

TÚNELES CON PARAMENTOS RUGOSOS Y CON CAVIDADES

(Tunnels with rough walls and cavities)

Gabriele Vigne*, Jimmy Jönsson**, Fernando Hacar***

*JVVA Fire & Risk, gabriele.vigne@jvvafire.com, **JVVA Fire & Risk, jimmy.jonsson@jvvafire.com

***JVVA Fire & Risk, fernando.hacar@jvvafire.com

(Recibido julio 23 de 2014 y aceptado octubre 08 de 2014)

Resumen:

En muchas ocasiones las superficies finales de los túneles de carretera (tanto los hastiales, como la bóveda) resultan no solo con rugosidades uniformes importantes, también con huecos más o menos numerosos y más o menos considerables: generalmente en túneles sin revestir es donde más se presentan las irregularidades uniformes importantes, y en túneles en roca excavados con voladuras es donde más se manifiestan los huecos.

Esto da lugar a coeficientes de fricción con las paredes del túnel que pueden ser muy elevados. La fricción que se produce al paso del aire en la ventilación puede dar lugar a necesidades de empujes aerodinámicos (con ventilación con *jet-fan*) muy importantes, esto es, a consumos de energía eléctrica significativos.

Para túneles de carretera con ventilación longitudinal con *jet-fan* se analizan las pérdidas de carga de túneles rugosos y con cavidades, y se evalúan los empujes aerodinámicos necesarios para contrarrestar las correspondientes pérdidas de carga.

Palabras clave: túneles, rugosidad, cavidades.

Abstract:

Often the finishing surfaces of road tunnels (both gables and vaults) present not only important uniform roughness, but even holes that can be numerous and with significant size: usually in uncoated tunnel is where most uniform and major irregularities can be found whilst in rock tunnels excavated with blasting is where most holes can be found.

This results in frictions coefficients with the tunnel walls that can be very high. The friction generated by the airflow in the ventilation can result in very important aerodynamic thrust requirements (with ventilation through jet-fans), which imply significant power consumption.

Pressure losses in rugous tunnels and with the presence of cavities are analyzed for road tunnels with longitudinal ventilation through jet-fans, evaluating the aerodynamic thrust required to counter the corresponding losses.

Keywords: tunnels, rugosity, cavities

1. INTRODUCCIÓN

El paramento visto de los túneles carreteros suele ser de hormigón, lo que les confiere baja rugosidad a las paredes (hastiales y bóveda) y uniformidad del conjunto, que favorece el rendimiento de la ventilación y del alumbrado. Con frecuencia se construye un revestimiento de hormigón, de espesor entre 30 cm. y 60 cm., normalmente de hormigón en masa encofrado (en algunos túneles es de hormigón armado, aunque no es usual), y

que forma un anillo con el que se finaliza el túnel. La cara vista de ese revestimiento será el “paramento visto” del túnel. A él se fijan los elementos de equipamiento: falso techo (si es necesario), ventiladores, luminarias, bandejas portacables, etc. Oculta por ese revestimiento se encontrará la lámina de impermeabilización que se colocó en las zonas con filtraciones (o en toda la longitud del túnel, como es habitual), así como todos los elementos que se usaron para el sostenimiento (bulones, gunita, mallazos, cerchas, etc.).



No obstante, en algunos túneles no revestidos se coloca una pared de cierta altura, entre 2,5 m y 4,0 m, en hastiales (y en ocasiones también en la bóveda), de material prefabricado o no (puede ser hormigón o cualquier otro elemento), que cumple con la premisa de aportar uniformidad y estética de la parte baja más vista (hastiales y arranque de la bóveda), dejando la parte superior, la bóveda, sin revestir.



Figura 1. Ejemplo de un túnel con revestimiento de hormigón encofrado.

En otros casos, los túneles se terminan sin ningún revestimiento ni cubrición de sus hastiales o bóveda. Esta solución de no revestir debe obedecer siempre a criterios predefinidos, muy claros y meditados para unas circunstancias determinadas, en las que se han de tener muy en cuenta las características geotécnicas -y reológicas- del macizo atravesado por el túnel.

Los elevados costes de ejecución de un túnel carretero son objeto de exhaustivos análisis con el fin de reducirlos en la mayor cuantía posible. El coste del revestimiento en un túnel representa una parte muy significativa del coste total, por lo que, en principio, parece interesante analizar la posibilidad de no revestirlo, pues, de ese modo, se logra un ahorro muy importante. El estudio técnico-económico permitirá evaluar dicho ahorro. Esta decisión, aparentemente sencilla, está afectada de múltiples variables, algunas de muy difícil cuantificación, de manera que la correcta solución tiene que pasar por un análisis complejo.

En la literatura se pueden consultar algunos estudios sobre los costes del revestimiento, la discusión de no revestir siguiendo los principios del “NATM, Nuevo Método Austriaco” y según el sistema de impermeabilización empleado. También algunos -pocos- estudios tratan acerca de la importancia que tiene una alta rugosidad en la ventilación, especialmente en caso de incendio.

En estas notas nos ocupamos de la rugosidad en túneles sin revestir, en relación con los cálculos de ventilación de túneles carreteros en situaciones ordinarias de explotación. En caso de incendio, las pérdidas de carga, temperatura, velocidad, densidad del aire, etc., varían en función del tipo de fuego, del desarrollo del mismo, de la distancia de la sección al foco, etc. En la bibliografía se pueden consultar algunos estudios que se ocupan de comparar las pérdidas de carga calculadas con métodos clásicos y con modelos de “CFD, Computacional Fluid Dynamics”, aunque algunos de dichos estudios concluyen con comparaciones erróneas al no haber tenido en cuenta en los cálculos clásicos las correcciones que han de hacerse en las ecuaciones de Kennedy.

