



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

Simulación numérica de incendios en túneles
inclinados

Autor: Juan Arias Llorente

Director: Pablo Ayala Santamaría

Madrid

julio de 2025

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título

Simulación numérica de incendios en túneles inclinados

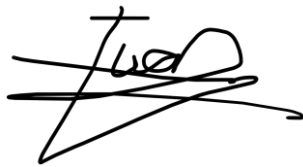
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico 2024/25 es de mi autoría, original e inédito y

no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido

tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Juan Arias Llorente

Fecha: 04/ 07/ 2025

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Pablo Ayala Santamaría

Fecha: 04/ 07/ 2025



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

Simulación numérica de incendios en túneles
inclinados

Autor: Juan Arias Llorente

Director: Pablo Ayala Santamaría

Madrid

Agradecimientos

Quisiera mostrar mi agradecimiento a Pablo Ayala Santamaría, director de este proyecto por darme la oportunidad de realizar mi Trabajo de Fin de Grado en el sector de la simulaciones y la modelación numérica. Ha sido una gran experiencia de aprendizaje meterme en el mundo de las simulaciones de incendios en túneles. Agradezco su apoyo y orientación a lo largo de todo el proceso, estando siempre disponible, aunque yo estuviera estudiando en el extranjero.

También me gustaría agradecer a Luis Amo Peletier su ayuda y apoyo, con los que me ha resultado más sencillo comprender las distintas herramientas aplicadas en el proyecto.

Por último, deseo agradecer a la escuela la formación excepcional, tanto en el ámbito académico como en el desarrollo personal, que me ha proporcionado a lo largo de la carrera, y que ha sido fundamental para la realización íntegra de este trabajo.

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE INCENDIOS EN TÚNELES INCLINADOS

Autor: Juan Arias Llorente.

Director: Pablo Ayala Santamaría.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Este Trabajo de Fin de Grado analiza el comportamiento de las temperaturas y el humo en incendios en túneles inclinados, más específicamente en tres pruebas realizadas en el Memorial Tunnel que se realizaron en la década de 1990. Este proceso se va a llevar a cabo a través de simulaciones numéricas, usando el software Fire Dynamics Simulator (FDS). Gracias a los resultados obtenidos en la investigación, se ha llegado a las conclusiones de que FDS tiende a sobrestimar el retroceso del humo en las zonas cercanas y anteriores al fuego, en túneles con una geometría irregular (un túnel arqueado en este caso). Sin embargo, es bastante preciso cuando se trata de predecir temperaturas aguas abajo del incendio en sistemas estables y controlados, haciéndolo especialmente útil para sectores de seguridad y ventilación.

Palabras clave: Simulación numérica, túneles inclinados, incendios, dinámica de fluidos computacional (CFD), FDS, Memorial Tunnel y capa de retroceso de humo.

1. Introducción

Durante las últimas décadas se ha dado un gran desarrollo en el sector de transportes, lo que ha supuesto un incremento en la construcción de túneles, elevando los riesgos entre los que destacan los incendios, ya que los gases liberados durante estos incidentes resultan muy nocivos para los humanos, llegando a ser incluso mortal tras inhalarlos. Este es el motivo principal por el que es imprescindible el estudio del comportamiento del humo y de las temperaturas en este tipo de accidente para así poder mejorar los estándares de seguridad. Para esto se han desarrollado sistemas de ventilación siendo los principales tipos natural y mecánica, que tienen como objetivo ser capaces de controlar la propagación del humo.

Recurrir a la experimentación para mejorar y optimizar los sistemas de ventilación resulta muy costoso y, además, se liberan gases tóxicos y perjudiciales para el medio ambiente. Por esto el desarrollo de la simulación numérica es fundamental como una alternativa económica y eficaz frente a ensayos experimentales. Existen de programas como FDS (Fire Dynamic Simulator) o ANSYS FLUENT centrados en la dinámica de fluidos computacional (CFD) que permiten evaluar múltiples escenarios con precisión y rapidez, sin tener que recurrir a experimentos.

Uno de los objetivos de este proyecto es analizar cómo afecta el factor de la inclinación al perfil de temperaturas, a la ventilación y al comportamiento del humo a través del uso de FDS.

2. Definición del proyecto

A lo largo de este proyecto se va a simular numéricamente tres pruebas de incendios (tests 606A, 610 y 615B) realizadas en el Memorial Tunnel en la década de 1990, analizando la capacidad que tiene FDS para modelar la propagación del humo, la distribución de temperaturas y el impacto sobre la ventilación longitudinal en túneles con pendiente y con una geometría irregular. También se quiere evaluar la precisión de FDS, las zonas más críticas del incendio, para poder determinar sus limitaciones. Los parámetros críticos son la temperatura y ventilación en la zona más cercana al fuego, la predicción capa de retroceso de humo y la estabilización de las temperaturas aguas abajo del incendio. Se compararán los resultados con las simulaciones realizadas por Beyer et al.(1) en 2024 con el programa ANSYS FLUENT.

A continuación, se muestra un esquema flujo que presenta de manera simplificada el proceso del proyecto.



Figura 1: Esquema de trabajo

3. Descripción del modelo

El túnel y las pruebas se han simulado a través del software Fire Dynamics Simulator (FDS), una herramienta CFD que se usa para simular la propagación de incendios (perfiles de temperaturas, propagación de humo, ventilación...) y los flujos de aire derivados de estos. FDS resuelve una versión simplificada de las ecuaciones de Navier-Stokes, con la siempre que los escenarios estén adaptados a flujos de baja velocidad (número de Mach inferior a 0.3).

La configuración geométrica del modelo del túnel intenta reproducir fielmente la sección transversal real del Memorial Tunnel, que se caracteriza por tener un arco superior y dimensiones aproximadas de 8.8 m de ancho por 7.85 m de alto. Cuenta con una longitud de 853 m y una pendiente decreciente del 3.2%. FDS cuenta con algunas limitaciones como representación directa de pendientes, que se ha conseguido simular modificando artificialmente el vector de gravedad.

FDS tampoco permite modelar curvas, lo que ha supuesto modelar el arco como una sucesión de rectángulos escalonados. Este tipo de simplificaciones, según concluyen

Kevin McGrattan y Matthew Bilson en sus investigaciones (2), pueden estar detrás de la tendencia a la sobrestimación de la capa de retroceso de humo propia de FDS. Se sospecha que representar arcos de esta manera puede llevar a la acumulación excesiva de humo en las capas superiores, perdiendo así precisión en las predicciones.

La ventilación longitudinal del túnel se ha modelado imponiendo una velocidad constante en la salida del túnel, y se ha dado en todas las simulaciones un tiempo previo al comienzo del incendio para garantizar un régimen de ventilación estacionario. Se han modelado paneles de incendio que representan los cuatro paneles que se usaron en experimentos originales (10 MW, 20 MW, 30 MW y 50 MW). Para la recopilación de datos se han modelado sensores de temperatura y velocidad a diferentes alturas y posiciones a lo largo del túnel, imitando la configuración experimental de termopares y sensores de velocidad empleados en el Memorial Tunnel. Con el objetivo de optimizar el tiempo de simulaciones, se han realizado simulaciones tanto con la geometría original como con secciones simplificadas, así como análisis de sensibilidad para diferentes resoluciones de malla, con el fin de optimizar la precisión y el coste computacional de los resultados.

En la Figura 2, se puede observar un esquema simplificado donde vienen definidas algunas de las propiedades del túnel y las pruebas realizadas.

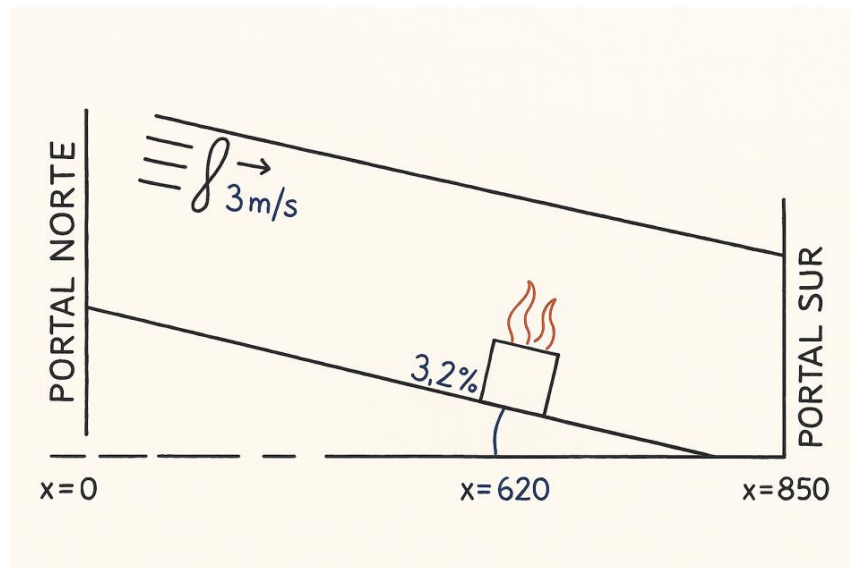


Figura 2: Esquema del Memorial Tunnel y pruebas

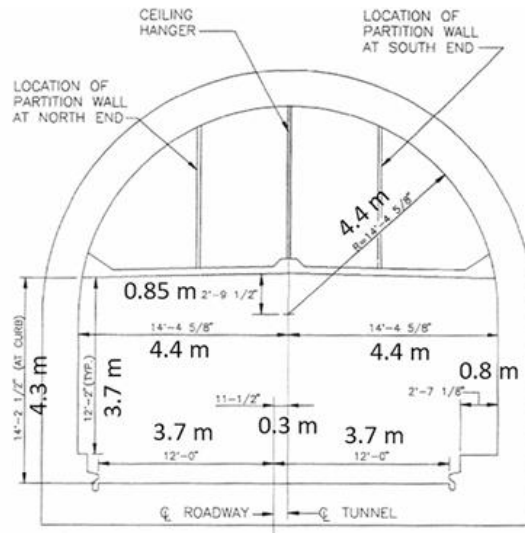


Figura 3: Sección del Memorial Tunnel

Se han modelado las tres pruebas mencionadas anteriormente. Con el objetivo de evaluar el impacto de la pendiente en las simulaciones, estas se han llevado a cabo tanto modelando la pendiente del 3.2%, como sin ella, es decir planteando un túnel horizontal.

A continuación, se muestra un pequeño resumen de las tres pruebas:

- TEST606A: 10 MW y 1800 s de simulación.
- TEST610: 50 MW y 400 s de simulación.
- TEST615B: 100 MW y 950 s de simulación.

Los modelos numéricos han sido ejecutados en el Cluster DIM de ICAI y los resultados han sido procesados después con Matlab y Excel, para poder representarlos gráficamente. Otra herramienta útil para la visualización de las simulaciones ha sido el software Smokeview.

4. Resultados

En cuanto a las pruebas de optimización computacional, el análisis de comparación geométrica de la sección (realista, rectangular de área equivalente, y rectangular basada en diámetro hidráulico) ha demostrado que el modelo de sección realista es el que mejor se adapta los datos experimentales, seguido muy de cerca por el modelo rectangular de área equivalente, teniendo ambos tiempos de simulación similares. El análisis de resolución de malla ha estudiado tres modalidades distintas (precisión de malla de 0.2, 0.4 y mixta), llegándose a usar para la modelación de las pruebas la modalidad de 0.4, tras comprobar que a medida que se aumenta la resolución de malla empeoraba la

sobrestimación del retroceso de la capa de humo. Además, los tiempos de simulación de la modalidad 0.2 eran excesivos, llegando al orden de tres semanas.

La Figura 4 muestra los resultados de las tres pruebas realizadas. Se tratan de unos árboles de Temperatura-Altura que representan las simulaciones FDS con pendiente (azul), las simulaciones FDS sin pendiente (morado), los resultados de los experimentos originales (verde) y las simulaciones FLUENT de Beyer et al. (rojo). Están representadas dos secciones del túnel por prueba, una en la región anterior al incendio (a 600 m de la entrada) y otra aguas abajo (a 680 m de la entrada).

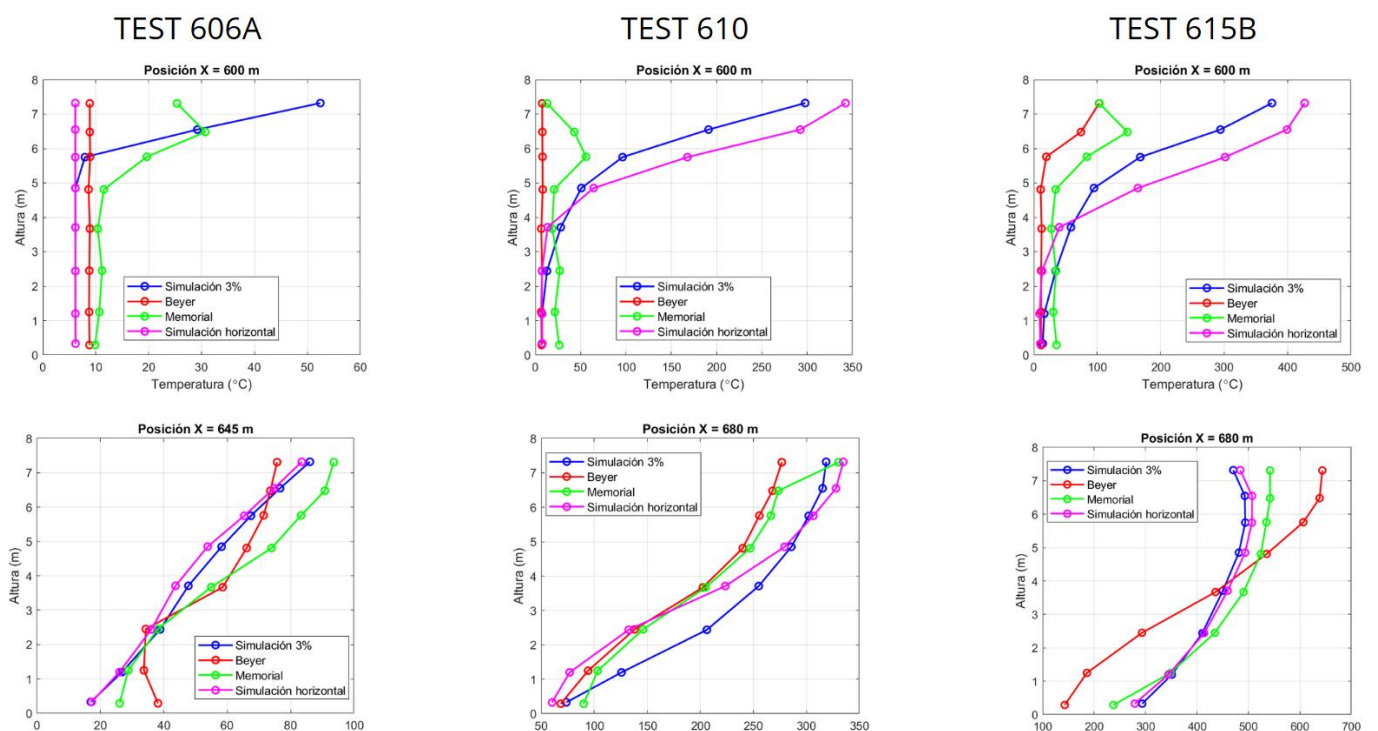


Figura 4: Árboles de temperatura de las tres pruebas

En las gráficas de la sección a 600 m se observa claramente el fenómeno de la sobrestimación del retroceso de la capa de humo, al predecir las simulaciones de FDS temperaturas mucho más altas a las experimentales. Este suceso tiende a intensificarse cuanto mayor es la tasa de liberación de calor.

En cuanto a las gráficas de la sección aguas abajo, se observa que se obtienen resultados mucho más precisos con las simulaciones FDS, especialmente para las simulaciones más largas, ya se ha dado más tiempo a estabilizarse. En los resultados del TEST 606A y del TEST615B incluso se consiguen mejores resultados que las simulaciones FLUENT hechas por Beyer et al.

5. Conclusiones

Los resultados obtenidos determinan los puntos fuertes y las limitaciones de FDS en simulaciones numéricas de incendios en túneles inclinados. Se observa consistentemente que FDS tiende a sobrestimar el retroceso del humo midiendo temperaturas más altas a la de los experimentos originales, especialmente cerca del foco de incendio y en las regiones anteriores. El suceso es más intenso para simulaciones con tasas de liberación de calor altas. Esto confirma la tendencia detectada por McGrattan y Bilson (2023) y más adelante por Beyer et al. (2024). Por el contrario, simulaciones realizadas con FLUENT por el último autor nombrado presentan una tendencia inversa, subestimando el retroceso del humo y midiendo temperaturas más bajas cerca del incendio.

A pesar de ello, FDS ha demostrado que es muy eficiente al simular la distribución de temperaturas y la ventilación longitudinal aguas abajo del incendio, superando en precisión incluso a FLUENT cuando las simulaciones se estabilizan en tiempos avanzados. Esto se observa claramente en los árboles de temperaturas obtenidos en los TEST606A y TEST615B. Se concluye, por tanto, que FDS es una herramienta predictiva útil siempre que se consideren sus limitaciones, especialmente la tendencia a sobrestimar la capa de humo aguas arriba del incendio.

Esta investigación ha logrado sus objetivos, aunque no ha conseguido simular con total precisión los escenarios, se han podido determinar los puntos fuertes del software, destacando su precisión aguas abajo y se ha podido investigar más sobre su limitación respecto a la capa de retroceso de humo. También se ha analizado la efectividad de utilizar simulaciones horizontales para túneles inclinados. Se encontró que, a corto plazo, la simulación horizontal sobrestima menos del retroceso de la capa de humo que la simulación inclinada, mientras que a largo plazo ocurre lo contrario. Asimismo, la importancia del factor de inclinación disminuye en las secciones más alejadas del incendio.

Se ha realizado un estudio de optimización de las simulaciones, logrando un equilibrio entre coste computacional y precisión.

Para futuros estudios, se recomienda explorar otras configuraciones geométricas, tasas de liberación de calor diversas y escenarios más complejos de ventilación. Se sugiere también investigar simulaciones híbridas combinando FLUENT y FDS para aprovechar las fortalezas específicas de cada herramienta. Finalmente, sería beneficioso analizar si la limitación geométrica en FDS (uso exclusivo de mallas y geometrías rectangulares) explica su tendencia a la sobrestimación, lo que podría orientar futuras mejoras del software.

NUMERICAL SIMULATION OF FIRES IN INCLINED TUNNELS

Author: Juan Arias LLorente.

Supervisor: Pablo Ayala Santamaría.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

This Final Degree Project analyses the behaviour of temperatures and smoke in fires in inclined tunnels, more specifically in three tests carried out in the Memorial Tunnel during the 1990s. This study is conducted through numerical simulations using the Fire Dynamics Simulator (FDS) software. Based on the results obtained, it was concluded that FDS tends to overestimate smoke rollback in the zones close to and upstream of the fire in tunnels with an irregular geometry (an arched tunnel in this case). However, it is quite accurate when predicting temperatures downstream of the fire in stable and controlled systems, making it especially useful for safety and ventilation applications.

Keywords: Numerical simulation, inclined tunnels, fires, computational fluid dynamics (CFD), FDS, Memorial Tunnel, smoke backlayering.

1. Introduction

Over the past decades, the transport sector has seen significant growth, leading to an increase in tunnel construction and, consequently, greater fire risks. The gases released during such incidents are highly harmful to humans and can even be lethal if inhaled. This is the primary reason why studying smoke behavior and temperature evolution in tunnel fires is essential to improving safety standards. To this end, both natural and mechanical ventilation systems have been developed, aiming to control smoke propagation.

Resorting to physical experiments to improve and optimize ventilation systems is costly and releases toxic gases harmful to the environment. Therefore, the development of numerical simulation represents a cost-effective and efficient alternative to experimental testing. Programs such as FDS (Fire Dynamics Simulator) and ANSYS FLUENT, which focus on computational fluid dynamics (CFD), allow multiple scenarios to be evaluated with precision and speed, without the need for full-scale experiments.

One objective of this project is to analyse how tunnel inclination affects the temperature profile, ventilation, and smoke behaviour through the use of FDS.

2. Project definition

In this project, three fire tests (606A, 610 and 615B) conducted in the Memorial Tunnel in the 1990s are numerically simulated. The study examines FDS's capability to model smoke propagation, temperature distribution, and the impact on longitudinal ventilation in sloped tunnels with irregular geometry. It also aims to evaluate FDS's accuracy in the most critical fire zones to determine its limitations. The critical parameters are temperature and ventilation in the area closest to the fire, the prediction of the smoke rollback layer, and the stabilization of temperatures downstream of the fire. Results will be compared with those obtained by Beyer et al.(1)in 2024 using ANSYS FLUENT.

Below is a simplified flow diagram of the project process.



Figure 1: Project process

3. Description of the model

The tunnel and tests are simulated using the Fire Dynamics Simulator (FDS), a CFD tool for modeling fire spread (temperature profiles, smoke propagation, ventilation) and the resulting airflow. FDS solves a simplified form of the Navier–Stokes equations, valid for low-speed flows (Mach number < 0.3).

The geometric configuration of the tunnel model faithfully reproduces the real cross-section of the Memorial Tunnel, characterized by an upper arch and approximate dimensions of 8.8 m width by 7.85 m height. The tunnel is 853 m long with a downward slope of 3.2%. Since FDS cannot directly represent slopes, this was simulated by artificially modifying the gravity vector.

FDS also does not allow curve modeling, so the arch was represented as a series of stepped rectangles. According to McGrattan & Bilson (2), such simplifications may underlie FDS's tendency to overestimate the smoke rollback layer. Representing arches in this manner can lead to excessive smoke accumulation in the upper layers, reducing prediction accuracy.

Longitudinal ventilation was modeled by imposing a constant velocity at the tunnel exit, and a pre-fire period was allowed in all simulations to ensure a steady ventilation regime. Fire panels representing the four original test panels (10 MW, 20 MW, 30 MW, and 50 MW) were included.

Temperature and velocity sensors were placed at various heights and positions along the tunnel to mimic the experimental thermocouple and flow sensor layout. To optimize simulation time, both the original geometry and simplified sections were tested, and sensitivity analyses were performed on different mesh resolutions to balance accuracy and computational cost.

In Figure 2, a simplified diagram is shown defining some of the tunnel properties and the tests carried out.

The numerical models were run on the ICAI DIM Cluster and the results were processed afterwards with Matlab and Excel, in order to represent them graphically. Another useful tool for visualizing the simulations was the Smokeview software.

4. Results

Regarding computational optimization tests, the geometric comparison analysis of the section (realistic, equivalent-area rectangle, and rectangle based on hydraulic diameter) has shown that the realistic section model is the one that best fits the experimental data, followed very closely by the equivalent-area rectangle model, both having similar simulation times. The mesh resolution analysis examined three different settings (mesh resolutions of 0.2, 0.4, and mixed), ultimately adopting the 0.4 setting for the test modeling after confirming that increasing the mesh resolution worsened the overestimation of the smoke layer. Moreover, the simulation times for the 0.2 setting were excessive, reaching on the order of three weeks.

In Figure 4 a plot with the results of the three tests is shown. These are Temperature-Height trees representing the FDS simulations with slope (blue), FDS simulations without slope (purple), original experimental results (green) and Beyer et al.'s FLUENT simulations (red). Two sections of the tunnel are shown per test: one in the region upstream of the fire (at 600 m from the entrance) and another downstream (at 680 m from the entrance).

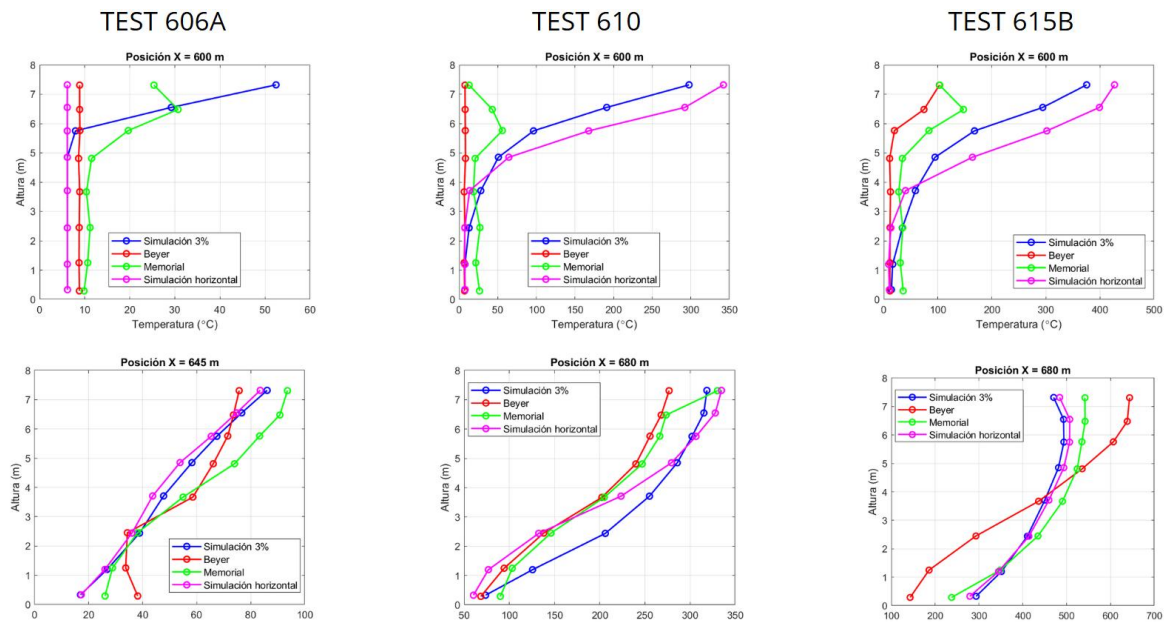


Figure 4: Temperature trees of the tests

In the graphs for the section at 600 m, the smoke layer overestimation phenomenon is clearly observed, with FDS simulations predicting much higher temperatures than the experimental ones. This event tends to intensify as the heat release rate increases.

As for the downstream section graphs, much more accurate results are obtained with FDS simulations, especially for longer simulations, since they have had more time to stabilize. In

the results of TEST 606A and TEST 615B, even better results are achieved than Beyer et al.'s FLUENT simulations.

