JENSEN HUGHES
FIRE & RISK

Control del humo y modelización avanzada de incendios y movimiento de personas

Gabriele Vigne, PhD
Director | Advanced Technology

Bizkaia
foru aldundia
diputación foral

SFPE España

OPRA Observatorio de Prevención de Riesgos y Accidentes

Avances científicos de la protección contra incendios en el siglo XXI - Getxo (Bizkaia) | 22 de octubre de 2026

Sobre mí

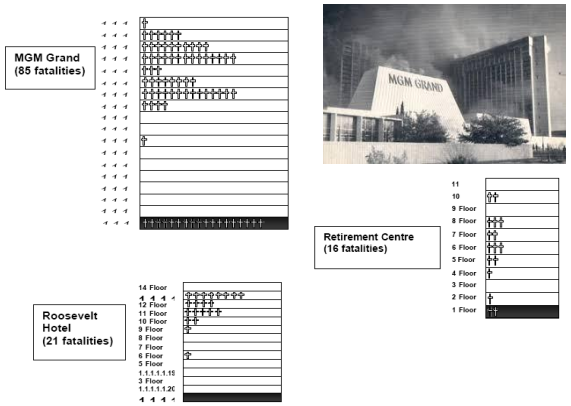
- Licenciado en Ingeniería Mecánica por la Universidad de Padua y Doctor en Mecánica de Fluidos por la Universidad de Jaén (España), con la tesis “Fluid Dynamics of Smoke from Enclosure Fires”, en colaboración con el Imperial College de Londres y la Universidad Pontificia Comillas de Madrid.
- Ha trabajado en proyectos internacionales y ha residido en España, Italia, Reino Unido y Países Bajos. Es el referente español e italiano del NIST para FDS y Smokeview, e instructor internacional certificado de FDS (Fire Dynamics Simulator). Ha sido profesor de Modelización del Comportamiento Humano y Evacuación en la Universidad Pontificia Comillas (ICAI) y en la Universidad Europea (UEM) de Madrid.
- Forma parte de la Junta Directiva del Capítulo Español de la SFPE y es revisor de numerosas revistas científicas internacionales.
- Miembro del grupo europeo de coordinación de la SFPE (ECCG). Desde 2016 forma parte del Subcomité de Supervisión de Normas (SCSO) y del Subcomité del Handbook (SCHD) de la SFPE, y colabora con el grupo de planificación estratégica a largo plazo y el grupo de trabajo de modelización de incendios. Forma parte del consejo editorial asesor de la revista SFPE Europe y es editor de la revista Ingenieria de Seguridad Contra Incendio de SFPE España.
- En 2017 fue designado perito experto por la asociación de víctimas del incendio de la Torre Grenfell en Londres para analizar las causas del incendio y cómo podría haberse evitado.
- En 2024 fue nombrado Fellow de la SFPE.



Índice

- Incendio y humo
  - Control de humo
  - ¿Que es el humo?
- Herramientas de Modelización
  - Cálculos manuales
  - Modelos de zona
  - Incertidumbre en los modelos de zona
  - Modelos CFD
  - La visibilidad e incertidumbre en el modelado CFD
- Los modelos de Evacuación
- Ejemplos de proyectos internacionales donde fue crucial el uso de simulaciones avanzadas de humo y evacuación

Incendio y humo



El humo representa uno de los mayores riesgos de muerte en incendios en espacios confinados.

Las estadísticas de incendios muestran que la mayoría de las muertes se deben a la inhalación de humo y gases tóxicos.

- España (2010-2024): el 56,4 % de las personas fallecidas en incendios murió por inhalación de humo.
- EE. UU.: más del 50 % de los fallecimientos pueden atribuirse a la inhalación de humo (partículas) y gases tóxicos.
- Reino Unido: el 35,5 % de las muertes en incendios se debió a la inhalación de humo.

Año	Fallecidos por humo o gases tóxicos	Total de fallecidos por incendios y explosiones	Porcentaje por humo o gases
2010	67	192	34,9 %
2011	56	173	32,4 %
2012	77	170	45,3 %
2013	58	132	43,9 %
2014	96	162	59,3 %
2015	90	143	62,9 %
2016	111	175	63,4 %
2017	96	212	45,3 %
2018	72	123	58,5 %
2019	99	165	60,0 %
2020	93	164	56,7 %
2021	129	204	63,2 %
2022	159	235	67,7 %
2023	176	249	70,7 %
2024	162	234	69,2 %



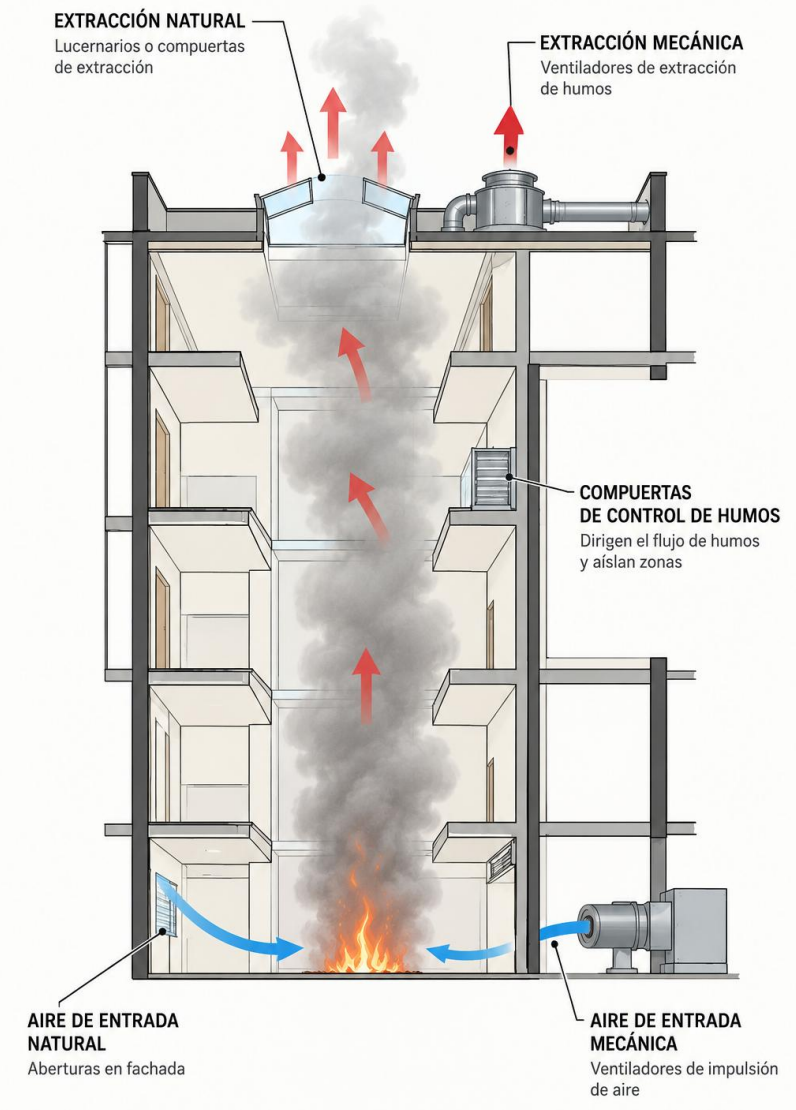
Necesidad de “controlar el humo”

El humo producido por los incendios es responsable de la mayoría de las muertes en edificios.

Se hace entonces necesario “**controlar el humo**”

Científicos e ingenieros han desarrollado modelos de producción de humo para que los profesionales de la seguridad contra incendios puedan diseñar sistemas de control de humos, para cumplir diversos objetivos:

- Seguridad de las personas: irrenunciable
- Intervención de los bomberos
- Limitación de daños materiales
- Reducción de la interrupción de la actividad
- Protección del medio ambiente
- Etc.



¿Pero qué es el humo?

«Partículas sólidas y líquidas y gases en suspensión que se generan cuando un material experimenta pirólisis o combustión, junto con el aire arrastrado o mezclado de otro modo con dichos productos».

Ecuaciones sencillas de combustión

p. ej., acetileno

$$2C_2H_2 + 5O_2 \rightarrow 4CO_2 + 2H_2O$$

suponen una combustión completa, algo poco frecuente

en realidad, puede contener:

- partículas (hollín)
- combustible sin quemar
- monóxido de carbono
- otros gases narcóticos, como HCN
- gases irritantes, como SO2, NH3, HF y HCl

La mayoría de las partículas sólidas presentes en el humo se generan como consecuencia de una combustión incompleta.

Mientras que los productos de una combustión completa son gases estables, vapor de agua y dióxido de carbono, las partículas generadas por una combustión incompleta siguen siendo combustibles.

Por este motivo, el humo también puede ser combustible.

¿Qué es el humo?

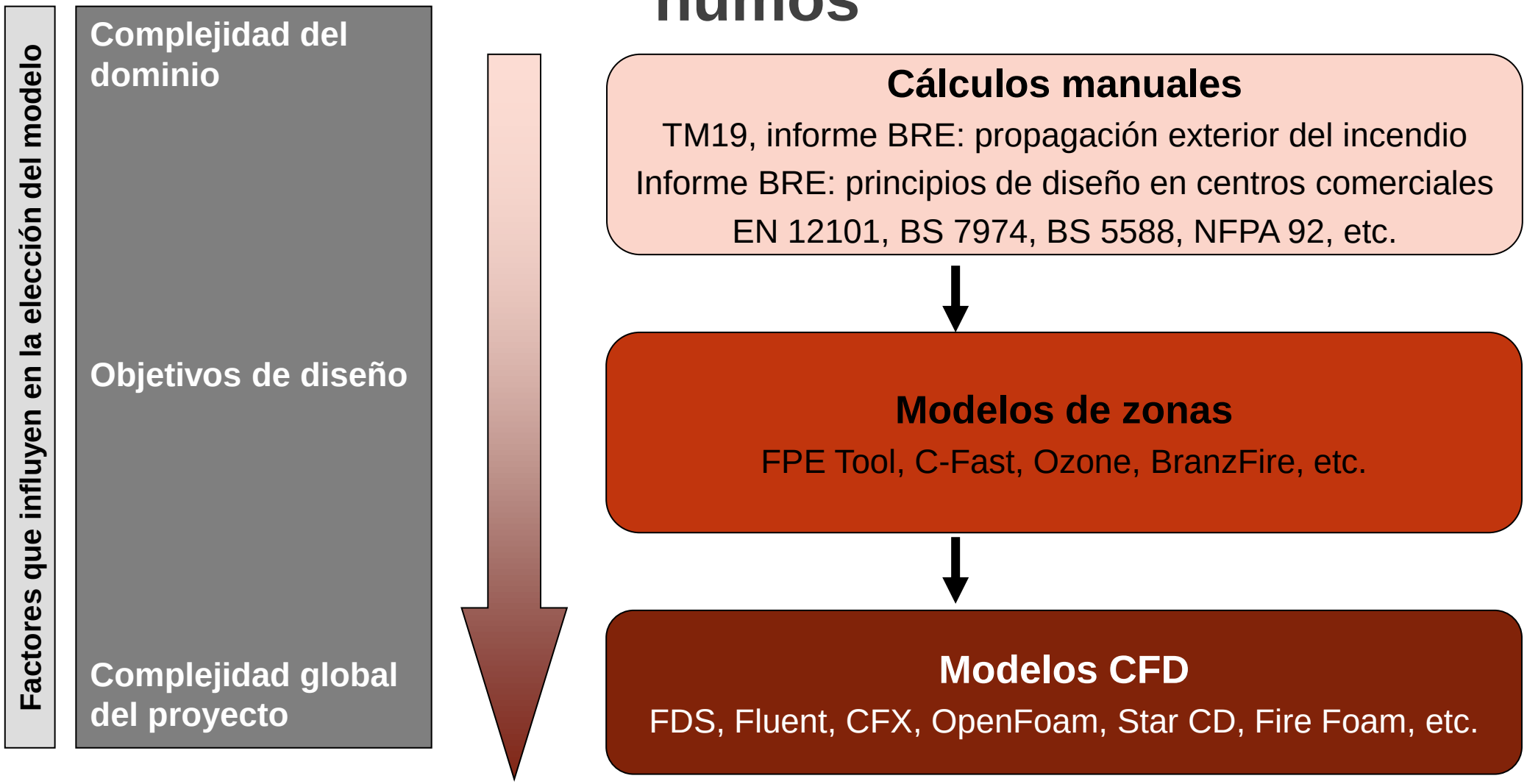
Depende de numerosas variables

- condiciones de ventilación: aporte de oxígeno
  - p. ej., llama oxiacetilénica
- tipo de combustión
  - con llama o sin llama (latente)
  - relacionado con otros factores
- flujo de calor radiante incidente
  - más calor aumenta la velocidad de combustión
- naturaleza del combustible
- orientación del combustible
  - factores como superficie, acceso al oxígeno y calor

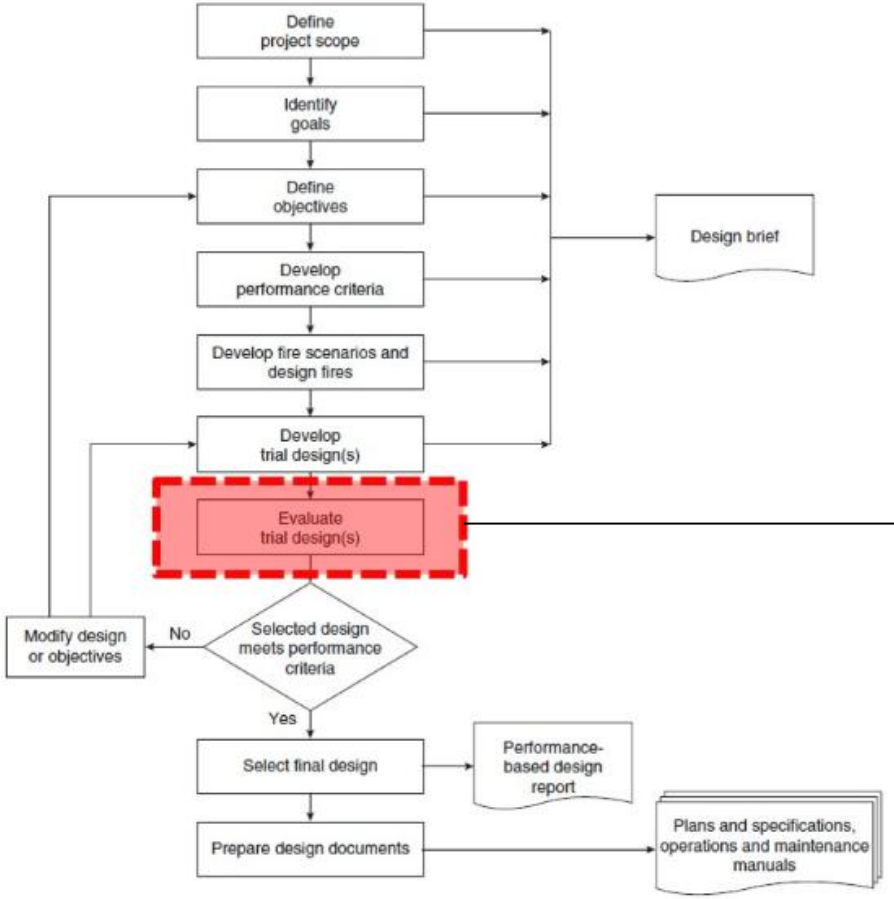
- arrastre de aire
  - al desplazarse, el humo se mezcla con aire fresco en la interfaz
    - cuando el penacho asciende desde el incendio
    - cuando el humo se desplaza bajo los techos
    - cuando el humo se propaga por el edificio

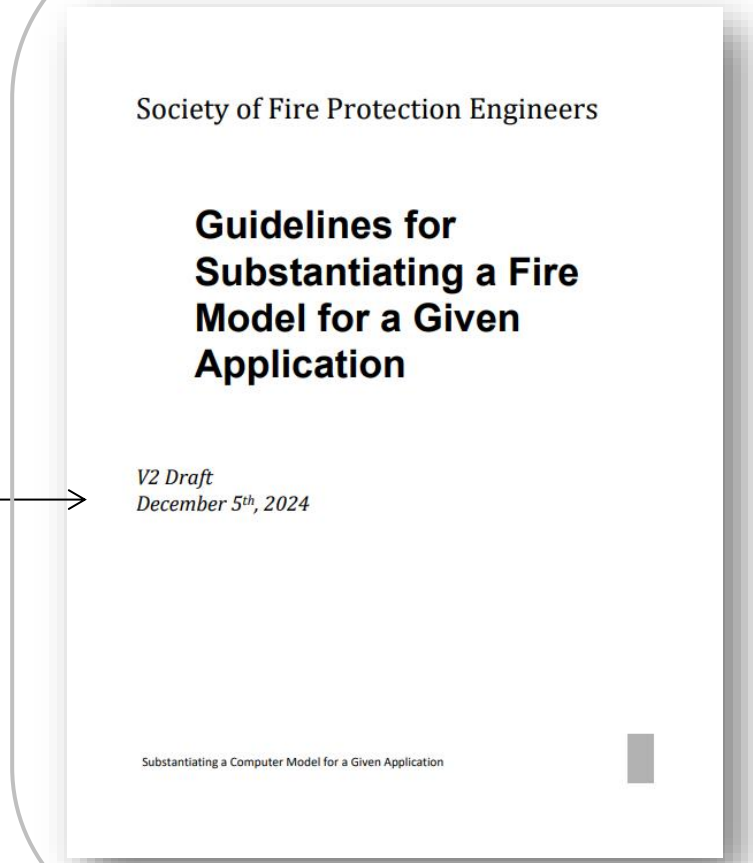
- el volumen total de «humo» aumenta a medida que se desplaza y se extiende

Herramientas para diseñar un sistema de control de humos



Modelización de incendios y humos

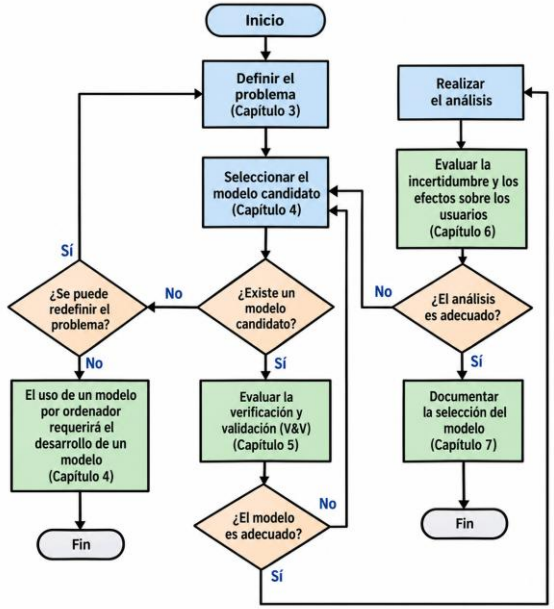



Society of Fire Protection Engineers

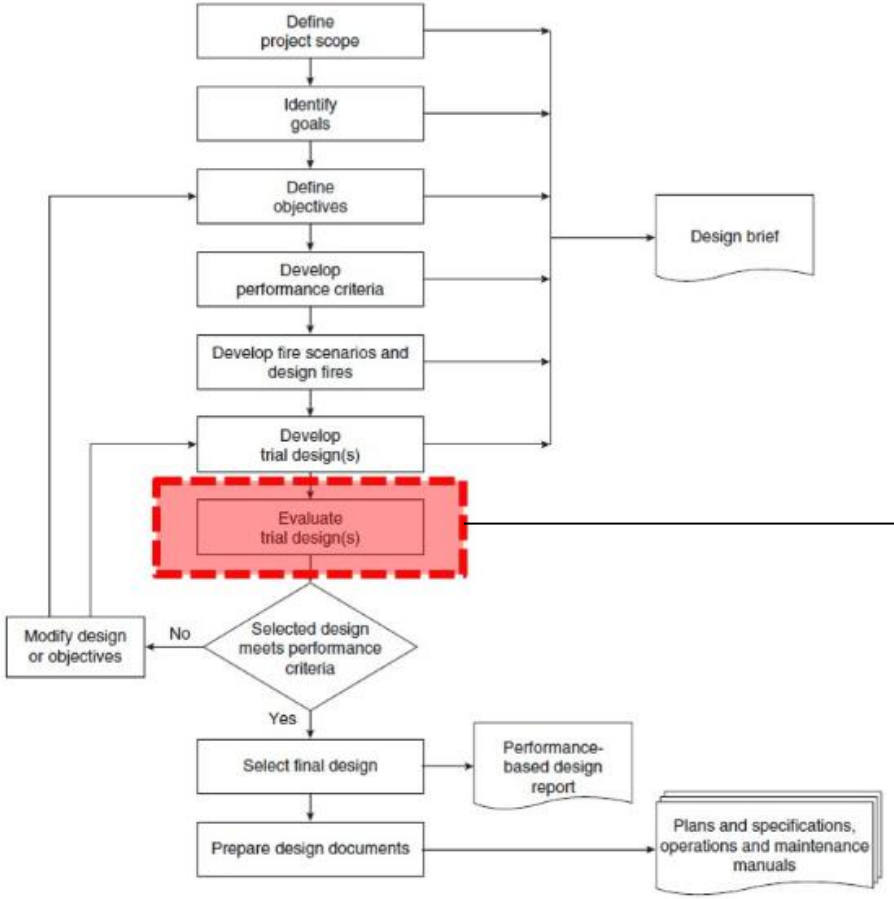
Guidelines for Substantiating a Fire Model for a Given Application

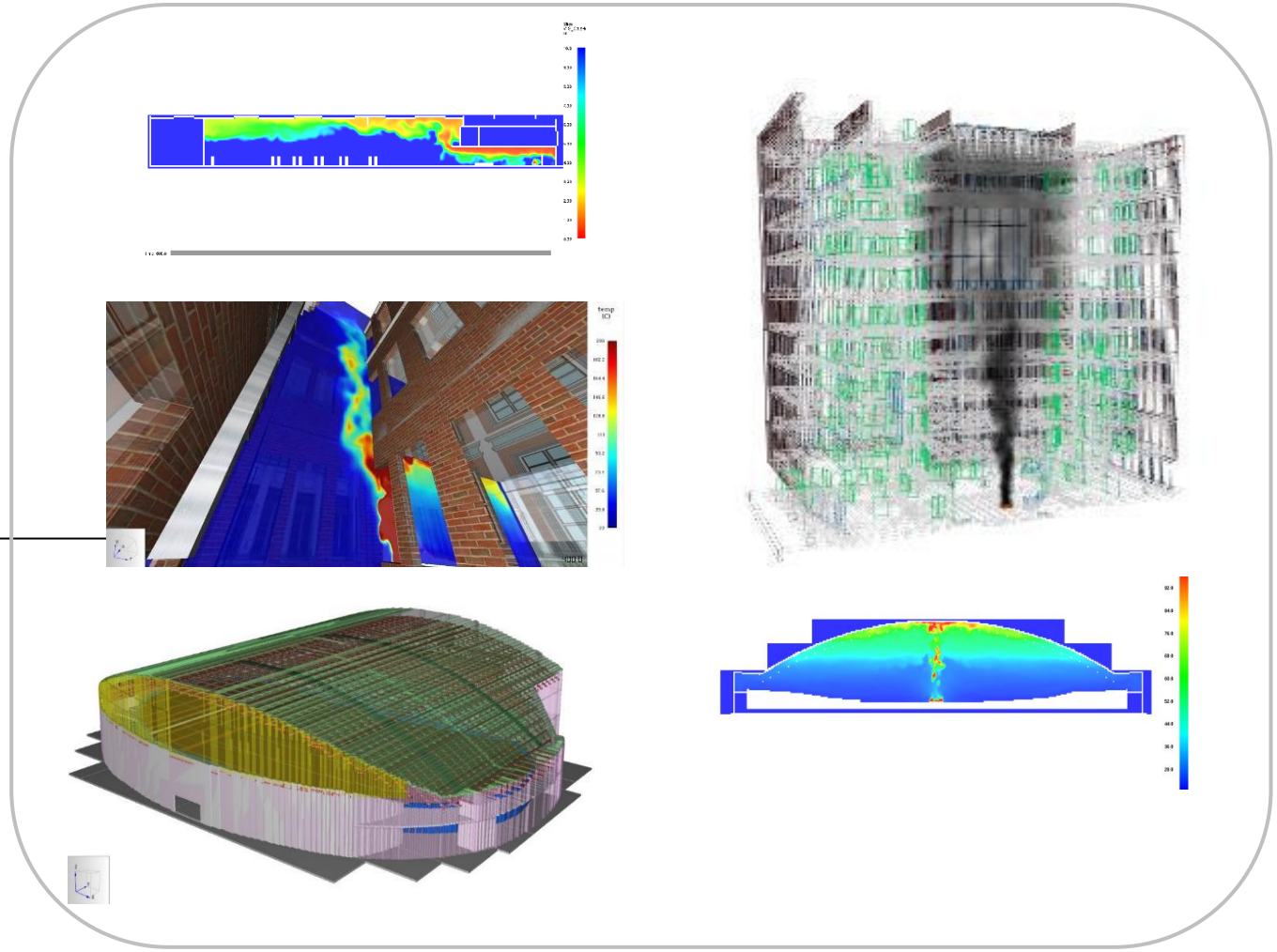
V2 Draft
December 5th, 2024

Substantiating a Computer Model for a Given Application



Modelización de incendios y humos





Cálculos manuales

Problema

- Evacuación por una galería de un centro comercial.
- Posible incendio en un local comercial con escaparate hacia la galería.

