



3° CONGRESO INTERNACIONAL PROTECCIÓN CONTRA INCENDIO

CONTROL DE HUMO



Patricio Valdés Gacitúa
Master of Science in Fire Safety Engineering
Universidad de Gent – Bélgica
patricio.valdesgacitua@ugent.be

REFERENCIAS

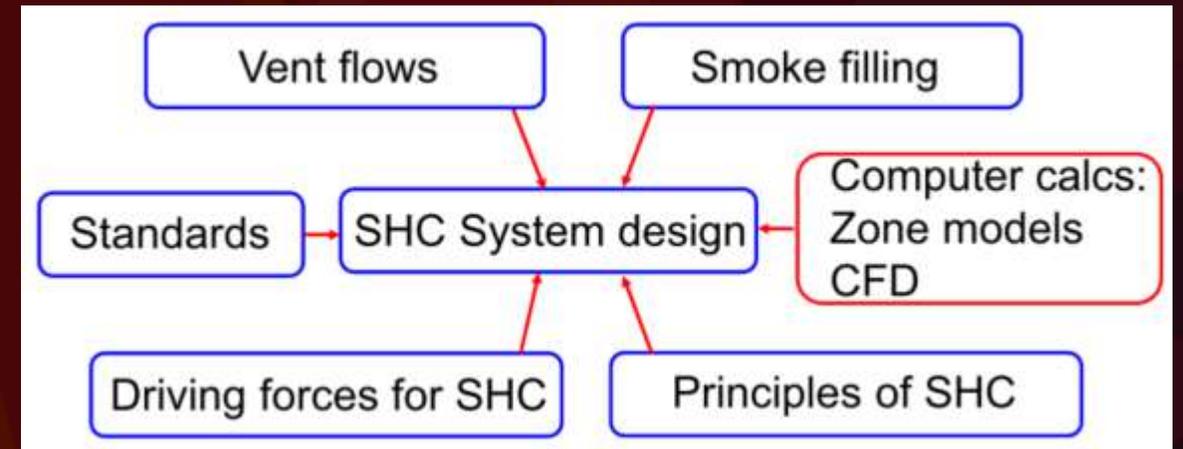
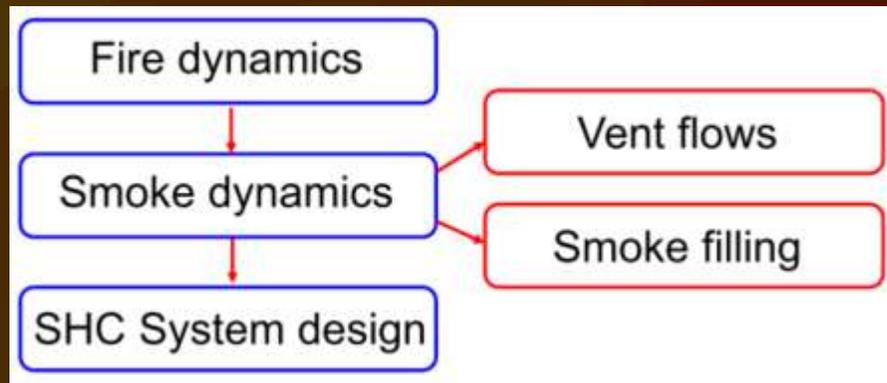
- Prof. dr. ir. Bart Merci, Department of Flow, heat and combustion mechanics, Gent University – Belgium.
- Dr. Tarek Beji, Department of Flow, heat and combustion mechanics, Gent University – Belgium.
- MSc Karel Lambert, Battalion Chief at Brussels Fire Department - Belgium.

Los gráficos, figuras e imágenes utilizados en la siguiente presentación, corresponden a los autores descritos en las referencias.

- Los sistemas de control de humo y calor son principalmente relacionados con la seguridad de vida (Incremento del ASET).
- $ASET > RSET$.
- Estadísticas indican que la mayoría de las muertes relacionadas con incendios en edificios son causadas por la inhalación de humo y gases tóxicos.
- El humo se propaga más rápido que el fuego.
- Tiende a invadir todos los volúmenes interiores comunicados.



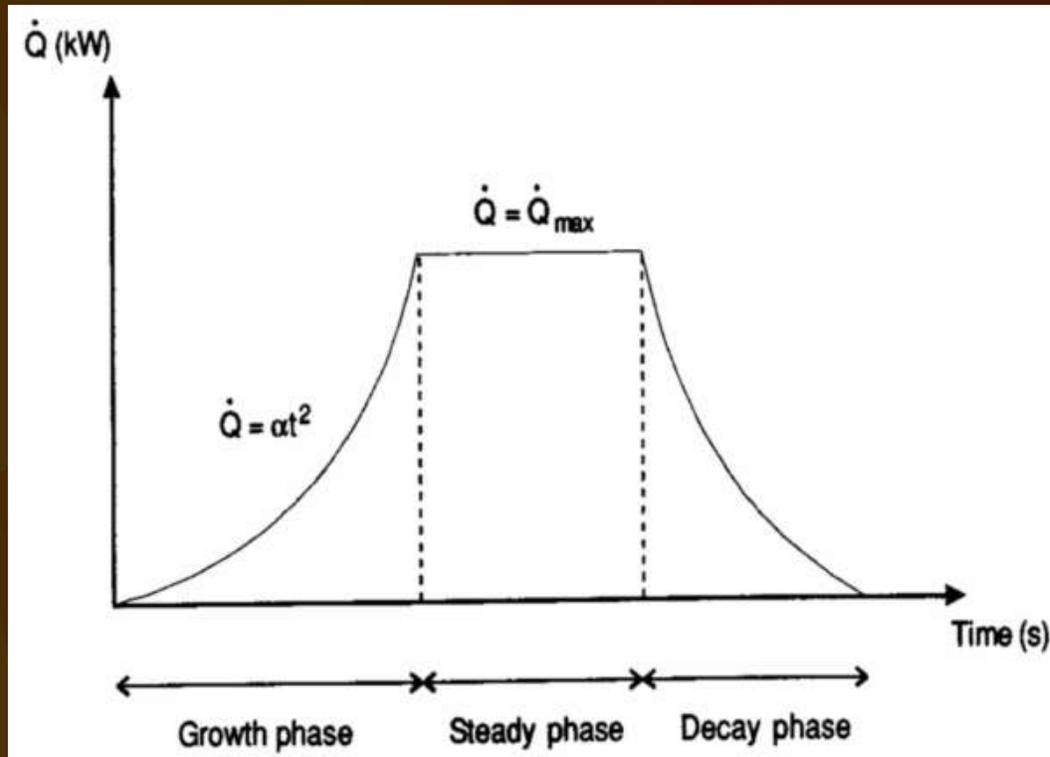
- Los sistemas de control de humo y calor (SHC) interactúan con la dinámica de los incendios, incluyendo fuego, humo, tipos de aberturas, sistemas de control, entre otros.



- HRR no es equivalente a la carga de combustible.
- HRR se refiere al calor liberado por unidad de tiempo, mientras que la carga de combustible al calor total liberado.
- Mientras la carga de combustible es esencial para la protección pasiva, el HRR es mas importante para el control de humo y calor.

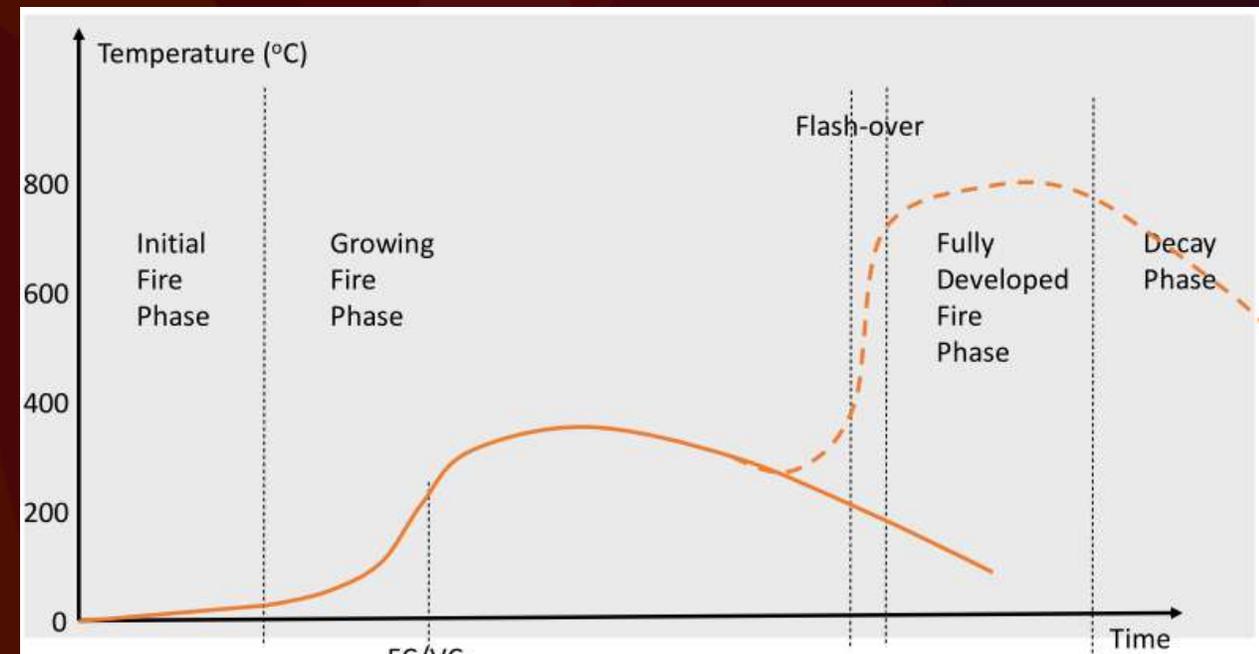
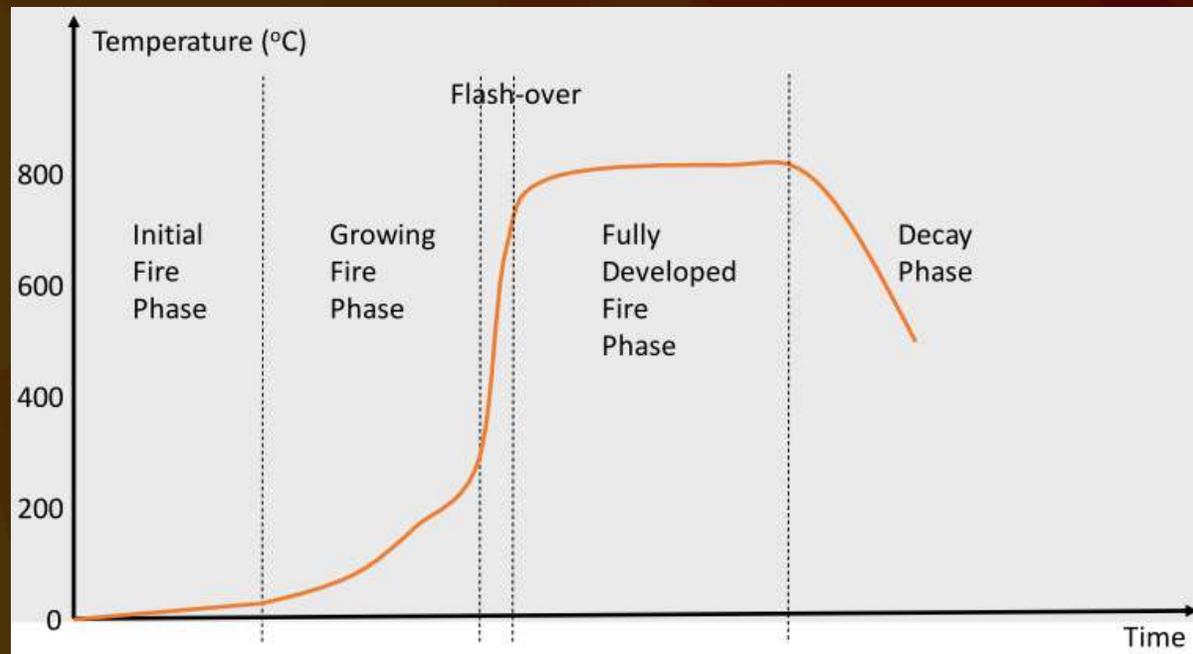


- En el contexto de control de humo y calor, hay una necesidad por un “Incendio de diseño”.
- Es un input crucial para todos los métodos de cálculo y diseño.
- Se puede determinar conociendo la cantidad, tipo y características del combustible, o del tipo o uso del edificio o compartimiento.
- Es necesario identificar las 3 fases básicas del incendio (crecimiento, desarrollo continuo y decaimiento).



- Los sistemas de control de humo y calor deben operar durante la fase de crecimiento y continua del incendio.
- Es valido considerar fase de crecimiento como αT^2 pero no es siempre valida.
- Propagación de llama vertical.
- Flashover local.
- Secundarias fuentes de fuego.
- Limites del incendio son alcanzados rápidamente.

- Un fuego real no siempre se comporta como el incendio de diseño!



CONTROL DE HUMO

- **Compartimentación**
- **Presurización / Despresurización**
- **Ventilación por presión positiva (PPV)**
- **Ventilación natural**
- **Ventilación mecánica o forzada**
- **Relleno de Humo**
- **Extracción de humo**
- **Cortinas de aire**
- **Cortinas de agua**

- **Compartimentación**
- Presurización / Despresurización
- Ventilación por presión positiva (PPV)
- Ventilación natural
- Ventilación mecánica o forzada
- Relleno de Humo
- Extracción de humo
- Cortinas de aire
- Cortinas de agua

- Principio fundamental, evitar la propagación del fuego desde el espacio donde el fuego se origina. Los volúmenes adyacentes separados por elementos suficientemente resistente al fuego-humo.
- Objetivos, evacuación de personas, protección de bienes y/o facilitar la intervención de bomberos.
- Muros, piso y cielo forman parte de la compartimentación. Las aberturas verticales (puertas) y horizontales (elevadores, escaleras), deben ser equipadas con un sello adecuado.
- Evitar aberturas para evitar la propagación del humo y fuego.
- Realidad?

COMPARTIMENTACIÓN

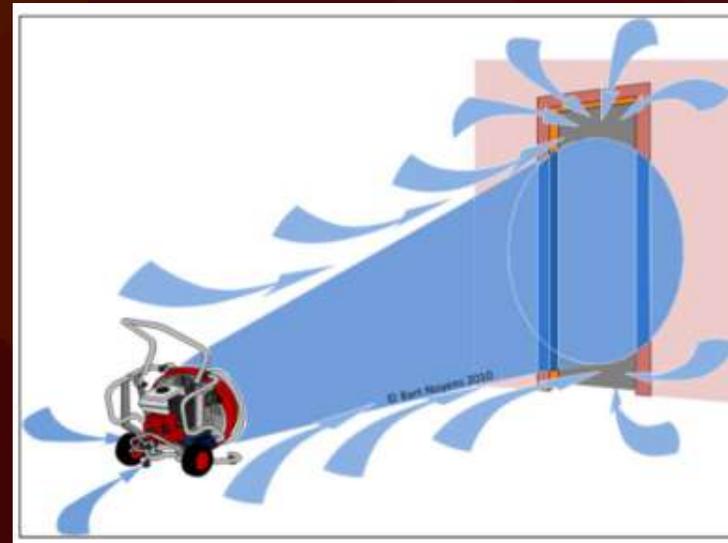


CONTROL DE HUMO

- Compartimentación
- **Presurización / Despresurización**
- Ventilación por presión positiva (PPV)
- Ventilación natural
- Ventilación mecánica o forzada
- Relleno de Humo
- Extracción de humo
- Cortinas de aire
- Cortinas de agua

PRESURIZACIÓN-DESPRESURIZACIÓN

- Principio básico de la presurización, asegura que la presión en los espacios protegidos es mayor a la presión en el compartimento incendiado.
- Mientras tanto la despresurización remueve los gases calientes del compartimiento en incendio, manteniéndolo a una presión menor al resto de los espacios protegidos.

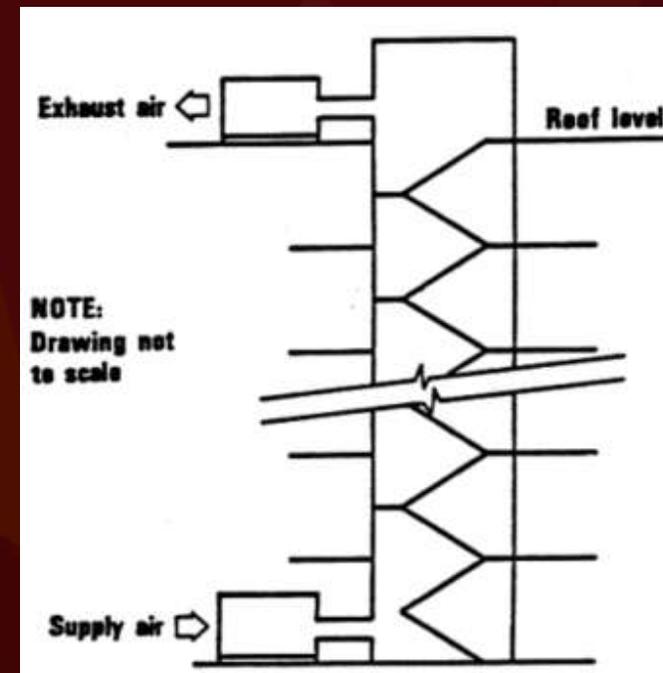
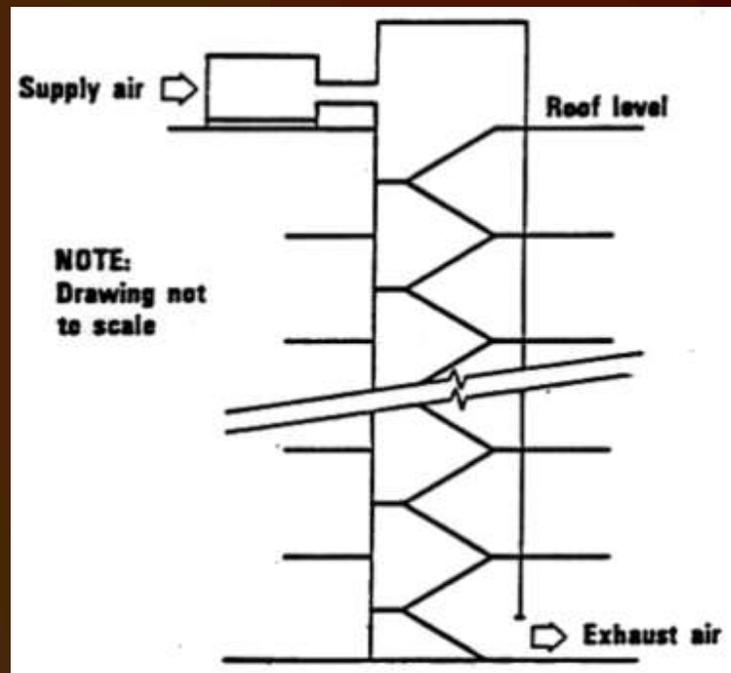


PRESURIZACIÓN-DESPRESURIZACIÓN

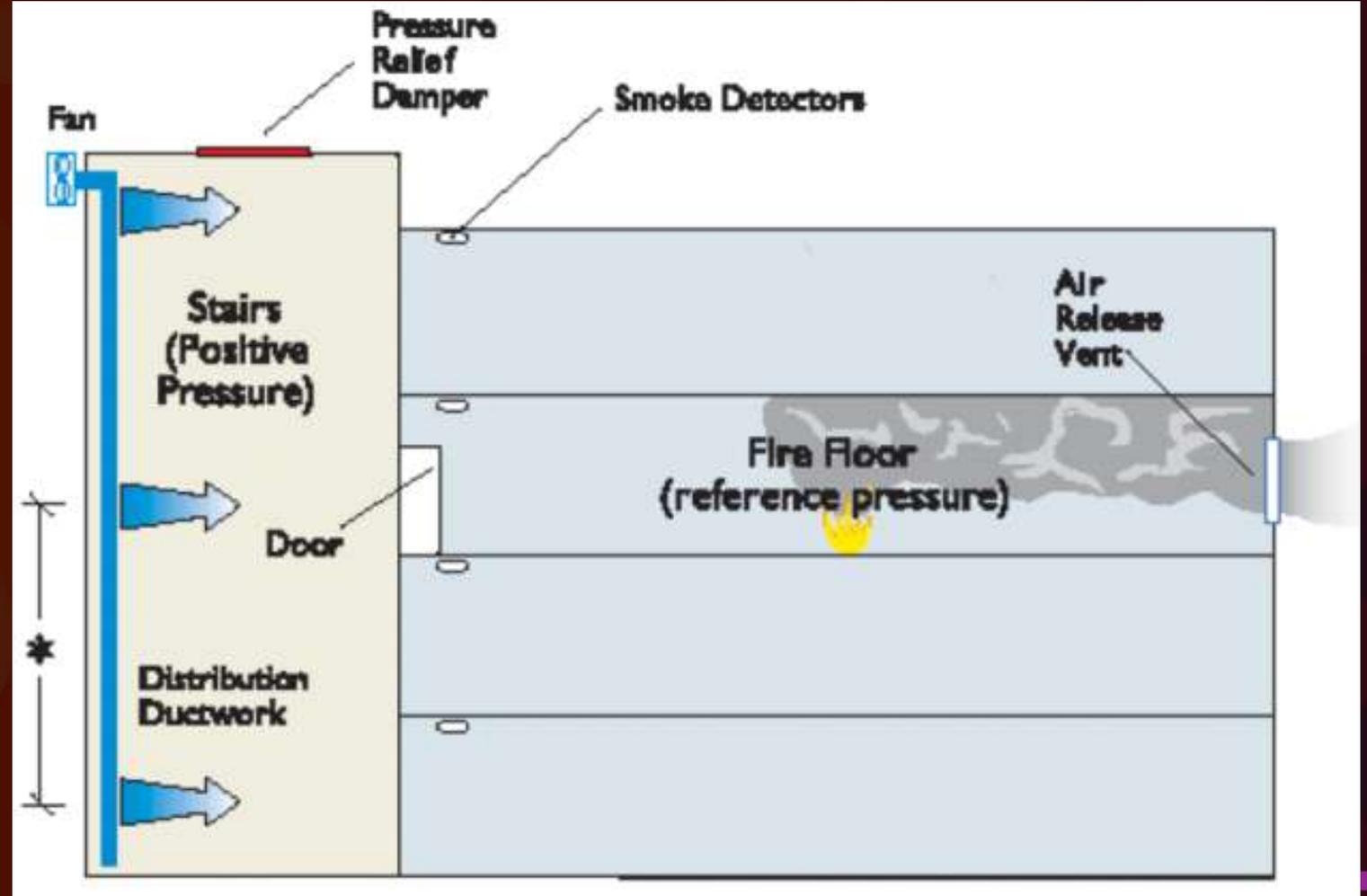
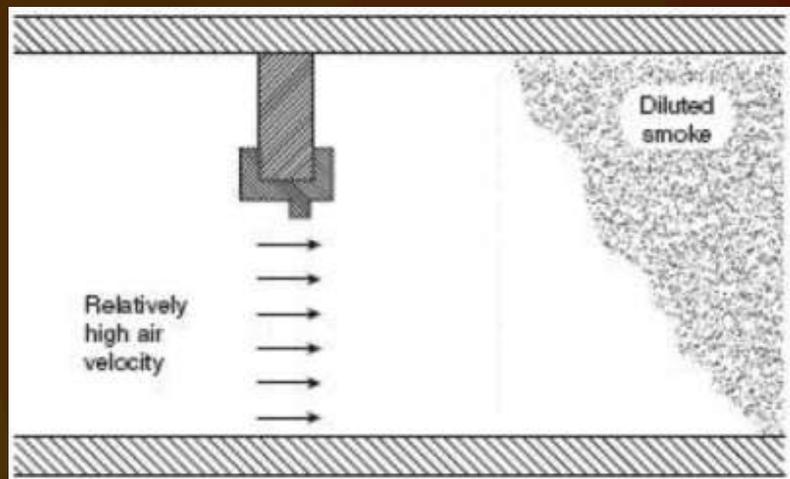
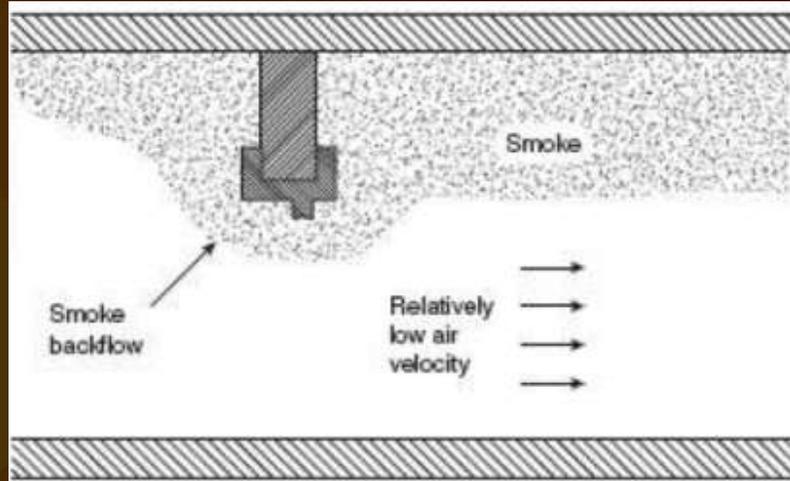
- El aire es inyectado en las rutas de escape, previniendo que el humo se propague a través de filtraciones.
- Las diferencias de presión sobre las aberturas (no importa las dimensiones) deben ser suficientes para contrarrestar cualquier gradiente de presión.
- La diferencia de presión debe ser suficientemente pequeña, facilitando la apertura de puertas en las rutas de escape.
- Orden de magnitud = 100 N.
- Típica puerta de 0.9m de ancho por 2.2m alto requiere $\Delta P=90\text{Pa}$ (asumiendo $d=0.1\text{m}$).
- Un valor frecuente utilizado como $\Delta P=60\text{Pa}$ (mas conservador).