5. Conclusions

The results obtained determine the strengths and limitations of FDS in numerical simulations of fires in inclined tunnels. It is consistently observed that FDS tends to overestimate smoke rollback by measuring higher temperatures than the original experiments, especially near the fire source and in upstream regions. The effect is more intense for simulations with high heat release rates. This confirms the trend detected by McGrattan and Bilson (2023) and later by Beyer et al. (2024). In contrast, simulations carried out with FLUENT by the latter author show an opposite tendency, underestimating smoke rollback and measuring lower temperatures near the fire.

Nevertheless, FDS has proven to be very efficient in simulating temperature distribution and longitudinal ventilation downstream of the fire, even surpassing FLUENT in precision when simulations stabilize at advanced times. This is clearly seen in the Temperature-Height trees obtained in TEST 606A and TEST 615B. It is therefore concluded that FDS is a useful predictive tool provided its limitations are considered, especially its tendency to overestimate the smoke layer upstream of the fire.

This research has achieved its objectives, although it has not managed to simulate the scenarios with total precision; it has been possible to determine the software's strengths, highlighting its downstream accuracy, and to investigate further its limitation regarding the smoke rollback layer. The effectiveness of using horizontal simulations for inclined tunnels has also been analysed. It was found that, in the short term, the horizontal simulation underestimates the smoke layer less than the inclined simulation, whereas in the long term the opposite occurs. Likewise, the importance of the slope factor decreases in sections farther from the fire.

An optimization study of the simulations has been carried out, achieving a balance between computational cost and precision.

For future studies, it is recommended to explore other geometric configurations, diverse heat release rates, and more complex ventilation scenarios. It is also suggested to investigate hybrid simulations combining FLUENT and FDS to leverage the specific strengths of each tool. Finally, it would be beneficial to analyse whether the geometric limitation in FDS (exclusive use of rectangular meshes and geometries) explains its tendency to overestimate, which could guide future software improvements.

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	7
Capítulo 2. Descripción de las Tecnologías.....	9
2.1 Fire Dynamics Simulator (FDS).....	9
2.2 ANSYS FLUENT.....	11
2.3 Comparación de programas	12
2.4 Cluster de ICAI	13
2.5 MATLAB R2024b	14
2.6 Smokeview	14
Capítulo 3. Estado de la Cuestión	15
3.1 Experimentos de incendios a escala real y reducida en túneles inclinados	17
3.2 Modelado numérico de incendios en túneles inclinados	21
Capítulo 4. Sistema/Modelo Desarrollado.....	27
4.1 Descripción de los Experimentos: Memorial Tunnel	27
4.1.1 Descripción del Memorial Tunnel.....	27
4.1.2 Adaptaciones en el Memorial Tunnel.....	29
4.1.3 Ensayos en el Memorial Tunnel	30
4.1.4 Puntos de medida en el Memorial Tunnel	33
4.2 Modelo Numérico.....	34
4.3 Análisis de sección	39
4.4 Análisis de Malla.....	45
4.4.1 Configuración y parámetros de la simulación	45
4.4.2 Análisis de los resultados con pendiente 3%.....	47
4.4.3 Análisis de los resultados sin pendiente	50
Capítulo 5. Análisis de Resultados.....	53
5.1 Test 606A	53
5.2 Test 610	60
5.3 Test 615B	67
Capítulo 6. Objetivos de Desarrollo Sostenible	74

<i>Capítulo 7. Conclusiones y Trabajos Futuros.....</i>	<i>76</i>
<i>Capítulo 8. Bibliografía.....</i>	<i>79</i>

Índice de figuras

Figura 1: Esquema de trabajo	8
Figura 2: Esquema del Memorial Tunnel y pruebas	9
Figura 3: Sección del Memorial Tunnel	10
Figura 4: Árboles de temperatura de las tres pruebas.....	11
Figura 5: Diagrama sistemático del dispositivo experimental. (24).....	19
Figura 6: Diferentes secciones transversales del túnel modeladas (dimensiones en mm) (23)	22
Figura 7: El modelo FDS de un túnel principal con un túnel conectado.(25)	22
Figura 8: Diagrama esquemático del modelo de simulación: (a) vista 3D. (b) Vista frontal. (c).(27).....	25
Figura 9: Detalle de la sección del Memorial Tunnel	27
Figura 10: Disposición de los ventiladores en el Memorial Tunnel.....	32
Figura 11: Disposición de las sartenes de fuego(1).....	32
Figura 12: Disposición de los bucles en el Memorial Tunnel	34
Figura 13: Sección transversal del Modelo 1.	35
Figura 14: Rampa de incendio del caso 606A.....	36
Figura 15: Rampa de incendio del caso 610.....	37
Figura 16: Rampa de incendio del caso 615B	37
Figura 17: Árboles Temperatura-Altura del Análisis de Secciones	41
Figura 18: Gráfico Distancia-Temperatura en eje horizontal del túnel del Análisis de Secciones	42
Figura 19: Temperatura a 0.4 m del techo.....	44
Figura 20 Ventilación longitudinal a 0.4 m del techo	44
Figura 21: Rampa de Fuego (30 MW)	46
Figura 22: Árboles de temperatura-altura Análisis de malla con pendiente.....	47
Figura 23: Temperatura-Distancia a 6.8 m de altura Análisis de malla con pendiente	48

Figura 24: Velocidad-Distancia a 6.8 m de altura Análisis de malla con pendiente	49
Figura 25: Árboles de temperatura-altura Análisis de malla sin pendiente	50
Figura 26: Temperatura-Distancia a 6.8 m de altura Análisis de malla sin pendiente	51
Figura 27: Velocidad-Distancia a 6.8 m de altura Análisis de malla sin pendiente	51
Figura 28: Árboles de temperatura-altura TEST606A	54
Figura 29: Temperatura-distancia en el eje longitudinal TEST606A.....	54
Figura 30: Temperatura-Distancia a 7.3 m de altura TEST606A.....	55
Figura 31: Velocidad-Distancia a 7.3 m de altura TEST 606A.....	57
Figura 32: Velocidad-Tiempo a 620 m para dos alturas TEST606A	57
Figura 33: Slice de temperatura (°C) para TEST606A	59
Figura 34: Slice de ventilación longitudinal (m/s) para TEST606A	59
Figura 35: Slice de propagación de humo para TEST606A	60
Figura 36: Árboles de temperatura-altura TEST610	61
Figura 37: Temperatura-distancia en el eje longitudinal TEST610	62
Figura 38: Temperatura-Distancia a 7.3 m de altura TEST610	62
Figura 39: Velocidad-Distancia a 7.3 m de altura TEST 610	64
Figura 40: Velocidad-Tiempo a 620 m para dos alturas TEST615B	64
Figura 41: Slice de temperatura (°C) para TEST610.....	66
Figura 42: Slice de ventilación longitudinal (m/s) para TEST610.....	66
Figura 43: Slice de propagación de humo para TEST610.....	66
Figura 44: Árboles de temperatura-altura TEST615B	67
Figura 45: Temperatura-distancia en el eje longitudinal TEST615B.....	68
Figura 46: Temperatura-Distancia a 7.3 m de altura TEST615B.....	68
Figura 47: Velocidad-Distancia a 7.3 m de altura TEST 615B.....	70
Figura 48: Velocidad-Tiempo a 620 m para dos alturas TEST615B	71
Figura 49: Slice de temperatura (°C) para TEST615B	72
Figura 50: Slice de ventilación longitudinal (m/s) para TEST615B	72
Figura 51: Slice de propagación de humo para TEST615B	73

Índice de tablas

Tabla 1: Parámetros de los Test a estudiar de los estudios de Beyer	31
Tabla 2: Liberación de calor de cada Test	38

Índice de ecuaciones

Ecuación 1: Conservación de la Masa	10
Ecuación 2: Conservación de la Cantidad de Movimiento	10
Ecuación 3: Conservación de la Energía	10

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) se ha convertido en una herramienta clave para entender y analizar el comportamiento del flujo, especialmente la distribución de temperaturas y la propagación del humo en túneles durante situaciones de incendio. Para esto se usan varios programas como Fire Dynamics Simulator (FDS) o ANSYS FLUENT que permiten la simulación precisa de este tipo de escenarios, reduciendo significativamente la necesidad de realizar experimentos físicos, que además de ser muy costosos liberan una gran cantidad de contaminantes.

Para este proyecto, es importante mencionar los ensayos sobre ventilación y comportamiento del fuego a gran escala, conocidos como Memorial Tunnel Fire Ventilation Tests, llevados a cabo durante la década de 1990 en el Memorial Tunnel, ubicado en Virginia Occidental, EE. UU. (3) (4) (5). Asimismo, también ha sido fundamental el análisis realizado por Beyer et al. en 2024 en su artículo titulado “A Mixed Convection Model for Estimating the Critical Velocity to Prevent Smoke Backlayering in Tunnels” (1), un estudio donde se simulaban con ANSYS FLUENT tres de estos ensayos.

FDS (Fire Dynamics Simulator) es uno de los softwares más utilizados a nivel mundial en la simulación de incendios. A pesar de esto, Beyer et al. decidieron emplear el programa ANSYS FLUENT para modelar numéricamente tres de los ensayos llevados a cabo en el Memorial Tunnel: los tests 606A, 610 y 615B, que se analizarán en mayor detalle en secciones posteriores. Se tomó esta decisión porque los autores modelaron primero las pruebas con FDS y observaron que, para estos escenarios, no ofrecía los niveles de precisión esperados. El software sobrestimaba el retroceso de humo y subestimaba el perfil de temperaturas aguas abajo del incendio. Además, investigaciones adicionales como las de Kevin McGrattan y Mathew Bilson (2) confirmaban que FDS tiende a sobrestimar la velocidad crítica de la capa de retroceso de humo en un rango de entre el 25% al 40%.

Estas limitaciones y errores supusieron evitar el uso de FDS como herramienta principal para los análisis de los tests. En su lugar, se optó por utilizar la versión 2021 R1 de ANSYS FLUENT (6), debido a su mayor precisión, fiabilidad y facilidad de tratar con geometrías más irregulares.

Este proyecto tiene como objetivo utilizar Fire Dynamics Simulator (FDS) para simular las tres pruebas estudiadas en el artículo de Beyer et al. La intención es analizar los resultados obtenidos mediante las simulaciones y compararlos tanto con los datos del artículo como con los resultados experimentales obtenidos en las pruebas oficiales realizadas en el Memorial Tunnel.

Capítulo 2. DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS

2.1 *FIRE DYNAMICS SIMULATOR (FDS)*

Fire Dynamics Simulator (FDS) es un programa que está creado para el estudio de la dinámica de fluidos computacional (CFD), con el que se puede simular tanto la propagación de incendios como los flujos de aire derivados de estos. FDS resuelve una versión simplificada de las ecuaciones de Navier-Stokes, con la condición de que esté adaptada a flujos de baja velocidad (número de Mach inferior a 0.3) (7).

A través de FDS se pueden simular una gran variedad de escenarios, estando entre sus funciones principales:

- El estudio de la transmisión de calor y gases en entornos tridimensionales.
- Puede evaluar la interacción de la transferencia de calor y las reacciones entre el fuego con estructuras y materiales.
- Simula procesos químicos relacionados con la combustión y la liberación de energía.
- El análisis del funcionamiento de sistemas HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning), sobre todo en situaciones donde controlar el flujo de humo resulta imprescindible.
- También incluye herramientas para estudiar la interacción de las personas con el fuego y el humo en situaciones de emergencia.

Gracias a estas funciones, FDS se utiliza en varios sectores: desde el diseño de sistemas de evacuación y ventilación en túneles y edificios, hasta investigaciones forenses tras un incendio. También se puede aplicar a simulaciones de incendios forestales o a programas de formación para servicios de emergencia. Sin embargo, su uso requiere conocimientos avanzados en física de fluidos, termodinámica y combustión. También es importante contar con equipos informáticos potentes que permitan simular escenarios complejos, ya que estos suelen requerir un alto coste computacional.

FDS utiliza una forma simplificada de las ecuaciones de Navier-Stokes que están adaptadas a flujos de baja velocidad (Mach inferior a 0.3) como se ha comentado anteriormente, adaptando la conservación de la masa, la conservación de cantidad de movimiento y la conservación de energía.

$$\frac{dm_{sist}}{dt} = 0 = \frac{d}{dt} * \iiint_{VC} \rho * dV + \iint_{SC} \rho (\vec{v}_r * \vec{n}) * dA$$

Ecuación 1: Conservación de la Masa

$$\Sigma \vec{F} = \frac{d}{dt} * \iiint_{VC} \rho * \vec{v} * dV + \iint_{SC} \rho * \vec{v} * (\vec{v}_r * \vec{n}) * dA$$

Ecuación 2: Conservación de la Cantidad de Movimiento

$$\begin{aligned} \dot{Q} - W_{ext} - W_v = \\ = \frac{d}{dt} * \iiint_{VC} \rho \left(\tilde{u} + \frac{1}{2} v^2 + gz \right) dV + \iint_{SC} \rho \left(\tilde{u} + \rho p + \frac{1}{2} v^2 + gz \right) (\vec{v}_r \cdot \vec{n}) dA \end{aligned}$$

Ecuación 3: Conservación de la Energía

La simulación con FDS supone un proceso de varias fases (8) Inicialmente, se genera una malla tridimensional que contendrá el modelo que se va a estudiar. Posteriormente, se definen las condiciones iniciales y de contorno como la geometría, los materiales, las fuentes de calor y los sistemas de ventilación. Se usa el método de diferencias finitas para poder resolver las ecuaciones y los resultados pueden visualizarse con el software Smokeview, que

permite observar la evolución del incendio, el movimiento del humo, los perfiles de temperatura y el efecto de la ventilación. También se pueden simular una serie de sensores de varias magnitudes como temperatura o velocidad de ventilación cuyos datos serán registrados en un Excel.

FDS (7) también tiene funciones avanzadas, como el uso de múltiples mallas en una misma simulación que trabajan en paralelo, reduciendo así los tiempos de simulación. Otras funciones son que permite modelar de manera detallada la transferencia de calor por radiación, que resulta muy útil en fuegos intensos, y la interacción con partículas, como gotas de agua en simulaciones de sistemas de extinción.

Otra de sus herramientas principales con la que se puede controlar la precisión de las simulaciones es la resolución de la malla: la precisión de la simulación es mejor al hacer la malla más fina (más celdas por malla), aunque supone un gran aumento del coste computacional, alargando los tiempos de cálculo. También incluye modelos de turbulencia como LES (Large Eddy Simulation), que sirve para ayudar con la representación de los efectos turbulentos en los flujos.

2.2 ANSYS FLUENT

Otro software, también muy utilizado en ingeniería y que está centrado en el estudio de la dinámica de fluidos computacional (CFD) es ANSYS FLUENT (6) usado para simular el comportamiento de fluidos, gases y varios fenómenos térmicos. Ha sido desarrollado por ANSYS Inc.; el programa sirve para analizar varios problemas también a través de las ecuaciones de Navier-Stokes, y es aplicable a varios sectores como la automoción, la energía, la aeroespacial o la ingeniería química.

FLUENT es conocido por modelar de forma precisa flujos turbulentos, transferencia de calor, reacciones químicas e interacciones fluido-estructura. Su flexibilidad lo permite adaptarse a un gran número de sectores. Dentro del sector automovilístico, se emplea para optimizar diseños aerodinámicos, sistemas de refrigeración y cámaras de combustión. En el

aeroespacial, ayuda a simular flujos supersónicos alrededor de aeronaves o también para simular cómo se comporta el aire en turbinas. En el sector energético, se usa para diseñar de intercambiadores de calor, turbinas de vapor y sistemas de combustión.

Al igual que FDS, ANSYS utiliza las ecuaciones de Navier-Stokes, para explicar el movimiento de fluidos: conservación de la masa, la conservación de cantidad de movimiento y la conservación de energía (ver en Ecuación 1, Ecuación 2 y Ecuación 3).

El uso de ANSYS es parecido al de FDS, primero se crea la geometría del sistema y después se genera una malla dividida en pequeñas celdas donde se resolverán estas ecuaciones. Después, se definen las condiciones de contorno y otras propiedades, como las velocidades iniciales, las temperaturas, las fuentes de calor y materiales. Por último, FLUENT utiliza métodos avanzados de resolución numérica para simular el comportamiento del flujo. Este programa también utiliza factores de corrección y predicción que le permiten obtener resultados precisos y estables, como el refinamiento o resolución de malla, uso de modelos de turbulencia y validación experimental.

2.3 COMPARACIÓN DE PROGRAMAS

A pesar de que ambos programas son herramientas de dinámica de fluidos computacional (CFD), se utilizan de manera distinta, ya que no se aplican de la misma forma. ANSYS FLUENT es una plataforma multifuncional que se usa para resolver varios escenarios físicos y químicos. Tiene una gran flexibilidad, como se ha explicado anteriormente, lo le permite adaptarse a múltiples industrias. Por el contrario, FDS está especializado, centrándose en el estudio de incendios, el transporte de humo y calor. Al ser más especializado, es muy útil para proyectos de ingeniería de seguridad contra incendios y estudios de evacuación.

Desde el punto de vista técnico, FLUENT ofrece también una mayor flexibilidad al tratar con geometrías complejas, gracias al uso de mallas no estructuradas que permiten tratar con formas irregulares o inclinadas. Esta característica supone una gran ayuda para modelación de túneles con pendiente, donde FDS presenta limitaciones debido a su estructura de malla

ortogonal. Para simular pendientes en FDS, hay que modificar el vector gravedad, inclinandolo de forma artificial, lo que puede aumentar los errores y disminuir la precisión del modelo, siendo esta una de las mayores limitaciones de FDS.

Una de las razones por las que Beyer et al. optaron por utilizar ANSYS FLUENT en lugar de FDS en su estudio del Memorial Tunnel podría estar relacionada con estas limitaciones geométricas. El Memorial Tunnel tiene una pendiente del 3.2%, lo que dificulta la eficacia de las mallas rectangulares, ya que estas no pueden inclinarse directamente, como se ha comentado anteriormente. La mejor adaptación de geometría irregulares también puede ayudar a modelar la sección del túnel, ya que, al tener un arco, en FDS hay que modelarlo como rectángulos escalonados, otra de las posibles razones que se relacionan con la tendencia a la sobrestimación del retroceso de la capa de humo característica de FDS.

Otra de las razones que podrían haber influido en la decisión, se trata de las características del flujo dentro del túnel. Como se mencionó previamente, FDS está funciona mejor con flujos de baja velocidad. Aunque la ventilación global del túnel se encuentra en un rango de velocidades de entre 2 a 6 m/s, que son relativamente bajas, el aire impulsado por los sistemas de ventilación puede alcanzar velocidades de hasta 30 m/s. FDS pierde precisión al no estar diseñado para trabajar en ese régimen y es aconsejable modelar la velocidad global en vez los sistemas de ventilación. FLUENT, en cambio, puede manejar tanto flujos incompresibles como compresibles, pudiéndose adaptar a velocidades mayores lo que lo hace más adecuado para este tipo de escenarios.

2.4 CLUSTER DE ICAI

Las simulaciones se han desarrollado en el Clúster de Departamento de Ingeniería Mecánica (DIM) de ICAI que posee siete nodos en total: dos nodos de 48 cores, tres nodos de 36 cores y dos nodos de 32 cores.

2.5 *MATLAB R2024B*

Se ha empleado MATLAB 2024b para procesar y visualizar los resultados obtenidos en clúster de ICAI, específicamente las medidas que simulan las temperaturas y velocidades. Se han realizado los promedios respectivos, según la prueba o el análisis y a continuación se han generado las gráficas (árboles de temperatura-altura, perfiles de temperatura y velocidad...) aprovechando las potentes funciones de “plotting” de Matlab.

Otra herramienta de MATLAB que ha sido empleada es Grabit con la que se ha podido extraer y digitalizar junto a las simulaciones realizadas en este proyecto, los resultados y Memorial Tunnel del de Beyer et al., estando estos publicados en el artículo publicado por este último (1).

2.6 *SMOKEVIEW*

Para ayudar a entender los resultados las simulaciones, se ha empleado Smokeview para recorrer de forma interactiva el túnel analizando la generación de humo y la evolución del los perfiles de temperatura y ventilación a lo largo de las pruebas.

Capítulo 3. ESTADO DE LA CUESTIÓN

Durante las últimas décadas, el sector del transporte ha pasado por un gran desarrollo, llevando a un aumento en la construcción y mejora de túneles, con el objetivo para reducir problemas de tráfico. Sin embargo, este crecimiento también ha supuesto el incremento de los riesgos, siendo uno de los más cruciales los accidentes causados por incendios. Los túneles tienen una estructura confinada y alargada lo que complica la evacuación y, favorece la acumulación de humo tóxico. La inhalación de los gases liberados en incendios es la principal causa de muertes y lesiones graves en estos incidentes (9).

Para evitar la acumulación de humo y controlar su propagación, se han desarrollado diversos sistemas de ventilación, existiendo dos tipos principales: ventilación natural y ventilación mecánica.

La distancia de retroceso del humo es una de las propiedades más importantes de los incendios en túneles, de manera que va a ser uno de los parám fundamentales a estudiar de este proyecto. En este sector es más conocido como “back-layering distance”, que se define como la distancia que alcanza el humo aguas arriba del incendio, circulando en sentido opuesto al flujo principal de ventilación. En un incendio, el calor impulsa el humo caliente hacia el techo del túnel, donde se acumula y empieza a moverse horizontalmente. Si la ventilación no es suficientemente eficaz, una parte del humo acaba desplazándose es sentido opuesto al flujo principal (en dirección contraria al sentido de evacuación), creando lo que se conoce como “back-layering” (8). La velocidad de ventilación mínima necesaria para evitar este suceso se denomina velocidad de ventilación crítica, otro de los parám clave a estudiar.

La mayoría de los análisis teóricos, simulaciones y experimentos se centran en túneles horizontales. Sin embargo, la topografía de muchas áreas donde se construyen túneles son irregulares y tienn pendientes, lo que impide que estos sean completamente horizontales, y acaba resultando en la construcción de estructuras con cierto grado de inclinación. En este

trabajo, se analizará el impacto de esta inclinación en el comportamiento del humo, la distancia de retroceso y la distribución de la temperatura.

Los primeros modelos que se desarrollaron para predecir la distancia de retroceso del humo fueron creados por Donald R. Thomas en 1958, que el número de Froude y parám como la altura de la velocidad de entrada del aire y la diferencia de presión causada por el efecto chimenea (10). Años después, Li et al. (11) e Ingason y Li (12) añadieron el análisis dimensional en sus investigaciones y estudiaron la relación entre la distancia de retroceso del humo, la velocidad de ventilación y el HRR del fuego, mostrando que cuando el HRR es suficiente mente alto, la distancia de retroceso es prácticamente independiente de este.

La mayoría de estas investigaciones fueron realizadas para túneles horizontales, y estos modelos teóricos no se pueden aplicar directamente a túneles con inclinación. Esto se debe a que la distribución de la velocidad y la temperatura del humo no es simétrica en ambos lados del incendio, creando así la necesidad de estudiar los efectos de la inclinación sobre la propagación del humo, su capa de retroceso y el perfil de temperaturas (13) (14) (15). Algunas investigaciones recientes han estudiado que si la pendiente del túnel es suficientemente pronunciada, el retroceso del humo podría disminuir o incluso desaparecer, evitando así el uso de ventilación mecánica, esto se produciría gracias al efecto chimenea.

Una de las primeras investigaciones que se centró en la relación entre la inclinación del túnel y la distancia de retroceso del humo fueron Oka et al. (14), a través de ensayos a escala reducida. Propusieron una fórmula que relacionaba la distancia del retroceso de humos con la inclinación y el HRR. Sin embargo, Kong et al. (16) se dieron cuenta que la altura del túnel no estaba incluida, lo que acababa limitando su. También se realizaron trabajos posteriores, como los de Zhang et al. (17) (18), mediante simulaciones CFD, mostraron que la distancia de retroceso del humo en túneles inclinados está más relacionada con la altura del túnel y la inclinación, mientras que el HRR no tiene importancia dentro del modelo.

Du et al. (19) continuó estas investigaciones apoyado en los modelos y teorías anteriores, y llegaron a la conclusión de que otro de los factores que influyen en la distancia de retroceso del humo es la longitud aguas abajo del túnel y la inclinación del mismo, es decir, la

diferencia de altura vertical entre la fuente del fuego y el portal de salida del túnel. A través de sus resultados llegaron a la conclusión de que aunque la tasa de liberación de calor (HRR) afecta a la velocidad del aire, su influencia sobre la distancia del retroceso de humo es muy pequeña, siendo mucho más importante la inclinación del túnel, llegando a conclusiones similares a las anteriores investigaciones.

Por otro lado, Wang et al. (20) llevaron a cabo experimentos a escala reducida para investigar el retroceso del humo y la temperatura máxima en túneles inclinados usando ventilación natural. Los resultados de su investigación reafirmaron la importancia de la inclinación del túnel y propusieron una nueva relación entre la distancia de retroceso de humos y la tasa de liberación de calor (HRR).

3.1 EXPERIMENTOS DE INCENDIOS A ESCALA REAL Y REDUCIDA EN TÚNELES INCLINADOS

Entre los años de 1990 en el Memorial Tunnel, Virginia Occidental, EE. UU., se llevaron a cabo varias pruebas de ventilación e incendios a gran escala, conocidas como los Memorial Tunnel Fire Ventilation Tests (MTFVTS). Para este caso, interesan tres pruebas realizadas entre 1995 y 1997 (21) y recientemente estudiadas por Beyer et al. (1) para desarrollar modelos de simulación del comportamiento de temperatura y humo en túneles inclinados. El túnel tiene una longitud de 853 m, y una sección circular de 8.8 m de diámetro y una parte conectada rectangular de 4.3 m (W) $\times$ 4.4 m (H), y una inclinación decreciente de 3.2%. Las tasas de liberación de calor en los tres escenarios fueron: 10 MW (escenario 1), 54.3MW (escenario 2) y 20MW, 30MW y 50 MW (escenario 3).

