

Diseño y Ejecución de Obras Subterráneas

Tema 12. Ventilación de túneles



Rubén Pérez Álvarez

Departamento de Transportes y Tecnología
de Proyectos y Procesos

Este tema se publica bajo Licencia:

[Creative Commons BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

TEMA 12: VENTILACIÓN EN TÚNELES

12.1. Introducción.

12.2. Cálculo de la ventilación en construcción.

12.3. Cálculo de la ventilación en servicio.



Introducción

Definiciones relativas a la calidad del aire

AIRE PURO SECO

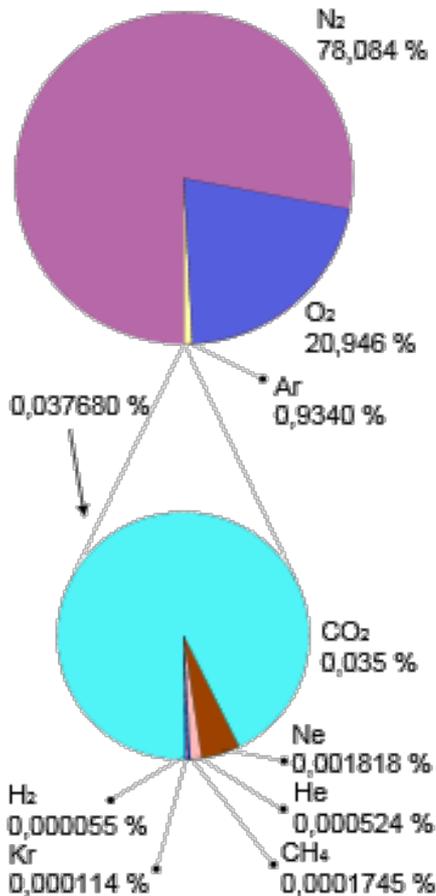
Mezcla de oxígeno ($\cong 21\%$), Nitrógeno ($\cong 79\%$) y otros gases ($< 1\%$).

AIRE LIMPIO

Adecuado para la respiración (con un porcentaje de oxígeno próximo al 21%). El aire en las labores de fondo de saco, como son los avances de túneles, contiene otros gases, vapores y polvo en suspensión, por lo que habrá de adecuarse para poder ser respirado.

AIRE VICIADO

Aquel cuyo porcentaje de oxígeno respirable se ve desplazado, o existen gases o vapores molestos o nocivos. Podrá llegar a hablarse si las condiciones empeoran de ambiente irrespirable, tóxico, etc.



Introducción

Requisitos para la respiración

CONSUMO DE AIRE/OXÍGENO

- 👤 En condiciones normales: 7 l/min aire - 0,25 l/min de oxígeno.
- 👤 Desarrollando un esfuerzo: 60 l/min - 2,5 l/min de oxígeno.

CONSECUENCIAS DE LA REDUCCIÓN DEL PORCENTAJE DE OXÍGENO

- 👤 21% - 28%: no altera el ritmo respiratorio.
- 👤 18% - 9%: aceleración de pulso y respiración. Vómitos.
- 👤 9% - 6%: excitación intensa, síncope, coma.
- 👤 5% - 3%: muerte rápida.

CAUSAS

Respiración, ejecución de voladuras, motores...



«Fresh Air». By Norbert.

<https://flic.kr/p/ehYGmc>.

<https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/>.

Introducción

Clasificación de los gases

GASES ANÓXICOS

No provocan efecto directo sobre el organismo, pero pueden provocar la no aptitud para la respiración de una atmósfera.



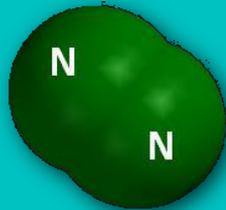
Incoloro, inodoro e insípido. Un exceso de Nitrógeno puede proceder de determinadas formaciones, como por ejemplo potasas.



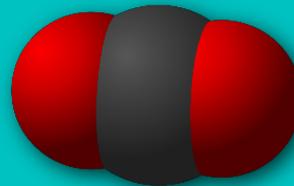
Se presenta en terrenos del Carbonífero. Ofrece un efecto sobre la respiración similar al Nitrógeno, aunque por su menor densidad tiende a acumularse en las partes altas de las labores, empobreciendo la atmósfera en oxígeno. De naturaleza inflamable y explosiva en determinados porcentajes.



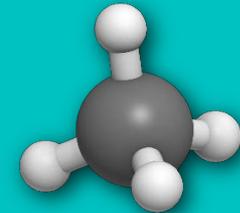
Incoloro, sabor y olor ligeramente ácido, soluble en agua, irritante (mucosas y ojos), tiende a acumularse en la parte baja de las labores. Procede de la respiración, los motores Diésel, las voladuras, la oxidación de materia orgánica o los incendios.



«Nitrogeno Molecular» de CDR.
<https://eo.wikipedia.org/wiki/Nitrogeno>.
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Nitrogeno_-_Molecular-jpg#/media/File:Nitrogeno_-_Molecular-jpg.



«Metano 3D» de Manuel Almagro Rivas.
Disponible bajo la licencia CC BY-SA 3.0.
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Metano-3D.png#/media/>.



By Jacek FH (Own work based on Image: Carbon-dioxide-3D-vdW.png).
<http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html>.
CC BY-SA 3.0: <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0>.

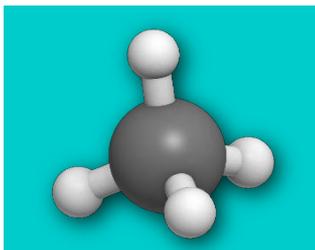
Introducción

Clasificación de los gases

GASES ANÓXICOS

No provocan efecto directo sobre el organismo, pero pueden provocar la no aptitud para la respiración de una atmósfera.

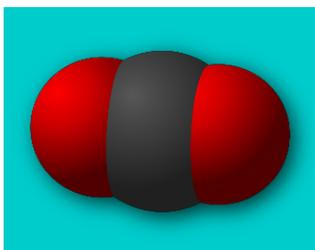
METANO, CH₄



Se presenta en terrenos del Carbonífero. Ofrece un efecto sobre la respiración similar al Nitrógeno, aunque por su menor densidad tiende a acumularse en las partes altas de las labores, empobreciendo la atmósfera en oxígeno. De naturaleza inflamable y explosiva en determinados porcentajes.

- 🦋 **0% - 5%: arde, combustión simple hasta desaparecer la fuente de inflamación.**
- 🦋 **5% - 16%: explota. Máxima magnitud entre 8,5% y 9,5%.**
- 🦋 **> 16%: asfixia. Combustión simple incluso tras desaparecer el foco.**

DIÓXIDO DE CARBONO, CO₂



Incoloro, sabor y olor ligeramente ácido, soluble en agua, irritante (mucosas y ojos), tiende a acumularse en la parte baja de las labores. Procede de la respiración, los motores Diésel, las voladuras, la oxidación de materia orgánica o los incendios.

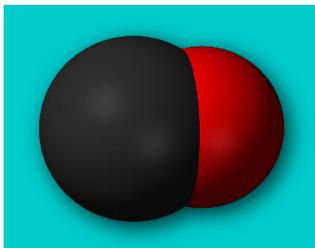
- 🦋 **0,5%: bien tolerado.**
- 🦋 **0,5% - 5%: síntomas. Cuesta respirar.**
- 🦋 **5% - 10%: posible coma.**
- 🦋 **20% - 25%: muerte rápida.**

Clasificación de los gases

GASES ANÓXICOS

Atacan órganos, al metabolismo o al sistema nervioso.

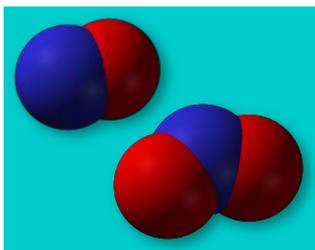
CO



Incoloro, inodoro, insípido, de densidad similar al aire. Procedente de combustiones incompletas de sustancias con contenido en carbono, oxidación, putrefacción, voladuras y motores Diésel. De gran toxicidad: se combina con la hemoglobina, con una afinidad superior a la del oxígeno, generando carboxihemoglobina e imposibilitando la oxigenación.

- ☛ **5 ppm: tolerado.**
- ☛ **100 - 500 ppm: dolores de cabeza y vómitos.**
- ☛ **1000 ppm: síntomas graves en 30 - 45 minutos.**
- ☛ **10000 ppm: muerte en minutos.**

NO_x



Vapores nitrosos, mezcla de distintos tipos de óxidos de nitrógeno, pero destacando sobre todo el monóxido (incoloro, inodoro, insípido) y el dióxido de nitrógeno (marrón rojizo, maloliente, muy pernicioso). El monóxido se combina rápidamente para dar el dióxido.

- ☛ **60 ppm: irritación de garganta.**
- ☛ **100 - 150 ppm: tos, síntomas graves en 30 minutos.**
- ☛ **250 ppm: muerte producida en minutos.**

Límites admisibles. ITC 04/7/2002. Concentraciones límites de gases. Temperatura, humedad, clima

CONCENTRACIÓN MÁXIMA ADMISIBLE DURANTE 8 HORAS DE TRABAJO

CO	50 ppm
CO ₂	5000 ppm (0,5%)
NO + NO ₂	10 ppm
SH ₂	10 ppm
SO ₂	5 ppm
H ₂	1000 ppm (0,1%)
CH ₄	15000 ppm (1,5%)

LÍMITE MÁXIMO PARA PERIODOS CORTOS

Determinación basada en el principio de isotoxicidad: se admite el riesgo como proporcional al tiempo de exposición por la concentración, permitiéndose de esta manera acciones puntuales de extrema importancia, como pudiera ser la mitigación de un conato de incendio.

CO	100 ppm
CO ₂	12500 ppm (1,25%)
NO + NO ₂	25 ppm
SH ₂	10 ppm
SO ₂	5 ppm
H ₂	10000 ppm (1,00%)
CH ₄	25000 ppm (2,5%)

Fases del diseño

El diseño de la ventilación en ejecución de una obra subterránea comprende dos fases fundamentales:

DETERMINACIÓN DEL CAUDAL , TIPO DE VENTILACIÓN (SOPLANTE, ASPIRANTE, MIXTA)

SELECCIÓN DEL VENTILADOR Y LA CONDUCCIÓN

Tipos de ventilación

VENTILACIÓN SOPLANTE

Se instalará una conducción por la que circulará el aire del exterior hasta las inmediaciones del frente, retirando el tapón de humos, gases y polvo por la introducción de dicho aire, que es soplado por la tubería. El aire circula por el interior de la tubería hacia el frente. La presión en el interior de la tubería es mayor que la presión atmosférica en el túnel/labor.

Para un caudal de 1 m³/s, la distancia recomendable debe ser inferior a 15 - 18 metros, mientras que si éste está comprendido entre 1 y 0,5, deberá ser inferior a los 15 - 12 m.

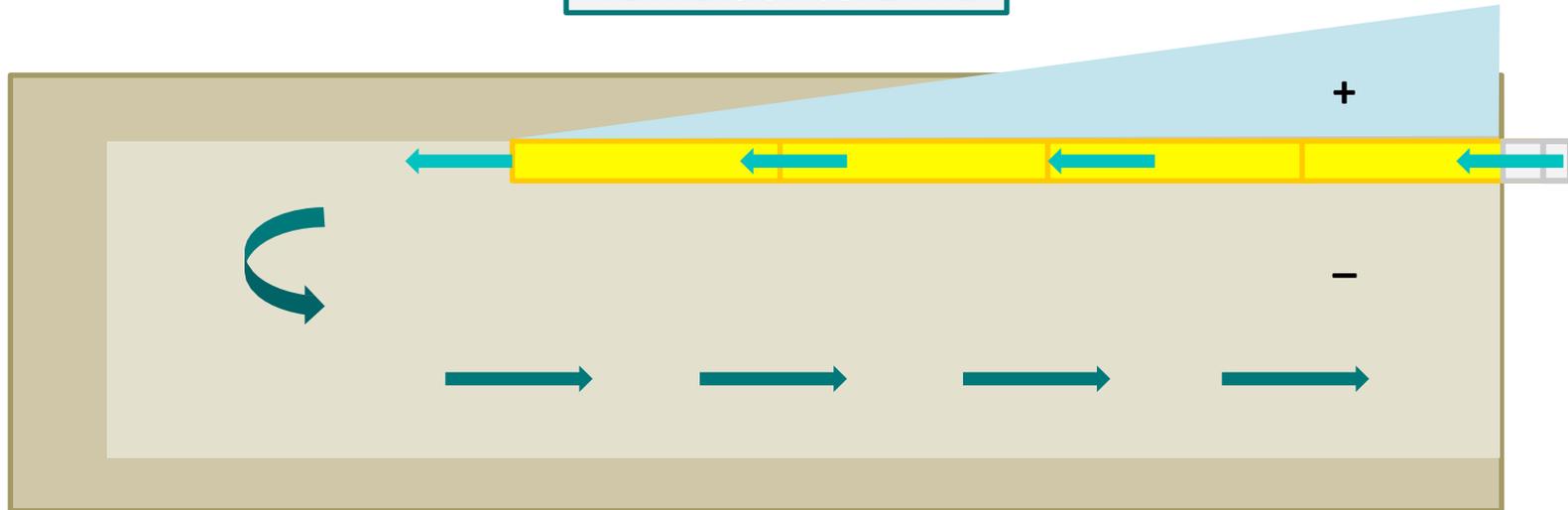
$$t = Ln \frac{c_0}{c} \cdot \frac{S \cdot d}{Q}$$


Tiempo de dilución para unas dimensiones del tapón definidas por la sección del túnel (S) y la distancia entre el frente y la salida de la tubería de ventilación (d), un caudal aportado Q, y unas concentraciones inicial y admisible c_0 y c.

Cálculo de la ventilación en ejecución

Tipos de ventilación

VENTILACIÓN SOPLANTE



Fuente de la imagen: Adaptada de Talleres Zintrón.

VENTAJAS

- ❖ Fácil instalación, mayor facilidad de manejo de las tuberías por no ser rígidas (lona sin armadura).
- ❖ Rápida introducción del aire.
- ❖ Mejores condiciones de llegada del aire al frente de trabajo no es necesario juntar excesivamente el conducto al frente, menores pérdidas de carga, menor potencia instalada.

