



ANÁLISIS DEL EFECTO PISTÓN EN LA VENTILACIÓN DE TÚNELES FERROVIARIOS

Alumno: David Yáñez Coto
Tutores: Raúl Barrio Perotti; Mónica Galdo Vega
UO217731@uniovi.es

Departamento de Energía. Universidad de Oviedo.

RESUMEN

Este artículo presenta un análisis metodológico de tipo numérico con el objetivo de estimar la influencia del efecto pistón en el movimiento del aire por el interior de un túnel ferroviario al paso de un convoy. Se partirá de un caso base en el que se estudiarán una serie de parámetros como presión, velocidad y flujo másico. Así mismo se estudiará la dependencia de estos parámetros con la longitud del túnel por la que pasa el convoy, que representa la distancia de separación entre estaciones, y con el porcentaje de túnel ocupado por el tren, definido a través de un coeficiente de bloqueo. El estudio se realiza a una velocidad de 60 km/h, típica de las redes ferroviarias de metro.

Este estudio se ha llevado a cabo con un modelo bidimensional simulado en FLUENT de forma no estacionaria, por medio de un mallado dinámico creado en el interior de una malla estructurada.

ABSTRACT

This article presents a methodological numerical analysis in order to estimate the influence of piston effect on air movements inside a train tunnel while a conveyance is passing by. A canonical case will be investigated to take some representative variables like pressures, mass flows or velocities. The dependence of these variables with the length of the tunnel and also with the ratio between the section of the train and that of the tunnel will be also studied. The work will be conducted at a constant velocity of 60 km/h which is typical on subway trains.

In order to accomplish this study, a two-dimensional model will be simulated unsteadily on FLUENT through a dynamic mesh inside an structured mesh.

INTRODUCCIÓN

Los túneles son una obra artificial creada por la mano del hombre cuyo fin es conectar dos puntos separados por un obstáculo difícilmente franqueable por vías tradicionales al aire libre, usualmente una colina, una montaña o una masa de agua. Estas infraestructuras permiten el paso rápido y eficaz de peatones, ciclistas, vehículos a motor, ferrocarriles, conducciones eléctricas, transporte de agua etc. Un túnel tiene un fuerte impacto en la región en la que es construido, mejorando considerablemente su desarrollo global.

Pero no todo son ventajas para estas obras de la ingeniería, ya que no están exentas de riesgos debido a su condición de espacio cerrado y de difícil acceso, por el que llegan a circular grandes cantidades de tráfico rodado en caso de túneles de carretera o convoys de gran tamaño o a gran velocidad en caso de túneles ferroviarios.

La ventilación de un túnel es importante para asegurar una adecuada calidad del aire, que puede verse mermada por los gases de escape de los motores de combustión; además es esencial para evacuar el humo del interior en caso de incendio y para reducir las temperaturas a límites aceptables que no comprometan la estructura.

La importancia de la ventilación se hace evidente al examinar casos de desastres en túneles en los últimos tiempos, como el incendio del túnel de Gotthard en 2001, en el que la totalidad de las víctimas fueron causadas por el humo y la inhalación de gases; el desastre ferroviario de



Balvano en 1944 donde más de 400 pasajeros murieron cuando el tren se detuvo en el interior del túnel, la mayoría debido a la inhalación de monóxido de carbono; o el incendio del túnel

Caldecott en 1982 donde hubo más muertes por inhalación de humo que por el choque que inició el desastre.

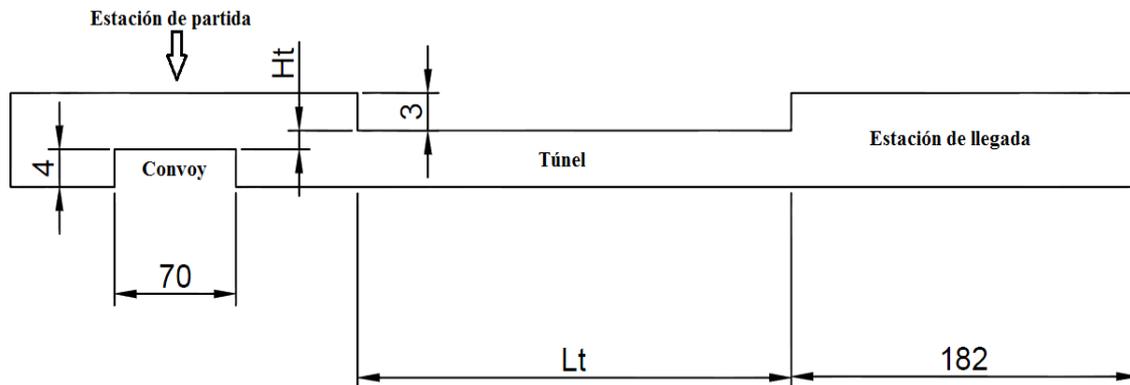


Figura 1.- Esquema de la geometría estudiada. Las cotas sin número presentan medidas variables (Lt: Longitud del túnel; Ht: Altura entre el techo del tren y el techo de túnel).

ANTECEDENTES

En la actualidad existe un compendio de trabajos sobre el efecto pistón a lo largo del tiempo, algunos más importantes que otros. Por citar a algunos brevemente, existe un estudio que analiza la influencia en el efecto pistón de la velocidad del tren y del coeficiente de bloqueo en un túnel con un conducto de alivio (Lu Ping et al., 2014). Otro estudio realizado en Corea comparó los resultados experimentales de laboratorio realizados en un modelo a escala con las predicciones obtenidas mediante un modelo numérico realizado en CFX4. En dicho estudio se detectó un desvío de en torno al 15% entre los valores de la velocidad y presión obtenidos en ambos modelos (Kim & Kim, 2007). En el año 2008 se llevó a cabo un estudio (Chi-Ji et al., 2008) en el que, mediante la comparación entre un metro real y un modelo numérico simulado en SES, se llegó a la conclusión de que los conductos de alivio de menos de 60 m de longitud pueden ser eficaces para aprovechar el viento del efecto pistón en términos de refrigeración. Otros artículos que pueden citarse, algunos de los cuales amplían estos trabajos previos, son los de Huang y Gao (2010) en el que se amplía el trabajo de Kim & Kim (2007) o el realizado por Bao Hai (2010), destinado principalmente a la validación de una serie de modelos numéricos.

Por último, puede destacarse un estudio realizado en el Área de Mecánica de Fluidos de la Universidad de Oviedo (López González et al., 2014) en el que se emplea un modelo tridimensional, simulado en FLUENT, con el objetivo de proponer una ventilación mecánica que actúe en la dirección y en el momento del efecto pistón al paso del tren para así ahorrar energía en el sistema de ventilación.