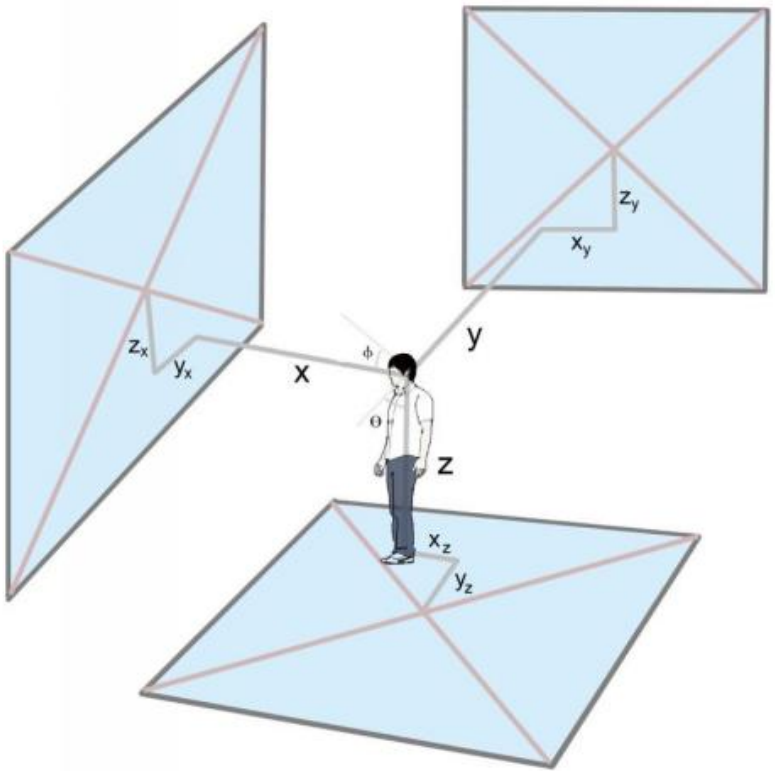
Objetivo:

- Estimar cuándo se alcanzan condiciones no admisibles por radiación térmica.
- Determinar la anchura recomendada de la galería.
- ¿Cómo se puede resolver?



Cálculos manuales

- El problema puede resolverse mediante la ecuación del factor de configuración.
- Distancia mínima necesaria para mantener condiciones admisibles con una radiación máxima tolerable (p. ej., 2,5 kW/m²).



donde:

σ = constante de Stefan-Boltzmann

T = temperatura absoluta

α y β = ángulos entre el vector radial r y las áreas infinitesimales dF1 de la superficie radiante y dF2 de un receptor situado en el origen

$$dQ = \sigma T^4 \cos\alpha \frac{\cos\beta}{\pi r^2} \frac{dF1}{dF2}$$

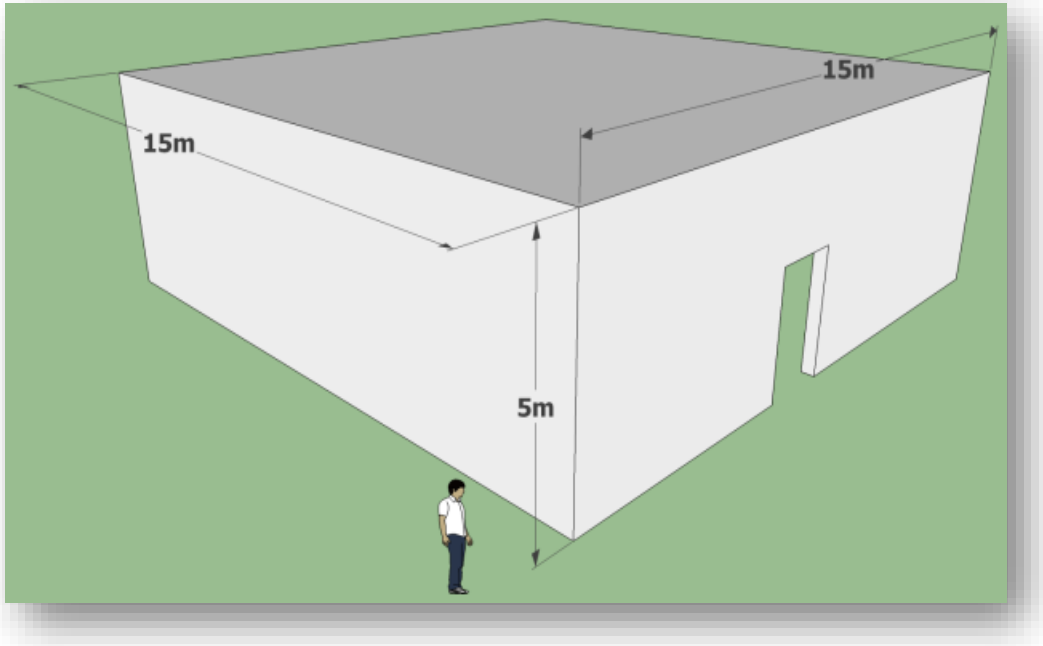
Modelos de zonas

Problema

- Evaluación del control de humos en un recinto pequeño con ventilación natural por cubierta.

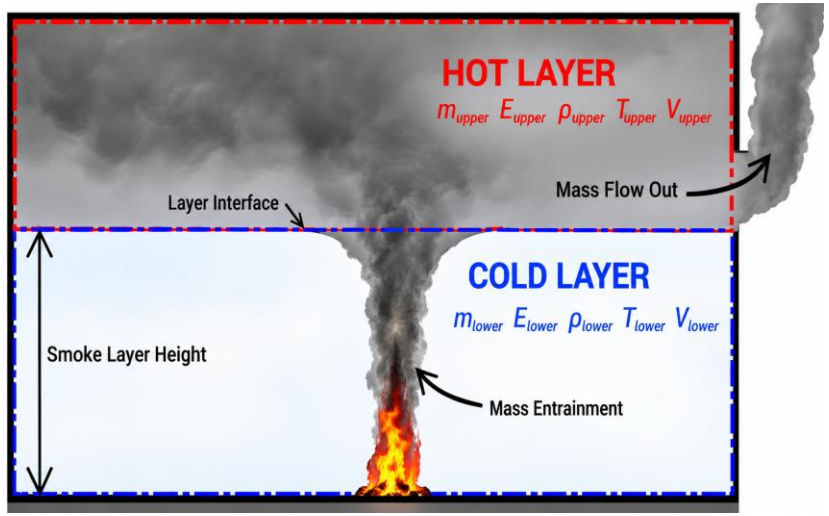
Objetivo:

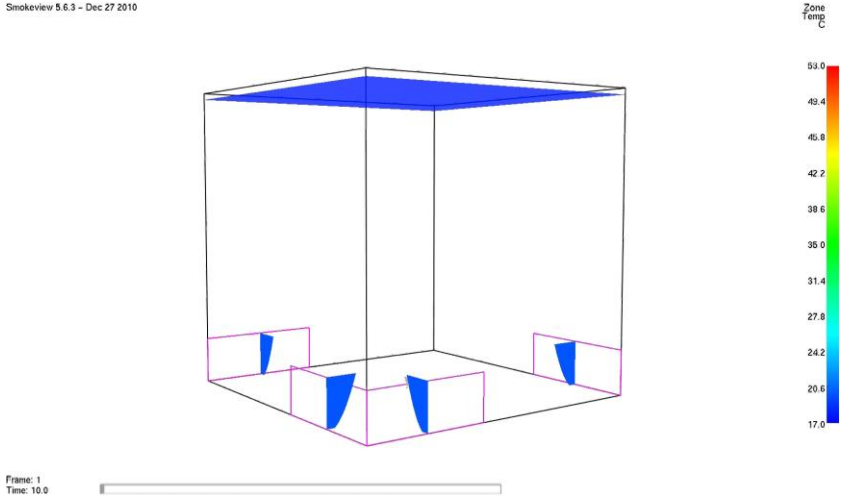
- Estimar la altura de la capa de humo.
- Estimar la temperatura media de la capa de humo.
- ¿Cómo se puede resolver el problema?



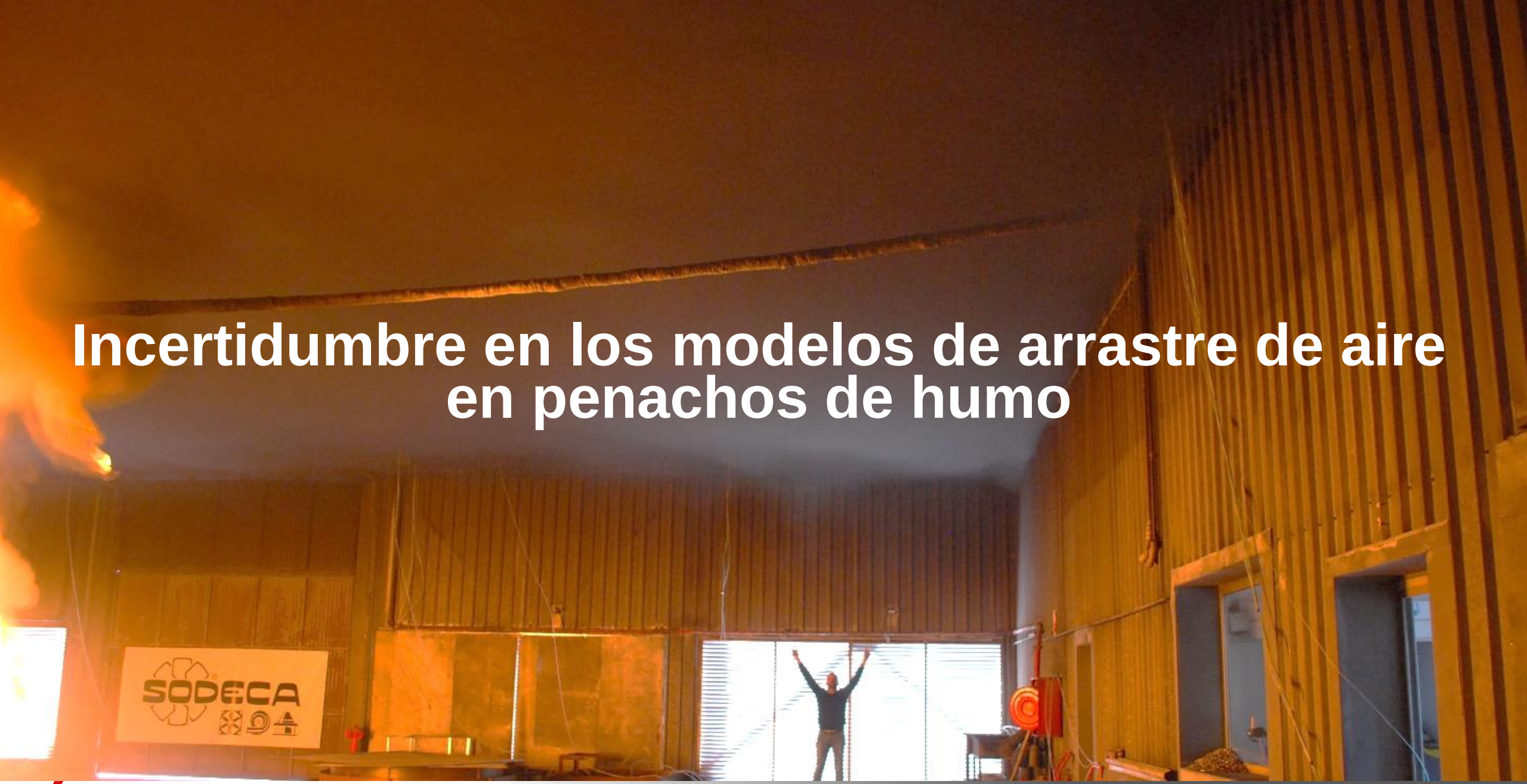
Modelos de zonas

- El problema puede resolverse mediante un modelo de zonas.
- El recinto se divide en dos capas uniformes: una relativamente caliente y otra relativamente fría.
- Se puede calcular la posición (altura) de la interfaz entre ambas capas.
- También se puede calcular la temperatura media de la capa de humo.





Incertidumbre en los modelos de arrastre de aire en penachos de humo

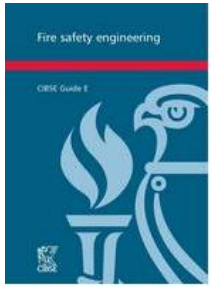


Modelos de arrastre de aire en penachos de humo

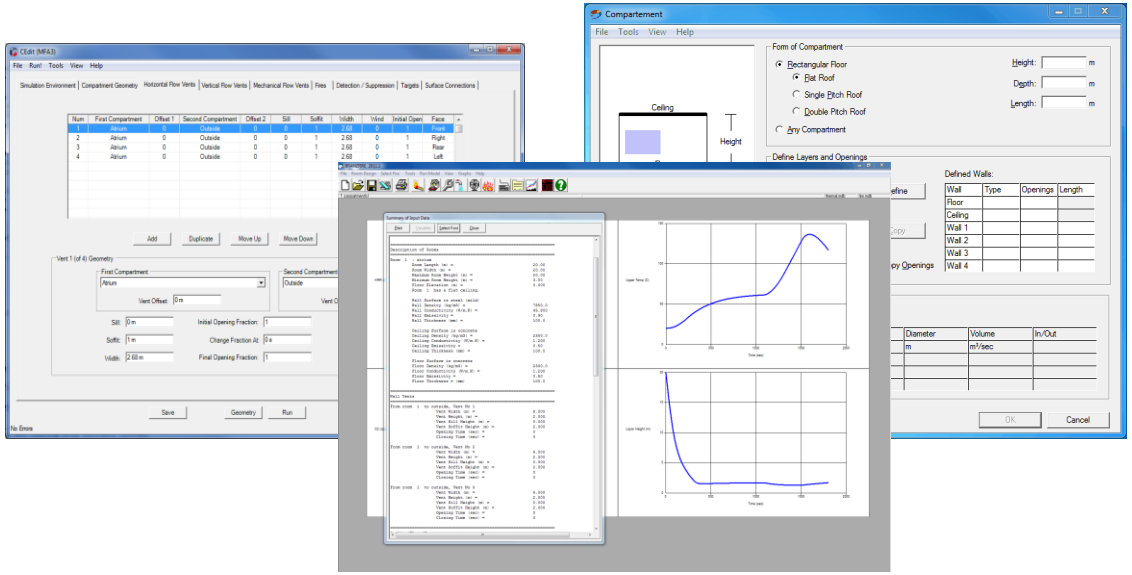
Norma o guía de diseño	Tipo	País de origen	Correlaciones de arrastre en penachos (apartado del artículo)
NFPA 92 [47]	norma nacional	EE. UU.	Heskestad (3.2.4)
EN 12101-5 [48]	norma internacional	UE	Thomas (3.2.1) y Heskestad (3.2.4)
TM19 [49]	guía de diseño	Reino Unido	Heskestad (3.2.4), Thomas (3.2.1) como alternativa
NBS S21-208-1 [50]	norma nacional	Bélgica	Thomas (3.2.1)
BRE 368 [51]	guía de diseño	Europa	Thomas (3.2.1), Zukoski (3.2.2)
BS 5588-7 [52]	guía de diseño	Reino Unido	Remite a BS EN 12101-5 [48]
BS 9999:2017 [53]	norma nacional	Reino Unido	Remite a BS EN 12101-5 [48]
AS 1668.3-2001 [54]	norma nacional	Australia	Thomas (3.2.1)
Handbook of Smoke Control Eng. [2]	guía de diseño	EE. UU.	Heskestad (3.2.4)











Modelo	Autor	País	Correlaciones de arrastre en penachos (apartado de la tesis)
CFAST [60]	NIST	EE. UU.	Heskestad (3.2.4), McCaffrey (3.2.3) — eliminado en v7.0.0. (2015).
Ozone [61]	Universidad de Lieja	Bélgica	Thomas (3.2.1), Zukoski (3.2.2), McCaffrey (3.2.3), Heskestad (3.2.4).
BRANZFIRE [62]	Branz	Nueva Zelanda	McCaffrey (3.2.3), Delichatsios.
B-RISK [63]	Branz	Nueva Zelanda	McCaffrey (3.2.3), Heskestad (3.2.4).

Correlaciones de arrastre en penachos

Penacho de Thomas

$$\dot{m}_p = 0.043\ \rho_c {r_b}^{\frac{5}{2}} \left(\frac{2g\Theta}{T_\infty}\right)^{\frac{1}{2}}, \qquad \dot{m}_p = 0.188\ \mathrm{P}\ z^{3/2}$$

Penacho de Zukoski

$$\dot{m}_p = 0.21 \left(\frac{\rho_\infty^2 g}{c_p\ T_\infty}\right)^{1/3} \dot{Q}^{1/3} z^{5/3} \qquad \dot{m}_p = 0.071\ \dot{Q}^{1/3} (z)^{5/3}$$

Penacho de McCaffrey

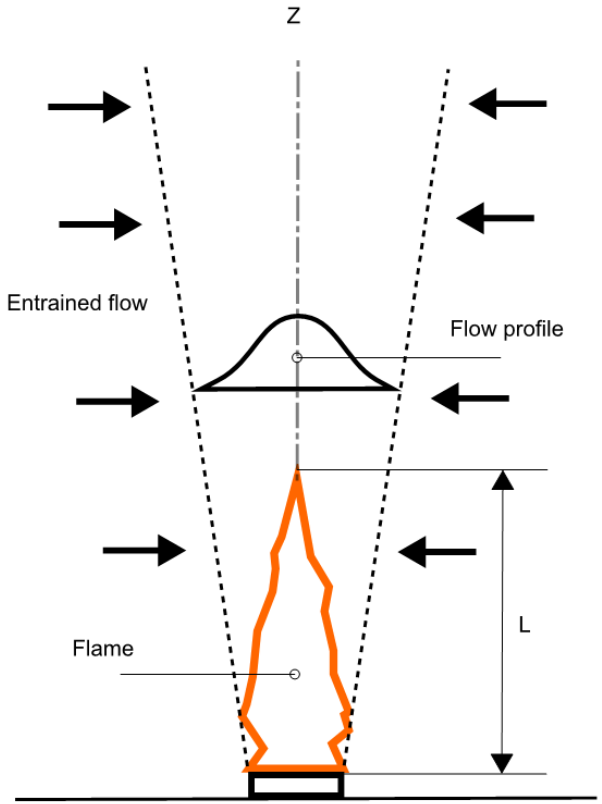
$$\dot{m}_p = 0.011\ \dot{Q} \left(\frac{z}{\dot{Q}^{0.4}}\right)^{0.566} \text{for } 0 < \frac{z}{\dot{Q}^{0.4}} < 0.08\,.$$

$$\dot{m}_p = 0.026\ \dot{Q} \left(\frac{z}{\dot{Q}^{0.4}}\right)^{0.909} \text{for } 0.08 < \frac{z}{\dot{Q}^{0.4}} < 0.20\,.$$

$$\dot{m}_p = 0.124\ \dot{Q} \left(\frac{z}{\dot{Q}^{0.4}}\right)^{1.895} \text{for } 0.20 < \frac{z}{\dot{Q}^{0.4}}\,.$$

Penacho de Heskestad

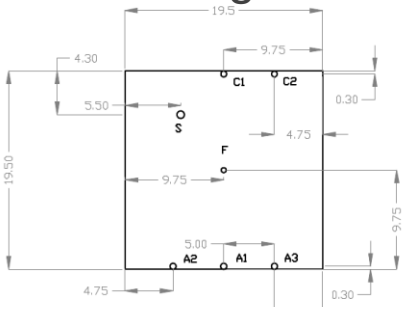
$$\dot{m}_p = 0.071\ \dot{Q}_c^{1/3} (z - z_0)^{5/3} + 1.92\ 10^{-3} \dot{Q}_c$$

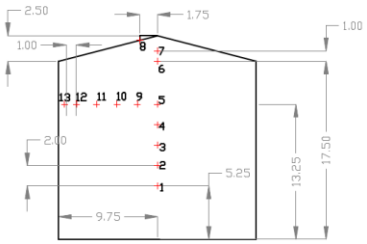


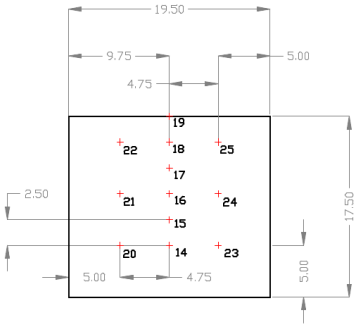
Approach	$\dot{Q}$ (total)	$\dot{Q}_c$ (convective)
Zukoski	YES	NO
McCaffrey	YES	NO
Heskestad	NO*	YES
Thomas	NO**	NO**

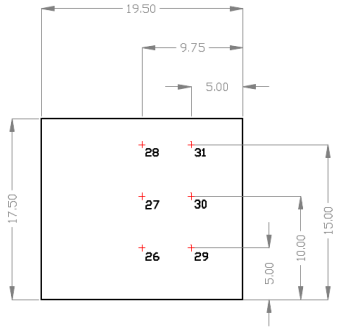
Validación de los métodos numéricos

Se realizaron ensayos de incendio en un recinto de gran volumen es el Atrio de Fuego del Centro Tecnológico del Metal (CTM), en Murcia (España).

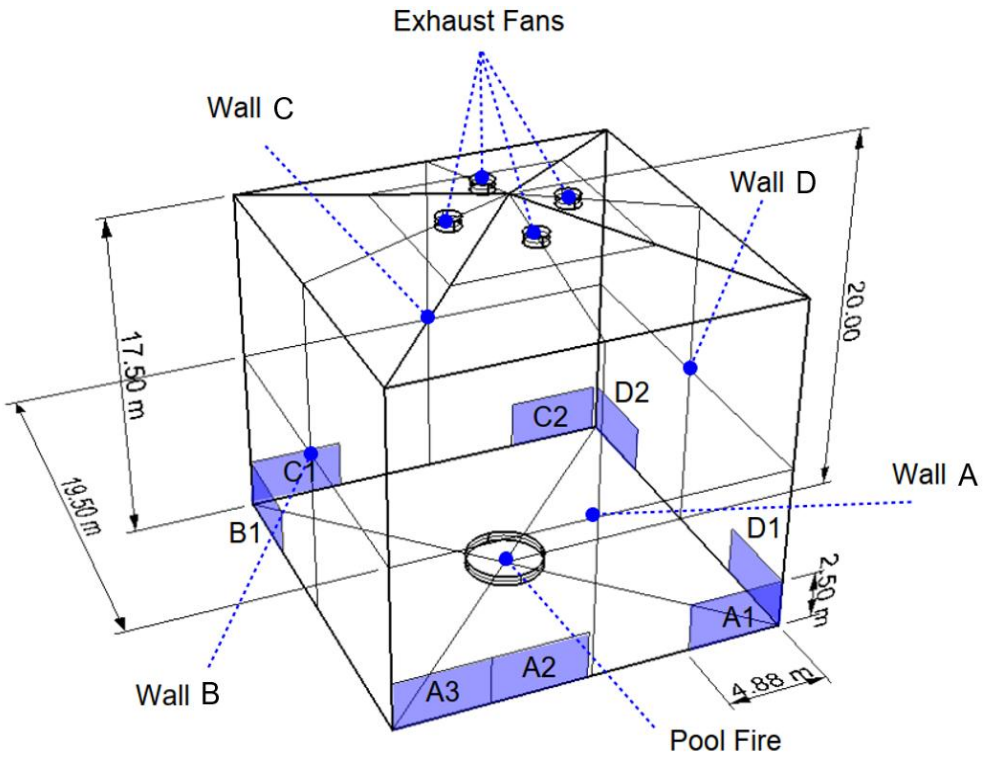


















Ensayos de incendio

Parámetro	#M1	#M2	#M3
Diámetro de la bandeja (m)	0.92	0.92	0.92
Superficie de la bandeja (m²)	0.665	0.665	0.665
Volumen de combustible (l)	44	52	52
Duración de la combustión (s)	837	883	1094
Caudal de extracción (m³/s)	15.2	15.2	15.2
Temperatura (ºC)	16.7	28.9	27.5
Presión (mbar)	1018	1008	1007
Tasa media de liberación de calor calculada (MW)	1.58	1.77	1.43
Aberturas abiertas	A1,A3,C1,C2	A1,A3,C1,C2	A1,A3,C1,C2
Superficie libre de las aberturas abiertas (m²)	48.8 (4x12.2)	48.8 (4x12.2)	48.8 (4x12.2)
HRRPUA (kW/m²)	2377	2661	2150