DESVENTAJAS

- ❖ Circulación de los gases por el túnel y del polvo, empeorando la condiciones de trabajo.

Tipos de ventilación

VENTILACIÓN SOPLANTE

Debe estudiarse la reducción en la concentración de gases del frente, y los posibles efectos del desplazamiento de los gases por el propio túnel, ya que éste constituirá su circuito de evacuación.

El **parámetro de peligrosidad** debido a un gas concreto, por ejemplo el monóxido de Carbono, puede estimarse mediante la expresión, dependiente de la concentración (c_0 , en milésimas), y del tiempo de permanencia en segundos:

$$T = t \cdot c_0;$$


El tiempo de permanencia se define como el empleado por un tapón de longitud L_0 en recorrer una sección del túnel, quedando definido por la ecuación:

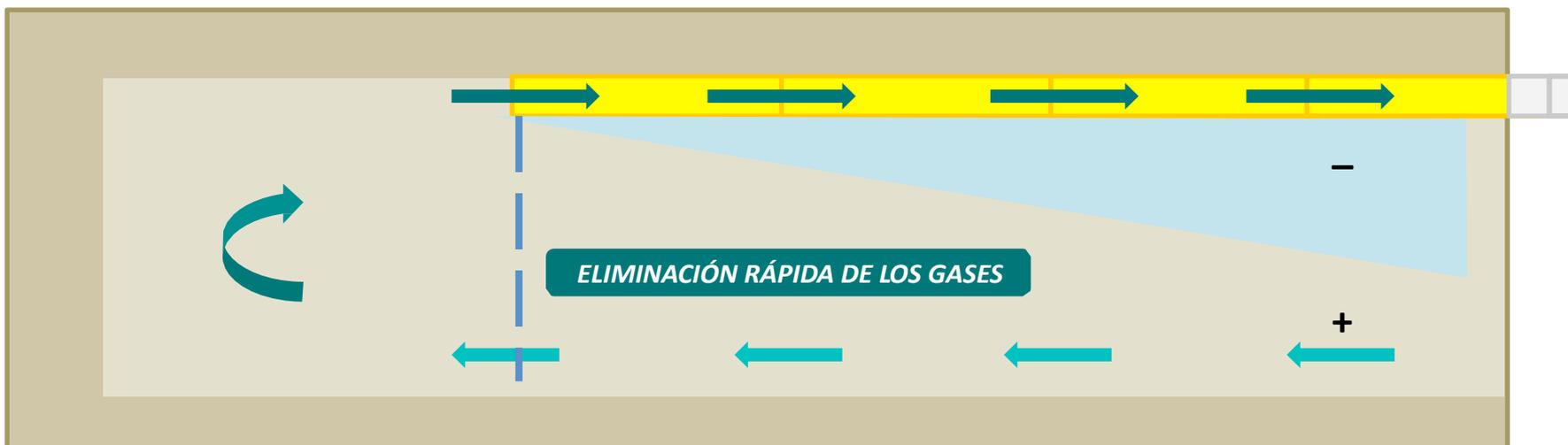
$$t = \frac{S \cdot L_0}{Q};$$


Quedando determinado el factor de peligrosidad como sigue. Teniendo en cuenta el valor máximo admisible de dicho factor, que para el caso del monóxido de carbono se considera de 2000, podrá establecerse el caudal máximo:

$$T = \frac{c_0 \cdot S \cdot L_0}{Q}; \quad Q = \frac{c_0 \cdot S \cdot L_0}{T}$$

Tipos de ventilación

VENTILACIÓN SOPLANTE



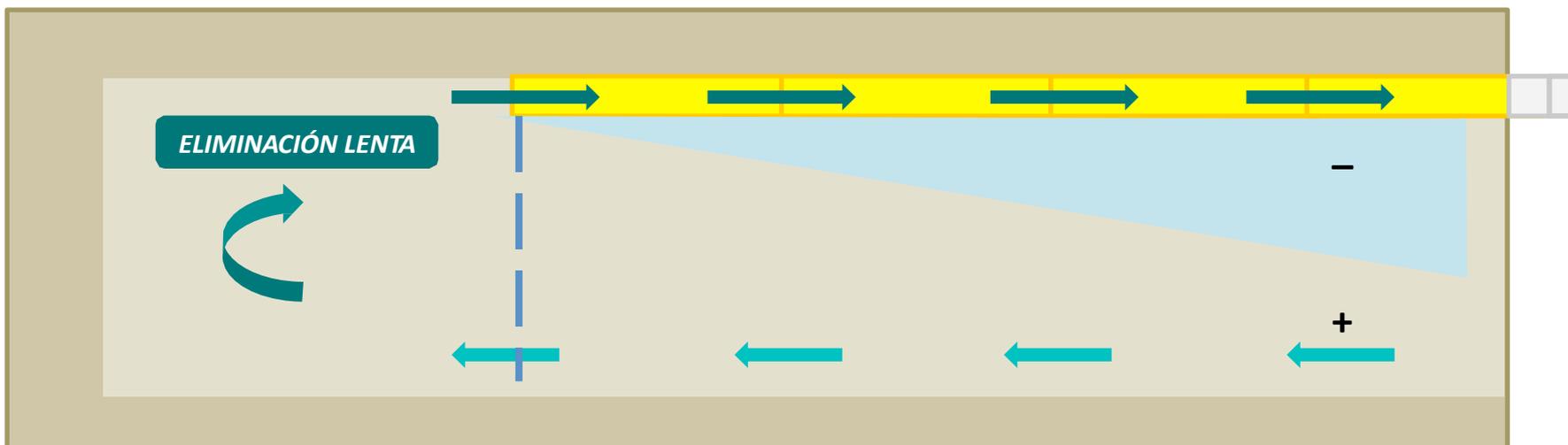
Fuente de la imagen: Adaptada de Talleres Zintrón.

El aire del frente se aspira mediante la tubería de ventilación, accediendo el aire limpio por la boca del túnel, mezclándose con los contaminantes, y siendo extraído por la tubería acoplada a un ventilador lo expulsará al exterior del túnel. La eliminación de los gases y humos ubicados con anterioridad al extremo de la tubería es rápida, tardando un tiempo en segundos aproximado definido por la expresión adjunta, dependiente del coeficiente de dilución δ (generalmente inferior a 3), la sección del túnel en metros cuadrados (S), la longitud del tapón de ventilación en m (L_0) la distancia del extremo de la tubería de ventilación al frente en m, y el caudal Q :

$$t = \frac{\delta \cdot S \cdot (L_0 - d)}{Q}$$

Tipos de ventilación

VENTILACIÓN ASPIRANTE

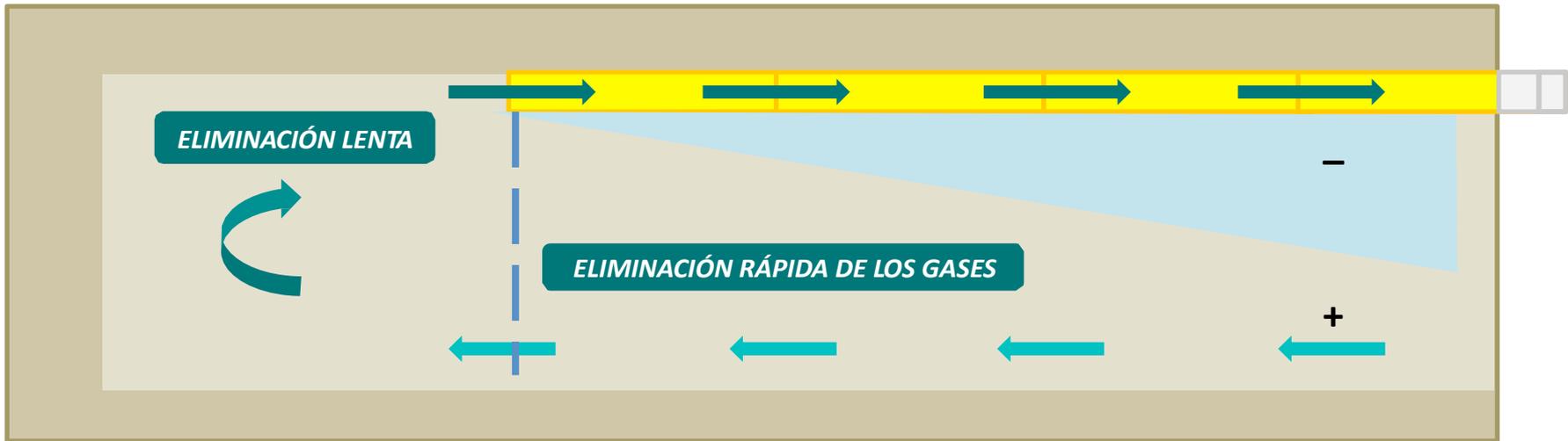


Fuente de la imagen: Adaptada de Talleres Zintrón.

Los humos ubicados entre el frente y el extremo de la tubería se eliminan lentamente por difusión. Es por ello que para una adecuada limpieza del frente la ventilación aspirante suele combinarse con la soplante, empleándola únicamente sin combinar en aquellos casos en los que el sistema de avance sea mediante minadores y máquinas de corte, con el fin de extraer el polvo.

Tipos de ventilación

VENTILACIÓN ASPIRANTE



Fuente de la imagen: Adaptada de Talleres Zintrón.

VENTAJAS

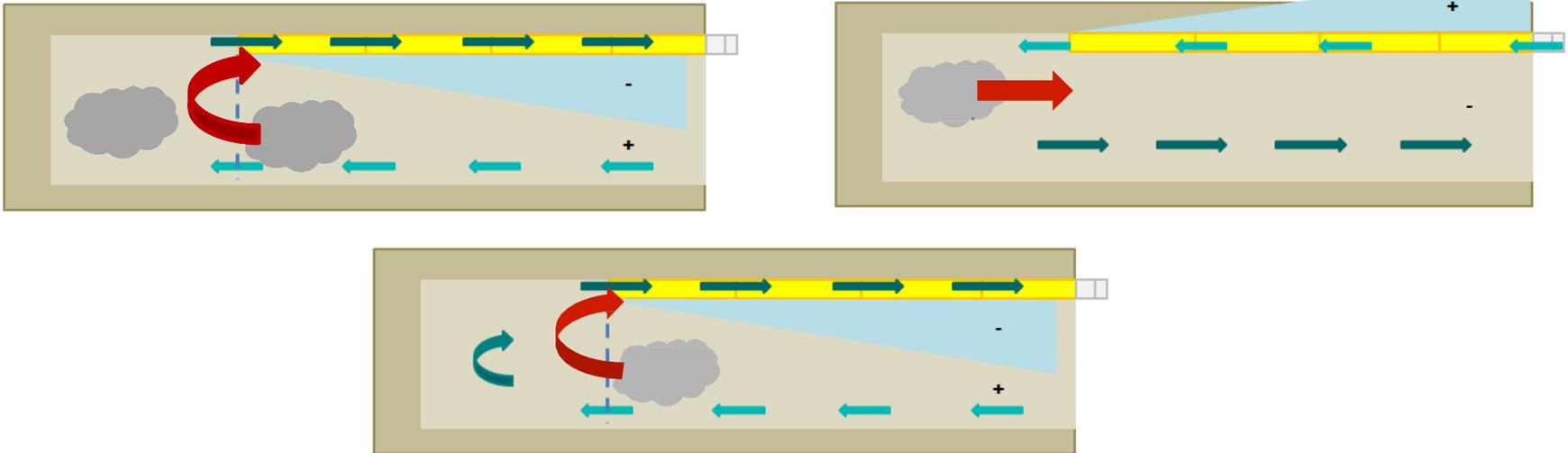
- Las ventajas de la ventilación aspirante son el retorno de gases y del polvo por la tubería.
- Rápida eliminación del tapón de gases tras el disparo de una voladura.

DESVENTAJAS

- Necesidad de emplear tuberías rígidas o de lona armada (con una mayor pérdida de carga), el aire accederá de forma lenta al túnel, por lo que llegará caliente, la mala ventilación de determinadas zonas del frente, o la mayor potencia instalada requerida.

Tipos de ventilación

VENTILACIÓN SUCESIVA ASPIRANTE - SOPLANTE



Fuente de la imagen: Adaptada de Talleres Zintrón.

Consiste en el empleo de una misma tubería para una fase inicial de aspiración, destinada a eliminar la fracción de humo ubicada en las inmediaciones de la boca, y posteriormente se sopla, con objeto de eliminar el espacio comprendido entre la tubería y el propio frente (el aire se desplaza a la parte anterior al extremo de la tubería, con lo que puede eliminarse en la siguiente secuencia de aspiración). El tiempo de aspiración se determina mediante la expresión siguiente, que tienen en cuenta el tiempo requerido para que los humos recorran la tubería (definida por su longitud, L , y su diámetro, D):

$$t_{\text{aspiración}} = \frac{\delta \cdot S \cdot (L_0 - d)}{Q} + \pi \cdot \frac{L \cdot D^2}{4 \cdot Q}$$

Tipos de ventilación

VENTILACIÓN SIMULTÁNEA ASPIRANTE - SOPLANTE



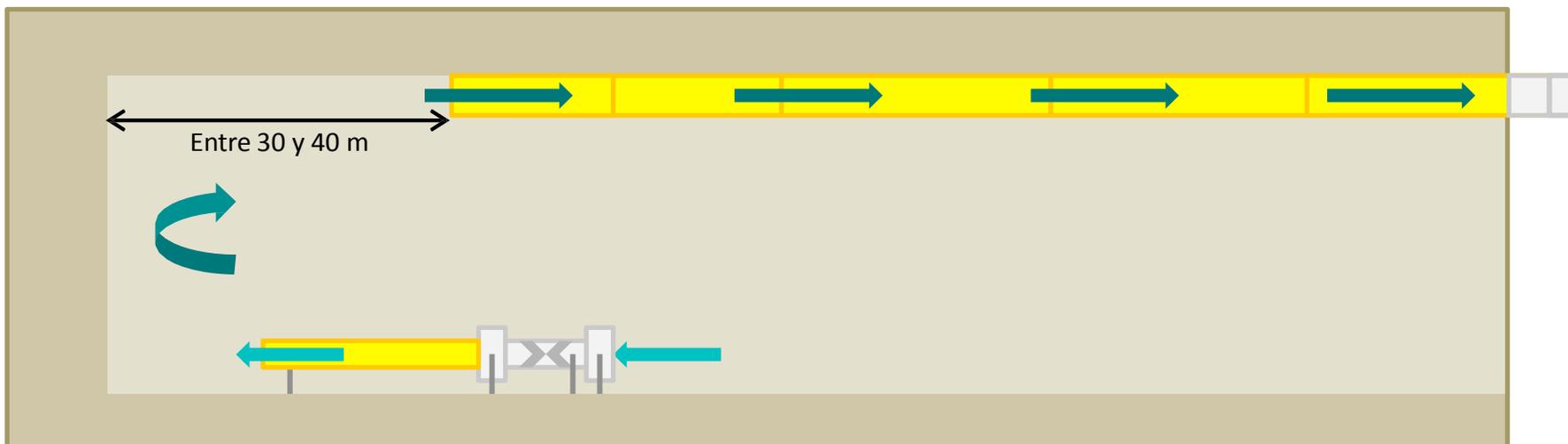
Fuente de la imagen: Adaptada de Talleres Zintrón.