MÉTODO DE TRABAJO

Para llevar a cabo el conjunto final de simulaciones se siguieron una serie de pasos previos que se pueden resumir en primera instancia de la siguiente manera:

1. Especificación de la geometría del problema.

El modelo 2D generado está basado en las dimensiones típicas de las infraestructuras ferroviarias. En primer lugar se ha creado, con el programa GAMBIT, un archivo de texto que se ha utilizado para generar una batería de casos de morfología similar en los que se variaban algunos parámetros que se indicarán más adelante. Se ha escogido un modelo bidimensional debido a que la simulación de un modelo tridimensional excedía el horizonte temporal del trabajo, tal como recogen algunos estudios tridimensionales (López González et al., 2014).



El modelo numérico consta de tres zonas: *i)* la estación de salida del tren, *ii)* la estación de llegada y *iii)* el túnel que une ambas estaciones. El comportamiento del aire en el interior de este túnel durante el paso del tren será el aspecto fundamental de estudio en este trabajo.

En la *figura 1* se especifican las dimensiones generales de la geometría. El escalón de altura entre la estación y el túnel será 3 metros; fluidodinámicamente el aire se comportará en esa zona como si el túnel tuviese a su entrada una cubierta de sección constante (*Uystepuyst, 2013*). El convoy se simulará mediante un rectángulo de altura 4 m y longitud 70 m que estará sometido a un movimiento de traslación. Las estaciones de partida y de llegada tendrán una longitud de 182 m. Las cotas L_t y H_t , que representan respectivamente la distancia existente entre ambas estaciones y la distancia existente entre el techo del túnel y el techo del convoy, se variarán durante las simulaciones.

2. Generación del mallado.

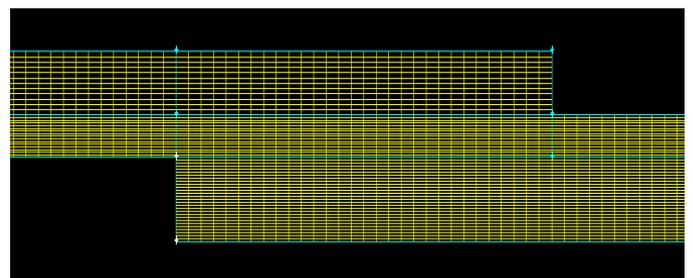
Para llevar a cabo las simulaciones no estacionarias del modelo numérico se ha escogido un mallado estructurado dado la simpleza de las formas del modelo y su rapidez de cálculo frente a otros tipos de mallados no estructurados como pueden ser los formados por triángulos.

Respecto al tamaño del mallado, se ha escogido una dimensión longitudinal típica de celda de 0.5 metros. Como se puede apreciar en la *figura 1*, transversalmente existen tres dimensiones diferenciadas: *i)* la altura del tren (A_t), que tiene un valor constante de 4 metros; *ii)* la altura superior de la estación (A_e) que tiene un valor constante de 3 metros; y *iii)* la diferencia de altura entre el techo del túnel y el techo del tren (H_t), que varía entre 0.8 y 3 metros. En la *tabla 1* se pueden consultar los intervalos empleados para cada dimensión:

Tramo	Metros	Interv.	Relación metro/interv.	
A_t	4	28	0.143	
A_e	3	12	0.250	
H_t	1.	0.8	6	0.133
	2.	1.2	9	0.133
	3.	1.6	12	0.133
	4.	2	16	0.125
	5.	2.5	19	0.131
	6.	3	22	0.136

Tabla 1.- Intervalos de mallado en dirección transversal.

Como se puede observar en la *tabla 1*, la zona superior de la estación se ha mallado de forma relativamente grosera puesto que no es especialmente relevante para el cálculo. Con esto se consiguen minimizar los tiempos de cálculo. La longitud de actuación del tren presenta un mallado fino que permite, entre otras cosas, representar con precisión los contornos de presión en la zona delantera del convoy y la succión en su parte posterior. El mallado más fino se ha impuesto en el intersticio existente entre el techo del tren y el techo del túnel, debido a la elevada actividad fluidodinámica que esta zona presentará (*figura 2*). La disminución de sección implicará un aumento de la velocidad que repercutirá en un aumento del número de Reynolds y en la importancia de implementar un adecuado modelo de turbulencia.



Zona detalle del mallado



Figura 2.-Detalle del mallado de un caso con $H_t=2$ metros, con la cabecera del tren (parte izquierda) y la conexión entre el final de la estación de partida y el túnel (parte derecha).



3. Análisis de sensibilidad del mallado.

Antes de proponer como definitiva la malla generada se realizó un análisis de sensibilidad para comprobar el efecto de la densidad del mallado sobre la predicción de las variables de interés. Para ello se generaron sucesivos mallados cada vez más afinados sobre los que se realizaron las respectivas simulaciones. Durante estas simulaciones se fueron monitorizando ciertas variables tomadas en puntos clave del túnel; con posterioridad se comparó el valor de estos datos hasta encontrar dos densidades de la malla que prácticamente convergiesen en resultados, optando por la versión menos fina de estas dos. De esta forma se pudo encontrar un equilibrio entre precisión de resultados y tiempo de cálculo. Los resultados de este análisis se recogen en la *figura 3*.

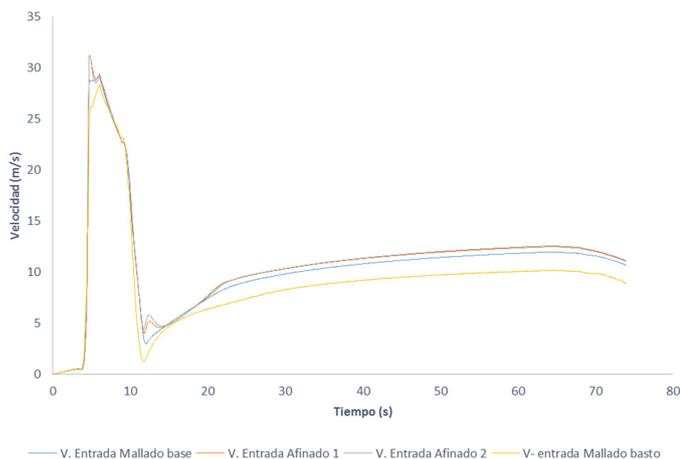


Figura 3.- Análisis de sensibilidad para la velocidad medida en el punto medio del túnel. La curva superior en color rojo en realidad son dos gráficas casi superpuestas.

4. Software empleado.

Como se ha indicado antes brevemente la geometría, el mallado y las condiciones de contorno iniciales se han creado o impuesto con el código comercial GAMBIT v.2.4.6. Empleando el archivo generado por dicho programa se han preparado y simulado los casos con el código comercial FLUENT v.6.3.26. La UDF (User-Defined Function, ver más adelante) que impone el perfil de velocidad del convoy durante la simulación ha sido realizada mediante el entorno de desarrollo MICROSOFT VISUAL STUDIO 2010.