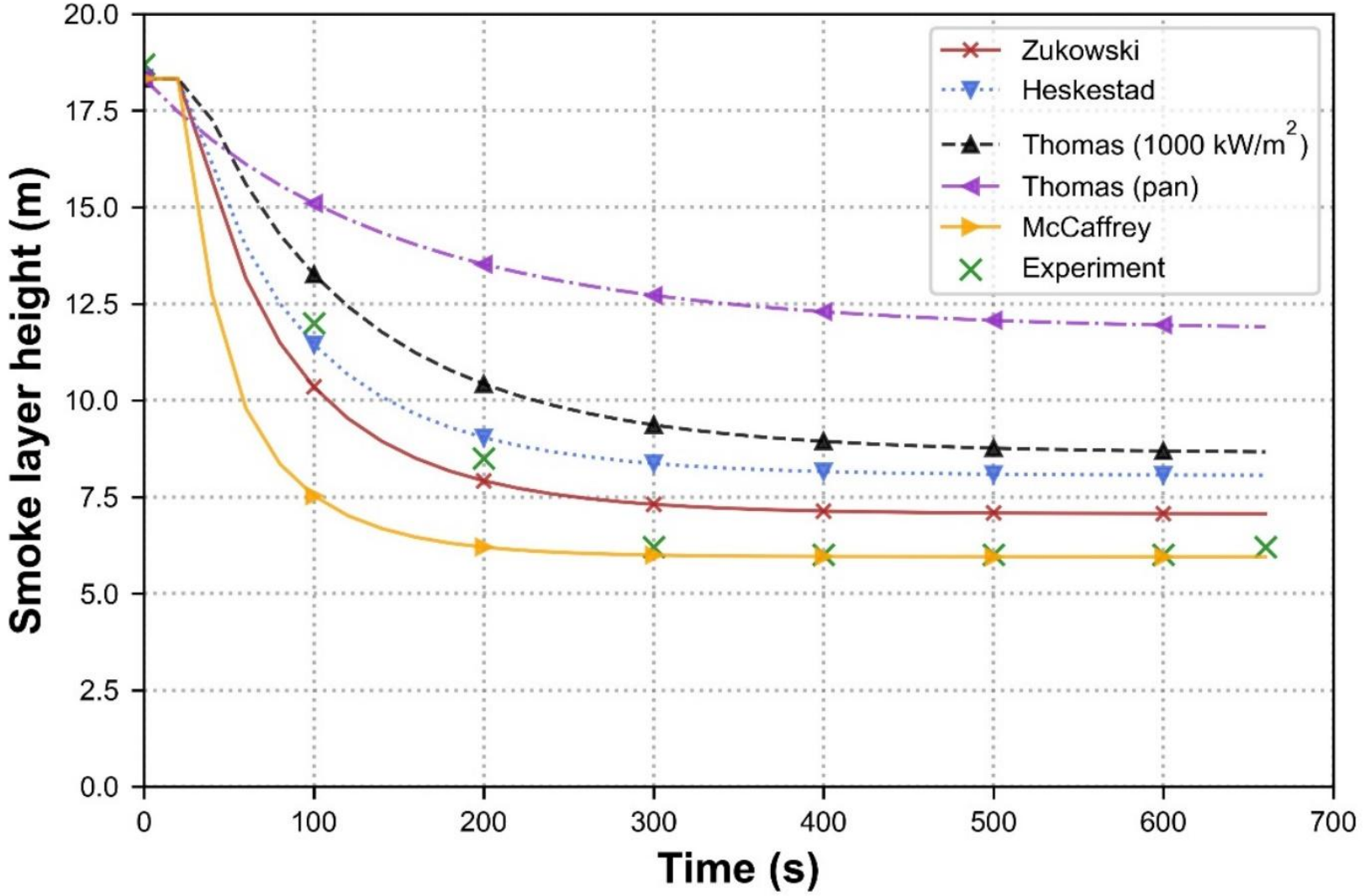
Parámetro	#G1	#G2	#G3
Diámetro de la bandeja (m)	1.17	0.92	1.17
Volumen de combustible (l)	36.5	28.8	36.5
Duración de la combustión (s)	647	708	671
Caudal de extracción (m³/s)	18.3	18.3	18.3
Temperatura (ºC)	18	20.1	18
Presión (mbar)	1016	1016	1016
Tasa media de liberación de calor calculada (MW)	2.30	1.70	2.30
Aberturas abiertas	A1,A3,C1,C2	A1,C1	A1,A3,C1,C5
Superficie libre de las aberturas abiertas (m²)	48.8 (4x12.2)	48.8 (4x12.2)	48.8 (4x12.2)
HRRPUA (kW/m²)	2199	2559	2199







Resultados



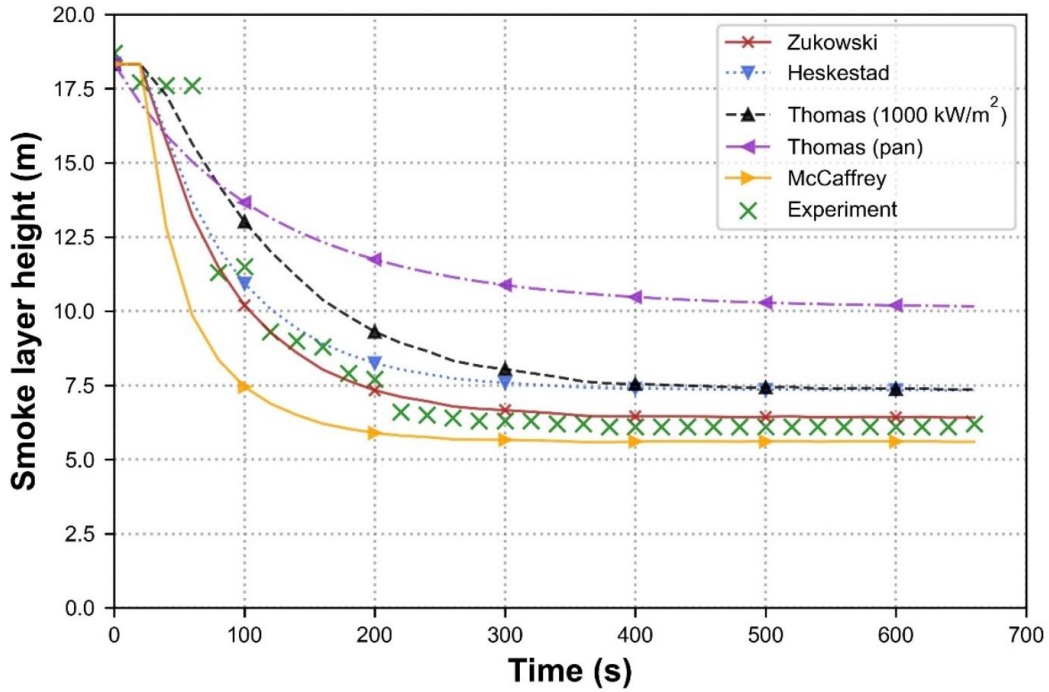
Parámetro	#G2
Diámetro de la bandeja (m)	0.92
Volumen de combustible (l)	28.8
Duración de la combustión (s)	708
Caudal de extracción (m³/s)	18.3
Temperatura (ºC)	20.1
Presión (mbar)	1016
Tasa media de liberación de calor calculada (MW)	1.70
Aberturas abiertas	A1,C1
Superficie libre de las aberturas abiertas (m²)	48.8 (4x12.2)
HRRPUA (kW/m²)	2559

Resultados y discusión

Según los resultados de este análisis, realizado en un recinto de gran volumen, los métodos actualmente disponibles (y recomendados por las normativas nacionales) para modelizar un incendio y determinar el humo producido **podrían no ser adecuados**.

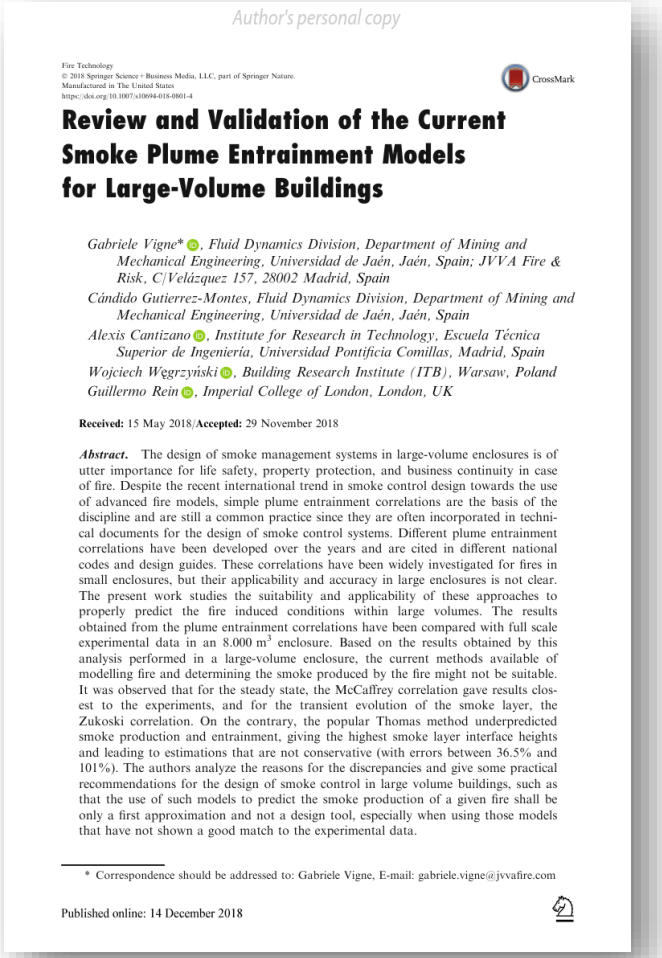
La mejor concordancia para predecir la altura de la capa en régimen estacionario se obtuvo sistemáticamente con el modelo de McCaffrey. Para la evolución de la capa de humo, la mejor concordancia correspondió al modelo de Zukoski. El conocido modelo de Thomas infravaloró la producción de humo en el atrio y predijo alturas de capa de humo significativamente mayores que las medidas.

El uso de estos modelos para predecir la producción de humo de un incendio concreto debería considerarse una primera aproximación, y no una herramienta de diseño, especialmente cuando los modelos no muestran una buena concordancia con los datos experimentales.



G. Vigne, C. Gutierrez-Montes, A. Cantizano, W. Węgrzyński, G. Rein — «Revisión y validación de los modelos actuales de arrastre en penachos de humo para edificios de gran volumen», diciembre de 2018, Fire Technology [DOI: 10.1007/s10694-018-0801-4].

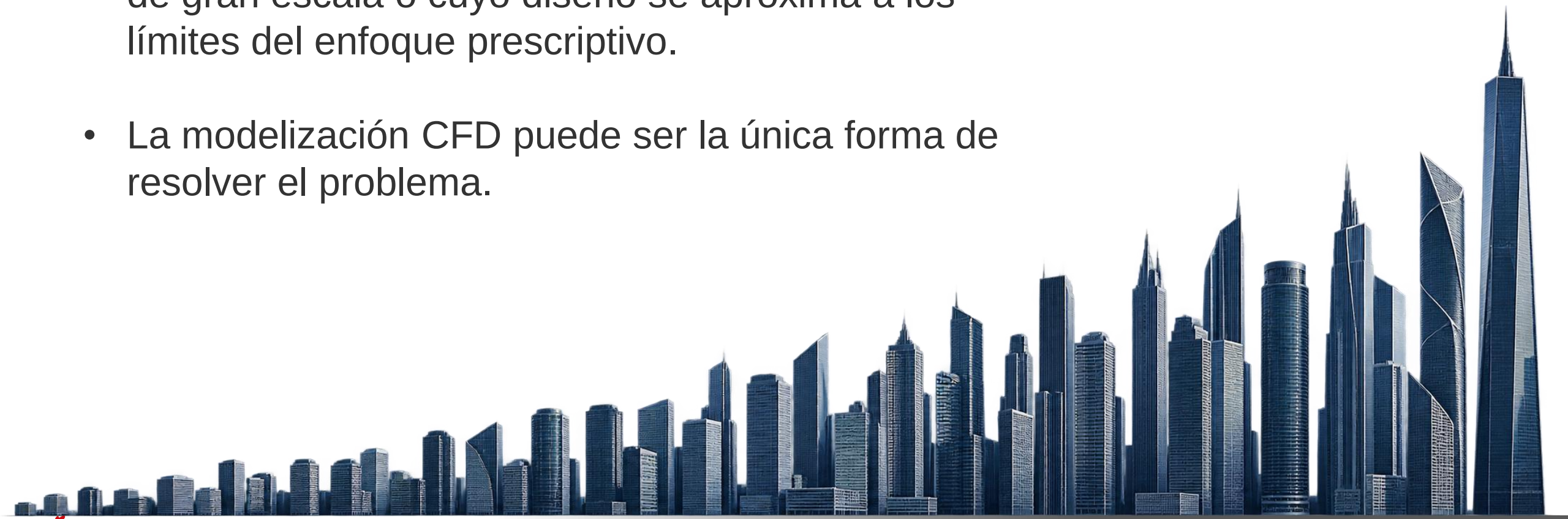




Modelos CFD

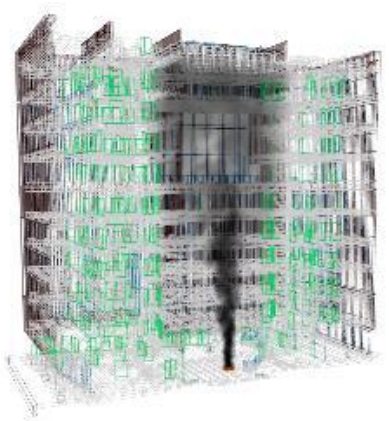
- Los modelos algebraicos y de zonas pueden superar sus límites de validez, especialmente en proyectos de gran escala o cuyo diseño se aproxima a los límites del enfoque prescriptivo.

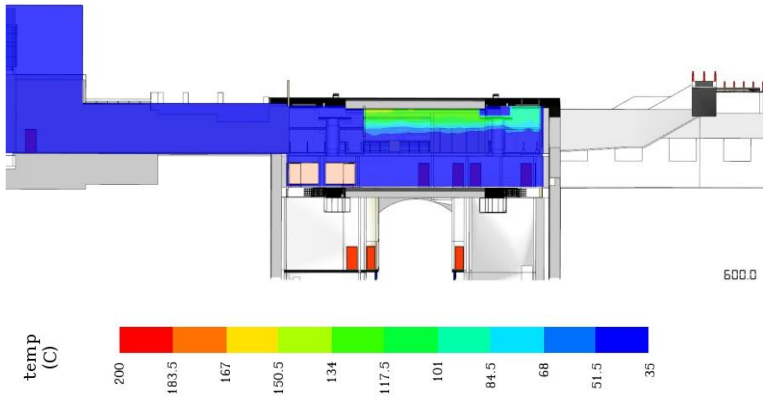
- La modelización CFD puede ser la única forma de resolver el problema.



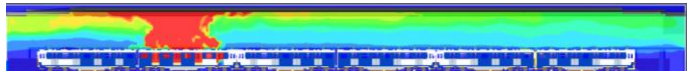
Modelos CFD

- Se utiliza CFD porque simula el fuego y el humo en tres dimensiones y reproduce fenómenos físicos que los métodos sencillos no captan.
- Tiene en cuenta la geometría, la ventilación, la turbulencia y las condiciones locales que determinan el movimiento del humo.
- Este nivel de detalle es esencial para tomar decisiones críticas de seguridad con precisión y realismo.

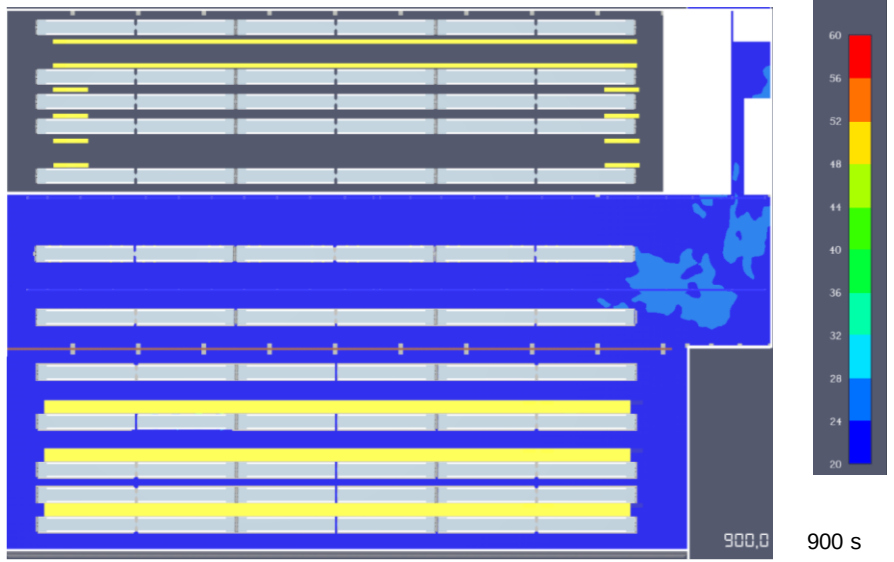




Sección longitudinal



Planta (2 m sobre el suelo



900 s



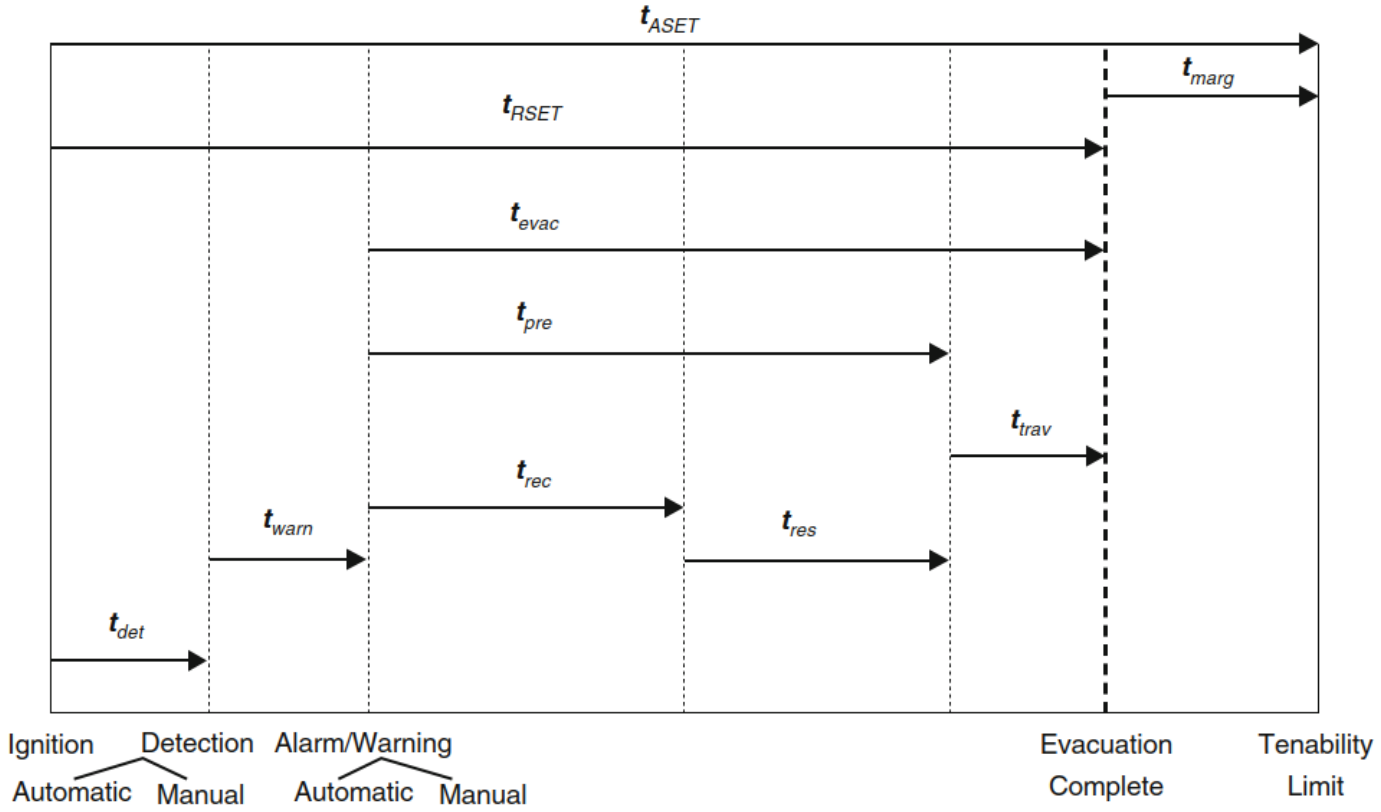


Influencia de la tasa de producción de hollín del combustible en la visibilidad a través del humo

Cómo se utiliza la visibilidad en la ingeniería de seguridad contra incendios

Los modelos de ingeniería y los modelos computacionales se utilizan habitualmente para establecer los tiempos ASET y RSET. ASET representa el tiempo disponible desde el inicio del incendio hasta que las condiciones dejan de ser admisibles, mientras que RSET es el tiempo que necesitan los ocupantes para reconocer la emergencia, reaccionar y alcanzar un lugar seguro. Estas escalas temporales suelen describir la evacuación de la población en conjunto y, por tanto, simplifican las numerosas decisiones, acciones y respuestas individuales que se producen durante una emergencia. La condición fundamental de seguridad es:

ASET > RSET + margen de seguridad adecuado



Variables del humo

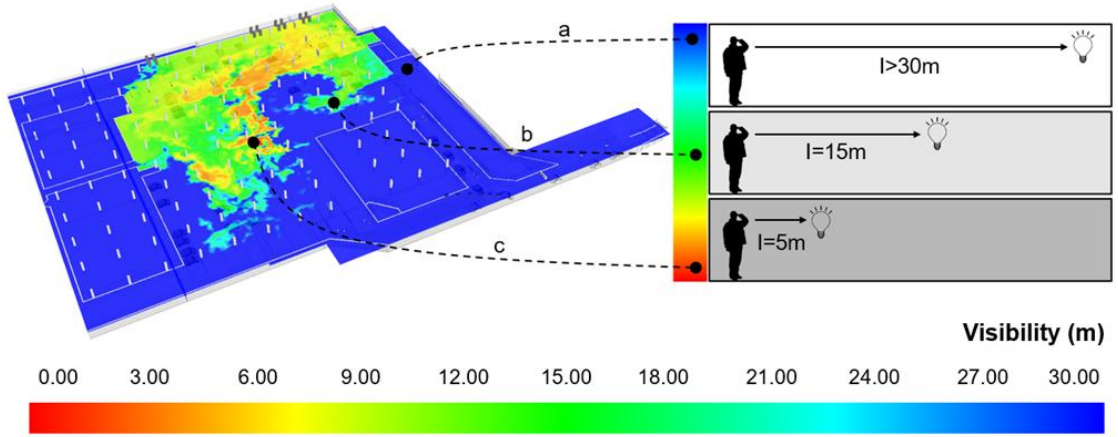
El humo puede describirse mediante la temperatura, la densidad de los productos, el oscurecimiento, la transmitancia o la concentración de gases tóxicos, entre otros parámetros.

En el análisis de ingeniería de seguridad contra incendios, la visibilidad a través del humo es una de las variables más importantes.

A menudo es el primer parámetro que alcanza el umbral crítico de admisibilidad.









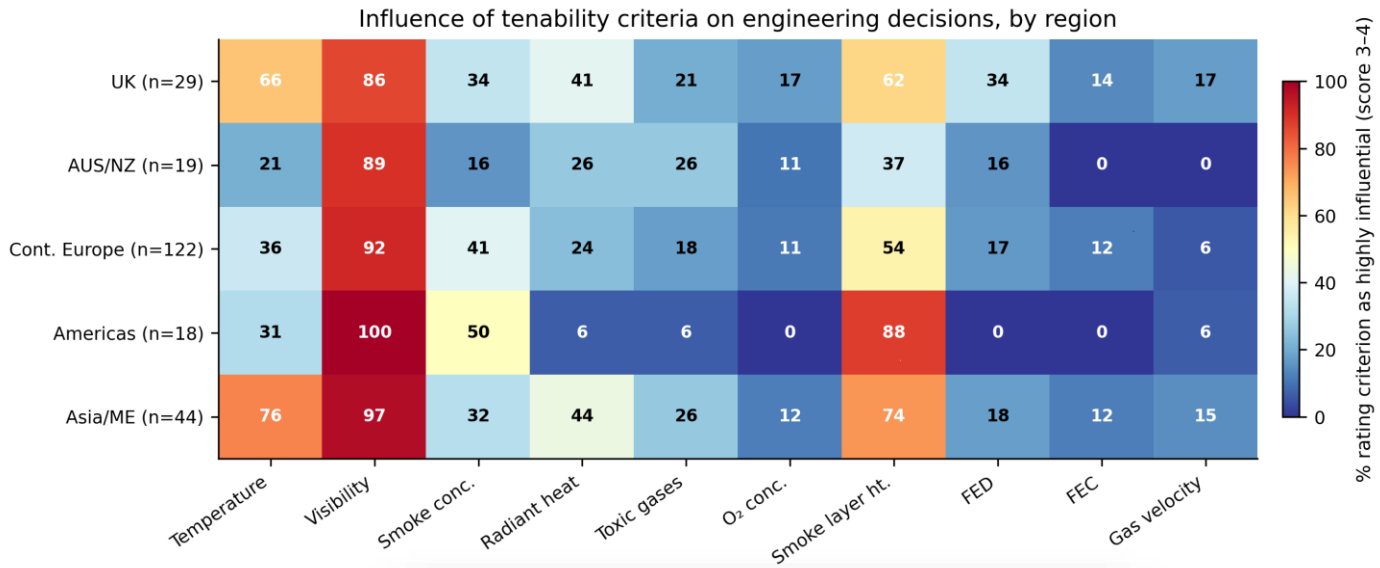
Visibilidad

Se ha publicado un estudio reciente sobre CFD y criterios de tenabilidad en la modelización de incendios y humos en procesos de ingeniería basada en el rendimiento.

Los datos se obtuvieron mediante una encuesta abierta en línea según la experiencia de los participantes, sus necesidades e intereses.

En total, 254 participantes procedían de 43 países diferentes, de una amplia variedad de ámbitos educativos y profesionales.

La encuesta consistió en 22 preguntas que abordaban cuestiones como su formación profesional y la familiaridad con el concepto ASET/RSER.



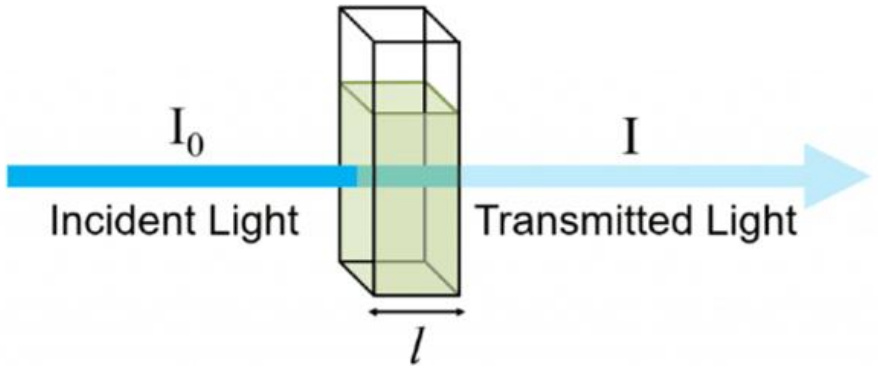


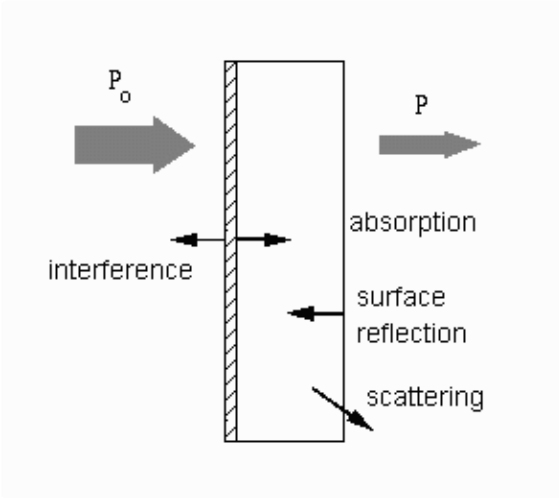
Atenuación de la luz por el humo

La interacción entre la luz y el humo se describe mediante la ley de Bouguer-Lambert-Beer, que relaciona la pérdida de intensidad luminosa al atravesar el humo con el coeficiente de extinción de la luz, K (m^{-1}).

$$I = I_0 e^{-\mathrm{KL}}$$

I: intensidad luminosa que atraviesa el humo. I_0: intensidad luminosa en aire limpio. K: coeficiente de extinción de la luz (m^{-1}). L: distancia recorrida por la luz a través del humo (m).