PRESURIZACIÓN-DESPRESURIZACIÓN

- Importante! – no solo debe ser determinado el punto de inyección de aire, sino que también donde deben salir del edificio el aire y humo y qué caminos seguirán durante este proceso.
- Normalmente se requieren tasas de flujo de ventilación relativamente bajas, pero el efecto se limita a la protección de los recintos.



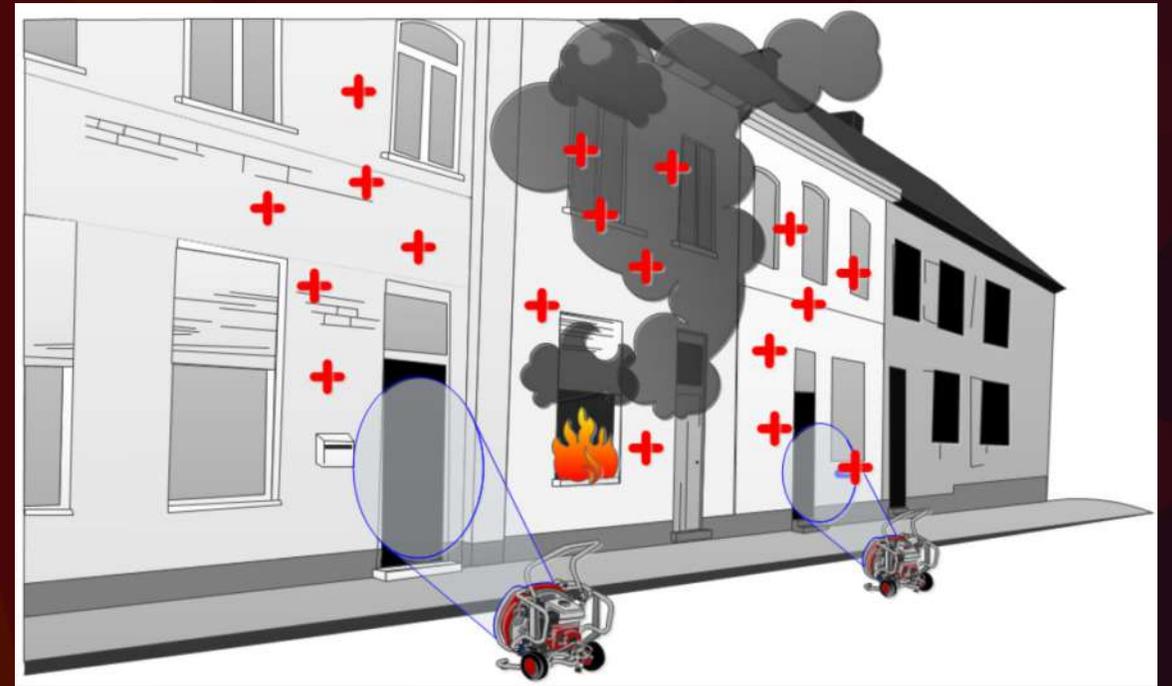
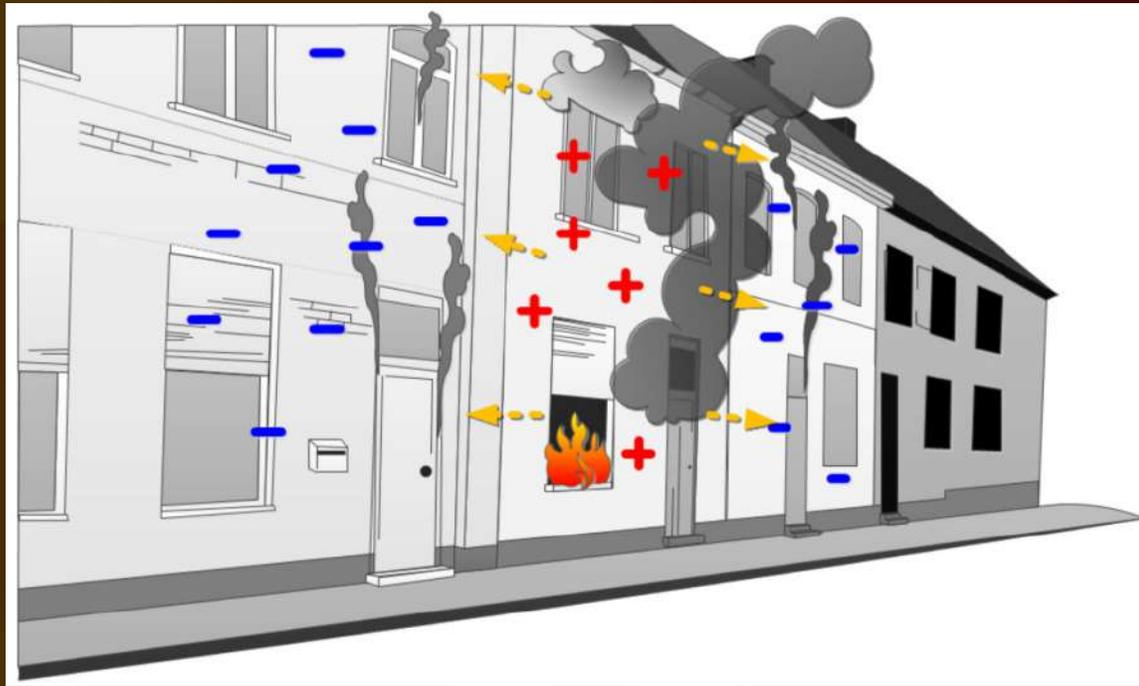
PRESURIZACIÓN-DESPRESURIZACIÓN



- El diseño del sistema de presurización es fuertemente determinado por el objetivo.
- Protección de las vías de escape, intervención de bomberos, protección de los bienes.
- Diferentes normativas permiten un diseño de sistemas de presurización (NFPA 92, EN 12101-6, ASHRAE, entre otras).
- Existen problemáticas y desafíos en el diseño de los sistemas de presurización que deben ser consideradas (número de puertas abiertas, volumen del recinto, pérdidas de presión, venteos, entre otros).

PRESURIZACIÓN-DESPRESURIZACIÓN

- Existen técnicas de presurización móviles que previenen la infiltración del humo.

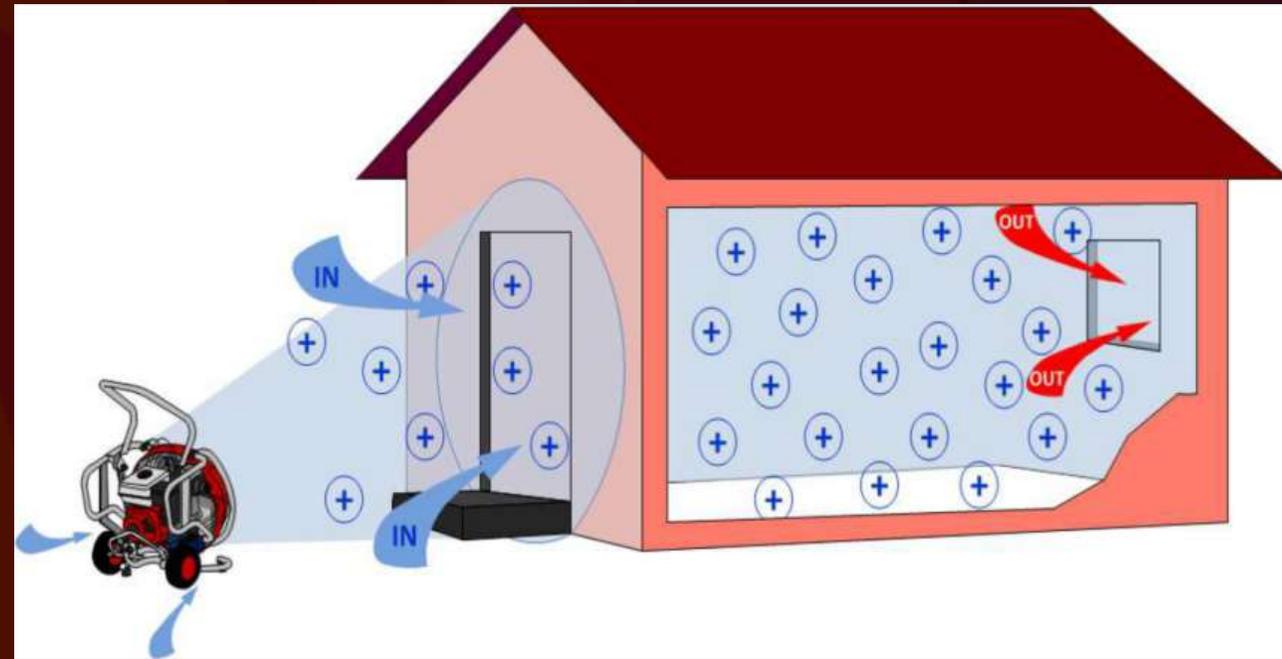


CONTROL DE HUMO

- Compartimentación
- Presurización / Despresurización
- **Ventilación por presión positiva (PPV)**
- Ventilación natural
- Ventilación mecánica o forzada
- Relleno de Humo
- Extracción de humo
- Cortinas de aire
- Cortinas de agua

VENTILACIÓN POR PRESIÓN POSITIVA

- Sistema de presurización móvil.
- Puede ser usada por bomberos.
- Debe ser utilizado con precaución (personas en el edificio – propagación de humo – fuegos under-ventilated).
- Puede ser eficiente para generar escaleras libres de humo.
- Debe generarse una abertura para generar la trayectoria del flujo.

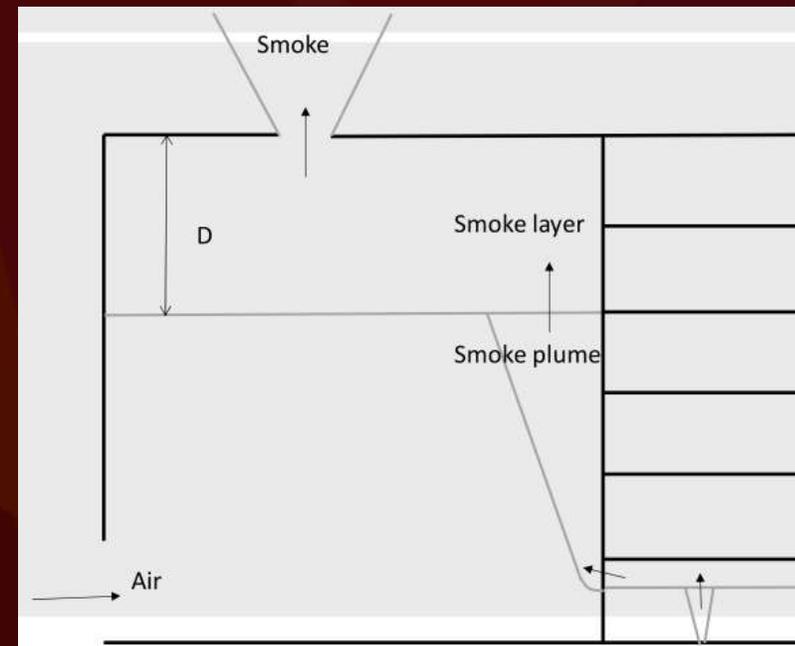
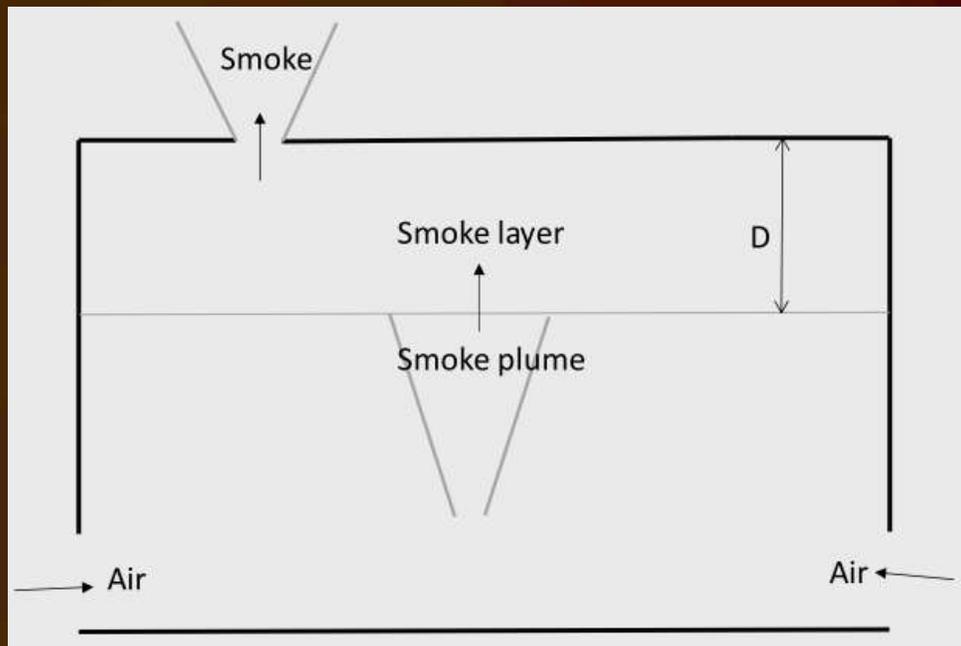


CONTROL DE HUMO

- Compartimentación
- Presurización / Despresurización
- Ventilación por presión positiva (PPV)
- **Ventilación natural**
- Ventilación mecánica o forzada
- Relleno de Humo
- Extracción de humo
- Cortinas de aire
- Cortinas de agua

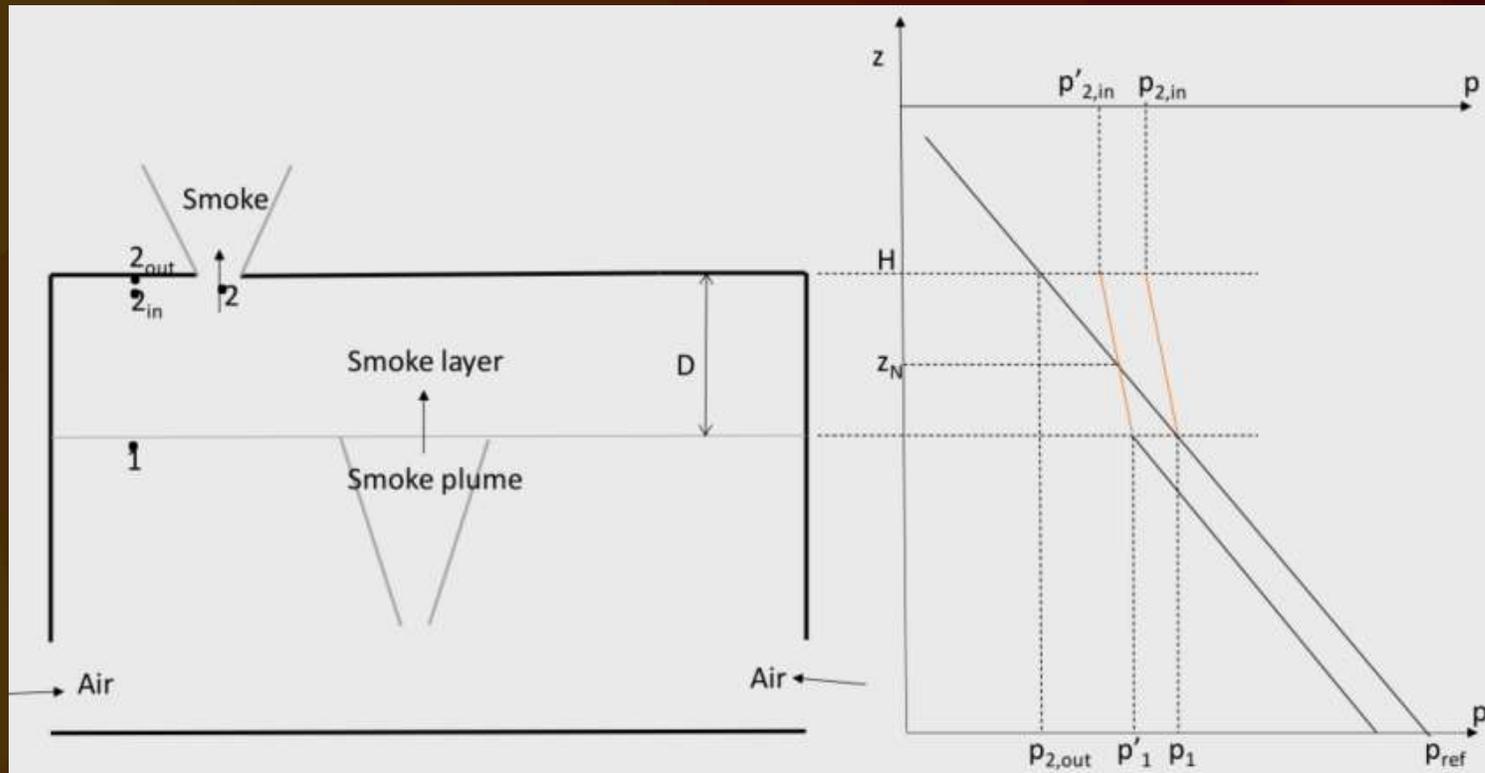
VENTILACIÓN NATURAL

- Puede ser aplicada como sistema de control de humo y calor durante la fase de crecimiento.
- Idea básica: flujo a través de una abertura que remueve el humo (por lo tanto el calor).
- Configuraciones mas comunes: aberturas horizontales al nivel del techo.



VENTILACIÓN NATURAL

- Elección natural: aberturas de extracción ubicadas sobre el plano neutro, mientras que las aberturas de aire fresco son ubicadas bajo el plano neutro.