5. Modelo de cálculo.

Las simulaciones se realizaron de manera no estacionaria con el programa FLUENT. Mediante este código se resolvieron las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas en el tiempo junto con la ecuación de continuidad. Puesto que los cálculos se realizaron considerando la hipótesis de flujo incompresible no fue necesario incluir en los mismos la ecuación de la energía. El modelo matemático se completó con un modelo de turbulencia adecuado a las características del cálculo, en función del número de Reynolds, del tipo de flujo, del gradiente de presión, etc. En este caso se decidió escoger el modelo k- ϵ debido a su amplia aceptación y utilización por su robustez, economía y precisión para resolver un gran número de flujos turbulentos (*Fernández Oro., 2012*).

Para discretizar las ecuaciones matemáticas se emplearon diferencias de segundo orden. El acoplamiento entre los campos de presión y de velocidad se estableció mediante el modelo SIMPLEC. Para simular el comportamiento del flujo en el interior de la capa límite se utilizaron funciones estándar de pared basadas en la conocida ley logarítmica.

6. Propiedades del fluido.

El fluido simulado es aire con propiedades estándar.

7. Condiciones de contorno y de continuo.

Estas condiciones pueden dividirse en las correspondientes a los límites del dominio de cálculo (contornos) y las que especifican el tipo de sustancia (continuo) que se encuentra en el interior del dominio de cálculo (en este caso una superficie plana bidimensional).

Condiciones de borde y líneas interiores.

Como se muestra en la *figura 4*, se han marcado en distintos colores las líneas y bordes a los que se les ha asignado una condición de contorno.

La condición de contorno de *pressure outlet* (PRESSURE_OUTLET; P-O) considera a estos contornos como zonas expuestas a las condiciones atmosféricas. La condición *wall* (WALL; W), como su propio nombre indica, hace comportarse al contorno como si fuese un muro sólido y simula los límites físicos de la estación y del túnel. El *wall* del tren, el suelo y el techo del túnel están definidos



separadamente puesto que se consideró más adecuado de cara a las simulaciones.

Merece especial atención la doble línea verde-roja señalada en la figura con la palabra *Interfase*, que junto con las líneas adyacentes rosas constituyen las definiciones necesarias para

generar el mallado dinámico (ver más adelante). La doble línea de la interfase recibe la condición *interface* (INTERFACE), mientras que los bordes rosas reciben la condición de interiores (INTERIOR; I).



Figura 4.- Condiciones de contorno en los bordes y en las líneas interiores.

Condiciones continuas de la superficie (condiciones de entorno).

Por motivos de mallado dinámico y de registro de datos durante simulación se ha dividido el

modelo numérico completo en cinco superficies (figura 5). Todas ellas se han definido en GAMBIT como FLUID, una condición genérica que las identifica como fluidos; el tipo de fluido y sus características se definirán más adelante.



Figura 5.- Zonas de fluido definidas en el modelo numérico.

8. Implementación del mallado dinámico.

El mallado dinámico es una técnica CFD que se emplea en este trabajo para simular el movimiento del tren. Dicho mallado dinámico se genera mediante la destrucción de celdas en el frente de avance del tren junto con la generación de celdas en los espacios vacíos que va dejando a su paso. Dos líneas interiores en los extremos del recorrido del convoy definen la localización desde donde las celdas se generan y se destruyen; las dos zonas de fluido que quedan contenidas entre esas líneas y que se encuentran divididas por la superficie del tren se definen como zonas móviles supeditadas a una UDF (User-Defined Function) que carga un perfil de velocidad para el tren y que es automáticamente actualizado durante la simulación no estacionaria. La UDF se modifica con cada longitud de túnel para adaptarla a lo que tarda el tren en recorrer cada caso.

Este procedimiento no funciona correctamente sin la doble línea denominada *entrefase*, la cual permite el deslizamiento relativo entre la zona de fluido incluida en el mallado dinámico y la zona de fluido adyacente.

El perfil de velocidad programado mediante la UDF se ha estimado como el típico de un convoy de metro. Todas las UDF programadas comprenden un periodo de 6 segundos de aceleración del tren al inicio de la simulación, 6 segundos de deceleración al final y un lapso de tiempo a una velocidad constante de 60 km/h que depende de la longitud de túnel que tenga el caso que se esté simulando (ver figura 6).

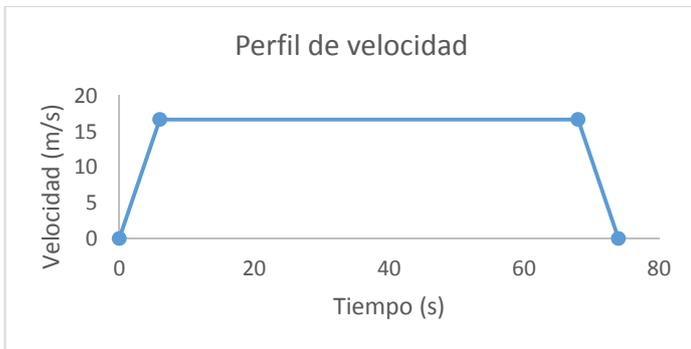


Figura 6.- Perfil de la UDF.

9. Condiciones iniciales.

Un problema no estacionario necesita de unos valores iniciales de las variables para todos los puntos del dominio que inicien el cálculo iterativo de los pasos temporales. En este caso se inicializa el problema partiendo de una velocidad nula en todos los puntos del dominio.

10. Control de los parámetros que afectan a la resolución numérica del problema.

Con el objetivo de que los ficheros de datos generen unos resultados suficientemente precisos se ha fijado un criterio de convergencia del residuo de cada variable en 0.00001. El residuo es la diferencia entre el valor de la solución nueva y la anterior; cuando esta diferencia tiene un valor menor al criterio de convergencia se considera la solución como correcta.

Otros parámetros cuyo adecuado valor es imprescindible de cara al cálculo son el paso

temporal, el número de pasos temporales y el número máximo de iteraciones por paso temporal.

Caso	Lt	Tcelda	Paso temporal	Tsim	Pasos
1-6	0.5 km	0.029 s	0.02 s	44 s	2200
7-12	0.75 km	0.029 s	0.02 s	59 s	2950
13-18	1.0 km	0.029 s	0.02 s	74 s	3700
19-24	1.5 km	0.029 s	0.02 s	104 s	5200
25-30	2.0 km	0.029 s	0.02 s	134 s	6700

Tabla 2.- Datos de iteración para configuración de simulación.

Para evitar posibles problemas en el cálculo se debe fijar un paso temporal de manera que el tren, a su velocidad máxima, recorra como máximo una celda del mallado. Dado que el tren se desplaza longitudinalmente sólo afectará en este último aspecto la dimensión longitudinal de la celda, que es de 0.5 metros en todos los casos. El número de pasos temporales va en función del tiempo total de simulación, mientras que el número máximo de iteraciones se fija con el fin de asegurar la convergencia en cada paso temporal. Se ha escogido el valor por defecto de 20 iteraciones por paso temporal en todos los casos, puesto que se ha comprobado que resulta un número de iteraciones adecuadas para conseguir la convergencia en cada paso temporal. En la tabla 2 se muestra la configuración de estos valores para los distintos casos simulados.