Atenuación de la luz por el humo

La aplicación de la ley de Bouguer-Lambert-Beer al humo presenta las siguientes limitaciones:

a) la capa de humo debe ser homogénea.

b) el mecanismo de atenuación de la luz debe ser la absorción y no la dispersión.

c) debe existir una única fuente luminosa, o las fuentes deben ser paralelas.

d) la fuente luminosa debe ser monocromática.

Pese a sus limitaciones, la ley de Bouguer-Lambert-Beer sigue siendo la aproximación más habitual para describir el efecto del humo sobre la luz que lo atraviesa.

Atenuación de la luz por el humo

$$I = I_0 e^{-K_m m L},$$

$$\left|\frac{L_t - L_b}{L_t}\right| > \delta_c$$

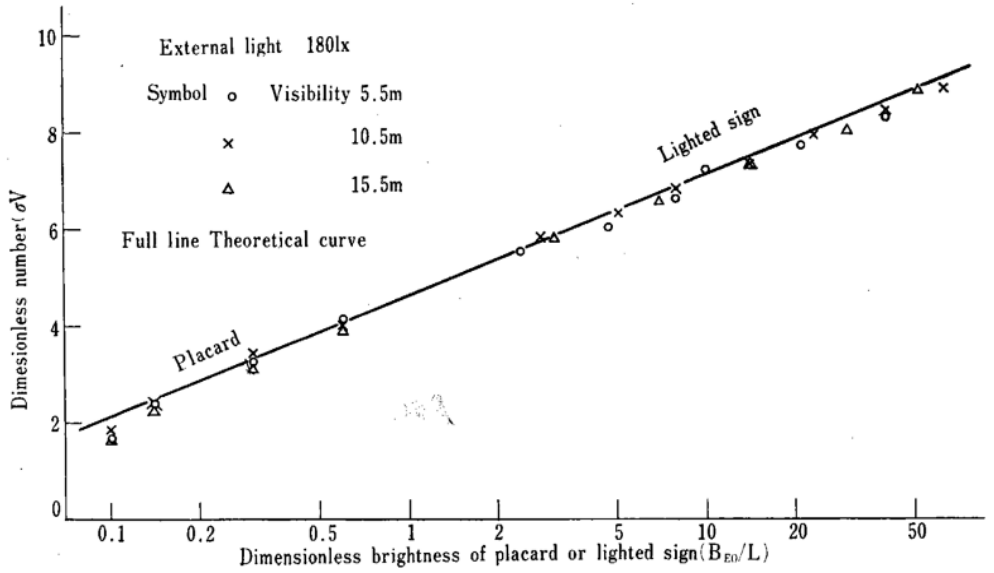
$$V = \frac{1}{\mathrm{K}} \ln\left(\frac{L_t \pi}{\delta_c a E}\right)$$

$$V = C\left(\frac{1}{K}\right)$$

El ojo humano distingue una forma (por ejemplo, una señal de evacuación) cuando el contraste de luminancia entre el objeto (Lt, cd/m²) y el fondo (Lb) supera un umbral crítico δc. Este umbral depende de la intensidad luminosa.

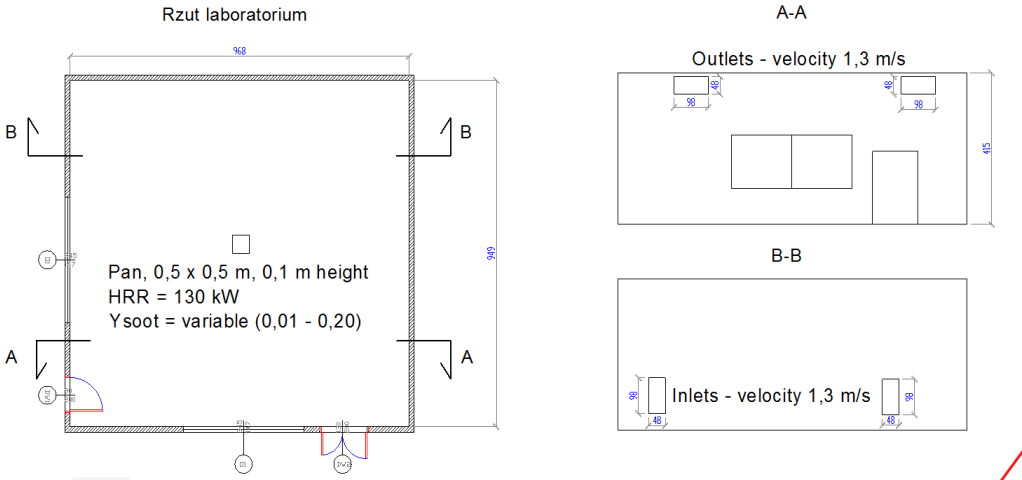
En condiciones de niebla suele adoptarse δc = 0,02, aunque algunas fuentes indican valores entre 0,01 y 0,05.

También depende de las características visuales de cada persona.



Ensayos en el Instituto de Investigación de la Construcción (ITB), Varsovia (Polonia)

La instalación de ensayo dispone de una sala de 10 × 10 m de planta y 4 m de altura, equipada con un sistema mecánico de extracción de humos.









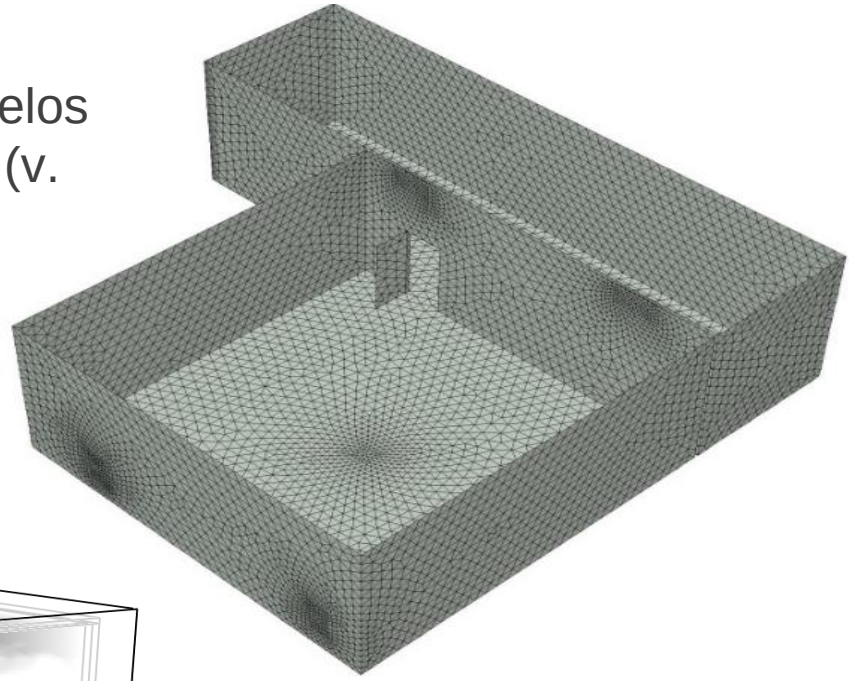


Ys

- Alcohol metílico (metanol), Ys = 0,001 g/g
- Alcohol propílico (propanol), Ys = 0,015 g/g
- Heptano, Ys = 0,035 g/g
- Tolueno, Ys = 0,178 g/g.

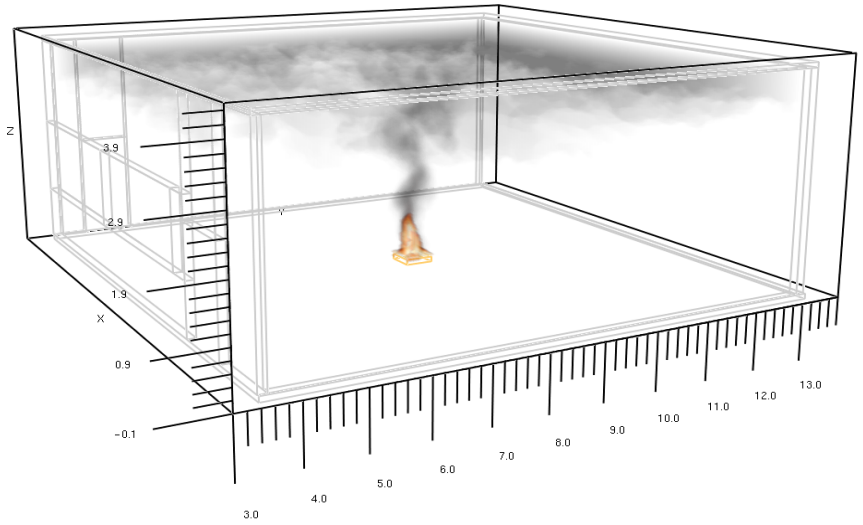
Validación del modelo numérico de visibilidad mediante CFD

El experimento del ITB de Varsovia se reprodujo mediante los modelos numéricos ANSYS® Fluent® (v. 17.0.0) y Fire Dynamics Simulator (v. 6.4.0), a fin de validarlos para posteriores estudios paramétricos.



Se utilizaron dos modelos diferentes:

- ANSYS® Fluent®
- FDS

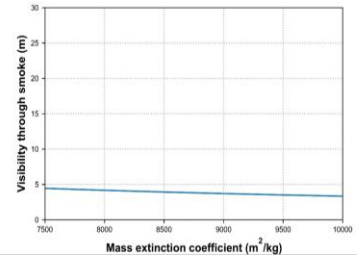


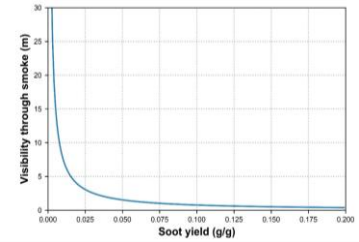
Influencia del rendimiento de producción de hollín en la visibilidad

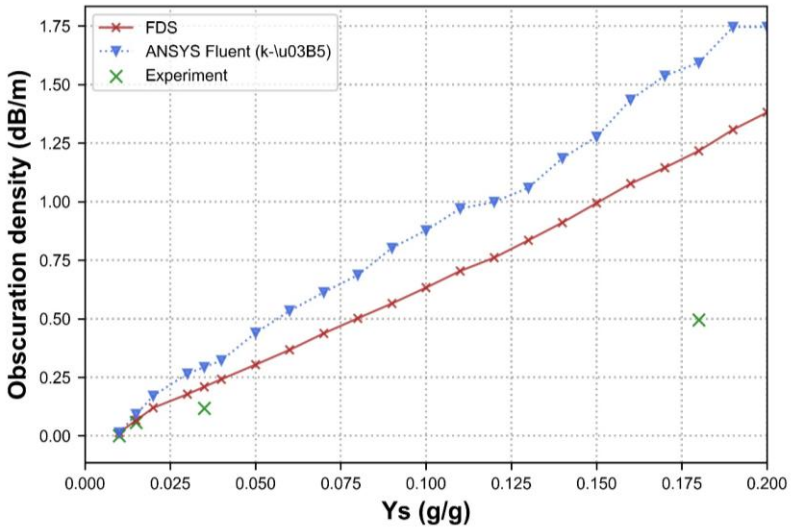
Se realizaron 20 simulaciones del «experimento de Varsovia» en Fluent y FDS, con rendimientos de hollín entre 0,01 y 0,2 g/g, utilizando la reacción del heptano.

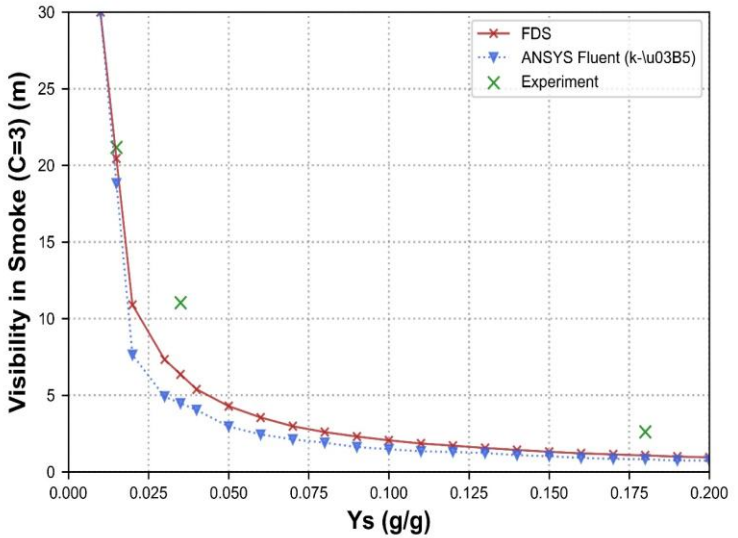
Los resultados de ambos programas y los ensayos muestran que el oscurecimiento aumenta linealmente con el rendimiento de hollín, mientras que la visibilidad sigue una tendencia hiperbólica.

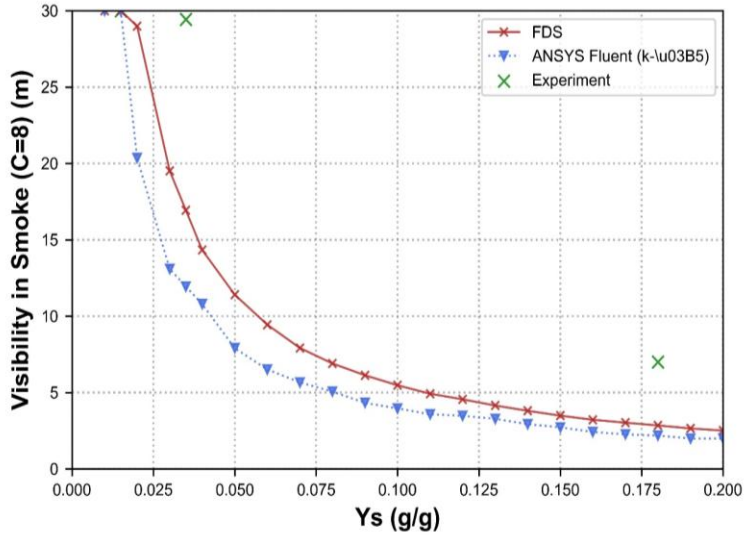
Se observa un umbral en torno a 0,10-0,12 g/g: por debajo la visibilidad cambia notablemente; por encima apenas varía.











W. Węgrzyński, G. Vigne — «Evaluación experimental y numérica de la influencia del rendimiento de producción de hollín en la visibilidad a través del humo en análisis CFD», 2017, Fire Safety Journal [DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.03.053].




Fire Safety Journal xxx (xxxx) xxx–xxx

Contents lists available at ScienceDirect

Fire Safety Journal

journal homepage: www.elsevier.com/locate/firesaf

Experimental and numerical evaluation of the influence of the soot yield on the visibility in smoke in CFD analysis

Wojciech Węgrzyński[a,*], Gabriele Vigne[b,c]

[a] Building Research Institute, Fire Research Department, Filtrowa 1 St., 00-611 Warsaw, Poland
[b] JVVA Fire & Risk, Velazquez 157, 28002 Madrid, Spain
[c] University of Jaén, Fluid Mechanics Department, Spain

ARTICLE INFO

Keywords:
Fire
Smoke
CFD
Smoke management
Visibility
Soot yield

ABSTRACT

Experimental and numerical analysis have been performed to evaluate the influence of the soot yield parameter on the results of advanced engineering analysis, in regards to visibility. After identifying soot yield as the most influential factor on the results, fuels with various values of Ys have been analysed in a fire chamber and then compared to numerical data. The numerical analysis has been performed using two different CFD packages, ANSYS® Fluent®, and Fire Dynamics Simulator. The numerical analysis itself show an apparent hyperbolic trend of the visibility when changing the soot yield with clear consequences on the ASET (Available Safe Egress Time). Below a cut-off point, that exists at a soot yield value close to Ys =0,10 g/g, a small change in the parameter causes a substantial shift in the results (visibility or ASET time), while above this value an increase to soot yield does barely influence the results. Qualitative assessment of the results shows a need for use of conservative values of Ys in engineering analysis if detailed and precise material data is not available. Additionally to the full-scale experiments, a real case study has been included to show how this research can be translated into the Fire Safety Engineering design process. In this study, change of Ys value below 0,10 g/g caused a significant change of the qualitative assessment of the results of CFD.

1. Introduction

Many parameters exist that can be used to describe the smoke properties, e.g. temperature, mass density of products, obscuration density, transmittance, toxic gasses concentration, etc. Among these numerous variables, when conducting Fire Safety Engineering (FSE) analysis, one of the most important is the "visibility in smoke". It is very common in FSE study, to see the visibility to be the first parameter that meets its critical value (tenability criteria). Visibility in numerical modeling is a result of modeling the transport of combustion products within the model, especially the soot aerosol. The soot is introduced into numerical domain through a source model, and its amount is directly affected by the effective heat of combustion of the fuel ($H_{c,ef}$) and the soot yield (Y_s). The visibility sub model is also dependent on the visibility factor (K) and the mass extinction coefficient of the smoke (σ). Previous research [1] has demonstrated, that among these parameters, the soot yield (Y_s) has the greatest influence on the value of visibility, while observation of engineering projects shown that is the one that is most liberally chosen.

The aim of this study was to further investigate the impact of soot yield on visibility. This goal was pursued through full-scale fire tests performed in the Building Research Institute (ITB) in Warsaw, Poland. Different fires have been examined, using fuels with a high diversity of soot yield values, varying from Ys =0.001 g/g to Ys =0.178 g/g. The density of the smoke layer has been measured with an optical densitometer.

The results have been compared to parametric numerical analysis, performed with ANSYS® Fluent® and Fire Dynamics Simulator. The numerical analysis shows a hyperbolic trend of the Visibility when increasing the soot yield with a cut-off point around 0.10 g/g, where a lower value can produce a relevant change, while a higher value a negligible change in the Visibility and therefore to the ASET (Available Safe Egress Time). Ultimately, a case study has been included to show how critical the soot yield is in the determination of the ASET in a real building.

2. Modeling visibility in smoke

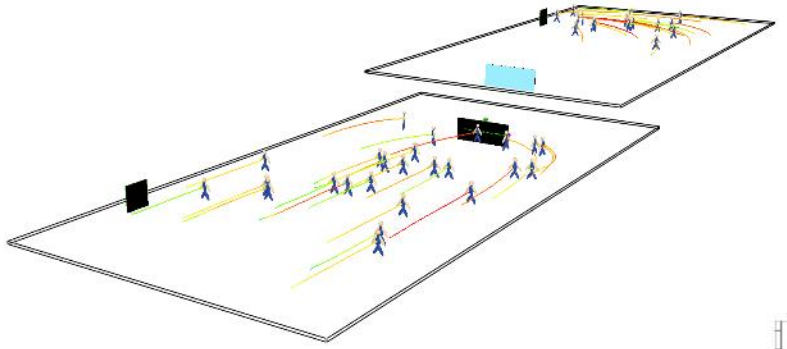
2.1. Optical properties of smoke

The optical properties of smoke aerosol in the air are comparable with other dispersive systems. The intensity of light passing through

* Corresponding author.

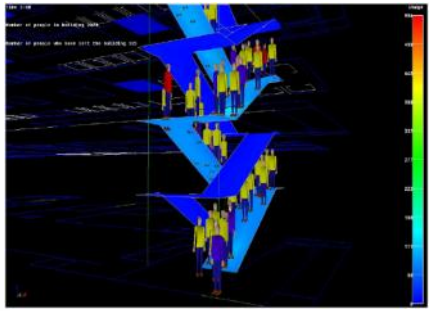
http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.03.053
Received 14 February 2017; Accepted 27 March 2017
0379-7112/ © 2017 Elsevier Ltd. All rights reserved.

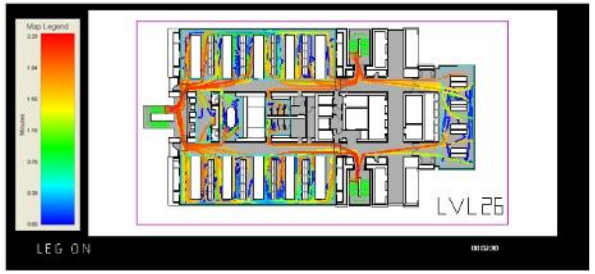
Los modelos de evacuación



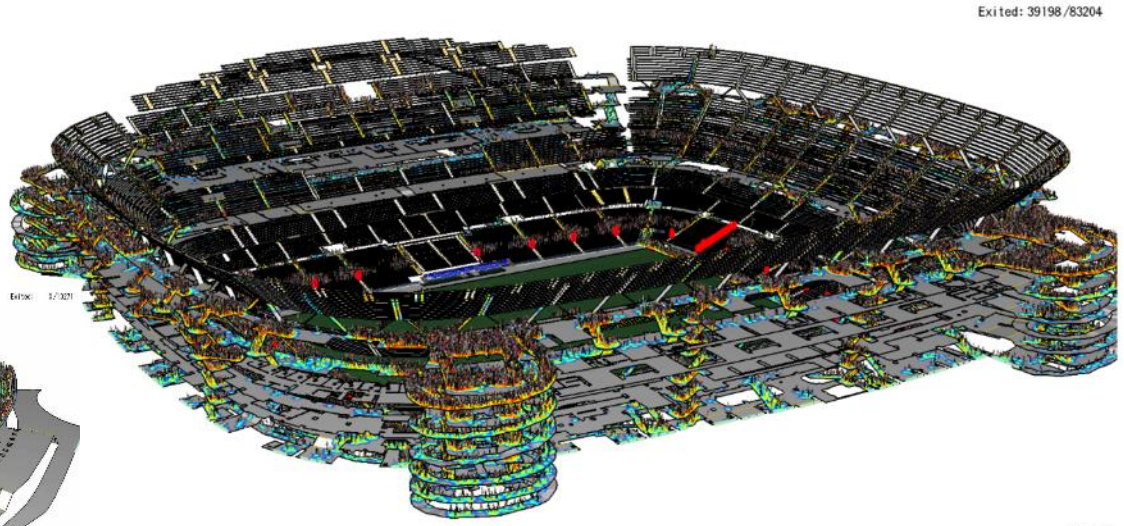


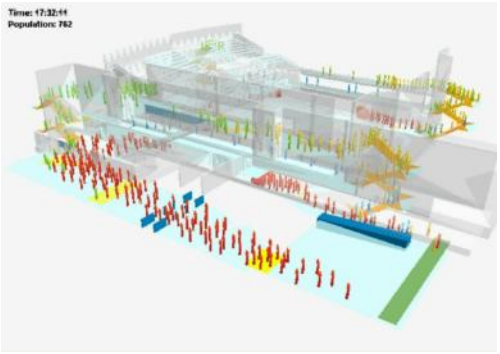


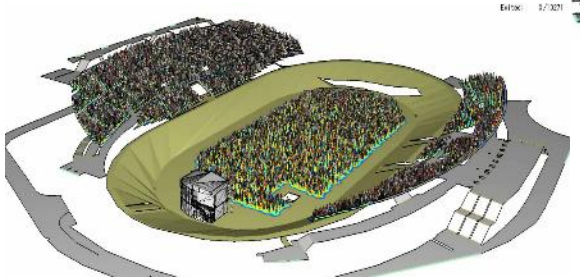








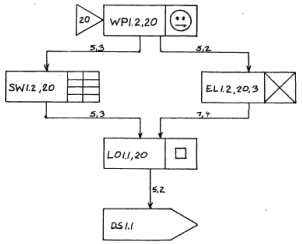




Tipología

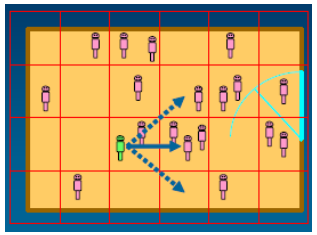
Modelos de red gruesa

Son modelos de evacuación más básicos y dividen el espacio entre habitaciones, recorridos, escaleras, etc. Los ocupantes se pueden mover de una habitación a otra.



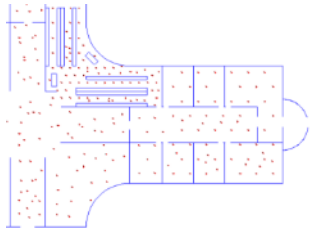
Modelos de red fina

El espacio está dividido en pequeñas celdas y los ocupantes pueden moverse de una celda a otra.



Modelos continuos

Los modelos continuos consideran el espacio como un dominio 2D donde los ocupantes pueden moverse en cualquier lado.