Posteriormente, en el año 2013, Oka et al. (14) realizaron unos ensayos de incendio en un túnel a escala 1/23.3 de dimensiones 3.6 m (L) $\times$ 0.55 m (W) $\times$ 0.30 m (H) con ventilación natural y cuyas paredes fueron de 25mm de cerámica. Se analizaron cuatro inclinaciones: 0°, 8°, 10° y 20°, y se estudiaron dos potencias de incendio: 1.95 y 5.78 kW, equivalentes a escala real a incendios de un coche (5 MW) y un autobús (15 MW) respectivamente. Se utilizó como combustible gas licuado de petróleo, colocado a una distancia de 1.35 o 1.95 m

de la abertura de escape, dependiendo de la inclinación del túnel. Se midió la temperatura de la capa de humo, instalados en intervalos de entre 5 y 10 cm a una altura de 100 mm por debajo del techo del túnel. Para lograr medir en estado estacionario, se tomaron medidas durante los 4 primeros minutos después de la ignición, tomando datos a intervalos de 1 s. A partir de los resultados obtenidos, se propuso una correlación para la predicción aumento máximo de temperatura del chorro bajo el techo en un túnel inclinado y otra para la distancia del retroceso de humos en función de la inclinación del túnel. Finalmente, se dedujo el ancho del chorro de humo en el techo de un túnel confinado (con restricción lateral, es decir, paredes cercanas) es 2.3 veces más grande que uno no confinado.

Hu et al (22) llevó a cabo una serie de ensayos en un túnel a escala reducida de dimensiones 6 m (L) $\times$ 1.3 m (W) $\times$ 0.80 m (H) con techo y suelo cubiertos por paneles de yeso ignífugo, y paredes de vidrio templado. Se analizaron tres inclinaciones: 0°, 3° y 5°, para cinco potencias de incendio: 20, 40, 60, 90 y 120 kW, usando como combustible gas licuado de petróleo. Se estudiaron cinco velocidades de ventilación distintas: 0 m/s, 0.3 m/s, 0.6 m/s, 0.9 m/s y 1.2 m/s. La temperatura del humo se midió usando 22 termopares de tipo K a lo largo del túnel, instalados longitudinalmente, 0.3 m por debajo del techo. Se observó principalmente que la temperatura máxima del humo disminuye a medida que aumenta la inclinación del túnel; y que, en un túnel inclinado, la temperatura del gas bajo el techo decae exponencialmente más rápido que en un túnel horizontal.

Más adelante en 2016, Weng et al. (23) llevan a cabo experimentos y simulaciones con el objetivo de estudiar la velocidad crítica, llevando a cabo un total de 45 de ensayos en un túnel a escala 1:10 de dimensiones 15 m (L) $\times$ 0.48m (W) $\times$ 0.54 m (H), y pudiendo variar la inclinación entre un 0% y un 1%. Se utilizó ventilación longitudinal, variando entre 0.1m/s y 0.81 m/s y se usó como combustible metanol industrial al 95%, variando la tasa de liberación de calor de 8.97KW a 12.38KW. Las simulaciones llevadas a cabo y las conclusiones se explicarán en la siguiente sección.

Posteriormente, en el 2018 Yang et al. (24) desarrollo un estudio basado en un modelo de túnel de dimensiones 200 cm (L) $\times$ 10 cm (W) $\times$ 7 cm (H), este modelo se introdujo en un

recipiente más grande. El recipiente se llenó de agua de densidad 1000 kg/m^3 , y luego se añadió una solución salina teñida con una diferencia de densidad de 70.7 kg/m^3 para representar un flujo de fuego. Se utilizaron tres fuentes de liberación de salmuera colocadas a diferente distancia (50 cm, 100 cm y 150 cm de la entrada), simulando varias posiciones del fuego. En la Figura 5 está representado un diagrama del equipo del experimento. Se realizaron un total de 48 pruebas en el modelo con una inclinación de 6.3° , evaluando las diferencias de densidad entre el flujo de retroceso y el flujo corriente abajo, así como la influencia del ángulo de inclinación y la ubicación de la fuente en el flujo de retroceso. De los experimentos se dedujo que en un túnel con ventilación natural se puede dar el flujo de retroceso estratificado, siendo su longitud casi independiente del flujo de flotabilidad liberado desde la fuente. Se aprecia también una diferencia significativa entre la densidad del flujo de retroceso aguas arriba y el flujo corriente abajo, siendo mucho mayor la diferencia de densidad en el flujo de retroceso. Por último, se dedujo que, en incendios de túneles con ventilación natural, incluso sin ventilación forzada, puede generarse una velocidad crítica gracias al efecto chimenea natural. Esta condición crítica no depende significativamente del flujo de flotabilidad, sino de la ubicación de la fuente de flotabilidad.

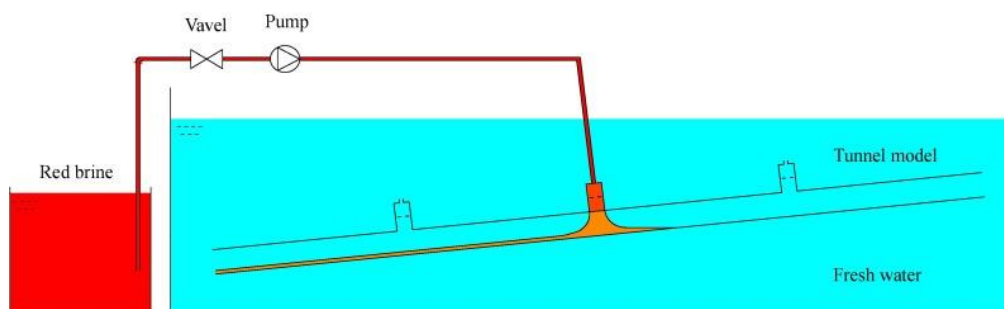


Figura 5: Diagrama sistemático del dispositivo experimental. (24)

En 2019 Liu et al. (25), llevó a cabo dos experimentos, uno a escala reducida y otro a escala real. El estudio a escala reducida se llevó a cabo en el Instituto de Investigación de Seguridad Pública de la Universidad de Tsinghua. Se construyó un túnel de metro a escala 1:5 usando

el método de escala de Froude. El túnel principal tiene 30 m de longitud, con una sección circular de 1.2 m de diámetro y paredes de concreto de 0.12 m de espesor. Un segundo túnel (7.7 m de largo) estaba conectado en un ángulo de 30° a 8 m de uno de los extremos del túnel principal. Se utilizaron termopares tipo K instalados a 3 cm del techo del túnel, con distancias de intervalo entre 0.5 m y 1 m a lo largo del túnel, para medir la temperatura del humo en distintas localizaciones del túnel. Se utilizó metanol como combustible en bandejas cuadradas que simulaban incendios con tasas de liberación de calor de entre 17 y 115.4 kW, equivalentes a incendios de 0.95–6.45 MW en un túnel real. El experimento se realizó en un túnel horizontal, y las simulaciones numéricas posteriores modelaron túneles inclinados. Por otro lado, el experimento a escala real Laboratorio Clave de Seguridad en el Transporte de Pasajeros del Metro en Beijing. Se utilizó un túnel real similar en estructura al de la escala reducida, con una sección de 3.5 m de ancho y 2.8 m de alto en el túnel principal, y 3.2 m $\times$ 3.2 m en el túnel conectado. El ángulo entre ambos túneles fue de 33° , similar al del experimento a escala reducida. Se utilizaron metanol y gasolina como combustibles para generar tasas de liberación de calor entre 72.2 kW y 919.4 kW. Dichos estudios mostraron que la temperatura máxima del humo se ve afectada por las pendientes del túnel principal y del túnel conectado. La temperatura disminuye al aumentar el ángulo de inclinación en túneles ascendentes debido a la reducción de la acumulación de calor. Sin embargo, en túneles descendentes, el efecto chimenea impide el flujo de humo desde la columna de fuego, aumentando la temperatura en comparación con túneles horizontales. También se observó que en el túnel principal, la temperatura decaía más lentamente aguas arriba del fuego y más rápido aguas abajo del mismo, a medida que aumentaba la inclinación. El túnel conectado influyó poco en este proceso. En el túnel conectado, la tasa de disminución de la temperatura dependía de la inclinación: decaía más lentamente en túneles ascendentes y más rápidamente en túneles descendentes. Se introdujeron también coeficientes modificados para desarrollar nuevas correlaciones que predicen la temperatura máxima del humo y los perfiles longitudinales de temperatura. Estos ajustes mostraron un buen nivel de concordancia con los resultados experimentales y simulados.

En 2023, Wang et al. (20) construyó un modelo a escala 1:20 basado en la estrategia de reducción Froude, con un túnel de 10 m de largo. La estructura incluía una parte superior semicircular (0.32 m de diámetro y una parte inferior rectangular 0.32m (W) × 0.13 m (H). Se realizaron experimentos en nueve inclinaciones diferentes del túnel, hasta un 35% de pendiente: 4, 6, 8, 10,15, 20, 25, 30 y 35%. El experimento utilizó propano como combustible y analizó tres tasas de liberación de calor diferentes: 2.8 kW, 5.6 kW y 11.2 kW, equivalentes a 5 MW, 10 MW y 20 MW en escala real. Se instalaron 108 termopares tipo K a lo largo del techo del túnel para medir la temperatura del humo cada segundo. A partir de este estudio, se observó que a medida que aumenta la pendiente, la longitud de retroceso se reduce. No obstante, el impacto de la HRR sobre esta longitud varía según la inclinación: a mayor pendiente (con un punto de corte del 10% identificado en este estudio), menor es la influencia de la HRR. Se propone un modelo analítico exponencial para predecir la longitud de retroceso. Además, se observa que la temperatura disminuye gradualmente al aumentar la pendiente del túnel.

3.2 MODELADO NUMÉRICO DE INCENDIOS EN TÚNELES INCLINADOS

En 2016, Weng et al. (23) llevan a cabo experimentos y simulaciones con el objetivo de estudiar la velocidad crítica, como se ha explicado en la anterior sección. Se llevaron a cabo 250 simulaciones cambiando la sección del túnel, a través del Coeficiente seccional del túnel (ζ), como se ve en Figura 6. La inclinación del túnel analizada varía entre -3% y 3%, y se estudian diferentes valores de ventilación longitudinal (1.40, 1.60, 1.80, 1.90, 2.00, 2.20, 2.50, 2.65 y 2.80 m/s). Se utilizan dos tasas de liberación de calor: 5MW y 7.5MW. Tras el análisis de los resultados experimentales y simulados se concluye que coeficiente seccional ζ influye sobre velocidad crítica y la distancia de retroceso de humo, proponiéndose nuevas fórmulas para predecir el comportamiento de estas.

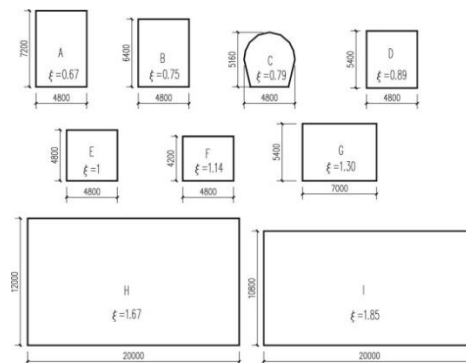


Figura 6: Diferentes secciones transversales del túnel modeladas (dimensiones en mm) (23)

En 2019 Liu et al. (25), como se ha explicado en la anterior sección llevo a cabo un experimento a escala reducida (1:5) y otro a escala real. Además, también realizó una serie de simulaciones con el objetivo de contrastar los resultados. El modelo se desarrolló utilizando Fire Dynamics Simulator (FDS) 6.3.2, y está basado en un túnel a escala real con una sección circular de 6 m de diámetro y una parte conectada rectangular de 6 m (W) × 5 m (H). Las longitudes base del túnel principal y conectado son 200 m y 80 m, respectivamente, con un ángulo de 30° entre ambos. Se ejecutaron 266 casos de simulación estableciendo como variables principales la tasa de liberación de calor (HRR) y las inclinaciones de los túneles, con tiempos de simulación desde los 1200s hasta 1300s según las condiciones experimentales. Se situó el fuego en la unión de ambos túneles simulando distintas tasas de liberación de calor variando entre 0.95 MW y 6.45 MW. Las pendientes varían desde los 0° a los 5° para el túnel principal y desde -8° hasta los 8° para el conectado. Con el objetivo de estudiar la fiabilidad del modelo, se compararon los resultados simulados de la temperatura del techo con los datos experimentales, encontrando una desviación aceptable dentro del 20%, lo que asegura la validez del modelo.

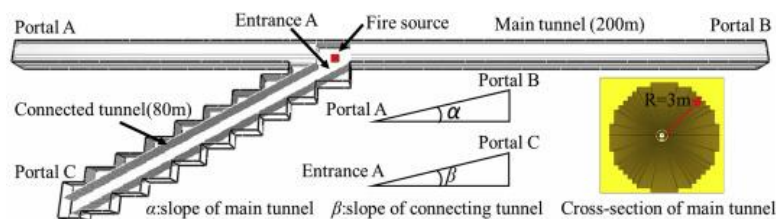


Figura 7: El modelo FDS de un túnel principal con un túnel conectado. (25)

Posteriormente, en el 2021 Kong J et al (16), llevó a cabo unas simulaciones con FDS (versión 6.5.3), basadas en el túnel escudo del estrecho de Qiongzhou, en el sur de China. Tiene una sección transversal de herradura de 10 m de diámetro y 8.5 m de altura, con una longitud total de 500 m. Se simula con ventilación natural y se estableció la fuente del fuego en el centro del túnel como caso base, configurando tres tipos de escenarios distintos con una tasa de liberación de calor de 15MW fija. El primer escenario sitúa el fuego a intervalos de 30 m en varias ubicaciones. Los otros dos escenarios cambian las longitudes aguas arriba y aguas abajo, respectivamente, para analizar el impacto en el flujo de humo. Los resultados se analizaron en estado cuasi-estacionario, tomando los valores promedio entre los 450 s y 500 s de simulación, y variando pendientes del túnel desde el 3.5% hasta el 7.5% a intervalos de 0.5%. De estas simulaciones se deduce que la longitud de aguas abajo tiene mucho mayor impacto sobre la distancia de retroceso de humo que la longitud aguas arriba. También se concluye que la distancia aguas abajo está correlacionada negativamente con distancia de retroceso de humo, la velocidad de la capa de humo y la temperatura en la salida aguas abajo; y a su vez, está correlacionada positivamente de manera lineal con la velocidad del flujo de aire en la entrada aguas arriba.

En 2023 Zhang Y et al (26), desarrolló unas simulaciones con FDS tomando como modelo un túnel de dimensiones 280 m(L) × 5 m(W) × 5 m(H). Se simularon 90 escenarios de incendio, variando la pendiente del túnel (3%-8%) y la presión ambiente (60-100 kPa), además de 24 casos adicionales con diferentes longitudes de túnel, cambiando la distancia aguas abajo variando desde 80m a 140m. El experimento utilizó n-octano como combustible y analizó tres tasas de liberación de calor diferentes: 5 MW, 7.5 MW y 10 MW. Se colocaron 280 termopares a 0.1 m por debajo del techo del túnel con una separación longitudinal de 1 m. Para confirmar la veracidad de la simulación, los datos simulados de FDS se compararon con los datos experimentales de experimentos a escala de modelo realizados por Hu et al. (2013)(22). En las simulaciones se ha observado que la temperatura máxima del humo disminuye a medida que aumenta la inclinación del túnel o la presión ambiente; que la velocidad a la entrada del túnel aumenta por la diferencia de altura provocada por el efecto

chimenea, mientras que disminuye al aumentar la presión ambiente; y que la longitud de retroceso de humo también disminuye a medida que aumenta la diferencia de altura.

En 2024 Sun et al (27), llevó a cabo simulaciones numéricas con FDS 6.7.0 para simular incendios en túneles inclinados con pozos de ventilación, estudiando 3 escenarios base usando una sección de túnel de 10 m(W) $\times$ 5 m(H). Cada escenario cambia la longitud total del túnel (370m, 400m y 430m) y la distancia entre entrada del túnel y la fuente del fuego (201m, 231m y 261m respectivamente). Para cada escenario hay 5 casos en los que varía la distancia entre el pozo y el fuego (5 m, 10 m, 15 m, 20 m, and 25 m), estando ambos centrados y siendo las dimensiones del pozo de ventilación 3 m (L) $\times$ 3 m (W) $\times$ 5 m (H) en todos los casos. Se utiliza el cambio de la aceleración gravitacional para simular inclinaciones de 1 % hasta 10 %, en intervalos de 1 %. Se utiliza n-heptano como combustible para 4 tasa de liberación distintas (5 MW, 10 MW, 15 MW, y 20 MW) para tiempos de simulación de 700 s. Se comprobaron los resultados de la simulación numérica con el experimento a escala reducida (1:20) realizado por He et al (28) en un túnel horizontal de dimensiones 20 m (L) $\times$ 0.6 m (W) $\times$ 0.3 m (H) midiendo la temperatura del humo usando 22 termopares de tipo K a lo largo del túnel, instalados longitudinalmente, 0.03 m por debajo del techo. También se contrastan los resultados con el experimento a escala real de Hu et al (29) en 2005 , en un túnel de dimensiones 88 m (L) $\times$ 8 m (W) $\times$ 2.65 m (H) en el que se realizaron dos test: El primero usó 23 termopares de tipo K a lo largo del túnel, 0.02 m por debajo del techo, para una tasa de liberación de calor de 0.8MW; mientras que el segundo contaba con 26 termopares de tipo K a lo largo del túnel, 0.02 m por debajo del techo, para una tasa de liberación de calor de 1.5MW. Los resultados simulados eran consistentes con los resultados experimentales tanto a pequeña como a gran escala, llegando a haber error máximo de hasta un 10%, pudiendo darse por válido el modelo. Sin embargo, hay que tener en cuenta que ninguno de los experimentos que usó para contrastar tenían inclinación.

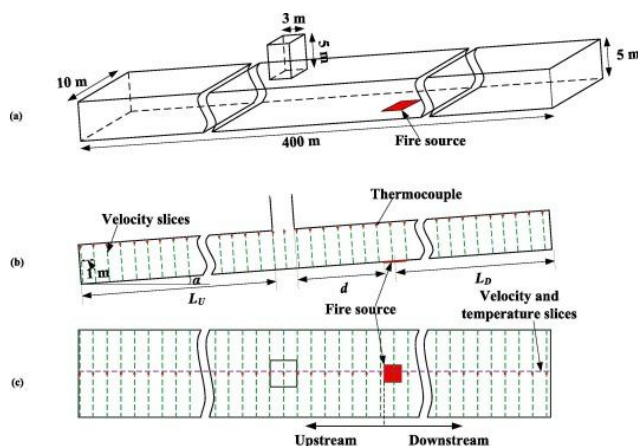


Figura 8: Diagrama esquemático del modelo de simulación: (a) vista 3D. (b) Vista frontal. (c). (27)

En diciembre de 2023 Kevin McGrattan y Mathew Bilson (2) presentaron su investigación, en las que se centraron en investigar la capacidad predictiva de FDS, replicando experimentos de pruebas de incendio en distintos túneles, por un lado replicaron varias de las pruebas realizadas en el Memorial Tunnel y por otro lado, simuló los experimentos a escala reducida de Wu y Bakar (30). De aquí se extrajeron conclusiones muy importantes, como que, en las simulaciones de FDS de túneles con arcos, se tiende a sobrestimar la capa de retroceso de humo (sobrestimando la velocidad crítica entre un 25% y un 40%), especialmente en casos con una gran liberación de calor. Esta sobrestimación no se daba para túneles con el techo plano, lo que los llevó a pensar que esta limitación se podría deber a que FDS no permite la recreación de elementos circulares, sino que se tiene que aproximar a través de rectángulos. Esta geometría podría resultar en la concentración excesiva de humo en las capas superiores.

Por último, en 2024 Beyer et al.(1), analizaron los cuatro problemas principales sobre las limitaciones que tienen los modelos desarrollados: la dependencia de la velocidad crítica de la tasa de liberación de calor, que ha causado problemas de predicción; la influencia de la intensidad del incendio, ya que el aumento en la tasa de liberación de calor no siempre implica un aumento de la velocidad crítica; la extensión física del fuego afecta la distancia de retroceso de humo, especialmente en incendios largos; y la relación de aspecto del túnel, donde túneles más anchos requieren correcciones a las fórmulas empíricas. Con el objetivo de estudiar estos casos ha realizado una serie simulaciones de con ANSYS FLUENT version

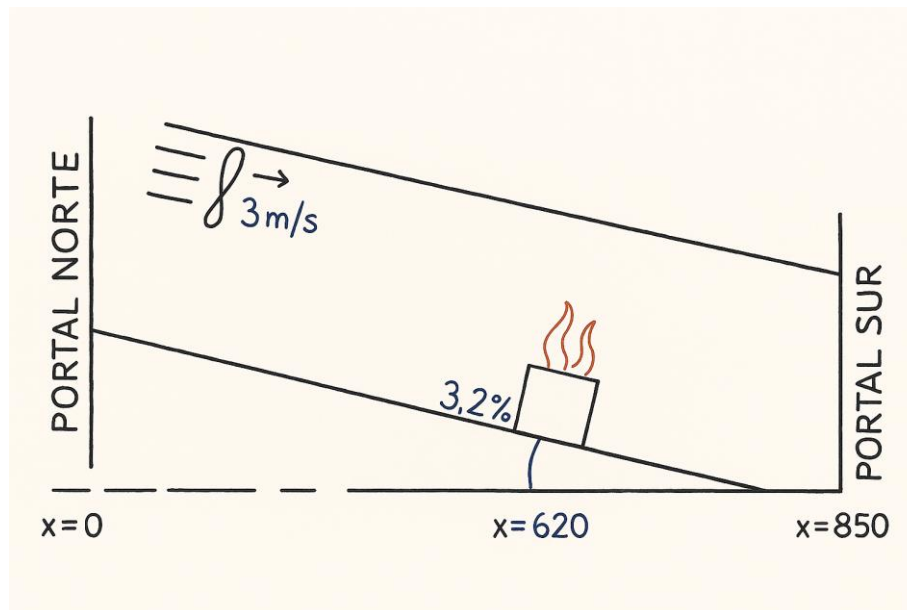
2021 R1 , que han validado con los resultados de las pruebas a gran escala del programa de pruebas de ventilación contra incendios del Memorial Tunnel (21) . No se utilizó FDS debido a que el túnel contaba con un arco y por tanto tiende a sobre predecir la velocidad crítica entre un 25% y un 40%, tal como descubrieron Kevin McGrattan y Mathew Bilson. Se reprodujeron también con FLUENT las pruebas 606A (11 MW), 610 (50 MW), y 615B(100 MW) y se compararon los resultados con los datos experimentales, simplificando la sección a una rectangular. Más adelante partiendo del experimento de los 50MW se hicieron varias pruebas variando distintos parámetros para ver su efecto sobre el perfil de temperaturas, la propagación de humo y la velocidad crítica. Entre estas pruebas se encuentra un estudio de variación de altura: 3m, 6m, 9m y 12m; manteniendo 12 m de ancho, siendo el aumento de altura directamente proporcional a la velocidad crítica necesaria. También se ha estudiado el efecto de la pendiente: 0%, 3.2 % (la del Memorial Tunnel) y 6%, llegando a la conclusión que la pendiente tiene una influencia baja sobre la velocidad crítica.

Del análisis de los resultados se ha desarrollado un nuevo enfoque para modelar el flujo de fuego en túneles sin retroceso de humo, desarrollando ecuaciones con buena capacidad predictiva para la velocidad crítica. La tasa de liberación de calor deja de ejercer influencia sobre la velocidad crítica una vez superados los 10 a 15 MW. No se requiere ajustar más la relación ancho-altura de la sección del túnel y el efecto de la pendiente del túnel es despreciable ($\sim 1\%$). El uso del número de Froude en túneles a escala pequeña puede producir resultados poco fiables para la velocidad crítica.

Este diseño da estabilidad estructural y facilita la distribución de cargas. El túnel incluye también elementos como colgadores en el techo para sistemas auxiliares y espacios reservados para paredes divisorias en los extremos norte y sur del túnel.

En cuanto a materiales, el Memorial Tunnel está compuesto por hormigón armado, un material robusto que proporciona resistencia térmica y mecánica durante los incendios. Además, se instalaron sistemas avanzados de ventilación para las pruebas, que incluyeron ventiladores de chorro y sistemas transversales de extracción, que ayudaron evaluar la gestión del humo en diferentes configuraciones

En este proyecto se va a considerar el portal norte como la entrada al túnel ($X=0$ m), y la salida estará en el portal sur ($X=850$ m). La pendiente de 3.2% es decreciente, es decir, el portal norte (la entrada) se encuentra a una mayor elevación que el portal sur (salida). La ventilación va también en este sentido, de entrada, a salida, y para las simulaciones se intentará ajustar a un valor de 3 m/s, como se explicará más adelante. Los paneles de incendios están situados cerca de los 620 m. Esta descripción se ve claramente mostrada en la siguiente figura.



4.1.2 ADAPTACIONES EN EL MEMORIAL TUNNEL

El Memorial Tunnel pasó por varias modificaciones (5) para convertirlo en una instalación experimental dedicada a pruebas de ventilación y seguridad contra incendios. Se instalaron nuevas salas de ventilación en ambos extremos del túnel. Estas salas contaban con ventiladores axiales de flujo reversible, capaces de manejar hasta 95 m³/s de aire a temperaturas de hasta 316 °C. Cada ventilador tenía motores de 224 kW y operaban a velocidades de entre 120 y 1,200 rpm. Estos equipos estaban montados sobre bases de hormigón reforzado, asegurando estabilidad incluso en condiciones extremas.

Se realizaron también adaptaciones en el sistema de conductos. Se implementaron divisores móviles que separaban las zonas de suministro y extracción de aire, para poder ajustar las condiciones del flujo según las necesidades de cada prueba. Se aislaron los conductos y las estructuras colgantes del techo con mantas cerámicas de alta densidad y se recubrió también con cemento para proteger las estructuras contra el calor extremo generado por los incendios.

En el techo del túnel se instalaron puertos de escape de humo y aberturas de un solo punto. Esto permitió dispersar el humo de manera uniforme y evaluar configuraciones para una ventilación eficiente. También se agregaron grandes aberturas de escape para analizar escenarios de ventilación más complejos, con un área aproximada de 2.8 m² que podían cubrirse cuando no se utilizaban.

Se incorporó un sistema de un circuito cerrado de televisión (CCTV) con siete cámaras equipadas con funciones de zoom, panorámica e inclinación, que transmitían imágenes en tiempo real al centro de control. Estas cámaras fueron esenciales para observar el comportamiento del humo y las llamas durante las pruebas. Además, se instalaron termopares distribuidos en 15 secciones del túnel con los que se midieron las temperaturas de manera precisa.