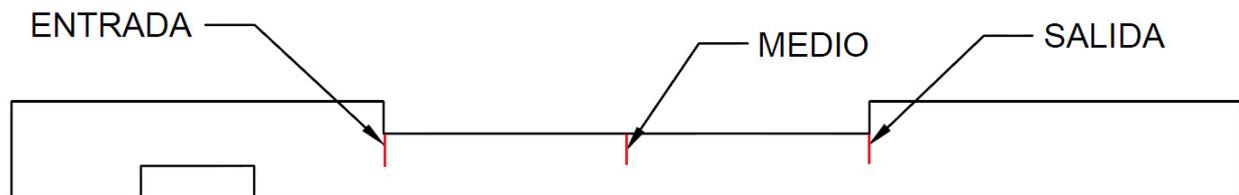


Figura 7.- Zonas de medida de las variables.

11. Monitorización de la convergencia y evolución de las variables.

Con el objetivo de obtener una batería de datos lo más completa posible se fijaron tres zonas de medida: en la entrada del túnel, en su punto medio y en la salida del túnel. Estas zonas de medida son tres líneas rectas que abarcan el hueco existente entre el techo del tren y el techo del túnel y

devuelven, en cada paso temporal, el valor medio ponderado del perfil de las variables monitorizadas en su dominio correspondiente. Estas zonas de medida se ilustran en la figura 7 en color rojo.

En cada zona se monitoriza la presión estática así como la velocidad y el flujo másico en cada paso temporal. Con ello se consigue generar un conjunto de ficheros de datos que permiten generar



posteriormente gráficas de la evolución de estas variables en dichas zonas a lo largo del tiempo.

12. Batería de casos simulados.

Las variaciones en las dimensiones de la geometría implican una serie de modelos distintos. En este caso se varían las longitudes Ht y Lt , cuyos valores quedan reflejados en la *tabla 3*. El parámetro Lt toma cinco valores y Ht seis, por lo tanto la batería de casos generada es de una treintena.

Lt (km)	Ht (m)					
	0.8	1.2	1.6	2.0	2.5	3.0
0.5	1	2	3	4	5	6
0.75	7	8	9	10	11	12
1.0	13	14	15	16	17	18
1.5	19	20	21	22	23	24
2.0	25	26	27	28	29	30

Tabla 3.- Batería de casos simulados y variaciones geométricas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los datos obtenidos mediante las simulaciones numéricas se han analizado desde dos puntos de vista. El primero de ellos, que se analizará a continuación, es el que se encuentra relacionado con el comportamiento fluidodinámico del aire durante el desplazamiento del convoy. Este comportamiento sigue el mismo patrón general en todos los casos simulados aunque, obviamente, la magnitud de las variables varía de un caso a otro. Por tanto, mediante el análisis de un único caso patrón se obtiene una idea de todos los casos descritos. Por otra parte, a posteriori, se analizará la variación en la magnitud de ciertos parámetros entre los distintos casos y, en particular, se estudiará cómo afecta la longitud del túnel y el coeficiente de bloqueo a dichos parámetros.

Resultados generales de presión y velocidad

En líneas generales existen tres puntos críticos y singulares que permiten condensar el comportamiento del aire durante la simulación, que son: *i*) entrada del tren al túnel, *ii*) paso del tren por el punto medio y *iii*) salida del tren del túnel.

1. Entrada del tren al túnel.

Cuando el tren comienza a atravesar el túnel (*figura 8*) se genera un aumento de presión en todo el volumen de éste debido a que el tren comprime el aire como si fuese un pistón en el interior de una camisa. Además, el volumen entrante del tren desaloja un volumen de aire que en la entrada se tiende a evacuar en su totalidad entre el intersticio existente entre el techo del tren y el techo del túnel. El volumen de aire desalojado tiene que atravesar una sección relativamente pequeña; esta es la razón por la que en dicho intersticio en la *figura 8* las velocidades son tan elevadas y las presiones tan bajas. La entrada del tren genera de esta manera la mayor velocidad de aire de toda la simulación debido a su carácter singular, espontáneo y violento.

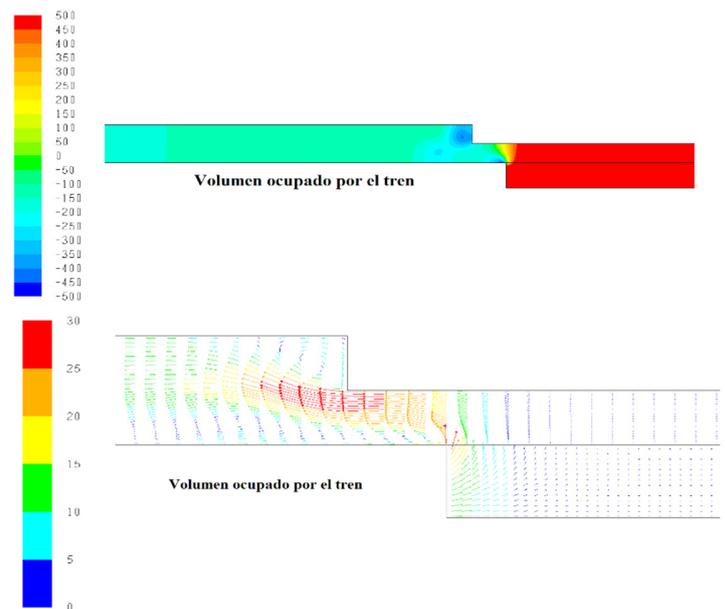


Figura 8.- Mapas de presión (arriba) y velocidad (abajo) de entrada.

2. Tren llegando al punto medio.

Cuando el tren alcanza y mantiene una velocidad constante (*figura 9*), el efecto pistón genera y mantiene unos valores relativamente estacionarios de las variables. En el frente del tren el aire es empujado en parte hacia delante, hacia la salida del túnel, mientras que el resto es recirculado por el intersticio. Resulta interesante comentar la velocidad nula del aire justo en la parte delantera superior del tren debido al choque del fluido con el techo del túnel. Una vez en el



intersticio el perfil de velocidad del aire alcanza su valor máximo en los dos tercios superiores, mientras que el tercio inferior se ve fuertemente afectado por el rozamiento del tren que se desplaza en dirección contraria. No obstante, en general este perfil pierde velocidad a medida que se va acercando a la cola del tren.