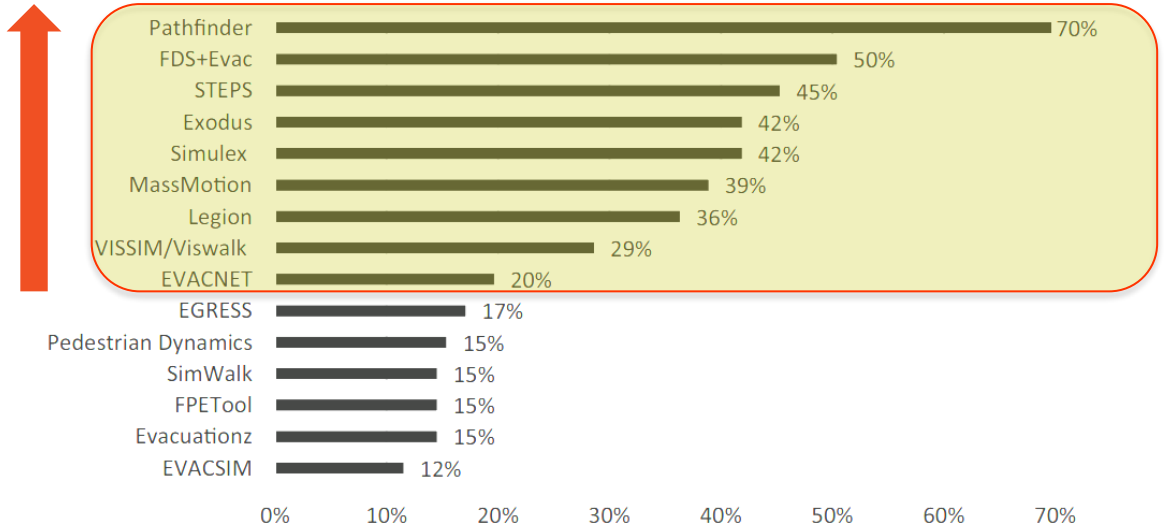


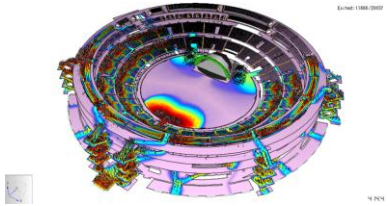
Características

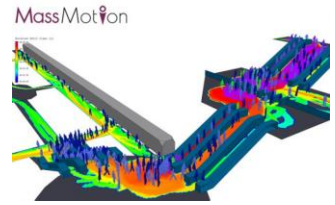
Model	*Available to public*	*Modeling Method*	*Purpose*	*Grid/ Structure*	*Perspective of M/O*	*Behavior*[a]	*Movement*[a]	*Fire data*	*CAD*	*Visual*	*Valid*
EVACNET4	Y	M-O	1	C	G	N	UC	N	N	N	FD
WAYOUT	Y	M	5	C	G	N	D	N	N	2-D	FD
STEPS[c]	Y	B	1	F	I	C, P	P, E	Y1,2	Y	2,3-D	C,FD,PE
PEDROUTE	Y	PB	3	C	G	I	D	N	Y	2,3-D	N
Simulex[b]	Y	PB	1	Co.	I	I	ID	N	Y	2-D	FD,PE, 3P
GridFlow	Y	PB	1	Co.	I	I	D	N	Y	2,3-D	FD, PE
FDS+Evac[c]	Y	PB	1	Co.	I	I, C, P	ID	Y3	N/Y	2,3-D	FD,PE,OM
Pathfinder 2009[c]	Y	PB	1	Co.	I/G	I	D,ID	N	Y	2,3-D	C,FD,PE,OM
SimWalk[c]	Y	PB	1,3	Co.	I	C, P	P	N	Y	2,3-D	FD,PE,3P
PEDFLOW[c]	Y	B	1	Co.	I	C, P	ID	Y2	Y	2,3-D	PE
PedGo[c]	Y,N1	PB/B	1	F	I/I,G	I/C, P	P,E (CA), C	Y2	Y	2,3-D	FD,PE,OM,3P
ASERI[c]	Y	B-RA	1	Co.	I	C, P	ID	Y1,2	Y	2,3-D	FD, PE
BldEXO[b]	Y	B	1	F	I	C, P	P, E	Y1,2	Y	2,3-D	FD,PE,OM,3P
Legion[c]	Y,N1	B	1	Co.	I	AI, P	ID, C	Y1	Y	2,3-D	C,FD,PE,3P
SpaceSensor[c]	Y	B	3	Co.	I	C, P	C, Ac_K	N	Y	2,3-D	FD,OM
EPT[c]	Y,N1	B	1	F	I	AI	UC,C	Y2	Y	2,3-D	FD
Myriad II[c]	Y, N1	B	1	C, F, Co.	I	AI	D, UC, IP, Ac_K	Y1	Y	2,3-D	PE, 3P
MassMotion[c]	Y, N1	B	1	Co.	I/I,G	AI,P	C	N	Y	2,3-D	C,FD,PE,OM
PathFinder	N1	M	1	F	I/G	N	D	N	Y	2-D	N
ALLSAFE	N1	PB	5	C	G	I	Un_F	Y1,2	N	2-D	OM
CRISP	N1	B-RA	1	F	I	C, P	E,D	Y3	Y	2,3-D	FD
EGRESS 2002	N1	B	1	F	I	C, P	P,D (CA)	Y2	N	2-D	FD
SGEM[c]	N1	PB	1	Co.	I	I	D	N	Y	2-D	FD,OM
EXIT89[c]	N2	PB	1	C	I	I/C, P	D	Y1	N	N	FD,3P
MASSEgress[b]	N2	B	1	Co.	I	C, AI	C	N	Y	2,3-D	PE,OM
EvacuatioNZ[c]	N2	B	1	C	I/I,G	I, C, P	D, UC	Y2	Y	2-D	FD, PE,OM

Los modelos computacionales de Evacuación

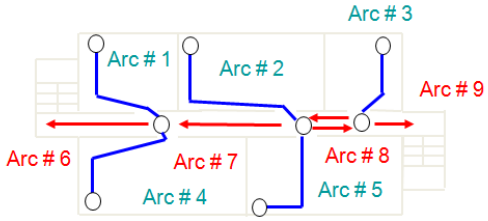
- Modelos arcos/nodos
- EVACNET
- Viswalk
- Legion
- MassMotion
- Simulex
- Exodus
- STEPS
- FDS+Evac
- Pathfinder

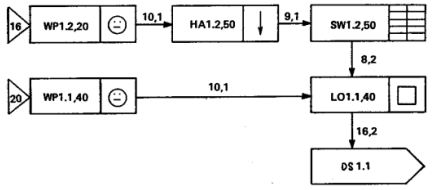


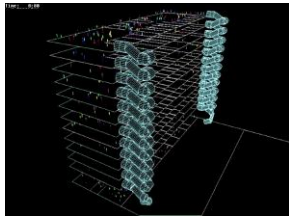


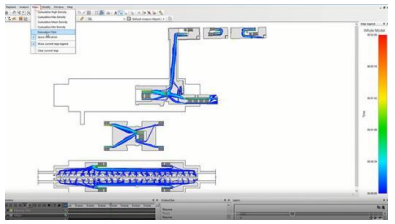


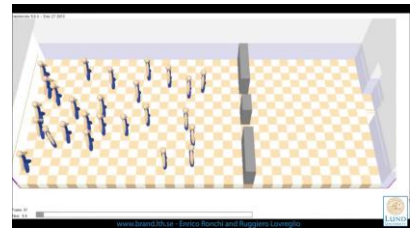


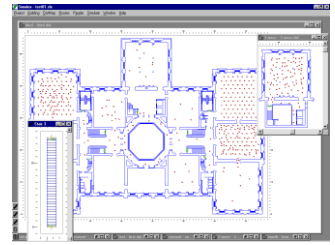










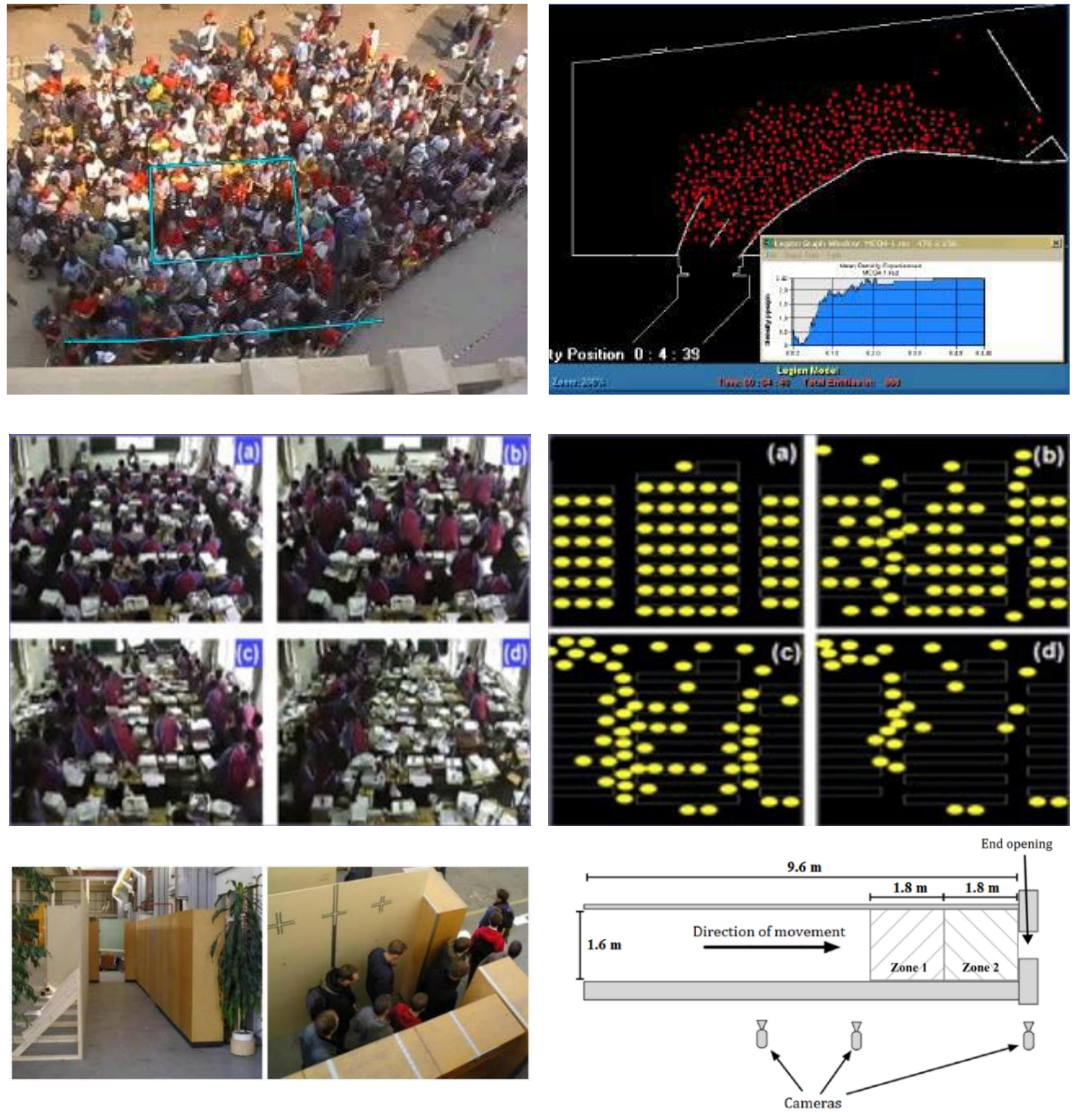


Calibración y validación

Al analizar la aplicabilidad de un modelo, la validación y calibración de estos modelos es uno de los factores más importantes a tener en cuenta.

Hay diferentes maneras de validar los modelos de evacuación de computadoras:

- Validación de los requisitos del código directrices para el análisis de evacuación para buques de pasajeros nuevos y existentes. MSC.1/Circ.1238, Londres: Organización Marítima Internacional, prueba RIMEA (Meyer-Koning)
- Validación con simulacros de incendio o pruebas experimentales.
- Validación mediante la literatura de experimentos de evacuación.
- Validación mediante otros modelos.
-





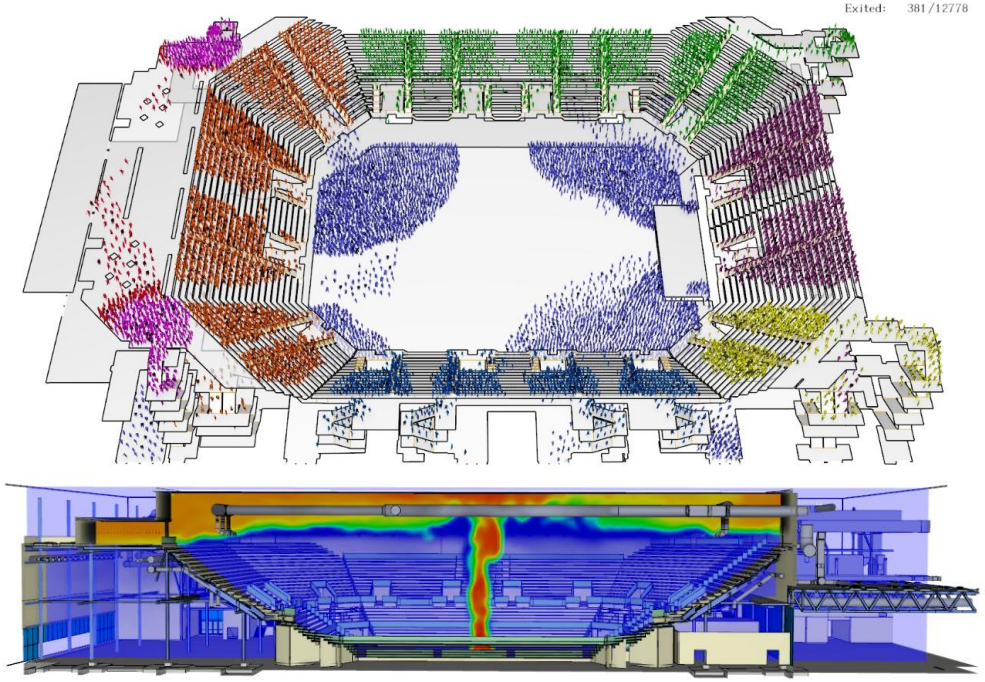
Ejemplos internacionales en los que el diseño basado en prestaciones ha sido crucial

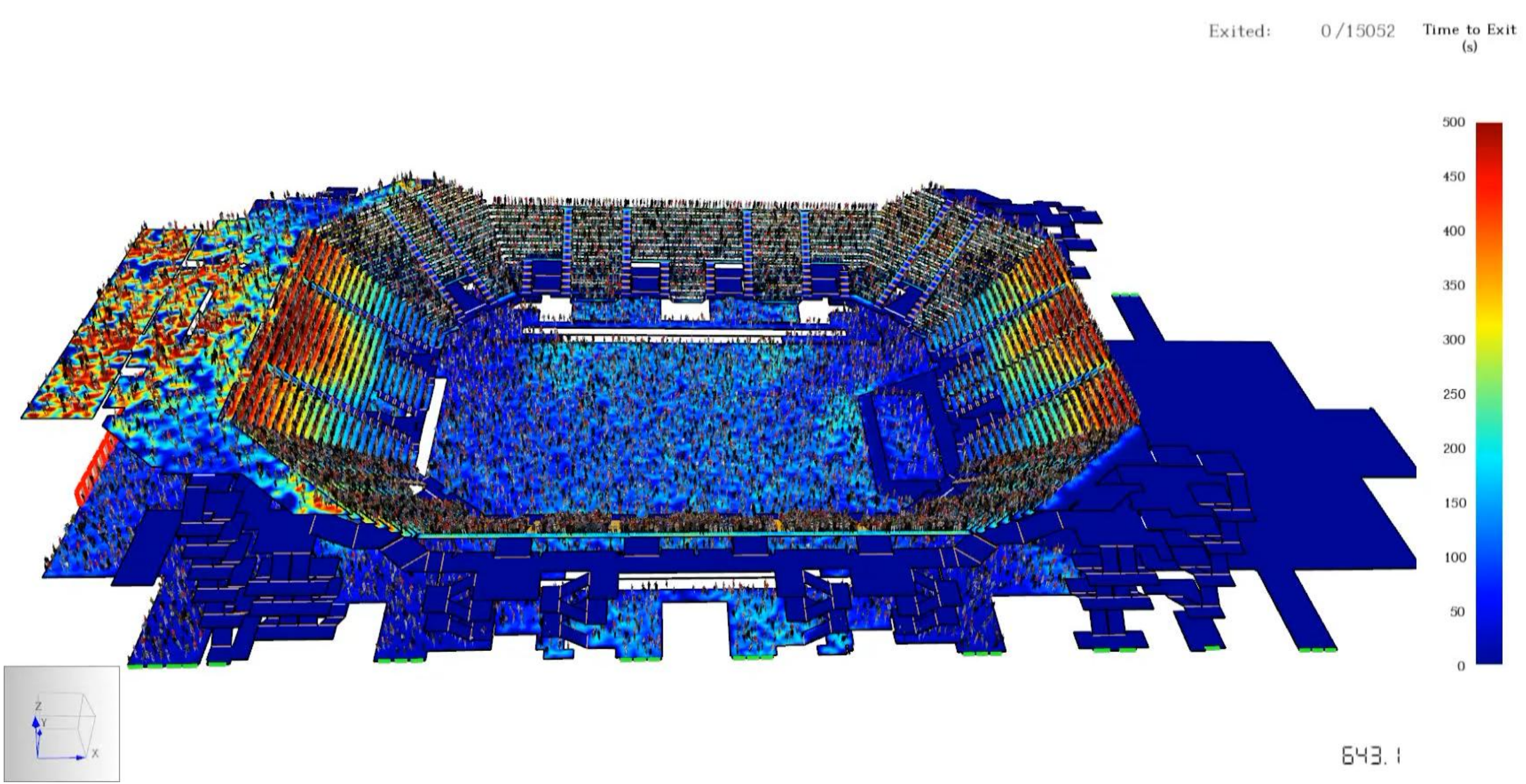
New Virtus Arena Bologna

Cliente	Bologna Fiere
Servicios	Evacuation Modelling and Crowd Management
Año	2023-2026
Lugar	Bologna, Italy

La Nueva Virtus Arena Bologna es un emblemático desarrollo deportivo y de entretenimiento situado dentro del distrito expositivo BolognaFiere en Bolonia, Italia. Desarrollado como el futuro recinto principal de Virtus Bologna, el proyecto pretende crear una arena polivalente de última generación capaz de acoger competiciones de baloncesto de primer nivel, eventos deportivos internacionales, conciertos, eventos corporativos y grandes actividades de entretenimiento con una capacidad prevista para 15.000 espectadores.
Se realizó un análisis exhaustivo de evacuación basado en el rendimiento, evaluando la salida simultánea de ocupantes para todas las configuraciones deportivas y de eventos especiales. Los resultados de la evacuación se integraron con simulaciones de incendio y humo en múltiples escenarios de diseño para verificar el rendimiento en seguridad de vida y apoyar la estrategia general de seguridad contra incendios.






Exited: 0 /15052
Time to Exit (s)
500
450
400
350
300
250
200
150
100
50
0
Z
Y
X
643.1

Estadio Santiago Bernabéu

Cliente	Ferrovial
Servicios	Evacuation Modelling and Crowd Management
Año	2019
Lugar	Madrid, Spain

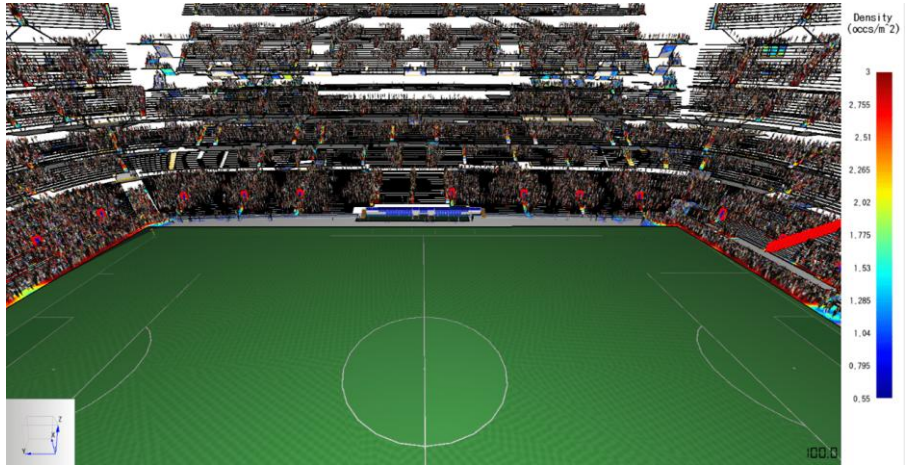
El Estadio Santiago Bernabéu es un estadio de fútbol situado en Madrid, España. Con una capacidad actual de 81.044 espectadores, es la sede del Real Madrid desde su inauguración en 1947. Es el segundo estadio más grande de España y el mayor de la Comunidad de Madrid, además de uno de los recintos futbolísticos más conocidos del mundo.

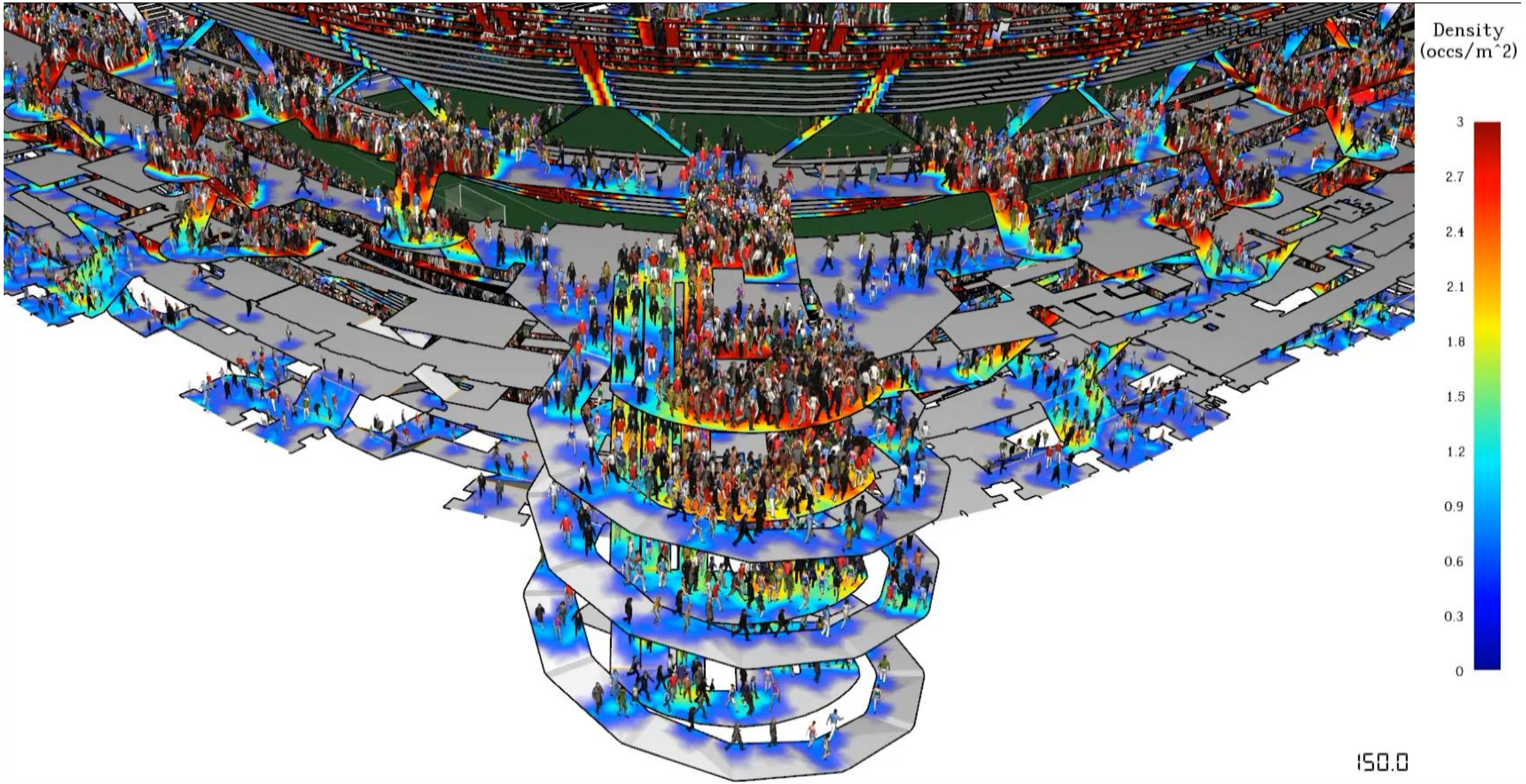
Se realizó un análisis avanzado de evacuación simultánea del estadio ante diferentes escenarios de emergencia mediante modelos de evacuación. A partir de los resultados se desarrollaron y prescribieron medidas de seguridad para su implantación durante la remodelación, con el fin de mejorar la fluidez y la seguridad de la evacuación en las zonas conflictivas del estadio.










Density
(occs/m^2)
3
2.7
2.4
2.1
1.8
1.5
1.2
0.9
0.6
0.3
0
150.0

Edificios

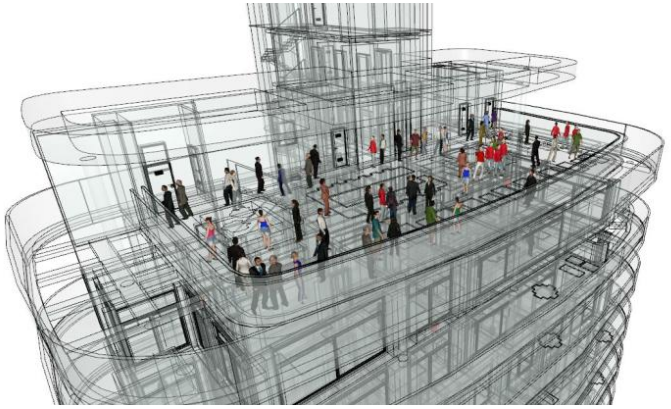
Cliente	TM | TM Tower
Servicios	Evacuation analysis
Año	2025
Lugar	Benidorm, Spain

Se ha realizado un estudio avanzado de evacuación de ocupantes para un edificio residencial proyectado en Benidorm (Alicante).