Todas estas modificaciones, junto con los sistemas de control y monitoreo instalados, convirtieron al Memorial Tunnel en un laboratorio de pruebas de incendios, que fue clave

para el diseño de sistemas de ventilación en túneles y el desarrollo de estándares de seguridad.

4.1.3 ENSAYOS EN EL MEMORIAL TUNNEL

Durante la fase de experimentación, se realizaron hasta 98 ensayos de los 130 que había planeados, aunque en este trabajo nos vamos a centrar tan solo en tres de ellos que serán descritos a continuación con la información obtenida en la documentación oficial publicada (3) y el artículo publicado por Kevin McGrattan y Mathew Bilson (2):

- Test 606A: En este ensayo se realizó dos veces. La primera se midió una liberación de calor de 9.3 MW, con una velocidad de 1.27 m/s. La localización del fuego se inició en un panel situado a 618 m de la entrada, centrado en el ancho del túnel y a una altura de 0.8 m. Se puso en marcha un sistema de ventilación longitudinal usando en el que dependiendo de la fuente se usaron entre uno y tres ventiladores a los cinco minutos de empezar el fuego (para las dos veces que se hizo la prueba). Los resultados mostraron que no se logró controlar completamente el retroceso de humo, ya que se necesitaba llegar a una velocidad crítica teórica de 2.03 m/s no se llegó a alcanzar con el equipo disponible. En la segunda prueba se midió una liberación de calor de 11.4 MW, obteniendo una velocidad de ventilación de 1.98 m/s, que estaba suficientemente cerca de la nueva velocidad crítica (2.14 m/s) como para poder controlar con éxito el retroceso del humo. Lamentablemente, no hay acceso a ninguna de las curvas de fuego reales obtenidas durante los experimentos, ya que esta información no ha sido publicada de forma oficial. Por este motivo en las simulaciones numéricas que se han realizado en este proyecto se han utilizado las curvas usadas en el artículo realizado por Kevin McGrattan y Mathew Bilson (2)
- Test 610: Este test evaluó una liberación de calor mayor, llegándose a medir una tasa de liberación de calor de 47.9 MW, con una velocidad medida de 2.04 m/s. En este caso se activó un panel diseñado para liberar 50 MW situado a 610 m de la entrada.

Dependiendo de la fuente, se llegaron a emplear entre cuatro y seis ventiladores, desde el inicio del incendio. La velocidad crítica teórica de 3.06 m/s no se alcanzó completamente, y el retroceso del humo no pudo ser controlado de manera efectiva.

- Test 615B: Este test se diseñó para evaluar el rendimiento de los sistemas de ventilación longitudinal en un escenario de incendio de alta intensidad, buscando como objetivo una liberación de calor de 100MW, y usando entre 0 y seis ventiladores, dejando dos minutos de espera. Sobre este test no se han publicado informes más detallados, aunque según las investigaciones de Beyer et al. midieron una velocidad de 2.38 m/s.

Algunos de los datos proporcionados por la documentación oficial publicada, son un poco dispares con los que asume Beyer et al. (1) como los oficiales, alterando ligeramente los valores de liberación de calor. Los parámetros usados por Beyer se encuentran en la Tabla 1.

Parámetro	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Número de prueba	606A	610	615B
Tiempo transcurrido usado para el promedio (s)	1651	191.5	678.5
Tasa de liberación de calor total medida (MW)	11.1	54.3	104.6
Ventiladores de chorro activados	JF3	JF2, 5, 8, 11 & 14	JF1, 3, 4, 6, 7 & 9
Sartenes de fuego usados	10 MW	50 MW	50, 30 & 20 MW

Tabla 1: Parámetros de los Test a estudiar de los estudios de Beyer

A continuación, en la Figura 10 se muestra la localización de los ventiladores a lo largo del túnel, visto en planta, “mirando hacia el techo”. Más adelante se presenta la Figura 11 sacada del artículo de Beyer et al. (1) donde se ven representadas las sartenes de fuego usadas.

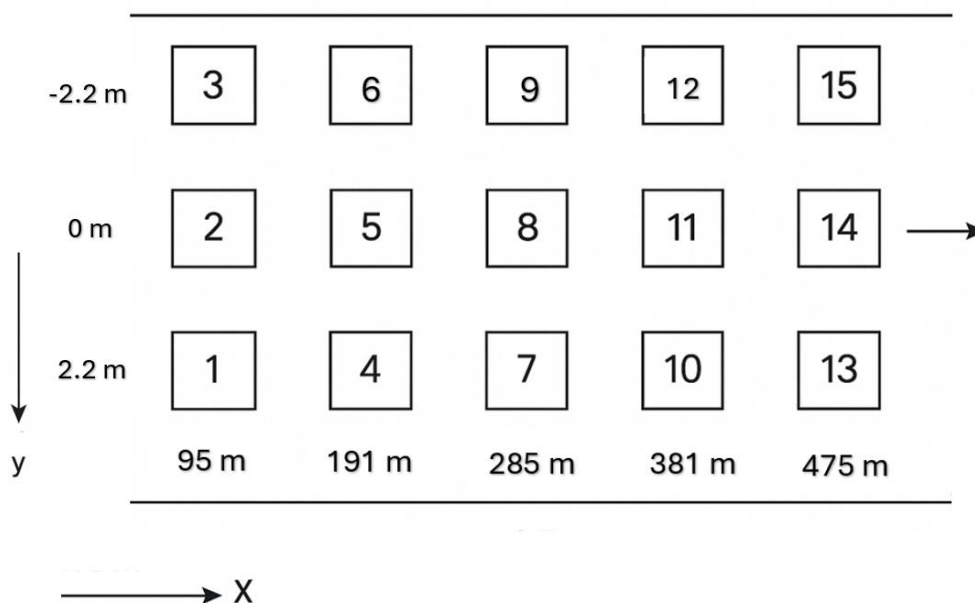


Figura 10: Disposición de los ventiladores en el Memorial Tunnel

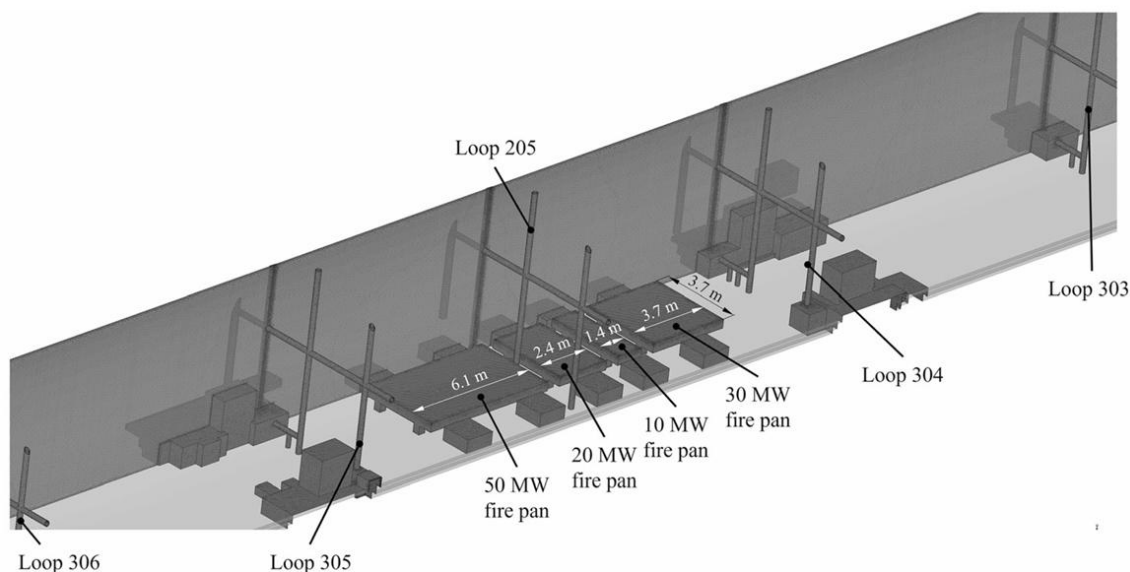


Figura 11: Disposición de las sartenes de fuego(1)

Los resultados obtenidos en estas pruebas no solo sirvieron para validar modelos computacionales como los tratados en este proyecto: FDS y ANSYS FLUENT, sino que también proporcionaron datos experimentales que han servido para mejorar los estándares

de seguridad en túneles de carreteras. Los resultados también han contribuido a mejorar el diseño, haciendo a los túneles y otras infraestructuras mucho más seguros.

4.1.4 PUNTOS DE MEDIDA EN EL MEMORIAL TUNNEL

Durante las pruebas realizadas en el Memorial Tunnel fue imprescindible la toma de medidas, que sirvieron para analizar las distribuciones de temperatura y las condiciones de ventilación durante estas. Por esto se instalaron varios equipos que monitoreaban y registraban a tiempo real los parámetros a estudiar. Se instalaron hasta 1,400 puntos de medición, que medían datos cada segundo, llegando a recoger hasta 3 millones de medidas por prueba. Este sistema de medición permitió un análisis riguroso del comportamiento del fuego, del humo y la eficiencia de los sistemas de ventilación.

Entre los sensores empleados, los termopares fueron los más importantes, con los cuales se medía la temperatura del aire en diferentes secciones del túnel. Estos dispositivos colocaron en varias zonas a lo largo del túnel para capturar con precisión los perfiles de temperatura y la propagación del calor durante los incendios. Lo más probable es que se emplearan termopares tipo K (no vienen descritos de manera oficial en ninguna documentación), no se ha encontrado ninguna confirmación oficial, pero son los que más se tienden a usar en este tipo de pruebas. Son conocidos por tener un amplio rango de medición, pudiendo medir desde -200°C hasta 1370°C , lo que los hace muy útiles para estudios de incendios con una gran tasa de liberación de calor. Los termopares estaban organizados en secciones llamadas “bucles”, de manera que se recogía información de medida en el centro de la sección a distintas alturas.

Al igual que Beyer et al., este proyecto va a estudiar los resultados de las medidas más próximas a los paneles de fuego (situados entre los 610 m y 625 m del túnel respecto a la entrada) y en secciones aguas abajo. Para esto se evaluarán y compararán las medidas de los siguientes bucles (entre paréntesis la distancia a la que se encuentran de la entrada del túnel): 306 (585 m), 305 (600 m), 304 (625 m), 303 (645 m), 302 (680 m), 301 (720 m) y

202 (835 m). En cada uno de los seis primeros bucles la temperatura se evaluó a nueve alturas distintas (en m): 0.33, 1.2, 2.44, 3.71, 4.85, 5.75, 6.55, 7.32 y 4 m. Las 8 primeras alturas se utilizaron para hacer un árbol de temperaturas en cada uno de las secciones transversales o bucles. Las medidas obtenidas a una altura de 4 m de cada bucle (incluyendo también en este caso el bucle 202), se utilizaron para crear un árbol de temperaturas de la sección longitudinal del túnel a través del eje longitudinal del túnel.

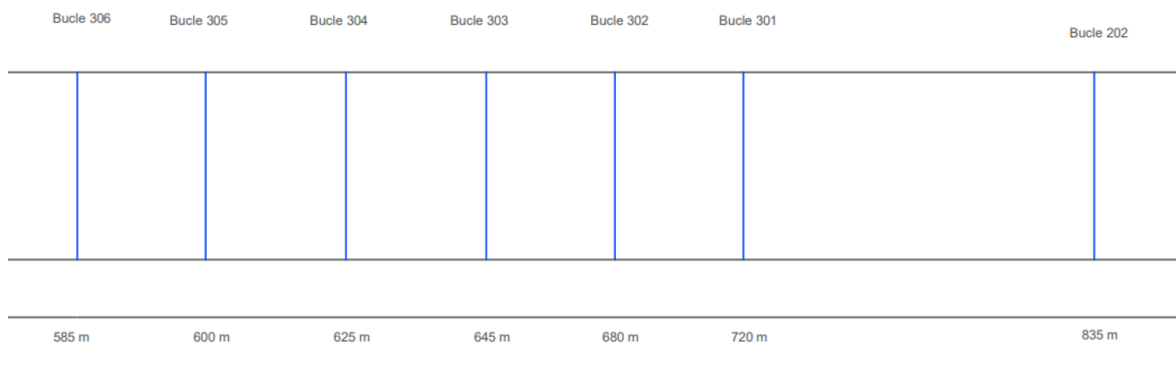


Figura 12: Disposición de los bucles en el Memorial Tunnel

4.2 MODELO NUMÉRICO

Los modelos numéricos han sido desarrollados con el programa FDS, ejecutados en el Clúster DIM y los resultados han sido procesados con Matlab y Excel.

El túnel, que cuenta con una longitud de 850 m, un área transversal de 60 m² y teniendo un perímetro de 29.2 m. El diámetro hidráulico ($D_{Hidráulico} = 4 * \frac{\text{Área mojada}}{\text{Perímetro mojado}}$) calculado es 8.2 m. La Figura 13 muestra una sección del túnel del Modelo 1.

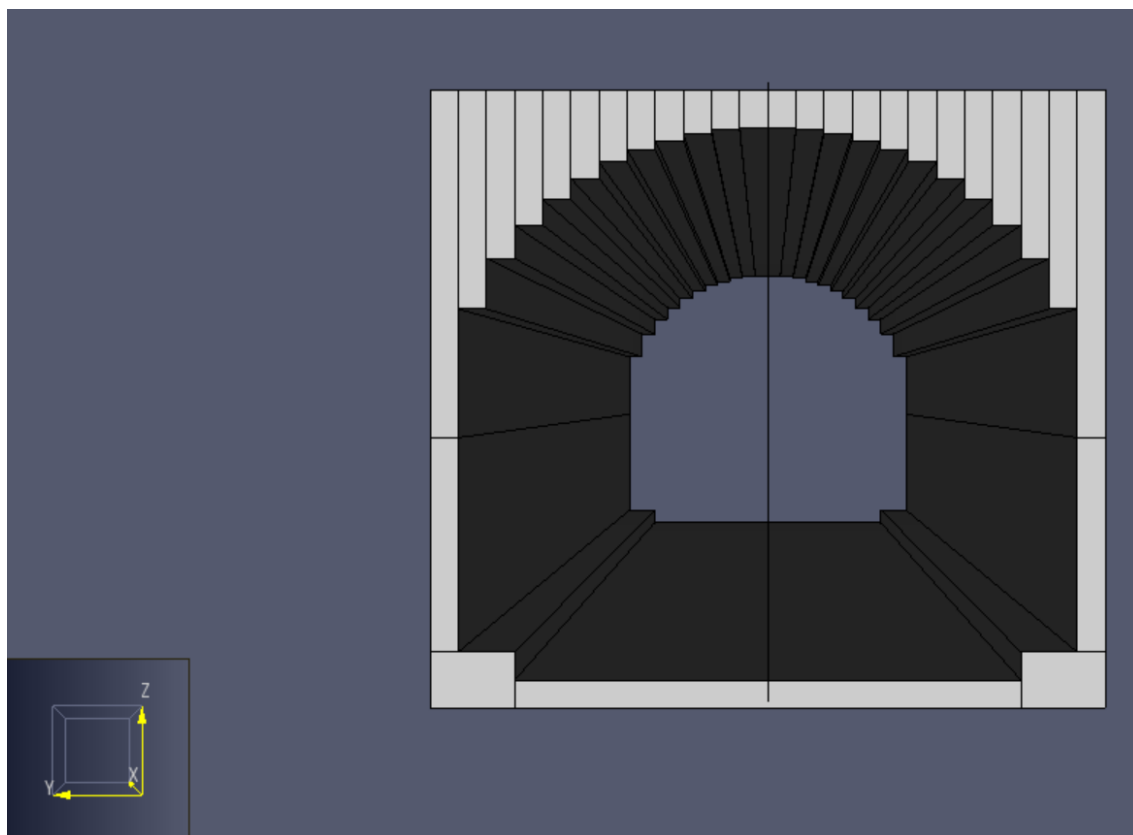


Figura 13: Sección transversal del Modelo 1.

Dado que FDS no permite la utilización de rampas, el efecto de la pendiente se ha simulado mediante la modificación de la dirección de la gravedad ($g = -0.548i - 9.795k \text{ m/s}^2$), consiguiendo así el efecto de la pendiente de 3.2%.

La ventilación se ha modelado por medio de una velocidad constante de 3 m/s en la salida del túnel, velocidad que corresponde a la medida obtenida para régimen permanente en las pruebas experimentales para todos los ensayos. Para garantizar dicha ventilación en todo el túnel antes de que arrancara el incendio se ha retrasado el inicio de este 50 garantizando alcanzar condiciones de flujo en régimen permanente.

Se han recreado los paneles de los incendios siendo estos cuatro, todos ellos con un ancho de 3.7 m, centrados a lo ancho del túnel: 50 MW (de los 609 m a los 615.2 m), 20 MW (de

los 615.6 m a los 618,2 m), 10 MW (de los 618.4 m a los 620 m) y 30 MW (de los 620.8 m a los 624.4 m)

En cuanto a la rampa del fuego, los datos experimentales oficiales del Memorial Tunnel no son públicos, y Beyer et al, tampoco publicó en su artículo la que usó él, así se ha recurrido a las investigaciones que realizaron Kevin McGrattan y Mathew Bilson (2) que ya se han mencionado previamente. He utilizado la rampa de fuego correspondiente a cada uno de los ensayos, dejando en el inicio hasta 90 s para asegurar una ventilación estable.

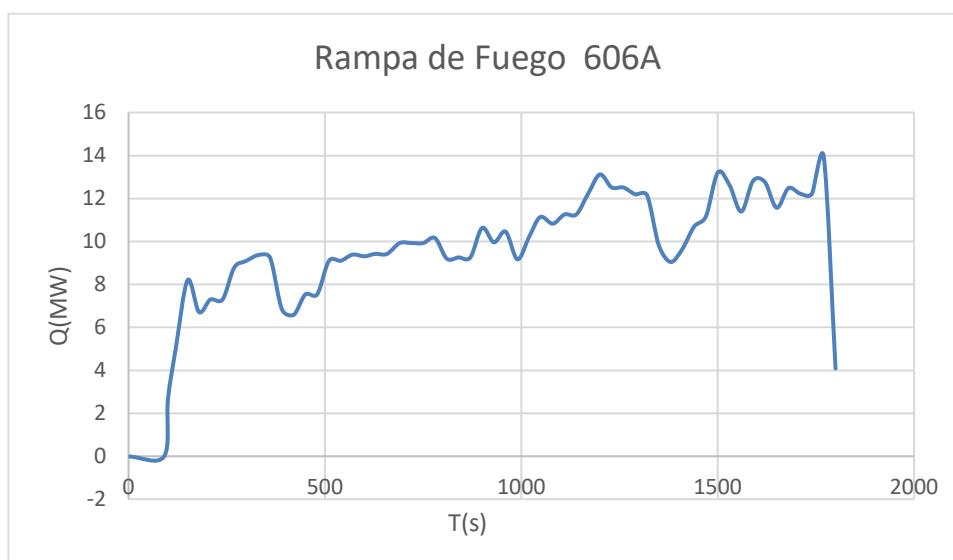


Figura 14: Rampa de incendio del caso 606A

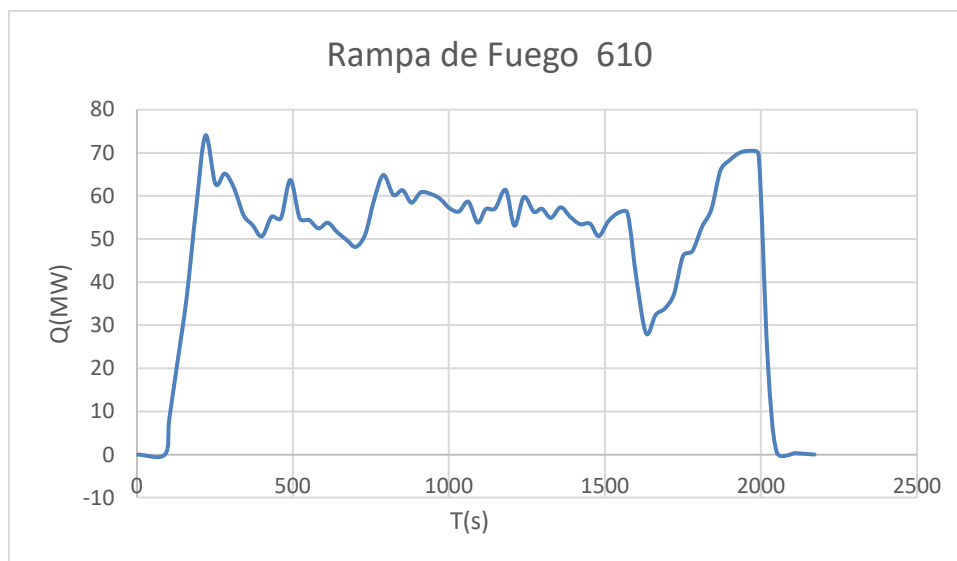


Figura 15: Rampa de incendio del caso 610

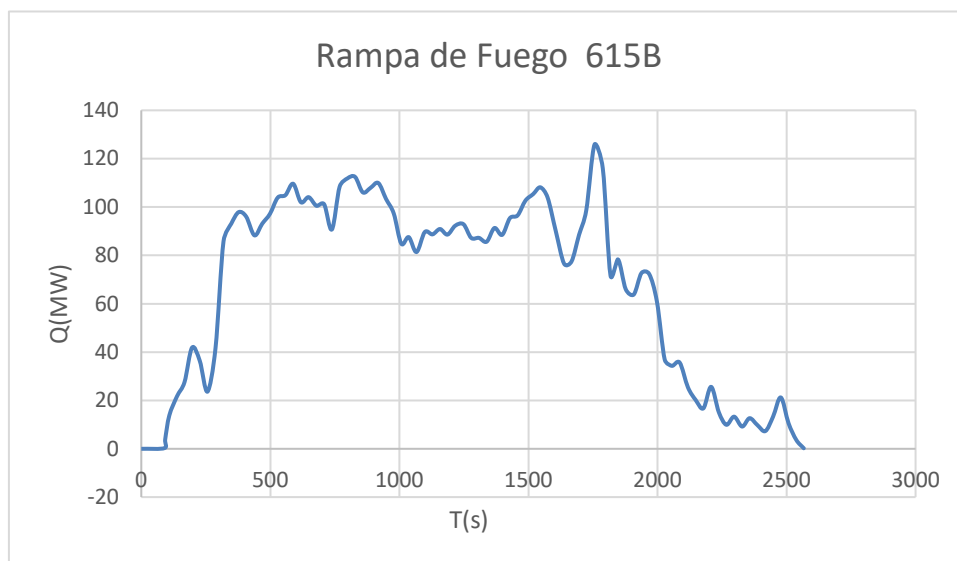


Figura 16: Rampa de incendio del caso 615B

Durante las simulaciones, la HRRPUA (Tasa de liberación de calor por unidad de área) viene representada como una fracción de la tasa media de liberación de calor por unidad de área establecida en cada uno de los tres ensayos.

Ensayo	Tasa de liberación de calor por unidad de área (KW/m ²)
606A	2083.33
610	10284.1
615B	19814.4

Tabla 2: Liberación de calor de cada Test

- La rampa del ensayo 606A muestra un aumento brusco de la tasa de liberación de calor a los 90 s y a partir de ese punto muestra un incremento progresivo, alcanzando varios picos de 13.1 MW a los 1200 s, otro de 13.2 MW a los 1500 s y el máximo global de 13.9 MW a los 1770 s. Posteriormente, se observó una disminución gradual hasta estabilizarse en 4.1 MW al finalizar el periodo simulado a los 1800 s. La rampa cuenta con una tasa de liberación de calor media de 9.8 MW y una mediana de 9.9 MW. Este comportamiento refleja las distintas fases del incendio, desde su crecimiento hasta su estabilización.
- La rampa del ensayo 610 muestra un aumento brusco de la tasa de liberación de calor a los 90 s, llegando a su máximo global de 74 MW a los 220 s y a partir de ese punto se estabiliza con valor más o menos constantes entorno a los 56.2 MW. Posteriormente, se observó una caída repentina a los 1600 s midiendo 28.1 MW para luego alcanzar un pico de 70 MW a los 1960 s. Finalmente se da una caída brusca terminando la simulación a los 2171 s. La rampa cuenta con una tasa de liberación de calor media de 5.1 MW y una mediana de 55.4 MW.
- La rampa del ensayo 615 muestra un aumento brusco de la tasa de liberación de calor a los 90 s, y entre los 400 y 1500 s se estabiliza con una media de 96.8 MW. Posteriormente, se alcanza un pico de 125.1 MW a los 1750 s. Tras este pico, la curva decrece progresivamente hasta desaparecer, terminando la simulación a los 2567 s. Esta lenta caída final provoca que la rampa cuente con una tasa de liberación de calor media

de 68.2 MW, mucho más bajo que el valor objetivo de estudio de 104.6 MW y una mediana de 87.3 MW.

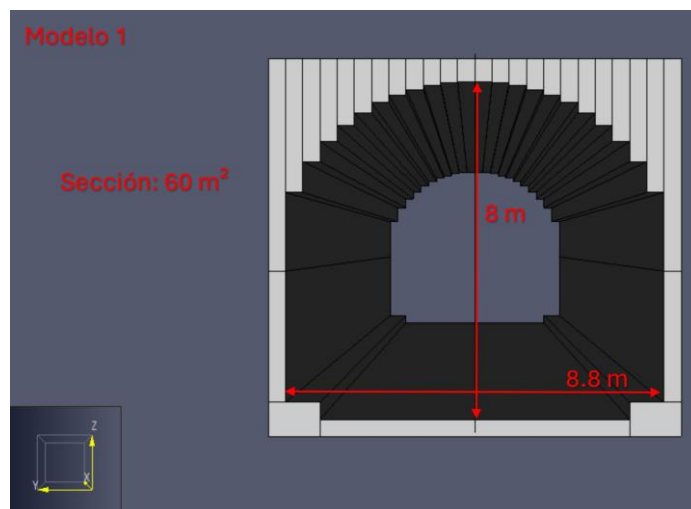
Respecto a los puntos de medición, como se ha explicado y mostrado anteriormente en la Figura 12, se han colocado sensores de temperatura simulando los termopares de los experimentos originales, en los 7 “bucles” o secciones a estudiar, a distintas alturas.