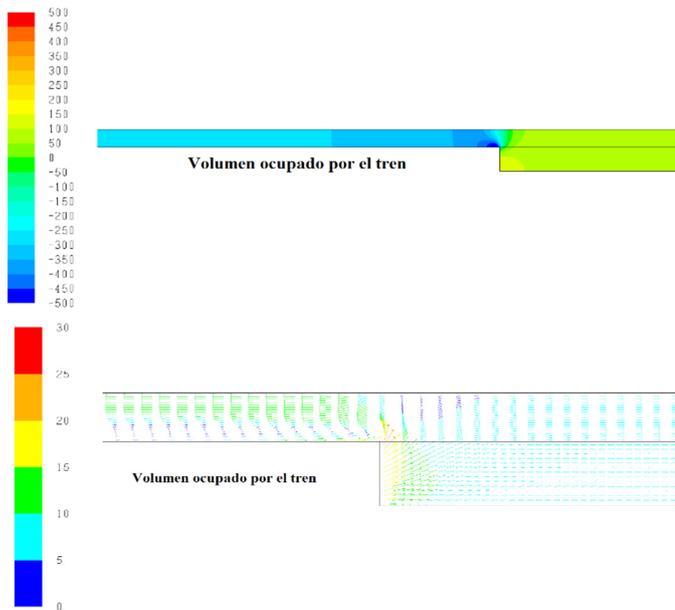


Figura 9.- Mapas de presión (arriba) y velocidad (abajo) de morro, punto medio.

Respecto a las presiones, puede verse cómo la presión en el túnel frente al tren se mantiene elevada pero va disminuyendo progresivamente, formándose una bolsa de presión en el morro del tren. Así mismo, el intersticio presenta bajas presiones debido a la alta velocidad del fluido.

3. Tren pasando el punto medio.

Durante esta fase estacionaria del efecto pistón que se ha comentado anteriormente, la cola arrastra aire a altas velocidades debido a la succión generada por el volumen del tren, el cual crea un vacío tras de sí (figura 10). Todo este aire circula a un porcentaje elevado de la velocidad del tren y ejerce fricción en su parte superior con el aire proveniente del intersticio, que circula en dirección contraria, al cual detiene e invierte progresivamente su sentido para ser arrastrado por el tren. Este aire arrastrado tras el tren es el aprovechable para aplicaciones de ventilación y recibe el nombre anglosajón de *piston wind* o viento pistón.

Toda la cola del tren genera una zona de bajas presiones debido a una combinación de altas velocidades y de la succión generada por el tren.

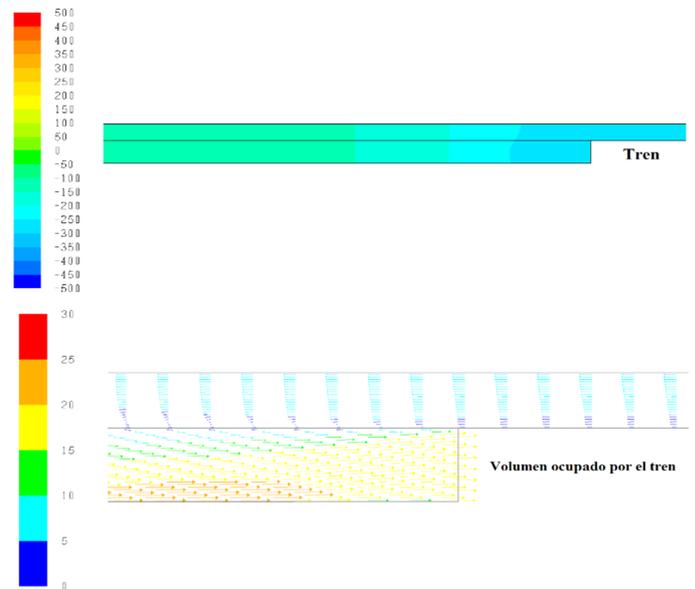


Figura 10.- Mapas de presión (arriba) y velocidad (abajo) de cola, punto medio.

4. Tren saliendo del túnel.

Al comenzar la salida del tren del túnel (figura 11) la sección sufre un ensanchamiento muy brusco, lo cual implica una fuerte reducción de la velocidad y de la cantidad de aire que recircula hacia la cola del tren, que ahora puede ascender hasta el techo de la estación. La velocidad del aire que empuja el morro del tren y que arrastra la cola del mismo alcanza su valor máximo.

Respecto a las presiones, se sigue manteniendo una bolsa de presión frente al tren y un vacío en el intersticio entre el tren y el túnel, que se ira recuperando progresivamente.

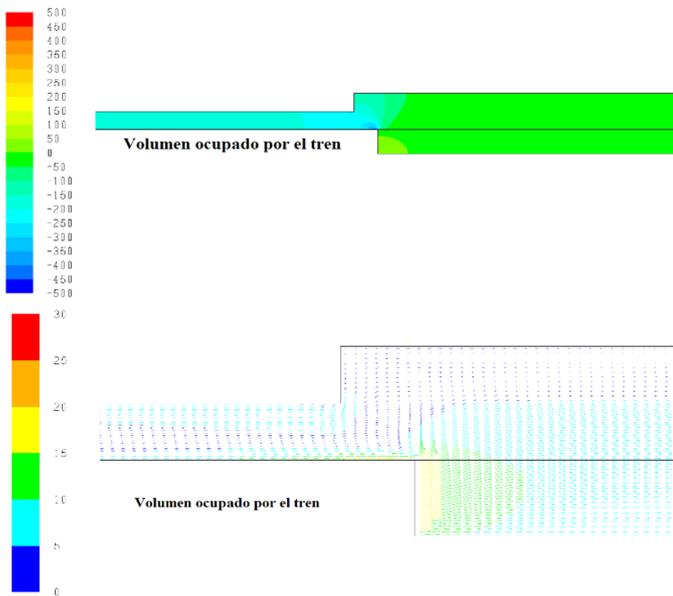


Figura 11.- Mapas de presión (arriba) y velocidad (abajo) de salida del tren.

5. Tren detenido.

La salida completa del tren (*figura 12*) coincide con una brusca recuperación de presión local en particular y en el túnel en general, aunque de manera cada vez más amortiguada a mayor distancia de la salida. Este incremento de presión se ve amplificado por las inercias del aire que siguen al tren y que aún conserva cierta energía cinética a medida que el tren decelera, convirtiéndose este exceso de energía en un aumento progresivo de la presión hasta que el aire comienza a detenerse y la salida, a presión atmosférica, restaura los valores estacionarios.

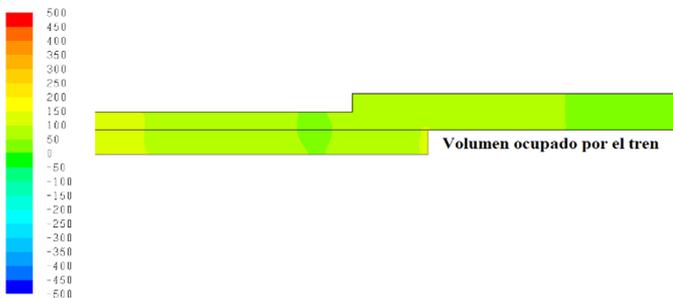


Figura 12.- Tren detenido.