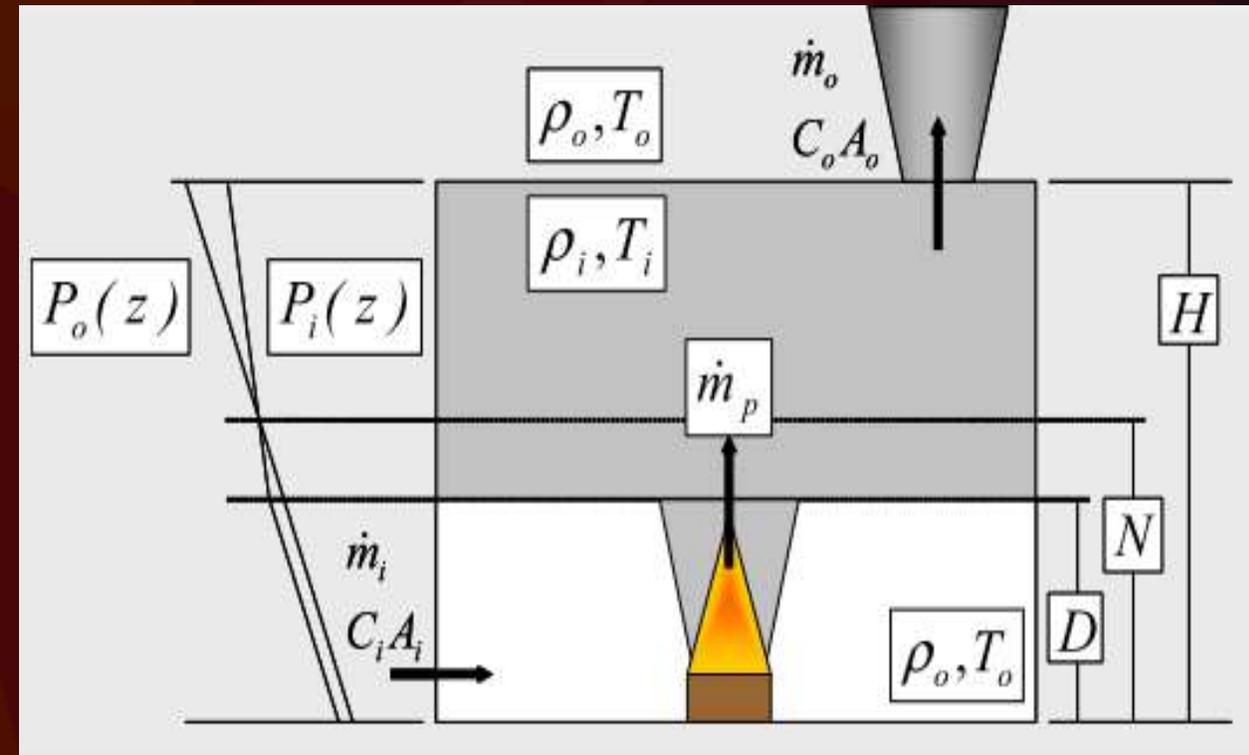


$$\dot{m}_s = \rho_s C_d A_v \sqrt{\frac{2gD \left(\frac{T_s}{T_{amb}} - 1 \right)}{1 + \left(\frac{T_{amb}}{T_s} \right) \left(\frac{C_d A_v}{C_{d,in} A_{in}} \right)^2}}$$

VENTILACIÓN NATURAL

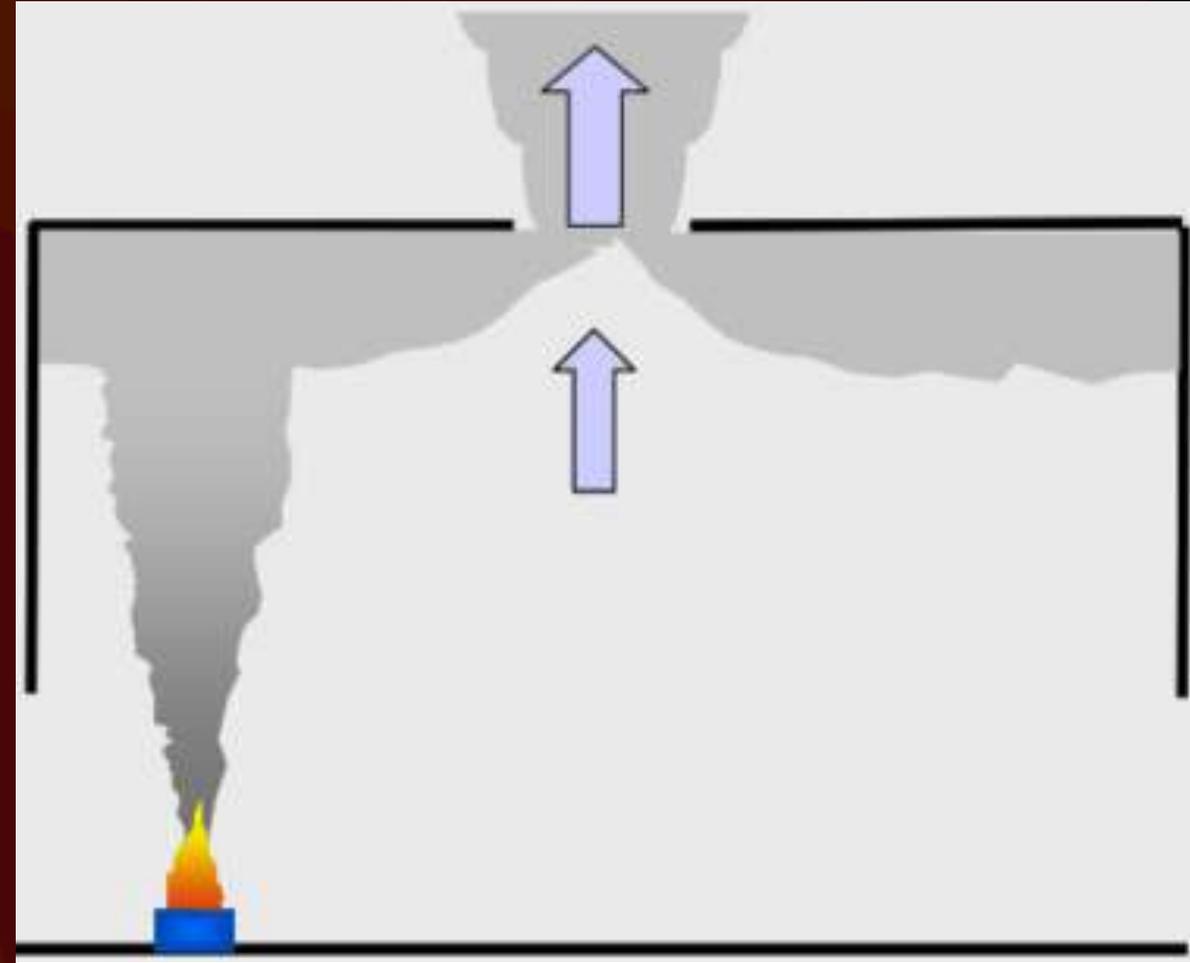
Importantes parámetros para determinar el área de extracción:

- Caudal másico de humo.
- Espesor de la capa de humo.
- Temperatura ambiente.
- Coeficiente de descarga de la abertura.
- Área aerodinámica de la abertura de ingreso de aire fresco.



Recordar PLUG-HOLING:

- Aire fresco fluyendo a través de las aberturas horizontales en el techo en lugar de humo (espesor capa de humo insuficiente).
- Pérdida de eficiencia de la abertura respecto de la remoción de humo caliente.
- Puede también ocurrir en sistemas de ventilación mecánica.



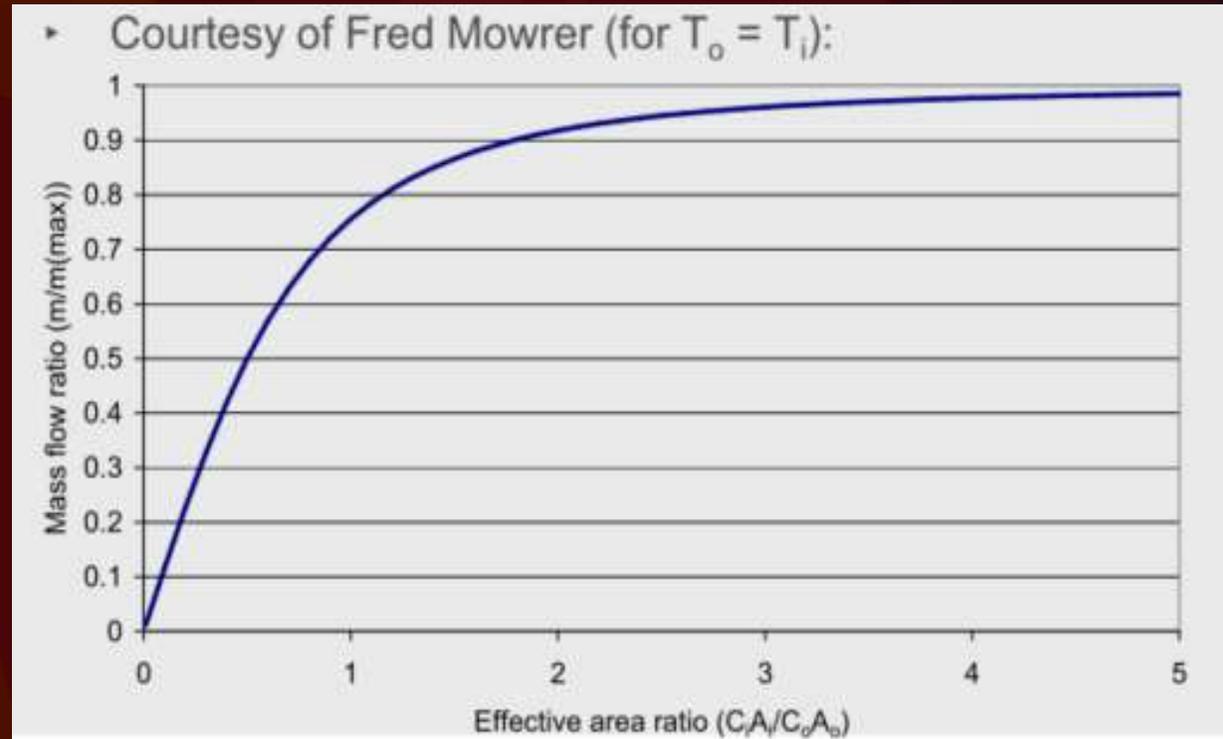
Cómo evitar el fenómeno de PLUG-HOLING?

- El flujo másico a través de la abertura debe ser menor que cierto valor crítico.
- Se pueden considerar suficientes números de aberturas o asegurar suficiente espesor de capa de humo.



Recordar:

- Las aberturas para el suministro de aire fresco son importantes para la efectividad.
- Esto también es válido para la ventilación mecánica (pérdida de presión adicional debe ser contrarrestada por los ventiladores).
- Efecto del viento cambia la posición de el plano neutro.

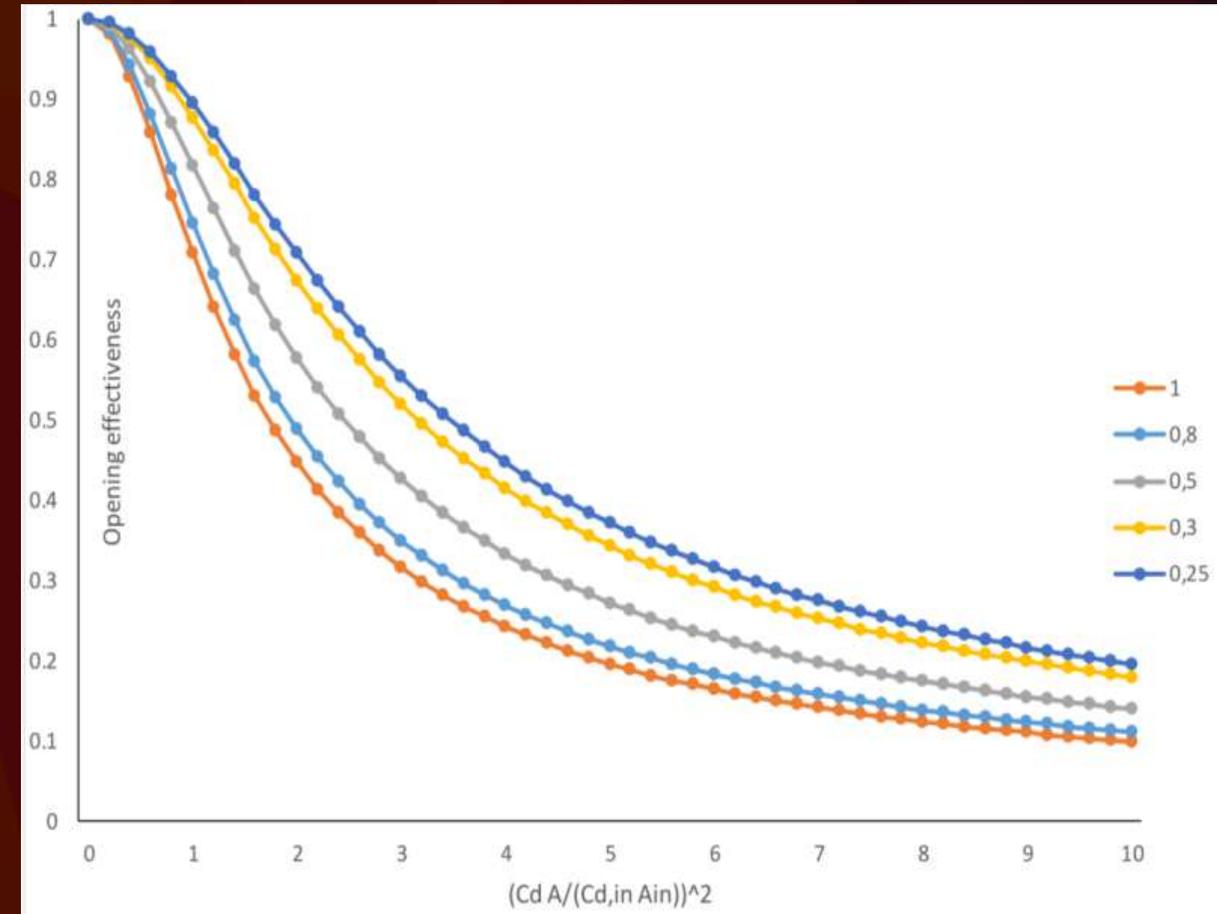


VENTILACIÓN NATURAL

Importante:

- La eficacia de las aperturas que extraen el humo se reduce cuando las aberturas de entrada de aire se vuelven mas pequeñas.

$$effectiveness = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_{max}} = \sqrt{\frac{1}{1 + \left(\frac{T_{amb}}{T}\right) \left(\frac{C_{d,out} A_{out}}{C_{d,in} A_{in}}\right)^2}}$$



- Compartimentación
- Presurización / Despresurización
- Ventilación por presión positiva (PPV)
- Ventilación natural
- **Ventilación mecánica o forzada**
- **Relleno de Humo**
- **Extracción de humo**
- **Cortinas de aire**
- **Cortinas de agua**

- **Idea básica:** ventiladores mecánicos extraen o empujan el humo (por lo tanto el calor).
- **Los sistemas de ventilación mecánica deben siempre ser en combinación con la dinámica propia del humo (debido a el HRR convectivo del incendio).**
- **Las extracciones de humo se generan sobre el plano neutro, mientras que la inyección de aire fresco bajo el plano neutro.**
- **Situación común:** extracción natural o mecánica de humo en combinación con suministro natural de aire fresco.
- **Cuando se configura extracción de humo mecánica y suministro de aire mecánica, se debe considerar la variación de presión (+,-) en la apertura de puertas.**

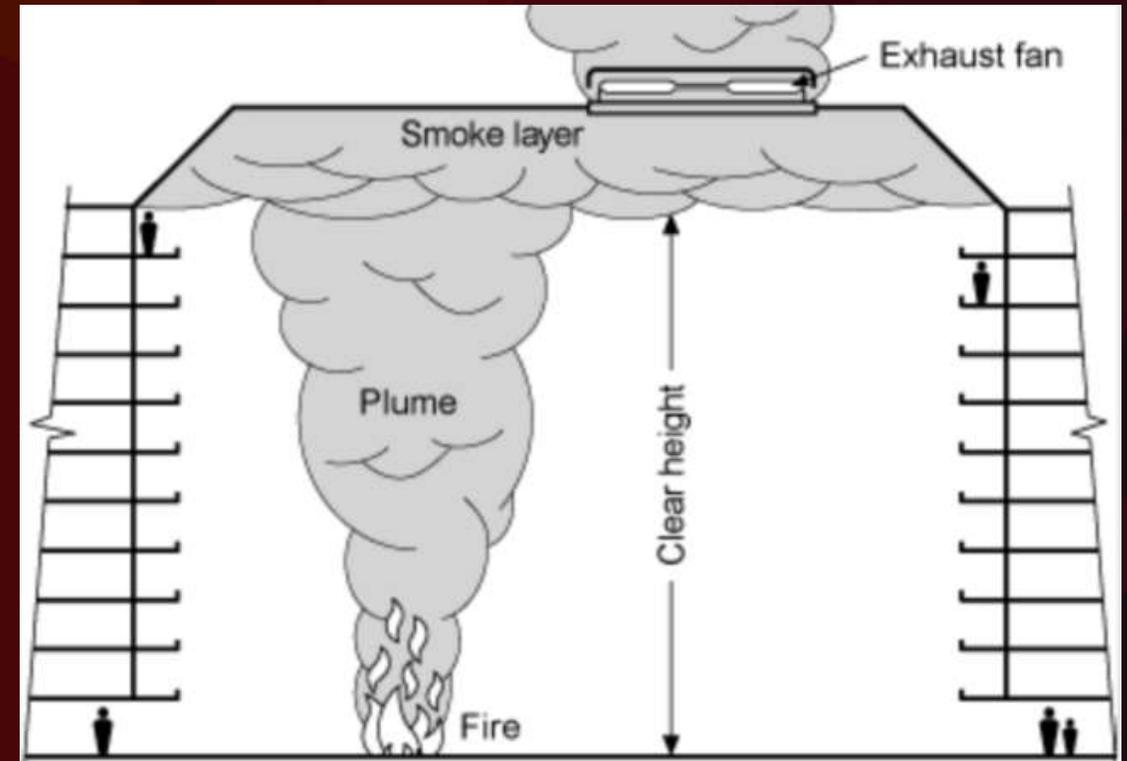
VENTILACIÓN MECÁNICA VERTICAL

- Las extracciones de humo se generan sobre el plano neutro, mientras que la inyección de aire fresco bajo el plano neutro.
- Situación común: extracción natural o mecánica de humo en combinación con suministro natural de aire fresco.
- Cuando se configura extracción de humo mecánica y suministro de aire mecánica, se debe considerar la variación de presión (+,-) en la apertura de puertas.
- En situación de estado estable, el flujo másico de humo extraído debe ser igual al flujo másico que entra en la parte inferior de la capa de humo.
- Altura libre de humo estable.

VENTILACIÓN MECÁNICA VERTICAL

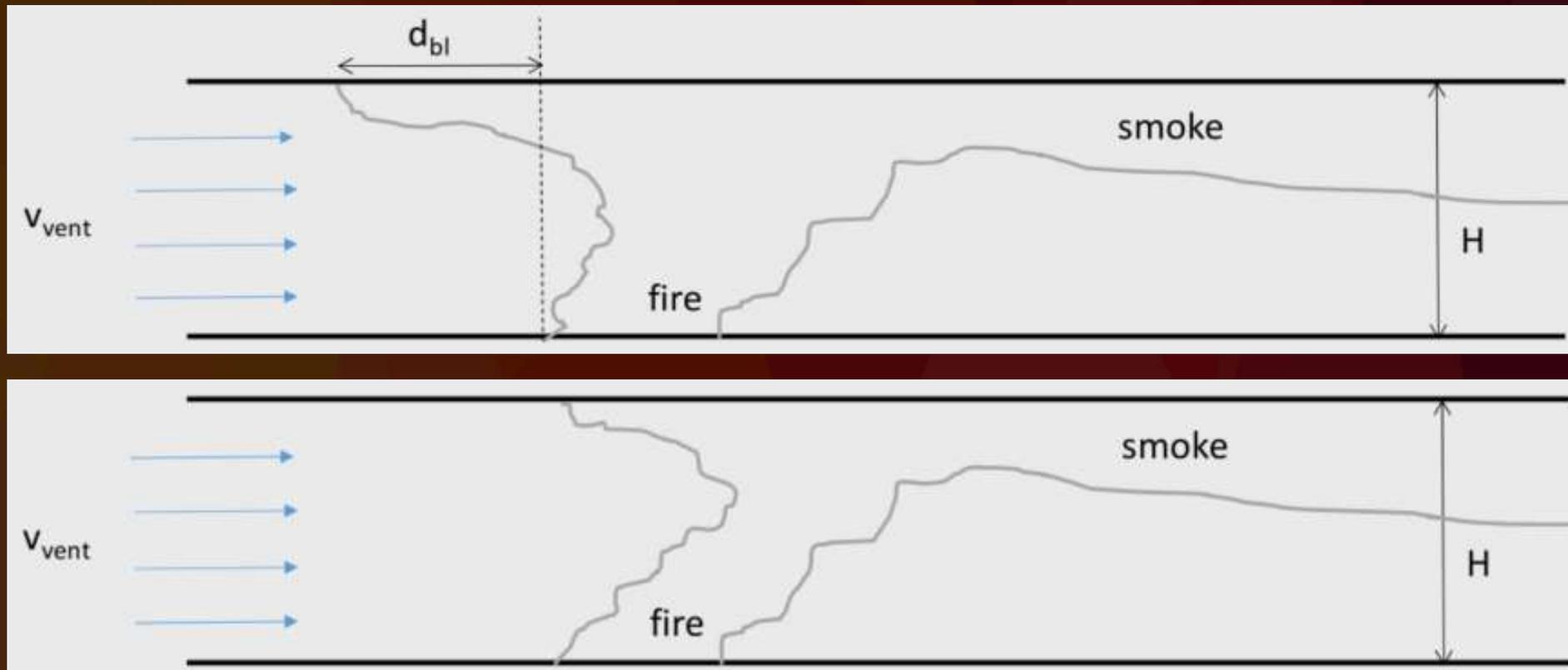
- Plug-Holing: limitación del caudal máximo a través del ventilador o control de la capa de humo mínima requerida

$$\dot{V}_{\max} = \frac{\dot{m}_{\max}}{\rho} = \frac{\dot{m}_{\max}}{\rho_{amb}} \frac{T}{T_{amb}} = C' \beta d^{5/2} \sqrt{T_{amb} (T - T_{amb})}$$
$$d_{\min} = \frac{\dot{V}^{2/5}}{(C' \beta)^{2/5} (T_{amb} (T - T_{amb}))^{1/5}}$$



VENTILACIÓN MECÁNICA HORIZONTAL

- El momento horizontal (p.e. el producto de el flujo másico y la velocidad) es esencial.
- El momento horizontal del humo debe ser superado.