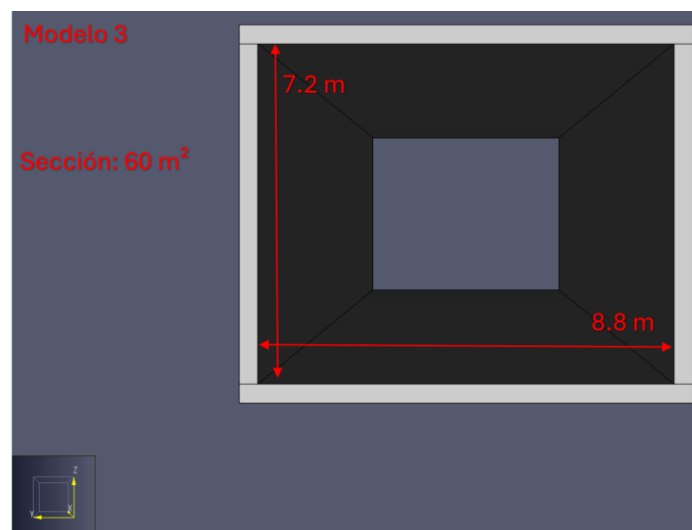
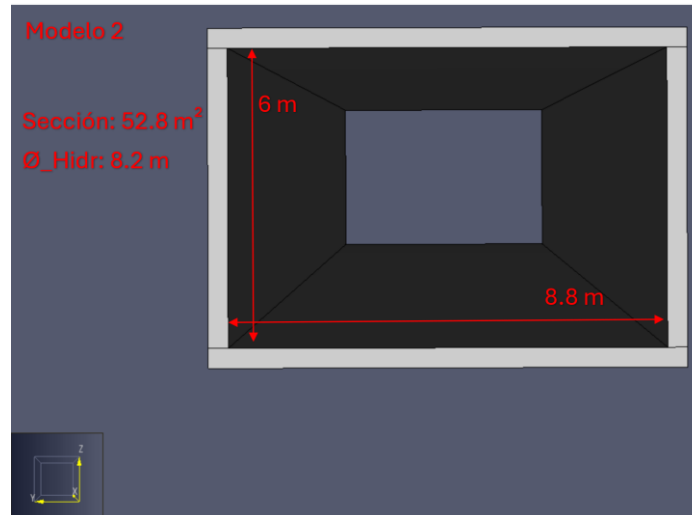
Adicionalmente, se han colocado sensores de temperatura y de velocidad longitudinal del túnel 7.3 m y a 7.6 m de altura respecto al suelo a lo largo de todo el túnel cada 5 m. A través de estos sensores, se ha podido evaluar la propagación del humo y la distancia de retroceso.

4.3 ANÁLISIS DE SECCIÓN

Para evaluar la influencia de la geometría de la sección del túnel e intentar simplificar las simulaciones se ha hecho un análisis de tres modelos geométricos distintos:

- Modelo 1: Sección realista del túnel
- Modelo 2: Sección rectangular con D_h equivalente
- Modelo 3: Sección rectangular con similar área transversal





El modelo 1 es lo más parecido posible a la sección verdadera del Memorial Tunnel reproduciendo el arco original del Memorial Tunnel, tiene una sección aproximada de 60 m^2 .

El modelo 2 tiene una sección rectangular cuya área (52.8 m^2) equivale al círculo de diámetro hidráulico $D_h = 8.2 \text{ m}$ del Memorial Tunnel, y se fija el ancho de la sección al del túnel original (8.8 m).

El modelo 3 tiene una sección rectangular cuya área igual a la real (60 m²), también se fija el ancho de la sección al del túnel original (8.8 m).

Para estudiar las tres secciones se ha simulado simulado el Test 610, activando el panel de 50MW con una precisión de mallado de 0.4x0.4x0.4. Se ha impuesto una ventilación de 2.5 m/s, y se han dejado unos 90 s para que se estabilice. A continuación, ha empezado el fuego y se ha hecho una media entre los valores obtenidos entre los s 191 y 281 una vez empezado el incendio (después de los 90 s de estabilización de ventilación).

Distribución de Temperatura por Altura en el Túnel

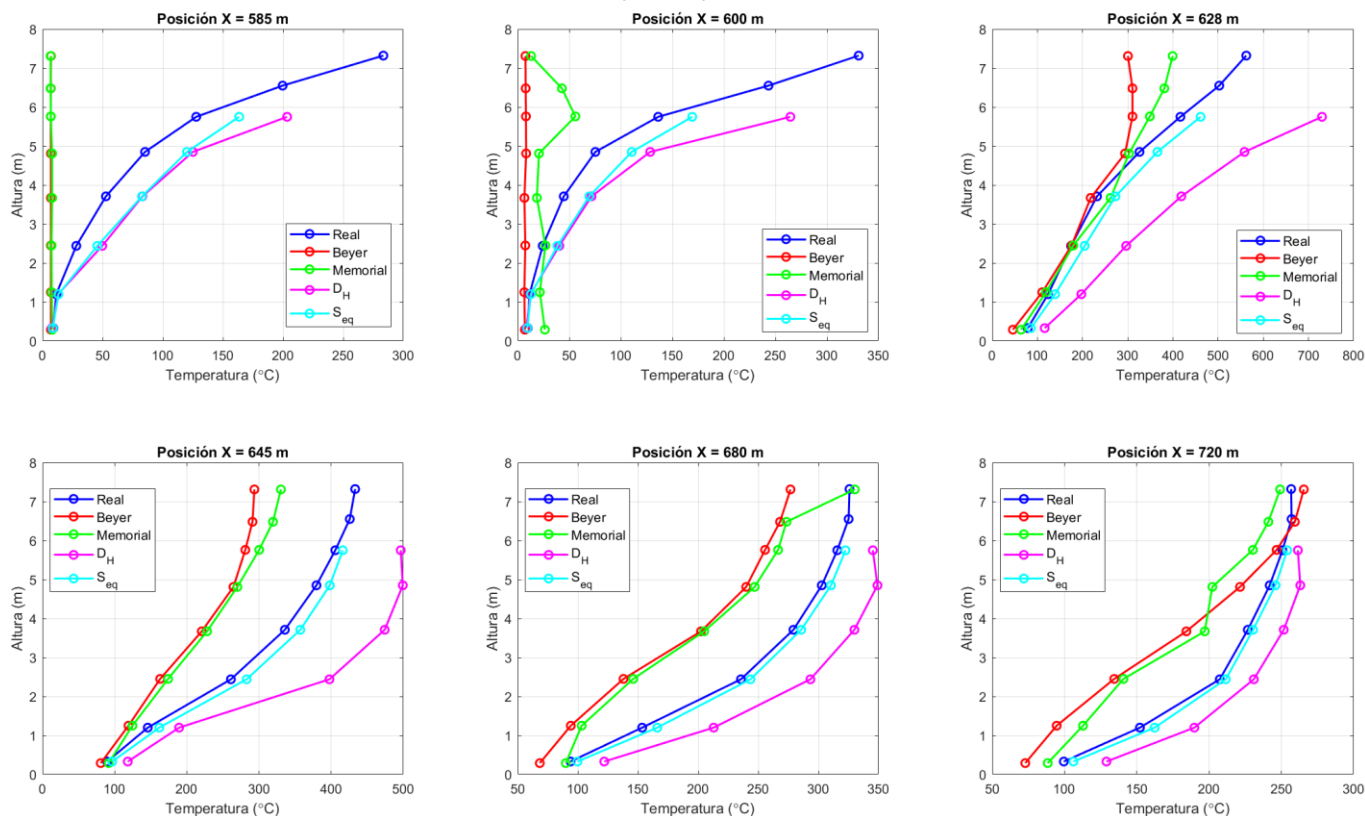


Figura 17: Árboles Temperatura-Altura del Análisis de Secciones

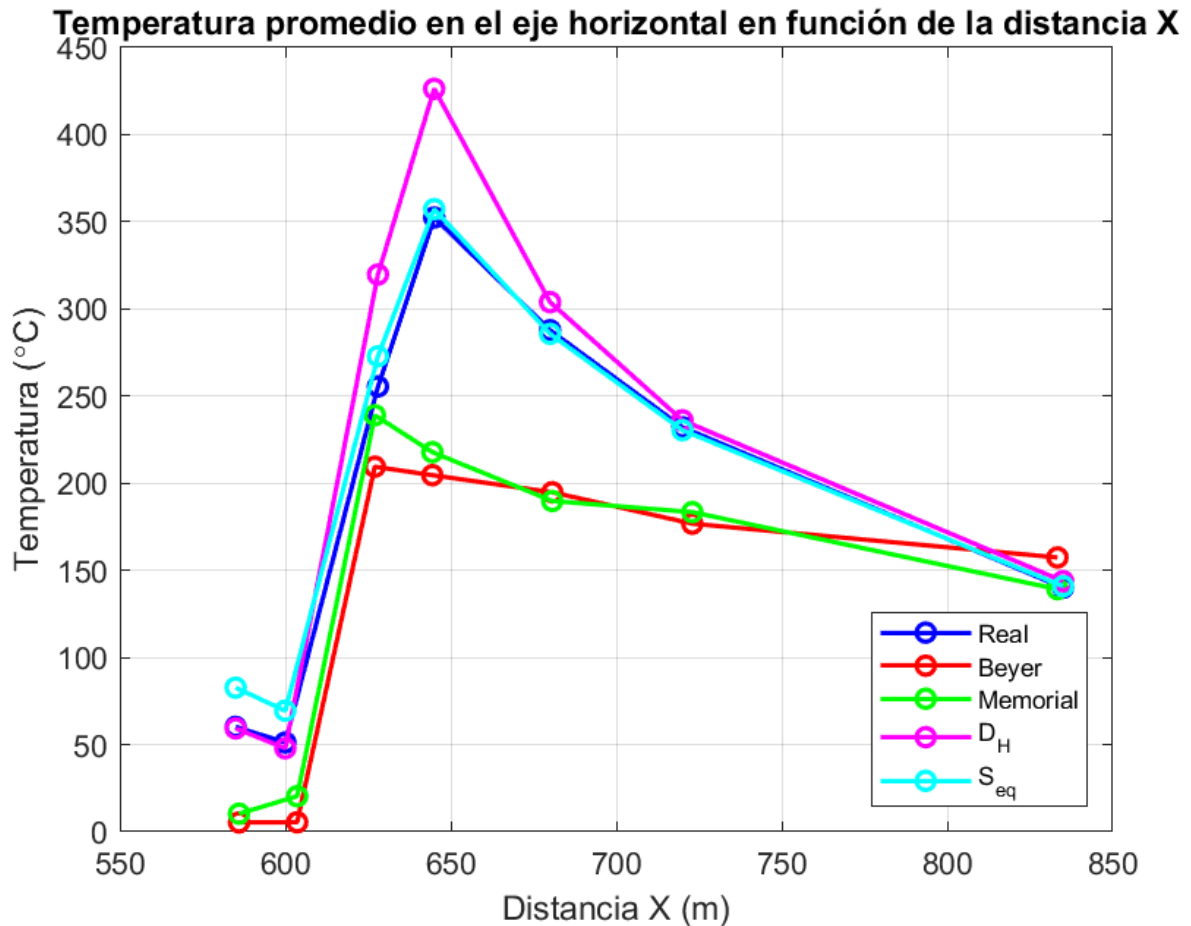


Figura 18: Gráfico Distancia-Temperatura en eje horizontal del túnel del Análisis de Secciones

En las curvas de la Figura 17 (distribución vertical de temperatura en seis secciones), observamos que tanto el Modelo 1 (azul) como el Modelo 3 (cian) son los que mejor replican los perfiles de Beyer (rojo) y del ensayo original (verde). En cambio, el Modelo 2 (morado) simula siempre valores mucho más altos de temperaturas siendo este suceso más evidente aguas abajo, lo que prueba que el uso del diámetro hidráulico no es la representación más adecuada para las simulaciones.

En cuanto a la Figura 18, representa una gráfica posición temperatura en el eje horizontal del túnel, este cambia según el modelo. Para las simulaciones de Beyer, la del modelo 1 y para las pruebas originales el eje horizontal se encuentra a una altura de 4 m, para el modelo 2 (Diámetro hidráulico) se encuentra a una altura de 3 m y para el modelo 3 (sección equivalente) se encuentra a una altura de 3.6 m. Se vuelve a apreciar resultados parecidos a la anterior figura, siendo el modelo de la sección realista el que más se acerca a los resultados de Beyer y los originales, seguido por poco por el modelo 3 y siendo el modelo más dispar el 2.

De estas imágenes se concluye que el modelo más fiel es el número 1 (realista), seguido por poco por el modelo 3 (área equivalente), ambos con tiempos de simulación parecidos (entorno a los dos días). El modelo 2 (diámetro hidráulico) es el que más se distancia de los valores experimentales, simulando valores de temperatura más altos. Por esto, las simulaciones definitivas de los Test se han realizado con el modelo 1. A continuación, están representadas gráficas que estudian los valores de temperatura y de ventilación longitudinal a lo largo del túnel.

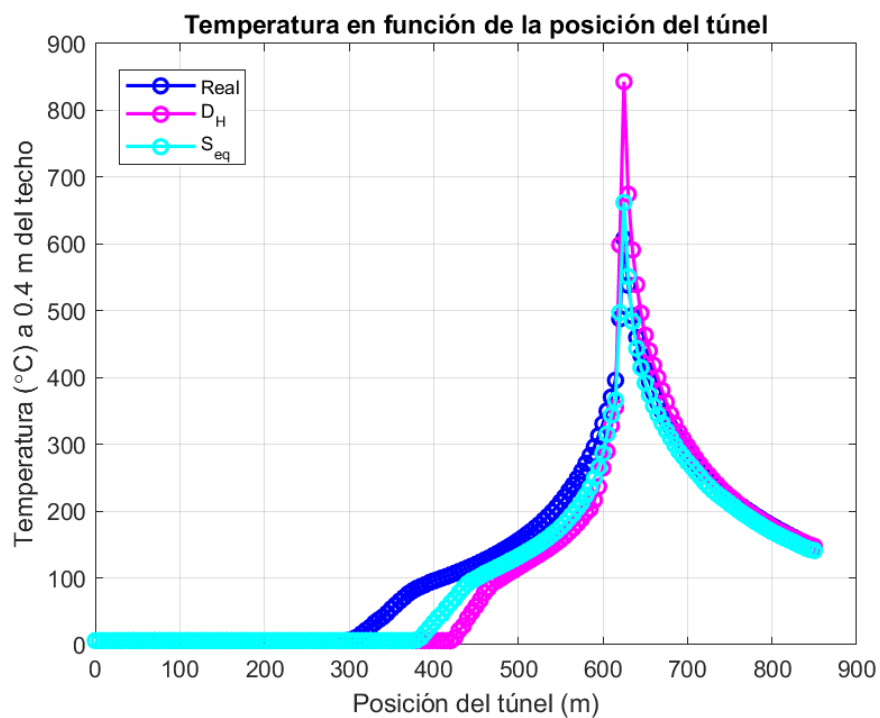


Figura 19: Temperatura a 0.4 m del techo

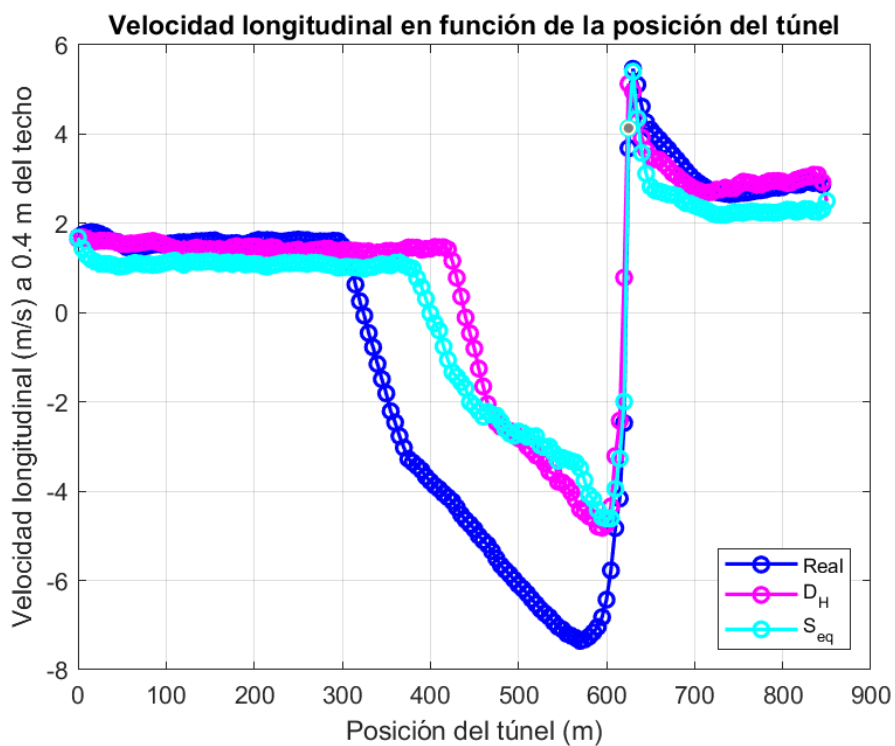


Figura 20 Ventilación longitudinal a 0.4 m del techo

Hay que considerar que los sensores de temperatura y velocidad se han colocado a 0.4 m por debajo del techo en cada uno de los modelos, por lo que su distancia al suelo varía según la altura de la sección. Esta diferencia geométrica hace que la capa de retroceso de humo resulte más pronunciada en el Modelo 1, cuya sección es la más alta. En este modelo se observan temperaturas iniciales superiores, aunque luego el valor máximo del pico sea algo menor (cercano a 600 °C) y un retroceso de humo más intenso, con velocidades negativas que superan los 7 m/s.

De estas comparaciones se deduce que el Modelo 1 (sección realista) ofrece la mayor fidelidad frente a los datos experimentales, seguido muy de cerca por el Modelo 3 (rectangular de área real), ambos con tiempos de simulación similares (aproximadamente dos días). El Modelo 2 (rectangular de área equivalente al diámetro hidráulico) se separa con mayor claridad de los resultados de referencia, sobrestimando las temperaturas a lo largo del túnel. Por ello, las simulaciones finales de los Test se han llevado a cabo empleando el Modelo 1. A continuación se muestran las curvas de temperatura y velocidad longitudinal a lo largo del túnel.

4.4 ANÁLISIS DE MALLA

El objetivo del análisis de malla de un modelo numérico es el de evaluar la precisión de la malla utilizada. El objetivo es identificar la malla más adecuada que permita encontrar un equilibrio entre obtener resultados lo más precisos posible para las condiciones de incendio simuladas, considerando la propagación del fuego, la ventilación y los fenómenos de retroceso de humo; y realizar simulaciones que no tengan un alto coste computacional, debido a las limitaciones de tiempo y espacio de este proyecto.

4.4.1 CONFIGURACIÓN Y PARÁMETROS DE LA SIMULACIÓN

La simulación se ha ejecutado durante un total de 800 s, divididos en tres fases principales. En primer lugar, se ha dejado un período inicial de 200 s para que la ventilación se estabilice

a 3 m/s. Posteriormente, se ha aplicado una rampa de 400 s que sigue una ecuación cuadrática $\alpha \cdot t^2$ ultra rápida (con $\alpha=0.1876$) representada en la Figura 21, para simular el inicio del incendio, con una liberación de calor desde el panel de 30 MW (situado a unos 620 m de la entrada del túnel). Esta fase de rampa simula el calentamiento progresivo y la activación del fuego. Finalmente, se ha dejado un período de 200 s en el que la rampa de fuego se mantiene constante con un valor de 30 MW. Los resultados del análisis de mallado se han calculado como una media de los últimos 50 s de simulación.

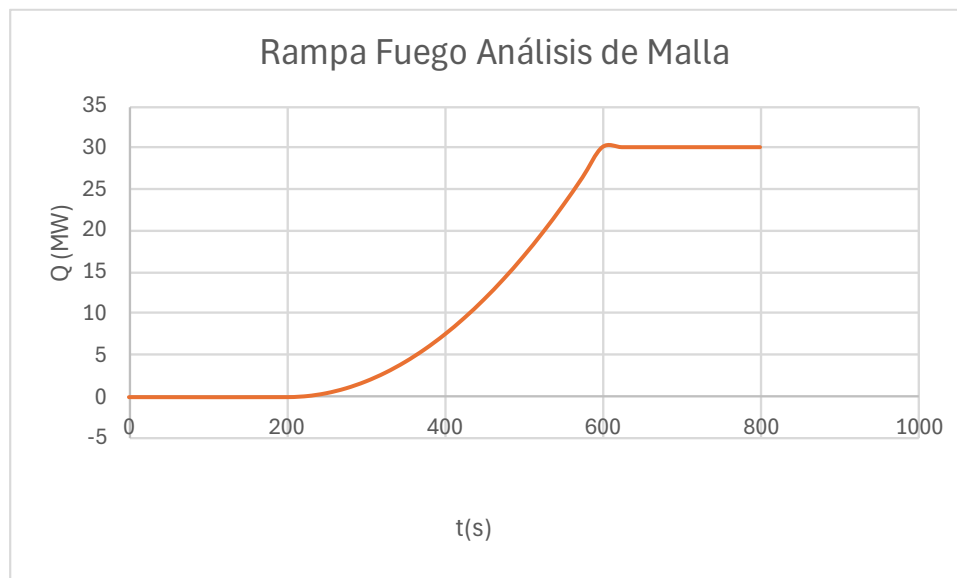


Figura 21: Rampa de Fuego (30 MW)

En cuanto a los modelos de malla utilizados, se ha optado por realizar tres configuraciones diferentes: una simulación con una malla uniforme de 0.4 m; una con una malla mixta, donde la mayor parte del túnel utiliza una malla de 0.4 m, pero las zonas más cercanas al fuego se resuelven con una malla más fina de 0.2 m; y una última con una precisión de malla constante de 0.2. Esta estrategia tiene como objetivo evaluar cómo la resolución más detallada en las zonas críticas, donde el fuego se desarrolla, puede mejorar la precisión de la simulación.

Los resultados de estas simulaciones se han evaluado utilizando el modelo de sección de área equivalente (modelo 3), que tiene un área de sección transversal de 60 m², igual a la del túnel original. Esta sección es perfil rectangular con un ancho de 8.8 m y una altura de 7.2 m.

4.4.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS CON PENDIENTE 3%

Los primeros gráficos muestran los resultados de la distribución de temperatura por altura en diferentes secciones del túnel (secciones a 585 m, 600 m, 628 m, 645 m, 680 m, y 720 m de la entrada). En estos gráficos, se comparan las simulaciones con malla de 0.4 m (representadas en azul oscuro), malla mixta (representadas en morado) y malla de 0.2, (azul cian) para cada sección.

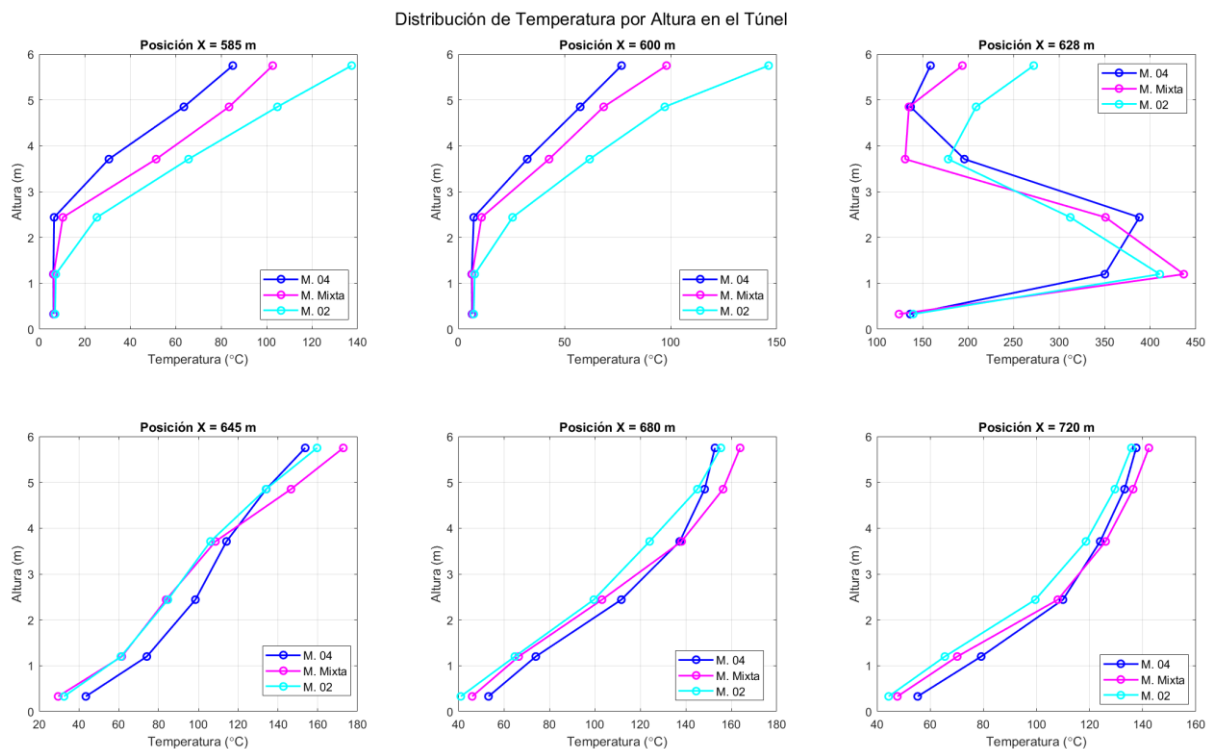


Figura 22: Árboles de temperatura-altura Análisis de malla con pendiente

En las primeras secciones del túnel, la diferencia entre las tres configuraciones de malla es más evidente. Las dos primeras secciones corresponden a la región del túnel que se encuentra antes del incendio y la tercera está sobre los paneles de fuego. En alturas superiores se aprecia un aumento de las temperaturas que está relacionado con la sobrestimación del retroceso de la capa de humo. A través de simulaciones ya realizada; y de investigaciones anteriores como las de Beyer et al.(1) o Kevin McGrattan y Matthew Bilson (2), sabemos que FDS tiende a sobrestimar este suceso; y lo que sorprendentemente se deduce de este análisis es que a medida que aumentamos la precisión del modelo al incrementar la resolución de malla, más se intensifica esta sobrestimación. La simulación con resolución de 0.2 m, predice temperaturas de hasta 50°C por encima que la de resolución de 0.4 m para la sección a 600 m de la entrada; y hasta de 100 °C para la sección la de 628 m.