Análisis paramétrico

En este apartado se ha representado el flujo másico promedio, las presiones y las velocidades en función de la longitud del túnel y del coeficiente de bloqueo, definido como el porcentaje de la sección del túnel ocupada por el convoy. El objetivo de este análisis es comprobar si existen tendencias que puedan resultar de utilidad para una herramienta predictiva de aplicación práctica en el futuro.

En la *figura 13* se representa el flujo másico promedio que atraviesa la sección perteneciente al intersticio entre el techo del tren y el techo del túnel en el punto medio de este último. El valor del flujo másico promedio es el más importante de todos los generados porque da una idea de la cantidad de aire que desplazará el efecto pistón y, por lo tanto, de su capacidad de ventilación en el dimensionamiento de un sistema de ventilación forzada.

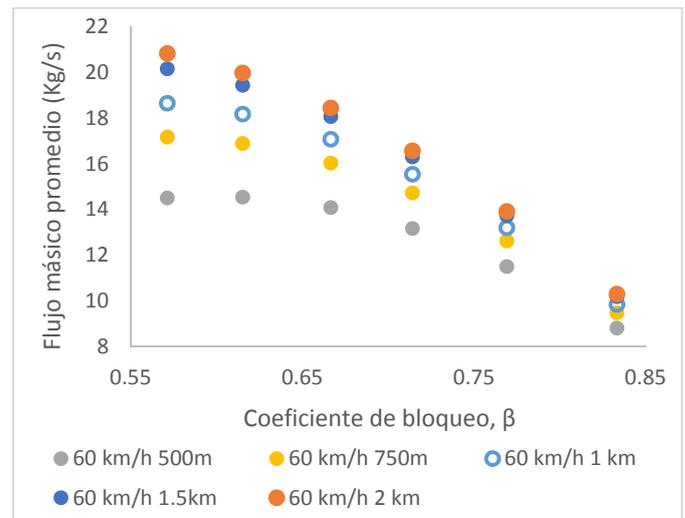


Figura 13.- Gráfica de flujo másico promedio.

En la *figura 13* puede apreciarse con total claridad cómo el flujo másico promedio presenta una distribución aproximadamente cuadrática respecto a los coeficientes de bloqueo para cada longitud dada. Así mismo, también resulta evidente que, a medida que aumenta la longitud del túnel, esta distribución cuadrática tiende a tornarse lineal, por lo que se espera que para túneles de mayor longitud sea ésta la tendencia esperada. También se comprueba cómo a valores bajos del coeficiente de bloqueo la longitud del túnel es una variable que afecta significativamente al flujo másico promedio, especialmente para longitudes bajas.



En la *figura 14* se representan los valores del flujo másico pico. Este no es un parámetro con excesiva importancia, y representa la máxima cantidad de aire que el viento pistón desplaza en un momento puntual. Como se puede comprobar en la *figura 14*, su valor depende prácticamente del coeficiente de bloqueo de manera cuasi-lineal: a mayor coeficiente de bloqueo menor flujo másico pico, siendo el efecto de la longitud del túnel prácticamente inapreciable.

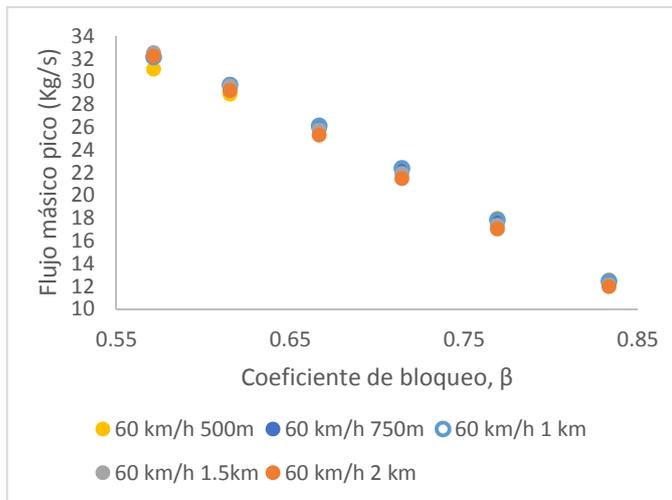


Figura 14.- Gráfica del flujo másico pico.

La *figura 15* representa el valor de la velocidad promediada, que es proporcional al flujo másico promedio, de forma que con la propia sección del intersticio y la densidad del aire, en este caso constante, se podría obtener el otro parámetro o viceversa. No obstante resulta representativo e interesante representar gráficamente sus valores en función del coeficiente de bloqueo como en dicha figura.

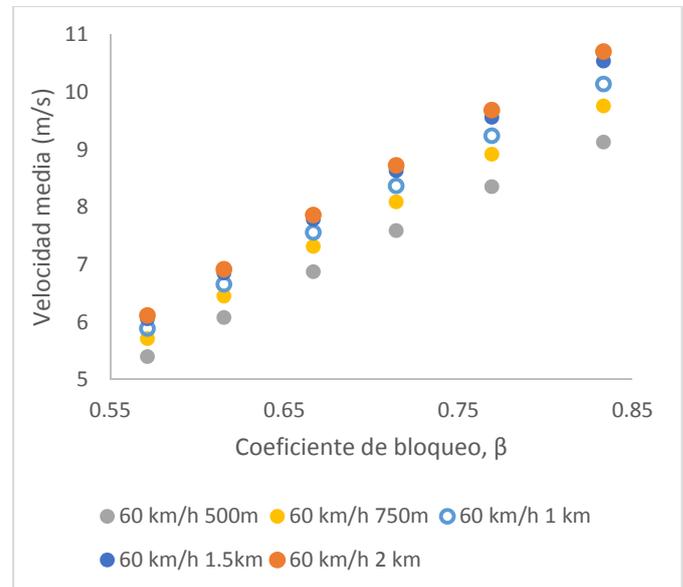


Figura 15.- Gráfica de velocidad media.

Los resultados de la *figura 15* representan la velocidad media en el intersticio existente entre el techo del tren y el túnel, obtenida en el punto medio del túnel. Se aprecia un paralelismo con la gráfica de flujo másico promediado en el sentido de que siguen manteniendo el patrón de tender a la linealidad a medida que aumenta la longitud del túnel. Así mismo, se observa que la velocidad media parece verse más influenciada por el coeficiente de bloqueo a valores elevados de éste y bajas longitudes de túnel.

Presiones

A continuación se representan varias gráficas de la magnitud de presión en función de la situación del punto de medida en el interior del túnel: al inicio del mismo, en su punto medio y a la salida. Así mismo se han tomado dos tipos distintos de valores: la presión pico en cada punto de medida y el valor del módulo de salto de presión cada vez que el tren atravesaba dichos puntos de medida.