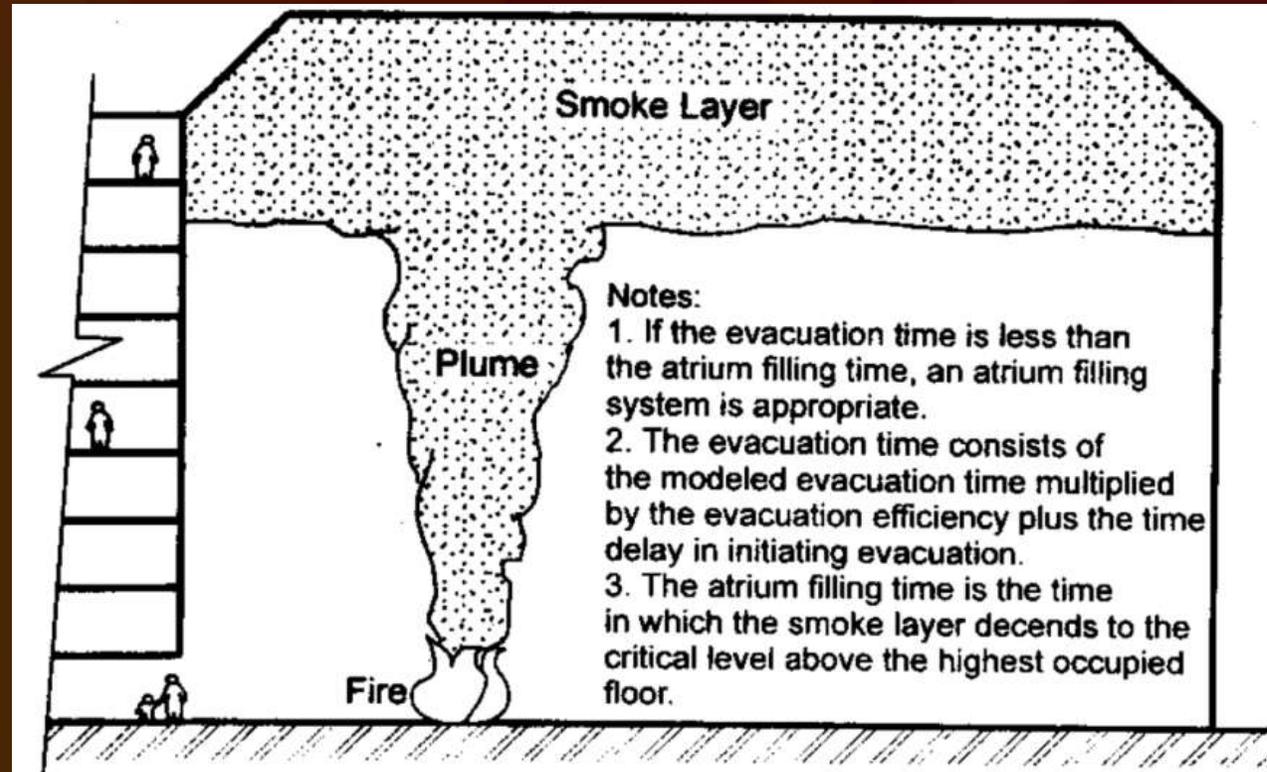


- Utilizada en otras estructuras subterráneas (metro, estacionamientos, entre otros).
- Considerar el fenómeno de by-pass, donde el flujo de aire sigue la ruta que opone menor resistencia.
- En flujos con caminos complicados (edificios complejos), se debe incluir recirculación y puntos o zonas de estancamiento (stagnation points or zones), a diferencia de los flujos en túneles.

- Compartimentación
- Presurización / Despresurización
- Ventilación por presión positiva (PPV)
- Ventilación natural
- Ventilación mecánica o forzada
- **Relleno de Humo**
- **Extracción de humo**
- **Cortinas de aire**
- **Cortinas de agua**

RELLENO DE HUMO

- La idea básica es permitir llenar recintos altos con humo.
- El relleno de humo debe ser lo suficientemente lento: $ASET > RSET$, incluyendo un factor de seguridad.



CONTROL DE HUMO

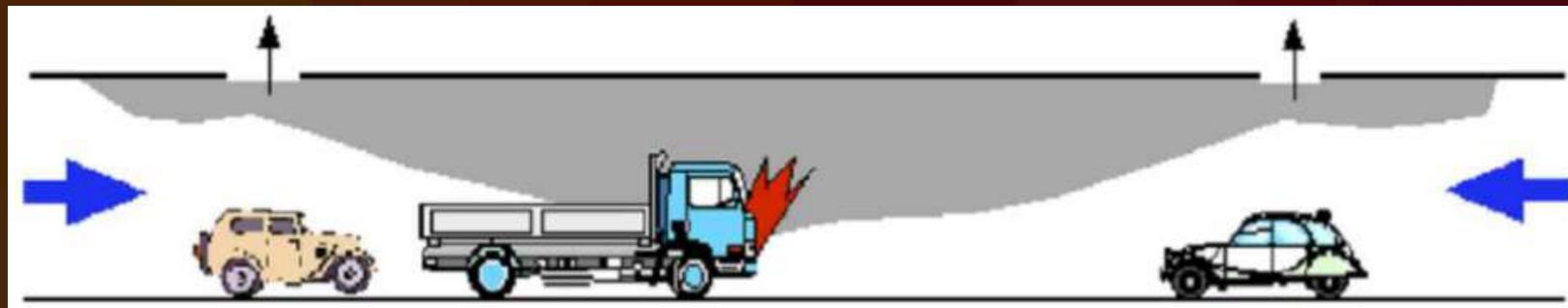
- Compartimentación
- Presurización / Despresurización
- Ventilación por presión positiva (PPV)
- Ventilación natural
- Ventilación mecánica o forzada
- Relleno de Humo
- **Extracción de humo**
- Cortinas de aire
- Cortinas de agua

EXTRACCIÓN DE HUMO

- El humo inducido por el fuego es extraído a través de venteos cercanos o vecinos al fuego.
- Dampers contra humo pueden ser localizados para prevenir que el humo se propague hacia otras instalaciones.
- Potencial riesgo en caso de fuego under-ventilated, se añade aire (oxígeno) fresco al incendio.
- En túneles, estacionamientos u otras estructuras subterráneas el humo es recolectado en un ducto de escape.

EXTRACCIÓN DE HUMO

- En túneles, la extracción se denomina “Ventilación Transversal”.
- Aire entrada inducido por el sistema presenta suficiente momento, se puede prevenir la propagación de humo.
- Estratificación de humo puede ser mantenida.
- El humo no es empujado en cierta dirección.
- El aire de entrada es muy importante, si las aperturas no son suficientes, la presión decrecerá y la extracción de humo se volverá muy inefectiva.

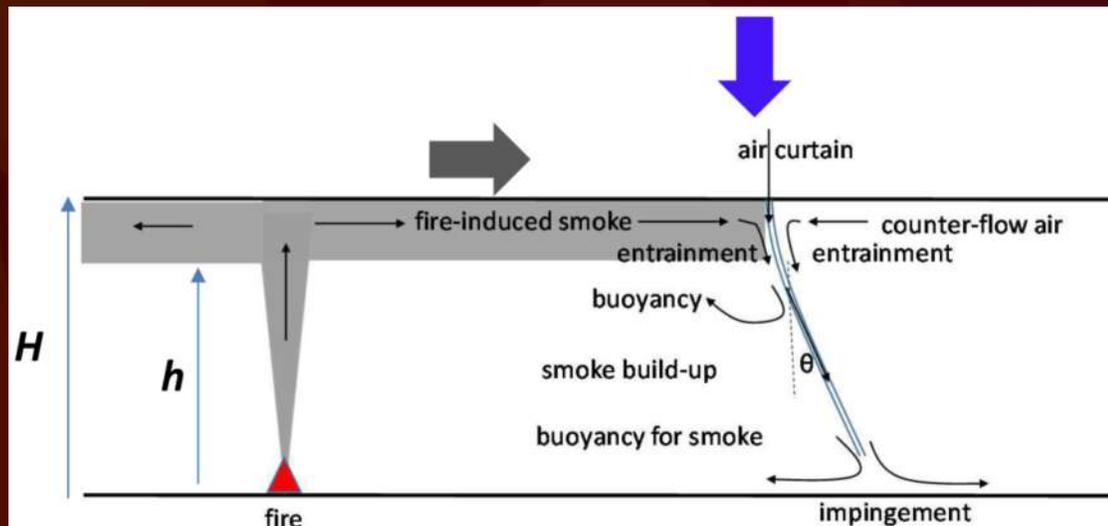


CONTROL DE HUMO

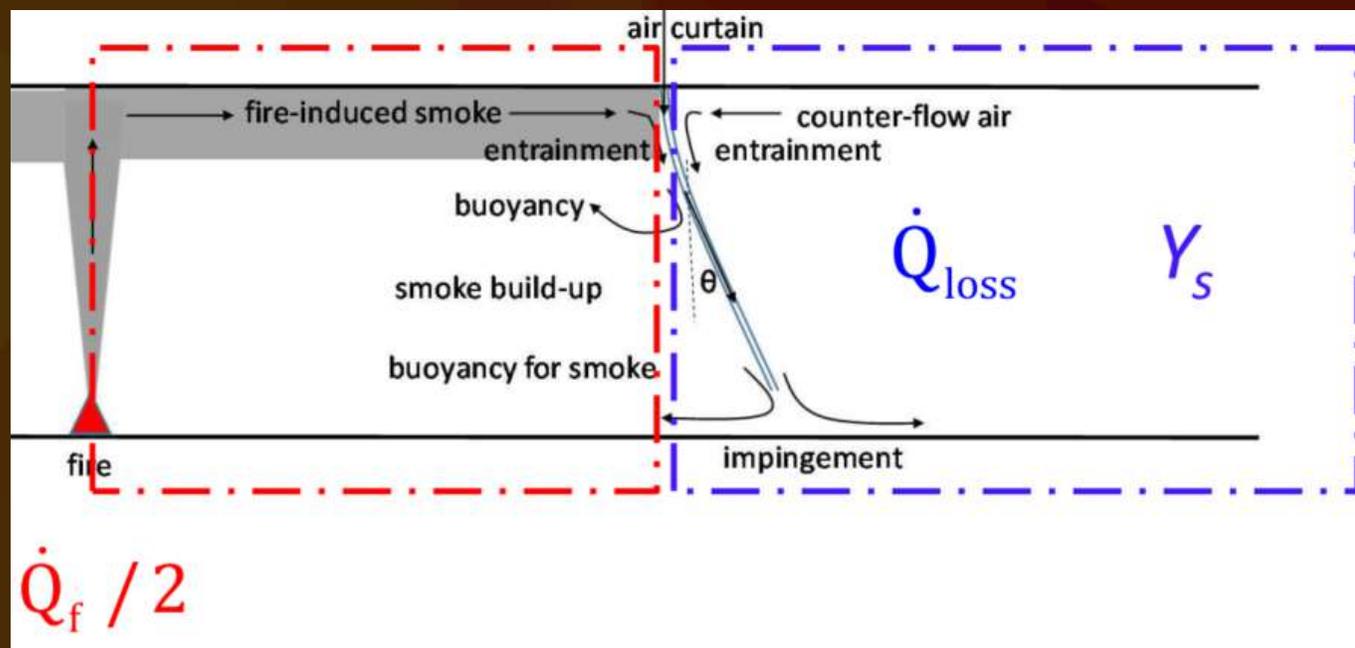
- Compartimentación
- Presurización / Despresurización
- Ventilación por presión positiva (PPV)
- Ventilación natural
- Ventilación mecánica o forzada
- Relleno de Humo
- Extracción de humo
- **Cortinas de aire**
- **Cortinas de agua**

CORTINAS DE AIRE

- El principio de operación de las cortinas de aire es bloquear la propagación de humo, mediante un gran momento ejercido por chorros de aire (alto momento – bajo flujo másico).
- Estudios en CFD permiten obtener la efectividad de las cortinas de aire en términos de relación de momento, entre el momento horizontal ejercido por el humo y el vertical ejercido por la cortina.
- No bloquea la radiación.



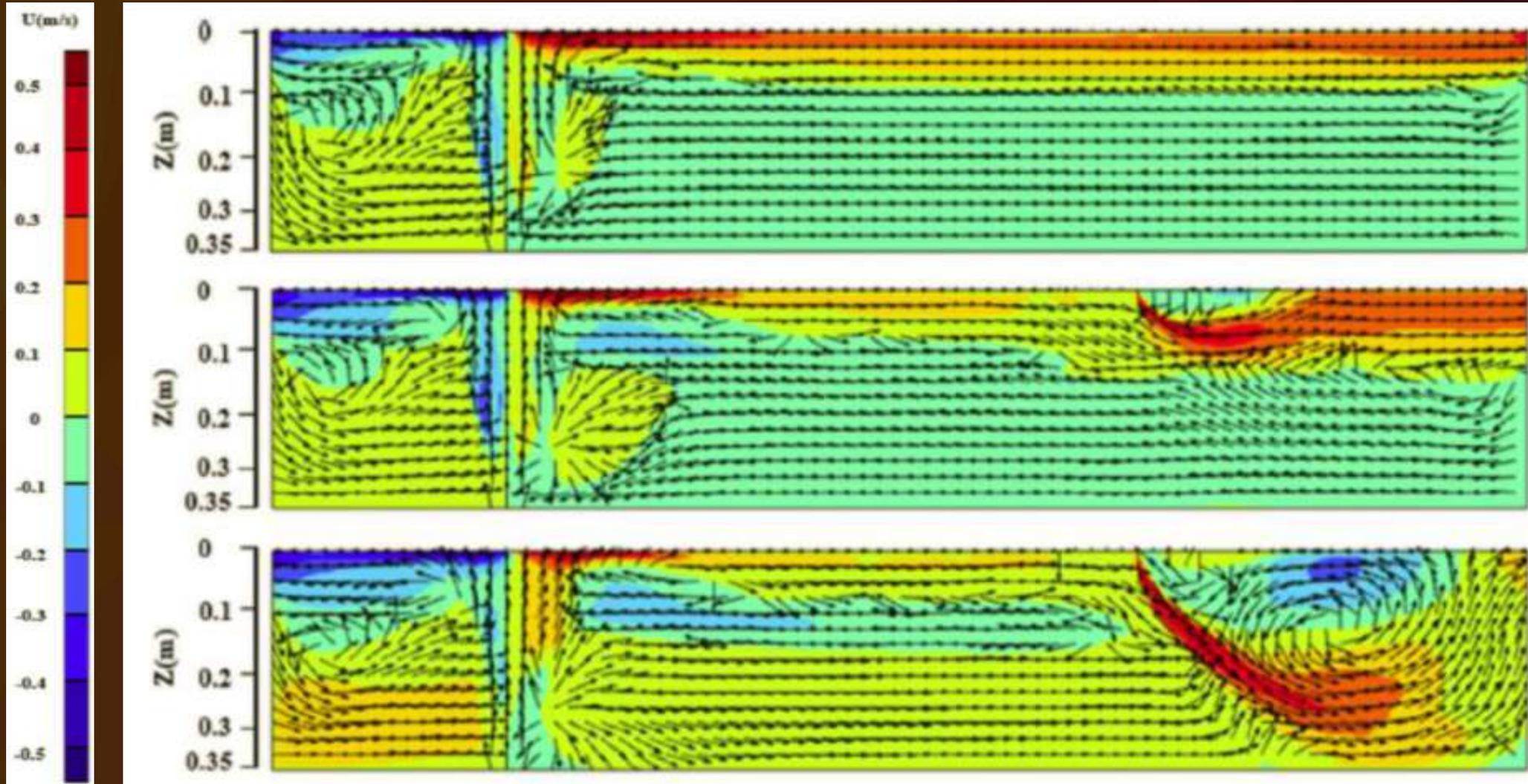
CORTINAS DE AIRE



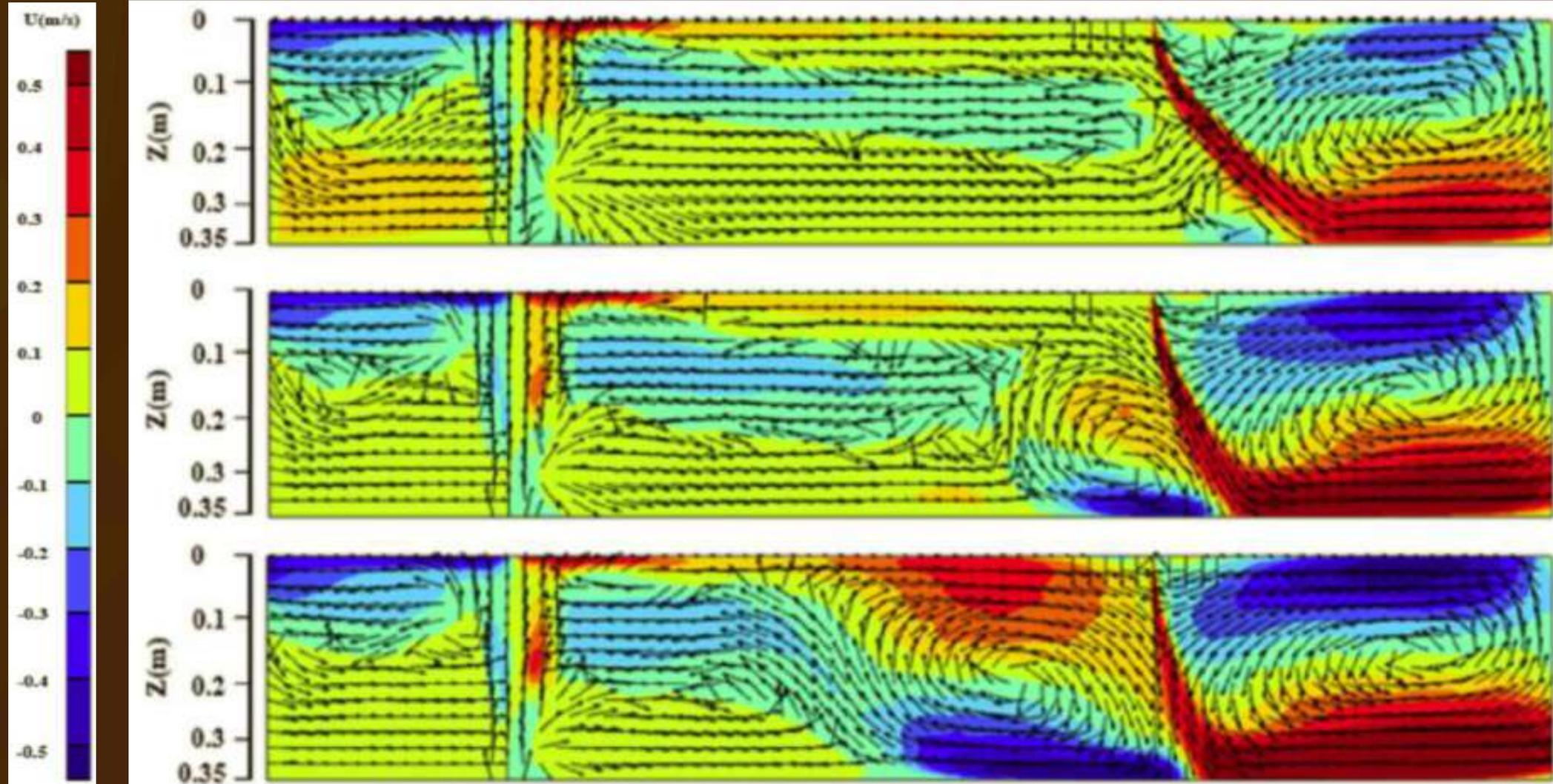
$$\eta_T = \left[1 - \frac{\dot{Q}_{loss}}{(\dot{Q}_f / 2)} \right] \times 100\%$$

$$\eta_s = \left[1 - \frac{Y_{s,with\ air\ curtain}}{Y_{s,without\ air\ curtain}} \right] \times 100\%$$