En las posiciones más avanzadas del túnel (a partir de 645 m), la diferencia entre las tres simulaciones se reduce. Además, para estas secciones las simulaciones con más resolución predicen temperaturas un poco más bajas.

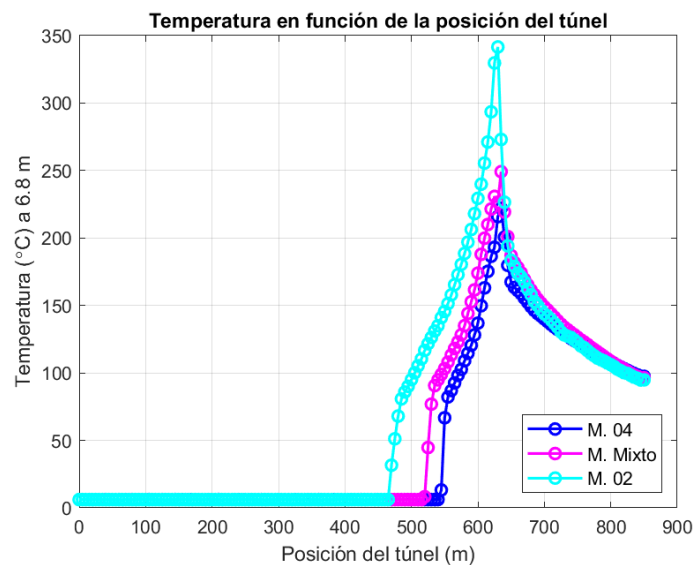


Figura 23: Temperatura-Distancia a 6.8 m de altura Análisis de malla con pendiente

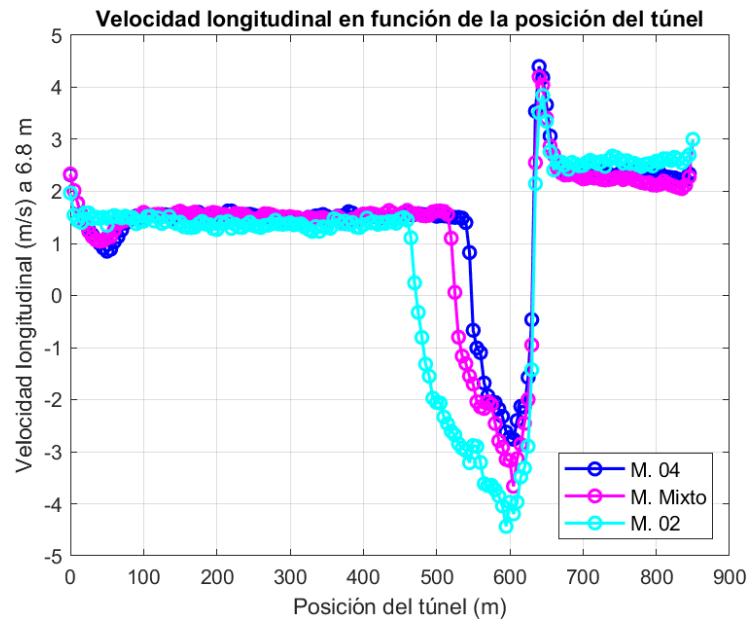


Figura 24: Velocidad-Distancia a 6.8 m de altura Análisis de malla con pendiente

Todos estos sucesos se pueden apreciar gráfico que muestra la temperatura a 6.8 m de altura a lo largo del túnel, en los cuales la malla mixta y la de precisión 02 muestran, una estimación más alta de los valores de temperatura en las zonas cercanas al fuego.

En cuanto al gráfico distribución de la velocidad de ventilación longitudinal, a través de este se obtienen más detalles sobre el retroceso de humo. Se reafirma el hecho de que el retroceso de humo es más intenso para resoluciones de malla más alta: La simulación con la resolución de 0.2m presenta un pico de flujo inverso de hasta -4.5 m/s y la zona con retroceso de humo llega hasta 475 m antes de la entrada; mientras la simulación con una la resolución de 0.4m presenta un pico de flujo inverso de solo -2.5m/s y la zona con retroceso de humo solo llega hasta 550 m antes de la entrada.

Del análisis de malla se obtienen dos conclusiones principales: a medida que se incrementa la resolución de mallado, se intensifica la tendencia característica de FDS de sobrestimar el retroceso de la capa de humo. El otro punto clave es que la influencia de la resolución de malla es mucho más notable en la región anterior al incendio y sobre los paneles de fuego, mientras que aguas abajo esta diferencia es mucho menor.

4.4.3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS SIN PENDIENTE

Para los resultados del análisis de mallado horizontal se vuelve a repetir la misma configuración: se muestras. secciones del túnel (secciones a 585 m, 600 m, 628 m, 645 m, 680 m, y 720 m de la entrada). En estos gráficos, se comparan las simulaciones con malla de 0.4 m (representadas en azul oscuro), malla mixta (representadas en morado) y malla de 0.2, (azul cian) para cada sección.

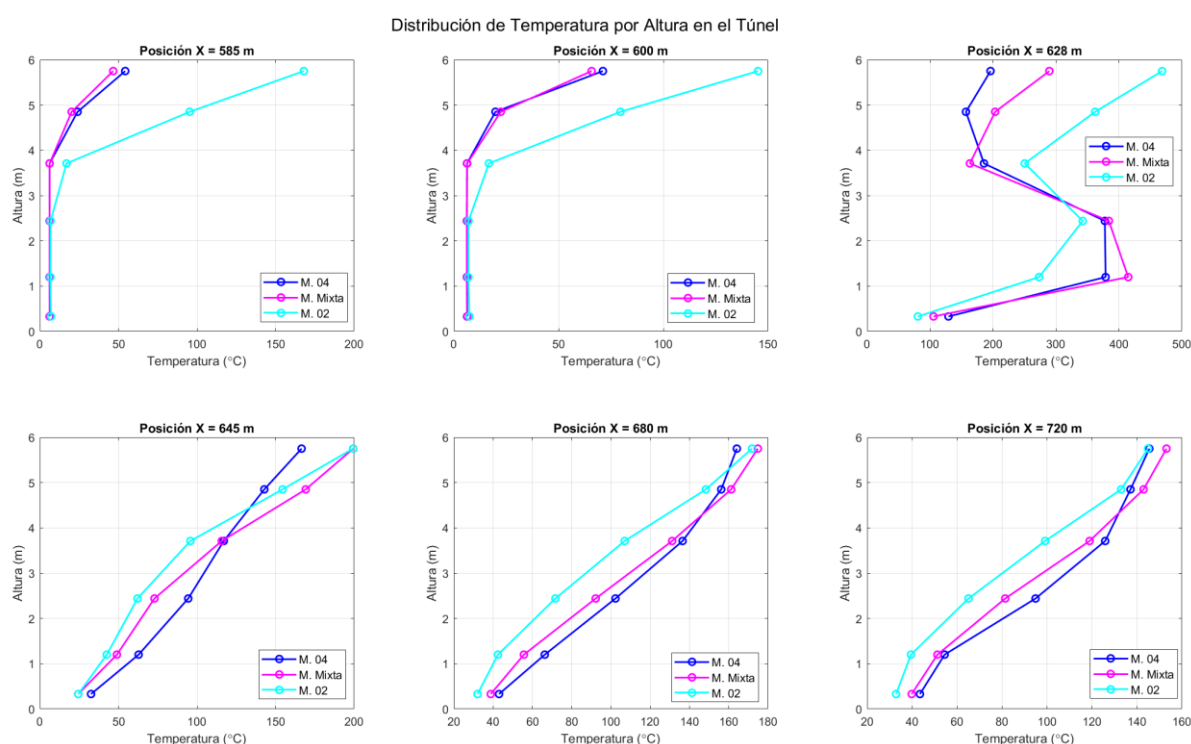


Figura 25: Árboles de temperatura-altura Análisis de malla sin pendiente

Los gráficos muestran un comportamiento muy parecido al anterior, ya que vuelve a ser la simulación con una resolución de mallado más alto la que predice temperaturas más altas en la zona de retroceso de humo. Esta vez la diferencia de temperaturas entre las simulaciones es más pronunciada en las tres primeras secciones, llegando incluso a una diferencia de temperaturas de 250 °C en el techo encima de los paneles de fuego.

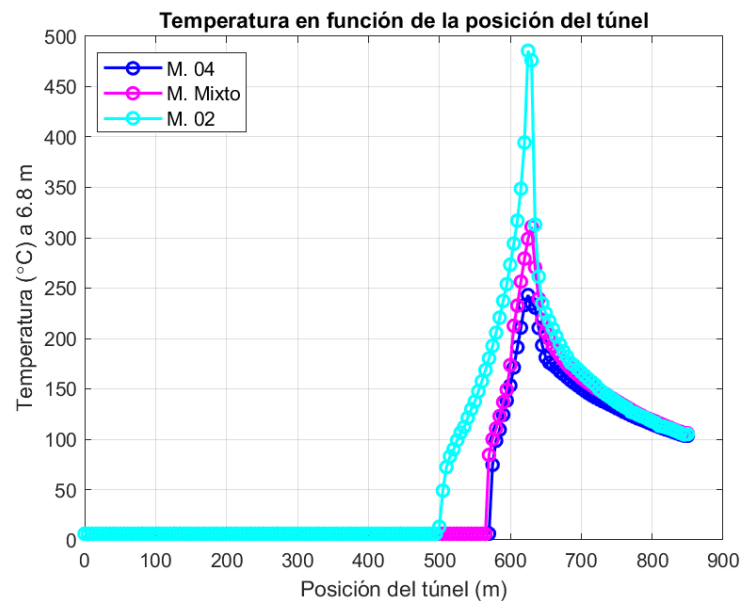


Figura 26: Temperatura-Distancia a 6.8 m de altura Análisis de malla sin pendiente

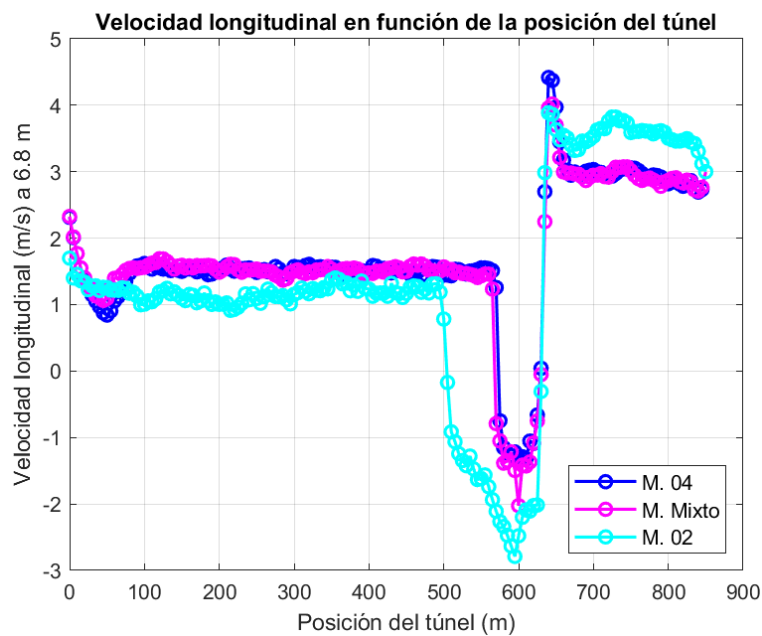


Figura 27: Velocidad-Distancia a 6.8 m de altura Análisis de malla sin pendiente

La Figura 27 demuestra de nuevo la intensificación de las temperaturas para la simulación con mayor simulación de malla.

En cuanto al gráfico que analiza las velocidades, se observa una reducción de la velocidad del flujo inverso de ventilación en la zona de retroceso de humo, llegando el pico de ventilación en flujo inverso a 3 m/s frente a los 4.5 m/s de la simulación con pendiente (refiriéndose a las simulaciones con una resolución de malla de 0.2 m). Esto era esperable ya que, al eliminar la pendiente decreciente, ya no se produce el “efecto chimenea” que ayudaba al aire a circular en el sentido opuesto.

Capítulo 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 TEST 606A

Para el análisis del Test 606A se ha llevado a cabo una simulación con una precisión de malla de 0.4, sección realista (modelo 1) y una duración de 1800 s, comenzando el incendio en el panel de 10 MW (ubicado a unos 618 m de la entrada) a los 90 s, dejando este tiempo para que se establezca una ventilación de 3 m/s; se ha seguido la rampa de fuego de la Figura 14. La simulación se ha realizado tanto con una pendiente del 3% (representada con una curva azul oscuro) como sin pendiente (representada con una curva azul cian). Estos resultados fueron analizados mediante un promedio de los valores obtenidos entre los s 1741 y 1770 de la simulación. En algunas de las gráficas de resultados también se mostrarán los datos obtenidos en los experimentos oficiales del Memorial Tunnel (representados con una curva verde) y los obtenidos en las investigaciones de Beyer et al (1) (representados con una curva roja).

Distribución de Temperatura por Altura en el Túnel

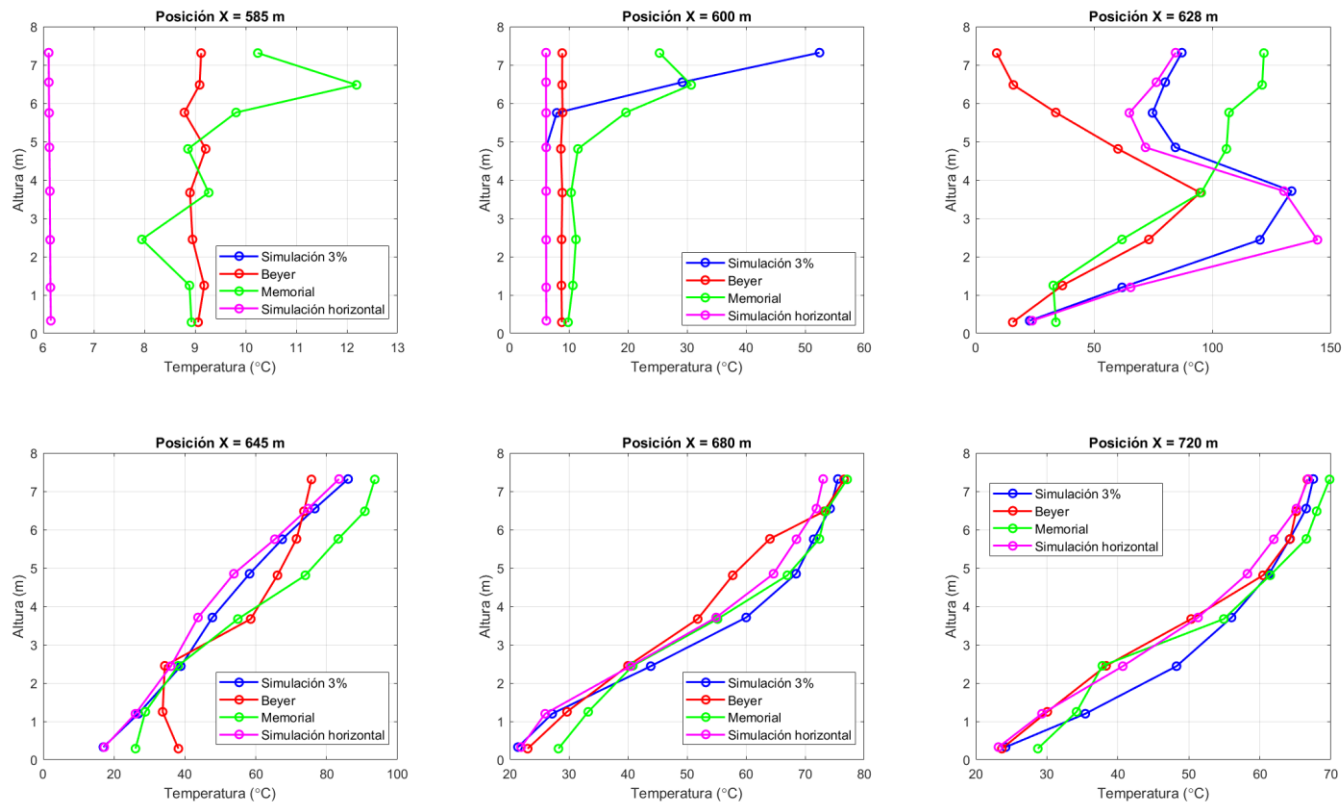


Figura 28: Árboles de temperatura-altura TEST606A

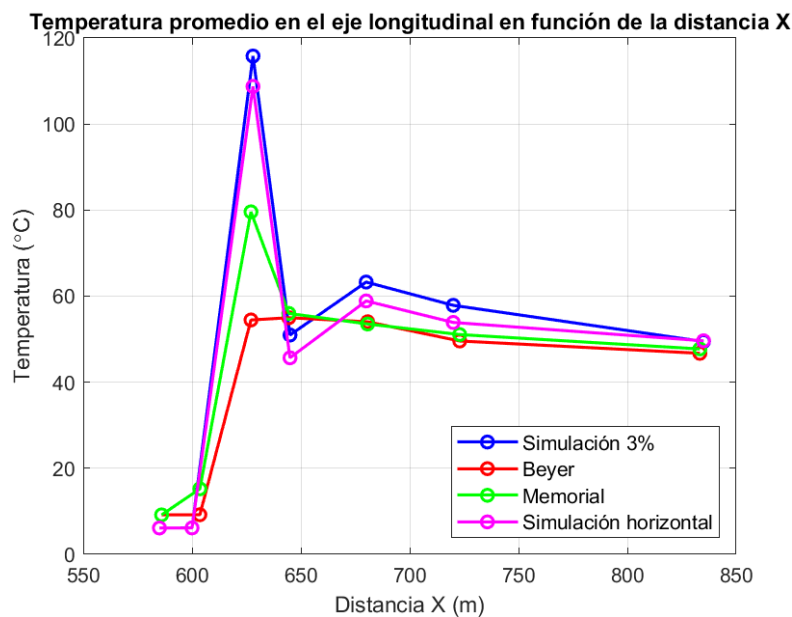


Figura 29: Temperatura-distancia en el eje longitudinal TEST606A

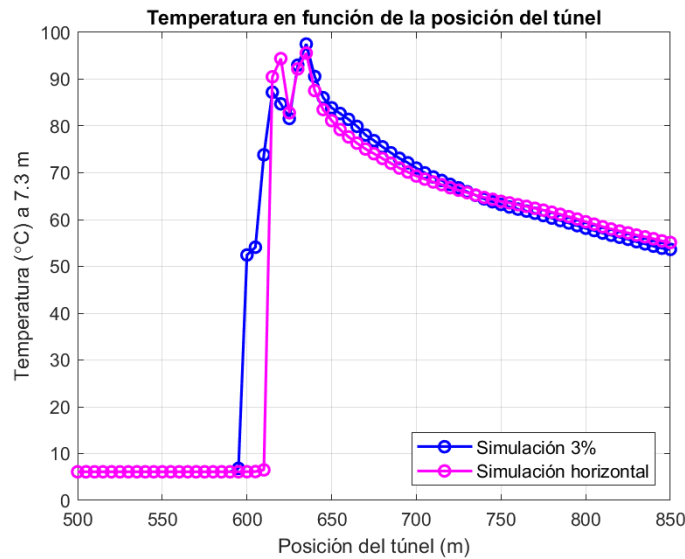


Figura 30: Temperatura-Distancia a 7.3 m de altura TEST606A

En cuanto la Figura 28 muestra la variación de la temperatura con la altura para cuatro series de datos: el experimento original del Memorial Tunnel (verde), las simulaciones de Beyer et al. (1) con FLUENT (rojo), la simulación con FDS y pendiente del 3 % (azul) y la misma simulación en un túnel horizontal, es decir, sin pendiente (morado) en las sección X = 585 m, 600 m, 628 m, 645 m, 680 m y 720 m, respectivamente.

En las secciones anteriores al panel de fuego, en particular en la sección situada a 600 m la simulación con pendiente (azul) sobrestima la temperatura en las capas superiores, alcanzando valores próximos a 50 °C a 7 m de altura, frente a los 20–22 °C del Memorial y los 8–10 °C de Beyer. Aunque este aumento exagerado se debe a la tendencia de FDS a intensificar el “efecto chimenea” intensificado por la inclinación, dicho modelo sí es capaz de capturar el retroceso de humo, que también se puede observar en la curva experimental del Memorial Tunnel, y que tanto Beyer como la simulación sin pendiente no muestran.

La sección situada a 628 m, la más próxima al panel de fuego, resulta especialmente crítica. En los primeros 4 m de altura, tanto la simulación con 3 % de pendiente como la horizontal registran temperaturas muy elevadas, superiores a las de Beyer y el Memorial. A partir de esa altura, sin embargo, ambas curvas se estabilizan y se aproximan incluso más que la simulación de Beyer.

A medida que avanzamos hacia las posiciones finales del túnel, los tres últimos perfiles (645, 680 y 720 m) tienden a converger. A 645 m y 680 m, las cuatro curvas muestran temperaturas de 70–80 °C a 7 m, con la simulación pendiente ligeramente por encima. Finalmente, a 720 m todas las series coinciden en torno a 65 °C, lo que indica que el efecto de la pendiente disminuye progresivamente a medida que se aleja del origen del incendio.

La Figura 29 y Figura 30 demuestran un comportamiento similar a los árboles de temperatura. La primera de las dos recoge la temperatura media en el eje longitudinal (a 4 m de altura) a lo largo de siete secciones (las seis anteriores más una situada a 835 m de la entrada. Ambas simulaciones de FDS proyectan un pico alrededor de los 110 °C a los 625 m, seguido de un periodo más estable con temperaturas entre los 50–65 °C hasta los 850 m. Los datos de Beyer (rojo) y del Memorial (verde) muestran picos menores (55 y 80 °C respectivamente), de manera que se vuelve a observar las sobrestimaciones propias de FDS. La Figura 30 recoge un comportamiento parecido, esta vez los picos de la simulación llegando a valores de temperatura más alto, llegando casi a los 100°C (debido a que los datos de temperatura recogidos se encuentran a 7.3 m, en vez de a 4 m), para luego estabilizarse progresivamente.

A través de los siguientes gráficos, se va a poder analizar más detalladamente el retroceso de humo.

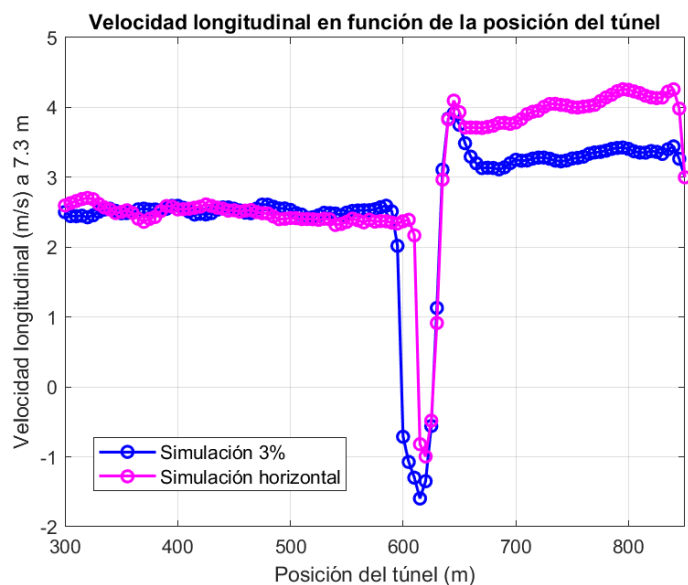


Figura 31: Velocidad-Distancia a 7.3 m de altura TEST 606A

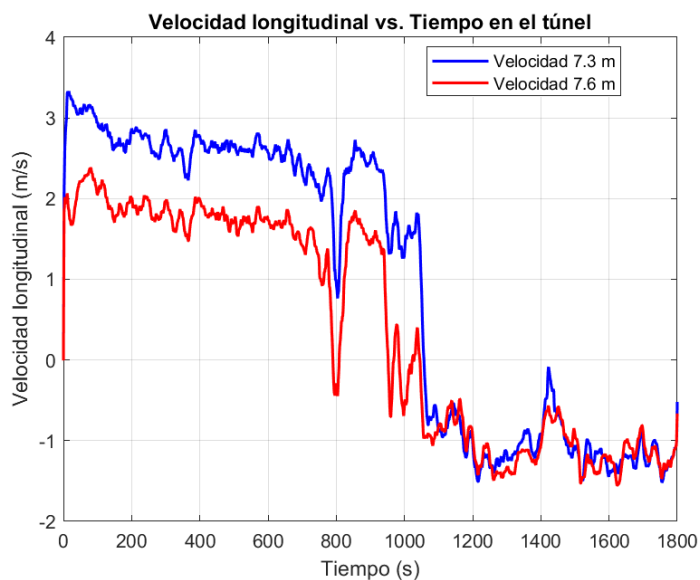


Figura 32: Velocidad-Tiempo a 620 m para dos alturas TEST606A

En la Figura 31 se observa la evolución de la componente longitudinal de la velocidad U a 7.3 m de altura. En ambos modelos la ventilación inicial se mantiene en torno a 2.5 m/s hasta los 600 m, donde el frente de humo invierte el flujo: la simulación con pendiente (azul) alcanza un mínimo de -1.6 m/s, mientras que la horizontal (morado) llega a -1 m/s. A

continuación, el flujo se restablece y se estabiliza alrededor de 3.2 m/s (pendiente) y 3.7 m/s (horizontal) en las zonas alejadas del fuego. Las zonas con un valor de ventilación negativo representan las zonas con retroceso de humo, a partir de esta primera figura se determina que el área afectada una vez se ha estabilizado el modelo (los datos siguen siendo una media de los recogidos entre los s 1741 y 1770) se encuentra entre los 600 y 625 m para estas simulaciones.