Si en un túnel rugoso la ventilación natural no es capaz de empujar el aire suficiente para lograr la ventilación, podría ser necesario instalar una ventilación artificial, es decir, la rugosidad podría llegar a motivar la necesidad de ventilación artificial. Por otra parte, en un túnel que precise ventilación (por su longitud, tráfico, etc.), los gastos adicionales que supondría una importante rugosidad tal que obligase a colocar una instalación más potente capaz de arrastrar el caudal de aire necesario, tendría otro coste superior, etc. Aun siendo muy importante el aspecto económico en la explotación del túnel, nuestro estudio se ocupará de evaluar las pérdidas de carga y no de los aspectos económicos derivados de un túnel más o menos rugoso en su relación con la ventilación.

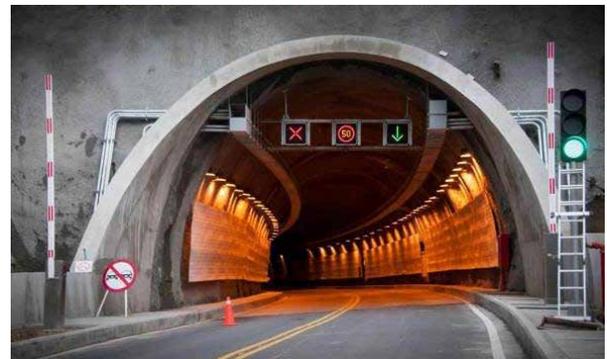


Figura 2. Túnel de Daza (Variante Oriental de Pasto, Colombia).

- Longitud 1710 m (Boca Norte, Daza - Boca Sur, Aranda).
- Tráfico bidireccional. 2 carriles de 3,85 m, bermas a cada lado de 0,30 m, y aceras a cada lado de 1,0 m.
- Hormigón proyectado como revestimiento definitivo.

Fuente: Devinar S.A. (2013), David (2013)

2. FORMULACIÓN

2.1 Pérdidas de carga

Las pérdidas de carga (o presión) lineales debidas a la fricción del aire con las paredes del túnel (en bóveda, hastiales y calzada) para un túnel de longitud $L_{\text{túnel}}$ se expresan según:

$$\Delta H_{\text{paredes}} = f \cdot \frac{\rho_{\text{túnel}} \cdot V^2}{2} \cdot \frac{L_{\text{túnel}}}{DH_{\text{túnel}}}$$

Siendo:

$\Delta H_{\text{paredes}}$ =pérdida de carga con las paredes (Pa).

f =coeficiente de fricción con las paredes del túnel (bóveda, hastiales y calzada).

$L_{\text{túnel}}$ =longitud del túnel (m).

$\rho_{\text{túnel}}$ =densidad aire en el túnel (kg/m^3).

V =velocidad media del aire en el túnel (m/s).

$DH_{\text{túnel}}$ =diámetro hidráulico del túnel (m):

$$DH_{\text{túnel}} = \frac{4 \cdot A_{\text{túnel}}}{P_{\text{túnel}}}$$

$A_{\text{túnel}}$ =área de la sección transversal del túnel (m^2).

$P_{\text{túnel}}$ =perímetro de la sección transversal del túnel (m).

Las pérdidas de carga singulares debidas a cavidades, estrechamientos o ensanches de la sección, codos, etc., se expresan de manera general según:

$$\Delta H_{\text{sin}} = \xi \cdot \frac{\rho_{\text{túnel}} \cdot V^2}{2}$$

Siendo:

ΔH_{sin} =pérdida de carga debida a la singularidad (Pa).

ξ =coeficiente de pérdida de carga en la singularidad (adim).

Si se ensancha bruscamente la sección transversal de la conducción, la corriente del fluido se separa de la pared y se proyecta en forma de chorro en la sección una vez ensanchada. Ese chorro se expande hasta ocupar completamente la sección de la conducción. El espacio entre el chorro expansionado y la pared de la conducción está ocupado por el fluido en movimiento de vórtice, originando en esta zona una fricción y pérdida de carga significativa.

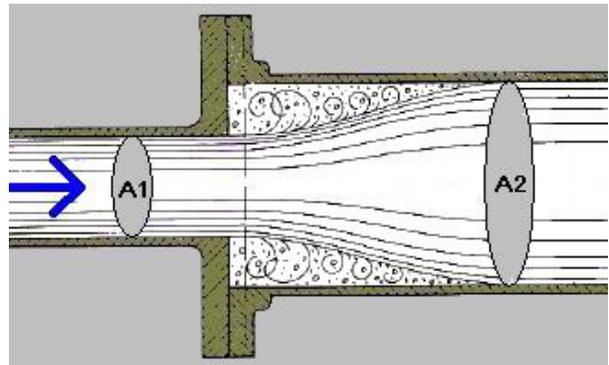


Figura 3. Pérdida de carga por un ensanchamiento de la sección.

Según sea el ensanche, obtenemos:

- Ensanchamiento brusco de la sección del túnel (de la sección A_1 a la A_2):

$$\xi_{\text{ensanche}} = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2$$

- Para un ensanchamiento muy grande:

$$\frac{A_1}{A_2} \rightarrow 0, \xi_{\text{ensanche}} = 1$$

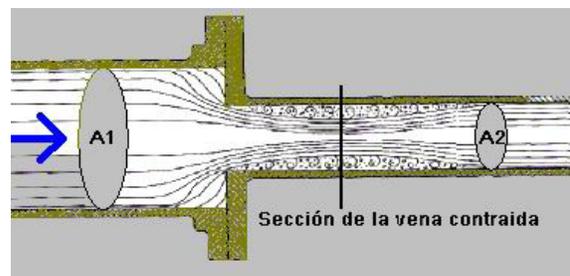


Figura 4. Pérdida de carga por un estrechamiento de la sección.

