadas, tornillería adecuada.
EI 90	2 placas 15 mm + lana de roca (> 100 kg/m ³)	
EI 120	2-3 placas 15 mm + perfilería reforzada + lana > 120 kg/m ³	

COMPARATIVA YESO LAMINADO VS CERÁMICO

ASPECTO	TABIQUE CARTÓN YESO	TABIQUE CERÁMICO
Mecanismo de protección	Yeso con agua de cristalización (efecto endotérmico) + lana como aislamiento térmico.	Masa cerámica y espesor
Estabilidad mecánica en incendio (E)	Subestructura metálica y fijaciones; sensible a errores de montaje.	Buena estabilidad del muro cerámico, que soporta bien altas temperaturas con espesor suficiente.
Estanqueidad (E / paso de llamas y humos)	Se debe sellar correctamente juntas y encuentros → defectos pueden permitir paso de gases.	Juntas de mortero pueden fisurar, pero el comportamiento es robusto.
Aislamiento térmico (I)	Excelente con placas + lana; suele requerir menor espesor para un mismo nivel de aislamiento.	Depende de espesor y densidad; normalmente requiere mayor espesor para igualar el aislamiento.
Modos de fallo típicos	Fisuración y desprendimiento de placas.	Fisuración de revocos, caída de revestimientos y, a largo plazo, desconchado o rotura de piezas.
Sensibilidad a taladros e instalaciones	Muy alta: perforaciones o cajas mal protegidas pueden comprometer la clasificación EI.	Alta: rozas profundas y huecos grandes reducen sección resistente y aislamiento térmico.

BLOQUE 3

SIMULACIONES FDS


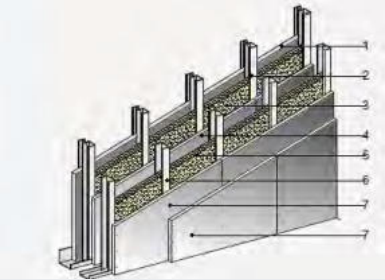
ESTUDIO PREVIO

- Se han establecido 3 líneas previas de trabajo:
 - Estado del arte del comportamiento al fuego de materiales (placas de yeso laminado y cerámicos)
 - Caracterización del incendio tipo de una vivienda (Ensayo de Dalmarnok)
 - Validación del modelo de simulación computacional
 - Tamaño de malla
 - Fiabilidad de resultados (temperatura)
 - Estabilidad del modelo para tiempos elevados de simulación
- Una vez validado el modelo se procede a caracterizar la curva de incendio en función de variables como la rotura de ventanas o degradación de las placas de yeso laminado.
- Finalmente se establecen y desarrollan los diferentes escenarios para su comparativa.

COMPORTAMIENTO DE LOS MATERIALES

Material	Densidad (ρ) [kg/m ³]	Calor Específico (cp) [J/kg·K]	Conductividad Térmica (λ) [W/m·K]
Aislamientos Típicos			
Lana Mineral (MW)	30 - 150	800 - 1000	0,031 – 0,040
Poliestireno Expandido (EPS)	15 - 30	1200 - 1500	0,036 – 0,045
Materiales Base			
Ladrillo Cerámico Perforado	600 - 1000	800 - 1000	0,20 – 0,50
Ladrillo Macizo	1600 - 2000	800 - 900	0,60 – 1,00
Placa de Yeso Laminado (PYL)	600 - 1000	850 - 1050	0,20 – 0,35
Mortero de Yeso	1000 - 1200	850 - 1000	0,35 – 0,50
Mortero de Cemento	1800 - 2200	800 - 1000	1,00 – 1,40

COMPORTAMIENTO DE LOS MATERIALES

	Material	Espesor	Densidad (ρ) [kg/m ³]	Calor Específico (c_p) [J/kg·K]	Conductividad Térmica (λ) [W/m·K]
	Enlucido de yeso	0,015	1000	0,84	0,3
	Ladrillo doble de fábrica	0,07	930	0,85	0,4375
	Enlucido de yeso	0,015	1000	0,84	0,3
	Doble Placa de yeso	0,015+0,015	1440	0,84	0,48
	Lana de roca	0,04	30	0,8	0,035
	Doble Placa de yeso	0,015+0,015	1440	0,84	0,48

COMPORTAMIENTO DE LOS MATERIALES

Un incendio afecta una pared de pladur principalmente **progresivamente**, ya que el yeso contiene agua que, al evaporarse, ralentiza la propagación del fuego y el calor. Sin embargo, la placa **se degrada**; el contacto con el fuego calcinará el yeso y, con el tiempo, la estructura puede colapsar, especialmente si el incendio es prolongado y a muy altas temperaturas.