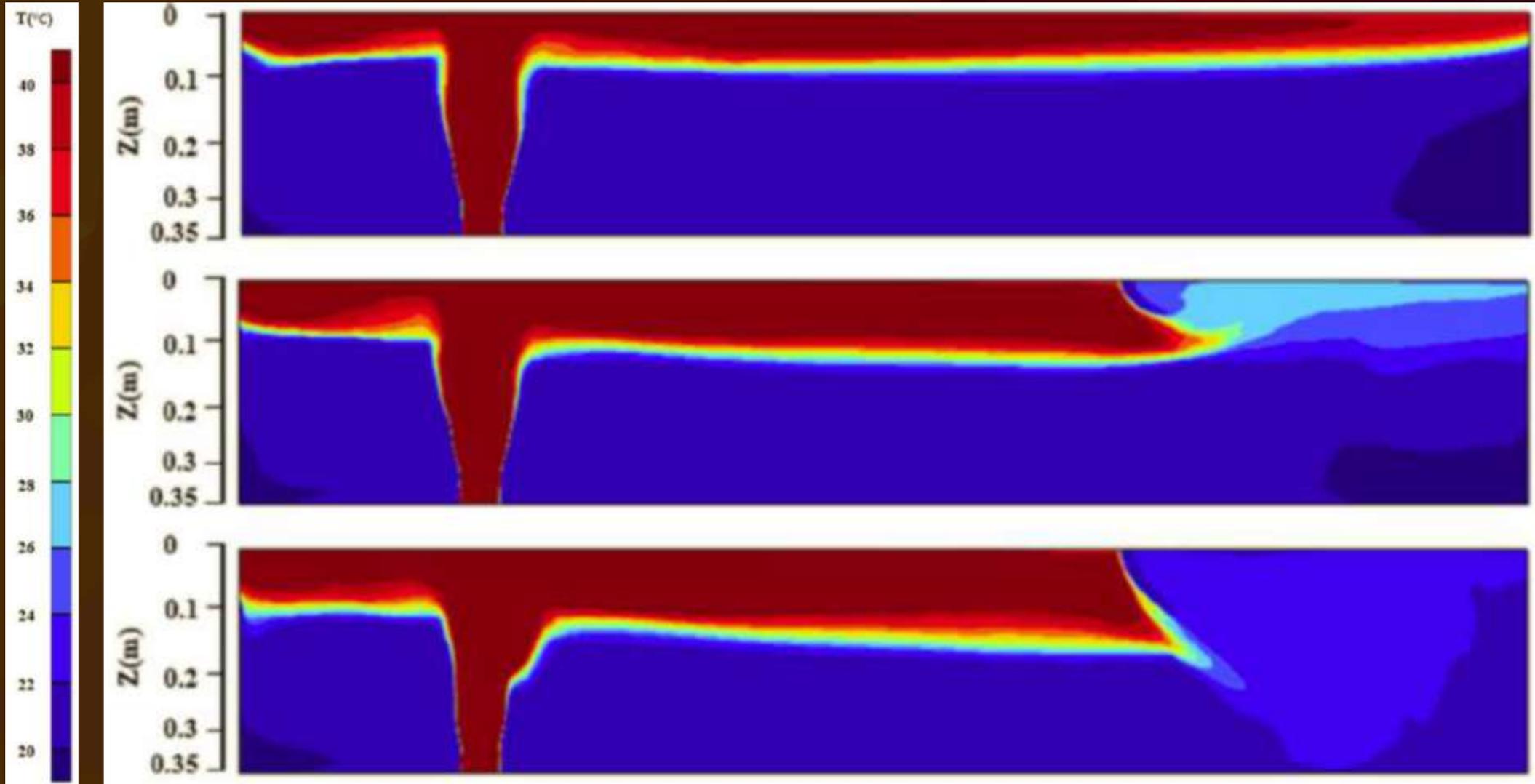
CORTINAS DE AIRE



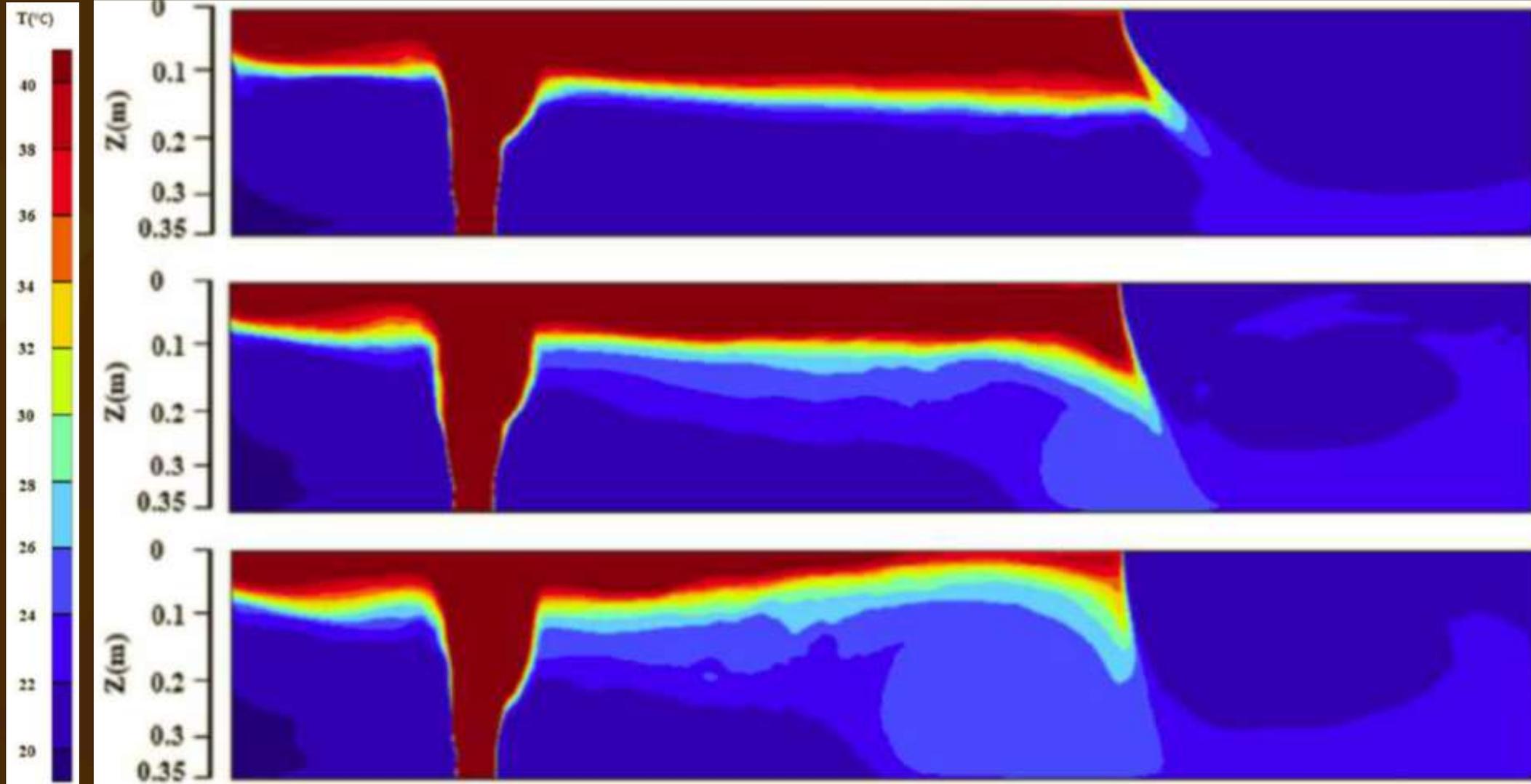
CORTINAS DE AIRE



CORTINAS DE AIRE



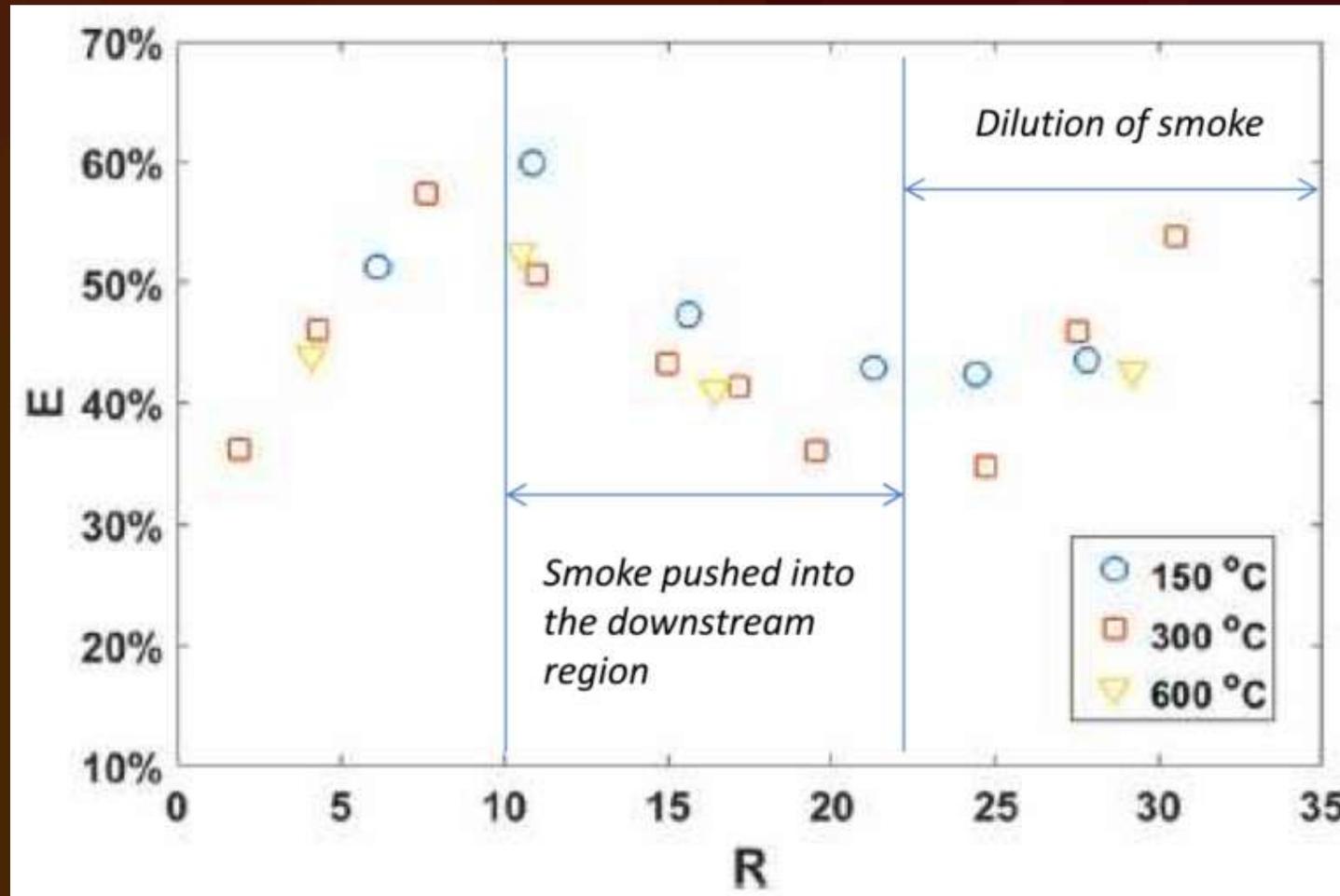
CORTINAS DE AIRE



CORTINAS DE AIRE

$$E = 1 - \frac{\Delta T_{V_j}}{\Delta T_{V_j=0}}$$

$$R = \frac{\rho_j A_j V_j^2}{\rho_s A_s V_s^2}$$



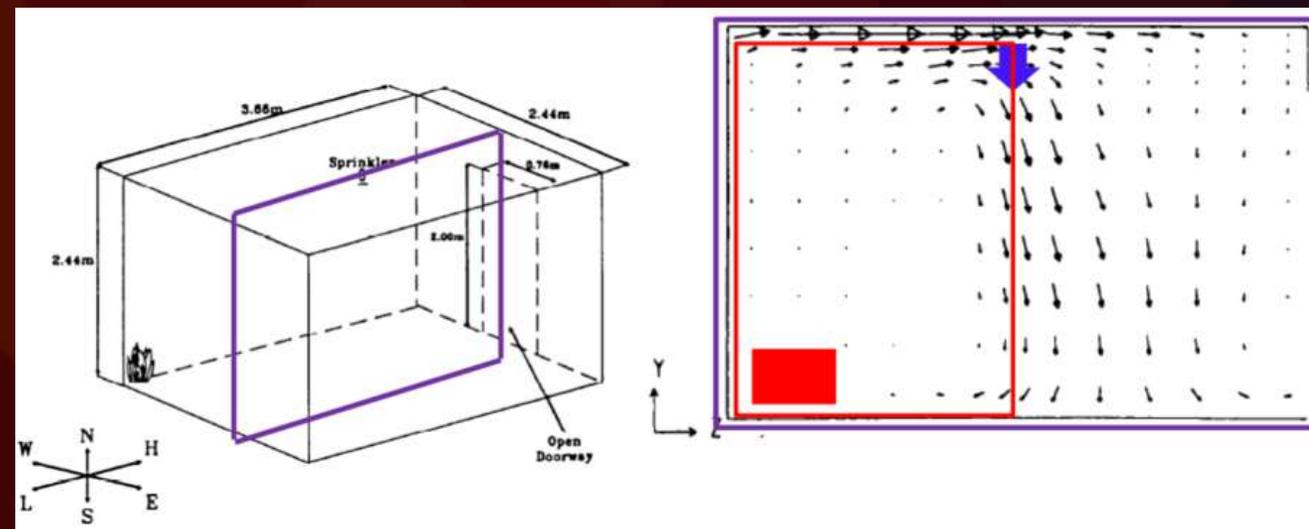
CONTROL DE HUMO

- Compartimentación
- Presurización / Despresurización
- Ventilación por presión positiva (PPV)
- Ventilación natural
- Ventilación mecánica o forzada
- Relleno de Humo
- Extracción de humo
- Cortinas de aire
- **Cortinas de agua**

CORTINAS DE AGUA

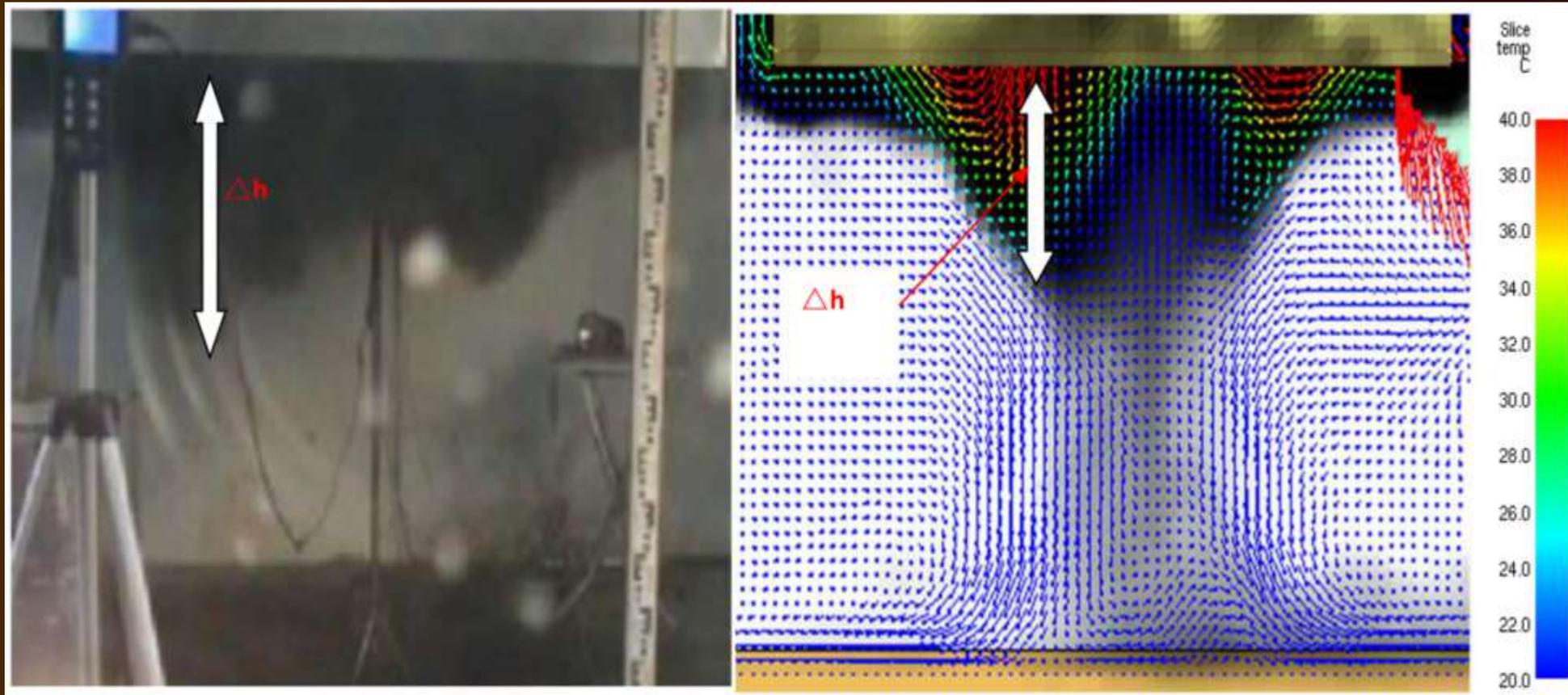
- El principio de operación de las cortinas de agua es similar a las cortinas de aire descrito anteriormente (alto momento).
- El momento del agua es mucho mas alto que el del aire a la misma velocidad, debido a que la densidad es 800 veces mas grande.
- Si el humo es bloqueado, el calor por convección es bloqueado. El agua también bloquea la radiación, por lo tanto pueden ser usados como compartimentación.

$$M_w = \rho_{\text{water}} A_{\text{nozzle}} w_{\text{water}}^2 = \rho_{\text{water}} \left(\frac{\dot{V}_{\text{water}}}{A} \right)^2 \quad (\text{N})$$



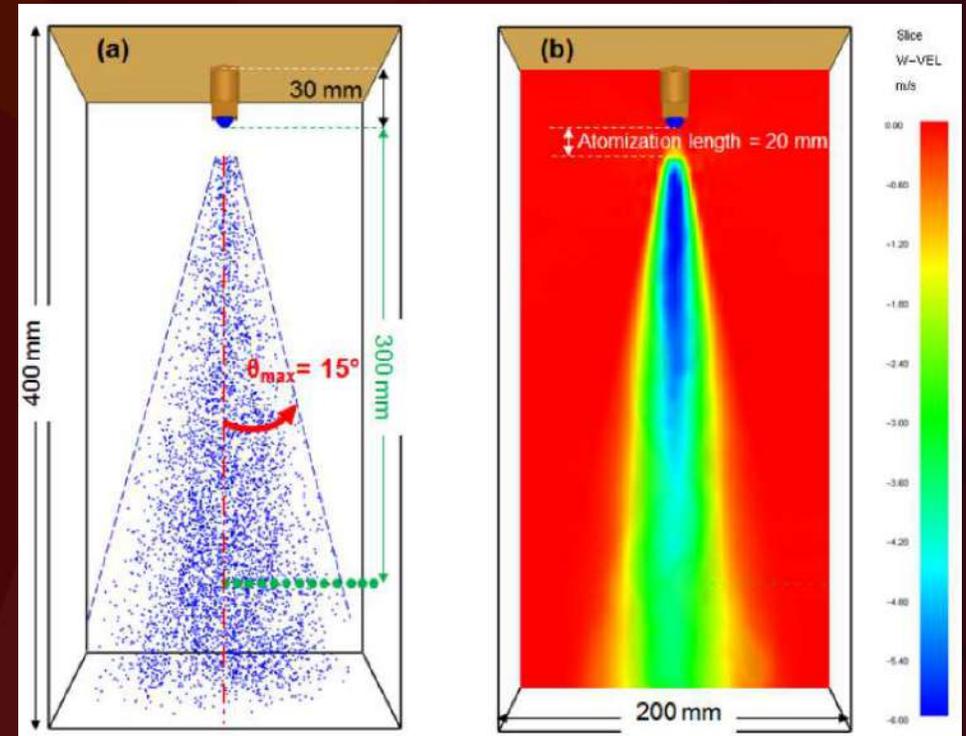
CORTINAS DE AGUA

- Desventaja: el desplazamiento de las gotas hacia el suelo genera un movimiento hacia abajo del humo, por lo tanto no existe estratificación.

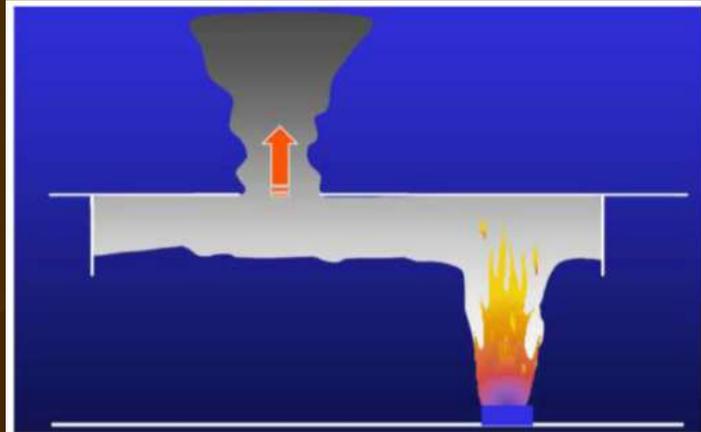


CONTROL DE HUMO

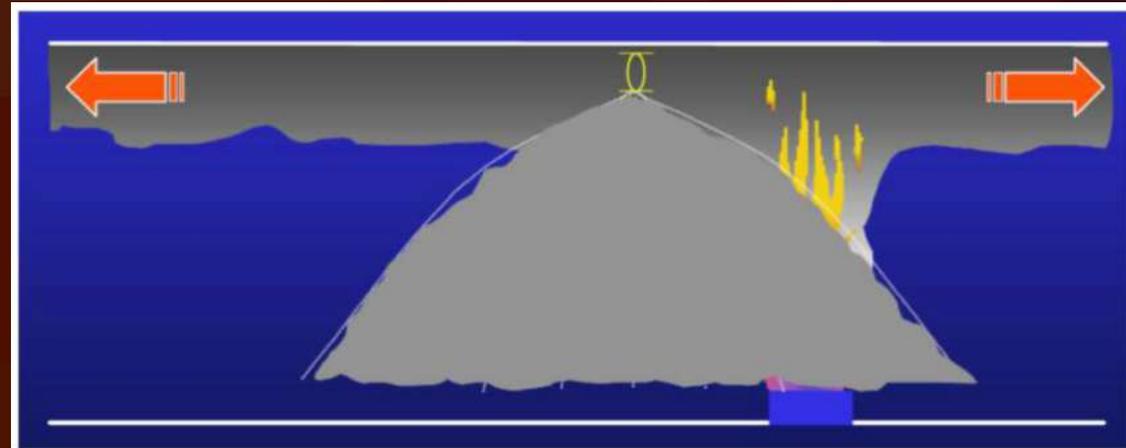
Estudios, investigación y trabajo experimental.



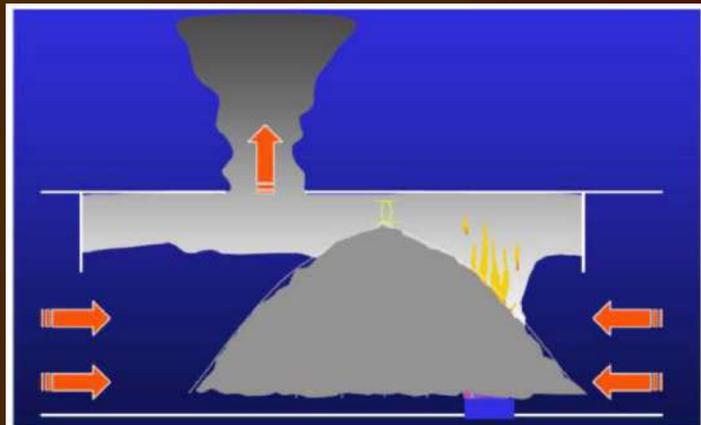
INTERACCIÓN ENTRE SPRINKLERS Y SHC



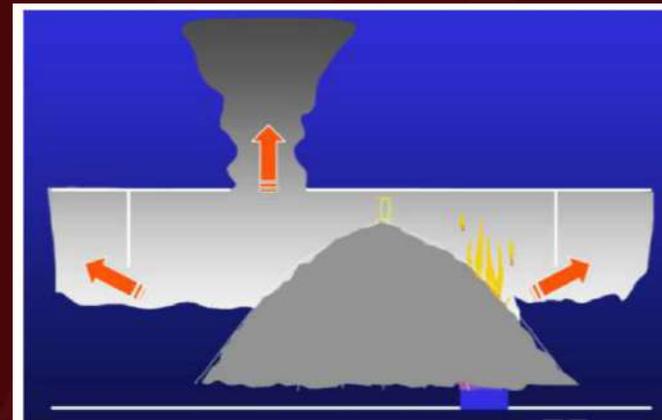
(a) Smoke and heat venting alone



(b) Sprinklers alone



(c) Combination (ideal scenario)



(d) Combination (worst-case scenario)

INTERACCIÓN ENTRE SPRINKLERS Y SHC

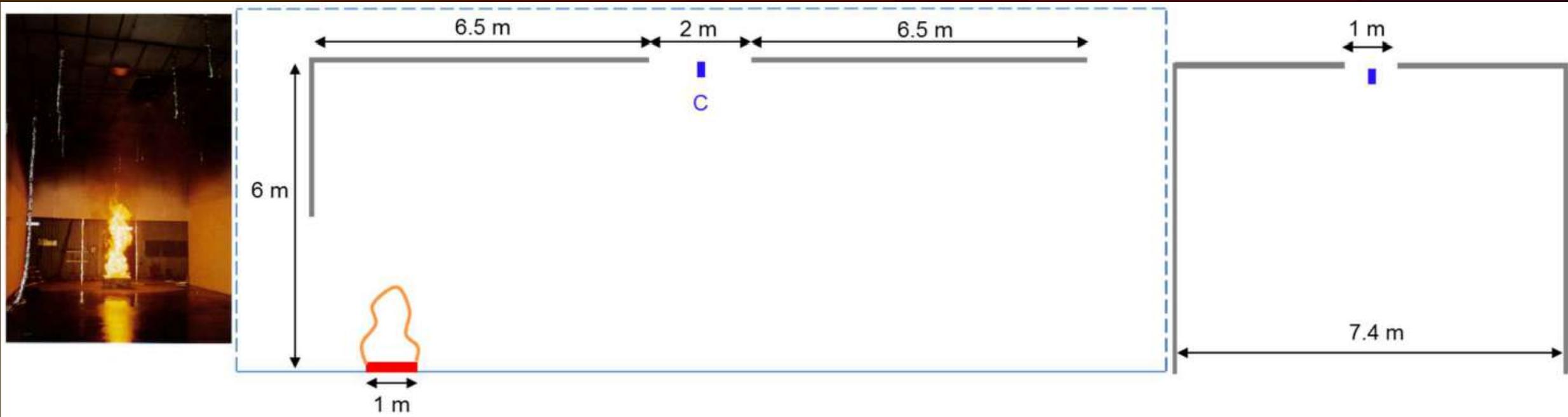
Ventajas:

- En algunos casos mejora la visibilidad.
- Mejora las condiciones de evacuación (calor y niveles de toxicidad).
- Extra protección en caso de falla de Sprinklers.
- Previene un excesivo número de sprinklers operando.

