



expo**fuego**

CHILE 2023

CONGRESO INTERNACIONAL
DE PROTECCIÓN CONTRA INCENDIO



Desafíos bajo tierra Experiencias en el diseño en infraestructura subterránea

Edith Pacci Leiva

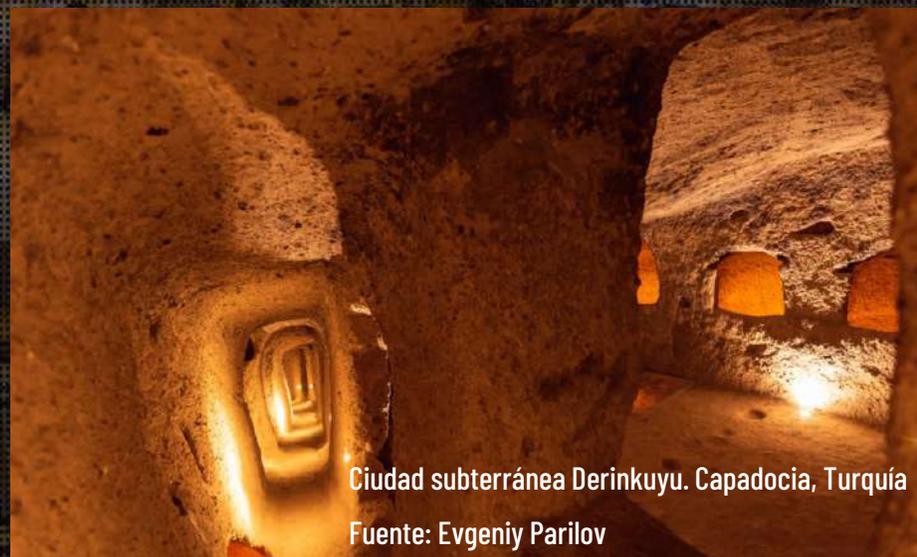


expofuego

CHILE 2023



Salina de Turda. Rumania
Fuente: Melinda Nagy



Ciudad subterránea Derinkuyu. Capadocia, Turquía
Fuente: Evgeniy Parilov



Estación Khovrino. Moscú, Rusia
Fuente: Dmitry Rogachev



Galería de ventilación.
Chuquicamata Subterránea. Chile
Fuente: Codelco | Flickr



T-Centralen. Estocolmo, Suecia
Fuente: Bruno Coelho



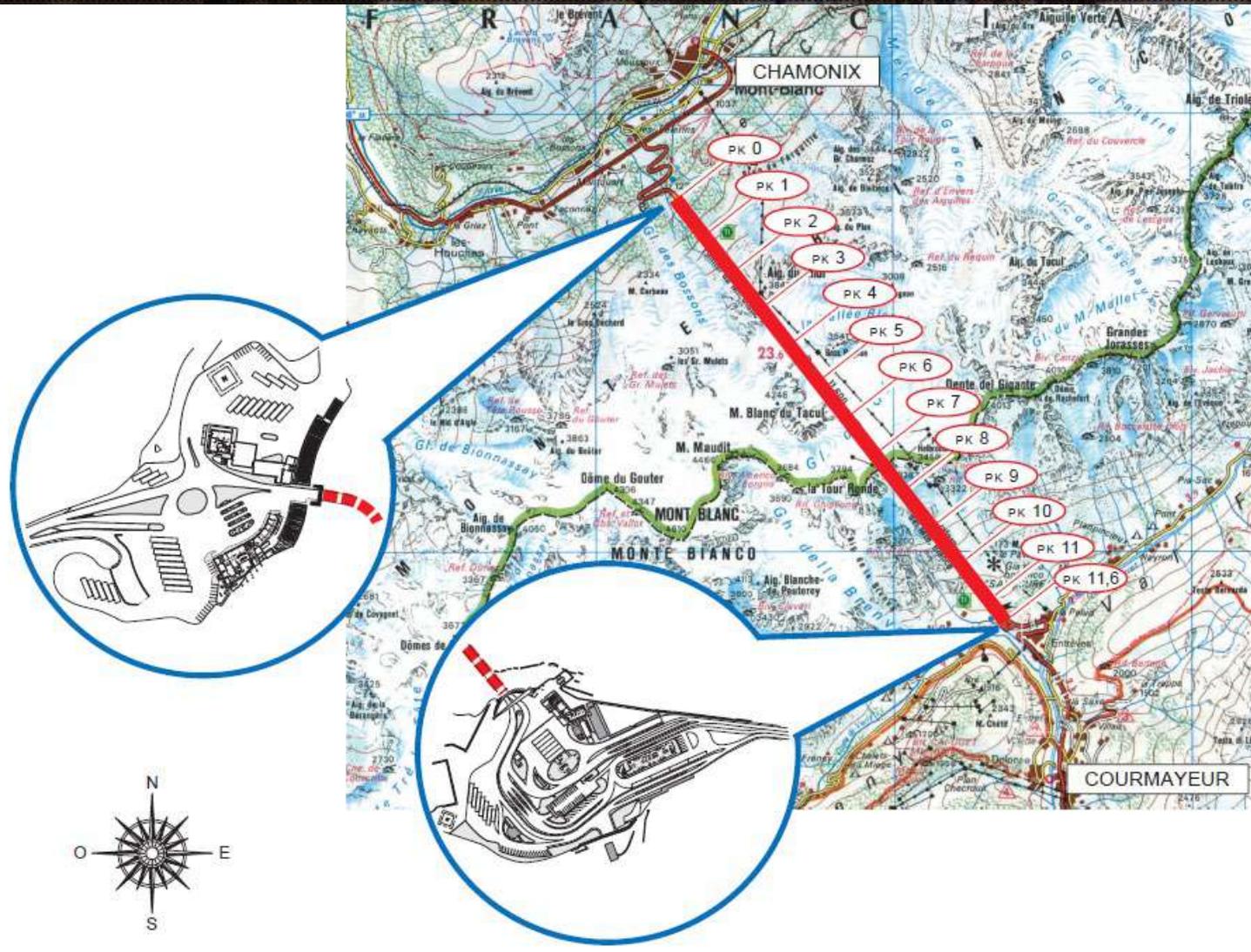
CCLM. Santiago, Chile
Fuente: Cristian Aravena Jara

Mont Blanc (Fr-It, 1999)



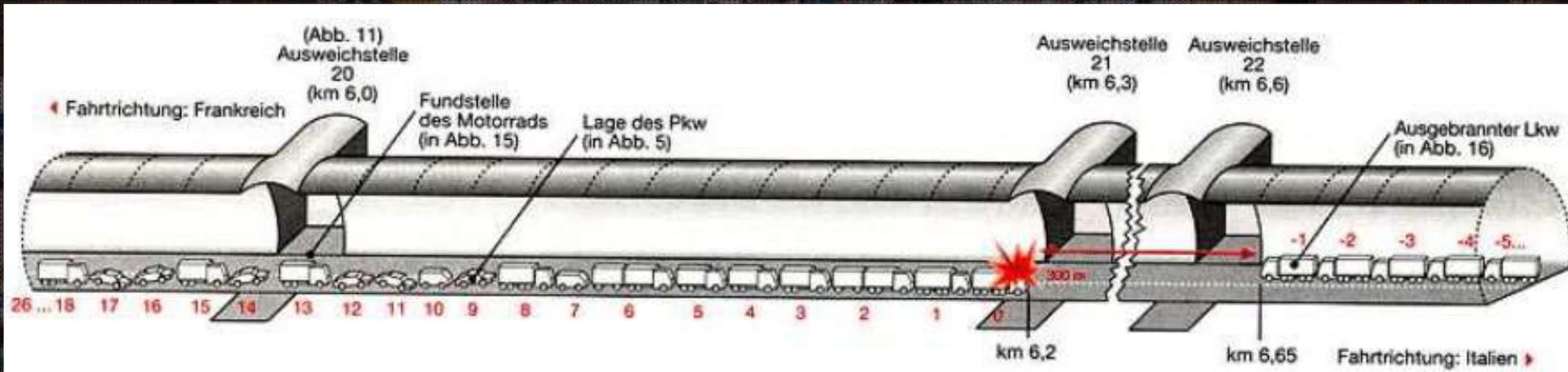
Fuente: Der Spiegel /
Christopher Gunkel

Mont Blanc (Fr-It, 1999)



- El túnel de Mont Blanc se encuentra en los Alpes y une por carretera Francia con Italia bajo el Mont Blanc. El túnel se inauguró en 1965.
- Tiene 11,6 km de longitud y 8,6m de ancho. Es una de las principales rutas de transporte particularmente para Italia que transporta hasta un tercio de sus mercancías hacia el norte de Europa.
- Por 15 años fue el túnel más largo del mundo

Mont Blanc (Fr-It, 1999)



- La investigación concluyó que la tragedia de 1999 tuvo su origen en una colilla encendida lanzada desde la ventana y que se introdujo en el filtro de aire de un camión cargado de harina y margarina.
- El fuego se propagó rápidamente en el interior del túnel. El incendio duró 53 horas y fallecieron 39 personas, la gran mayoría carbonizadas dentro de sus automóviles y otras tratando de escapar a pie.
- El túnel solo se cerró 9 minutos después del incendio y los rescatistas no estaban capacitados.