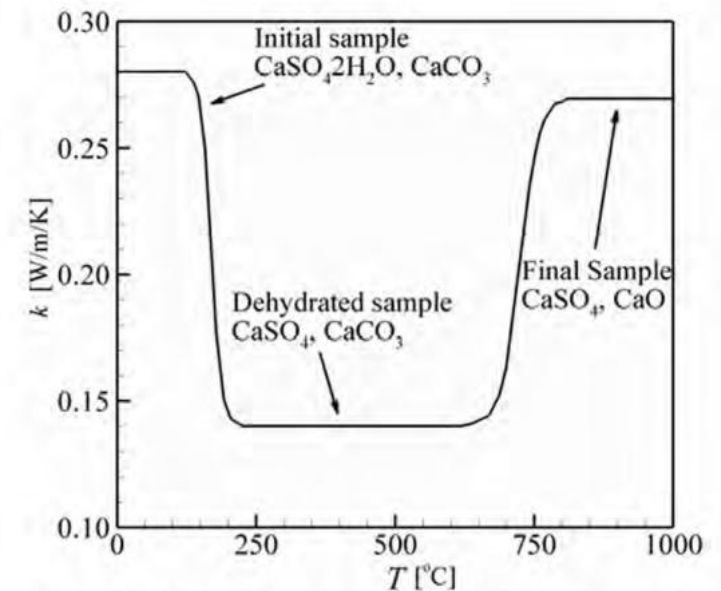
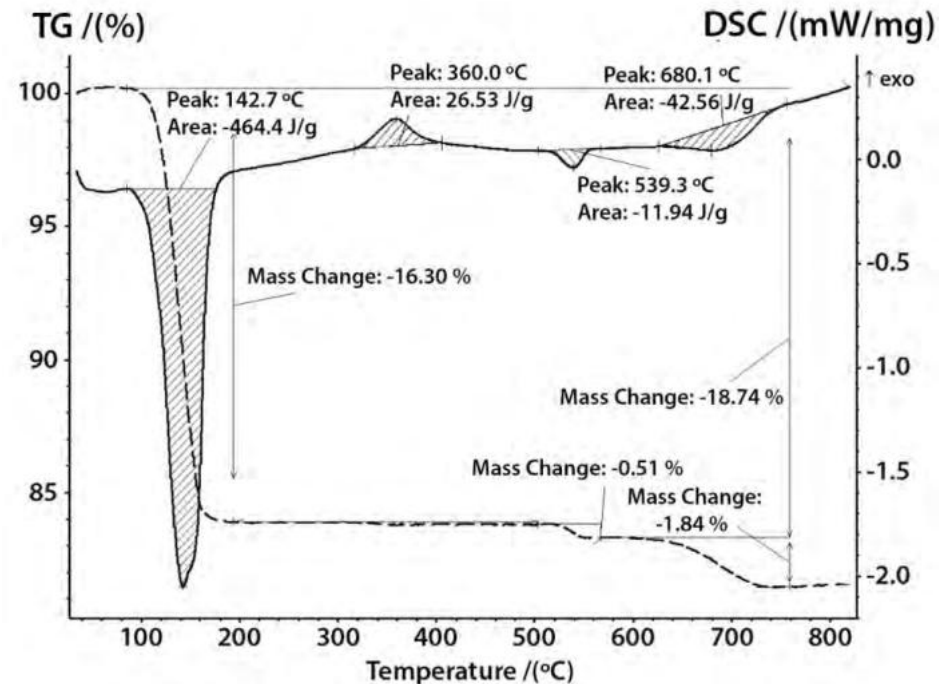


Figure 6 Thermal conductivity of the gypsum board as a function of temperature [10]