Requiere 2 tuberías, cada una provista de su propio ventilador. La soplante podrá ser corta y el ventilador poco potente, ya que sólo se requiere que la tubería soplante aspire el aire unos metros por detrás de la boca de la aspirante, y su papel consistirá exclusivamente en homogeneizar el frente de avance. Su diámetro suele ser pequeño, siendo de fácil portabilidad, y requiere tiempos de purga muy reducidos. La tubería de aspiración podrá quedar a entre 30 y 40 m. del frente, pudiendo emplearse tubería de gran diámetro por no molestar en el frente.

Entre las ventajas está el retorno de humos y gases por la tubería, limpieza rápida y eficaz, pero la instalación tiene una mayor complejidad y coste, la tubería aspirante será rígida, y el aire progresará lentamente hacia el frente, llegando al frente caliente.

Tipos de ventilación

VENTILACIÓN SIMULTÁNEA ASPIRANTE - SOPLANTE



Fuente de la imagen: Adaptada de Talleres Zintrón.

VENTAJAS

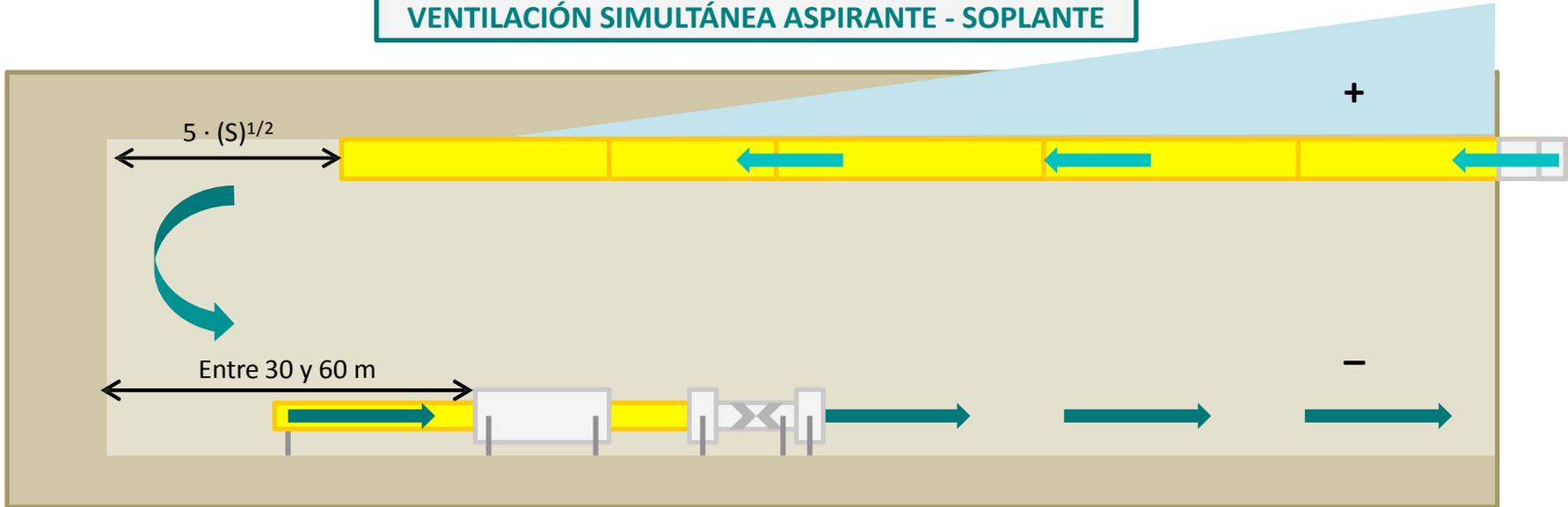
- Entre las ventajas está el retorno de humos y gases por la tubería, limpieza rápida y eficaz, pero la instalación tiene una mayor complejidad y coste, la tubería aspirante será rígida, y el aire progresará lentamente hacia el frente, llegando al frente caliente.

DESVENTAJAS

- Mayor complejidad y coste de la instalación, la tubería aspirante será rígida, y el aire progresará lentamente hacia el frente, llegando al frente caliente.

Tipos de ventilación

VENTILACIÓN SIMULTÁNEA ASPIRANTE - SOPLANTE

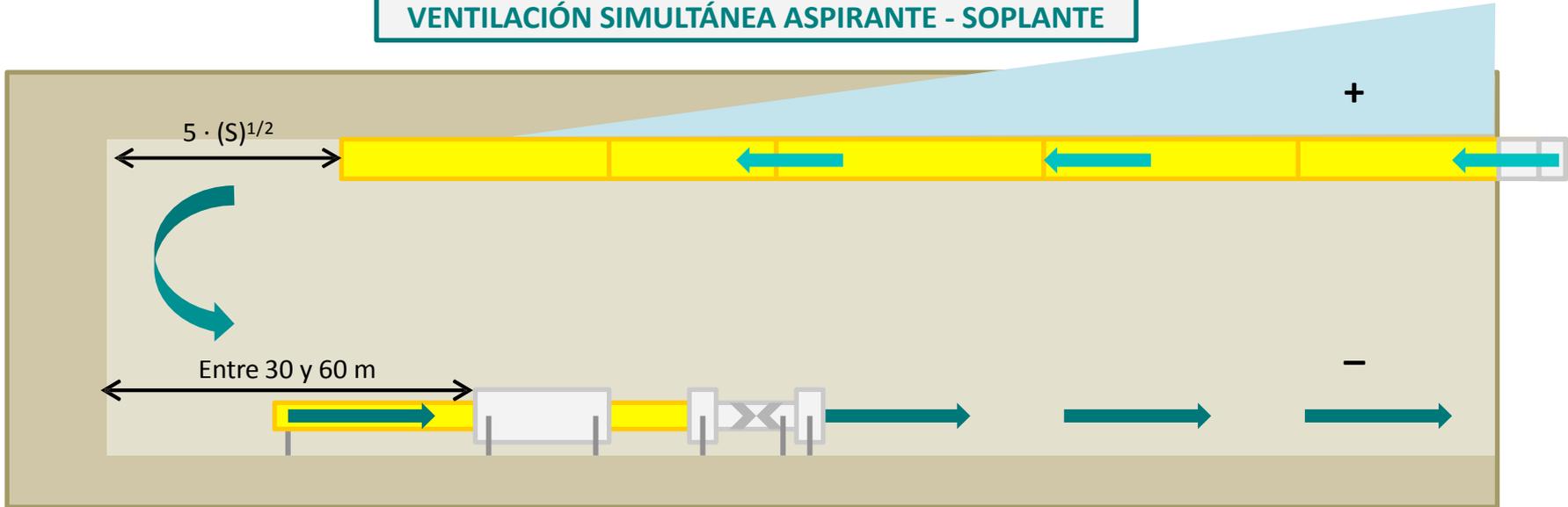


Fuente de la imagen: Adaptada de Talleres Zintrón.

En la imagen se recoge una variante adecuada para el trabajo con rozadoras, quedando el polvo captado en filtros asociados a la ventilación aspirante. La relación caudal soplante suele estar comprendido entre $\frac{2}{3}$ y $\frac{3}{4}$ del soplante.

Tipos de ventilación

VENTILACIÓN SIMULTÁNEA ASPIRANTE - SOPLANTE



Fuente de la imagen: Adaptada de Talleres Zintrón.

En la imagen se recoge una variante adecuada para el trabajo con rozadoras, quedando el polvo captado en filtros asociados a la ventilación aspirante. La relación caudal soplante suele estar comprendido entre $\frac{2}{3}$ y $\frac{3}{4}$ del soplante.

VENTAJAS

- Retorno de humos y gases por la tubería, limpieza rápida y eficaz, pero la instalación tiene una mayor complejidad y coste, la tubería aspirante será rígida, y el aire progresará lentamente hacia el frente, llegando al frente caliente.

DESVENTAJAS

- Mayor complejidad y coste de la instalación, la tubería aspirante será rígida, y el aire progresará lentamente hacia el frente, llegando al frente caliente.

Determinación del caudal

Entre los aspectos a considerar en la determinación del caudal está el calentamiento del aire, la respiración, los gases de escape de las máquinas, el polvo de la perforación o rozado (presencia estable), o los gases de las voladuras. El R.G.N.B.S.M. establece valores admisibles para jornadas de trabajo de ocho horas, y valores punta que podrán alcanzarse y mantenerse durante periodos muy limitados de tiempo. Una superación de las concentraciones admisibles implica el desalojo y ventilación del frente de trabajo. Debe garantizarse además que el porcentaje en oxígeno del aire no sea nunca inferior al 19% en volumen. En un túnel avanzado con perforación y voladura, se considerará lo siguiente:

PERFORACIÓN Y VOLADURA

- 🛠️ **Gases de voladuras.**
- 🛠️ **Gases de los escapes de la maquinaria Diésel + necesidades del personal.**
- 🛠️ **Velocidad mínima de aire en la labor.**

Caso perforación y voladura: se estudia si la combinación Diésel + requerimientos de personal son superiores a los de dilución del tapón de gases. De entre ambos, se escoge el mayor. Tras comprobar si la velocidad proporcionada es mayor a la prescrita en la ITC (entre 0,2 y 8 m/s), se aplica al cálculo.

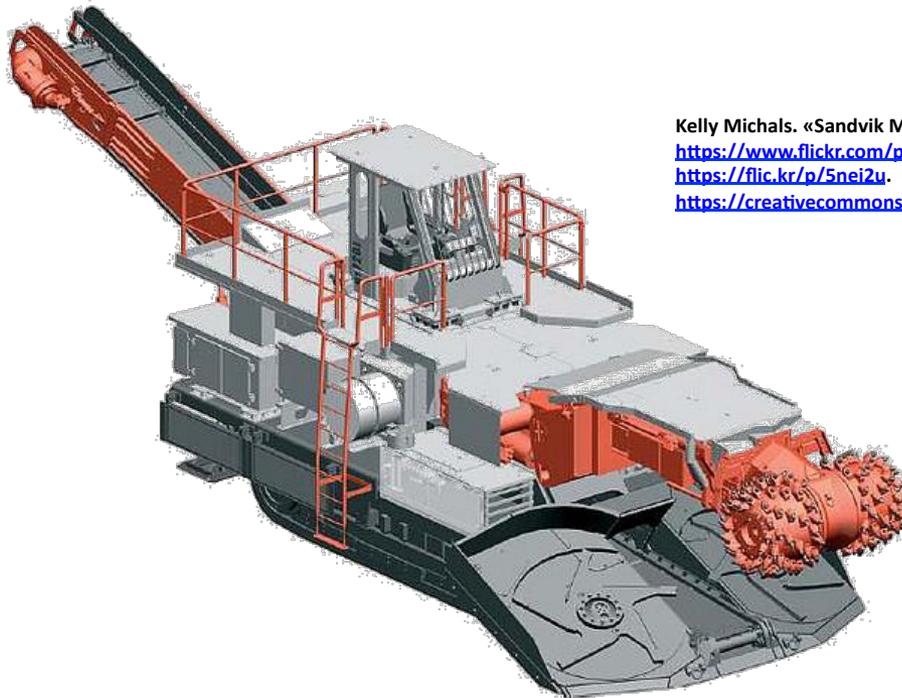
ESCAPE DE LOS MOTORES DIÉSEL

Se considera que por hora y kg de gasoil consumido se necesitan 1500 metros cúbicos de aire. Partiendo de ése dato, y considerando un consumo nominal de 0,272 kg/kW·h para equipos que trabajen a un 60% de su potencia nominal, puede establecerse una expresión que permita definir el consumo de aire en función de la potencia de la maquinaria.

Determinación del caudal

VENTILACIÓN DEL POLVO

Tareas como el rozado del frente, la carga de escombros, la perforación, o la proyección de hormigón redundan en la generación y suspensión de polvo. Si se emplean perforadoras cuya extracción de detritus venga asistida por aire, el caudal suministrado deberá como mínimo coincidir con el empleado por la propia máquina. Si se emplean tuneladoras o rozadoras, suele estimarse un caudal entre los 17 y los 27 m³/m², en base al tipo de roca y el avance:



Kelly Michals. «Sandvik MT 720 Roadheader» (© Sandvik Mining and Construction).

<https://www.flickr.com/photos/rocbolt/>

<https://fic.kr/p/5nei2u>

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/>

Cálculo de la ventilación en ejecución

Determinación del caudal

DILUCIÓN DE LOS HUMOS DE LAS VOLADURAS

La producción de humos en una voladura es instantánea, diluyéndose inicialmente en el volumen comprendido entre el frente y la salida de la tubería de ventilación secundaria. Las concentraciones irán diluyéndose con el tiempo según la expresión:

$$C = C_0 \cdot e^{-(Q \cdot t / V)}$$

- C_0 = concentración inicial.
- C = concentración para un tiempo t .
- Q = caudal suministrado.
- V = volumen de aire entre la salida de la tubería y el frente.