Cuando se estrecha bruscamente la sección transversal de la conducción, el fluido no puede adaptarse al borde en ángulo recto y la corriente pierde el contacto con la pared de las paredes de la conducción. Debido a esto se forma un chorro que se proyecta en el interior del fluido estancado en la parte estrecha de la conducción. El chorro primero se contrae y luego se expande hasta ocupar toda la sección estrecha, reestableciéndose aguas abajo del estrechamiento la distribución normal de la velocidad. La sección de área mínima en la que el chorro pasa de la contracción a la expansión suele designarse como “sección de vena contraída”. Para flujo laminar, la pérdida por contracción es despreciable, para flujo turbulento podemos adoptar la siguiente expresión:

- Estrechamiento brusco de la sección del túnel (de la sección A_1 a la A_2):

$$\xi_{estrecha} = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{A_2}{A_1} \right)$$

Siendo:

$\xi_{ensanche}$ = coeficiente de pérdida carga cambio sección ensanchamiento.

$\xi_{estrecha}$ = coeficiente de pérdida carga cambio sección estrechamiento.

Si en el túnel con rugosidad absoluta ϵ , además existen “n” cavidades singulares con coeficientes de pérdida de carga ξ_i , a la pérdida de carga ocasionada por la fricción del aire con las paredes del túnel $\Delta H_{paredes}$ debemos

añadirle las causadas por dichas cavidades. De esa forma la pérdida de carga total ΔH_{total} será:

$$\Delta H_{total} = \Delta H_{paredes} + \sum_1^n \Delta H_{sin}$$

Siendo:

ΔH_{total} = pérdida de carga por fricción con las paredes del túnel + pérdida de carga por las n cavidades del túnel (Pa).

n = número de cavidades.

2.2 Longitud equivalente y coeficiente de fricción equivalente

La longitud equivalente de túnel $L_{túnel}^*$ (de rugosidad absoluta ϵ y coeficiente de fricción f) que ocasiona la misma pérdida de carga por fricción del aire con las paredes del túnel $\Delta H_{paredes}$ que las “n” cavidades, es:

$$L_{túnel}^* = \frac{DH_{túnel}}{f} \cdot \sum_{i=1}^n \xi_i$$

De igual forma, el coeficiente de fricción equivalente del aire con las paredes del túnel f^* que ha de tener un túnel ficticio de longitud igual al que nos ocupa $L_{túnel}$ para que la pérdida de carga por fricción sea igual a la que ocasiona el túnel rugoso y además con esas cavidades, será:

$$f^* = \frac{2 \cdot DH_{túnel} \cdot \Delta H_{total}}{L_{túnel} \cdot V^2 \cdot \rho_{túnel}}$$





Figura 5. Túnel de Dosquebradas (Autopista del Café, entre Dosquebradas y Santa Rosa de Cabal, departamento de Risaralda).

- Longitud 134 m, pendiente longitudinal de 7,0 %, trazado en curva con radio de 99,5 m, altura libre 5,63 m, ancho de rodadura de 10,0 m (incluidos sobreanchos y bermas).
- Una primera capa de hormigón proyectado (espesor de 20 mm), reforzado con fibras metálicas (30 kg/m³), cerchas metálicas en celosía como soporte definitivo y una capa final de 7 mm.

Fuente: David (2013); Jaramillo, Lalinde & Naranjo (2009).

2.3 Rugosidad de las paredes del túnel y coeficiente de fricción

El coeficiente de fricción del aire con las paredes del túnel f se puede obtener en función del Número de Reynolds Re , de la rugosidad absoluta ε y del diámetro hidráulico del túnel $DH_{túnel}$ (también se suele expresar en función de la rugosidad relativa $\varepsilon/DH_{túnel}$).

Para el caso de rugosidad heterogénea, como prácticamente son todas las conducciones industriales, el valor del coeficiente de fricción f , según el régimen hidráulico, puede obtenerse con la formulación que seguidamente se expone.

2.3.1 Fórmula de Hagen-Poiseuille

Para régimen laminar (normalmente en fluidos con velocidades bajas o viscosidades altas), correspondiente

a bajos Números de Reynolds ($Re \leq 2.000$), la preponderancia de las fuerzas de viscosidad motiva que el flujo sobre la superficie de las rugosidades sea continuo, no dependiendo el coeficiente de fricción de la rugosidad, siempre que esta no adquiera valores muy altos. En este caso la expresión de Hagen-Poiseuille permite obtener dicho coeficiente de rugosidad f :

$$f = \frac{64}{Re} \quad (Re \leq 2000)$$

$$Re = \frac{V \cdot DH_{túnel}}{\nu} = \frac{\rho_{túnel} \cdot V \cdot DH_{túnel}}{\mu}$$

Siendo:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \text{viscosidad cinemática del fluido (m}^2/\text{s)}.$$

μ = viscosidad absoluta o dinámica del fluido (kg/(m·s)).

2.3.2 Fórmula de Colebrook-White

Para otro régimen no laminar puede emplearse la expresión de Colebrook-White (puede usarse el diagrama de Moody para mayor facilidad en el empleo de esa expresión):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{3,7 \cdot DH_{túnel}} + \frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{f}} \right) \quad (Re > 2000)$$

Siendo:

ε = rugosidad absoluta (m).