Desventajas:

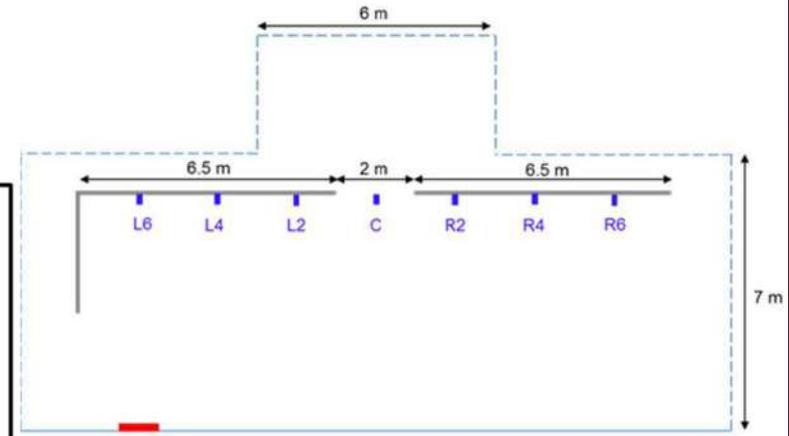
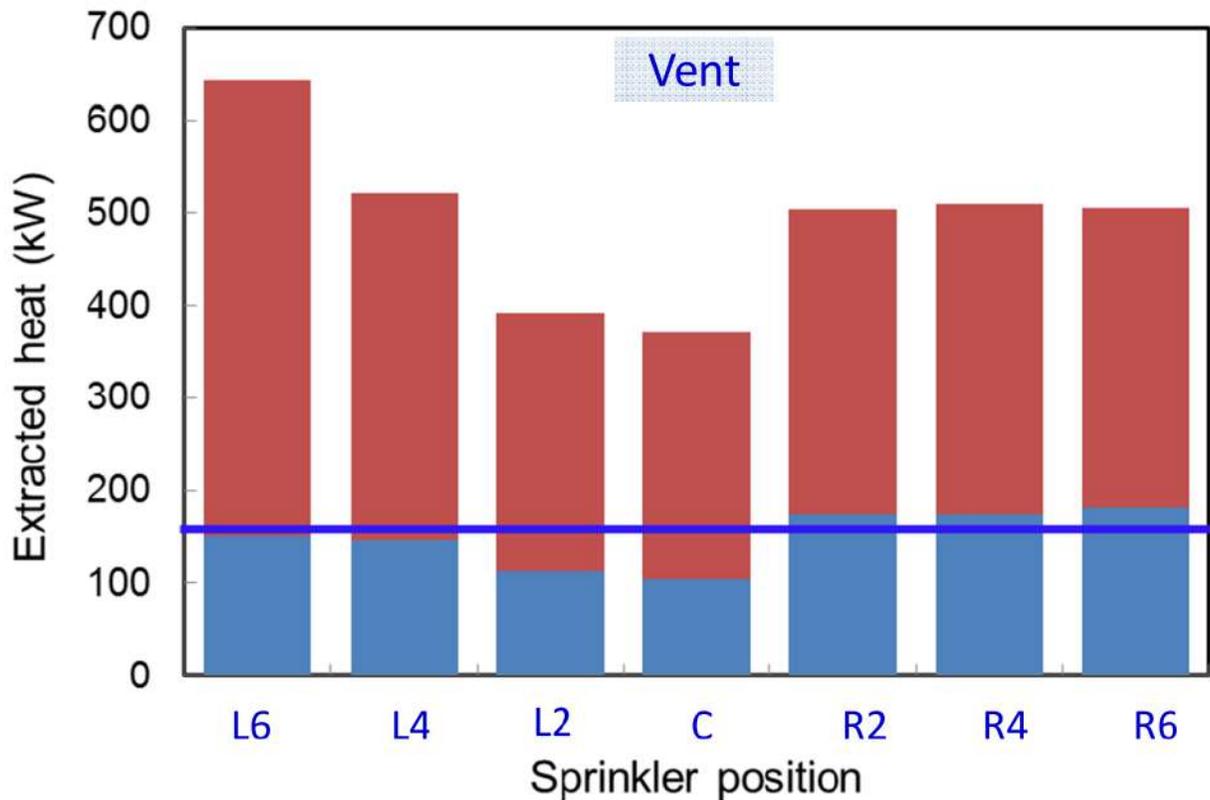
- Retarda la activación de sprinklers.
- Disminuye la eficiencia de los SHC.

Configuración



Resultados

Combination of 1 sprinkler and 1 vent

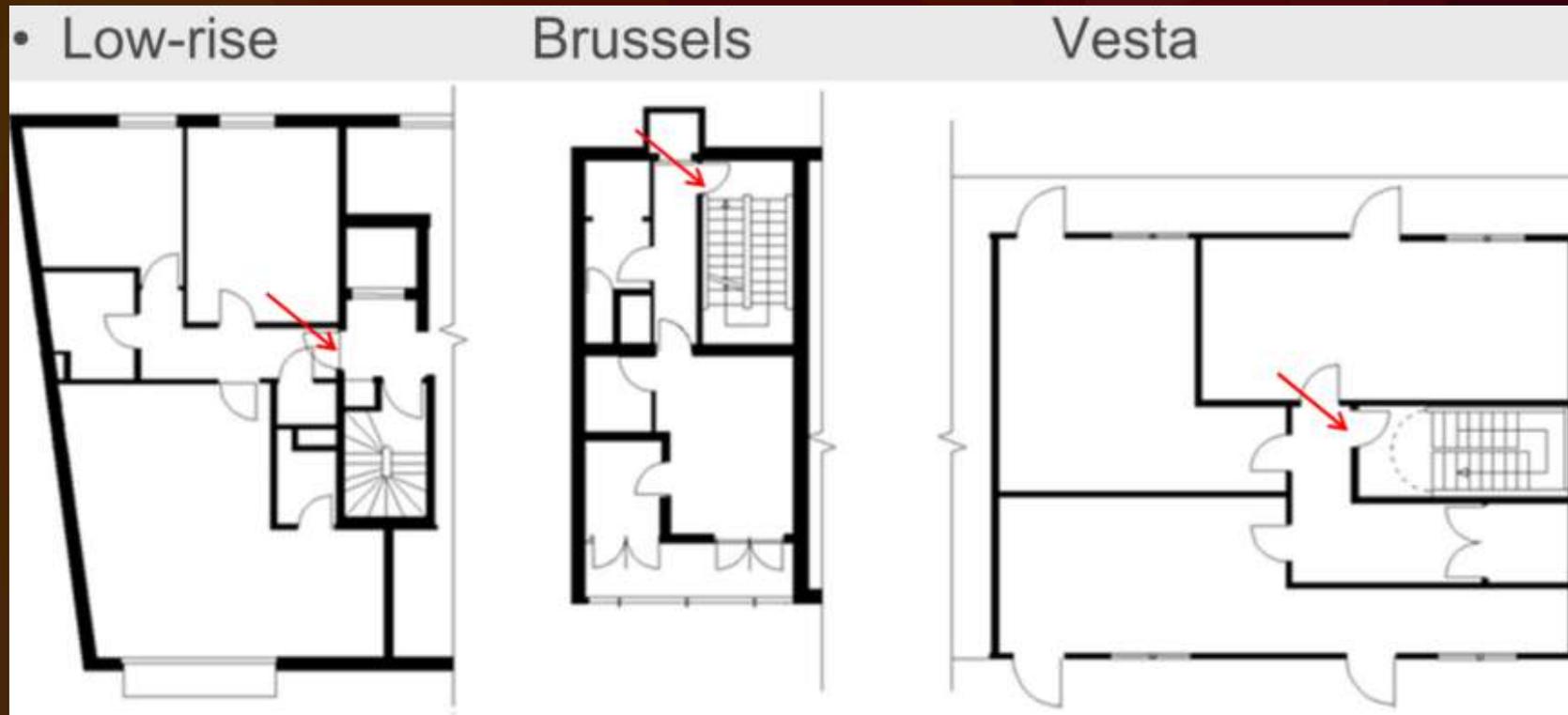


■ Sprinkler
■ Vent

Vent extraction without sprinkler

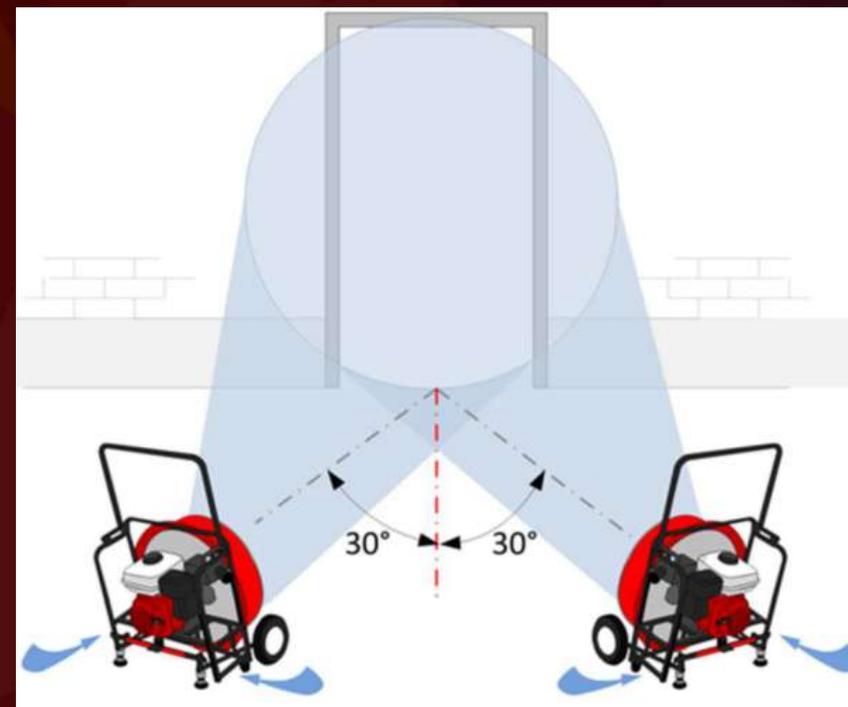
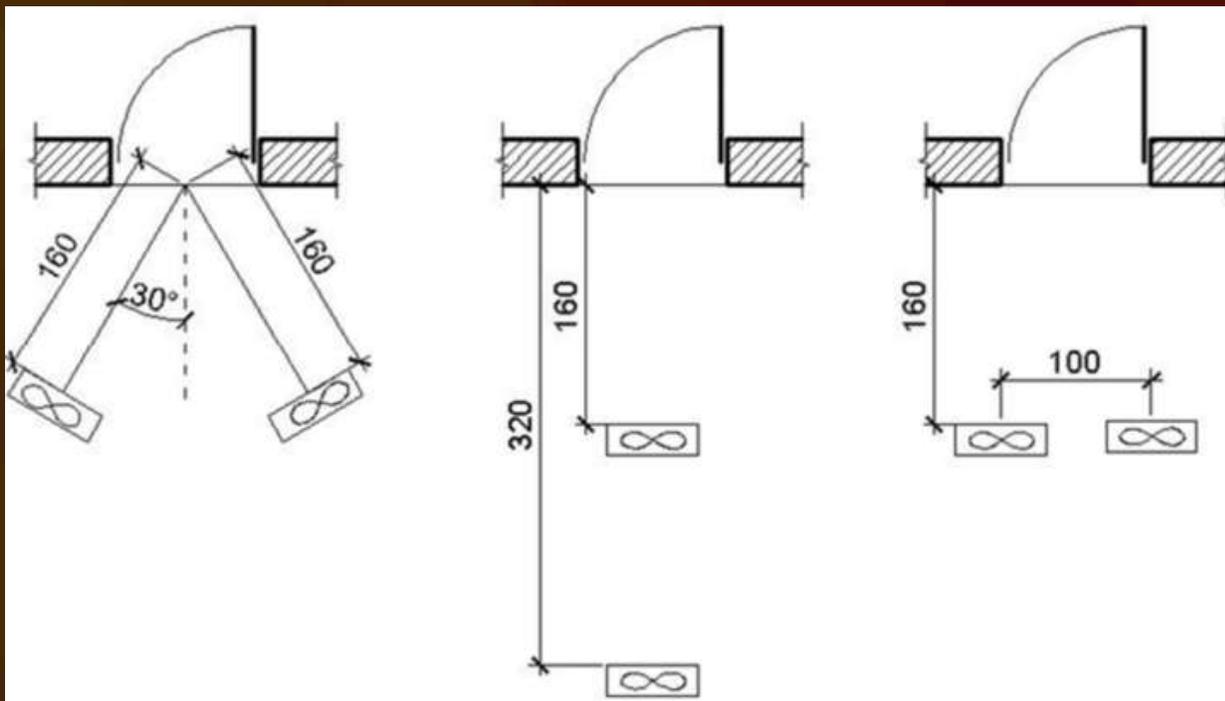
TRABAJO EXPERIMENTAL - PPV

- Low-rise (Primer piso + 3 niveles), mediciones en el segundo piso.
- Brussels (Primer piso + 7 niveles).
- Vesta (Primer piso + 6 niveles).



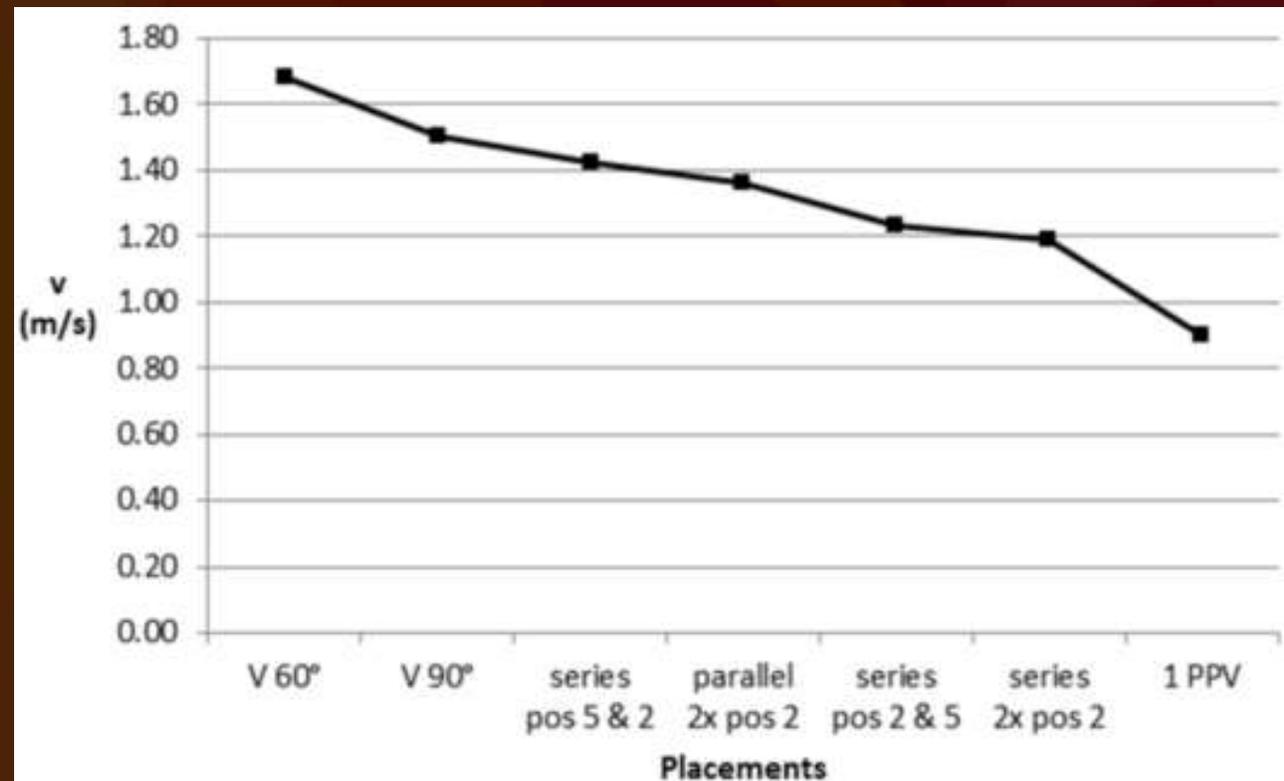
TRABAJO EXPERIMENTAL - PPV

Experimento con múltiples ventiladores (2 ventiladores), configuración en serie, configuración en paralelo y configuración en V (Diferentes ángulos posibles).



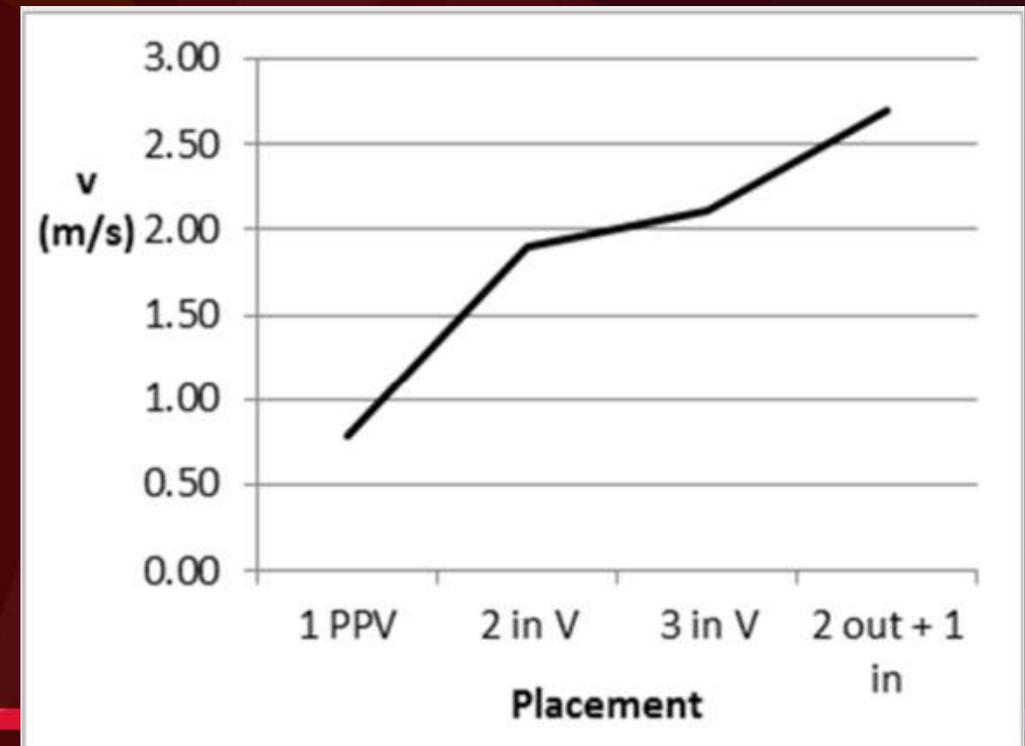
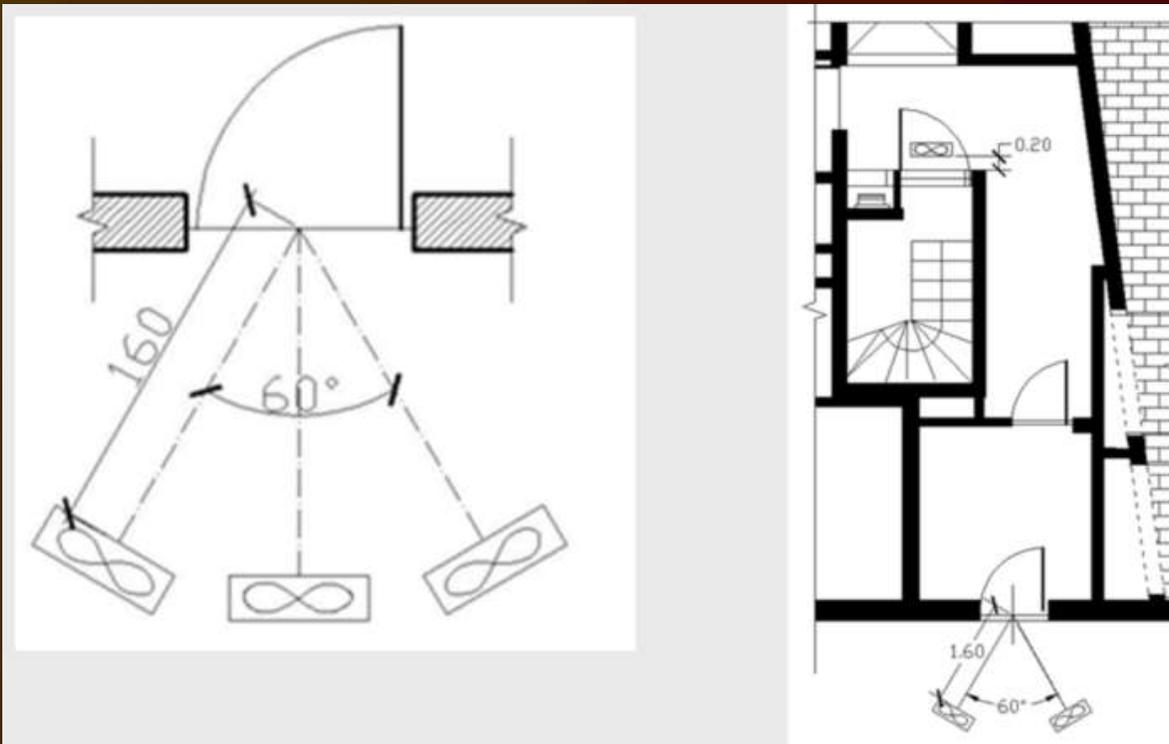
TRABAJO EXPERIMENTAL - PPV

- Configuración en V presenta la mejor performance que la configuración en serie o paralelo.
- El ángulo de 60 grados es el óptimo para la configuración en V.