El caudal que se ha de aportar para diluir de C_0 a C en un tiempo t un tapón de volumen V , será:

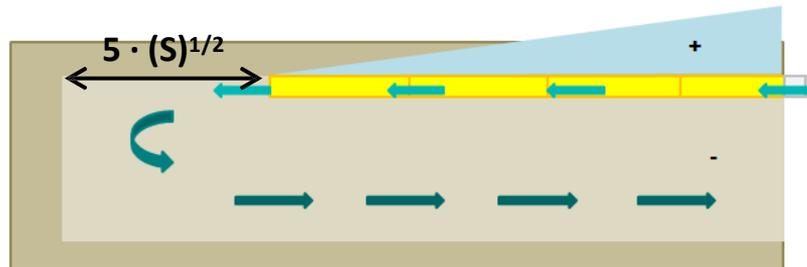
$$Q = \left(\frac{V}{t} \right) \cdot \ln \left(\frac{C_0}{C} \right)$$

Cálculo de la ventilación en ejecución

Determinación del caudal

DILUCIÓN DE LOS HUMOS DE LAS VOLADURAS (EJEMPLO)

Se tiene un túnel con una sección de 70 m^2 , en el que se avanza por metodología convencional (perforación y voladura), con un consumo total por ciclo de 250 kg de explosivo del tipo GOMA 2 (Considérese que la producción de gases es de 935 l/kg de explosivo, con una composición en **CO₂ del 20%, CO del 1,7% y NO_x del 0,9%**). Determinése el caudal mínimo requerido para la dilución del tapón de gases en un tiempo de 30 minutos.



1º CÁLCULO DEL VOLUMEN DEL TAPÓN

L = separación entre el frente y la boca de la tubería se sopla =

$$5 \cdot \sqrt{S} = 5 \cdot \sqrt{70} = 41,83 \text{ m}$$

$$V = S \cdot l = 70 \cdot 41,83 = 2928,3 \text{ m}^3$$

Cálculo de la ventilación en ejecución

Determinación del caudal

DILUCIÓN DE LOS HUMOS DE LAS VOLADURAS (ELEMPLO)

1° CÁLCULO DEL VOLUMEN DEL TAPÓN

L = separación entre el frente y la boca de la tubería se sopla =

$$5 \cdot \sqrt{S} = 5 \cdot \sqrt{70} = 41,83 \text{ m}$$

$$V = S \cdot l = 70 \cdot 41,83 = 2928,3 \text{ m}^3$$

2° VOLUMEN DE GASES GENERADOS EN LA VOLADURA

$$V_{CO_2} = 250 \text{ kg explosivo} \cdot 935 \frac{\text{l gases}}{\text{kg explosivo}} \cdot \frac{20 \text{ l } CO_2}{100 \text{ l gas}} \cdot \frac{\text{m}^3}{1000 \text{ l}} = 46,75 \text{ m}^3$$

$$V_{CO} = 250 \text{ kg explosivo} \cdot 935 \frac{\text{l gases}}{\text{kg explosivo}} \cdot \frac{1,7 \text{ l } CO}{100 \text{ l gas}} \cdot \frac{\text{m}^3}{1000 \text{ l}} = 3,97 \text{ m}^3$$

$$V_{NO_x} = 250 \text{ kg explosivo} \cdot 935 \frac{\text{l gases}}{\text{kg explosivo}} \cdot \frac{0,9 \text{ l } NO_x}{100 \text{ l gas}} \cdot \frac{\text{m}^3}{1000 \text{ l}} = 2,10 \text{ m}^3$$

Determinación del caudal

DILUCIÓN DE LOS HUMOS DE LAS VOLADURAS (ELEMPLO)

3º CONCENTRACIÓN INICIAL DE LOS GASES

$$C_{0_{CO_2}} = \frac{\text{Volumen generado}(m^3) \cdot 10^6}{\text{Volumen del tapón}(m^3)} = \frac{46,75 \cdot 10^6}{2928,3} = 15964,8 \text{ ppm}$$

$$C_{0_{CO}} = \frac{\text{Volumen generado}(m^3) \cdot 10^6}{\text{Volumen del tapón}(m^3)} = \frac{3,97 \cdot 10^6}{2928,3} = 1355,7 \text{ ppm}$$

$$C_{0_{NO_x}} = \frac{\text{Volumen generado}(m^3) \cdot 10^6}{\text{Volumen del tapón}(m^3)} = \frac{2,10 \cdot 10^6}{2928,3} = 717,1 \text{ ppm}$$

4º DETERMINACIÓN DE LOS CAUDALES REQUERIDOS POR GAS

$$C = C_0 \cdot e^{-(Q \cdot t / V)} \quad Q = \left(\frac{V}{t} \right) \cdot \text{Ln} \left(\frac{C_0}{C} \right)$$

$$CO_2 \quad Q = \frac{V}{t} \cdot \text{Ln} \left(\frac{C_0}{C} \right) = \frac{2928,3 \text{ m}^3}{30 \text{ min} \cdot \frac{60 \text{ s}}{\text{min}}} \cdot \text{Ln} \left(\frac{15964,8}{5000} \right) = 1,89 \text{ m}^3$$

$$CO \quad Q = \frac{V}{t} \cdot \text{Ln} \left(\frac{C_0}{C} \right) = \frac{2928,3 \text{ m}^3}{30 \text{ min} \cdot \frac{60 \text{ s}}{\text{min}}} \cdot \text{Ln} \left(\frac{1355,7}{50} \right) = 5,37 \text{ m}^3$$

$$NO_x \quad Q = \frac{V}{t} \cdot \text{Ln} \left(\frac{C_0}{C} \right) = \frac{2928,3 \text{ m}^3}{30 \text{ min} \cdot \frac{60 \text{ s}}{\text{min}}} \cdot \text{Ln} \left(\frac{717,1}{10} \right) = 6,95 \text{ m}^3$$

	UMBRALES LÍMITE
CO	50 ppm
CO ₂	5000 ppm (0,5%)
NO+NO ₂	10 ppm

En teoría, el mayor de los caudales calculados (en este caso el requerido para la dilución del NO_x), garantiza la dilución de las otras especies químicas con menor concentración. La metodología puede variar en función de la fuente, existiendo igualmente recomendaciones como la de la normativa francesa de túneles, que estipula la determinación del caudal para la dilución del tapón de gases en base a la sección del frente (300 l/(m² · s)).

Determinación del caudal



El caudal mínimo de aire de cada labor, mina o cuartel independiente será función del número de personas presentes en el relevo más numeroso a razón de 40 litros por persona y segundo.

REQUERIMIENTOS DE TEMPERATURA

La corriente de ventilación establecida deberá ser capaz de diluir y expulsar los polvos y gases nocivos, suministrar aire respirable e impedir la elevación de la temperatura de las labores, que no excederá de 33 °C de temperatura equivalente en ningún lugar donde regularmente trabaje el personal.

REQUERIMIENTOS DE VELOCIDAD

La velocidad de la corriente de ventilación no será superior a 8 m/s, salvo en los pozos, traviesas y retornos principales que no se utilicen normalmente para transporte de materiales o circulación de personal. A propuesta razonada del explotador, la autoridad minera competente podrá autorizar velocidades mayores en los casos que lo juzgue conveniente.

La velocidad mínima de la corriente de aire en cualquier lugar de la mina en actividad será tal que se consiga una buena dilución de los gases en la misma, de forma que se realice su continua evacuación y se eviten acumulaciones por estratificación en la parte superior o inferior de las labores. En cualquier caso, no será nunca inferior a 0,2 metros por segundo.

Determinación de la sobrepresión

PÉRDIDA DE CARGA

La resistencia aerodinámica de un tramo concreto puede determinarse a partir de la consideración de la pérdida de carga experimentada a lo largo del mismo por un caudal Q.

$$R = \frac{\Delta X}{Q^2}$$

Siendo R la resistencia aerodinámica en Ns^2/m^2 , ΔX la pérdida de carga en Pascales, y Q el caudal de aire, en m^3 . Dicha resistencia aerodinámica puede expresarse además en base a la fórmula general de cálculo de la resistencia aerodinámica, que definida en base al coeficiente de pérdida de carga (función del número de Reynolds, la naturaleza del revestimiento y su rugosidad, aunque si el número de Reynolds es suficientemente grande o la rugosidad importante, sólo dependerá de las condiciones del túnel o conducto, circunstancias comunes en este tipo de circunstancias, por darse un régimen turbulento de circulación), el perímetro del tramo considerado del conducto (P), su sección (S) y su longitud (L).

$$R = 153.03 \cdot \frac{\lambda \cdot P \cdot L}{S^3}$$

Determinación de la sobrepresión

PÉRDIDA DE CARGA EN LA TUBERÍA

Existen tuberías rígidas (metal, madera o plástico) o flexibles (textil o plástico), caracterizándose por su resistencia aerodinámica, coeficientes de fugas, resistencia (tracción, deformación, ácidos, agua, fuego), peso por metro, facilidad de almacenamiento y manejo, conductividad eléctrica.

La pérdida de carga que experimenta el caudal a lo largo del conducto de ventilación se estima mediante la expresión siguiente, dependiente de la longitud y diámetro de la tubería, el caudal, un coeficiente α que podrá valer 2 en tuberías rígidas y 1,7 en tuberías flexibles, y el coeficiente de pérdida de carga, cuyos valores más comunes se adjuntan en la tabla que acompaña a la expresión.

$$\Delta X_c = 0,98 \cdot \frac{\lambda \cdot L \cdot Q^\alpha}{D^5}$$

	TUBERIA	Coficiente pérdida de carga
Rígidas	En materia plástica	0,018
	Metálicas nuevas (lisas)	0,0205
	Contrachapado (madera)	0,022
Flexibles	Bien suspendidas	0,021
	Mal suspendidas	0,026

Determinación de la sobrepresión

PÉRDIDA DE CARGA EN EL TÚNEL

La resistencia aerodinámica del túnel puede clacularse con la fórmula siguiente, dependiente del coeficiente de pérdida de carga, el perímetro del conducto en el tramo, su sección, y su longitud. Particularizando para un peso específico del aire de 12,01 N/m³, se tendrá la fórmula:

$$R = 153,03 \cdot \frac{\lambda \cdot P \cdot L}{s^3}$$

El coeficiente de pérdida de carga se determina mediante la expresión:

$$\lambda = 0,7 \cdot \lambda_p + 0,3 \cdot \lambda_s$$

SOSTENIMIENTO		λ_p	
Roca revestida	Pared bien recortada	0,058	
	Acabado medio	0,084	
	Irregular	0,108	
Roca bulonada	Bien recortada	0,058	
	Acabado medio	0,084	
	Irregular	0,108	
	Con tela metálica	0,13	
Roca revestida	Hormigón liso	0,022	
	Albañilería	Buen estado	0,025
		Estado medio	0,03
		Irregular	0,04

SUELO		λ_s
Hormigonado o asfaltado		0,03
Profundidad media de las rugosidades	5 cm	0,06
	15 cm	0,08
	30 cm	0,108

Cálculo de la ventilación en ejecución

Determinación de la sobrepresión

PÉRDIDA DE CARGA EN EL TÚNEL

Determinada la resistencia R, la pérdida de carga se puede determinar mediante la expresión:

$$\Delta X_t = R \cdot Q^2$$

Han de tenerse en cuenta además las posibles pérdidas de carga en **las singularidades**:

$$\Delta X_{sing} = R_{sing} \cdot Q^2 = \xi \frac{\gamma_{aire} \cdot Q^2}{2 \cdot g \cdot S^2} = \xi \frac{0,61 \cdot Q^2}{S^2}$$

SINGULARIDAD		ξ
Cambio de dirección, ángulo recto aristas vivas		1,4
Cambio de dirección ángulo recto sin aristas	Radio interior = (1/4) · Radio exterior	0,6
	Radio interior = (2/5) · Radio exterior	0,3
Emboquille		0,6
Trampilla		3,6
Enlace con pozo con aristas vivas		2
Enlace con pozo sin aristas		1

Cálculo de la ventilación en ejecución

Determinación de la sobrepresión y potencia absorbida

PÉRDIDA DE CARGA EN EL TÚNEL

La presencia de las tuberías en la sección del túnel incrementará la resistencia aerodinámica, respondiendo a la expresión:

$$R = R_t \cdot (1 + 0,15 \cdot \sum d_k)$$

Siendo R_t la resistencia total del túnel, R la resistencia del túnel sin considerar los obstáculos, y d_k el diámetro de cada tubería presente en el túnel.

SOBREPRESIÓN

La depresión que habrá de producir el ventilador será igual a la suma de la pérdida de carga en la tuberías, en el túnel, y la debida a las singularidades y obstáculos.

$$\Delta H = \Delta X_t + \Delta X_c + \Delta X_{sing}$$

POTENCIA ABSORBIDA POR EL VENTILADOR

La potencia absorbida por el ventilador será:

$$W = Q \cdot \Delta H \cdot \frac{1}{\eta}$$

Siendo W la potencia absorbida por el ventilador en W , Q el caudal en m^3/s , ΔH la depresión en Pascales y el rendimiento del ventilador.

Definido el caudal requerido en el frente Q_f , se estima la presión media en la tubería.

PRESIÓN
DINÁMICA DEL
FRENTE

$$P_f = \gamma \cdot \frac{V_F^2}{2g} = \frac{\gamma}{2g} \left[\frac{Q_F}{\pi \cdot (D/2)^2} \right]^2$$



Resultado obtenido en Pascales, para expresarlo en mm de columna de agua debe dividirse por 10.

Esta presión media nos permite calcular el caudal de fugas y el caudal del ventilador.

$$Q_v - Q_f = \theta \cdot (P_f)^{1/2} n l$$



- Q = coeficiente de fugas de la instalación.
- l = longitud del tramo de tubería.
- $\frac{1}{2}$ = régimen de fuga (0,5 representa régimen turbulento).
- n = número de tramos.

P_f debe introducirse en mm de columna de agua.

Otra posibilidad de cálculo

Determinación de la potencia del ventilador

$$Q_v - Q_f = \theta \cdot (P_f)^{1/2} n l$$

Coeficiente de fugas (θ)	Calidad de la instalación
$1 \cdot 10^{-6}$	Excelente
$0,5 \cdot 10^{-5}$	Buena
$1 \cdot 10^{-5}$	Muy buena
$0,5 \cdot 10^{-4}$	Regular
$0,5 \cdot 10^{-3}$	Mala
$1 \cdot 10^{-3}$	Muy mala

Supuesto un caudal medio $Q = \sqrt{Q_v \cdot Q_f}$, la pérdida de carga en la tubería será: $\Delta X = nrlQ^2$

- r = resistividad o resistencia lineal en un conducto de ventilación (ver transparencia siguiente). Debe introducirse en Kilomurgues.