Fuente: Der Spiegel /
Christopher Gunkel

Desafíos bajo tierra. Experiencias en el diseño de infraestructura subterránea

- **INTRODUCCIÓN A LA PROTECCIÓN PASIVA CONTRA INCENDIOS**
- MARCO NORMATIVO
- LOS ELEMENTOS DE LA PROTECCIÓN PASIVA
- ALCANZANDO LA SEGURIDAD DE VIDA

Estadísticas e incendios

Algunos ejemplos de incendios en túneles con resultado de muerte

País	Año	Túnel	Largo	Origen incendio	Causa	Duración (horas)	Daños	Víctimas
Francia-Italia	1999	Mont Blanc	11,6 km	Camión	Fuga y sobrec.	> 53 horas	Serio, túnel reabre	39
Austria	2002	Tauern	6,4 km	Camión	Motor defecto	N/D	N/D	12
Francia	1972	Vierzy	N/D	Tren pasaj	Colapso	N/D	N/D	108
Austria	1995	Pfänder	6,7 km	Camión y trailes	Colisión	1 hora	Serios daños	3
Japón		Nihonzaka						7
Suiza	2001	San Gotardo	16 km	Camión	Colisión	>48 horas	Colapso en 250 m de túnel	11
Japón	1972	Hokuriku	N/D	Tren pasaj	Comed	N/D	N/D	34
Afganistán	1982	Salang	2,7 km	Columna militar	Explosión	N/D	N/D	700
UK	1987	King Cross Station	N/D	Escalera madera	Grasa y fibras	6 horas	Estación de tren	31
Italia	1996	Isolla delle Femmine	0,14 km	Algibe y bus	Colisión	N/D	Serio. Tunel cierra por 2,5d	5
Países Bajos	1978	Velsen	0,7 km	Autos – 2 HGV	Colisión frontal	1h 30 min	Daños en 30 m	5
Austria	2000	Kaprun	3,3 km	Tren pasaj	Rotura	N/D	Cierre 1 año	155

Fuente: Promat Handbook, 2008

¿Qué factores generan mayor probabilidad de accidentes?

El aumento de densidad del tráfico

La creciente demanda de conexiones subterráneas



¿ENTONCES?

Incremento en la longitud de túneles

Transporte de contenido peligroso

Circulaciones en 2 sentidos sin separaciones

“Las medidas de seguridad deberán ser complementarias y coordinadas, pero antes habrá que entender el problema”

Mayores cargas de fuego debido al aumento de tráfico y mayor capacidad de carga

Defectos mecánicos en vehículos

¿Por qué proteger un espacio subterráneo*?

Seguridad de vida



La importancia de los servicios como:

- Iluminación de emergencia
- Sistemas de extracción de humo
- Vías de escape

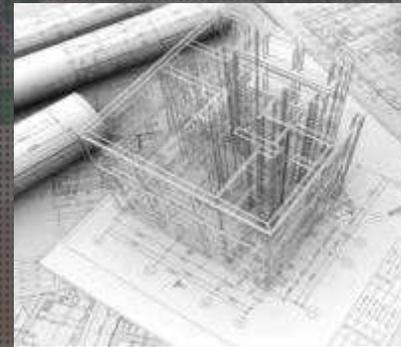
Proteger las instalaciones v/s operación



Caso Mont Blanc:

- Costo de reparación de USD 215 millones.
- Costo económico de USD 270 millones
- Impacto socioeconómico en el área geográfica (Italia) se estima en USD 2 millones.

Seguridad de Proyectos v/s Seguridad de lo Instalado



Se espera que los proyectos mejoren el desempeño de los edificios:

- Una débil inspección hace perder efecto respecto a lo diseñado.
- A proyectos de mayor complejidad, mayor necesidad de cumplir con altos estándares de calidad.
- Desarrollo y aplicación de normas y estándares

* International Association of Fire Service

Causas más frecuentes...

Las causas más frecuentes en un túnel(*) son:

- **Colisiones.**
- **Sobrecalentamiento por fallas eléctricas.**
- Sobrecalentamiento de frenos, neumáticos y motores.
- Colisiones de vehículos pesados
- Riesgos externos.

Según un estudio realizado en Noruega, define que entre los accidentes de transporte de mercancía peligrosa:

78.0% Libera sustancias peligrosas.
28.0% Fuego.
14.0% Explosiones
6.0% Nubes de gas

57% Error humano (USA)

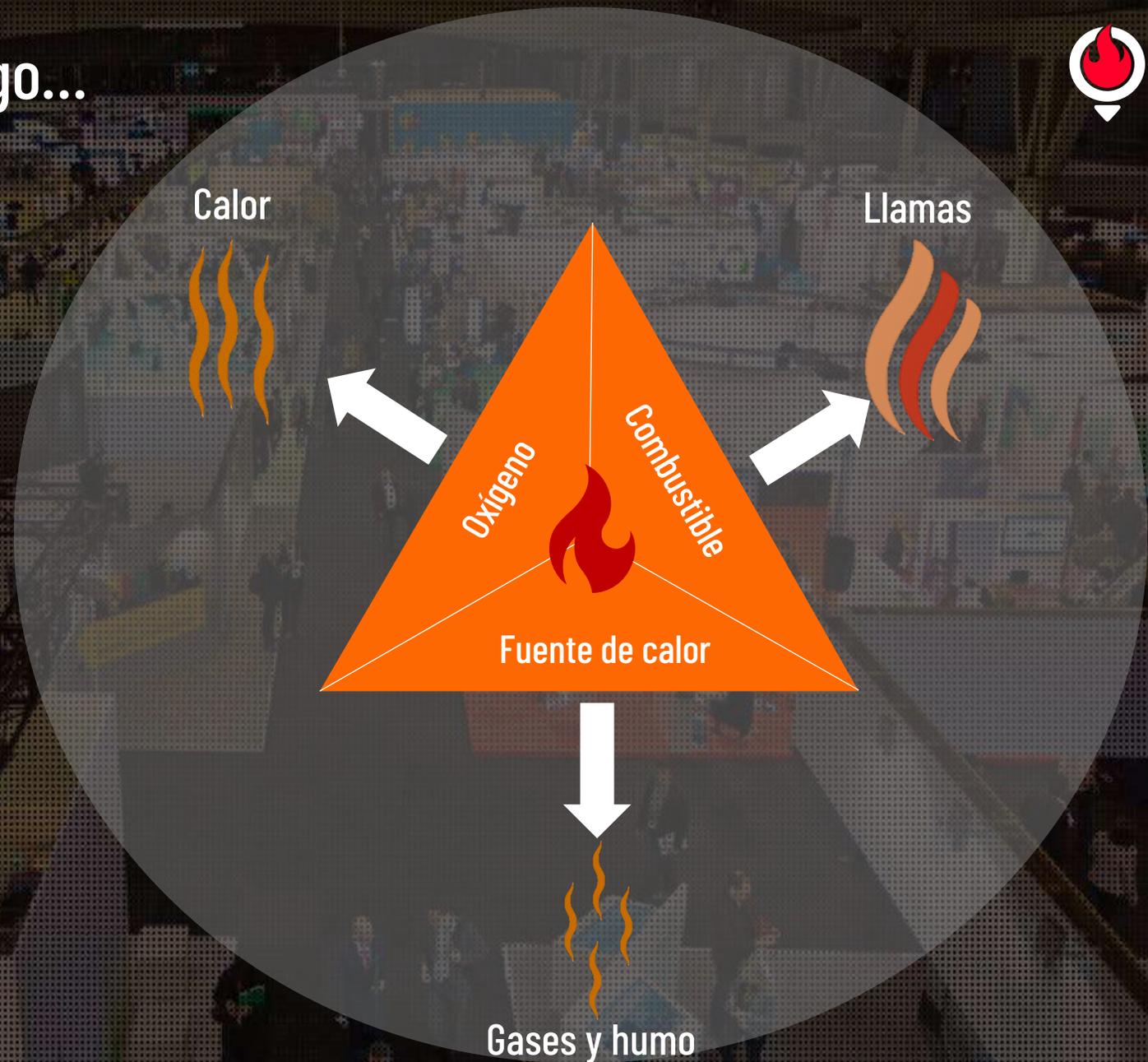
Factores ambientales: alta densidad de tráfico, anchos de vías y curvaturas, rampas y pendientes, entradas de túnel.