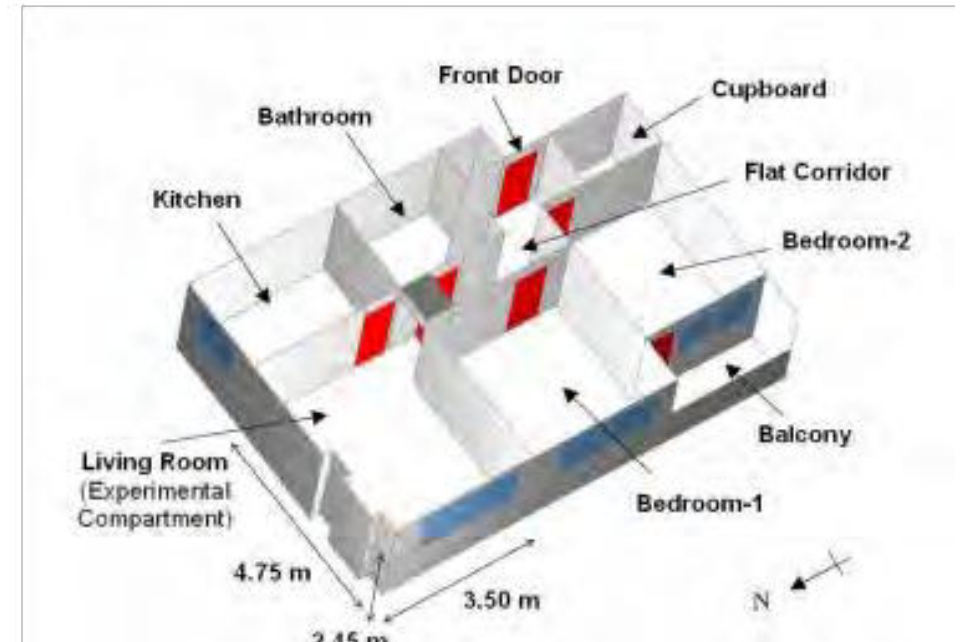
COMPORTAMIENTO DE LOS MATERIALES

- La **rotura de cristales** durante un incendio se produce principalmente por el **choque térmico** generado por la gran diferencia de temperatura entre la cara expuesta al fuego (caliente) y la cara protegida por el marco o el aire interior (más fría).
- El factor crítico no es tanto la temperatura de fusión del vidrio (que es muy alta, $\approx 1700^{\circ}\text{C}$), como la **diferencia de temperatura (ΔT)** que el material puede soportar antes de que las tensiones internas lo quiebren.

TIPO DE CRISTAL	DIFERENCIA DE TEMPERATURA SOPORTADA (ΔT)	RESISTENCIA AL FUEGO	OBSERVACIONES CLAVE
Vidrio Recocido o Estándar (Float)	30°C-40°C	Baja. Se romperá muy rápidamente en un incendio.	Es el vidrio más común en ventanas no tratadas. Sus bordes suelen ser la zona de inicio de la fisura.
Vidrio Laminado	Similar al vidrio recocido	Media-Baja.	Aunque se rompa, la capa intermedia (PVB) puede mantener los fragmentos unidos, manteniendo la integridad por un corto tiempo, pero no el aislamiento térmico.
Vidrio Templado (Térmicamente Reforzado)	2000°C-250°C	Media. Rompe a una temperatura muy superior al recocido.	La rotura es en pequeños fragmentos inofensivos, pero una vez roto, pierde inmediatamente su función de barrera.
Vidrio Cortafuego (E, EW o EI)	Muy Alta	Alta. Diseñado para resistir.	Utiliza capas intumescentes o múltiples capas para aislar. El tipo EI mantiene la temperatura de la cara no expuesta por debajo de 140°C durante un tiempo definido (ej. 30, 60 o 90 min).

CARACTERIZACIÓN DEL INCENDIO

La caracterización se basa en el Ensayo de Dalmarnok (Glasgow 2006)



CARACTERIZACIÓN DEL INCENDIO

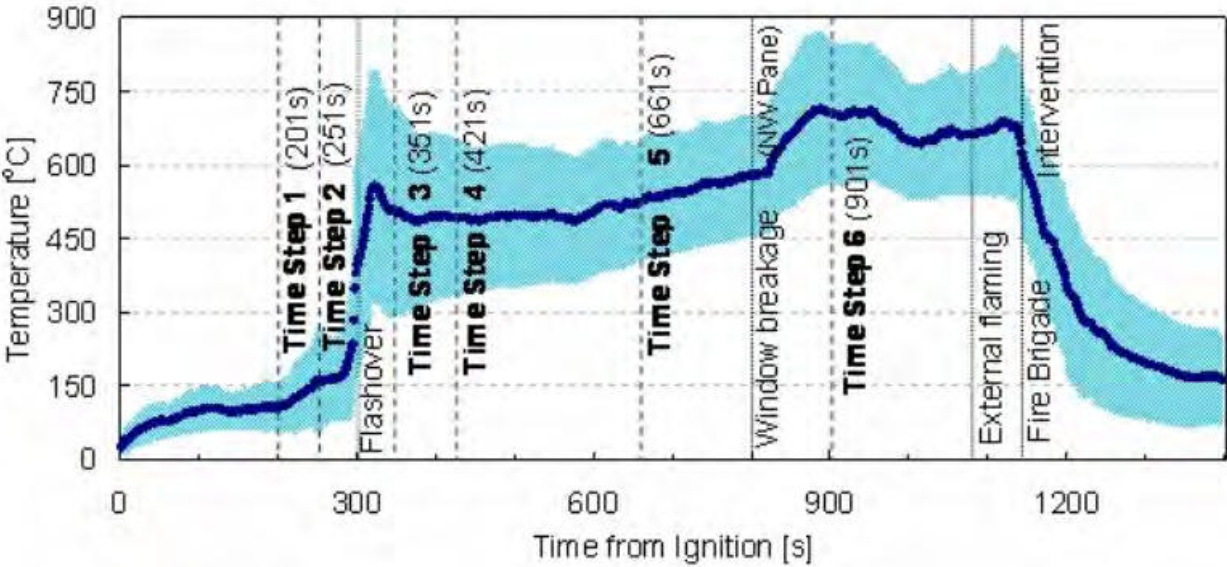
Incendio a escala real en escenario ambientado y elementos de medición.