En la Figura 32 está representada la evolución temporal de la ventilación longitudinal a 620 m de la entrada del túnel a dos alturas distintas: a 7.3 m (curva azul) y a 7.6 m (curva roja). Durante los primeros 1000 s, todavía no hay retroceso de humo, el flujo principal mantiene una velocidad positiva cercana a 2.7 m/s a 7.3 m de altura (curva azul) y en torno a 2 m/s a 7.6 m (curva roja). Esta diferencia, es perfectamente consistente con la teoría de capas límite: a menor distancia del techo, la fricción en la superficie rígida atenúa progresivamente la velocidad del flujo, de modo que tiene sentido la curva roja, presente valores más bajos de ventilación. A partir de los 1100 s se produce un descenso brusco de ambas curvas y una inversión del flujo de ventilación, llegando hasta los 1.2 m/s en ambas curvas, y manteniéndose invertido hasta el final de la simulación

A continuación, se muestran imágenes de los resultados de temperatura, ventilación longitudinal y propagación de humo procesado por la herramienta Smokeview. Las figuras representan los últimos 300 m para ella simulación con pendiente a los 1750 s:

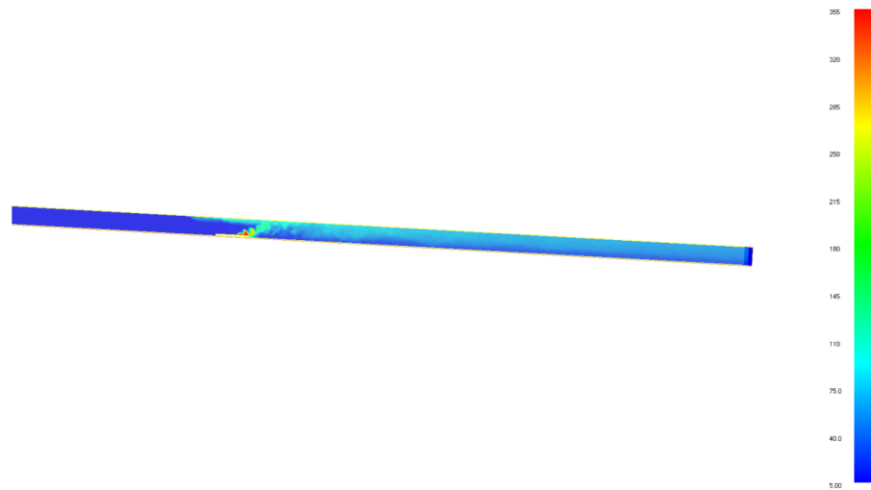


Figura 33: Slice de temperatura (°C) para TEST606A

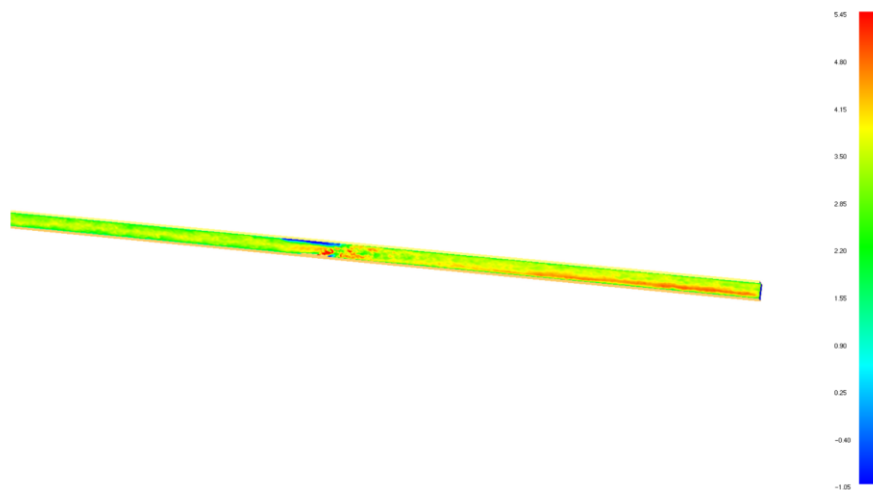


Figura 34: Slice de ventilación longitudinal (m/s) para TEST606A



Figura 35: Slice de propagación de humo para TEST606A

5.2 TEST 610

Para el análisis del Test 610 se ha llevado a cabo una simulación con una precisión de malla de 0.4 m, sección realista (modelo 1) y una duración de 400 s, comenzando el incendio en el panel de 50 MW (ubicado a unos 610 m de la entrada) a los 90 s, dejando este tiempo para que se establezca una ventilación de 3 m/s; se ha seguido la rampa de fuego de la Figura 15. La simulación se ha realizado tanto con una pendiente del 3% (representada con una curva azul oscuro) como sin pendiente (representada con una curva azul cian). Estos resultados fueron analizados mediante un promedio de los valores obtenidos entre los s 181 y 371 de la simulación. En algunas de las gráficas de resultados también se mostrarán los datos obtenidos en los experimentos oficiales del Memorial Tunnel (representados con una curva verde) y los obtenidos en las investigaciones de Beyer et al (1) (representados con una curva roja).

Distribución de Temperatura por Altura en el Túnel

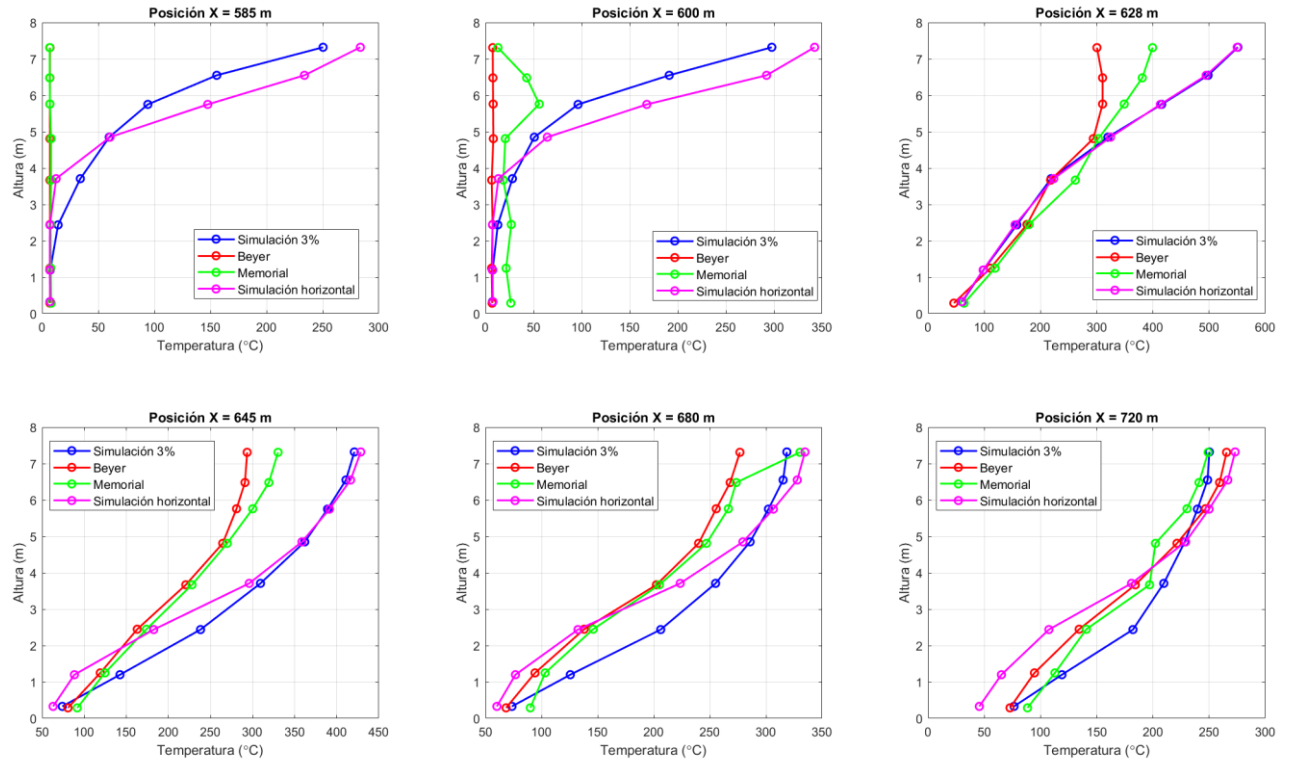


Figura 36: Árboles de temperatura-altura TEST610

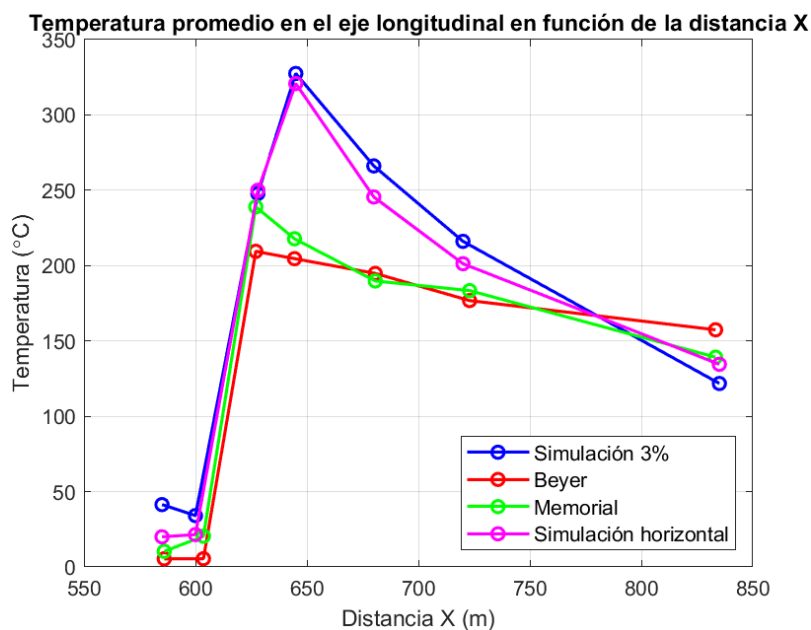


Figura 37: Temperatura-distancia en el eje longitudinal TEST610

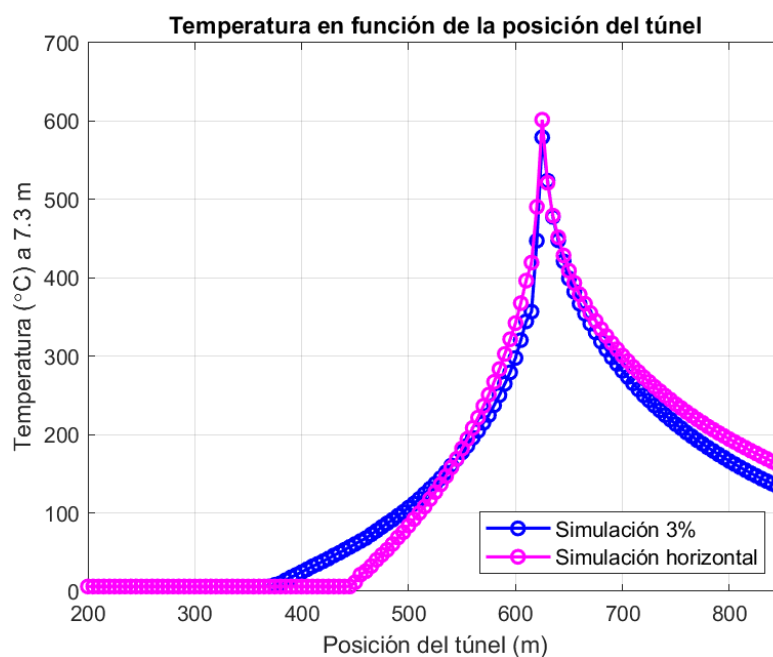


Figura 38: Temperatura-Distancia a 7.3 m de altura TEST610

En cuanto a la Figura 36: En los seis árboles correspondientes a las posiciones 585 m, 600 m, 628 m, 645 m, 680 m y 720 m se representa la variación de la temperatura con la altura para cuatro series de datos: el experimento original del Memorial Tunnel (verde), las simulaciones de Beyer et al. (1) con FLUENT (rojo), la simulación con FDS y pendiente del 3 % (azul) y la misma simulación en un túnel horizontal, es decir, sin pendiente (morado).

En las secciones anteriores a los paneles de fuego, ambas simulaciones sobrestiman la temperatura en las capas superiores, en este caso siendo la simulación sin pendiente (curva morada) la que da valores más altos

Para el árbol de temperatura de la sección a 628 m de la entrada, observamos que los resultados de la simulación con pendiente (azul) y la horizontal (morado) son idénticas, ya que se solapan entre sí. Ambas se acercan mucho a los datos experimentales en la mitad inferior del túnel, mientras que en la parte superior vuelven a sobredimensionar la capa de retroceso de humo, mientras que Beyer hace lo contrario, prediciendo valores más bajos a los experimentales. En cuanto a las tres últimas secciones observamos ambas simulaciones hechas con FDS predicen valores más altos de temperatura que los experimentales, especialmente a mayor altura, siendo peor el caso de la simulación con pendiente, estas diferencias se van moderando a medida que avanzamos en el túnel. En este caso la simulación realizada por Beyer et al (curva roja) logra un perfil de temperaturas bastante parecido al experimental para estas últimas secciones. Estas diferencias se pueden deber también a que los resultados para esta simulación se recogen muy pronto (a partir de los 181 s, y además 90 de estos se usan para estabilizar la ventilación), lo que dificulta la predicción de los valores de temperatura.

La Figura 37 es un gráfico que recoge la temperatura media a 4 m de altura a lo largo del túnel (incluyendo un punto adicional a 835 m). La simulación con pendiente (azul) y la horizontal (morada) muestran un pico de 330 °C aproximadamente, a 628 m de la entrada, seguido de un descenso progresivo hasta los 120 °C al final. Beyer (rojo) y el Memorial (verde) presentan picos de 205 °C y 240 °C, respectivamente, confirmando que FDS tiende a sobrestimar las temperaturas máximas, especialmente en presencia de pendiente. En la

Figura 38 se muestra un comportamiento parecido, llegando hasta una temperatura de casi 600°C en el pico.

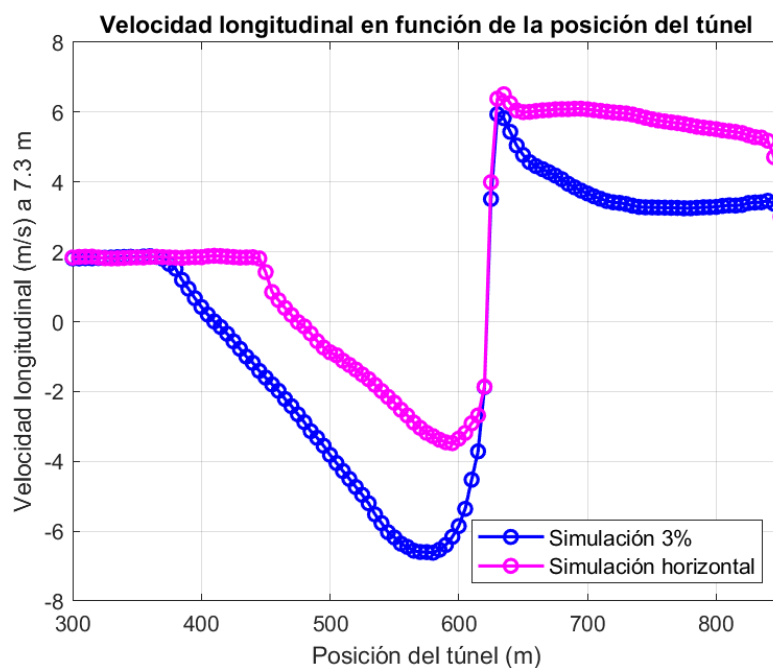


Figura 39: Velocidad-Distancia a 7.3 m de altura TEST 610

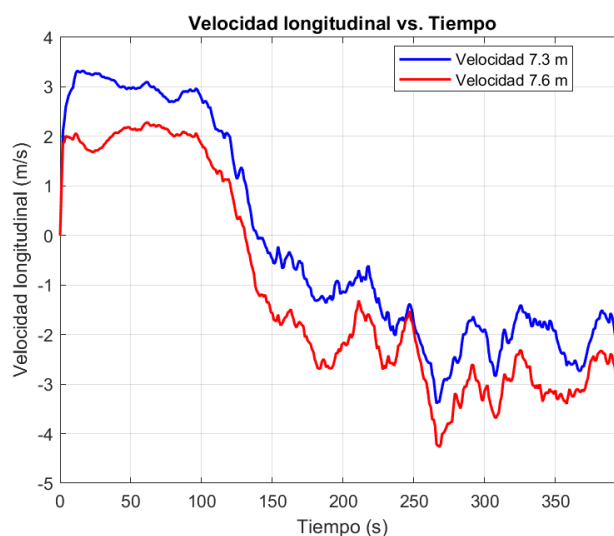


Figura 40: Velocidad-Tiempo a 620 m para dos alturas TEST615B

La Figura 39 nos muestra que en la simulación con pendiente (azul) la velocidad se mantiene estable cerca de 3.2 m/s hasta los 120 m, luego cae bruscamente y se invierte

progresivamente hasta llegar hasta los -6 m/s, de manera que tenemos una zona de retroceso de humo más grande que en el anterior caso, que va desde los 400 hasta los 630 m. Al pasar los paneles de fuego el flujo se reestablece hasta los a 4 m/s agua abajo. La simulación horizontal (morado) muestra un perfil de velocidades similar pero más suave y escalonado llegando un flujo inverso de velocidad de tan solo 3 m/s.

En la Figura 40 está representada la evolución temporal de la ventilación longitudinal a 620 m de la entrada del túnel a dos alturas distintas: a 7.3 m (curva azul) y a 7.6 m (curva roja). En esta prueba, la inversión de flujo se da muy pronto, concretamente cerca de los 150 s, y va aumentando la velocidad del flujo inverso hasta establecerse fluctuando entre valores cercanos a -2 m/s a 7.3 m de altura y entre los -3 m/s a los 7.6 m de altura.

A continuación, se muestran imágenes de los resultados de temperatura, ventilación longitudinal y propagación de humo procesado por la herramienta smokeview. Las figuras representan los últimos 300 m para ella simulación con pendiente a los 250 s:

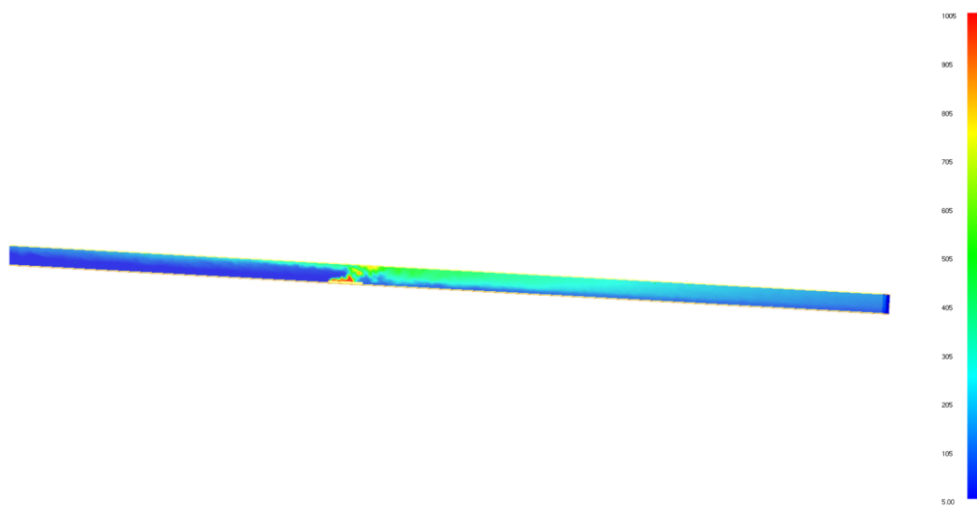


Figura 41: Slice de temperatura (°C) para TEST610

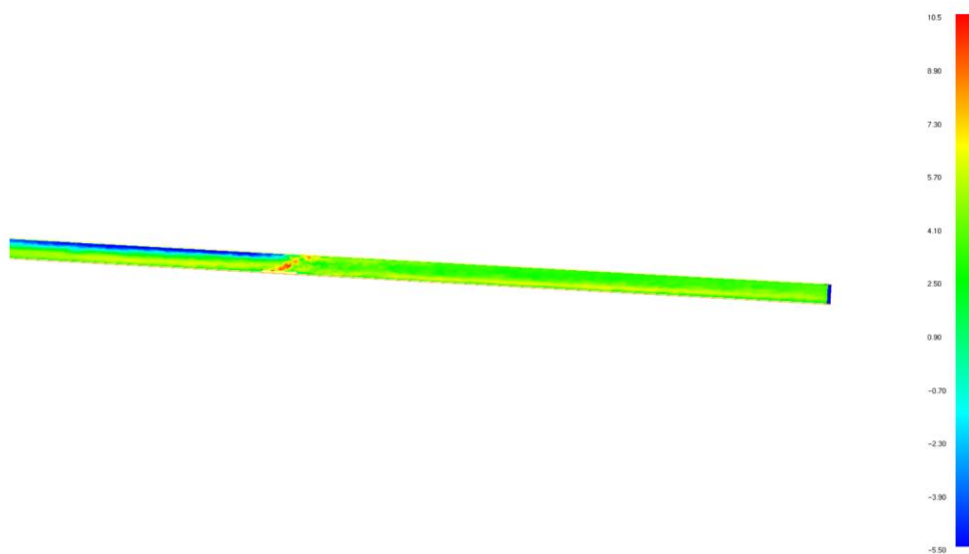


Figura 42: Slice de ventilación longitudinal (m/s) para TEST610



Figura 43: Slice de propagación de humo para TEST610

5.3 TEST 615B

Para el análisis del Test 615B se ha ejecutado una simulación de 950 s con mallado uniforme de 0.4 m y sección realista (modelo 1). Durante los primeros 100 s se permitió la estabilización de la ventilación a 3 m/s; a continuación, se inició el incendio activando los paneles de 50 MW, 30 MW y 20 MW, siguiendo la rampa de fuego representada en la Figura 16. Los resultados se calculan como la media de los datos obtenidos entre los 768 s y los 918 s para las curvas de temperatura y velocidad. Se comparan la simulación con pendiente del 3 % (curva azul), la simulación horizontal sin inclinación (curva morada), los datos experimentales del Memorial Tunnel (verde) y las simulaciones de Beyer et al. (rojo).

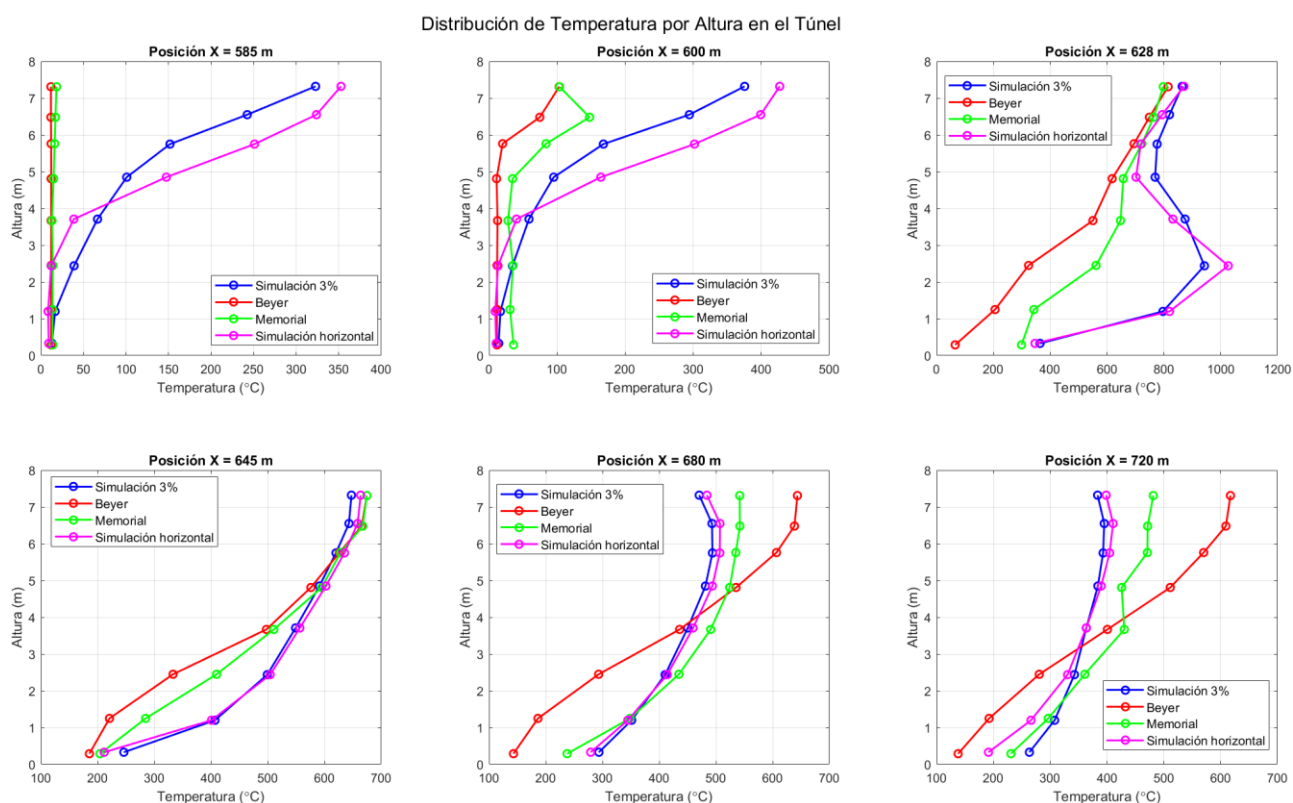


Figura 44: Árboles de temperatura-altura TEST615B

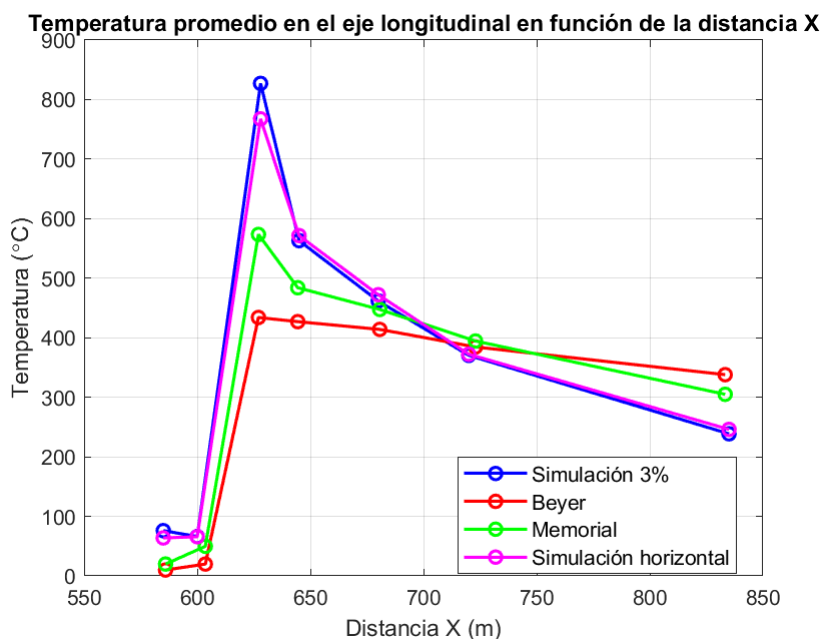


Figura 45: Temperatura-distancia en el eje longitudinal TEST615B

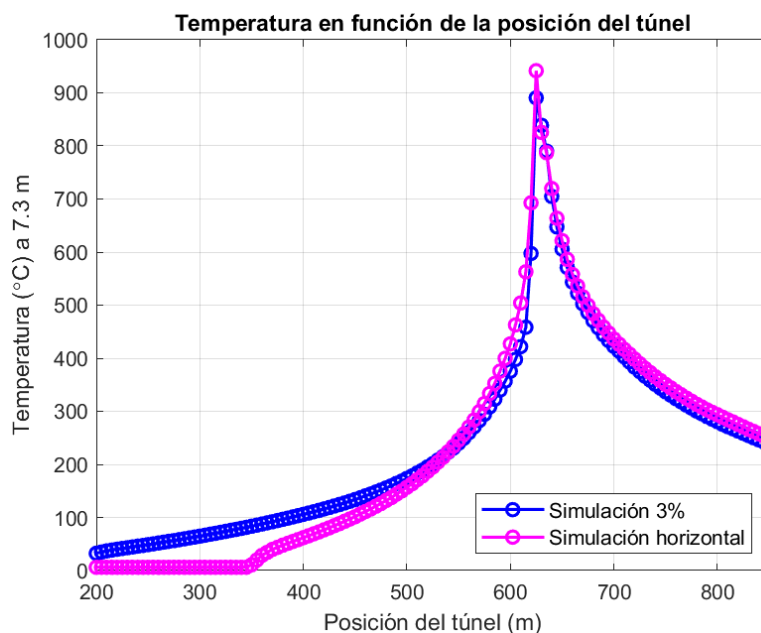


Figura 46: Temperatura-Distancia a 7.3 m de altura TEST615B

En cuanto a Figura 44: los árboles de temperatura muestran la variación de la temperatura con la altura para cuatro series de datos: el experimento original del Memorial Tunnel

(verde), las simulaciones de Beyer et al. (1) con FLUENT (rojo), la simulación con FDS y pendiente del 3 % (azul) y la misma simulación en un túnel horizontal, es decir, sin pendiente (morado) en diferentes secciones: 585 m, 600 m, 628 m, 645 m, 680 m y 720 m.