* Artículo Fire Science Review: Road Tunnel Fire Safety and Risk por Jonathan Gehandler, 2015.

¿Qué requisitos deberíamos considerar?



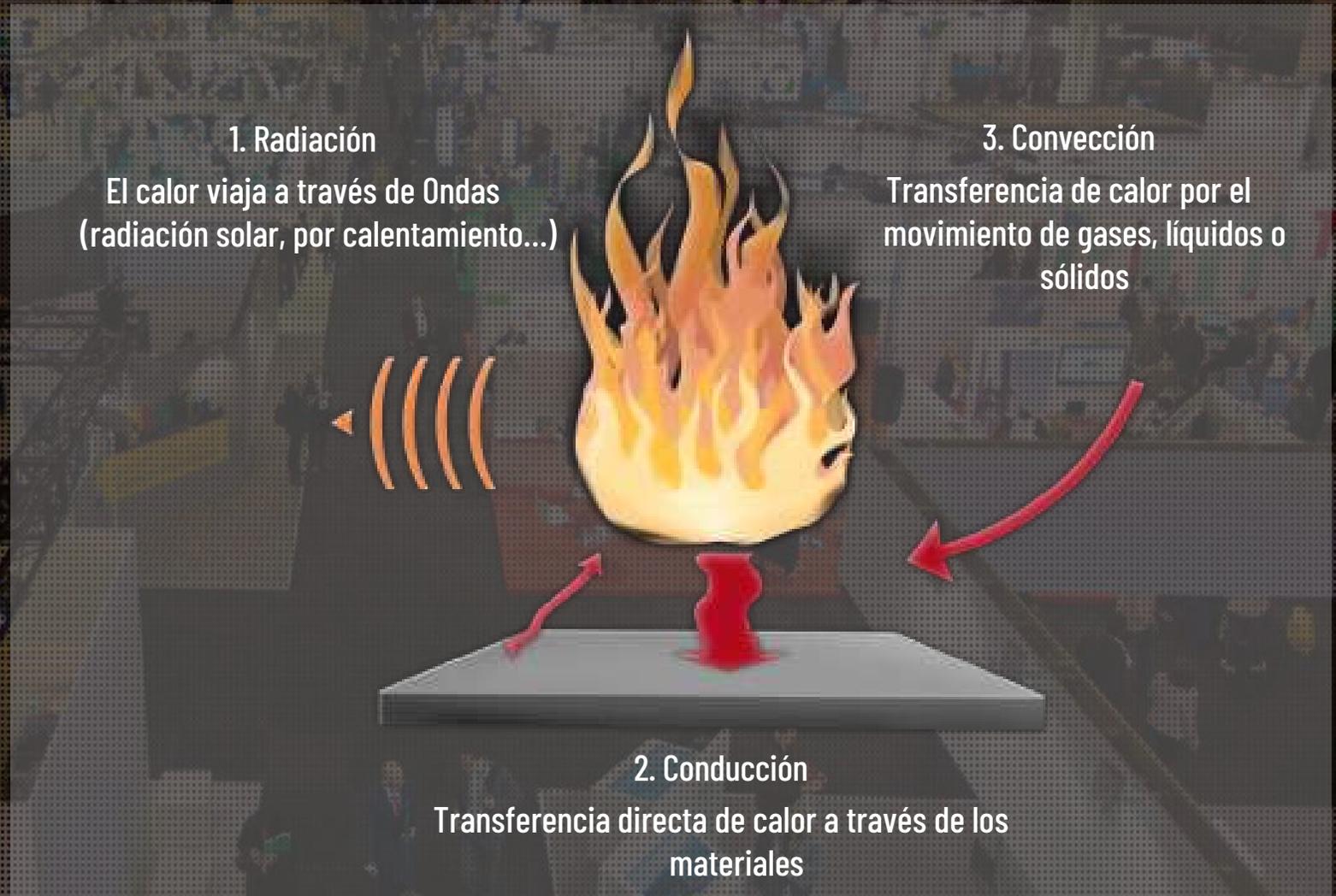
Breve introducción al fuego...



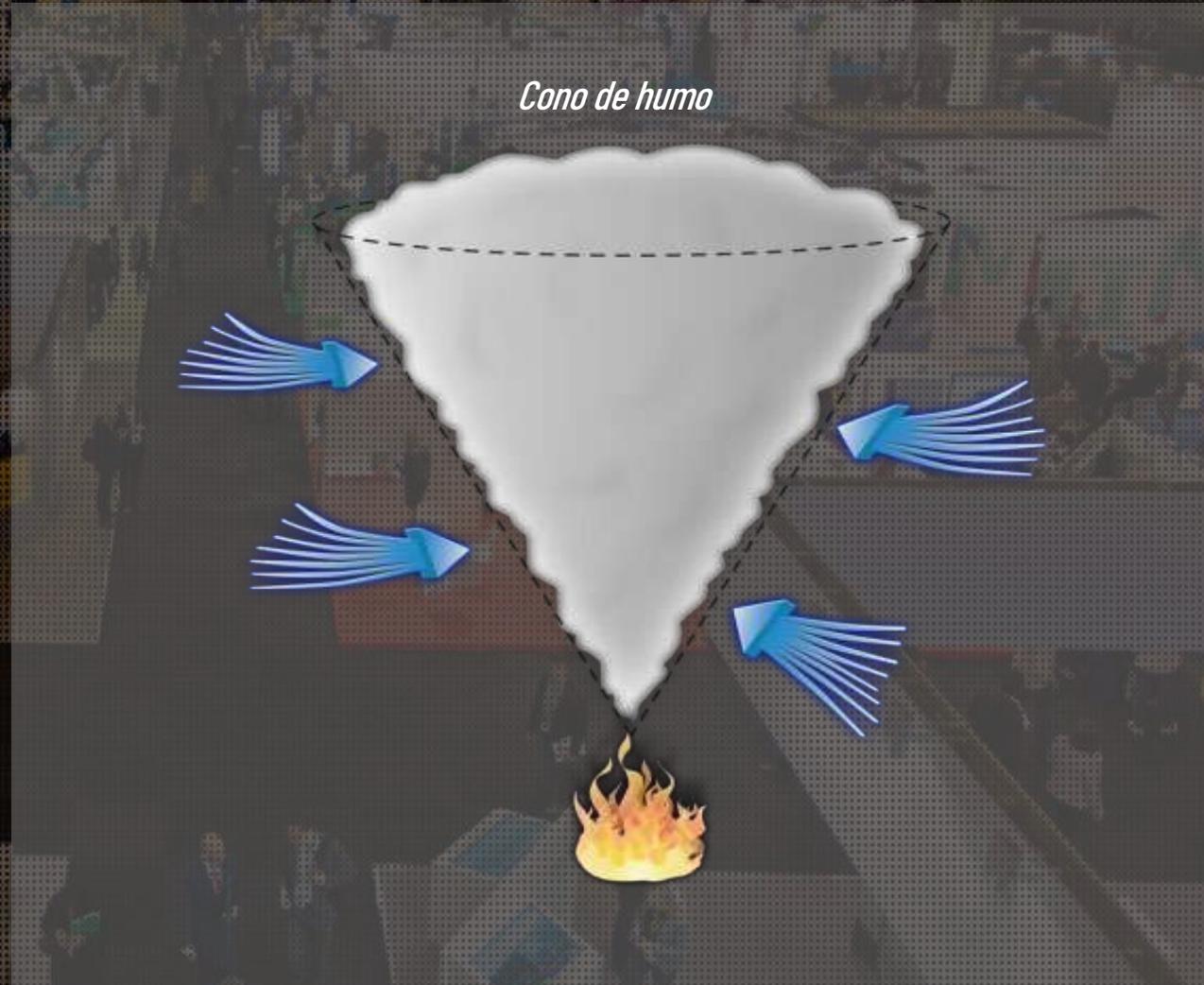
El fuego necesita 3 componentes básicos para iniciarse

¿Cómo es la transferencia de calor?