CARACTERIZACIÓN DEL INCENDIO

Resultados obtenidos en el Ensayo:

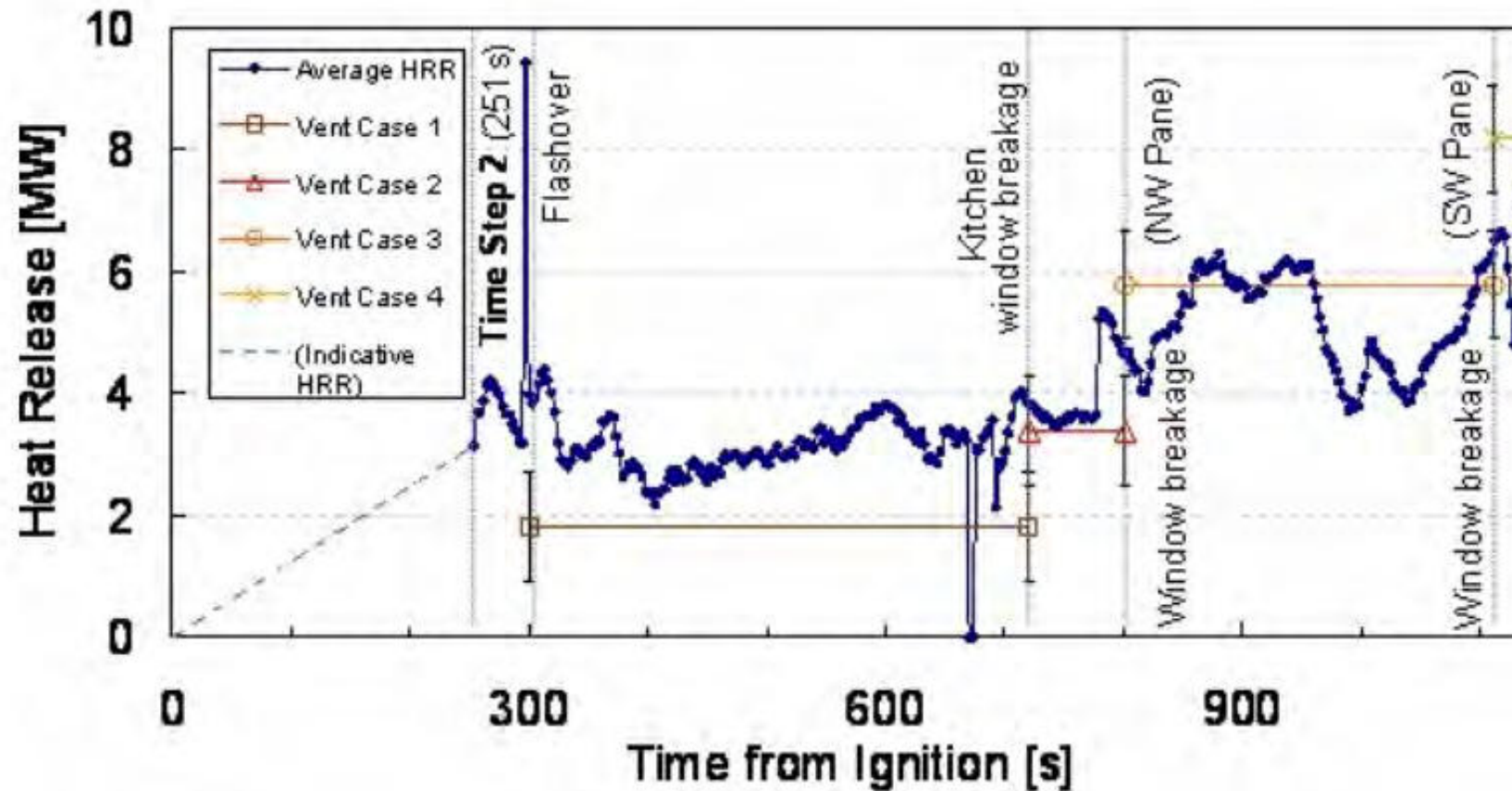
- Temperatura
- Cronología de eventos



Principales acontecimientos observados	Hora (h:m:s)	Tiempo desde la ignición (s)
<i>Periodo de crecimiento</i>		
Ignición	12:23:00	0
Los cojines se encienden	12:23:09	9
Se ve humo en el pasillo principal	12:26:06	186
La estantería se incendia	12:27:35	275
<i>Periodo de combustión instantánea</i>		
El fuego envuelve la estantería	12:28:00	300
Las llamas se proyectan hacia el techo plano del pasillo, baja visibilidad en el pasillo principal	12:28:15	315
Ignición de lámpara de papel y papeles de mesa	12:28:23	323
<i>Periodo posterior al flashover</i>		
Rompimiento de la ventana de la cocina	12:35:00	720
Rotura forzada de la ventana del compartimento (Panel noroeste)	12:36:21	801