La pérdida de carga es igual al producto de la Resistencia total del tramo (en este caso de tramo de tubería), por el cuadrado del caudal circulante por la misma.

El punto de funcionamiento del ventilador es:

$$Q_v = Q_f + \theta(P_f)^{1/2}$$

$$\Delta H = \Delta X + P_f$$

- P_f = la presión dinámica en el frente, representa la energía gastada en el retorno del aire a través del túnel o galería.

Otra posibilidad de cálculo

Determinación de la potencia del ventilador

Las tuberías de canalización del aire en fondo de saco pueden ser flexibles (soplantes lisos o aspirantes reforzados con aros de acero) o rígidas (tuberías metálicas).

El kilomurgue es la resistencia al paso de 1 m³/s en un conducto que da lugar a la pérdida de carga de 1 mm de columna de agua.

La resistencia lineal de un conducto de ventilación se calcula mediante la expresión:

$$r = 15,3 \cdot \lambda \cdot \frac{P}{S^3}$$

- **r** = resistencia lineal en Ns²/m⁹.
- **P** = perímetro en m.
- **S** = sección recta en m².

Si se opera con el sistema internacional:

$$r = 0,153 \cdot \lambda \cdot \frac{P}{S^3}$$

- **r** = resistencia lineal en Ns²/m⁹.
- **P** = perímetro en m.
- **S** = sección recta en m².

ESTA FÓRMULA ES APLICABLE TANTO A LAS TUBERÍAS, COMO A LOS TÚNELES O GALERÍAS.

$$r = 15,3 \cdot \lambda \cdot \frac{P}{S^3} \quad r = 0,153 \cdot \lambda \cdot \frac{P}{S^3}$$

Valores típicos de λ .

- $\lambda = 0,024$, tubería rígida o flexible soplante.
- $\lambda = 0,080$, tubería rígida o flexible soplante.
- $\lambda = 0,107$, tubería rígida o flexible soplante.
- $\lambda = 0,050$, túnel carretero con pared gunitada.
- $\lambda = 0,300$, galería de mina tradicional entibada con cuadro metálico.

Valores de r para distintos materiales y diámetros de tubería (evita realizar todo el cálculo para la tubería).

Φ Tubería (mm)	Metálica sop/asp (μ/m)	Flexible sop. (μ/m)	Flexible asp. (μ/m)
150	–	–	2900
300	900	1100	1800
400	260	260	800
500	70	70	260
600	28	30	120
700	15	13.5	65
800	8	8	25
900	4	4,6	–
1000	2,2	3	8
1100	1,2	1,8	3,6
1200	0,73	1,32	2
1300	0,4	0,8	1,5
1400	0,22	0,70	1,10
1500	0,20	0,45	0,80
1600	0,15	0,36	0,50
1700	0,12	0,26	0,35
1800	–	0,20	0,20
1900	–	0,153	–
2000	–	0,130	0,14
2100	–	0,115	–
2200	–	0,084	–
2300	–	0,073	–
2400	–	0,062	–
2500	–	0,044	–
2600	–	0,042	–
2700	–	0,040	–
2800	–	0,034	–

El punto de funcionamiento del ventilador es:

$$Q_v = Q_f + \theta(P_f)^{1/2}$$

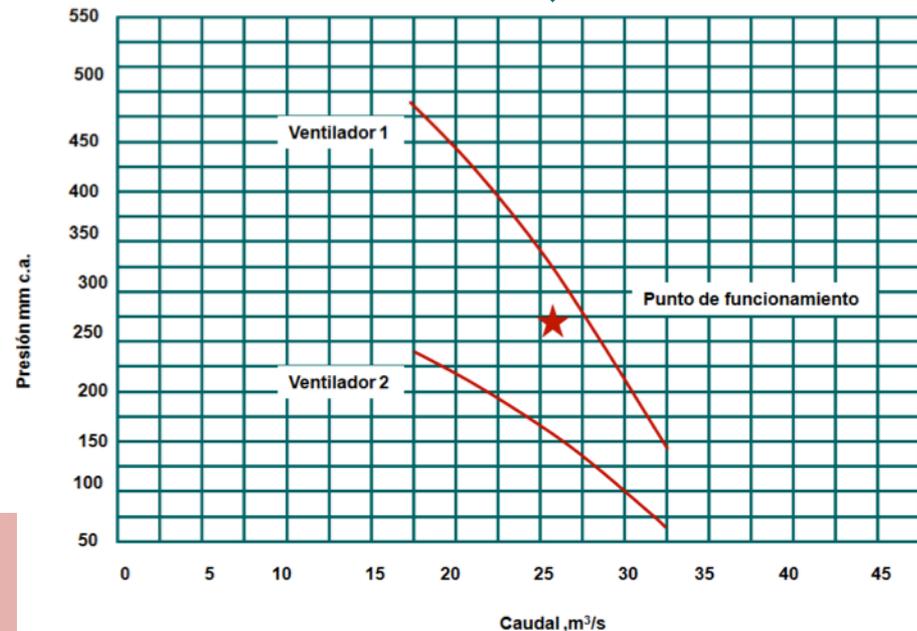
$$\Delta H = \Delta X + P_f$$

La potencia del ventilador será:

$$P = \Delta H \cdot Q / \eta$$

- **H** = pérdida total de carga en el túnel y el retorno.
- **Q** = caudal total (requerido en el frente y pérdidas de caudal).
- **η** = eficiencia del equipo.

Al seleccionar el modelo del ventilador del catálogo se escogerá aquel cuya curva quede por encima del punto de funcionamiento requerido, ya que será el que satisfaga las demandas.



Ejemplo

Túnel de 500 m de longitud con sección excavada de 100 m^2 , ejecutado mediante avance (sección de 76 m^2) y destroza (sección de 24 m^2), con perforación y voladura. La potencia Diésel instalada es de 2380 Cv, con un factor de simultaneidad del 60%. El número de operarios será de 20. Para la estimación del caudal requerido para la dilución del tapón de gases de la voladura, se seguirán las prescripciones de la normativa francesa ($300 \text{ l}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$).

Ejemplo

Túnel de 500 m de longitud con sección excavada de 100 m², ejecutado mediante avance (sección de 76 m²) y destroza (sección de 24 m²), con perforación y voladura. La potencia Diésel instalada es de 2380 Cv, con un factor de simultaneidad del 60%. El número de operarios será de 20. Para la estimación del caudal requerido para la dilución del tapón de gases de la voladura, se seguirán las prescripciones de la normativa francesa (300 l/(s·m²)).

CAUDAL DE AIRE NECESARIO

Caudal para el personal: (ITC 04.07.1, 40 l/persona)

$$Q_1 = \frac{20 \text{ personas} \cdot 40 \frac{\text{l} \cdot \text{persona}}{\text{s}}}{1000} = 0,8 \text{ m}^3 / \text{s}$$

Caudal por máquinas diésel:

$$Q_2 = 2380 \text{ cv} \cdot 0,736 \frac{\text{kW}}{\text{cv}} \cdot 0,066 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 0,60 = 69,36 \text{ m}^3 / \text{s}$$

CAUDAL DE AIRE NECESARIO

Caudal para la dilución de humos de la voladura.

$$Q_1 = \frac{300(l/s) \cdot 76m^2}{s} = 22,8m^3/s$$

Al actuar simultáneamente durante la operación equipos y operarios, los requerimientos de caudal se suman, ya que es una demanda simultánea.



$$Q_1 + Q_2 = 0,8 + 69,36 < 22,8 = Q_3$$

¿El caudal obtenido proporciona una velocidad de circulación del aire en el retorno conforme a la ITC 04.7.01? 0,92 está comprendido entre 0,2 y 8 m/s, por lo que el caudal calculado cumplirá dicha condición.

En caso de haber aplicado un cálculo basado en el consumo específico de explosivo, debiendo tener en cuenta la expresión exponencial que liga las concentraciones inicial y final de los diversos gases, por un tiempo de dilución de media hora, los caudales requeridos hubiesen sido de 3,85 m³/s, valor muy inferior al adoptado por condiciones de enunciado.

Tras comparar el caudal requerido para los operarios y la dilución de los gases de escape de los equipos Diésel con el requerido para la dilución del tapón de gases de la voladura, al ser mayor la suma de los primeros, es ese el caudal resultante requerido. De haber sido mayor el caudal para la dilución de gases, ése sería el resultante a considerar.

$$v = \frac{Q}{s} = \frac{0,8 + 69,36}{76} = \frac{70,16}{76} = 0,92 \frac{m}{s}$$

Ejemplo

FUGAS

VELOCIDAD

$$V_F = \frac{Q_F}{\pi \cdot (D/2)^2} = \frac{70,16}{\pi \cdot (1,6/2)^2} = 34,89 \text{ m/s}$$



Diámetro de la tubería, 1600 mm.

PRESIÓN DINÁMICA

$$P_f = \gamma \cdot \frac{V_F^2}{2g} = 13 \frac{\text{N}}{\text{m}} \cdot \frac{34,89^2}{2 \cdot 9,81} = 806,58 \text{ Pascales}$$

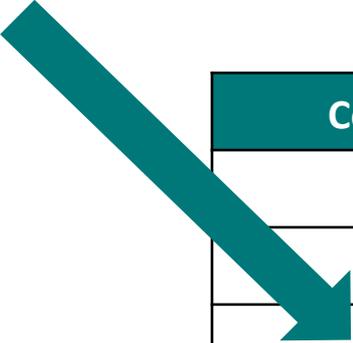


Peso específico del aire.

FUGAS

TIPO DE INSTALACIÓN:
REGULAR

$$P_f = \gamma \cdot \frac{V_F^2}{2g} = 13 \frac{N}{m} \cdot \frac{34,89^2}{2 \cdot 9,81} = 806,58 \text{ Pascales} = 80,66 \text{ mm c. agua}$$



Coefficiente de fugas (θ)	Calidad de la instalación
$1 \cdot 10^{-6}$	Excelente
$0,5 \cdot 10^{-5}$	Buena
$1 \cdot 10^{-5}$	Muy buena
$0,5 \cdot 10^{-4}$	Regular
$0,5 \cdot 10^{-3}$	Mala
$1 \cdot 10^{-3}$	Muy mala

$$Q_v = Q_f + \theta(P_f)^{1/2} = 0,5 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{80,66} \cdot 1 \text{ tramo} \cdot 500 \text{ m} = 0,225 \text{ m}^3 / \text{s}$$

CAUDAL DE RÉGIMEN DE TRABAJO DEL VENTILADOR

$$Q_v = Q_{FRENTE} + Q_{FUGAS} = Q_f + \theta(P_f)^{1/2}nl = 70,16 + 0,225 = 70,38 m^3/s$$

PÉRDIDAS DE CARGA

El caudal medio circulante por la tubería a introducir para el cálculo de la pérdida de carga en la misma se determina según la expresión siguiente:

$$Q_{medio} = \sqrt{Q_{VENTILADOR} \cdot Q_{FRENTE}} = \sqrt{Q_v \cdot Q_f} = \sqrt{70,16 \cdot 70,38} = 70,26 m^3/s$$

PÉRDIDAS DE CARGA

$$\Delta X = nrlQ^2 = 1 \text{ tramo} \cdot (0,36/1000) \cdot 500 \cdot (70,26)^2 = 888,56 \text{ mm_c.a.}$$

Φ Tubería (mm)	Metálica sop/asp (μ/m)	Flexible sop. (μ/m)	Flexible asp. (μ/m)
150	–	–	2900
300	900	1100	1800
400	260	260	800
500	70	70	260
600	28	30	120
700	15	13.5	65
800	8	8	25
900	4	4,6	–
1000	2,2	3	8
1100	1,2	1,8	3,6
1200	0,73	1,32	2
1300	0,4	0,8	1,5
1400	0,22	0,70	1,10
1500	0,20	0,45	0,80
1600	0,15	0,36	0,50

$$\Delta H = \Delta X + P_f = 888,56 + 80,58 = 969,14 \text{ mm_c.a.}$$

PUNTO DE FUNCIONAMIENTO Y POTENCIA DEL VENTILADOR

$$Q_v = Q_{FRENTE} + Q_{FUGAS} = Q_f + \theta(P_f)^{1/2}nl = 70,16 + 0,225 = 70,38 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\Delta H = \Delta X + P_f = 888,56 + 80,58 = 969,14 \text{ mm}_{\text{c.a.}} = 9691,4 \text{ Pa}$$

POTENCIA

$$P = \Delta H \cdot Q / \eta = (9691,4 \text{ Pa} \cdot 70,38 \text{ m}^3/\text{s}) / 0,8 = 852600 \text{ W} = 852,600 \text{ kW}$$



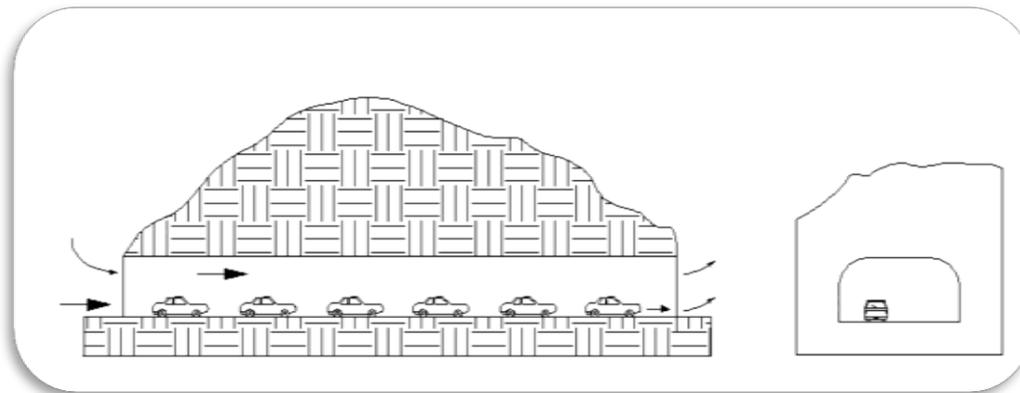
Debe prestarse especial atención a las unidades. Al introducirlas en P_a y m^3/s , el resultado se obtiene en W.