2.3.3 Valores de la rugosidad y del coeficiente de fricción

Para un túnel con revestimiento de hormigón, los valores de la rugosidad absoluta ε son los indicados en la Tabla 1.



Tabla 1. Rugosidad absoluta en túneles con revestimiento de hormigón.

Superficie	Rugosidad absoluta ϵ (mm)
Hormigón superficie lisa	0,3
Hormigón superficie muy lisa	0,8
Hormigón superficie normal, Hormigón armado	2,5
Hormigón superficie muy rugosa	9,0

Según algunos autores, debe considerarse un valor del coeficiente de fricción del aire con las paredes del túnel f mínimo de 0,015 o 0,016, pues también deben ser tenidas en cuenta las pérdidas ocasionadas por los elementos que normalmente se instalan en los túneles, tales como paneles alfanuméricos, señales, semáforos, nichos, etc.

En el Congreso Mundial de Carreteras del año 1975 se propusieron valores de f entre 0,015 y 0,02 para superficie muy lisa/lisa, y de 0,025 para hormigón rugoso. Para túneles sin revestimiento se propuso el valor entre 0,03 a 0,05.

Para el caso de un túnel sin revestimiento, excavado en roca, se han medido en el túnel ferroviario de Penmaenbach coeficientes de fricción del aire con las paredes del túnel de 0,0243.

Para túneles con superficies muy rugosas, con los ventiladores fijados muy próximos a las paredes del túnel, puede perderse entre un 30 y un 40 % de la fuerza de empuje, debido a las fricciones con las paredes del túnel.

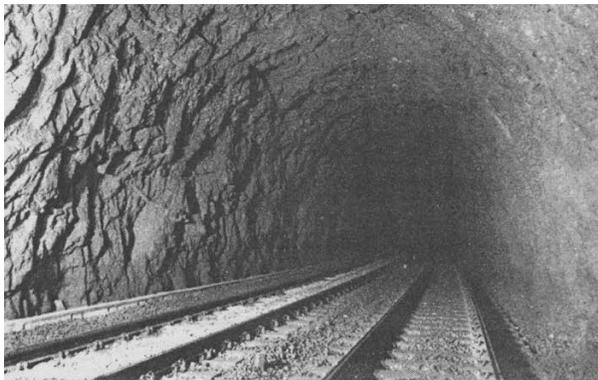


Figura 6. Túnel ferroviario de Penmaenbach (Gran Bretaña). Fuente: West & Pope (1985).

3. TÚNELES CON CAVIDADES DEBIDAS A DESPRENDIMIENTOS DE ROCA

En túneles sin revestir es frecuente observar que además de la propia rugosidad más o menos importante y uniforme de las paredes (en los hastiales y la bóveda) suele haber otras irregularidades más o menos significativas, normalmente formando cavidades debidas a cuñas desprendidas durante las voladuras en la fase de excavación, voladuras con las que se realizó la excavación por tratarse de roca sana, y precisamente por ello (por la buena calidad de la roca) se dejó el túnel sin revestir. En esos túneles, a las pérdidas de carga por la fricción con las paredes del túnel debemos añadirle aquellas otras que resultan de esas cavidades singulares: las pérdidas de carga por rugosidad media de la bóveda y de los hastiales de los túneles sin revestir, deben incluir también las pérdidas debidas a la existencia de cavidades.

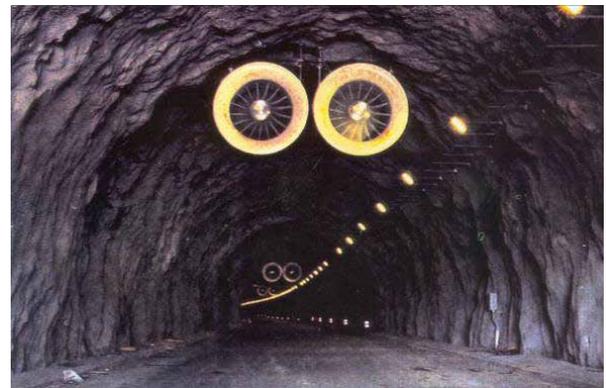


Figura 7. Túnel carretero sin revestimiento.

Seguidamente analizamos la influencia de los huecos o cavidades que se presentan en un túnel, generalmente ocasionadas -como ya hemos indicado- por las voladuras, aunque estén bien dimensionadas y ejecutadas (incluso con el empleo de técnicas de precorte “fino”) para la ejecución del túnel.

Si se prevé terminarlo sin revestir y sin “suavizar” esas cavidades, el perfil visto definitivo del túnel, además de la propia rugosidad media, se encontrará con esas cavidades distribuidas, de una u otra importancia, a lo largo del mismo.

Según sea la rugosidad absoluta, y según el número y geometría de esas cavidades (profundidad y longitud), la



existencia de esas cavidades a lo largo del túnel hará que las pérdidas de carga sean mayores.

En un túnel sin revestir y con superficie rugosa irregular, debido a la existencia de esas cavidades, el coeficiente de fricción equivalente puede alcanzar valores importantes.

Puede considerarse que, salvo casos excepcionales, es inevitable la formación de las cavidades que nos ocupan. Según sea la geometría de las cavidades (en profundidad y longitud) que se observan en el túnel, puede ser interesante terminar la excavación con una capa de gunita de regularización de manera que se reduzcan o suavicen, es decir, tratar de limitar las pérdidas a la propia rugosidad absoluta del túnel.