Llamas externas	12:41:00	1080
Rotura de la ventana del compartimento (panel SW)	12:41:31	1111
Los bomberos entran y comienzan a extinguir el incendio.	12:42:00	1140
Principalmente humo	12:45:00	1320

CARACTERIZACIÓN DEL INCENDIO

Resultados obtenidos en el Ensayo : Tasa de liberación de calor (HRR)

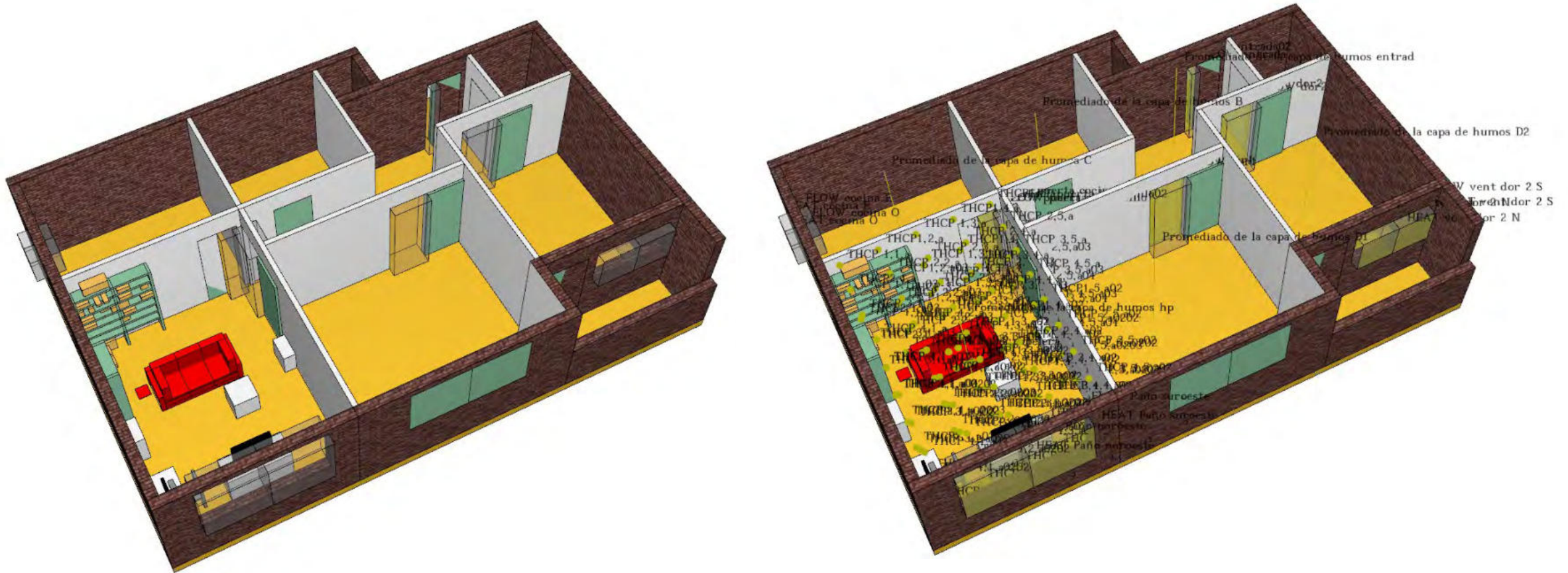


Caracterización de un incendio de vivienda

Ensayo de Dalmarnok

VALIDACIÓN DEL MODELO

Generación de los modelos FDS



VALIDACIÓN DEL MODELO COMPUTACIONAL

Definición:

El **HRR** es una medida crítica en la ingeniería de protección contra incendios. Indica la **potencia calorífica** liberada por un material o un conjunto de materiales (como una estantería con productos) durante un incendio. Se mide típicamente en **kilovatios (kW)** o **megavatios (MW)**.