Principales variantes

El presente apartado hará alusión a las variantes existentes para la ventilación de túneles carreteros en explotación o servicio: ventilación transversal pura, ventilación semi-transversal, ventilación longitudinal, ventilación longitudinal con ventiladores en pozos y ventilación natural.

VENTILACIÓN NATURAL

Debida a factores como las diferencias meteorológicas existentes entre las bocas, la difusión, la acción de los propios vehículos circulantes, y el viento. En túneles de longitud reducida, todos estos efectos pueden mantener las concentraciones de humos y gases en niveles seguros, no necesitando sistemas de ventilación artificial.

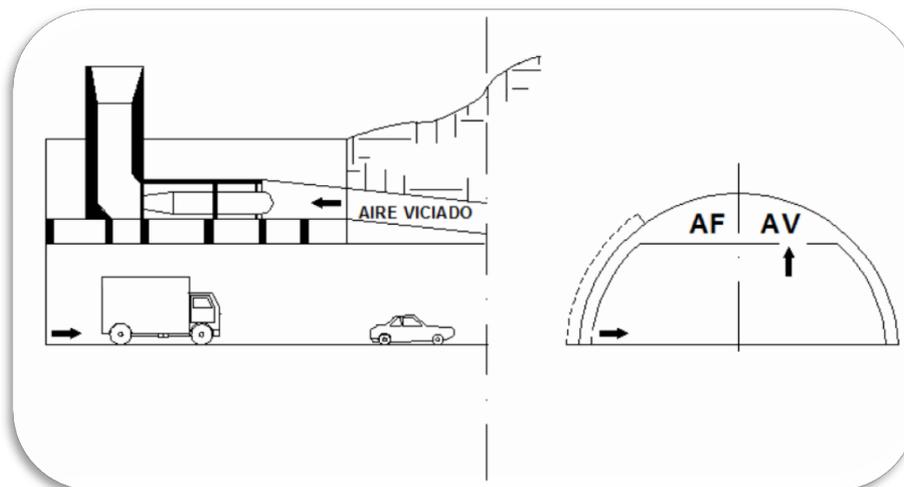


Principales variantes

VENTILACIÓN TRANSVERSAL PURA

En lugar de seguir el eje longitudinal del túnel, el aire avanza transversalmente dentro de una misma sección. Dispone de un canal de ventilación, y un segundo conducto con toberas distribuidas uniformemente a lo largo del mismo, por el que se aspira un volumen de aire viciado igual al inyectado, con lo que se garantizan unos niveles de contaminación bajos y constantes en todo el túnel. Es el sistema que ofrece mayores ventajas frente a incendios, y es por ello que está presente en la mayoría de los túneles de gran longitud. En caso de fuego, los ventiladores de aspiración entrarían a funcionar en régimen de máxima potencia.

Como posible mejora del sistema puede plantearse una apertura total y automática de las toberas en función de la temperatura.



El estudio del sistema de ventilación debe incluir un plan de alarma frente a incendio, que describa su funcionamiento según el lugar en que tenga lugar el siniestro. ofrece buen rendimiento en túneles de mediana y gran longitud, destacando además por su mayor seguridad y confort. Es igualmente el que supone mayores inversiones y costes de operación.

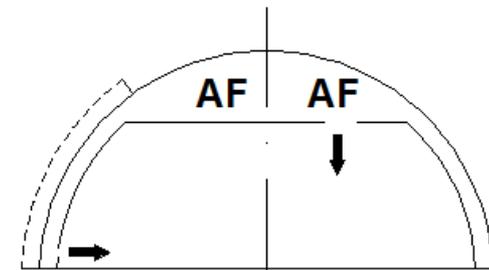
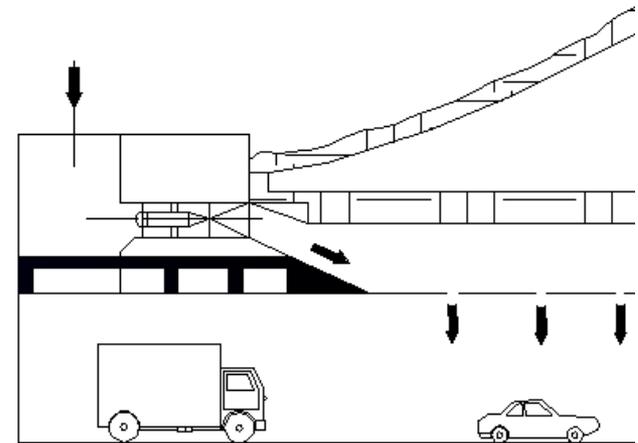
Principales variantes

VENTILACIÓN SEMI-TRANSVERSAL

El aire fresco se distribuye de manera uniforme a lo largo del túnel, empleando para ello un canal paralelo al eje del mismo, provisto de toberas dispuestas a intervalos regulares. El aire viciado recorre el túnel hacia las embocaduras, manteniéndose un nivel de contaminación uniforme a lo largo del mismo. Los conductos de ventilación en caso de contar con sección circular, suelen situarse bajo la calzada y junto a la bóveda. En una gran mayoría de túneles de montaña, los conductos suelen emplazarse bajo la bóveda, separados del espacio de tránsito de vehículos mediante un falso techo. En túneles bajo ríos, bahías, etc., en los que suele imponerse la sección rectangular, son comúnmente laterales o se sitúan entre las calzadas en caso de ser unidireccionales. Todo ello contribuye al encarecimiento de sus costes de instalación frente a los asociados al sistema longitudinal.

Como principal ventaja ofrece la reversibilidad en caso de incendio, permitiendo la absorción de humos. El sistema puede optimizarse añadiendo toberas mayores que las normales de ventilación, que se abran en las cercanías del incendio. El túnel puede ser dividido en sectores de ventilación o cantones, a los que el aire fresco accede mediante conductos independientes. Esto facilita la aspiración del humo en caso de incendio en un determinado sector, evitándose así su difusión al resto del túnel.

Los puntos de entrada del aire se emplazan en las cercanías de los embocillos del túnel. Si éste es de gran longitud, podrán utilizarse pozos para la toma de aire fresco.



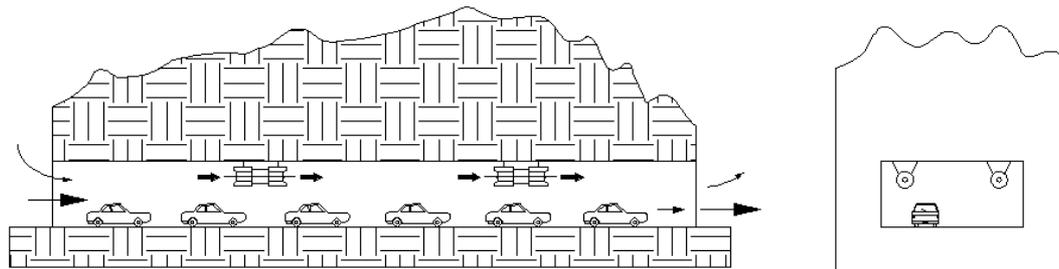
Principales variantes

VENTILACIÓN LONGITUDINAL

Plantea el acceso del aire fresco por una boca, y su salida por la opuesta, viendo favorecida su circulación por la acción de un número variable de ventiladores dispuestos a lo largo del túnel, suspendidos del techo o en los hastiales. Dichos equipos aspiran por uno de los lados, y proyectan el aire a gran velocidad por el otro, comunicando la energía del chorro a la masa de aire contenido en el espacio de tráfico.

Común en túneles urbanos por sus pequeñas dimensiones. En caso de circulación unidireccional, la acción de los ventiladores puede verse favorecida por el efecto pistón de los automóviles. El rendimiento de los ventiladores aumenta al alejarlos del techo o las paredes, y con rejillas de desviación de la corriente de aire en la salida. Crece además con la separación entre ellos, alcanzándose el máximo en distancias comprendidas entre los 80 y los 120 metros, y con el incremento en la relación entre la sección útil del ventilador y la propia del túnel.

Aplicable a túneles unidireccionales de casi cualquier longitud. En los de doble sentido de circulación ha de tomarse precauciones especiales destinadas a evitar el peligro asociado a dicho sistema en caso de incendio.



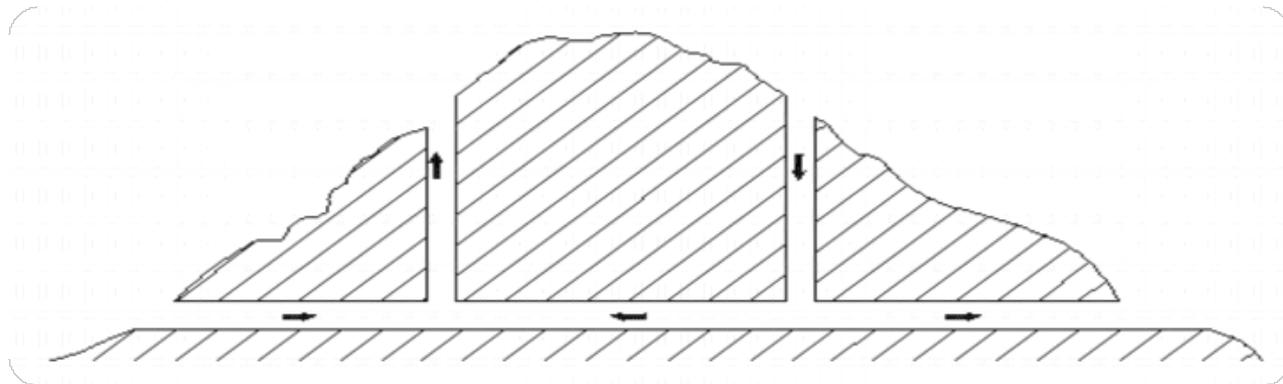
Principales variantes

VENTILACIÓN LONGITUDINAL CON VENTILADORES EN POZOS

La atmósfera exterior se comunica con el interior del túnel mediante pozos provistos de ventiladores: el aire aspirado recorre el espacio de tráfico longitudinalmente, y es expulsado por dichos pozos. Por razones prácticas se recomienda la construcción de un edificio de aspiración dotado de los pertinentes espacios que eviten la obstrucción por elementos extraños, como puede ser la nieve en túneles de montaña.

No existen molestias para el tráfico asociadas a la presencia de chorro fuerte de aire fresco, evitándose además los problemas asociados a la evacuación de aire viciado por las bocas si éstas se encuentran en zonas edificadas o próximas a las mismas. Los pozos tramifican el interior del túnel, concepto de gran utilidad en caso de incidentes graves como incendios.

Si se cuenta con varios pozos, debe preverse que la dirección sea reversible en pozos correlativos: si en 2 aledaños la dirección del chorro fuese idéntica, el tramo de túnel comprendido entre ellos carecería de ventilación.



Principales variantes

VENTILACIÓN LONGITUDINAL CON VENTILADORES EN POZOS

TIPO DE VÍA	SENTIDO DE TRÁFICO	DENSIDAD DE TRÁFICO	SISTEMA DE VENTILACIÓN Y LONGITUD DE APLICACIÓN	
			Longitudinal (Natural/forzada)	Transversal (Total o parcial)
Vía interurbana	Único	Fluido	Hasta 2.000 m	Desde 1.500 m
	Único	Escaso	Hasta 3.000 m	Desde 2.000 m
	Doble	Fluido	Hasta 1.000 m	Desde 800 m
Vía urbana	Único	Fluido, denso raramente	Hasta 2.000 m	A partir de 1.500 m
	Único	Habitualmente denso	Hasta 1.500 m	A partir de 800 m
	Doble	Fluido o denso	Hasta 400 m	A partir de 250 m

Determinación de los requisitos de caudal

Los caudales de dilución se determinan en función de los volúmenes de gases y humos que deben ser arrastrados al exterior por la corriente de aire. Dependerán de las emisiones producidas dentro del túnel, y de los umbrales admisibles para cada una de esas sustancias.

Si los gases de escape de los vehículos cuentan con una composición normal, únicamente deberán limitarse las concentraciones de monóxido de carbono (CO), de los óxidos de nitrógeno (NO_x) y de humos, ya que si estos no se diluyen lo suficiente, automáticamente estarán presentes en exceso el resto de sustancias contaminantes. De entre los resultados obtenidos, deberá seleccionarse el mayor. A continuación se recogen algunos coeficientes límites comúnmente empleados, así como los principales efectos de los contaminantes señalados sobre la salud.

Determinación de los requisitos de caudal

LÍMITES ASUMIBLES

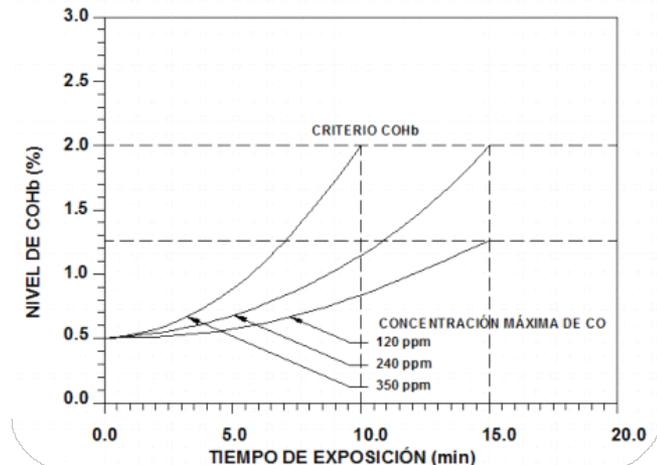
CO



Para saturaciones menores o iguales del 10% en sangre de carboxihemoglobina, no se aprecian síntomas en el organismo. En el incremento de la velocidad de saturación influye tanto el nivel de actividad que se esté desarrollando, como la altitud. Considerando distintos esquemas de ventilación, con un nivel máximo admisible del 2%, se establecerán distintos tiempos máximos de exposición.