En el caso de decidir “suavizar” la geometría de esas cavidades con un gunitado, debe prestarse mucha atención al instalar capas de poco espesor para el “acabado”, pues en algunas ocasiones esa capa de acabado no “pega” perfectamente con las subyacentes y se pueden producir “desconches”, lo que puede suceder incluso si se instala un mallazo para “fijar” esa capa de gunitado de regularización. Por otra parte, durante la vida de los túneles, los efectos de la ventilación (trepidaciones), los cambios de temperatura y humedad del ambiente, etc., pueden favorecer la formación de esos desconches.

Si el túnel se concluye instalando un revestimiento de hormigón (y por ello sin que existan cavidades), según la calidad del encofrado, pueden lograrse coeficientes de fricción de 0,02 a 0,03. Si el túnel se termina sin revestir y este queda con muchas oquedades (resultado frecuentemente de cuñas desprendidas en la fase de excavación) en su superficie, las pérdidas de carga pueden tener importante repercusión en el coste de la ventilación al aumentar significativamente el coeficiente de fricción con las paredes del túnel. El reducir esas oquedades, por ejemplo proyectando hormigón, puede resultar muy costoso.

En algunos túneles se han hecho estudios en fase de proyecto tratando de establecer una aproximación de las cavidades que pueden producirse al realizar el túnel. El propósito de esos estudios ha sido formular una argumentación razonable (en muchos casos muy imaginativa) para definir una línea de abono en el proyecto, y así poder presupuestar las obras teniendo en

cuenta ese importante aspecto de las sobreexcavaciones y su posterior relleno con gunita u hormigón proyectado.

El considerar que tales estudios teóricos permitan igualmente definir la rugosidad prevista con la que puede ser realmente terminado el túnel, resulta excesivamente aventurado.

Mediante técnicas topográficas empleadas en obras tuneleras es posible (y suele hacerse) disponer de secciones transversales del túnel realmente construido, tomadas cada metro, cada dos metros, cada tres, etc.

La profundidad de las cavidades b_c podrá medirse con facilidad partiendo de esas secciones transversales. No sucederá lo mismo con la medida de sus longitudes L_c , y tampoco será fácil la toma de datos de campo para poder medirla de manera sistemática, pues harían falta perfiles más próximos o diferentes tomas de la sección longitudinal (en clave, a diferentes alturas en hastiales, etc.).

Como ejercicio teórico, podemos proceder tomando datos de las cavidades existentes en un “tramo de túnel de control, $L_{control}$ ” de longitud determinada que se considere representativo de todo el túnel y realizar, para ese tramo de control, un análisis de las pérdidas de carga en esas cavidades, considerando que ese mismo número y geometría de las cavidades lo habrá en toda la longitud del túnel $L_{túnel}$.

Para el estudio de esos huecos utilizaremos en nuestro ejemplo el modelo de flujo turbulento completamente desarrollado, adoptado por Crespo y Hernández (1993, 1994). El estudio citado considera, entre otras hipótesis, un perfil de velocidad correspondiente a flujo turbulento, tal y como se indica en la Figura 8. Igualmente estudia las cavidades distribuidas de forma axial-simétrica, con secciones rectangulares de bordes rectos (“cavidad rectangular”) y con borde en la salida curvo (“cavidad rectangular con borde de salida suavizado”). Para profundidades b_c de la cavidad hasta 1,50 m, y para diversas longitudes L_c de la misma (desde 0,50 m hasta 3,00 m), se estudia la influencia de la geometría de esa cavidad (rectangular o rectangular con borde de salida suavizado). Las siguientes figuras muestran la geometría de las cavidades consideradas.



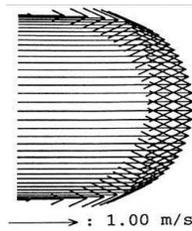


Figura 8. Perfil de velocidad en una sección con flujo turbulento completamente desarrollado.

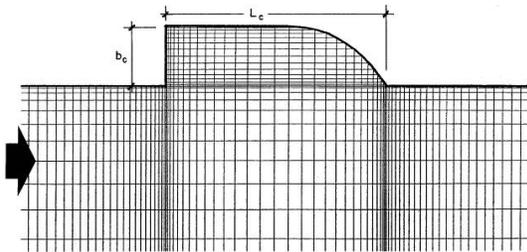


Figura 9. Geometría de una cavidad de sección rectangular (con borde de salida suavizado).

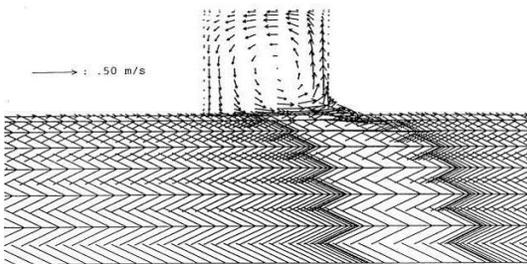


Figura 10. Cavidad de sección cuadrada $L_c=0,50$ m, $b_c=0,25$ m.

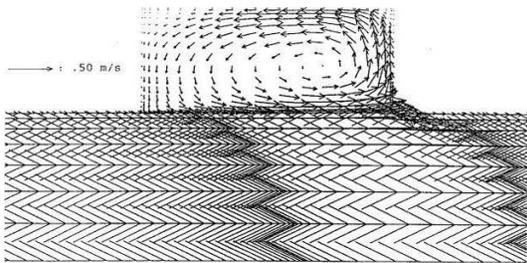


Figura 11. Cavidad de sección rectangular $L_c=1,00$ m, $b_c=0,50$ m.