TIPO DE MUEBLE	MATERIAL PRINCIPAL	HRR TÍPICO (KW) - RANGO APROXIMADO	OBSERVACIONES CLAVE
Silla de Oficina/Despacho	Plástico, Espuma (Poliuretano), Tela	200 kW a 500 kW (Pico)	El material de la espuma y el tapizado son los principales contribuyentes al rápido aumento del HRR.
Silla de Comedor	Madera maciza (o aglomerado/MDF)	50 kW a 200 kW (Pico)	Depende de la presencia de acolchado o tapizado; la madera arde más lentamente que la espuma.
Mesa de Madera	Madera maciza, Aglomerado, Melamina	200 kW a 500 kW (Pico)	El HRR se ve limitado por la superficie de la madera expuesta; los modelos grandes y gruesos tardan más en alcanzar el pico.
Mobiliario de Salón (Sillón)	Espuma, Tapizado pesado	1 MW a 2 MW (Pico)	Se utiliza como referencia para el fuego de diseño debido a su alto contenido de plástico/espuma.

Validación del modelo de simulación computacional

Desarrollo del modelo

VALIDACIÓN DEL MODELO COMPUTACIONAL

Factores que inciden directamente en la tasa de liberación de calor o HRR, muy relevantes en incendios confinados como el de una vivienda.

Carga de fuego

ESCENARIO DE DISEÑO	TIPO DE MOBILIARIO (EJEMPLO)	HRRPUA TÍPICO (kw/m2)
Bajo a Medio	Mesas y sillas de comedor de madera maciza o metal (sin tapizado) en baja densidad.	150 a 300
Medio a Alto	Mobiliario de salón estándar, incluyendo sofás, sillones y sillas tapizadas con espumas modernas.	400 a 700
Alto/Severo	Almacenamiento denso o materiales altamente inflamables (ej. plásticos) o cuando se diseña para el fuego más rápido posible .	750 a 1000+

Teoría del consumo de oxígeno

El valor universalmente aceptado para esta relación es:

$$\Delta h_c / r_0 \approx 13,1 \text{ MJ por kg de } O_2$$

Donde:

- Δh_c es el calor liberado por la combustión.
- r_0 es la masa de oxígeno consumida.

Esta constante es la base del funcionamiento del **Cono Calorímetro** y otros calorímetros de consumo de oxígeno, que son herramientas estándar para medir el **HRR** de materiales en la ingeniería de protección contra incendios.

$$HRR(kW) \approx (E/r_0) \cdot (\text{Consumo de } O_2)$$

Donde Consumo de O_2 es la velocidad a la que se consume el oxígeno, medida mediante analizadores de gases en la chimenea de extracción.

Ecuación de Kawagoe (HRRmax en compartimentos cerrados con áreas de ventilación)

La relación más conocida y utilizada para estimar el HRR_{max} en función de las aberturas es la **fórmula empírica de Kawagoe** (o una variante simplificada), que relaciona la potencia máxima con el área de ventilación.

La fórmula original relaciona la masa de combustible quemado (m_{max}) con las aberturas. Al transformar la masa quemada en potencia térmica (HRR), se obtiene la siguiente expresión simplificada:

$$HRR_{max}(kW) \approx 1500 \cdot A_v \cdot \sqrt{H}$$

Donde:

- HRR_{max} es la Tasa Máxima de Liberación de Calor, medida en **kilovatios (kW)**.
- A_v es el **área total de las aberturas** (puertas y ventanas que suministran aire), medida en **metros cuadrados (m²)**.
- H es la **altura de la abertura** que controla el flujo de entrada de aire, medida en **metros (m)**.
- 1500 es una **constante empírica** que incorpora el calor de combustión por unidad de oxígeno.

La fórmula aplica estrictamente cuando el incendio está **limitado por ventilación**. Esto ocurre típicamente después de que el fuego ha crecido lo suficiente como para agotar el oxígeno interior.