VENTILACIÓN LONGITUDINAL

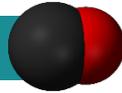
Según las recomendaciones estadounidenses, con 120 p.p.m. de CO en el aire del túnel, tras una exposición de 15 minutos, el nivel de COHb en sangre es aproximadamente del 1,25%. Para 240 p.p.m. de CO, tras 15 minutos se alcanza el 2%. Si la concentración se eleva hasta 350 p.p.m., la permanencia máxima admisible se reduce a 10 minutos.



Determinación de los requisitos de caudal

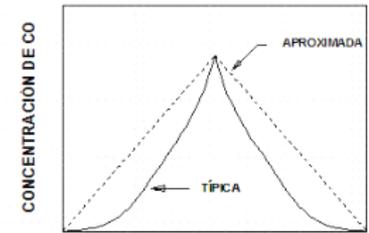
LÍMITES ASUMIBLES

CO

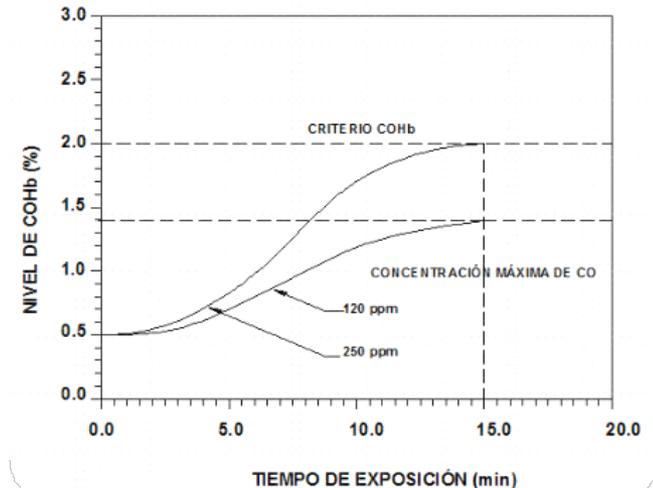


SEMI-TRANSVERSAL CON ASPIRACIÓN DE AIRE VICIADO

Con una concentración de 120 p.p.m., tras una exposición de 15 minutos se alcanza un nivel en sangre de COHb del 1,75%. Con 150 p.p.m., la permanencia máxima admisible es de 15 minutos.



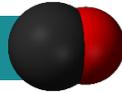
LOCALIZACIÓN RELATIVA EN EL TÚNEL



Determinación de los requisitos de caudal

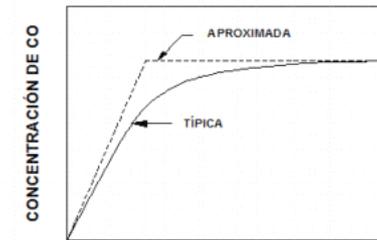
LÍMITES ASUMIBLES

CO

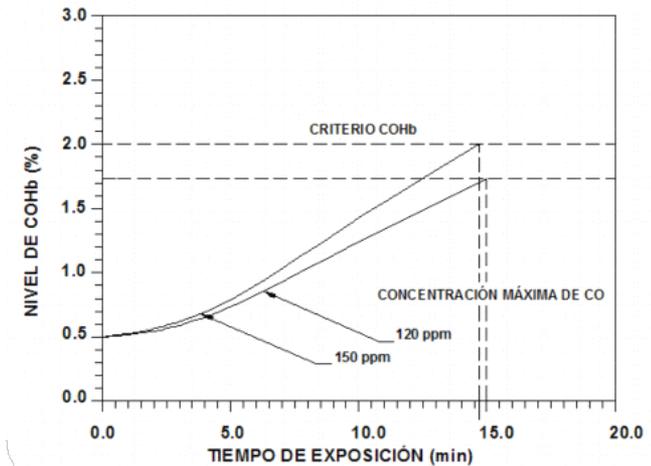


SEMI-TRANSVERSAL CON ASPIRACIÓN DE AIRE FRESCO

Con una concentración de 120 p.p.m., tras una exposición de 15 minutos se alcanza un nivel en sangre de COHb del 1,75%. Con 150 p.p.m., la permanencia máxima admisible es de 15 minutos.



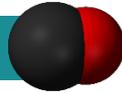
LOCALIZACIÓN RELATIVA EN EL TÚNEL



Determinación de los requisitos de caudal

LÍMITES ASUMIBLES

CO



TRANSVERSAL

Para una concentración en el aire del túnel de 120 p.p.m., el nivel alcanzado en sangre tras un período de exposición de 15 minutos resulta ligeramente inferior al 2% de COHb. En el caso de 180 p.p.m. de CO la permanencia máxima será de 10 minutos, y de 5 minutos si se tiene 360 p.p.m.

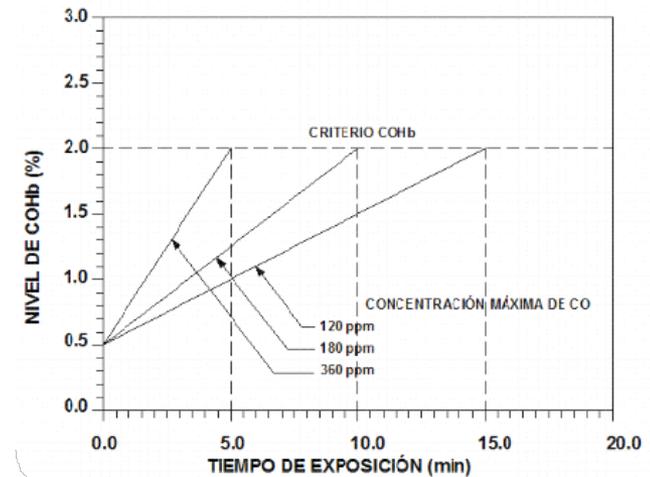
TÚNELES SUCESIVOS

La reducción del porcentaje de COHb no se produce instantáneamente al cesar la exposición al CO: para que descienda de un 10% a un 5% se requieren de 3 a 5 horas de aire fresco. Es por ello que en el caso de requerirse túneles sucesivos en un mismo trazado es conveniente.

CONCENTRACIÓN DE CO



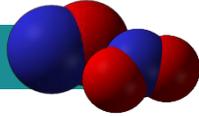
LOCALIZACIÓN RELATIVA EN EL TÚNEL



Determinación de los requisitos de caudal

LÍMITES ASUMIBLES

NO₂ - (NO_x)



El NO₂ viene a ser un 10% del total de los NO_x. Los umbrales admisibles propuestos para dichos compuestos son válidos para túneles abiertos a peatones y ciclistas. Como concentración límite admisible en el punto de mayor concentración del túnel puede considerarse el valor CNO_x = 15 ppm (CNO₂ = 1,5 ppm). En el esquema de ventilación longitudinal puede apreciarse un crecimiento en la presencia de óxidos nitrosos desde el punto de entrada del aire fresco, hasta el punto de salida del aire viciado. El valor máximo admisible en el punto medio del túnel será la concentración media entre la máxima de 1,5 ppm y la concentración inicial de NO₂ en el aire introducido desde el exterior del túnel, situada en el entorno de 0,03 ppm. Si se registra en dicho punto un contenido en NO₂ superior a las 1,5 ppm durante más de 15 minutos, deberá ser cerrado al tráfico. Si el esquema de ventilación empleado es transversal o semi-transversal, la concentración se mantendrá aproximadamente constante a lo largo del túnel.

Determinación de los requisitos de caudal

LÍMITES ASUMIBLES

OPACIDAD

En función de las condiciones concretas de explotación del túnel (circulación fluida, congestionada, cierre u operaciones de mantenimiento), se definen los límites del coeficiente de extinción K , que determinan los niveles admisibles de humos debidos a los vehículos de motor diésel. El coeficiente de extinción (K_{10} o K_e , dependiendo de la base adoptada, decimal o neperiana), es un indicador óptico de la opacidad del aire del túnel.

$$\phi = \phi_0 \cdot 10^{-K_{10} \cdot L}$$

($K_{10} = 0,43 \cdot K_e$). El cociente Φ_0/Φ se denomina grado de transparencia, y el factor K_{10} coeficiente de extinción. En los líquidos perfectamente transparentes Φ_0/Φ vale 1, y K_{10} es nulo.

Ley de Lambert-Beer

La ley empírica de Lambert-Beer establece que el coeficiente de extinción (K_1) es proporcional a la concentración:

K_0 = coeficiente de extinción correspondiente a una disolución de concentración unitaria. $K_1 = K_0 \cdot c$

Resulta difícil establecer la correlación entre el coeficiente K y la distancia de visibilidad, si bien se puede citar como ejemplo las propuestas para túneles de iluminación media, en que se dispondrá de una visibilidad de 80 metros para $K = 0,01 \text{ m}^{-1}$, y de 120 m para $K = 0,005 \text{ m}^{-1}$ (Estefanía, 1993).

Determinación de los requisitos de caudal

METODOLOGÍAS DE CÁLCULO DE LOS CAUDALES REQUERIDOS

Existen varias propuestas en la bibliografía para la determinación de los caudales (criterios publicados por el C.E.T.U., por el W.R.C., etc.), caracterizándose cada una de ellas por la consideración de diversos factores y coeficientes. El grado de compartimentación del parque vehicular influirá en los resultados.

CAUDAL PARA LA DILUCIÓN DE CO

$$Q_{0CO} = q_{0CO} \cdot M \cdot K_{hh} \cdot K_s \cdot K_f \cdot L$$

- Q_{0CO} = cantidad total de CO producida en el túnel (m³/h).
- q_{0CO} = valor base de producción de CO (m³/km vehículo). Puede considerarse de 0,013 m³/km vehículo, para el caso de conducción en carretera horizontal a 60 Km/h. Se estima que los motores en ralentí emiten 0,5 m³/km vehículo, para un consumo de combustible de 1 l/h, con un porcentaje de CO en los gases de escape del 6%.
- M = volumen de tráfico (vehículo/h).
- L = longitud del túnel.

Determinación de los requisitos de caudal

METODOLOGÍAS DE CÁLCULO DE LOS CAUDALES REQUERIDOS

CAUDAL PARA LA DILUCIÓN DE CO

$$Q_{0CO} = q_{0CO} \cdot M \cdot K_{hh} \cdot K_s \cdot K_f \cdot L$$

• K_{hh} = factor de corrección por altura sobre el nivel del mar. A mayor sea ésta, menor es la riqueza en oxígeno del aire, por lo que la combustión interna es más deficiente y produce mayor cantidad de CO.

Altura sobre el nivel del mar (m)	Factor de corrección K_{hh}
400	1,25
800	1,60
1000	2,00

Pendiente (%)	Factor de corrección K_s
- 4	0,85
- 2	0,95
0	1
2	1,1
4	1,2
6	1,3

• K_s = factor de corrección por pendiente. El consumo de combustible y la emisión de CO son proporcionales a la adversidad de la pendiente, por lo que se recomienda dar tanto a los túneles como a las rampas de acceso a los mismos la menor posible, con el fin de que los vehículos ingresen en los mismos en régimen estable

Determinación de los requisitos de caudal

METODOLOGÍAS DE CÁLCULO DE LOS CAUDALES REQUERIDOS

CAUDAL PARA LA DILUCIÓN DE CO

• K_f = factor de corrección por conducción a velocidad distinta a la de diseño.

Velocidad (Km/h)	Factor de corrección K_f
5	6,5
10	3,5
20	2
30	1,5
40	1,2
50	1,1
60	1
70 y 80	0,9

$$Q_{0CO} = q_{0CO} \cdot M \cdot K_{hh} \cdot K_s \cdot K_f \cdot L$$

$$Q_{0aire} = \frac{Q_{0CO} \cdot 10^6}{C_{CO}} \quad \leftarrow \text{CONDICIONES NORMALES}$$

CONDICIONES REALES

$$Q_{aire} = Q_{0aire} \cdot \frac{P_0 \cdot T_t}{P \cdot T_0}$$

- Q_{aire} = caudal de aire (m³/h) para las condiciones reales de presión y temperatura.
- q_{0aire} = caudal de aire (m³/h) en condiciones normales de presión y temperatura.
- P_0 = presión normal (760 mm Hg).
- P = presión prevista en el interior del túnel.
- T_0 = temperatura normal (273 K).
- T_t = temperatura media del punto medio del túnel.

Determinación de los requisitos de caudal

METODOLOGÍAS DE CÁLCULO DE LOS CAUDALES REQUERIDOS

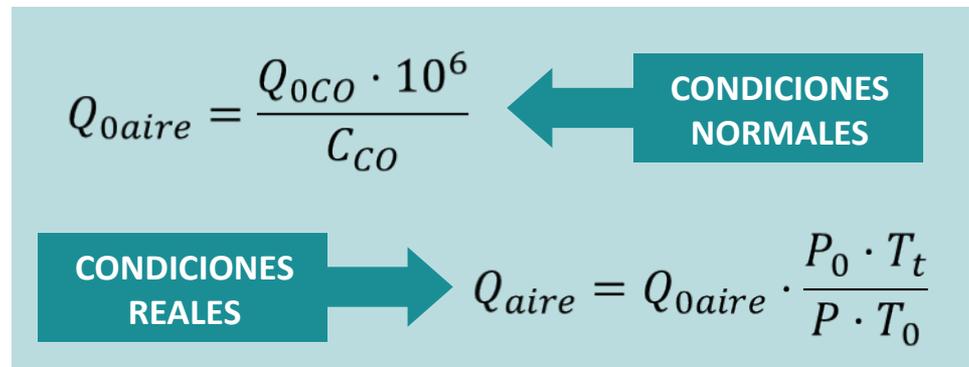
CAUDAL PARA LA DILUCIÓN DE NO_x

$$Q_{NOx} = q_{NOx} \cdot (M_l + K_t \cdot M_p) \cdot K_s \cdot L$$

- Q_{NOx} = cantidad total de NO_x producida en el túnel (m³/h).
- q_{NOx} = valor base de producción de NO_x. Se considera de $1,3 \cdot 10^{-3}$ m³/km.
- M_l = tráfico de vehículos ligeros (vehículos/h).
- M_p = intensidad horaria de vehículos pesados (vehículos/h).
- K_s = factor de corrección por conducción en pendiente.
- K_t = factor de corrección a aplicar para vehículos pesados, dada su mayor producción de óxidos de nitrógeno frente a los ligeros (parámetro referido a la velocidad de circulación de dichos vehículos).