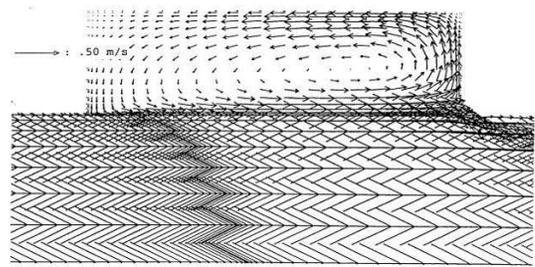


Figura 12. Cavidad de sección rectangular $L_c=1,50$ m, $b_c=0,75$ m.

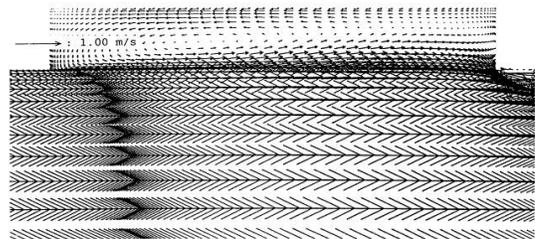


Figura 13. Cavidad de sección rectangular $L_c=3,00$ m, $b_c=1,50$ m.

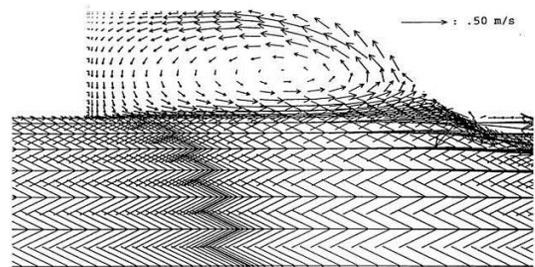


Figura 14. Cavidad de sección rectangular $L_c=1,50$ m, $b_c=0,50$ m.

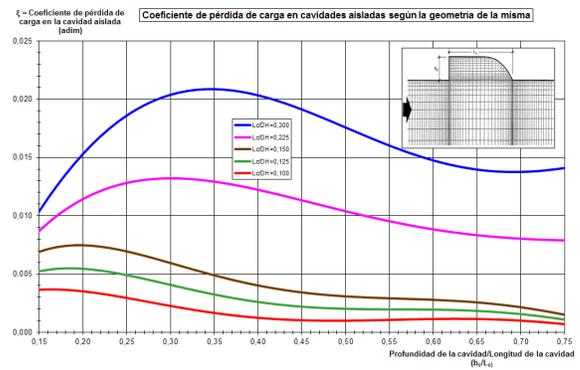


Figura 15. Resultados para cavidades rectangulares (con borde de salida suavizado) de diferentes dimensiones.



4. EJEMPLO

Sea un túnel de las siguientes características:

Tabla 2. Ejemplo, Sentido 0 , 2230 (L=2230 m)

Ubicación del túnel	Túnel Urbano
Tipología del túnel	Tráfico Unidireccional
$L_{\text{túnel}}$ Longitud del túnel (m)	2.230
N_{carriles} Número de carriles de circulación en el tubo	2
$H_{\text{túnel}}$ Altura desde la base del fuego hasta la parte más alta del túnel (m)	6,00
$B_{\text{túnel}}$ Ancho del túnel a nivel de calzada (m)	9,50
$A_{\text{túnel}}$ Área sección transversal del túnel (m ²)	57,00
$P_{\text{túnel}}$ Perímetro del túnel (m)	31,00

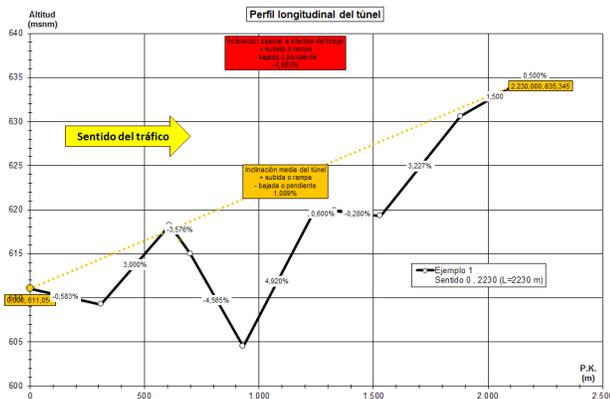


Figura 16. Perfil longitudinal del túnel.

Partiendo del tráfico previsto que pasará por el túnel en el año de cálculo y de los límites admisibles para los diferentes contaminantes, así como admitiendo que el fuego de diseño sea de 30 MW, obtenemos los caudales de aire fresco que han de aportarse en el túnel en cada hipótesis de diseño. Así resultan los siguientes valores:

Tabla 3. Tráfico en el año de cálculo

Año que se calcula	2.018				
IMD Suma ambos sentidos (veh/día)	60.000				
%VPesados Porcentaje de vehículos pesados (%)	15,00	%VLDiesel Porcentaje ligeros diesel (%)	36,55	%VLgasolina Porcentaje ligeros gasolina (%)	48,45
F_{th} Factor de Intensidad horaria punta	8,00	I_{h} Intensidad horaria punta Suma ambos sentidos (veh/h)	7.500		
Distribución asimétrica del tráfico por sentido Sentido de referencia	0,500	IMD Sentido de referencia (veh/día)	30.000	I_{h} Intensidad horaria punta Sentido de referencia (veh/h)	3.750
Distribución asimétrica del tráfico por sentido Sentido opuesto	0,500	IMD Sentido opuesto (veh/día)	30.000	I_{h} Intensidad horaria punta Sentido opuesto (veh/h)	3.750