- **Fase de Control por Combustible:** Al principio, el fuego crece libremente, limitado únicamente por la geometría y la composición del combustible. Un aumento en la ventilación **no** afecta significativamente el HRRmax en esta fase.
- **Fase de Control por Ventilación:** El fuego ha consumido la mayor parte del oxígeno disponible. La pirólisis de los combustibles continúa, pero los gases no pueden quemarse completamente. El HRRmax queda **directamente limitado** por la cantidad de oxígeno que entra por las aberturas.

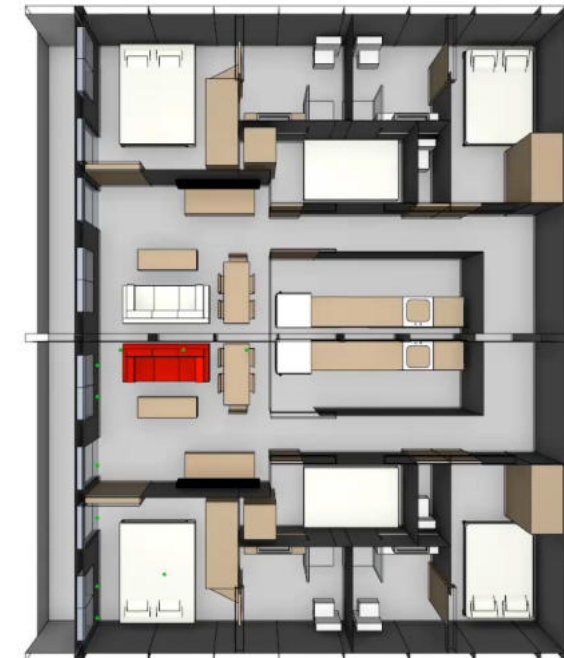
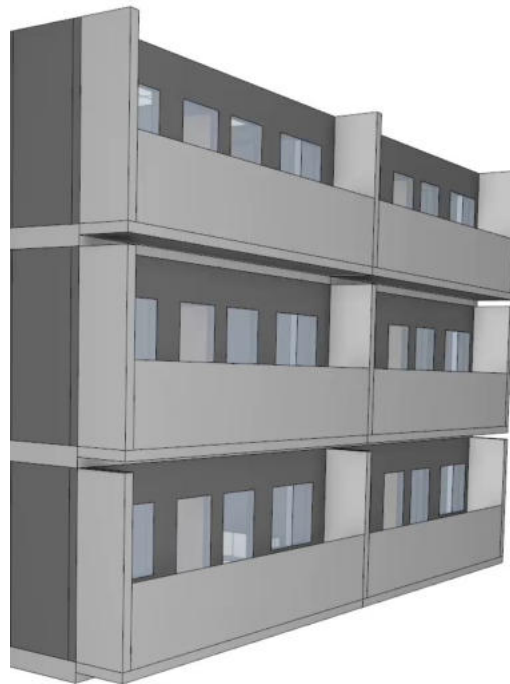
Aumento de Aberturas = Aumento de Oxígeno = Aumento de HRRmax

En esta fase, la apertura repentina de una puerta o ventana puede introducir una gran cantidad de oxígeno, provocando un rápido aumento del HRR y el fenómeno conocido como **flashover inducido por ventilación** o **backdraft**.

Pared de ladrillo 70mm enlucido con yeso



Pared de PLY de doble panel en cada extremo con lana de roca



Resultados de simulación computacional

Desarrollo del modelo

PRIMERAS CONCLUSIONES



El ladrillo proporciona una sectorización robusta, masiva y con un fallo "noble" (lento y predecible).



El PYL es una solución eficaz (cumple la descripción EI-60), pero es altamente sensible a la calidad de la instalación (juntas, sellados, pasos).



Las simulaciones FDS muestran un mayor comportamiento inicial en aislamiento (I) del PYL, aunque, en el momento límite, el fallo es abrupto, a diferencia de la curva lenta del ladrillo.



Un fallo de Integridad (E) por mala ejecución en PYL es el escenario más peligroso, anulando la sectorización en minutos.

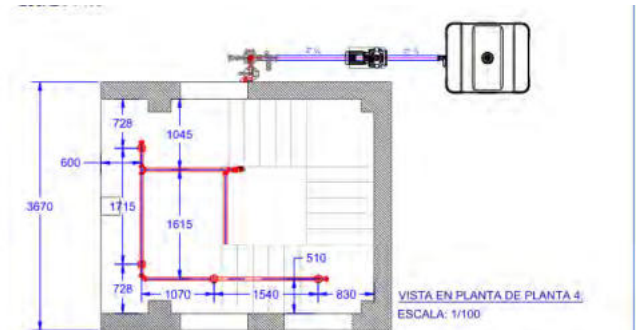
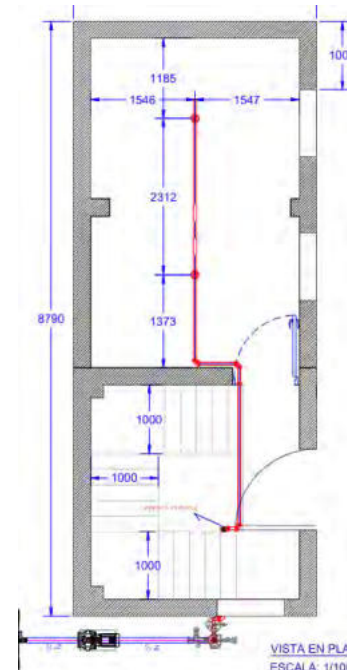