En las secciones anteriores a los paneles de fuego, ambas simulaciones sobrestiman la temperatura en las capas superiores, en este caso siendo la simulación sin pendiente (curva morada) la que da valores más altos. Se alcanzan valores próximos a 300 °C a 7 m de altura con FDS, mientras en los datos de los experimentos del Memorial Tunnel y de Beyer et al. solo presentan un aumento de temperatura (vinculado al retroceso de humo) en el segundo árbol de temperaturas con valores cercanos a 140°C y 70°C respectivamente. En estas dos figuras se vuelve a observar claramente el sobredimensionamiento del retroceso de la capa de humo propia de FDS.

La sección situada a 628 m, la más próxima al panel de fuego, sea probablemente la zona complicada de simular de todo el proyecto al ser este la prueba con una mayor liberación de calor (alrededor de 100MW) y al estar tan cerca de los paneles. Al igual que en las otras pruebas en los primeros 4 m de altura, ambas simulaciones de FDS recogen datos de temperatura demasiado elevados y luego tienden a converger en las capas superiores. En la sección a los 645 m se vuelve a repetir este patrón, pero con diferencias de temperaturas más moderadas.

En las dos secciones finales del túnel (680 m y 720m), este patrón cambia. En las capas inferiores tanto la simulación con pendiente, como la simulación sin pendiente se ajustan bastante bien a los resultados experimentales del Memorial Tunnel, y en las capas superiores predicen valores algo más bajos a los experimentales. El perfil de temperaturas dado por Beyer parece en este caso el más dispar a la curva experimental, con valores demasiado bajos a baja altura y demasiado alto en las capas superiores. De aquí se podría deducir que FLUENT es más preciso a la hora de simular las zonas anteriores al incendio y la capa de retroceso de humo, mientras que FDS parece más fiables aguas abajo, al menos cuando se ha llegado a una cierta estabilidad del sistema.

En la Figura 45 observamos perfiles parecidos a las anteriores pruebas con valores de temperatura más altos. La simulación con pendiente (azul) alcanza un máximo de 830 °C en la sección 628 m, seguida de un descenso progresivo hasta los 250°C al final del túnel. La simulación horizontal (morado) presenta un perfil muy parecido registrando un pico algo menor (770 °C). Los datos experimentales presentan un pico que no llega a los 600°C, y los resultados de Beyer configuran un perfil todavía más suave y menos cambiante. En la Figura 46 observamos que la simulación con pendiente (azul) predice valores más altos que la simulación sin pendiente (morada) hasta los 500 m donde se invierte esta situación y la curva morada pasa a mostrar valores ligeramente más altos que la curva azul hasta el final del túnel.

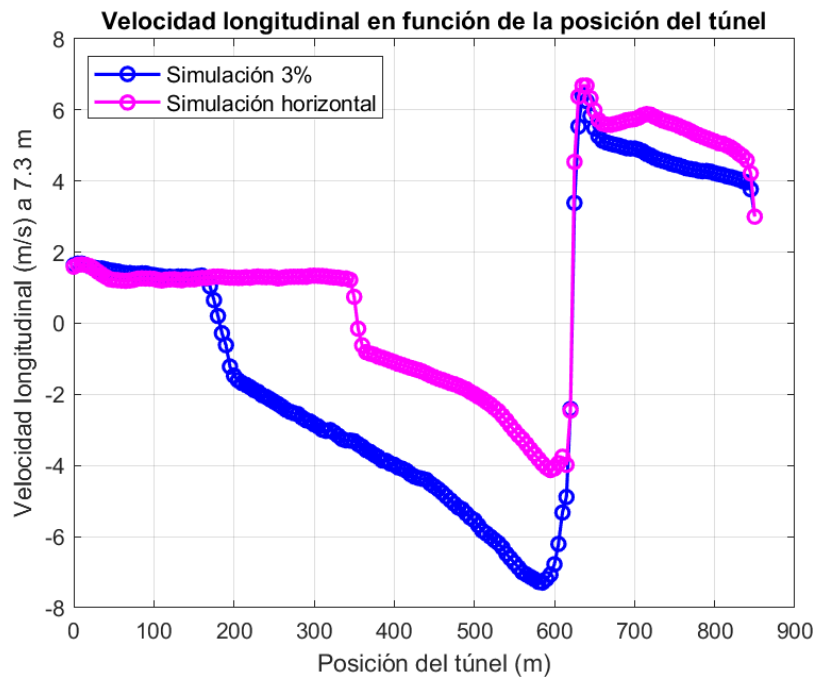


Figura 47: Velocidad-Distancia a 7.3 m de altura TEST 615B

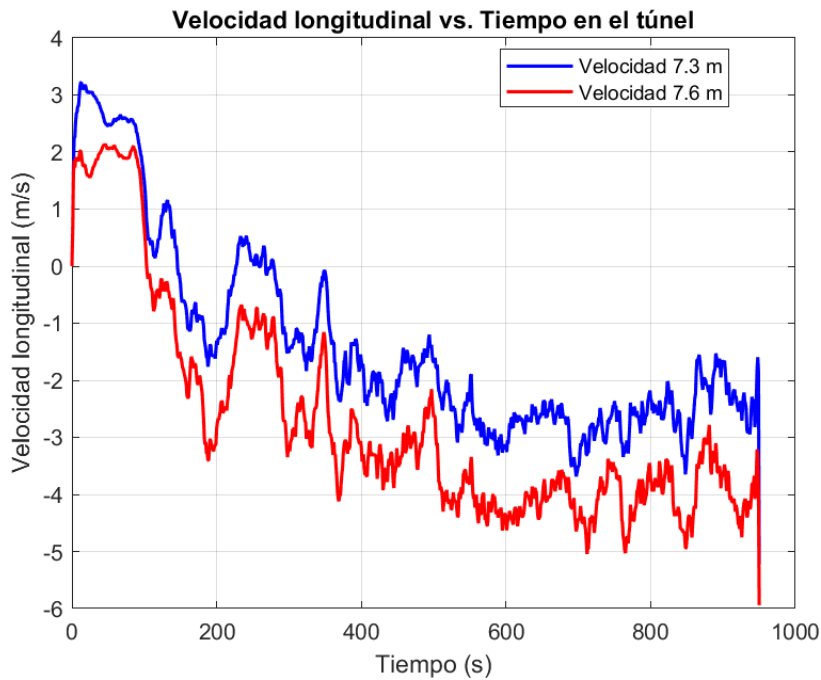


Figura 48: Velocidad-Tiempo a 620 m para dos alturas TEST615B

La Figura 47 nos muestra que en la simulación con pendiente (azul) la velocidad se mantiene estable cerca de 2 m/s hasta los 200 m, luego cae bruscamente y se invierte progresivamente hasta -7.2 m/s, de manera que tenemos una zona de retroceso de humo bastante grande que va desde los 200 hasta los 630 m. Al pasar los paneles de fuego el flujo se reestablece hasta los a 4 m/s agua abajo. La simulación horizontal (morado) muestra un perfil de velocidades similar pero más suave y escalonado llegando un flujo inverso de velocidad de tan solo 4 m/s.

En la Figura 48 está representada la evolución temporal de la ventilación longitudinal a 620 m de la entrada del túnel a dos alturas distintas: a 7.3 m (curva azul) y a 7.6 m (curva roja). En esta prueba, la inversión de flujo se da muy pronto, concretamente cerca de los 200 s, y va aumentando la velocidad del flujo inverso progresivamente variando entre los -2 m/s a 7.3 m de altura y entre los -4 m/s a los 7.6 m de altura.

A continuación, se muestran imágenes de los resultados de temperatura, ventilación longitudinal y propagación de humo procesado por la herramienta smokeview. Las figuras representan los últimos 300 m para ella simulación con pendiente a los 850 s:

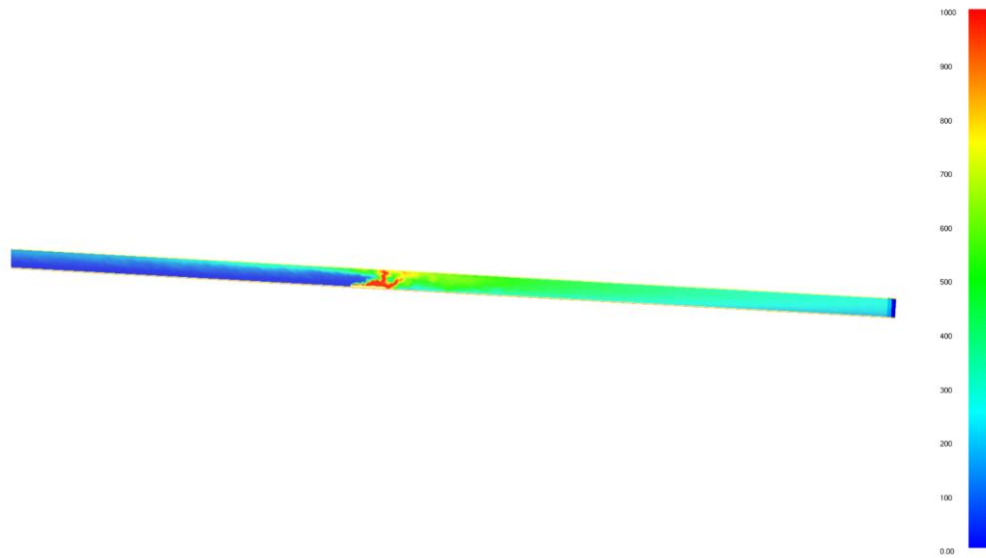


Figura 49: Slice de temperatura (°C) para TEST615B

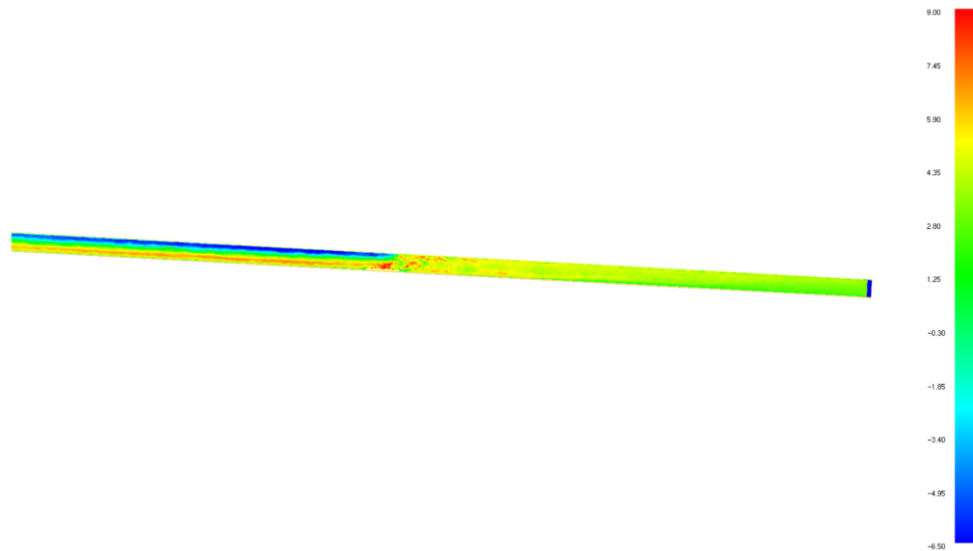


Figura 50: Slice de ventilación longitudinal (m/s) para TEST615B



Figura 51: Slice de propagación de humo para TEST615B

Capítulo 6. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

El 25 de septiembre de 2015, se reunieron los líderes del mundo para establecer una serie de objetivos y motivaciones para reducir y a la larga eliminar la pobreza, proteger nuestro planeta y motivar un desarrollo sostenible; para lograr esto, se establecieron 17 objetivos principales:

1. Fin de la pobreza
2. Hambre cero
3. Salud y bienestar
4. Educación de calidad
5. Igualdad de género
6. Agua limpia y saneamiento
7. Energía asequible y no contaminante
8. Trabajo decente y crecimiento económico
9. Industria, innovación e infraestructura
10. Reducción de las desigualdades
11. Ciudades y comunidades sostenibles
12. Producción y consumo responsables
13. Acción por el clima
14. Vida submarina
15. Vida de ecosistemas terrestres
16. Paz, justicia e instituciones sólidas
17. Alianzas para lograr los objetivos

Este TFG contribuye a completar varios de estos:

- Industria, Innovación e Infraestructura (ODS 9): Este objetivo se centra en la construcción y desarrollo de infraestructuras sostenibles. En este caso la construcción de infraestructuras de transporte seguras y eficientes.
- Salud y Bienestar (ODS 3): Este proyecto ayuda a mejorar salud y proteger a las personas, especialmente a través del estudio del comportamiento del humo que es clave para el diseño de sistemas de evacuación y ventilación, con el objetivo de minimizar la ingesta de gases tóxicos y letales a los evacuados en caso de incendio en túneles.
- Acción por el clima (ODS 13) y Vida de Ecosistemas terrestres (ODS 15): La aplicación de programas de simulación de FDS es clave para evitar la experimentación a escala real que además de costosa supone una gran liberación de gases que son perjudiciales para el medio ambiente.

Capítulo 7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este proyecto se ha estudiado la simulación numérica de incendios en túneles inclinados a través de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), usando del software Fire Dynamics Simulator (FDS). Se han elegido los ensayos realizados en el Memorial Tunnel durante la década de 1960 como referencia, específicamente los tests 606A, 610 y 615B. Como se ha podido observar los datos recogidos en los experimentos que se realizaron en dichas pruebas y las simulaciones que llevó a cabo Beyer et al. (1), han sido una parte fundamental para la investigación

Durante el desarrollo del proyecto, se ha construido un modelo numérico en FDS, tratando de adaptar lo mejor posible la sección realista del túnel. Se han usado herramientas modificación del vector gravedad que te proporciona FDS para simular la pendiente de 3.2% del túnel. También se ha realizado un análisis de secciones, probando diferentes geometrías de sección transversal para determinar su impacto sobre la precisión de los resultados y sobre los tiempos de simulación; destacando finalmente modelo realista, siendo este el que mejor se acomoda a los resultados experimentales. También es importante mencionar que el modelo simplificado a una sección rectangular manteniendo el área del túnel original (60 m²), también mostraba resultados bastante ajustados a los experimentos.

También se ha llevado a cabo, un análisis de precisión de mallado del cual se concluye que a medida que se incrementa la resolución de mallado, se intensifica la tendencia característica de FDS de sobrestimar el retroceso de la capa de humo. También se llega a la conclusión de que la resolución de malla influye más en los resultados de la región anterior al incendio y sobre los paneles de fuego, que aguas abajo.

Los resultados obtenidos en las simulaciones han determinado los puntos fuertes y limitaciones de FDS. Se ha podido observar consistentemente una sobrestimación del efecto de retroceso del humo y de las temperaturas, especialmente en las zonas cercanas al fuego y en la región anterior al incendio, reafirmando tendencia a la sobrestimación de la capa de

humo propia de FDS, estudiada tanto por McGrattan y Bilson en 2023, como por Beyer et al en 2024. La situación inversa ocurre con las simulaciones de FLUENT, que, aunque es cierto que en estas zonas críticas comete menos error en sus predicciones, tiende a subestimar el retroceso de humo, y por tanto, las temperaturas cerca del incendio. Sin embargo, FDS ha demostrado que es capaz para reproducir adecuadamente la distribución de temperaturas y la ventilación longitudinal aguas abajo. Incluso puede llegar a hacer predicciones más precisas que las realizadas en FLUENT, especialmente si se comparan resultados de la simulación para tiempos más avanzados, cuando el modelo ha podido estabilizarse. Esto se refleja bien en árboles de temperatura de las secciones pasadas el fuego de los TEST606A y TEST615B. De esta manera se puede concluir que FDS puede llegar a ser muy útil como herramienta predictiva bajo condiciones controladas, siempre que se tenga en cuenta su tendencia a la sobrestimación de la capa de retroceso de humo en las regiones anteriores a un incendio.

El comportamiento del uso de simulaciones horizontales para túneles con pendiente también ha sido analizado. Se ha observado que, para tiempos de simulación cortos, la sobrestimación de la capa de humo aguas arriba es menos pronunciada que las simulaciones con pendiente que para túneles horizontales, mientras que para tiempos más largos ocurre lo contrario. Además, se ha observado que el factor de la inclinación adquiere menos importancia medida que nos alejamos de la fuente del incendio. En los resultados se aprecia como la diferencia entre las curvas de las simulaciones horizontales y las de pendiente van disminuyendo al estudiar las secciones posteriores. También se concluye que en simulaciones con incendios con baja liberación de calor (10 MW en TEST606A) las simulaciones con pendiente sobrestiman más el retroceso de humo que la simulación horizontal; mientras que para simulaciones de fuego con una alta liberación de calor (50 MW y 100 MW para los TEST 610 y 615B respectivamente) se da el caso inverso.

Las aportaciones de este proyecto incluyen el desarrollo de un modelo que puede ser referencia para investigaciones posteriores o incluso podría tener alguna aplicación práctica en la ingeniería de seguridad contra incendios. También se ofrece una propuesta de cómo

optimizar las simulaciones para equilibrar la precisión con el coste computacional, a través de análisis de malla y análisis de simplificación de secciones de un túnel.

En cuanto a proyectos futuros, se incita a estudiar otros casos con diferentes configuraciones geométricas, otras tasas de liberación de calor y escenarios de ventilación más complejos. También podría ser interesante probar simulaciones híbridas utilizando ANSYS FLUENT y FDS de manera combinada, para aprovechar las ventajas específicas de cada herramienta y así obtener resultados aún más precisos. Finalmente, seguir investigando el funcionamiento del software FDS, y si fuera posible tratar de mejorarlo de manera que sea más fácil tratar con geometrías irregulares. Estudiar si su tendencia a la sobrestimación se debe a su limitación de solo poder modelar con geometrías rectangulares puede ser la clave para convertir FDS en una herramienta potente y precisa, incluso en los escenarios más complejos y críticos.

Capítulo 8. BIBLIOGRAFÍA

1. Beyer M, Stacey C, Brenn G. A Mixed Convection Model for Estimating the Critical Velocity to Prevent Smoke Backlayering in Tunnels. Fire Technol [Internet]. 9 de septiembre de 2024 [citado 23 de septiembre de 2024]; Disponible en: <https://link.springer.com/10.1007/s10694-024-01607-8>
2. McGrattan K, Bilson M. Modeling longitudinal ventilation in tunnels using fire dynamics simulator. Fire Saf J. diciembre de 2023;141:103982.
3. Kennedy W. The Memorial Tunnel Ventilation Program: Test Plan and Test Operations.
4. Kile G. The Memorial Tunnel Ventilation Program: The Longitudinal and Natural Tests.
5. Sandzimier J. The Memorial Tunnel Ventilation Program: The Memorial Tunnel Test Facility.
6. Matsson JE. An introduction to ANSYS Fluent 2021. Mission, KS: SDC Publications; 2021.
7. McGrattan KB, Forney GP. Fire dynamics simulator (version 4) : user's guide [Internet]. 0 ed. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology; 2004 [citado 30 de noviembre de 2024] p. NIST SP 1019. Report No.: NIST SP 1019. Disponible en: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication1019.pdf>
8. B. Ingason, Y. Z. Li, A. Lönnemark. Fire Dynamics in Tunnel Fires. CRC Press; 2014.
9. Hull TR, Stec AA. 1 - Introduction to fire toxicity. En: Stec A, Hull R, editores. Fire Toxicity [Internet]. Woodhead Publishing; 2010 [citado 12 de septiembre de 2024]. p. 3-25. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781845695026500014>
10. Thomas DR. Who Wants to be a Teacher? ¹. Teach Coll Rec Voice Scholarsh Educ. diciembre de 1958;60(3):1-7.
11. Li YZ, Lei B, Ingason H. Study of critical velocity and backlayering length in longitudinally ventilated tunnel fires. Fire Saf J. noviembre de 2010;45(6-8):361-70.
12. Ingason H, Li YZ. Model scale tunnel fire tests with longitudinal ventilation. Fire Saf J. noviembre de 2010;45(6-8):371-84.
13. Kung H, Spaulding R, Stavrianidis P. Fire Induced Flow Under A Sloped Ceiling. Fire Saf Sci. 1991;3:271-80.

14. Oka Y, Kakae N, Imazeki O, Inagaki K. Temperature Property of Ceiling Jet in an Inclined Tunnel. *Procedia Eng.* 2013;62:234-41.
15. Fan CG, Li XY, Mu Y, Guo FY, Ji J. Smoke movement characteristics under stack effect in a mine laneway fire. *Appl Therm Eng.* enero de 2017;110:70-9.
16. Kong J, Xu Z, You W, Wang B, Liang Y, Chen T. Study of smoke back-layering length with different longitudinal fire locations in inclined tunnels under natural ventilation. *Tunn Undergr Space Technol.* enero de 2021;107:103663.
17. Zhang T, Wang G, Li J, Huang Y, Zhu K, Wu K. Experimental study of back-layering length and critical velocity in longitudinally ventilated tunnel fire with various rectangular cross-sections. *Fire Saf J.* diciembre de 2021;126:103483.
18. Zhang X, Lin Y, Shi C, Zhang J. Numerical simulation on the maximum temperature and smoke back-layering length in a tilted tunnel under natural ventilation. *Tunn Undergr Space Technol.* enero de 2021;107:103661.
19. Du T, Li P, Wei H, Yang D. On the backlayering length of the buoyant smoke in inclined tunnel fires under natural ventilation. *Case Stud Therm Eng.* noviembre de 2022;39:102455.
20. Wang P, She C, Chen J, Xu Z, Chen Y. Study of slope effect on smoke back-layering length and ceiling temperature in tunnel fires under natural ventilation. *Int J Therm Sci.* marzo de 2023;185:108046.
21. U.S. Department of Transportation. Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program. 1995.
22. Hu LH, Chen LF, Wu L, Li YF, Zhang JY, Meng N. An experimental investigation and correlation on buoyant gas temperature below ceiling in a slopping tunnel fire. *Appl Therm Eng.* marzo de 2013;51(1-2):246-54.
23. Weng M cheng, Lu X ling, Liu F, Du C xian. Study on the critical velocity in a sloping tunnel fire under longitudinal ventilation. *Appl Therm Eng.* febrero de 2016;94:422-34.
24. Yang D, Ding Y, Du T, Mao S, Zhang Z. Buoyant back-layering and the critical condition for preventing back-layering fluid in inclined tunnels under natural ventilation: Brine water experiments. *Exp Therm Fluid Sci.* enero de 2018;90:319-29.
25. Liu C, Zhong M, Tian X, Zhang P, Xiao Y, Mei Q. Experimental and numerical study on fire-induced smoke temperature in connected area of metro tunnel under natural ventilation. *Int J Therm Sci.* abril de 2019;138:84-97.

26. Zhang Y, Yao Y, Ren F, Zhu H, Zhang S, Jiang L. Effects of ambient pressure on smoke propagation in inclined tunnel fires under natural ventilation. *Environ Sci Pollut Res.* 19 de abril de 2023;30(24):65074-85.
27. Sun C, Weng M, Liu F, Ling K. Study on the smoke flow characteristics in inclined tunnel with an upstream shaft under natural ventilation. *Tunn Undergr Space Technol.* julio de 2024;149:105806.
28. He L, Xu Z, Markert F, Zhao J, Xie E, Liu Q, et al. Ceiling jet velocity during the whole process of fire development in a tunnel. *J Wind Eng Ind Aerodyn.* mayo de 2021;212:104588.
29. Hu LH, Huo R, Li YZ, Wang HB, Chow WK. Full-scale burning tests on studying smoke temperature and velocity along a corridor. *Tunn Undergr Space Technol.* mayo de 2005;20(3):223-9.
30. Wu Y, Bakar MZA. Control of smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilation systems – a study of the critical velocity. *Fire Saf J.* noviembre de 2000;35(4):363-90.