Tabla 4. Límites admisibles

Superficie	Rugosidad absoluta ϵ (mm)
$CO_{2\text{lim}}$ Límite admisible (ppm)	45,000
$NO_{x\text{lim}}$ Límite admisible (ppm)	4,000
Relación en volumen (NO_2/NO_x)	0,100
$NO_{2\text{lim}}$ Límite admisible (ppm)	0,400
K_{lim} Límite admisible (m ⁻¹)	0,005



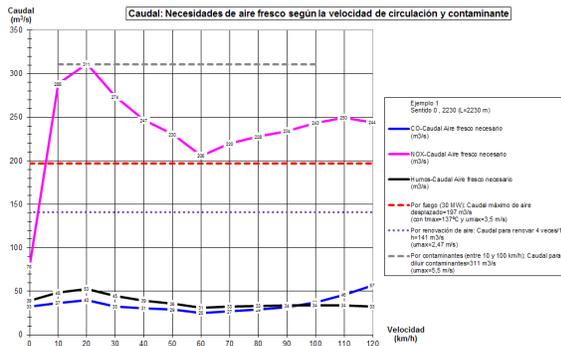


Figura 17. Caudales de aire fresco para aportar según diferentes criterios de cálculo:

- Caudal de aire fresco por fuego 197 m³/s,
- Caudal de aire fresco para dilución de contaminantes 311 m³/s,
- Caudal de aire fresco por renovación de aire 141 m³/s

Observamos que en este ejemplo el caudal máximo de aire fresco para aportar se produce por la necesidad de diluir los contaminantes, siendo de 311 m³/s a velocidad del tráfico de 20 km/h. La dimensión de la ventilación (número de *jet-fan* necesarios) se deberá realizar según ese criterio.

En una longitud del túnel de control $L_{control} = 100$ m se han medido las cavidades (axial-simétricas) que representan el estado de toda la longitud del túnel, siendo estas cavidades de las siguientes características:

Tabla 5. Características de las cavidades

$L_{control}$ (m)	100,00								
b_c (m)	1,00	0,75	0,50	0,30	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
L_c (m)	3,00	2,00	0,75	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
n	2	3	4	5	10	0	0	0	0
$L_{control}$ = longitud del "tramo de control" en el que se miden las cavidades									
b_c = profundidad de la cavidad									
L_c = longitud de la cavidad									
n = número de cavidades en el "tramo de control"									

Con el propósito de estudiar la variación de las pérdidas de carga, tanto por fricción del aire contra las paredes del túnel como las pérdidas debidas a las cavidades según sea el acabado del túnel, se hacen los cálculos suponiendo las siguientes superficies (hastiales y bóveda) del túnel:

Tabla 6. Características de las superficies del túnel estudiadas

Superficie del túnel	Rugosidad absoluta ϵ (mm)	Coefficiente de fricción del aire con las paredes del túnel f (adim)
Superficie muy lisa (muy buen hormigón encofrado) $f = 0,015$	-	0,015
Superficie lisa (hormigón encofrado) $f = 0,02$	-	0,020
Superficie rugosa (hormigón encofrado rugoso) $f = 0,025$	-	0,025
Túneles sin revestir (con muy buen perfil, gunitado) $f = 0,03$	-	0,030
Túnel no revestido (roca muy rugosa) $f = 0,05$	-	0,050
Superficie del túnel en roca viva		Fórmula de Colebrook-White
No revestido: Roca $\epsilon = 200$ mm	200	0,053
No revestido: Roca $\epsilon = 300$ mm	300	0,062
No revestido: Roca $\epsilon = 400$ mm	400	0,071

Según se haya construido el túnel con paramentos (hastiales y bóveda) más o menos rugosos, y según existan más o menos cavidades (y según la forma de estas), el empuje necesario que han de poder aportar los *jet-fan* para vencer las pérdidas de carga serán mayores o menores. En la Figura 18 se calculan dichos empujes según esos supuestos, resultando:

- Para un acabado con "superficie muy lisa (muy buen hormigón encofrado) $f = 0,015$ ", el empuje que han de poder suministrar los *jet-fan* es 2845 N.

- Para un acabado con "túneles sin revestir (con muy buen perfil, gunitado) $f = 0,03$ ", el empuje necesario es 4425 N, que supone un incremento de 56 % respecto



al caso anterior. Si además se consideran las cavidades que se han indicado, el empuje debe ser de 5057 N, que supone un incremento del 78 %.

- Si el acabado es “no revestido: roca con rugosidad absoluta $\epsilon=400$ mm”, el empuje necesario es 8534 N, lo que supone un incremento del 200 % respecto al primer caso.