Según la información facilitada por el cliente, el objetivo del estudio es evaluar y validar, mediante un enfoque basado en prestaciones, las condiciones de evacuación derivadas de las soluciones prescriptivas adoptadas en el proyecto, de acuerdo con el diseño actual y los requisitos del Código Técnico de la Edificación, CTE DB-SI [1].

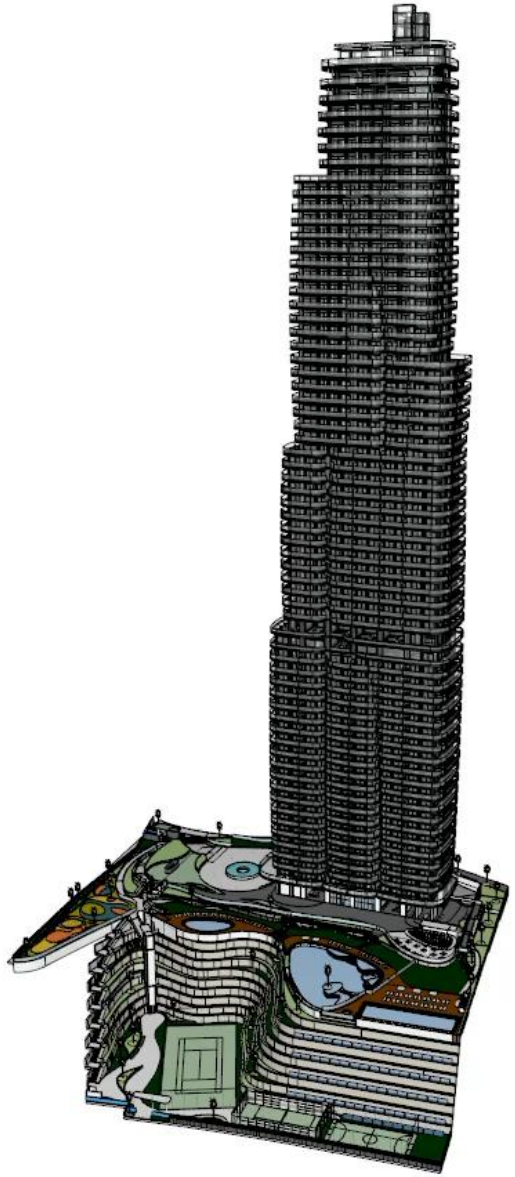
Por tanto, el estudio no plantea alternativas a los requisitos prescriptivos, sino que constituye un documento justificativo del cumplimiento, destinado a verificar las prestaciones de evacuación en los escenarios considerados.







Buildings



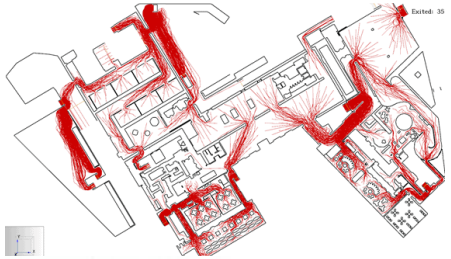
WoW (World of Wine)

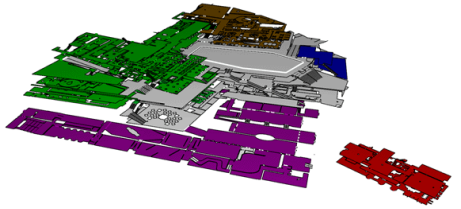
Cliente	A400
Servicios	Evacuation Modelling and Crowd Management
Año	2020
Lugar	Oporto, Portugal

World of Wine (WOW), una de las mayores atracciones turísticas inauguradas en Europa en 2020, ocupa más de 39.000 m² de antiguas bodegas rehabilitadas. Se creó para consolidar Oporto como destino cultural mediante experiencias educativas. El complejo incluye restaurantes, vinotecas y una plaza al aire libre con vistas a Oporto, entre antiguos almacenes de vino restaurados.

Se realizó un análisis avanzado de evacuación simultánea del edificio mediante modelos de evacuación y cálculos de ingeniería empíricos, con el objetivo de aumentar su aforo total. Como resultado, se desarrollaron y prescribieron medidas para mejorar la fluidez y la seguridad de la evacuación en las zonas más conflictivas.









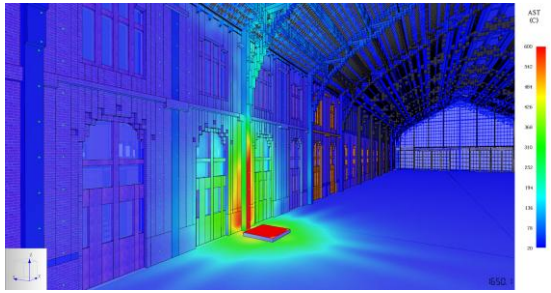

Exited: 79/8522
30,0

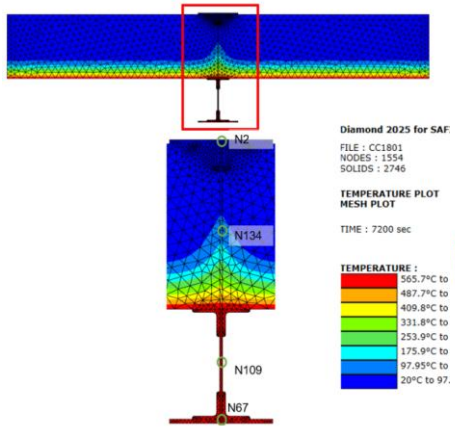
Edificios

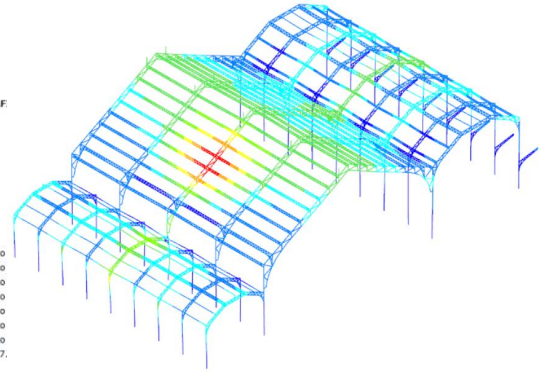
Cliente	ADIF | Museo del Ferrocarril
Servicios	Cultural heritage. Fire Engineering. Evacuation analysis. Structural Fire engineering. Performance based structural fire design. Passive fire protection optimisation. Structural strengthening.
Año	2025-2026
Lugar	Madrid, Spain









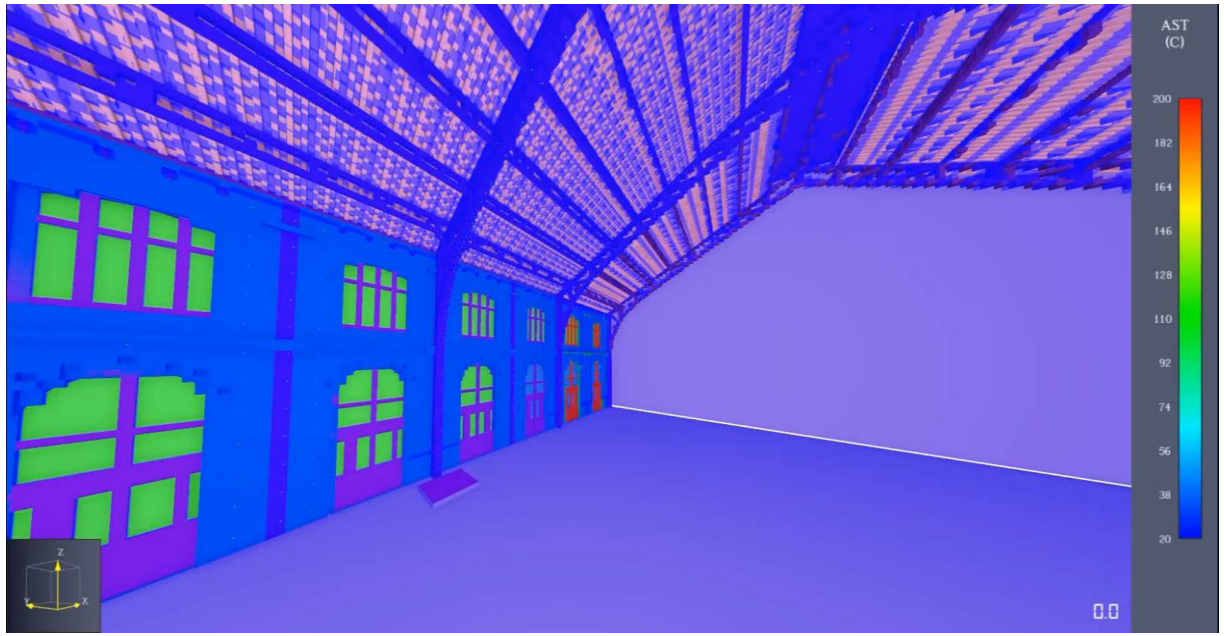


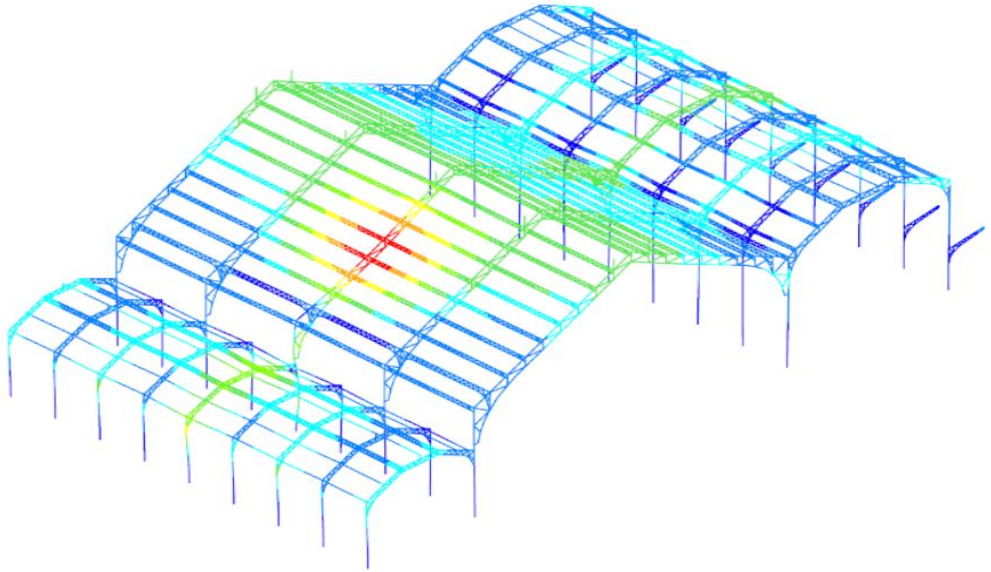
La estación de Delicias de Madrid se construyó a finales del siglo XIX y funcionó durante muchos años como estación ferroviaria. Actualmente se utiliza principalmente como museo.

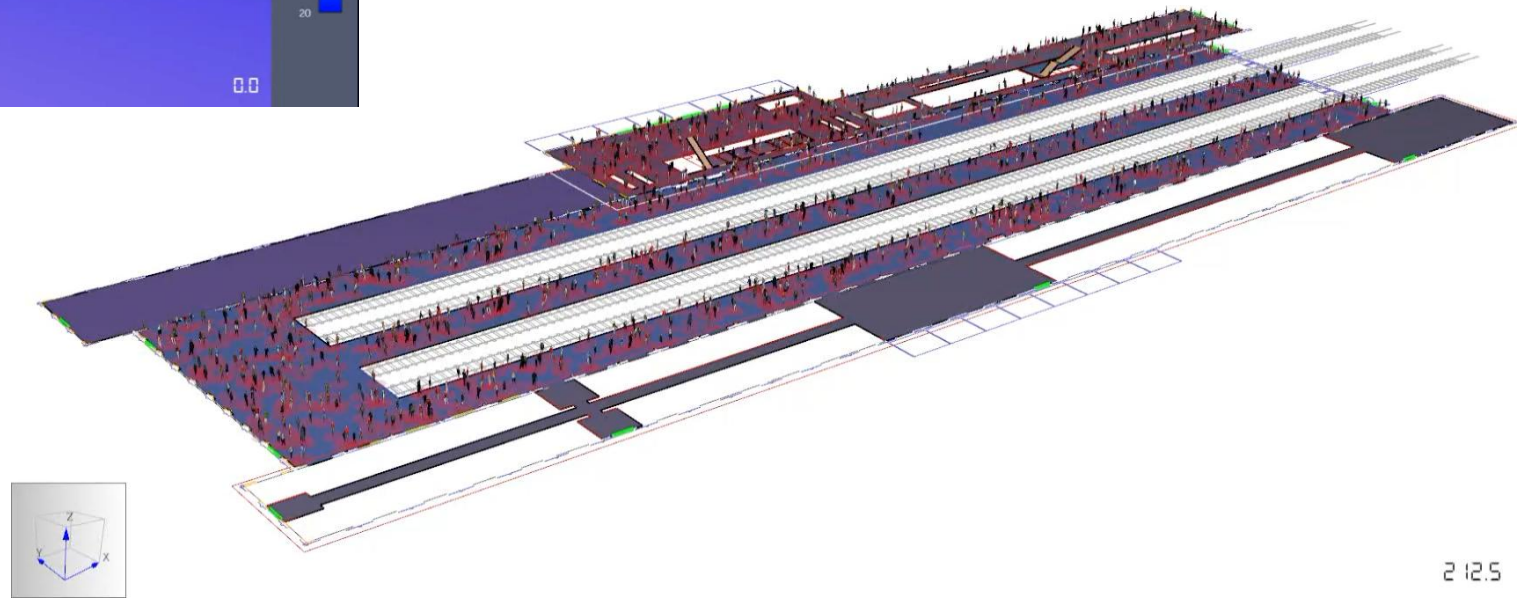
El sistema estructural consta de tres naves contiguas; la central es la principal y alberga las exposiciones ferroviarias. La cubierta está formada por cerchas Polonceau, con una luz total de 35 m y una altura máxima de 22 m.

En el proyecto, el cliente pretendía evaluar el comportamiento de la estructura ante un escenario de incendio real para determinar si eran necesarias medidas de protección pasiva contra incendios u otras actuaciones correctoras que evitaran un colapso parcial o total.

Buildings







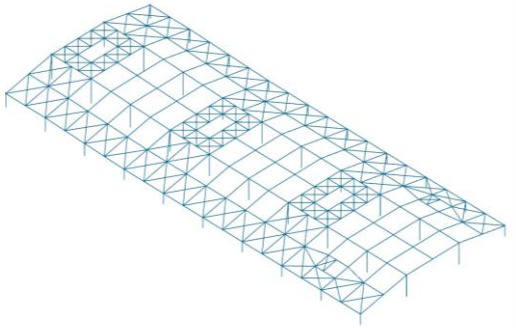
Infraestructuras

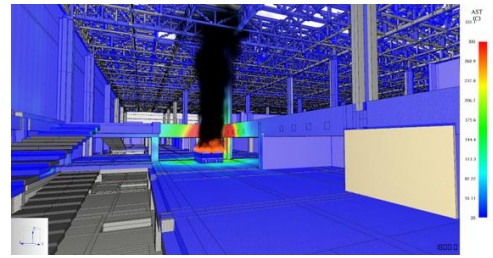
Cliente	Sacyr
Servicios	Building Sector. Fire Engineering, Evacuation Modelling. Structural Fire Engineering.
Año	2024-2026
Lugar	Lima, Perú

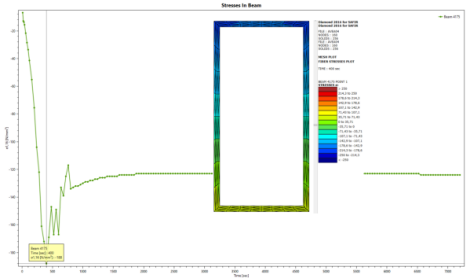


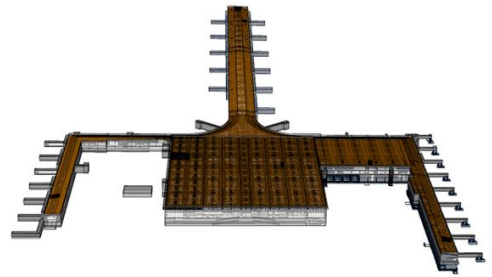
El nuevo Aeropuerto Internacional Jorge Chávez de Lima, inaugurado oficialmente en 2025, constituye una de las mayores actuaciones aeroportuarias de Latinoamérica. Su nueva terminal, aproximadamente tres veces mayor que la anterior, convierte el aeropuerto en un importante nodo aéreo regional. Desarrollado por Lima Airport Partners, filial de Fraport AG, incluye una terminal modular de gran escala, zonas de procesamiento de pasajeros de alta capacidad, amplios espacios comerciales, operaciones con dos pistas, sistemas avanzados de equipajes y capacidad de ampliación futura hasta unos 60 millones de pasajeros anuales.

Se realizaron varias simulaciones computacionales de incendios mediante CFD para los escenarios acordados con el cliente. Estas sirvieron de base para análisis avanzados mediante elementos finitos (FEM), tanto de transferencia térmica a las secciones como de respuesta estructural.

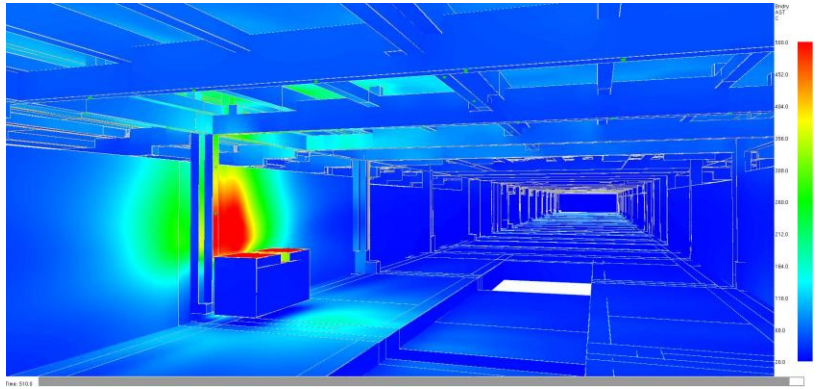


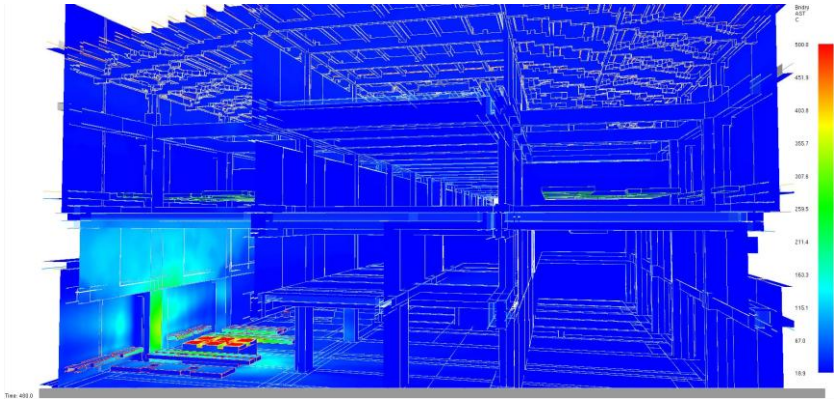


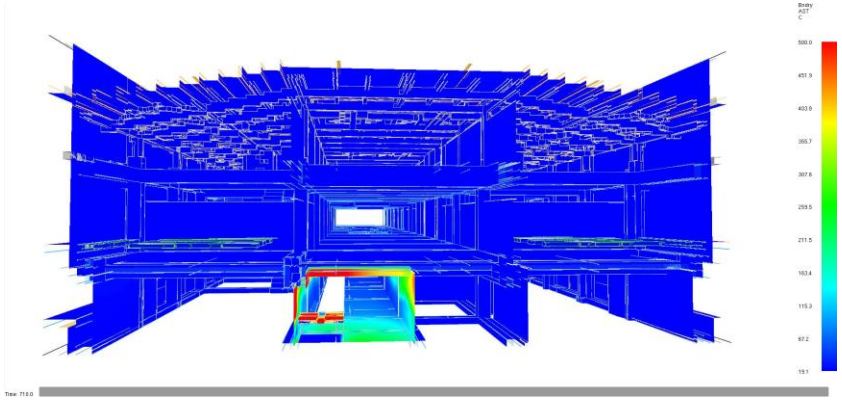


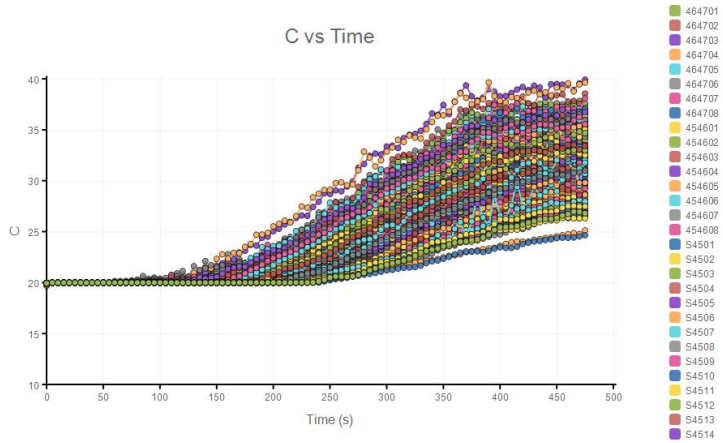


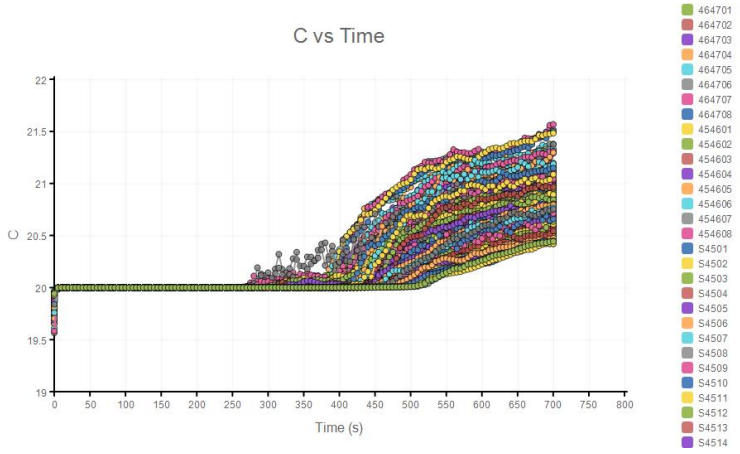









C vs Time
C
Time (s)
464701
464702
464703
464704
464705
464706
464707
464708
454601
454602
454603
454604
454605
454606
454607
454608
S4501
S4502
S4503
S4504
S4505
S4506
S4507
S4508
S4509
S4510
S4511
S4512
S4513
S4514

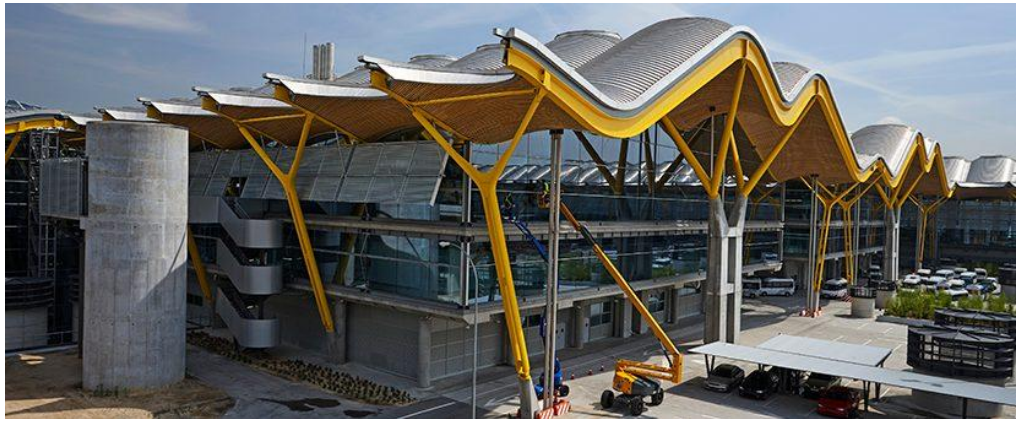

C vs Time
C
Time (s)
464701
464702
464703
464704
464705
464706
464707
464708
454601
454602
454603
454604
454605
454606
454607
454608
S4501
S4502
S4503
S4504
S4505
S4506
S4507
S4508
S4509
S4510
S4511
S4512
S4513
S4514