- El calor es una energía en tránsito
- La transferencia de calor va desde el objeto más caliente al objeto más frío

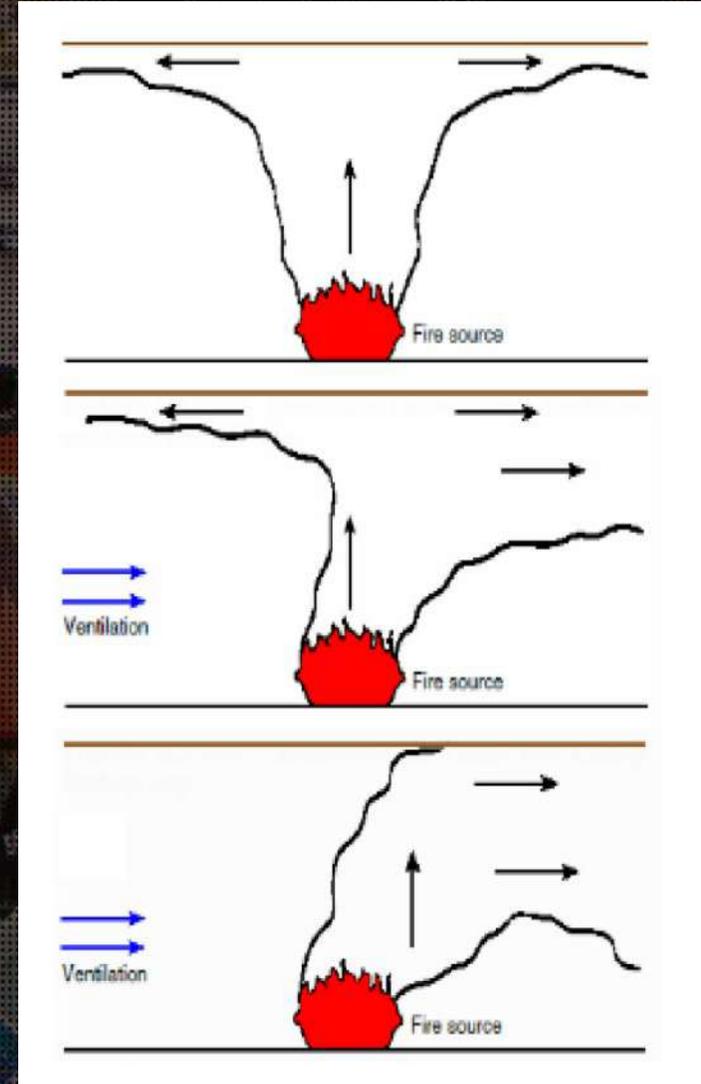
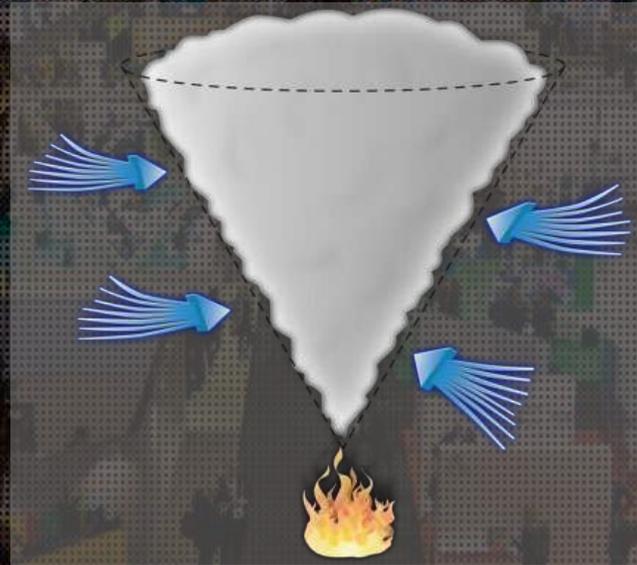


¿Cómo se mueven los gases?



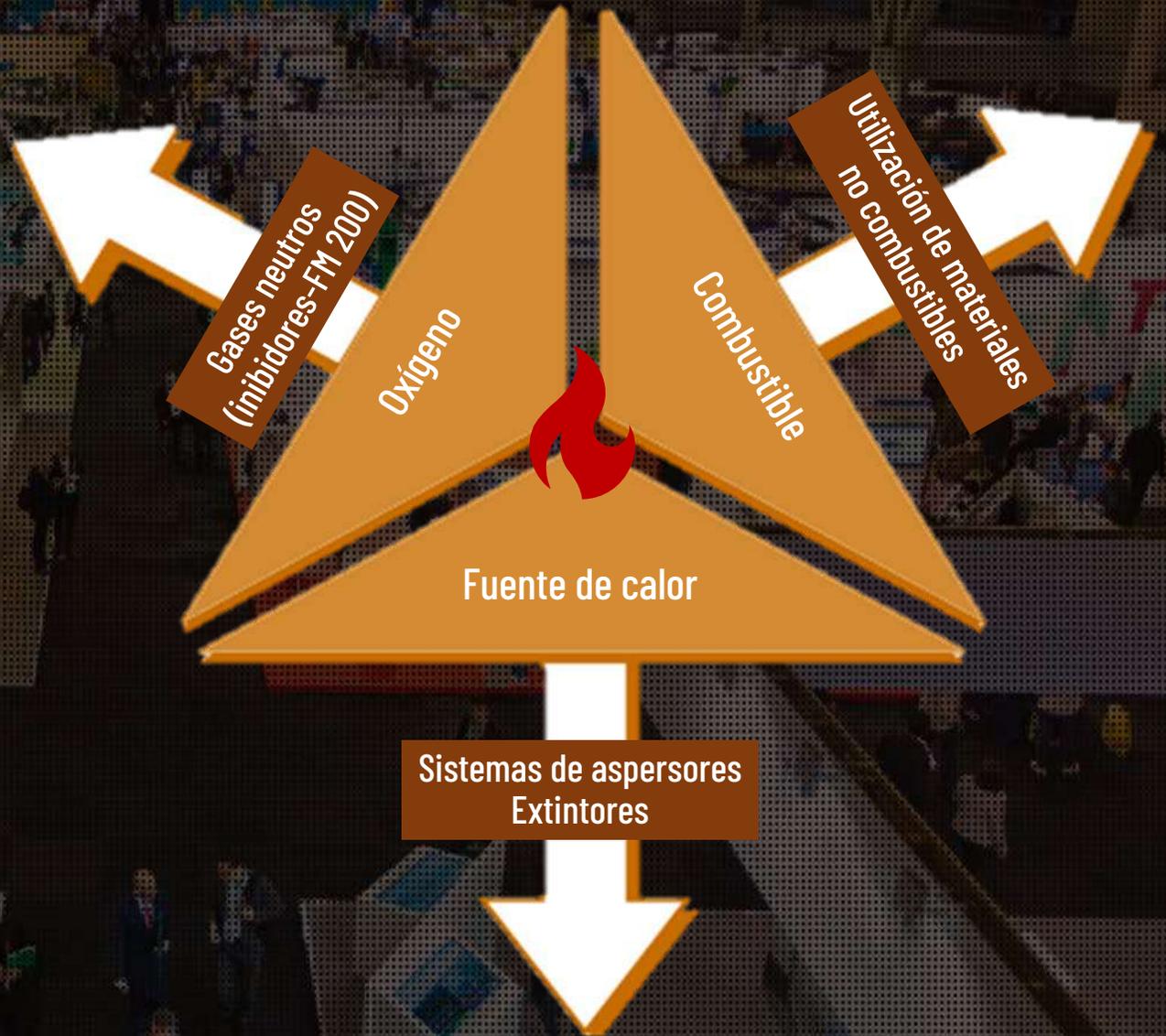
Inicialmente, los gases calientes se mueven hacia arriba y hacia fuera. Esto arrastra el aire

¿Cómo se mueven los gases?



El humo se eleva y fluye en un sentido o en ambos dependiendo de la alta o baja velocidad longitudinal

Para que no produzca fuego es necesario eliminar alguno de los componentes



¿Y en un túnel?