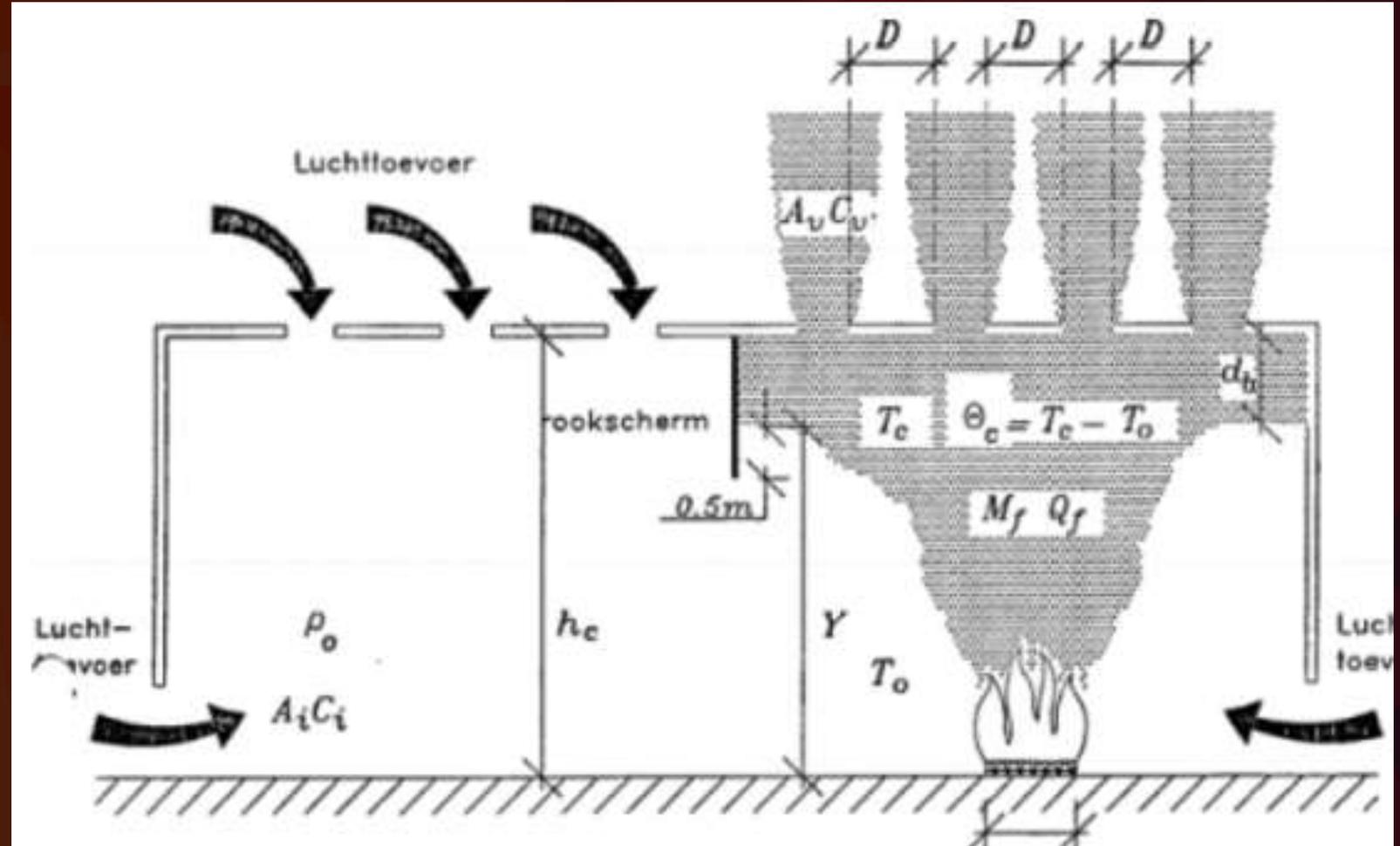
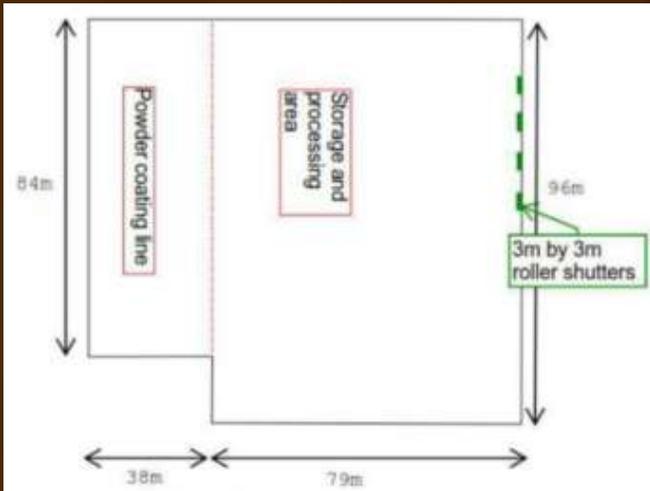
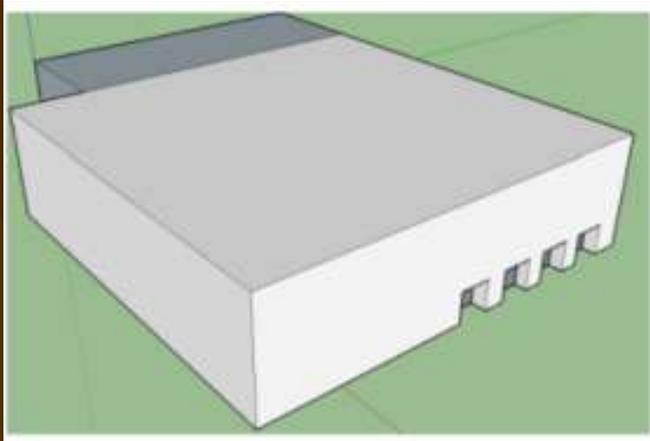


TRABAJO EXPERIMENTAL - PPV

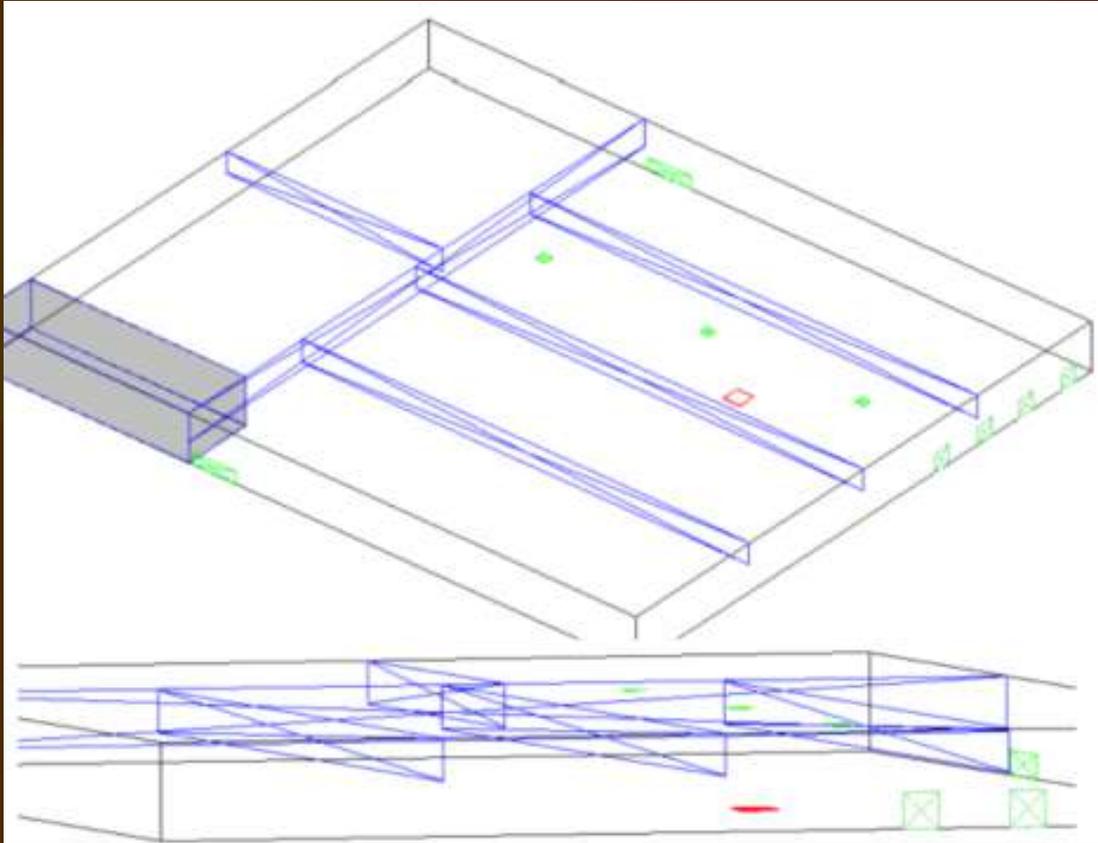
- Dos ventiladores en V han sido probados con un tercer equipo.
- Tres equipos son mejores que dos, pero el óptimo desempeño con los mismos equipos es logrado posicionando un ventilador en el interior.



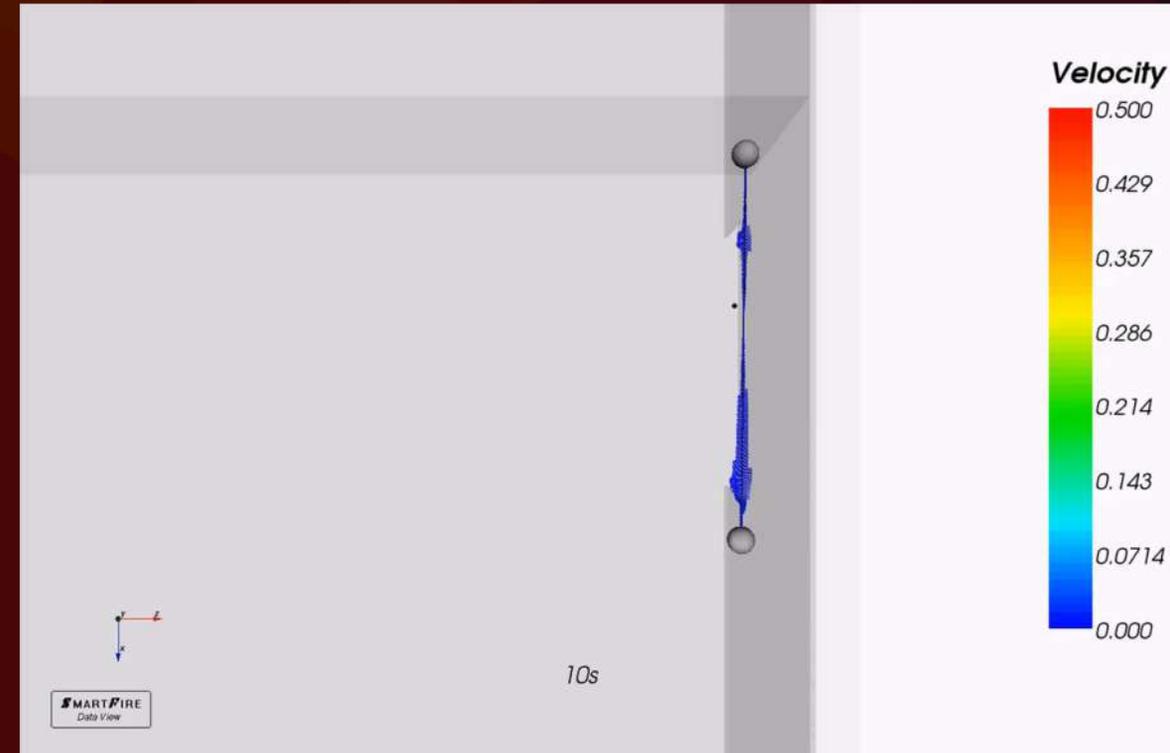
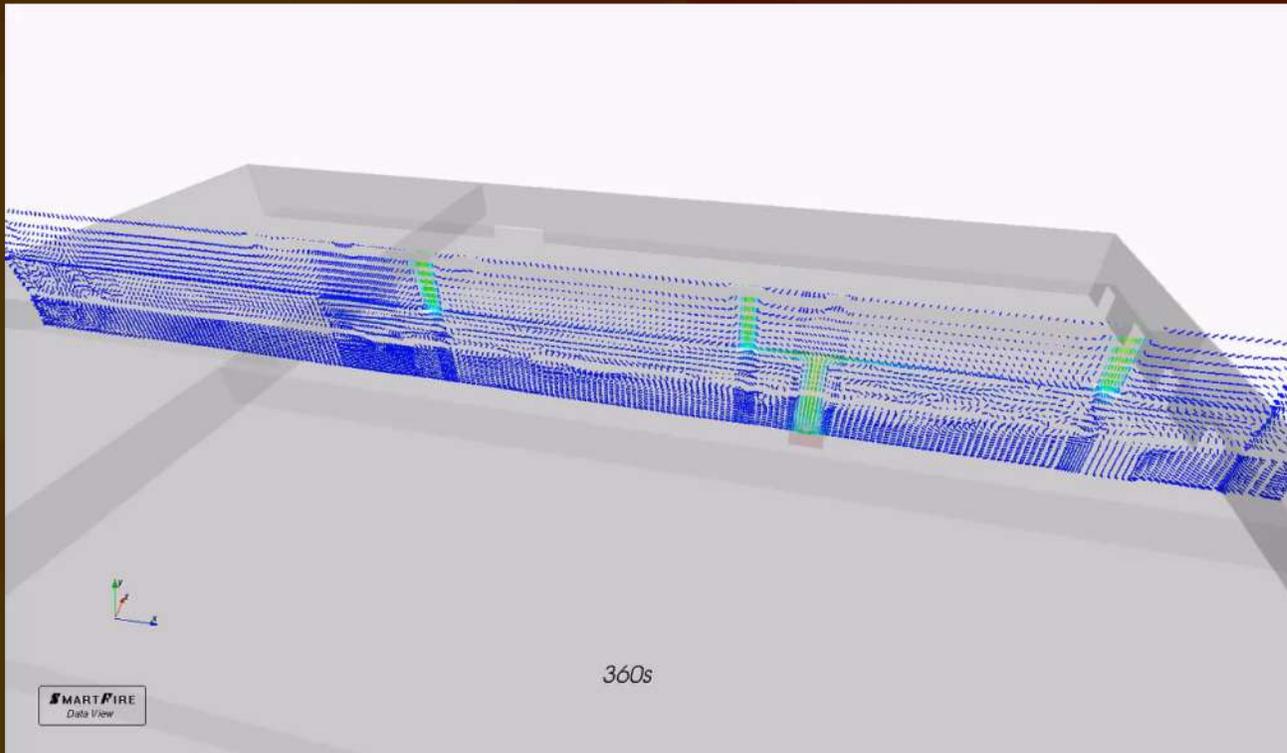
TRABAJO EXPERIMENTAL – SMOKE FILLING



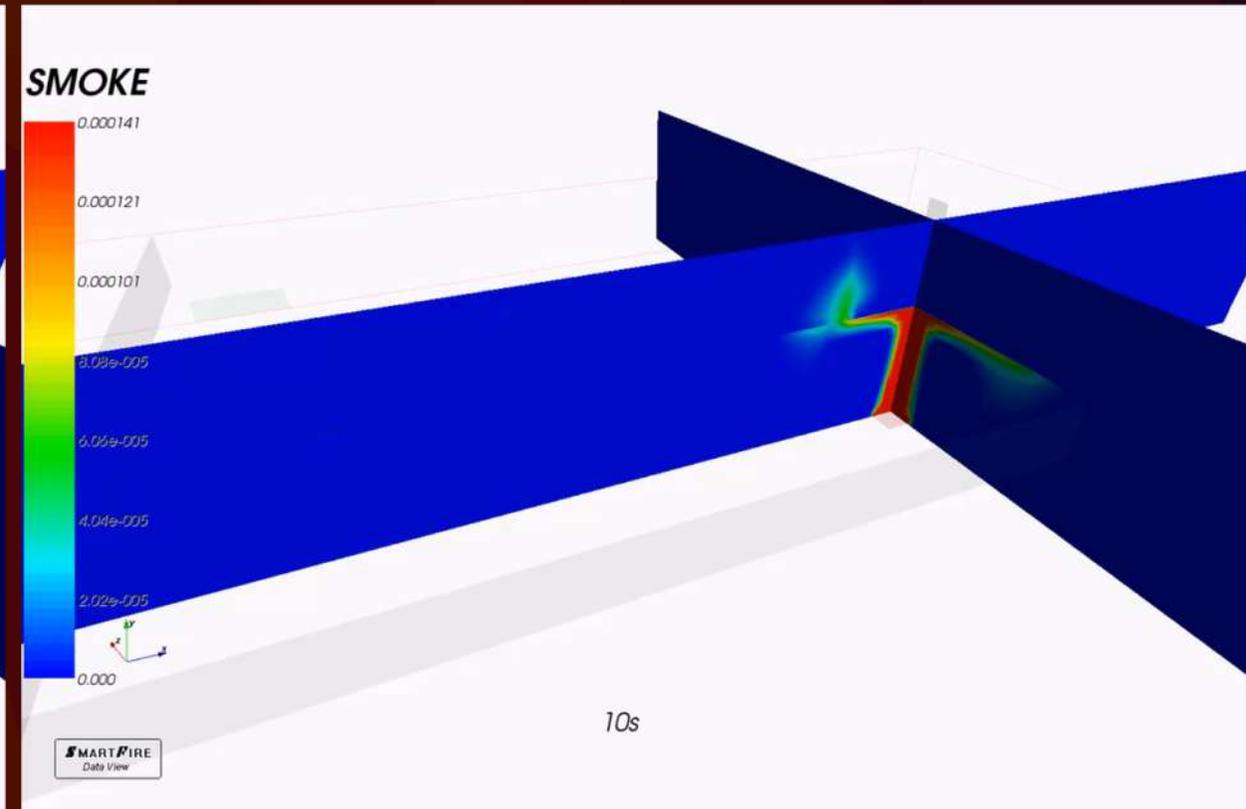
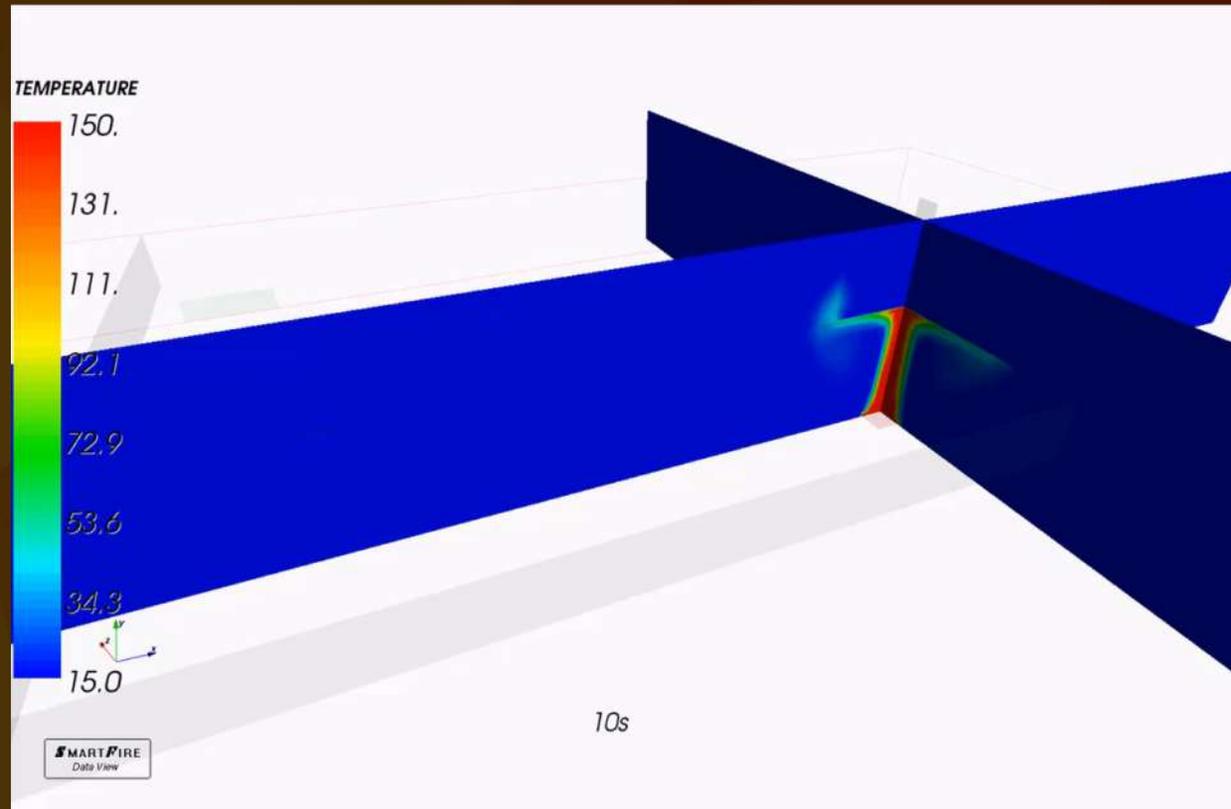
TRABAJO EXPERIMENTAL – SMOKE FILLING