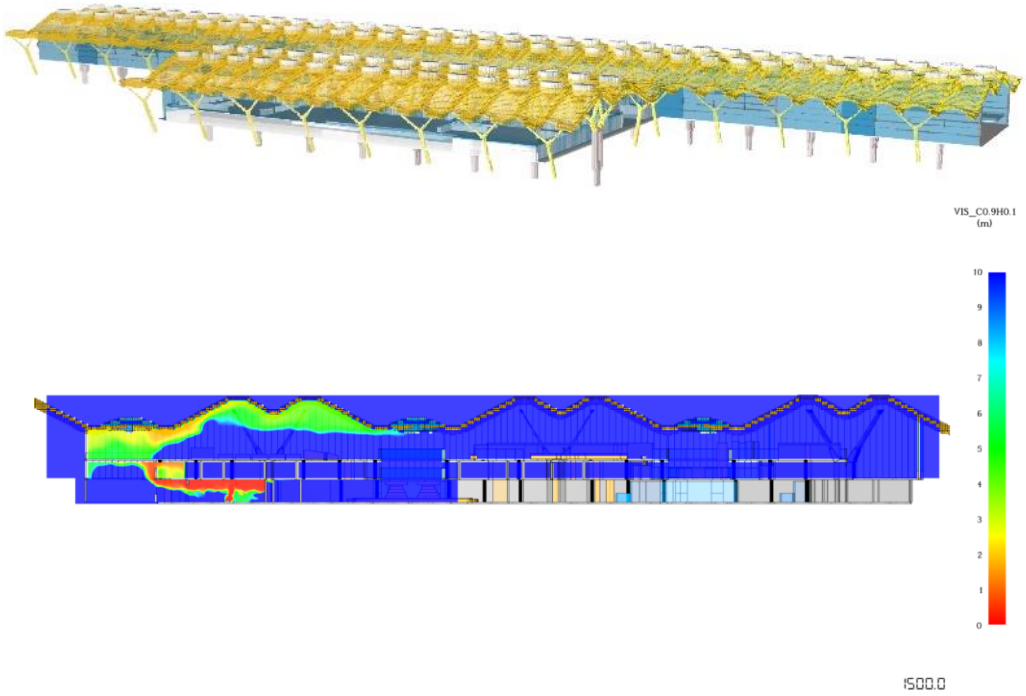
Infraestructuras

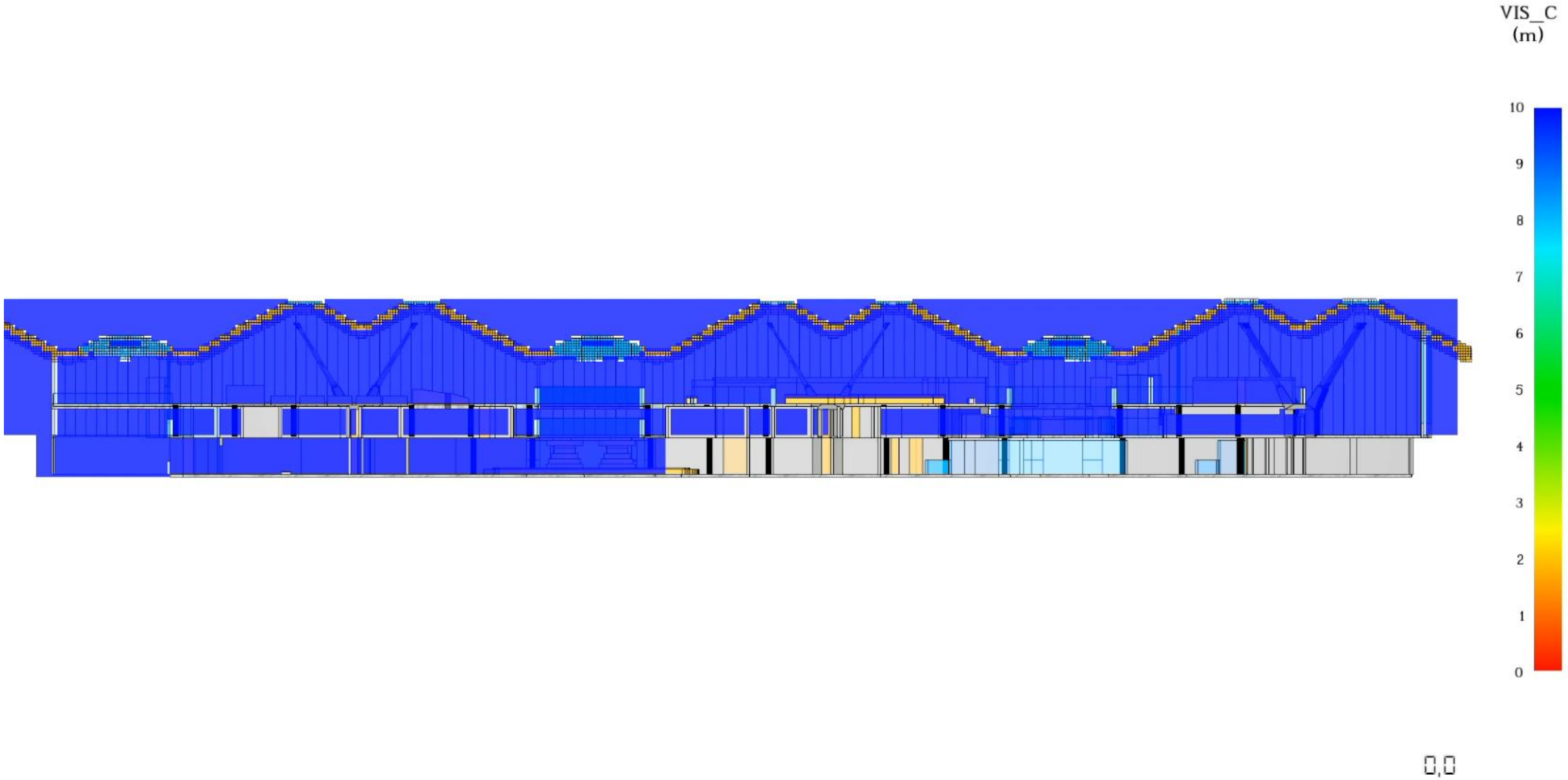
Cliente	AENA
Servicios	Building Sector. Fire Engineering, Evacuation Modelling.
Año	2015-2026
Lugar	Madrid, Spain

El Aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas es el principal aeropuerto internacional de Madrid. Con más de 65 millones de pasajeros, es el mayor y más transitado de España y el quinto de Europa.

Se realizó un estudio basado en prestaciones de todo el aeropuerto, evaluando el nivel de seguridad contra incendios en las zonas públicas y desarrollando medidas de mitigación para aquellas que requerían mejoras. El enfoque exigió numerosas simulaciones avanzadas (movimiento del humo y evacuación) y una estrecha colaboración con la dirección del aeropuerto. El proyecto resultó muy exigente por sus dimensiones y plazos, pero se entregó a tiempo y conforme al alcance acordado.






VIS_C
(m)
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
0
0,0

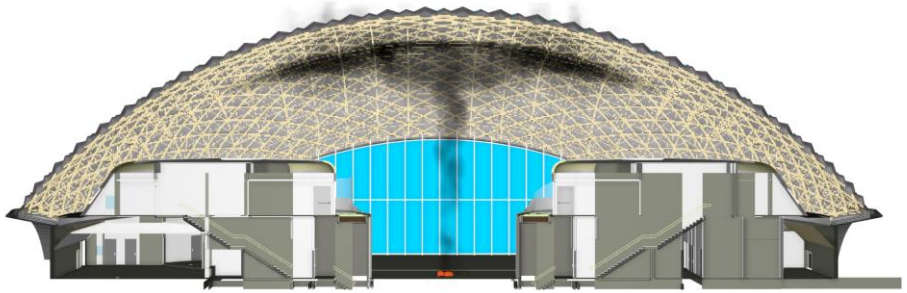
Infraestructuras

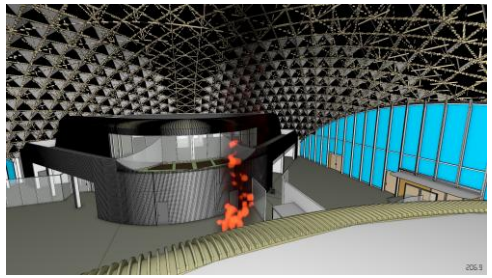
Cliente	LANIK
Servicios	Building Sector. Fire Engineering, Evacuation Modelling.
Año	2015-2026
Lugar	La Unión, San Salvador

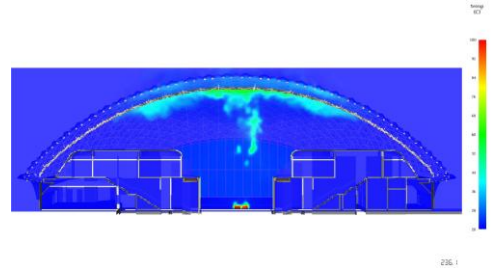


El aeropuerto se encuentra en construcción cerca de Conchagua, en el departamento de La Unión, a unos 190 km de San Salvador. El proyecto se ejecutará en varias fases y se prevé que sea el segundo gran aeropuerto internacional de El Salvador.

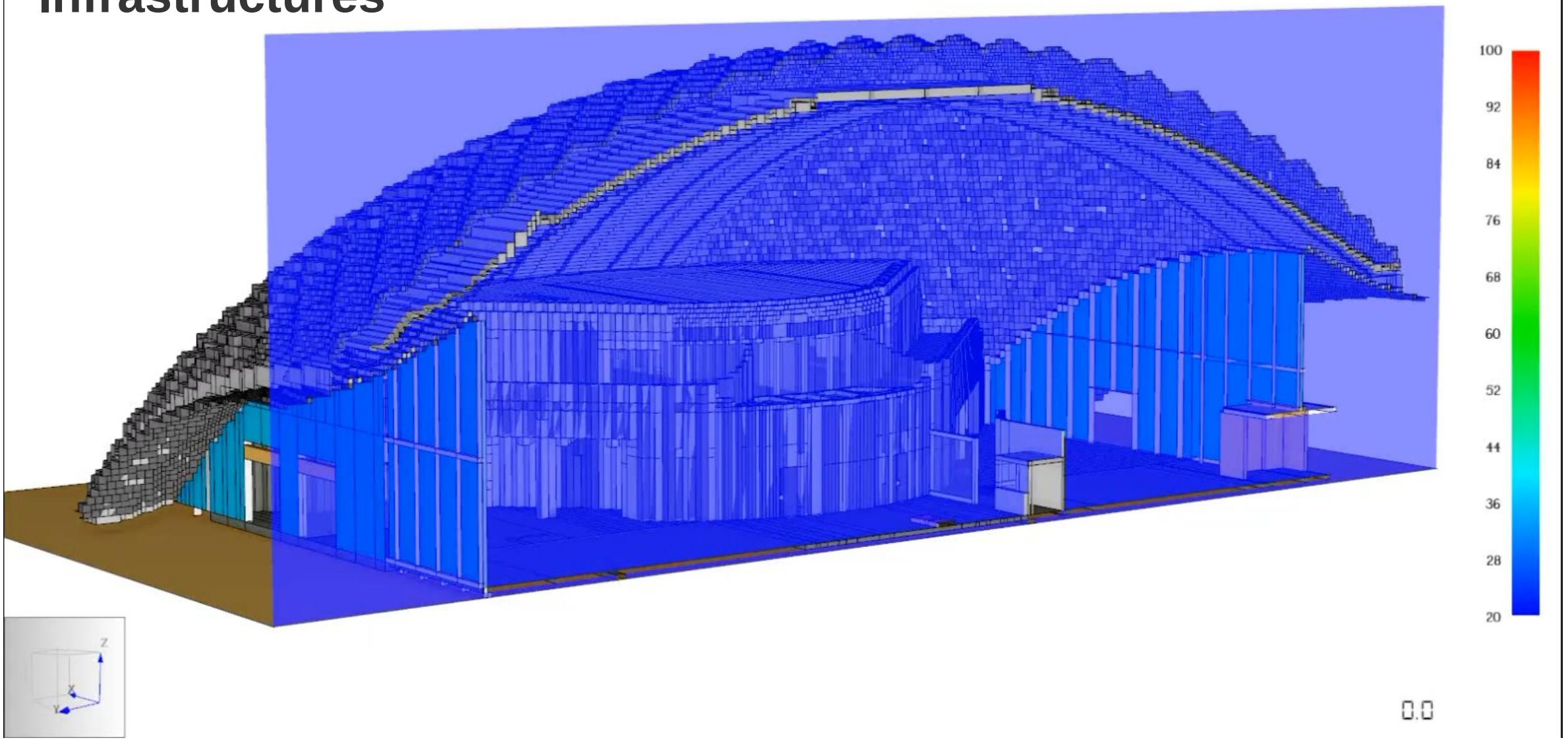
El estudio evaluó el comportamiento térmico de la malla metálica tridimensional que constituye el sistema estructural principal. Debido a la configuración arquitectónica, esta se encontraba cerca de posibles focos de incendio, como los apoyos a nivel del suelo y las terrazas de la primera planta. Ante la posibilidad de incendios accidentales en estas zonas, se efectuó un análisis térmico mediante CFD para evaluar las temperaturas de exposición y determinar en qué medida sería necesaria la protección contra incendios de la estructura principal.







Infrastructures



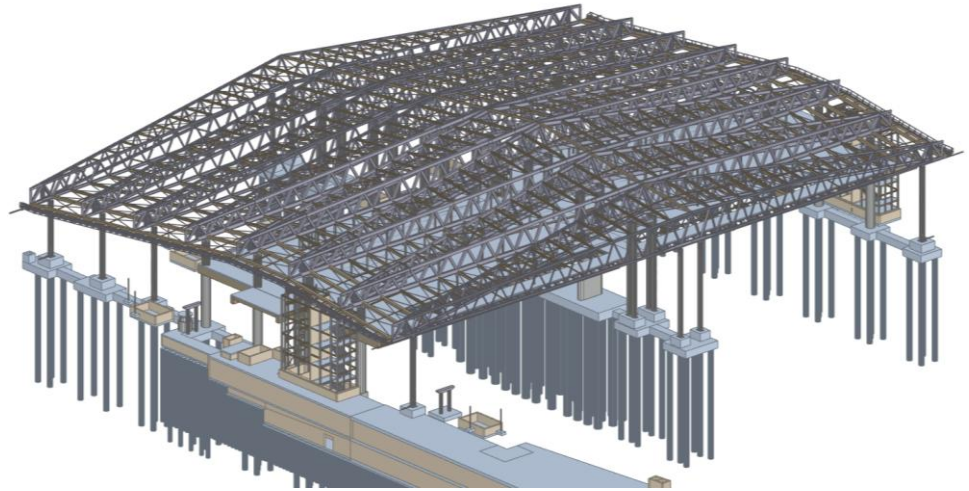
Infraestructuras

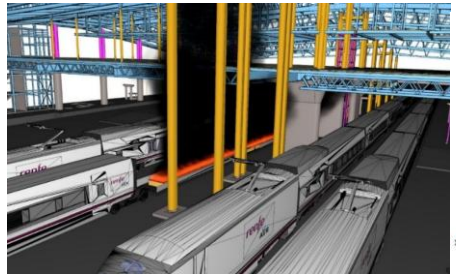
Cliente	CGP Novo Mesto Kolektor
Servicios	Building Sector. Singular Architecture Structural Fire Engineering. Advanced Nonlinear FEM Analysis.
Año	2025
Lugar	Ljubljana, Slovenia

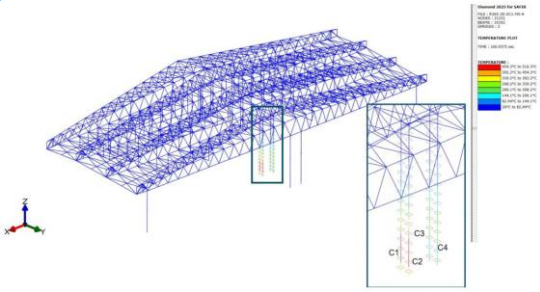
La nueva estación ferroviaria de Liubliana tiene especial importancia por ser un punto estratégico y de gran afluencia dentro de las principales redes de transporte de pasajeros y mercancías.

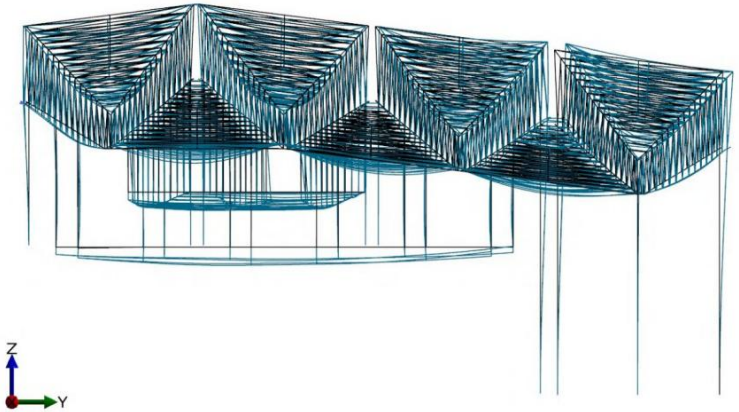
Se recibió el encargo de desarrollar un diseño basado en prestaciones del sistema estructural principal de acero. El objetivo era evaluar la estabilidad y la capacidad portante de la estructura metálica situada sobre las vías ferroviarias.

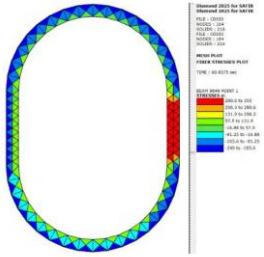
El trabajo incluyó evaluar las prestaciones de la estructura y determinar si el acero podía quedar sin protección en caso de incendio o si eran necesarias medidas de protección pasiva.

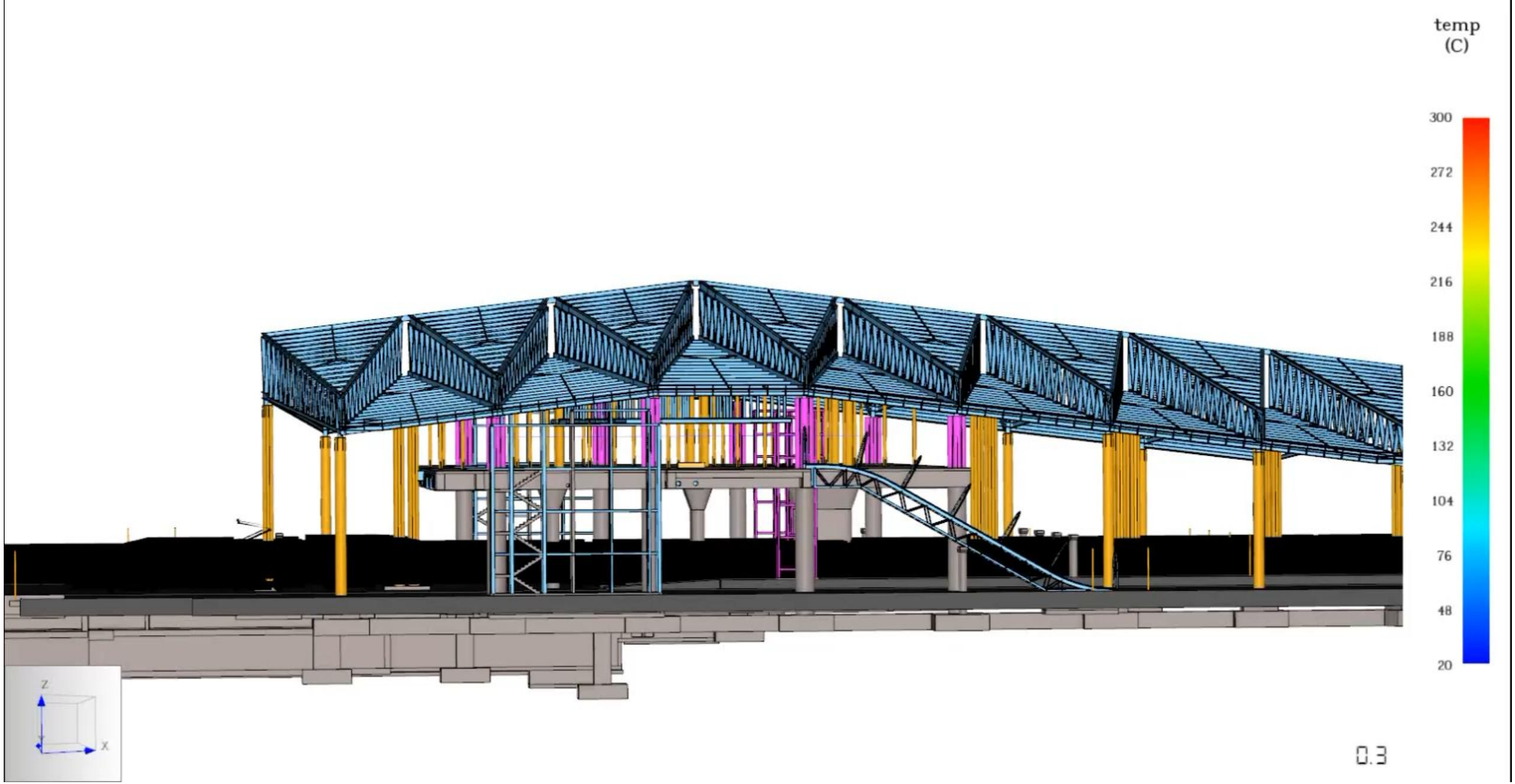










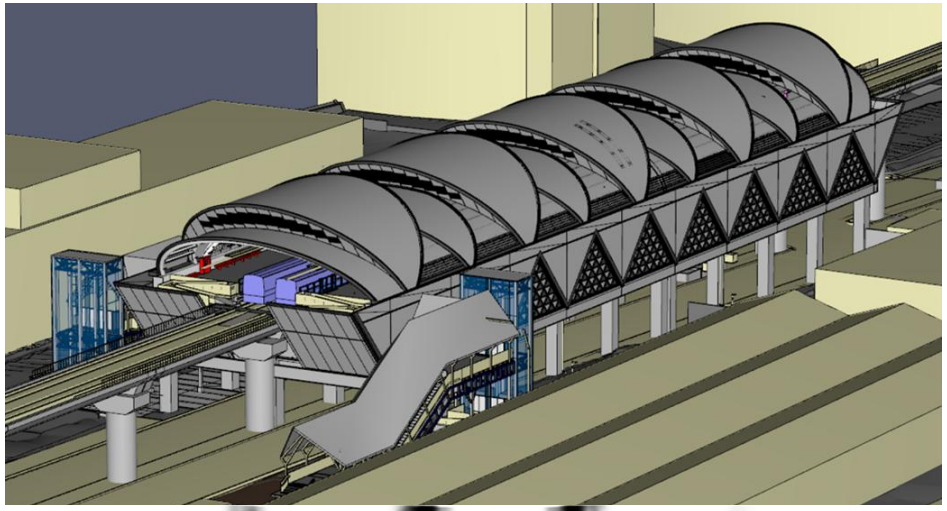

temp
(C)
300
272
244
216
188
160
132
104
76
48
20
Z
X
0.3

Infraestructuras

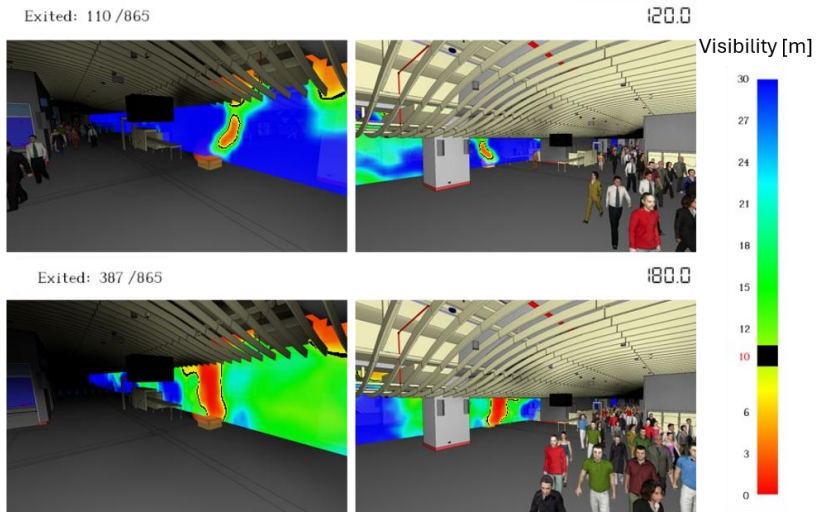
Cliente	IDOM
Servicios	Fire Modelling, Comfort Modelling, Tunnel Ventilation
Año	2024
Lugar	Manila, Philipines

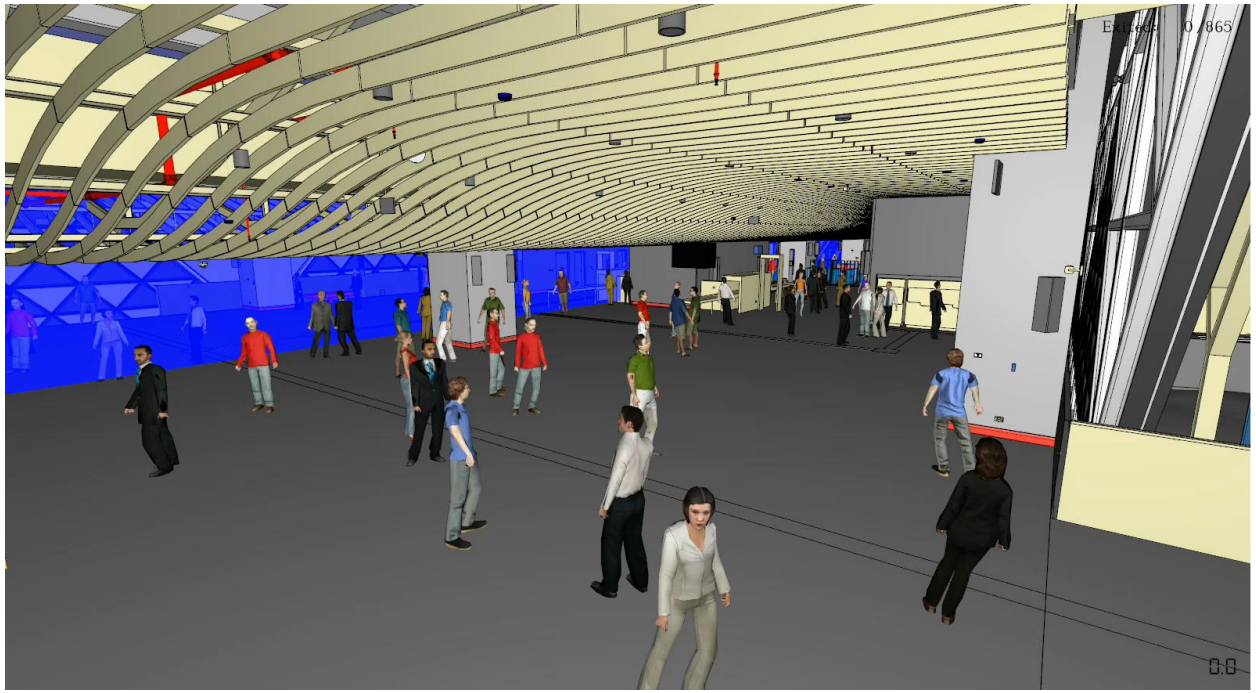
El programa de ampliación ferroviaria de Metro Manila es una de las mayores iniciativas actuales de transporte urbano del Sudeste Asiático, orientada a reducir la congestión y mejorar la conectividad regional. Incluye extensos viaductos elevados, estaciones multimodales y grandes flujos de pasajeros, que requieren soluciones avanzadas de diseño estructural, seguridad contra incendios, evacuación, control de humos y gestión de aglomeraciones.