CONTENER EL FUEGO

Las causas más comunes de muerte son por inhalación de humo y gases tóxicos

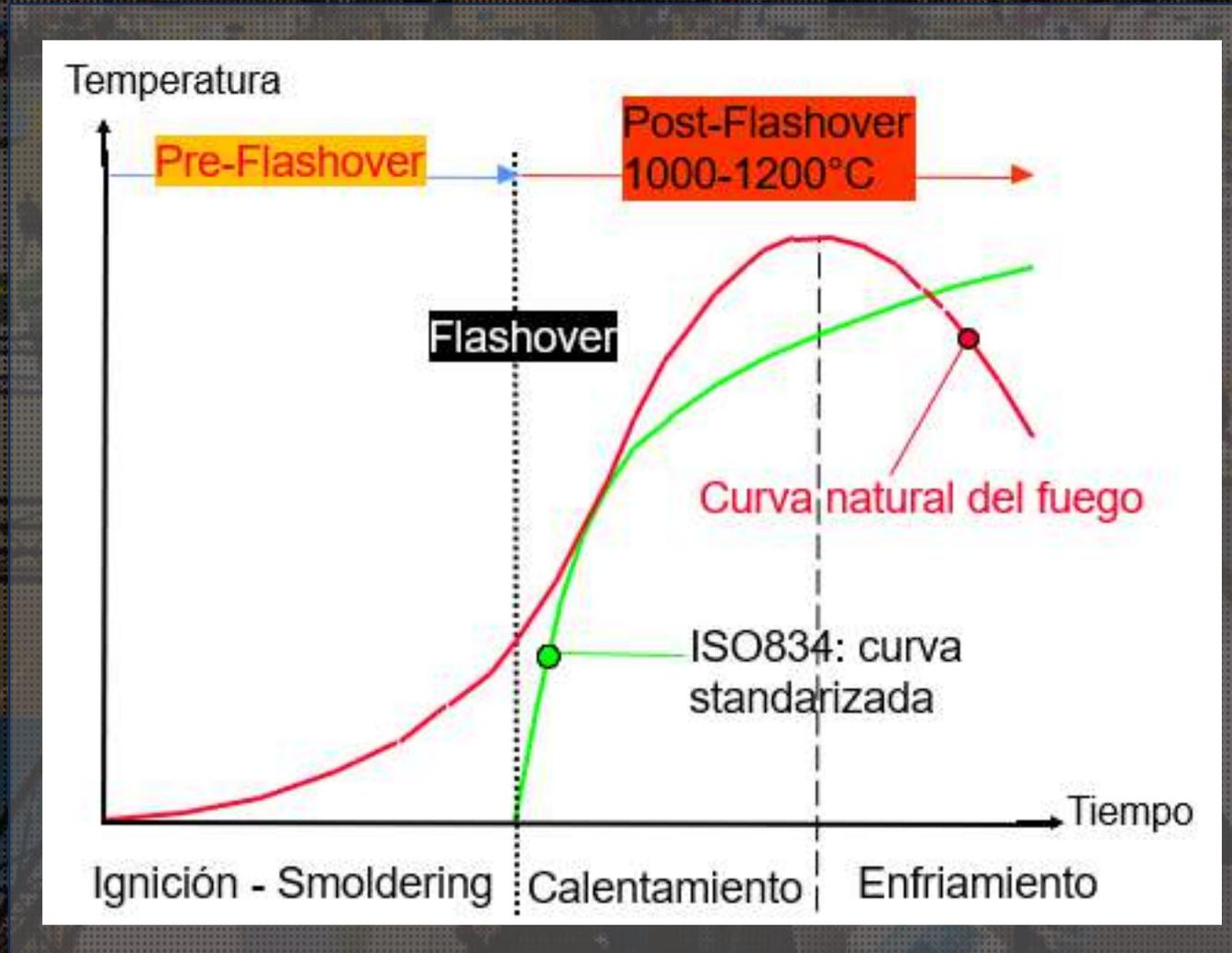
Efecto horno

Alta radiación

Efecto cañón

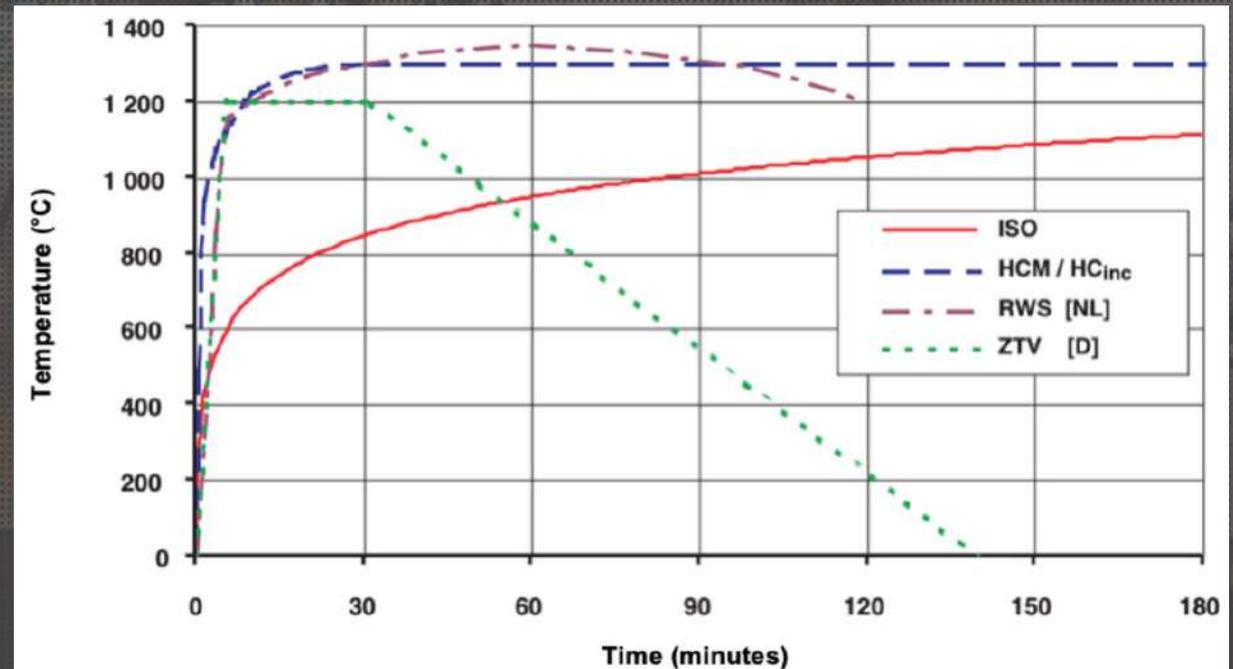
Dimensionamiento de las vías de escape

¿Qué es el Flashover?



Curvas de fuego

La temperatura en un túnel asciende muy rápidamente al principio, alcanzando hasta 1200°C – 1300°C, ocasionando un intenso choque térmico que afecta al hormigón y al acero

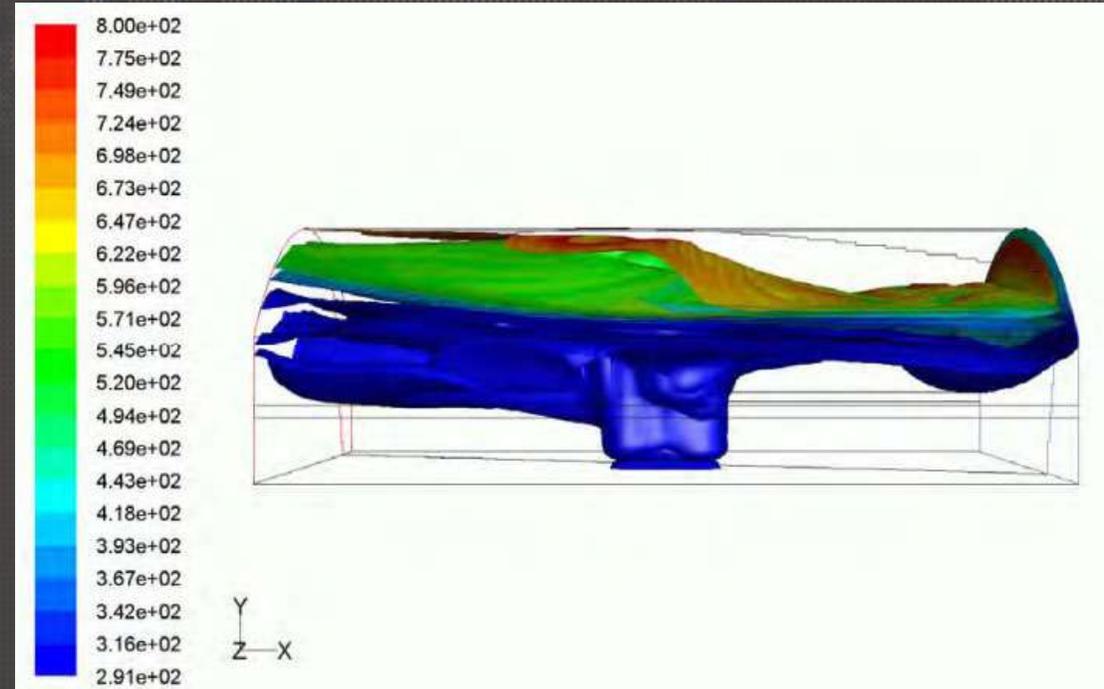


Otras herramientas necesarias: Modelos de Diseño y Evaluación

Modelo CFD Computational Fluid Dynamic

Permite una simulación que toma en cuenta_

- la geometría del túnel
- la potencia del incendio
- el estado de la ventilación



Otras herramientas necesarias: Ensayos

Ensayos in situ

- Máquina de humos calientes desarrollado por Tunnel Safety Testing



Ensayos en instalaciones experimentales



Desafíos bajo tierra. Experiencias en el diseño de infraestructura subterránea

- INTRODUCCIÓN A LA PROTECCIÓN PASIVA CONTRA INCENDIOS
- **MARCO NORMATIVO**
- LOS ELEMENTOS DE LA PROTECCIÓN PASIVA
- ALCANZANDO LA SEGURIDAD DE VIDA

Una primera observación de nuestras normas:

Manual
Recomendaciones
de Estándares
Generales para
Proyectos de
Túneles 2023

Manual de
Carreteras V3:
Instrucciones y
Criterios de
diseño 2023

Reglamento de
Seguridad
Minera DS32

Salvar Vidas es siempre un objetivo
de protección

- No hay un número ni **parámetros de diseño**
- No se mencionan **métodos de diseño** aceptados
- No se disponen de **normas** de apoyo nacionales...
- No hay indicaciones sobre **"security"** v/s **"safety"**

Estándares relacionados con el diseño de túneles

Normas NFPA

Tres normas que se refieren al ambiente subterráneo

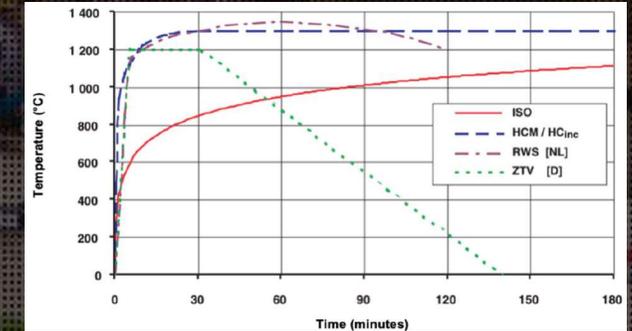
- **NFPA 130**, Norma para los sistemas ferroviarios de guía fija para tránsito y pasajeros
- **NFPA 502**, Norma para túneles de carretera, puentes y otras carreteras de acceso limitado
- **NFPA 520**, Norma sobre espacios subterráneos

Asociación Mundial de Carreteras PIARC

Publicaciones de directrices sobre el control del fuego y del humo

- *Fire and Smoke Control in Road Tunnels, 1999*

“Criterios de proyecto de la AIPCR para la resistencia al fuego de las estructuras de túneles en carreteras”



TIPO DE TRÁFICO	ESTRUCTURA PRINCIPAL				ESTRUCTURA SECUNDARIA (4)			
	Sumergido bajo/dentro superestructura	Túnel en terreno inestable	Túnel en terreno estable	Túnel artificial	Conductos de aire (5)	Salida de emergencia al exterior	Salida de emergencia a otro tubo	Refugios (6)
Coches, furgonetas	ISO 60 min	ISO 60 min	Ver nota (2)	Ver nota (2)	ISO 60 min	ISO 60 min	ISO 60 min	ISO 60 min
Camiones cisternas	RWS/ HCinc 120min (1)	RWS/HC 120 min (1)	Ver nota (3)	Ver nota (3)	ISO 60 min	ISO 60 min	RWS/ HCinc 120min	RWS/ HCinc 120min (7)

Propuesta / Criterios

Debe prestarse atención a la resistencia al fuego del sistema de ventilación con el fin de que las prestaciones previstas en proyecto no se vean mermadas ante un fallo.

Por tanto, es necesario examinar las consecuencias del colapso de los conductos en caso de incendio.

Las salidas de emergencia se usan solamente durante la primera fase del incendio para la evacuación de la gente.

Debe ser factible poder utilizar estas vías por lo menos durante 30 minutos.

Este periodo puede ser mayor en caso de que se empleen también por los equipos de emergencia.

Para evitar que se extienda el incendio a un tubo adyacente o hacia una galería de evacuación, las puertas de emergencia y los nichos de seguridad, así como los equipamientos situados entre los 2 tubos, deben resistir durante un periodo de tiempo determinado.

Todas las puertas de emergencia y la construcción que las rodea, incluyendo el marco de la puerta deben resistir al menos 30 minutos de exposición al fuego.

Para una puerta situada entre 2 tubos de circulación se requiere mucho más tiempo de resistencia, por ejemplo 1 o 2 horas.

Resistencia de los equipamientos al fuego

En términos de resistencia a altas temperaturas, los equipamientos de túnel y los cables se pueden clasificar por su resistencia al fuego según estén protegido o no.

Equipamiento protegido y los cables con niveles variables de RF como : cables RF CWZ por 3 horas; ventiladores por 1 o 2 horas

Equipamiento no protegido como señales de tráfico, cámaras y altavoces de información funcionan con temperaturas de hasta 50°C: luminarias, señales de tráfico (pantalla de policarbonato, carcasas de acero inoxidable), cámaras (lente, carcasas de aluminio), altavoces (GRP).

Todos los herrajes empleados en la fijación de los equipamientos a las estructuras deberán ser tenidos en cuenta en función de su comportamiento al fuego.

¿Entonces?

- La dispersión normativa es una debilidad que se puede traducir en proyectos poco integrados y quizás sin unos objetivos claros de seguridad
- El marco normativo internacional puede ser una herramienta para mejorar e implementar un concepto de estrategia PCI
- Las normas internacionales permiten identificar problemas no cubiertos por las normas nacionales

Desafíos bajo tierra. Experiencias en el diseño de infraestructura subterránea

- INTRODUCCIÓN A LA PROTECCIÓN PASIVA CONTRA INCENDIOS
- MARCO NORMATIVO
- **LOS ELEMENTOS DE LA PROTECCIÓN PASIVA**
- ALCANZANDO LA SEGURIDAD DE VIDA

¿Por qué proteger un túnel?

1° Objetivo: Prevención

- Prevenir eventos críticos que pongan en peligro la vida humana, el medioambiente y las instalaciones del túnel

2° Objetivo: Reducir consecuencias (pre-requisitos para)

- Que personas involucradas en el incidente puedan ser rescatadas
- La intervención inmediata de los usuarios de la vía para evitar mayores consecuencias
- Asegurar una actuación eficaz de los servicios de emergencias
- Proteger el medioambiente
- Limitar daños materiales

Para garantizar la seguridad en el tráfico rodado, se deben tomar las medidas estructurales, técnicas y organizativas necesarias, todas las medidas de seguridad deben corresponder a la última tecnología y aplicarse a todos los interesados.

9 Elementos de protección

#1 Resistencia al fuego de los materiales de construcción

#2 Control en el interior de los edificios

#3 Medios de egreso

#4 Compartimentación

#5 Detección y Alarma

#6 Sistemas de protección activa y pasiva

#7 Sistema de control y evacuación de humos

#8 Respuesta de servicios de emergencias

#9 Sistemas de ventilación

#1 Resistencia al fuego de los materiales de construcción

- Sistemas ensayados, aprobados y listados (**)
- Disponibilidad de sistemas con información coherente y aplicables



Resistencia del hormigón

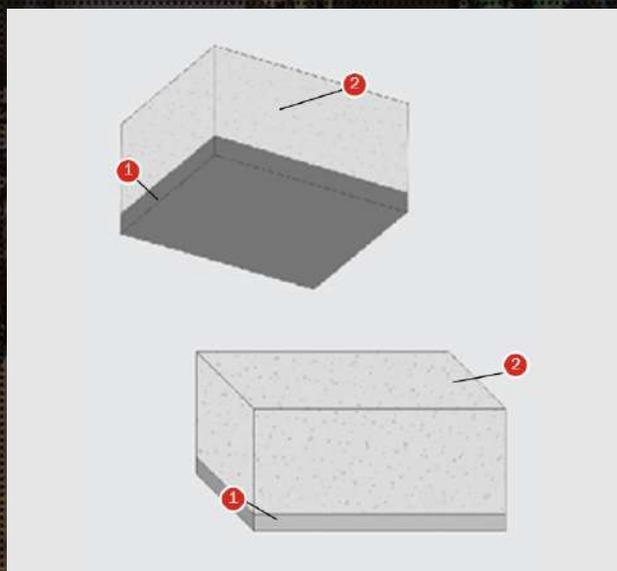
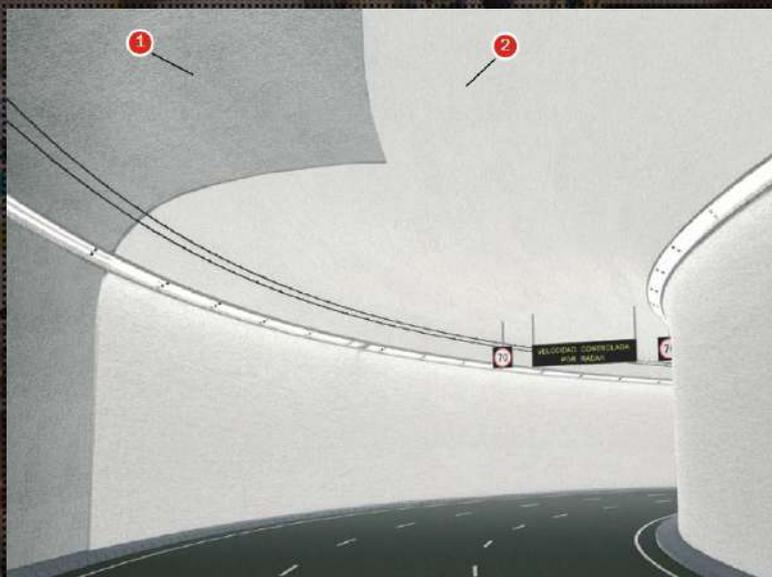
- ¿Qué tipo de fuego?
- ¿Cuánto tiempo de exposición?
- ¿Qué tipo de hormigón?
- ¿Contenido de humedad?
- ¿Densidad?
- ¿Aditivos? (silicio, calcáreo...)