Ambos materiales son resistentes al fuego, pero se comportan de manera diferente.

BLOQUE 4

ENSAYO A ESCALA REAL

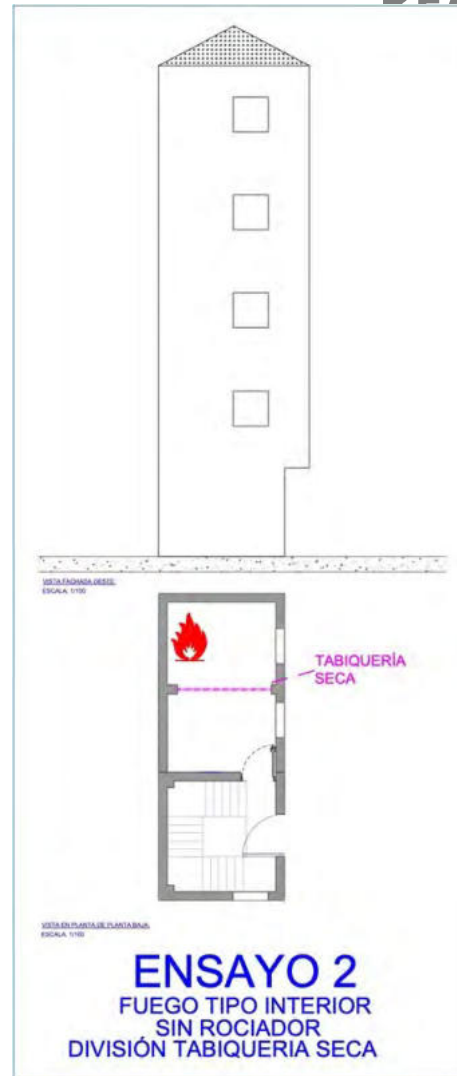
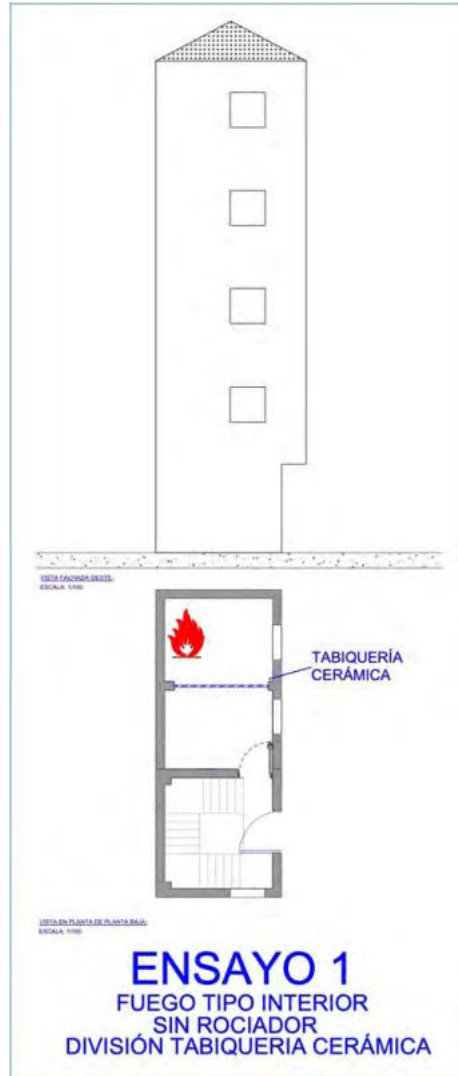
ESCENARIO DE LAS PRUEBAS



ENSAYOS A ESCALA REAL

Definición de los ensayos.

1. Objetivos de investigación.
2. Descripción del escenario experimental.
3. Carga de fuego.
4. Condiciones iniciales.
5. Instrumentación y adquisición de datos.
6. Metodología del ensayo
7. Seguridad





pixeling
ingeniería de seguridad

www.pixeling.org