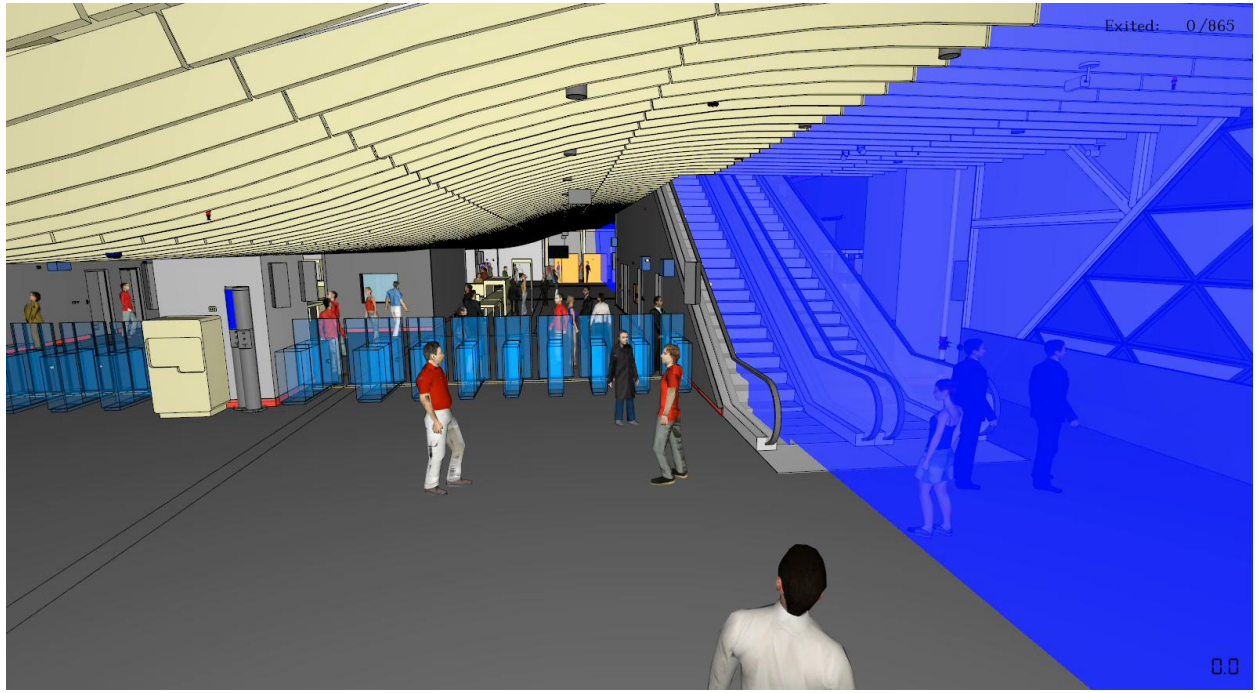
Se realizó una evaluación de seguridad contra incendios basada en prestaciones para comprobar la eficacia de la ventilación natural de humos de la estación, mediante aberturas en cubierta sobre el andén y paneles perforados en las paredes. Dada la complejidad de evaluar estos sistemas con métodos tradicionales, se emplearon simulaciones avanzadas CFD de incendio y humo y modelos de evacuación peatonal.

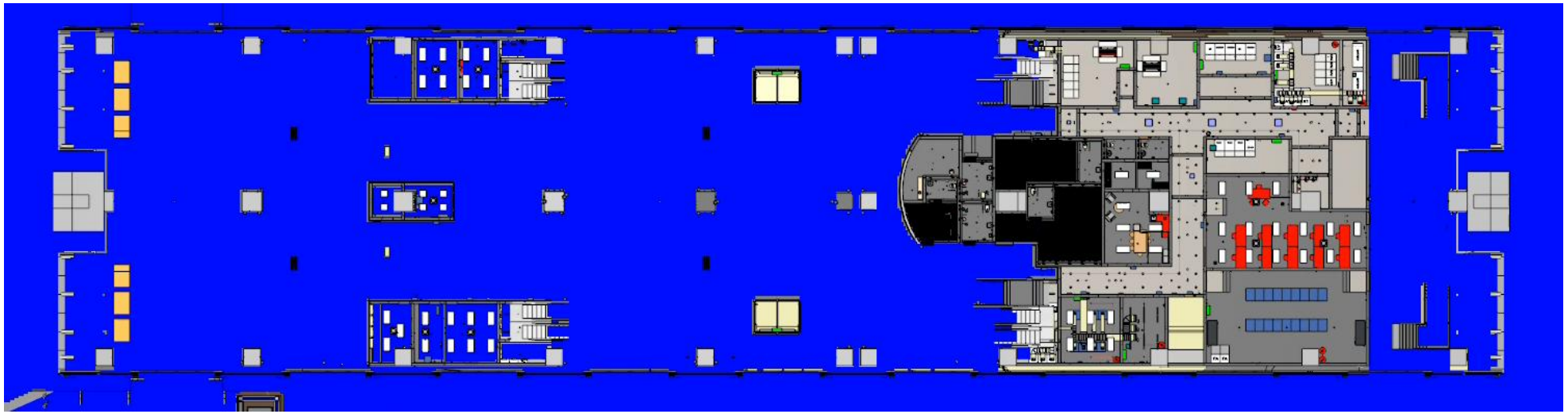







Exited: 0/865
0.0


Exited: 0/865
0.0



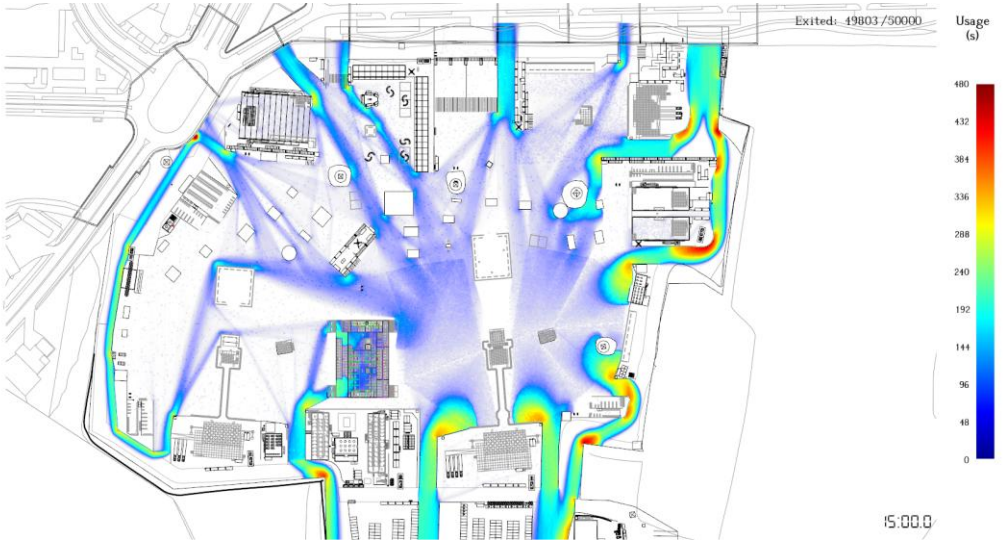
MadCool

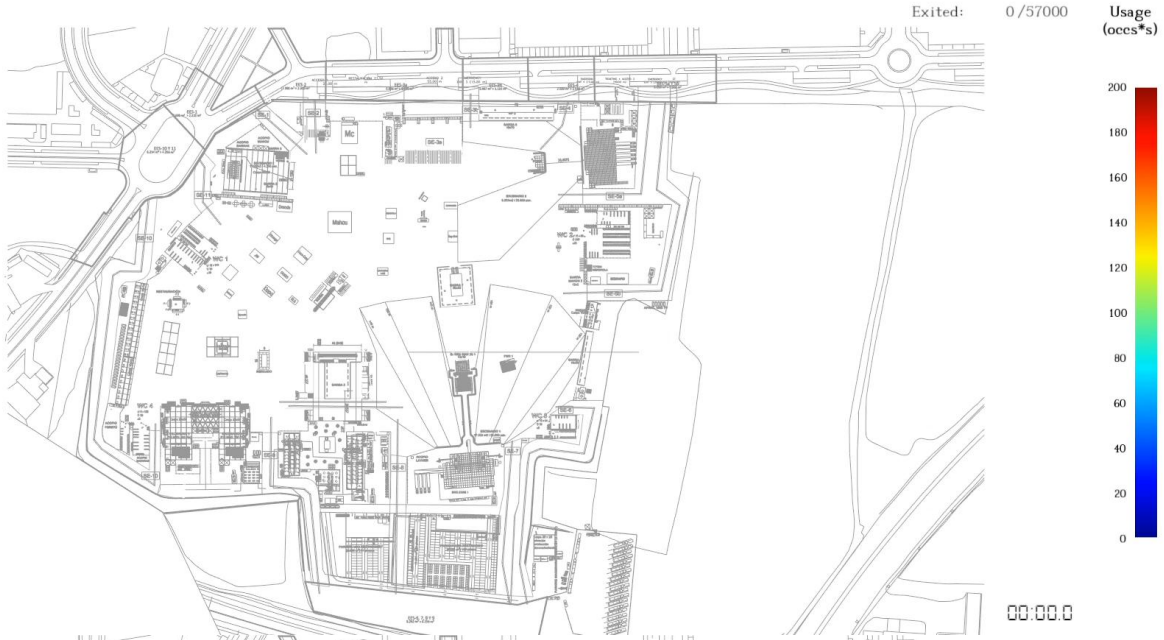
Cliente	MADCOOL
Servicios	Crowd management
Año	2025, 2026
Lugar	Madrid, Spain

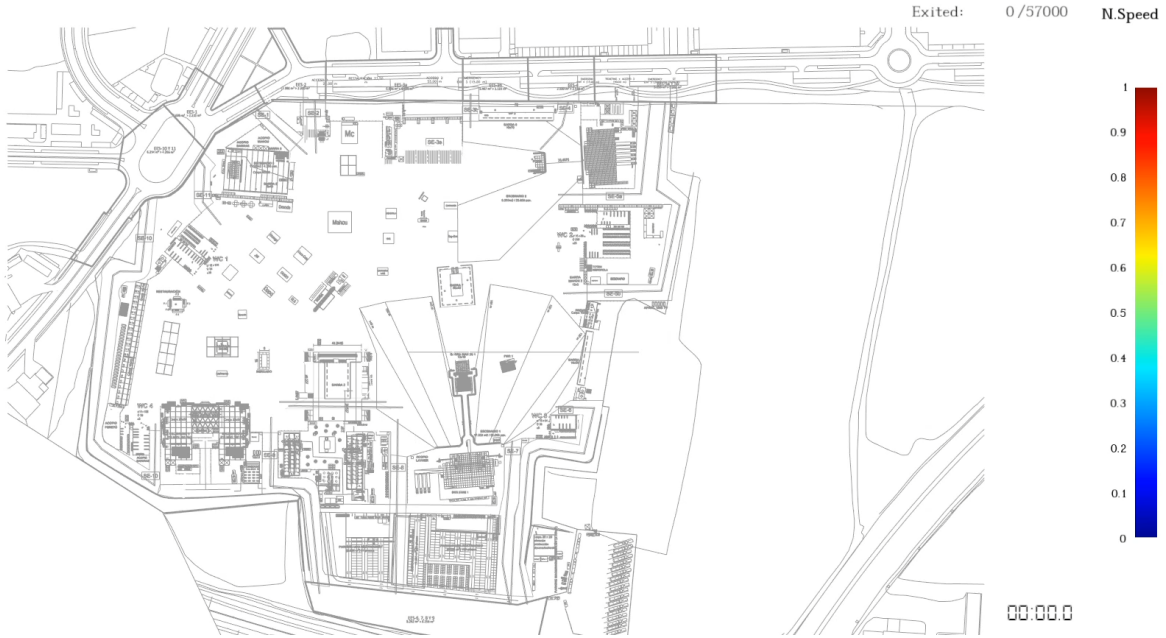
Se realizó un análisis avanzado de evacuación y flujos peatonales para los festivales MadCool 2025 y 2026 en Madrid, uno de los mayores eventos de música en directo de Europa.
El objetivo principal era evaluar la dinámica de movimiento de las multitudes y el funcionamiento de las infraestructuras con el aforo completo, garantizando elevados niveles de seguridad de las personas y una gestión eficiente del público.

Mediante herramientas de simulación dinámica y modelos basados en agentes, se analizó distintos escenarios operativos y de emergencia, incluidos los accesos, las salidas y la evacuación. Se evaluaron velocidades de desplazamiento, densidades y tiempos de evacuación para comprender el comportamiento peatonal en entornos complejos.
El estudio también identificó posibles cuellos de botella y puntos de congestión en condiciones normales y de emergencia. A partir de los resultados se propusieron mejoras en la distribución, la señalización y los procedimientos de control del público, optimizando la circulación segura, la eficacia de la evacuación y la experiencia de los asistentes.

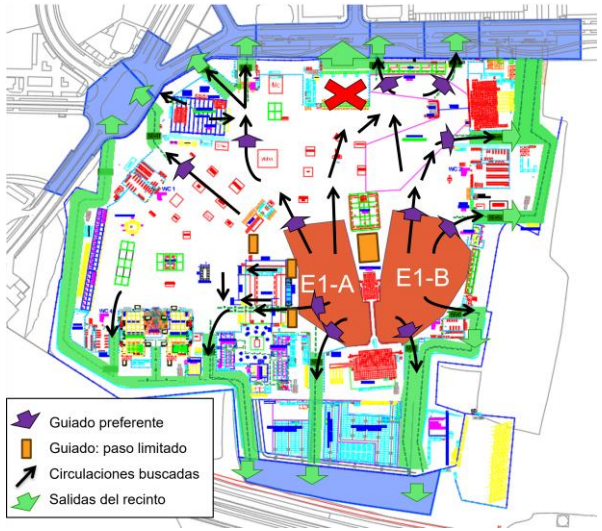


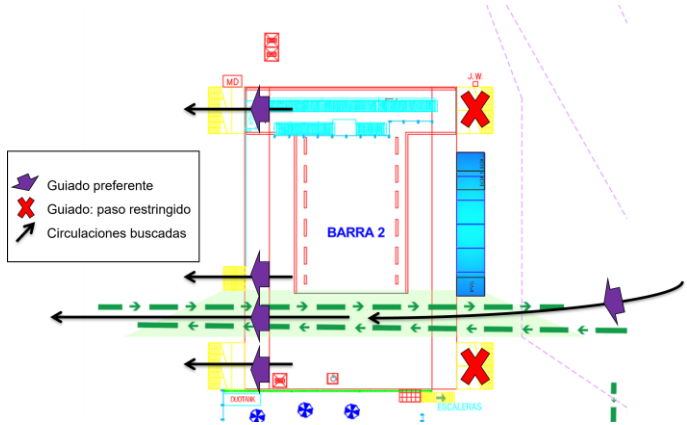



Exited: 0 /57000
Usage (occs*s)
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
00:00.0


Exited: 0 /57000
N.Speed
1
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
00:00.0


00:00.0


E1-A
E1-B
Guiado preferente
Guiado: paso limitado
Circulaciones buscadas
Salidas del recinto


Guiado preferente
Guiado: paso restringido
Circulaciones buscadas
BARRA 2
MD
ESCALERAS

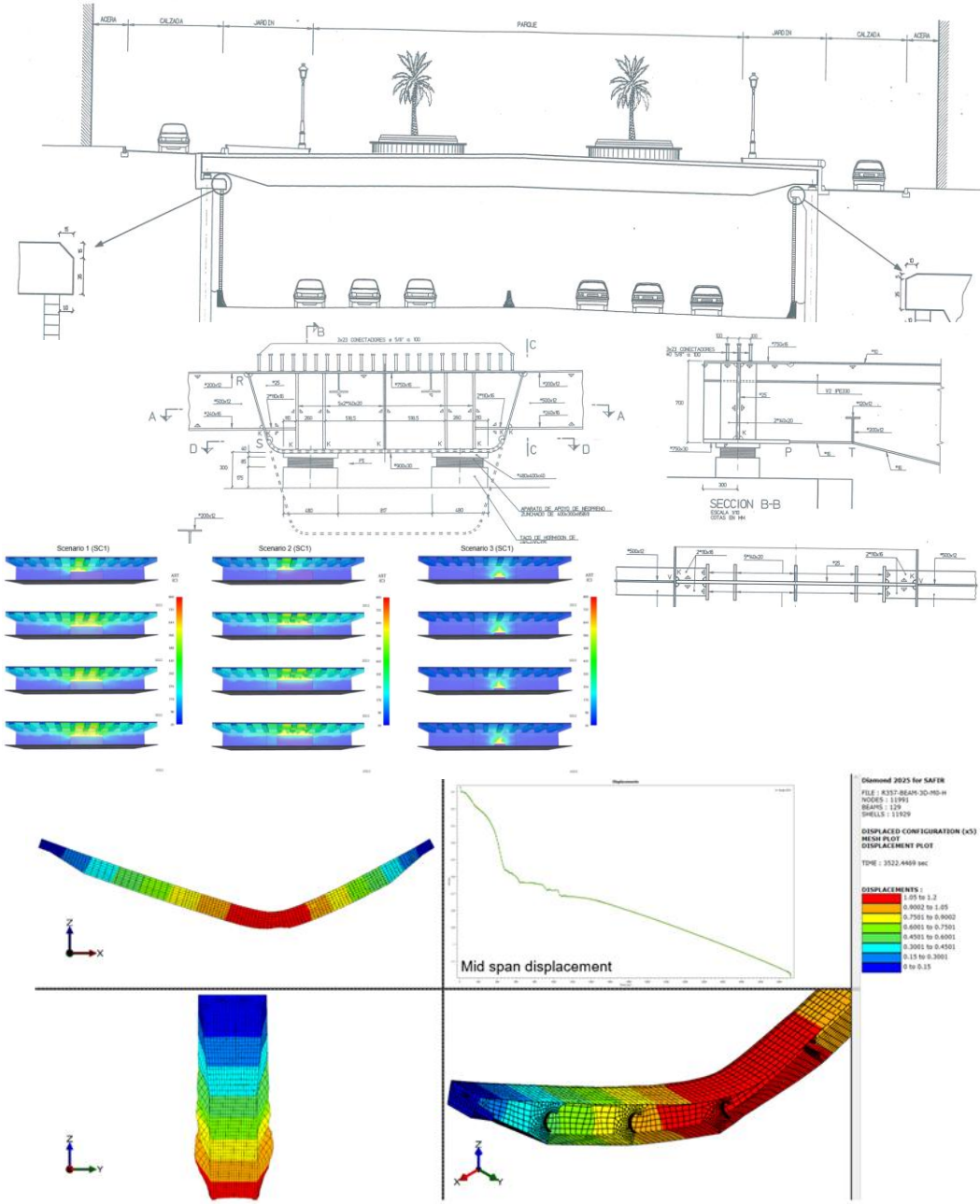
Infraestructuras

Cliente	FCC Construction | Tunnel Ortega Prado
Servicios	Structural Fire Engineering. Advanced Nonlinear FEM Analysis.
Año	2025
Lugar	Malaga, Spain

La estructura del túnel ejecutado mediante excavación a cielo abierto está formada por 42 vigas cajón mixtas de acero y hormigón (180 mm de espesor), de canto variable y comportamiento isostático: 700 mm en los apoyos y hasta 1.400 mm desde un octavo de la luz hasta el centro del vano. Cada viga tiene aproximadamente 34 m de luz y 2,4 m de anchura.

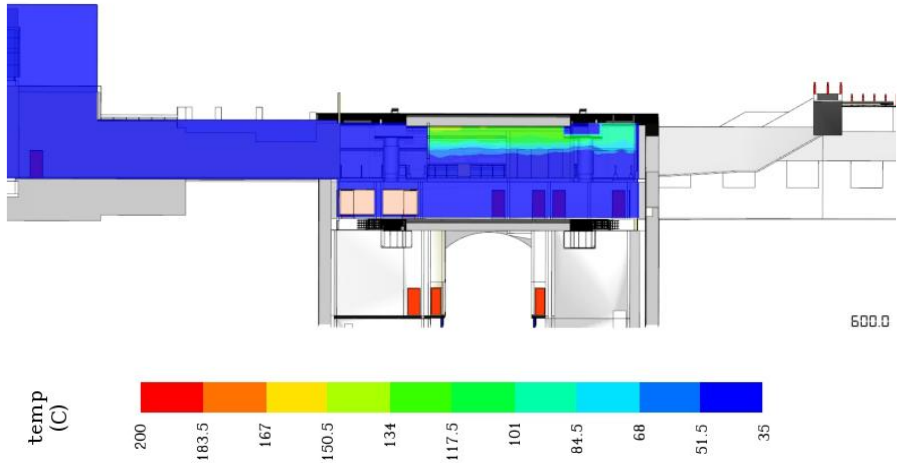
La importancia estratégica del túnel implica que cualquier fallo estructural o reparación prolongada tendría consecuencias inmediatas: colapso del tráfico en la zona occidental de la ciudad, impacto económico en servicios esenciales y alteración directa de la vida cotidiana de los ciudadanos.

En este contexto, el caso se planteó como una intervención crítica para adaptar el túnel a la normativa vigente y al estado del arte del diseño estructural frente al fuego basado en prestaciones (PBSFD). El objetivo era evaluar el comportamiento de la estructura ante escenarios de incendio natural.



Infraestructuras

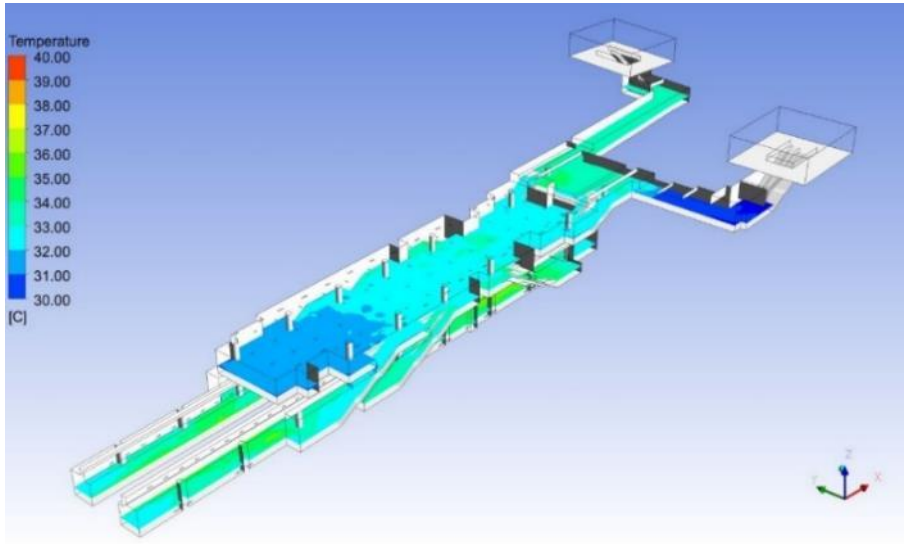
Cliente	Ayesa, TPF Getinsa Euroestudios
Servicios	Fire Modelling, Comfort Modelling, Tunnel Ventilation
Año	2020-ongoing
Lugar	Lima, Peru



El Metro de Lima es un sistema de transporte rápido que presta servicio a Lima y Callao, integrantes del área metropolitana de Lima. Actualmente conecta Villa El Salvador, al sur de Lima, con San Juan de Lurigancho, al noreste.

Se contribuyó al proyecto mediante análisis avanzados de dinámica de fluidos computacional (CFD), centrados en dos aspectos fundamentales:

- Modelización de incendios y humo con FDS (Fire Dynamics Simulator), para evaluar los sistemas de ventilación y control de humos ante diferentes emergencias, garantizando la seguridad de las personas, condiciones de habitabilidad y cumplimiento de normas internacionales.
- Modelización del confort térmico con CFX, para evaluar la distribución del aire, los gradientes de temperatura y el confort de los viajeros en condiciones normales de funcionamiento.



Conclusiones

- Disponemos de herramientas potentes para abordar retos complejos de seguridad contra incendios más allá de las limitaciones de los enfoques prescriptivos.
- Pero una mayor flexibilidad también implica una mayor responsabilidad técnica.
- Debemos representar adecuadamente el incendio y su entorno, incluyendo las variables que realmente determinan la seguridad.
- Las simulaciones avanzadas aportan información valiosa, pero no debemos confundir precisión con exactitud. Los resultados solo son tan fiables como las hipótesis, escenarios, condiciones de contorno y datos de entrada utilizados.
- Los modelos son herramientas potentes para comprender la seguridad contra incendios. Por sí solos no demuestran que exista seguridad.
- Buena física → Criterios relevantes → Datos fiables → Resultados creíbles
- Y recordad siempre: si entran datos basura, salen resultados basura.



JVVA
FIRE & RISK

Gracias por vuestra atención
¿Alguna pregunta?

Gabriele Vigne, PhD
Director | Advanced Technology

Bizkaia
foru aldundia
diputación foral

SFPE
España

OPRA Observatorio de Prevención de Riesgos y Accidentes