En la *figura 16* se representa, para dos longitudes del túnel, el mayor pico de presión registrado en cada punto de medida en función del coeficiente de bloqueo. El máximo valor de presión se registra justo a la entrada del tren en el túnel; en otros trabajos (*Uystepuyst, 2013*) este pico de presión ha sido objeto de estudio debido a la importancia que tiene en la generación de ruidos, vibraciones o incluso estallidos sónicos debido a la creación de ondas de presión a alta velocidad.

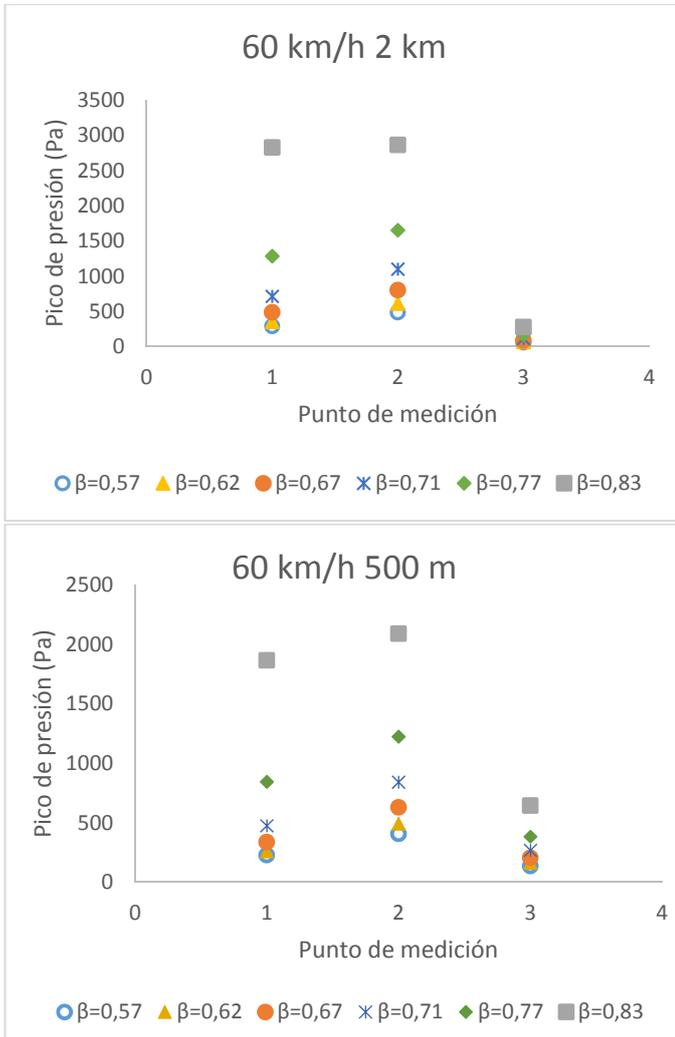


Figura 16.- Gráficas de picos de presión.

A primera vista, se puede apreciar en la figura 16 cómo el pico de presión a la salida del túnel es muy bajo comparado con los otros dos puntos, debido a efectos de amortiguación por la distancia y al aumento de sección a la salida. Esta presión a la salida disminuye con la longitud del túnel, al contrario de lo que experimentan los otros dos picos de presión, que además tienden a igualar su valor especialmente con coeficientes de bloqueo altos.

El módulo del salto de presión durante el paso del tren se representa en la figura 17. Este parámetro pretende cuantificar la variación de presión que se experimenta en un punto de medida desde la presión positiva previa a la llegada del tren hasta la presión negativa posterior al paso del mismo. Aporta una idea de la magnitud de las

distorsiones y turbulencias que en dicho punto se generan debido al convoy en movimiento.

Al igual que en el caso del pico de presión, los valores representados corresponden a ambos extremos de longitud del túnel. Los resultados muestran que el módulo de presión en el punto medio y en el de salida del túnel prácticamente no varía y su variación es prácticamente despreciable para todos los casos. Solamente merece la pena destacar que, en el salto de presión obtenido en la entrada, dicho valor depende fuertemente del coeficiente de bloqueo; además, dicho salto aumenta considerablemente con la longitud del túnel.

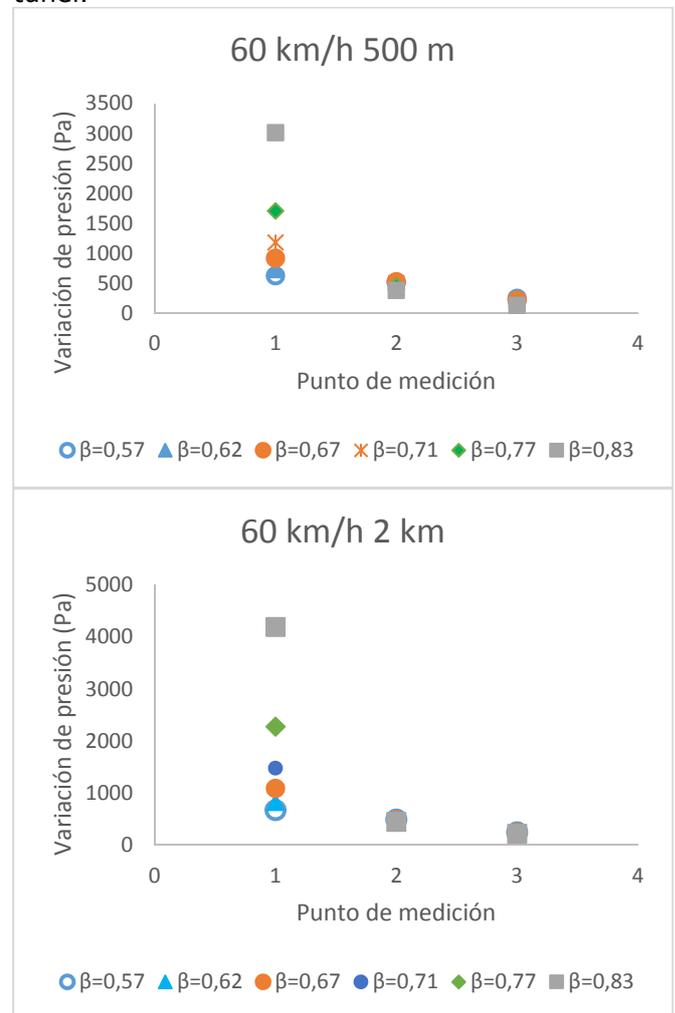


Figura 17.- Gráficas del salto de presión.



CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este artículo se ha presentado un análisis metodológico numérico que permite obtener datos sobre la influencia del efecto pistón en la ventilación de un túnel ferroviario durante el paso de un convoy, así como del papel de distintos parámetros en las consecuencias de dicho efecto.