Spalling o “desconchado”

Su causa es la vaporización del agua contenida en el hormigón con efectos explosivos sobre la zona más superficial

#1 Resistencia al fuego de los materiales de construcción

Ejemplo: mortero proyectado



ENSAYO

Norma: Curva de fuego RWS/HCM

Laboratorio Efectis Nederland

N° Ensayo: 2010-Efectis-R0531

SOLUCIÓN

(1) Estructura de hormigón / Forjados

(2) Tecwool 825 (espesor dependerá de la RF requerida y características de la construcción)

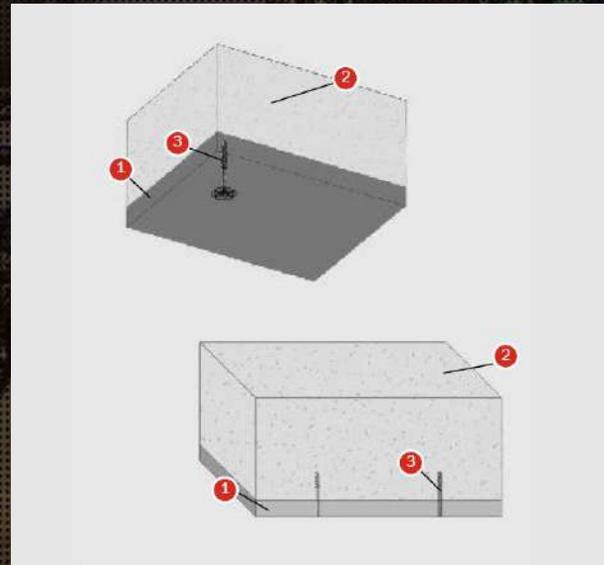
APLICACIÓN

Tecwool 825 se proyecta con una máquina neumática sobre una superficie limpia y no requiere de imprimación ni malla previa para la adherencia.

Fuente: Mercortecresa | Synixtor

#1 Resistencia al fuego de los materiales de construcción

Ejemplo: encofrado perdido



ENSAYO

Norma: Curva de fuego RWS

Laboratorio TECNALIA

N° Ensayo: 29232

SOLUCIÓN

- (1) Paneles Tecbor 40 mm
- (2) Estructura de hormigón
- (3) Anclaje de acero inoxidable IDMR 3/6

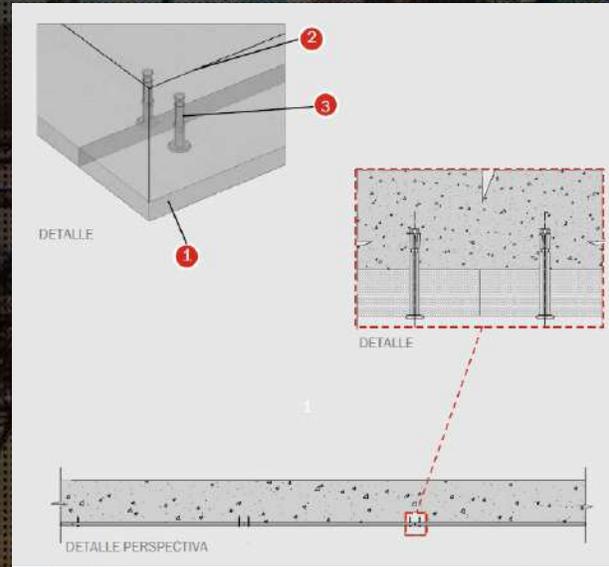
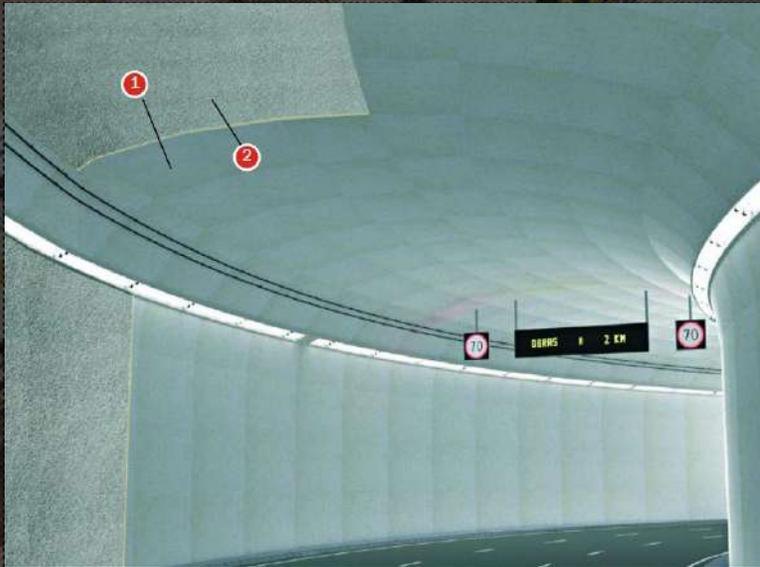
DESCRIPCIÓN DE MONTAJE

Antes de instalar, perforar los paneles Tecbor 40mm con una broca M8. Insertar los anclajes de acero inoxidable IDMR 3/6 y sellar la perforación central con masilla. Colocar el panel como encofrado perdido con juntas a tope. Posteriormente, proceder al vertido del hormigón.

Fuente: Mercortecresa | Synixtor

#1 Resistencia al fuego de los materiales de construcción

Ejemplo: por fijación



ENSAYO
Norma: Curva de fuego RWS / HCM
Laboratorio Efectis Nederland
N° Ensayo: 2015-Efectis-R000911

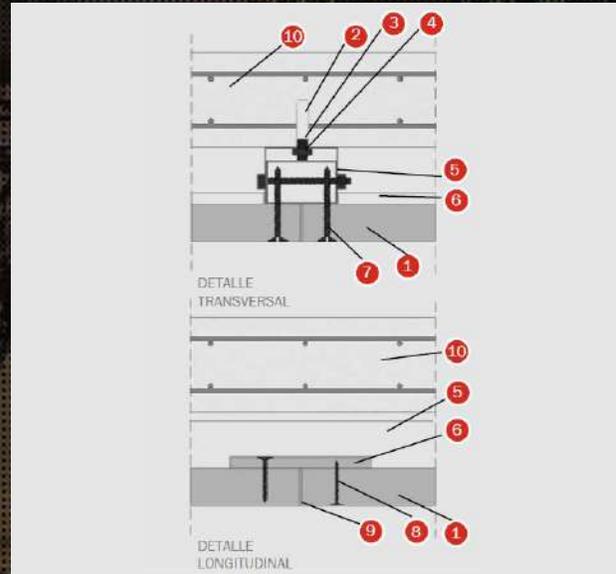
- SOLUCIÓN**
- (1) Paneles Tecbor 24 mm
 - (2) Losa de hormigón
 - (3) Anclaje de acero M6

DESCRIPCIÓN DE MONTAJE

Fijar el panel Tecbor 24mm directamente contra la losa de hormigón mediante anclajes metálicos FNA II 6x30/ 30 mm.

#1 Resistencia al fuego de los materiales de construcción

Ejemplo: falso techo suspendido



DESCRIPCIÓN DE MONTAJE

Fijar el panel Tecbor 24mm directamente contra la losa de hormigón mediante anclajes metálicos FNA II 6x30/ 30 mm.