TRABAJO EXPERIMENTAL – SMOKE FILLING



TRABAJO EXPERIMENTAL – SMOKE FILLING



TRABAJO EXPERIMENTAL – TUNNEL FIRES

(a) Thermocouple Tree



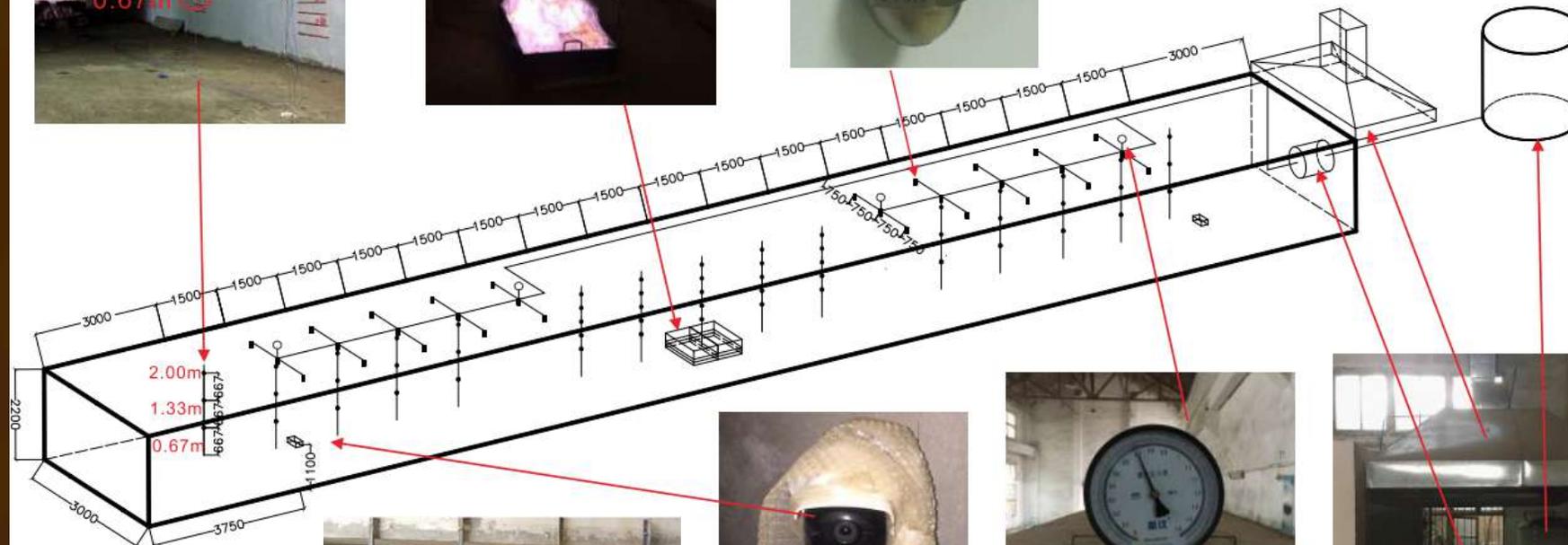
(b) Fire Source



(c) Nozzle



HRRPUA	Area	Nº of Pan	HRR
$\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	m^2	Unit	kW
384.1	0.5	2	384.1

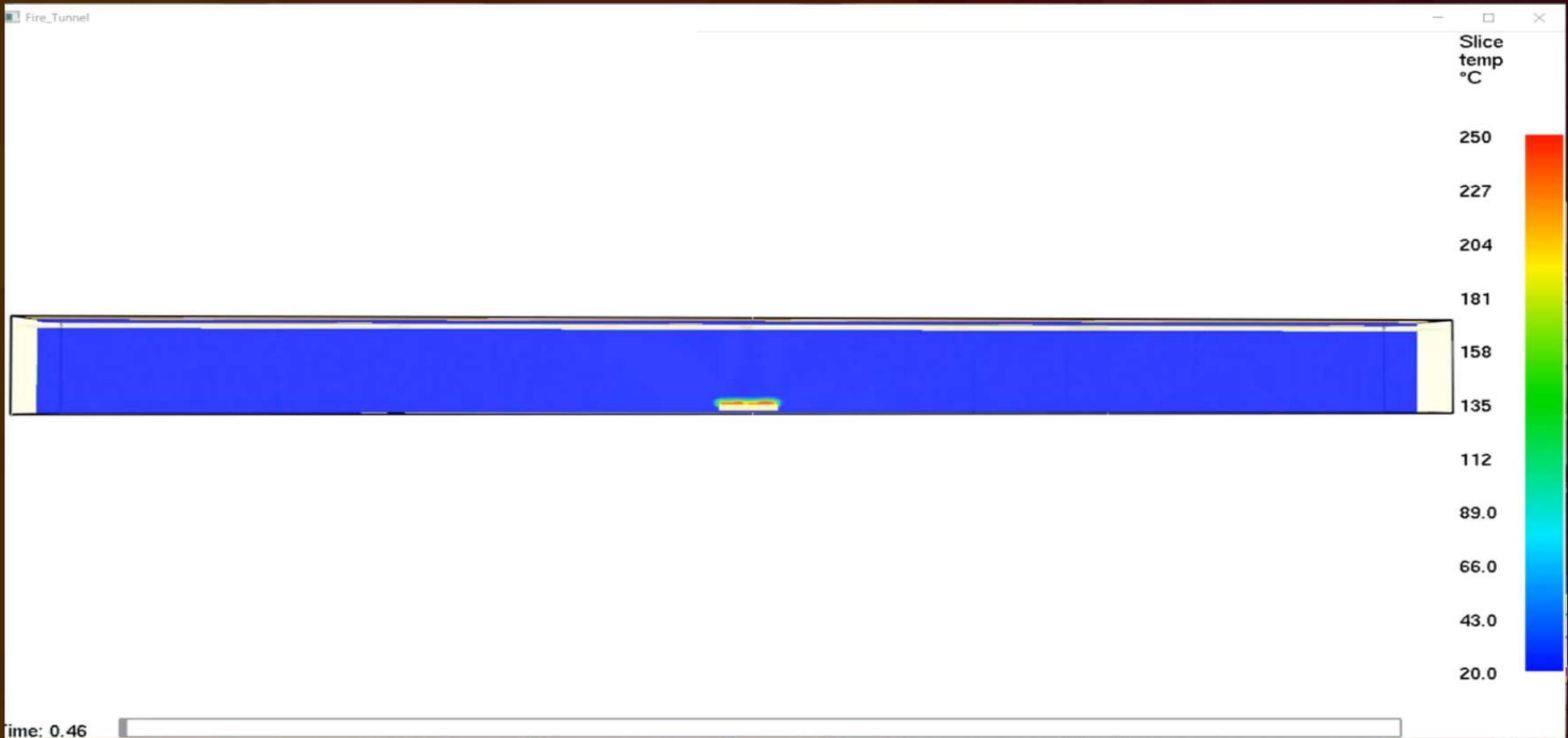


(d) Camera

(e) Water-flowmeter

(f) Pump, Tank and Hood for fume

TRABAJO EXPERIMENTAL – TUNNEL FIRES



TRABAJO EXPERIMENTAL – TUNNEL FIRES

Ventilación Mecánica

Atkinson and Wu

Slice
U-VEL
m/s

2.15
1.83
1.51
1.19
0.87
0.55
0.23
-0.09
-0.41
-0.73
-1.05

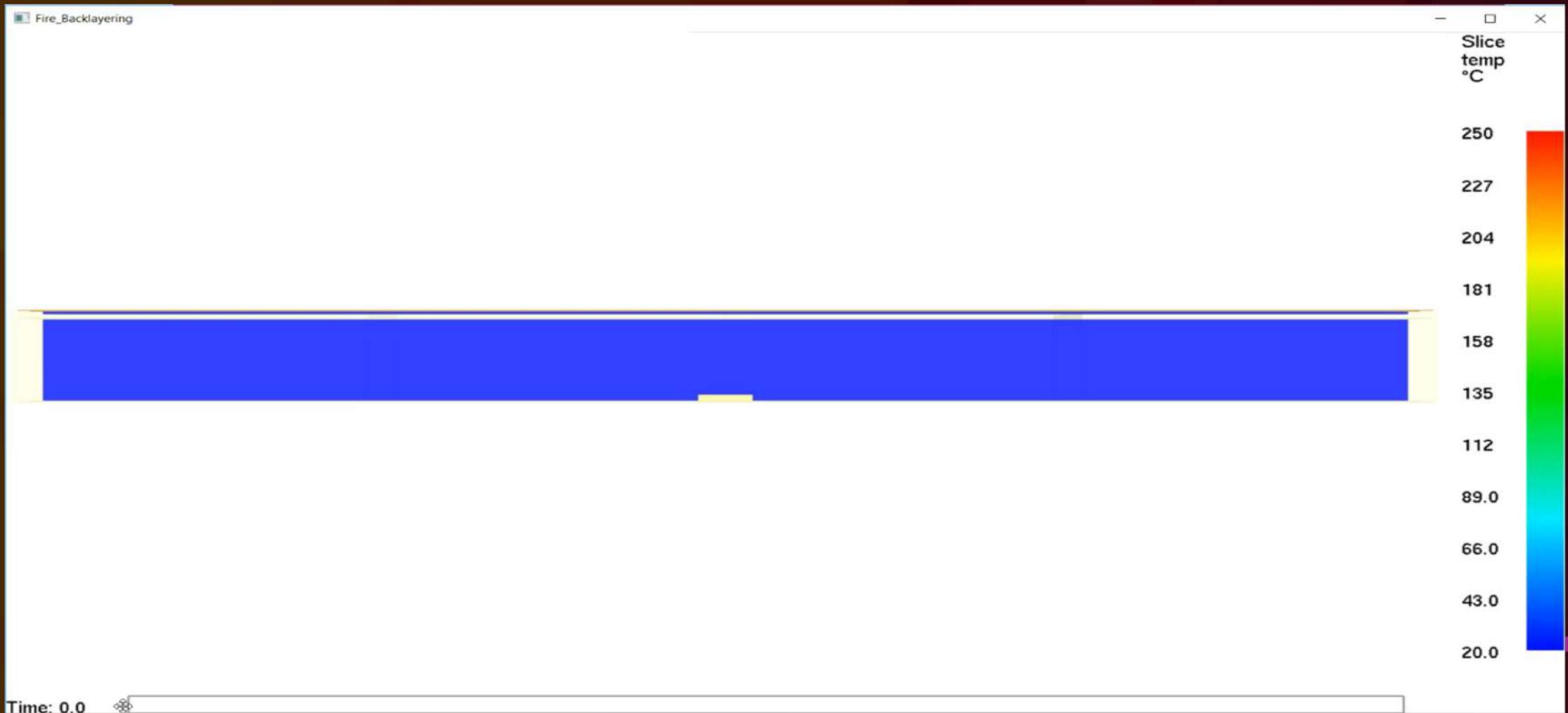
Kunsch

Slice
U-VEL
m/s

2.60
2.30
2.00
1.70
1.40
1.10
0.80
0.50
0.20
-0.10
-0.40

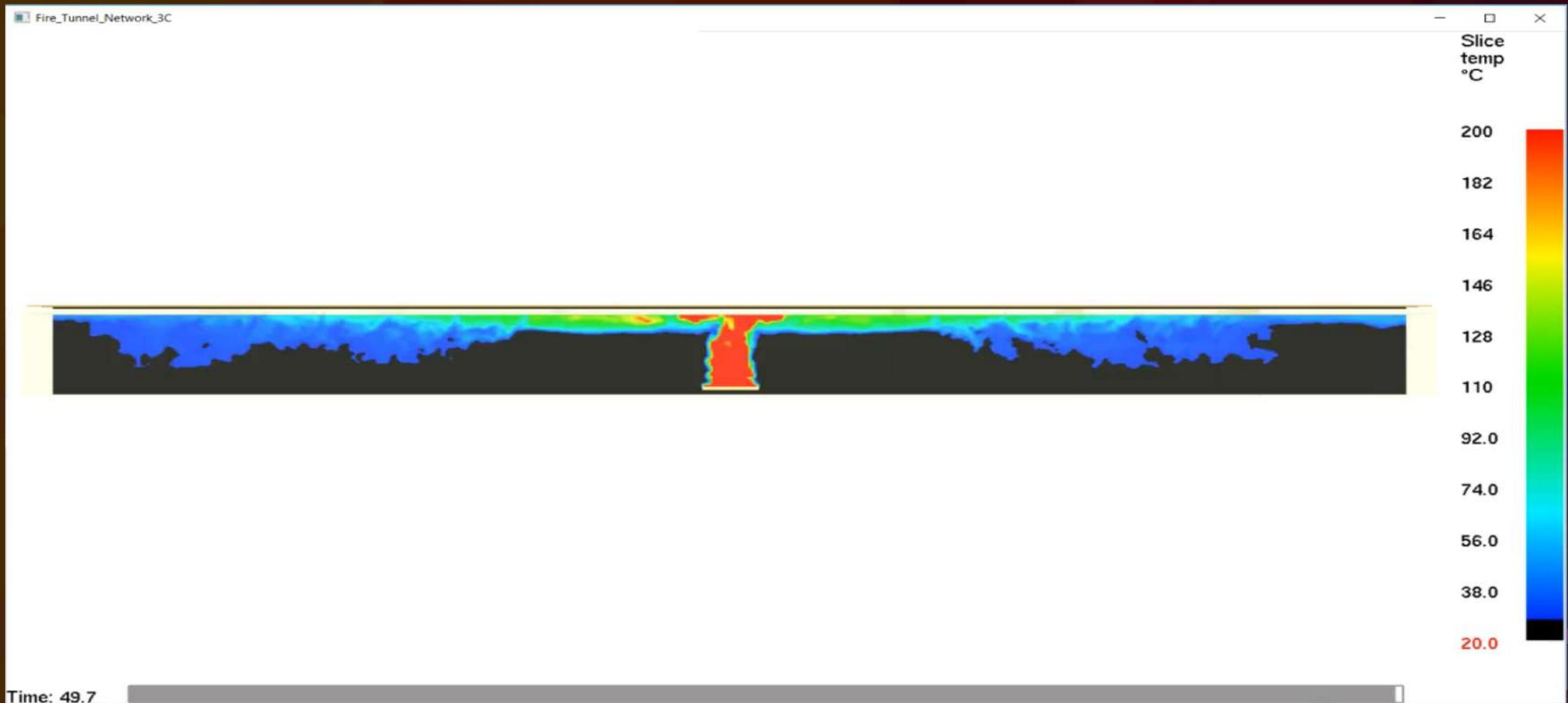
TRABAJO EXPERIMENTAL – TUNNEL FIRES

Ventilación Mecánica



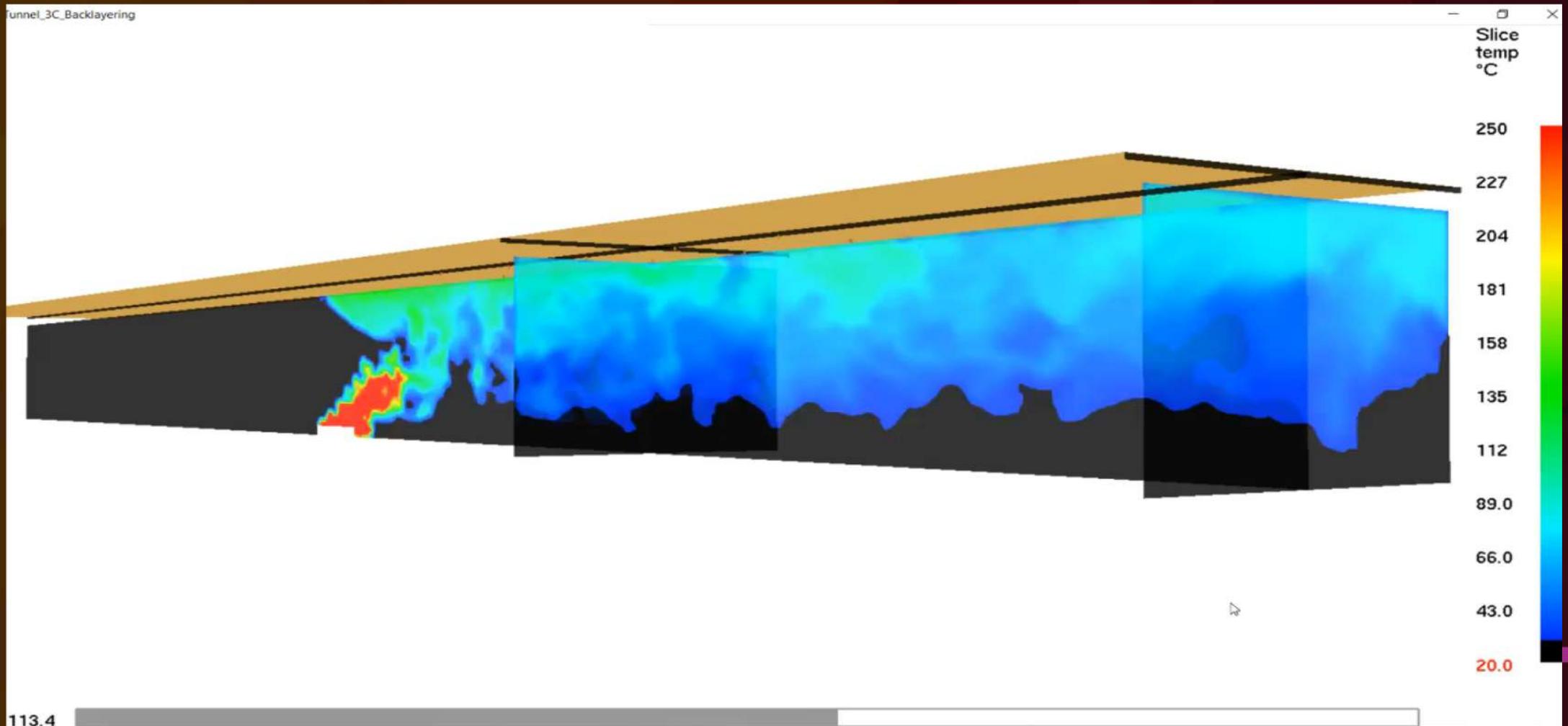
TRABAJO EXPERIMENTAL – TUNNEL FIRES

Interacción entre Humo y Water Nozzles

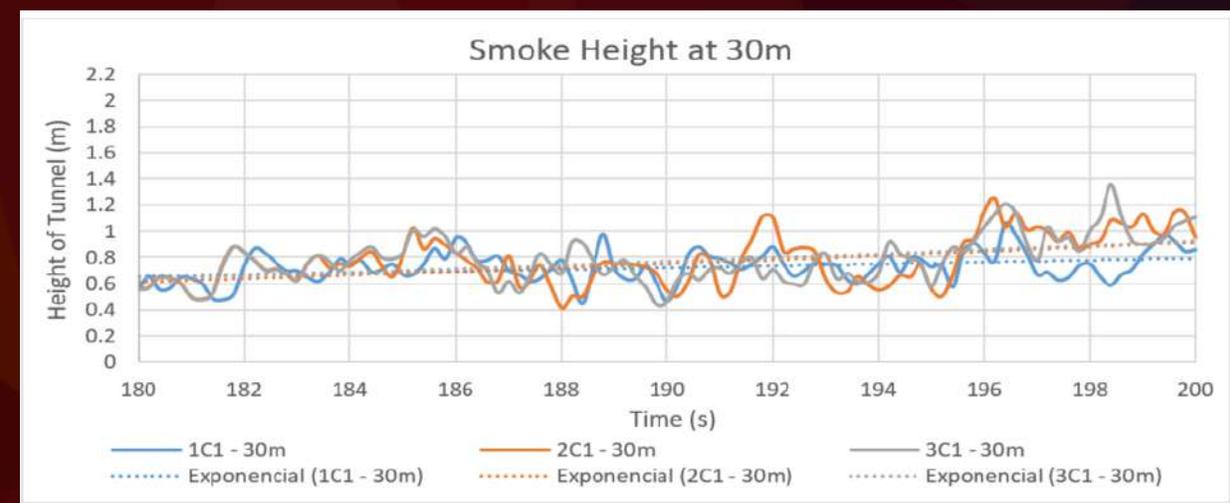
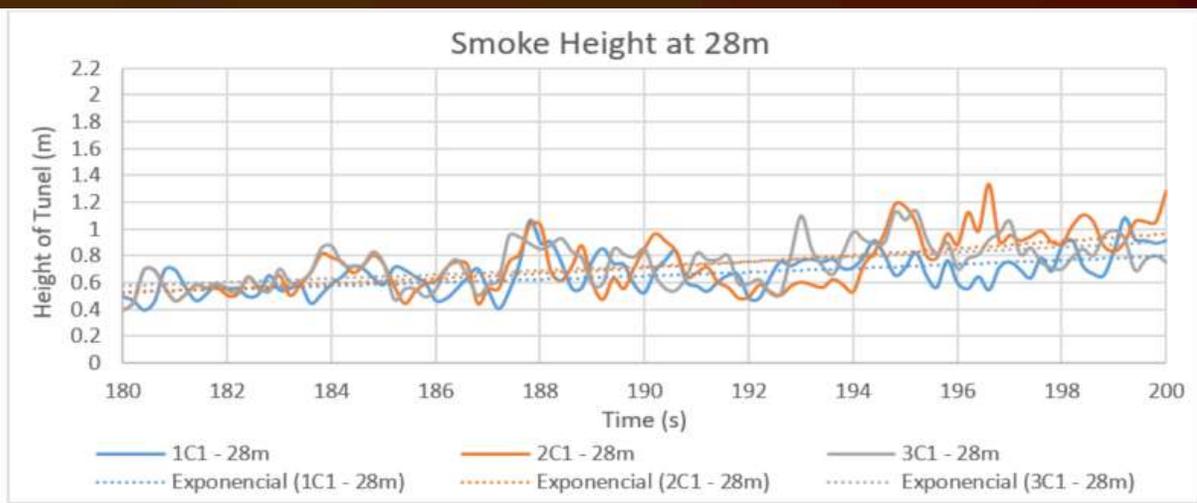
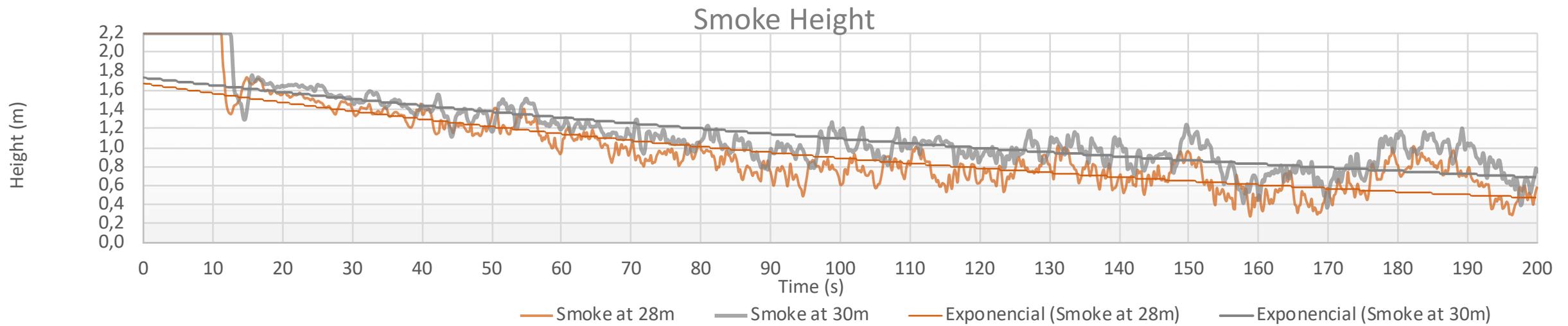


TRABAJO EXPERIMENTAL – TUNNEL FIRES

Interacción entre Humo, ventilación mecánica y water nozzles.



TRABAJO EXPERIMENTAL – TUNNEL FIRES



CONTROL DE HUMO



Patricio Valdés Gacitúa
Master of Science in Fire Safety Engineering
Universidad de Gent – Bélgica
patricio.valdesgacitua@ugent.be



expofuego

Chile 2018