Se ha simulado una batería de casos en los que se ha modificado la longitud y la altura del túnel para un mismo convoy. De cada caso se han obtenido las variables presión, velocidad y flujo másico de aire a lo largo del tiempo de simulación. Los datos que proporcionan las simulaciones se emplearon para estudiar y comparar el efecto pistón en el interior del túnel en función de la longitud y del coeficiente de bloqueo de cada caso.

De este análisis se han extraído un conjunto de conclusiones y datos de interés que pueden resumirse en:

- Conviene realizar las conexiones entre estaciones con coeficientes de bloqueo bajos para maximizar el flujo másico de aire además de para disminuir las ondas de sobrepresión. Estas medidas permitirán mejorar la ventilación generada por el tren, ayudando a la disipación de calor y a la mejora de la calidad del aire, contribuyendo por tanto a un ahorro energético en la instalación y mejorando la operación de los equipos de ventilación mecánica.
- Cabe destacar de manera especial la tendencia aproximadamente cuadrática del flujo másico promedio, la cual tiende a ser mucho más lineal a medida que aumenta la longitud del túnel. Así mismo, el flujo másico pico y la velocidad media presentan una distribución prácticamente lineal. Cabe también destacar la tendencia alcista de los picos y los módulos de presión con la longitud del túnel.
- En términos cuantitativos se podría añadir que el paso del tren en un caso favorable podría contribuir a la ventilación con aproximadamente 21 kg/s de aire que supondría así mismo unos 18 metros cúbicos de aire desplazados por segundo. La velocidad media del aire en un túnel con bajo coeficiente de bloqueo (la posibilidad más práctica) podría alcanzar hasta el 36% de la velocidad del tren y presentar unos valores de presión razonablemente bajos

siempre y cuando se esté hablando de coeficientes de bloqueo aplicables a la realidad y de velocidades de convoy subterráneo, no de tren de alta velocidad.

Como trabajos futuros, el objetivo más importante es la obtención de una ecuación que represente una superficie capaz de adaptarse a los valores de flujo másico calculados numéricamente en función del coeficiente de bloqueo y de la longitud del túnel. En otras palabras, se pretende conseguir una ecuación capaz de predecir el flujo másico esperado para un túnel de longitud conocida y coeficiente de bloqueo conocido con una precisión adecuada. Para llevar a cabo este objetivo debería realizarse una adimensionalización previa de los términos de dicha ecuación.

También se baraja, a más largo plazo, la posibilidad de ampliar la batería de casos a mayores alturas, longitudes de túnel y velocidades, así como tratar de obtener los perfiles de velocidad de convoys reales. Además, podría implementarse un modelo tridimensional similar y generar una batería de casos idéntica a la de este artículo con el fin de comparar la influencia que tiene el aumento de una dimensión y la pérdida de precisión que conlleva el cálculo bidimensional a cambio de tiempos de cálculo menores.

AGRADECIMIENTOS

Quiero transmitir mis agradecimientos académicamente a mis tutores que tanto me han ayudado durante la realización de este trabajo: Raúl Barrio Perotti y Mónica Galdo Vega. Así mismo, también quiero transmitir mi agradecimiento a Jesús Fernandez Oro en particular y a todo el profesorado del Máster en general por proporcionarnos vía correo electrónico de facilidades para informarnos, obtener plantillas, etc. También a la Universidad de Oviedo y sobre todo a mi familia por apoyarme en mis estudios y mostrarme que el esfuerzo siempre se ve recompensado.



REFERENCIAS

- Bao, H., 2010, Study of Piston Wind in Subway Tunnel Based on Numerical Simulation, 978-1-4244-5540-9/10, 266-268.
- Belén Amado, A., Ventilación de los túneles ferroviarios de alta velocidad de Guadarrama. Obras Urbanas, Abril 2008, 116-121.
- Chi-Ji, L., Yew Khoy, C., Chia-Wei, L., A study on underground tunnel ventilation for piston effects influenced by draught relief shaft in subway system, Applied thermal engineering, 28, (2008) 372-379.
- Fernandez Oro, J.M., Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos: introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD) por el método de volúmenes finitos. Barcelona:Reverté, 2012.
- Galdo Vega, M., Argüelles Díaz, K.M., Fernández Oro, J.M., Ballesteros Tajadura, R., Santolaria Morros, Carlos., Numerical 3D simulation of a longitudinal ventilation system: Memorial Tunnel Case. Tunnelling and Underground Space Technology. 23 (2008) 539-551.
- Herrero Paredes, R, 2009, Sistemas de ventilación en ferrocarriles metropolitanos: panorámica y estrategias de diseño. Departamento de ingeniería térmica y de fluidos. Universidad Carlos III de Madrid.
- Huang, Y., Gao, W., A numerical study of the train induced unsteady airflow in a subway tunnel with natural ventilation ducts using the dynamic layering method. Journal of Hydrodynamics 22, (2010) 164-172.
- Kim, J.Y., Kim, K.Y., Experimental and numerical analyses of train-induced unsteady tunnel flow in subway. Tunnelling and Underground Space Technology 22, (2007) 166-172.
- Juraeva, M., Lee, J., Song, D., A computational analysis of the train wind to identify the best position for the air curtain installation. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics. 99 (2011) 554-559.
- Kayili, S., 2005, CFD simulation of fire and ventilation in the stations of underground transportation systems. M.S., Department of Mechanical Engineering, Middle East Technical University, Jun 2005, 136 pp.
- López González, M., Galdo Vega, M., Fernández Oro, J.M., Blanco Marigorta, E., Numerical modelling of the piston effect in longitudinal ventilation systems for subway tunnels. Tunnelling and Underground Space Technology 40, (2014) 22-37.
- Lu, P., Pan, Y., Liao, G., Sun, J., 2006, Piston Effect and Piston Wind Velocity in the Subway Tunnel System by Shaft Exhaust Ventilation, Vol (No mencionado), 2201-2205, National Natural Science Foundation of China (Grant N°50323005) and Natural Science Foundation of Anhui Province (Grant N° 2006KJ002A).
- Peng, X., Shijun, Y., Jiangyue, C., Tianzhen, Y., Numerical investigation of unsteady airflow in subway influenced by piston effect based on dynamic mesh. Tunnelling and Underground Space Technology, 40 (2014) 174-181.
- Song, P., Li, F., Jiaping, L., Jingchao, X., Yuying, S., Na, C., Lili, Z., Binyang, Z., A Review of the Piston Effect in Subway Stations. Advances in Mechanical Engineering, volume 2013, article ID 950505.
- Tabarra, M., Abi-Zadeh, D., Sadokierski, S., 2004, Design of a modern subway ventilation system. Tunnels & Tunelling International, Nov 2004, 48-50.
- Thompson, J., 26 2010, California High Speed Train Project. Technical Memorandum. Basic High-Speed Train Tunnel Configuration, R1 TM 2.4.2.
- Uystepuyst, D., William-Louis, M., Monnoyer, F., 3D numerical design of tunnel hood. Tunnelling and Underground Space Technology, 38 (2013) 517-525.