ENSAYO

Norma: Curva de fuego RWS / HCM

Laboratorio Efectis

N° Ensayo: 2009-Efectis-R0998 / R0999

SOLUCIÓN

- (1) Paneles Tecbor 40 mm
- (2) Anclaje metálico de expansión con rosca interior
- (3) Varilla roscada acero d12mm
- (4) Tuerca recubierta de zinc d12mm
- (5) Perfil metálico 75x46x1,2 mm
- (6) Paneles Tecbor 12mm
- (7) Tornillo 6.3x65 mm
- (8) Tornillo Hi-Low 4.5 x50 mm
- (9) Masilla intumescente para juntas Tecsel
- (10) Estructura de hormigón

Fuente: Mercortecresa | Synixtor

#1 Resistencia al fuego de los materiales de construcción

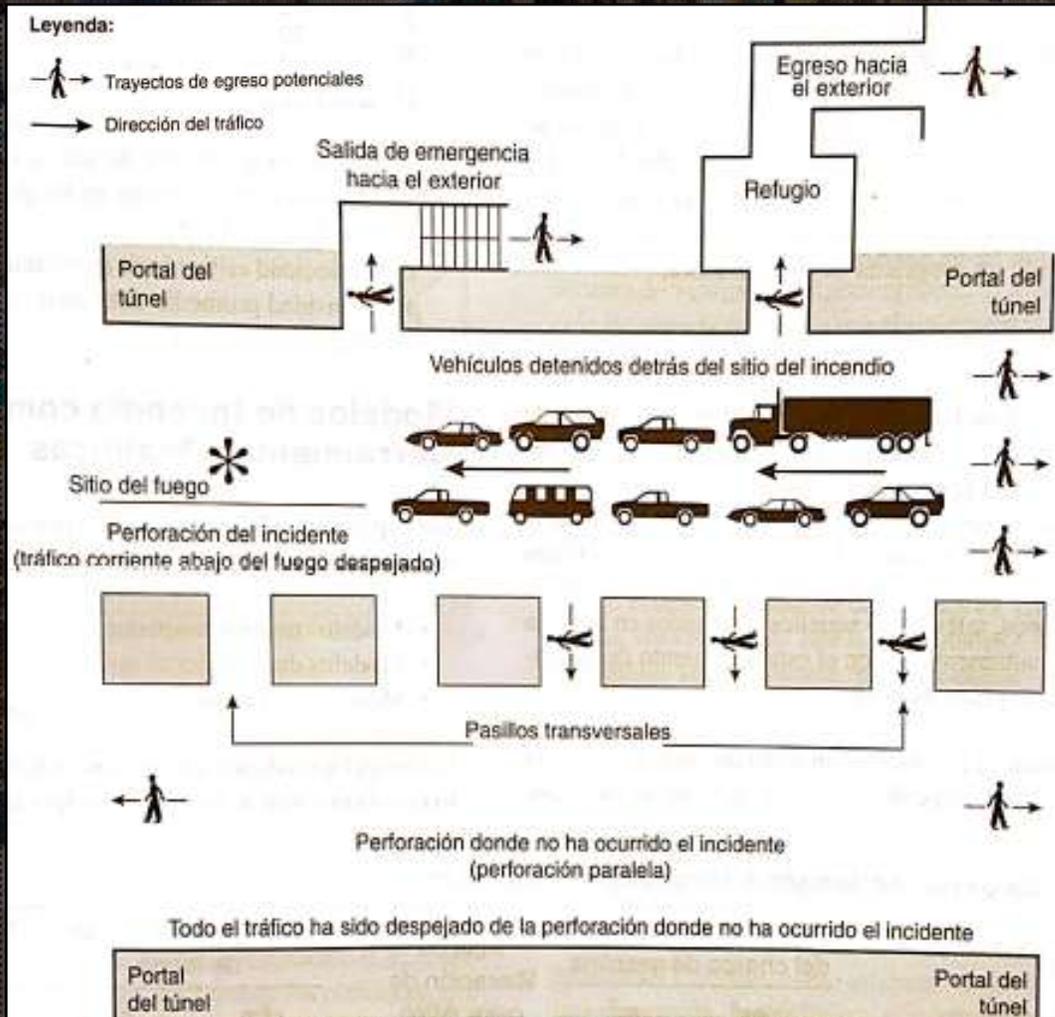


• Tabiques

- Sistemas ensayados, aprobados y listados
- Disponibilidad de sistemas con información coherente y aplicables
- Considerar que, en el caso de paneles con núcleo aislante, escasamente se dispone de soluciones de sellado cortafuego.

Fuente: PROMAT

#3 Medios de egreso



- Disponibles y protegidas: escaleras, salidas
- La decisión de evacuar es variable, se considera en el diseño y dependerá de los factores como el comportamiento de evacuación



Puerta abatible HCM-120
Fuente: Heinen



L9 Metro BCN, tramo II
Fuente: Infoconstrucción 2014

#4 Compartimentación

Sistemas de protección de cable, pasadas y juntas

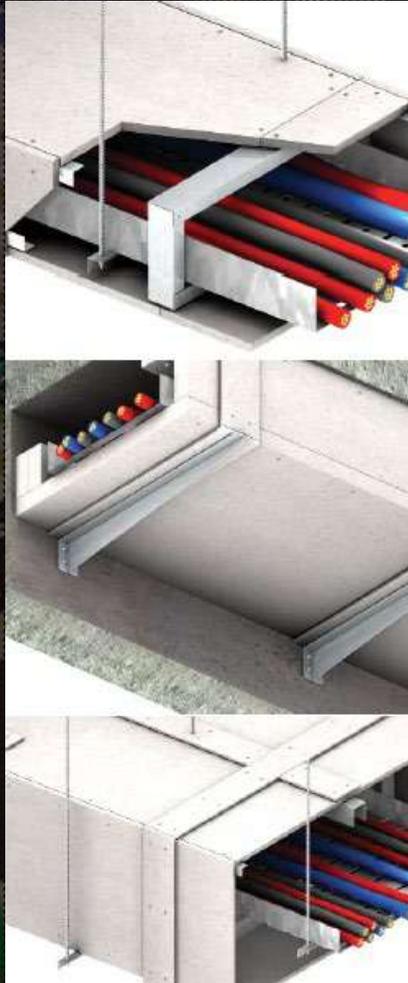


FIGURE 56:
SERVICE TUNNEL

Fuente: PROMAT Handbook, 2018



Fuente: HILTI

#4 Compartimentación

Sistemas de drenaje



Fuente: ACO Chile

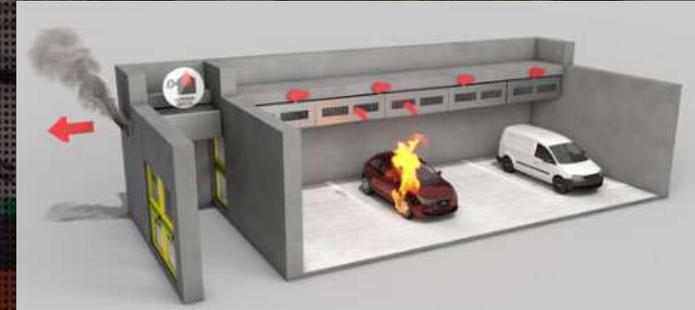
#7 Sistema de control y evacuación de humos

Control y manejo de humos

- Previene su propagación a otras partes del edificio
- Aumentar el tiempo disponible de evacuación
- Facilitar las labores de bomberos
- Minimizar los daños a la propiedad

Sistemas orientados a:

- Control (contención)
- Venteo / Extracción
- Manejo (grandes espacios)



Desafíos bajo tierra. Experiencias en el diseño de infraestructura subterránea

- INTRODUCCIÓN A LA PROTECCIÓN PASIVA CONTRA INCENDIOS
- MARCO NORMATIVO
- LOS ELEMENTOS DE LA PROTECCIÓN PASIVA
- **ALCANZANDO LA SEGURIDAD DE VIDA**

¿Inspección eficaz o proyecto deficiente?



¿Inspección eficaz o proyecto deficiente?

La importancia de una inspección eficaz



Quando los sistemas fallan...



¿Entonces?

Hacia una estrategia en el diseño de protección contra incendios en espacios subterráneos...

DISEÑO PCI

Permitir y fomentar el escape y la evacuación desde el túnel

Proteger la estructura y las instalaciones del Túnel

Facilitar la entrada del personal de emergencia dentro del túnel para combatir el fuego



DOCUMENTOS DE DISEÑO

PROYECTO

- Memoria de proyecto y EETT
- Memorias de cálculo
- Modelos y ensayos
- Planos (y detalles)
- Certificaciones
- Integración

Herramientas v/s Diseño

Competencia técnica

Cuerpo normativo
armónico

Responsabilidades

Proyecto PCI seguro e
integral

- Los **requerimientos normativos parecen dispersos**, se hace necesario armonizar o desarrollar herramientas óptimas de información fiable.
- Un **mal diseño conduce a una construcción deficiente y al peligro inminente** de pérdidas de vida, ineficaz e insegura. Los proyectistas somos responsables
- Las condiciones de seguridad son indispensables

¡Salvar Vidas es una premisa intransable del diseño!

Agradecimientos...

Sebastián Maltrana | Promat Túnel

María de los Ángeles Arce | Hilti Chile

Paloma Carralón | Synixtor Chile

José Manuel Marcos | MercorTecresa

Luis Torres Buscaglione | ACO Chile

¡Gracias!

Edith Pacci Leiva
Arquitecta



BP | Especialistas en Diseño contra Incendios

✉ contacto@bpfire.cl

+569 7338 6327

Mural de Ciro Beltrán
Estación Chile España. Línea 3. Santiago



expo**fuego**

CHILE 2023

CONGRESO INTERNACIONAL
DE PROTECCIÓN CONTRA INCENDIO