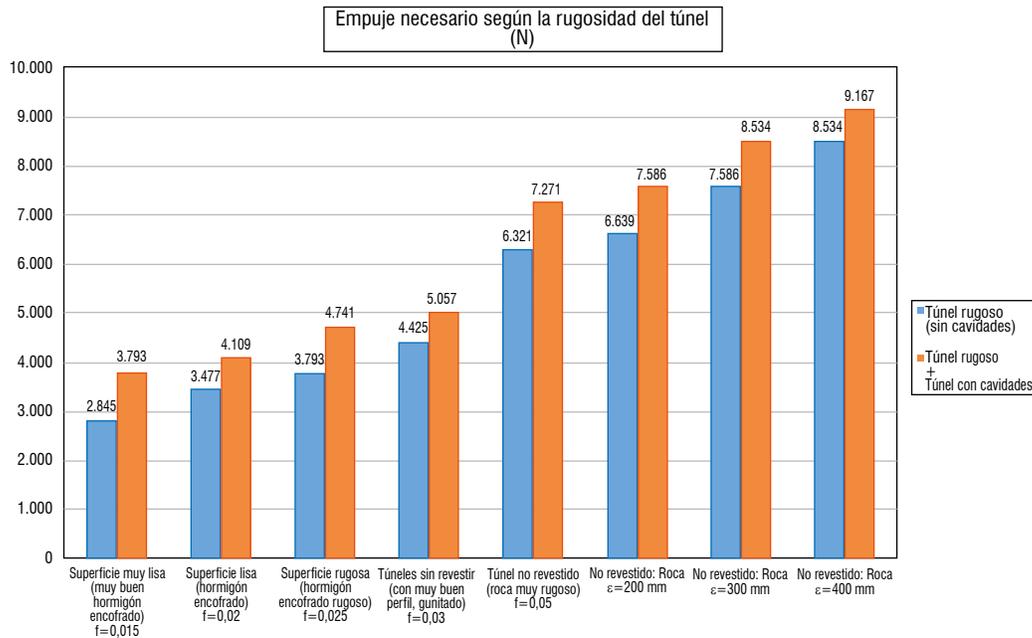


Figura 18. Empuje necesario según la rugosidad del túnel y según las cavidades existentes.

5. REVESTIMIENTOS CON PANELES

En túneles existentes con superficies muy rugosas (o en aquellos que se acaben con sus paramentos muy rugosos, muy frecuente en túneles sin revestir excavados en roca) es conveniente estudiar las ventajas (e inconvenientes) que puede suponer la instalación de paneles prefabricados que logren mejoras aerodinámicas al reducir las pérdidas de carga.

Con el modelo que hemos expuesto se ha visto cómo pueden lograrse reducciones muy importantes de los empujes necesarios (y, por lo tanto, de la potencia consumida y, consecuentemente, de la factura eléctrica) que han de ser aportados por los *jet-fan* al disminuir las pérdidas por fricción. Estas reducciones del consumo de la factura eléctrica pueden producirse durante la operación ordinaria del túnel, y por ello durante muchas horas al día.

Por otra parte, en túneles ya existentes, con paramentos rugosos, la ventilación puede mejorarse

significativamente con la disminución de las pérdidas por fricción.

Las fotografías siguientes muestran la instalación de paneles de acero vitrificado en un túnel.

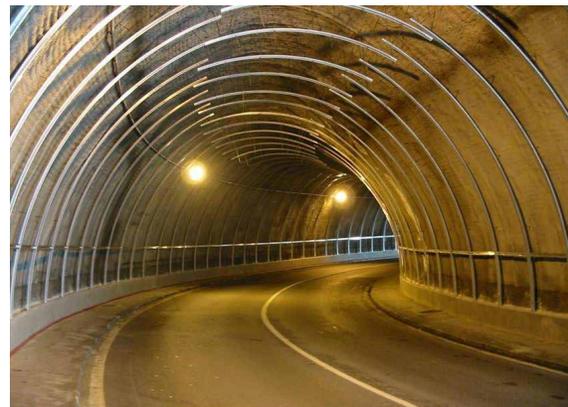


Figura 19. Instalación de la estructura ligera para soporte de los paneles de acabado del túnel.

Fuente: Alliance (2010)





Figura 20. Vista del túnel con los paneles instalados.
Fuente: Alliance (2010)

6. OBSERVACIONES

En los cálculos que se han expuesto se ha considerado que las cavidades son axial-simétricas, así como se ha hecho una hipótesis de la geometría y número de estas cavidades a lo largo del túnel.

Este es un modelo simplificado que deberá ser validado en cada túnel en concreto con medidas de campo y modelos más precisos de cálculo.

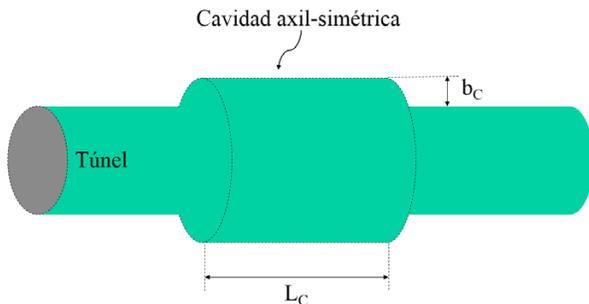


Figura 21. Geometría de una cavidad axial-simétrica.

7. REFERENCIAS

- Alliance Ceramicsteel Products. (2010). *Transporte público-túneles*. Madrid: s.n.
- Association Internationale Permanente des Congres de la Route – AIPCR-. (1975). In XVth World Road Congress. *Technical committee on Road Tunnels*. México.
- Crespo, A. & Hernández, J. (1993, 1994). *Método de diferencias finitas: estudio del flujo de aire en túneles*. E.T.S. Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid. E.T.S. Ingenieros Industriales, UNED. Estudio para los túneles de El Padrún, Asturias. 15 de noviembre de 1993 y 15 de enero de 1994.
- David, J. (2013, 26 de jul.). *Colombia de túneles: túneles carreteros*. Colombia: Blog 360 en Concreto.
- Devinar S.A. (2013, 23 de feb.). *Túnel de Daza*. Bogotá, Colombia.
- García-Arango, I.; Abella, A.; Hacar, F. (1993). *Incendios en túneles*. Oviedo, Asturias: Paraíso.
- Jaramillo, F., Lalinde, M. & Naranjo, J. L. (2009, dic.) El túnel de Dosquebradas. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. *Revista de Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, 9(2).
- Martínez, J. A. (2011, dic.). *Análisis del concreto lanzado como revestimiento definitivo para túneles*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería Civil.
- West, A. & Pope, C. (1985). The effect of wind on the ventilation of a road tunnel occupying an exposed position. In *5th International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*. Lille, France, 20-22 may 1985.