Pendiente (%)	Factor de corrección K_s
< 0	0,5
0	1
2	1,7
4	2,2
6	2,8
8	3,4
10	4,0
12	4,6

Velocidad del tráfico (km/h)	Factor de corrección K_t
20	8
30	7
40	5
50	3,5
60	2,5
> 60	2,5



Determinación de los requisitos de caudal

METODOLOGÍAS DE CÁLCULO DE LOS CAUDALES REQUERIDOS

CAUDAL PARA LA DILUCIÓN DE HUMOS

La cantidad de partículas sólidas en suspensión, responsables de la limitación en la visibilidad, viene dada por la siguiente expresión:

$$P_{vis} = p_{vis} \cdot (M_p + 0,08 \cdot M_l) \cdot K_{hh} \cdot K_s \cdot L$$

- P_{vis} = cantidad de humo producido en el interior del túnel.
- p_{vis} = valor base de producción de humo por parte de vehículos pesados = 750 mg/km · vehículo.
- M_l = tráfico de vehículos ligeros. Se asume que este tipo de automóviles únicamente producen el 8% del humo debido a los pesados.
- M_p = intensidad horaria de vehículos pesados (vehículos/h).
- K_{hh} = factor de corrección por altura sobre el nivel del mar.

Altura sobre el nivel del mar (m)	Factor de corrección K_{hh}
< 400	1
500	1,12
600	1,24
700	1,35
800	1,47
900	1,58
1000	1,69
1100	1,81
1100	1,93

Pendiente (%)	Factor de corrección K_s
< 0	0,5
0	1
2	1,8
4	2,7
6	3,6
8	4,5
10	5,2
12	5,5

Cálculo de la ventilación en servicio

Determinación de los requisitos de caudal

METODOLOGÍAS DE CÁLCULO DE LOS CAUDALES REQUERIDOS

CAUDAL PARA LA DILUCIÓN DE HUMOS

$$Q_{\text{aire}} = \frac{P_{\text{vis}} \cdot \left(\frac{\text{mg}}{\text{h}}\right)}{C_{\text{vis}} \cdot \left(\frac{\text{mg}}{\text{m}^3}\right)} \quad Q_{\text{aire}} = Q_{\text{0aire}} \cdot \frac{P_0 \cdot T_t}{P \cdot T_0}$$

El umbral superior de concentración de partículas sólidas en el aire, a partir del que se considera que la visibilidad disminuye en exceso, suele situarse en $C_{\text{vis}} = 1,5 \text{ mg/m}^3$ (límite máximo admisible del coeficiente de extinción, m^{-1}).

CAUDAL RESULTANTE

$$Q_{\text{0aire}} = \frac{Q_{\text{0CO}} \cdot 10^6}{C_{\text{CO}}}$$

$$Q_{\text{0aire}} = \frac{Q_{\text{0NOx}} \cdot 10^6}{C_{\text{NOx}}}$$

$$Q_{\text{0aire}} = \frac{P_{\text{vis}} \cdot \left(\frac{\text{mg}}{\text{h}}\right)}{C_{\text{vis}} \cdot \left(\frac{\text{mg}}{\text{m}^3}\right)}$$

$$Q_{\text{aire}} = Q_{\text{0aire}} \cdot \frac{P_0 \cdot T_t}{P \cdot T_0}$$

$$Q_{\text{aire}} = Q_{\text{0aire}} \cdot \frac{P_0 \cdot T_t}{P \cdot T_0}$$

$$Q_{\text{aire}} = Q_{\text{0aire}} \cdot \frac{P_0 \cdot T_t}{P \cdot T_0}$$

De los tres caudales de aire obtenidos a partir del empleo de las expresiones anteriormente expuestas (dilución de CO, de NO_x y de humos), se deberá considerar el mayor, puesto que asegurará una dispersión suficiente de los contaminantes.

Otros criterios de cálculo del caudal

CRITERIOS EN CONDICIONES OPERATIVAS NORMALES

- Marsault, J.P. & Carlotti, P. (2002): «*Calcul des emissions de polluants des vehicules automobiles en tunnel*». Centre d'Etudes des Tunnels. Direction des Routes. Bron Cedex.
- W.R.C. (Congreso Internacional de Carreteras). El Comité Técnico de Túneles de la Asociación Mundial de Carreteras (Comité N° 5 de la Asociación Internacional Permanente de los Congresos de Carreteras, la A.I.P.C.R.), determina los valores a adoptar para el correcto dimensionado de las instalaciones de ventilación en túneles carreteros, de gran aplicación en España, en función de los datos aportados por diferentes países.

CRITERIOS DE EVENTUALIDAD

- Incendio.
- Accidente.

Determinación de los requisitos de sobrepresión

La sobrepresión a garantizar por parte de los equipos de ventilación viene determinada por tres factores fundamentales:

- **Pérdidas de carga del caudal de aire requerido al circular por el túnel, debidas al rozamiento con las paredes, y las pérdidas asociadas al emboquille y las singularidades.**
- Fuerza aeromotriz de la ventilación natural.
- Efecto pistón de los vehículos.

$$\Delta H = \Delta X_T + \Delta p_c + P_v$$

PÉRDIDA DE CARGA EN EL TÚNEL

- λ = coeficiente de pérdida de carga.
- P = perímetro del conducto en el tramo estudiado (m).
- L = longitud del tramo considerado (m).
- s = sección del conducto en el tramo (m²).

$$R = 153,03 \cdot \frac{\lambda \cdot P \cdot L}{s^3}$$

$$\lambda = 0,7 \cdot \lambda_p + 0,3 \cdot \lambda_s$$

- λ_p = coeficiente de pérdida de carga.
- λ_s = perímetro del conducto en el tramo estudiado (m).

Determinación de los requisitos de sobrepresión

PÉRDIDA DE CARGA EN EL TÚNEL

Resistencia de un tramo del circuito de ventilación.

$$R = 153,03 \cdot \frac{\lambda \cdot P \cdot L}{s^3}$$

• λ = coeficiente de pérdida de carga.

$$\lambda = 0,7 \cdot \lambda_p + 0,3 \cdot \lambda_s$$

• λ_p = coeficiente de pérdida de carga debida a las paredes.

• λ_s = coeficiente de pérdida de carga asociado al suelo.

SOSTENIMIENTO		λ_p	
Roca revestida	Pared bien recortada	0,058	
	Acabado medio	0,084	
	Irregular	0,108	
Roca bulonada	Bien recortada	0,058	
	Acabado medio	0,084	
	Irregular	0,108	
	Con tela metálica	0,13	
Roca revestida	Hormigón liso	0,022	
	Albañilería	Buen estado	0,025
		Estado medio	0,03
		Irregular	0,04

CARACTERÍSTICAS DEL SUELO	λ_s
Hormigonado o asfaltado	0,03
i = 5 cm	0,06
i = 15 cm	0,08
i = 30 cm	0,108

Determinación de los requisitos de sobrepresión

PÉRDIDA DE CARGA EN EL TÚNEL

Pérdida total del circuito.

$$\Delta X_t = R \cdot Q^2$$

$$\Delta X_T = \sum R_i \cdot Q_i^2 + \sum \Delta X_{sing}$$

$$\Delta X_{sing} = R_{sing} \cdot Q^2$$


$$R_{sing} = \xi \cdot \frac{\gamma}{2 \cdot g \cdot S^2} = \xi \cdot \frac{0,61}{S^2}$$

- ΔX_T = pérdida de presión total del aire en el circuito de ventilación (Pa).
- R_i = resistencia aeromotriz asociada al tramo i ($N \cdot s^2/m^8$).
- Q_i = caudal de aire que circula por el tramo i.
- ΔX_{sing} = **pérdida de carga en las singularidades del circuito de ventilación (Pa).**

- ΔX_{si} = **pérdida de carga en la singularidad (Pa).**
- R_{sing} = resistencia aerodinámica de la singularidad ($N \cdot s^2/m^6$).
- Q = caudal de aire que atraviesa la singularidad (m^3/s).

- R_{sing} = resistencia aerodinámica de la singularidad ($N \cdot s^2/m^6$).
- ξ = coeficiente de fricción de la singularidad (ver tabla siguiente).
- γ = peso específico del aire ($12,01 N/m^3$).
- g = aceleración de la gravedad ($9,81 m/s^2$).
- S = sección de la singularidad (m^2).

Determinación de los requisitos de sobrepresión

PÉRDIDA DE CARGA EN EL TÚNEL

Pérdida total del circuito.

COEFICIENTE DE FRICCIÓN DE LA SINGULARIDAD

TIPO DE SINGULARIDAD		λ
Cambio de dirección en ángulo recto de aristas vivas		1,4
Cambio de dirección en ángulo recto sin aristas	Radio interior = $1/4 \cdot$ Radio exterior	0,6
	Radio interior = $2/5 \cdot$ Radio exterior	0,3
Emboquille		0,6
Trampilla		3,6
Enlace con pozo con aristas vivas		2
Enlace con pozo sin aristas		1

Determinación de los requisitos de sobrepresión

La sobrepresión a garantizar por parte de los equipos de ventilación viene determinada por tres factores fundamentales:

- Pérdidas de carga del caudal de aire requerido al circular por el túnel, debidas al rozamiento con las paredes, y las pérdidas asociadas al emboquille y las singularidades.
- **Fuerza aeromotriz de la ventilación natural.** ←
- Efecto pistón de los vehículos.

FUERZA AEROMOTRIZ DE LA VENTILACIÓN NATURAL (FUERZAS DE ORIGEN CLIMÁTICO)

El gradiente de presiones se dirige hacia aquella zona en que el aire cuente con una mayor temperatura, ya sea en el interior o fuera del túnel. Si las temperaturas son iguales, circunstancia habitual al final del invierno y del verano, se dan condiciones de inestabilidad.

$$\Delta p_c = \gamma \cdot \frac{\Delta T}{T_m} \cdot \Delta z = 12,01 \cdot \frac{\Delta T}{T_m} \cdot \Delta z$$

- Δp_c = diferencia de presión existente entre las entradas de túnel consideradas (Pa).
- γ = peso específico del aire en la entrada más baja (12,01 N/m³).
- T_m = temperatura media en el túnel (K).
- ΔT = diferencia de temperatura entre el interior del túnel y la entrada más baja (K).
- Δz = diferencia de altura entre las entradas al túnel, o entre la boca del túnel y la salida del pozo de ventilación (m).

Determinación de los requisitos de sobrepresión

La sobrepresión a garantizar por parte de los equipos de ventilación viene determinada por tres factores fundamentales:

- Pérdidas de carga del caudal de aire requerido al circular por el túnel, debidas al rozamiento con las paredes, y las pérdidas asociadas al emboquille y las singularidades.
- **Fuerza aeromotriz de la ventilación natural.** ←
- Efecto pistón de los vehículos.

FUERZA AEROMOTRIZ DE LA VENTILACIÓN NATURAL (FUERZAS DE ORIGEN CLIMÁTICO)

$$\Delta p_c = \gamma \cdot \frac{\Delta T}{T_m} \cdot \Delta z = 12,01 \cdot \frac{\Delta T}{T_m} \cdot \Delta z$$

- Δp_c = diferencia de presión existente entre las entradas de túnel consideradas (Pa).
- γ = peso específico del aire en la entrada más baja (12,01 N/m³).
- T_m = temperatura media en el túnel (K).
- ΔT = diferencia de temperatura entre el interior del túnel y la entrada más baja (K).
- Δz = diferencia de altura entre las entradas al túnel, o entre la boca del túnel y la salida del pozo de ventilación (m).

Determinación de los requisitos de sobrepresión

La sobrepresión a garantizar por parte de los equipos de ventilación viene determinada por tres factores fundamentales:

- Pérdidas de carga del caudal de aire requerido al circular por el túnel, debidas al rozamiento con las paredes, y las pérdidas asociadas al emboquille y las singularidades.
- Fuerza aeromotriz de la ventilación natural.
- **Efecto pistón de los vehículos.** ←

EFFECTO PISTÓN DE LOS VEHÍCULOS

La resistencia aerodinámica, ejercida por los vehículos en el aire del túnel:

$$F_p = \frac{\rho}{2} \cdot \frac{i_F \cdot A_V}{\left(1 - \frac{A_V}{S}\right)} \cdot |N^+ \cdot (V_t - v)^2 - N^- \cdot (V_t - v)^2|$$

← TÚNEL BIDIRECCIONAL

TÚNEL UNIDIRECCIONAL →

$$F_p = \frac{\rho}{2} \cdot \frac{i_F \cdot A_V}{\left(1 - \frac{A_V}{S}\right)} \cdot |N^+ \cdot (V_t - v)^2|$$

Determinación de los requisitos de sobrepresión

EFFECTO PISTÓN DE LOS VEHÍCULOS

La resistencia aerodinámica, ejercida por los vehículos en el aire del túnel:

$$F_p = \frac{\rho}{2} \cdot \frac{i_F \cdot A_V}{\left(1 - \frac{A_V}{S}\right)} \cdot |N^+ \cdot (V_t - v)^2 - N^- \cdot (V_t + v)^2|$$


- F_p = fuerza de efecto pistón (N).
- ρ = densidad del aire (1,23 kg/m³).
- S = sección recta del túnel (m²).
- A_V = sección recta de los vehículos, considerando:
 - Turismos: $A_V = 2 \text{ m}^2$.
 - Camiones y autobuses: $A_V = 6 \text{ m}^2$.
- I_F = factor de forma a emplear en la determinación de la superficie resistente efectiva:
 - Turismos: $I_F = 0,5$.
 - Camiones y autobuses: $I_F = 1,0 - 1,7$.
- N^+ , N^- = número de vehículos que en un momento dado, el considerado para realizar el diseño de la ventilación, se desplazan dentro de un túnel a la velocidad de diseño, en el sentido del flujo de aire (+), o en contra (-).
- V_t = velocidad del tráfico (m/s).
- v = velocidad del aire (m/s).

Cálculo de la ventilación en servicio

Determinación de los requisitos de sobrepresión

EFFECTO PISTÓN DE LOS VEHÍCULOS

Los efectos pistón de los vehículos ligeros (F_{pl}) y pesados (F_{pp}) han de calcularse por separado, dando su suma el efecto pistón total F_p .

$$F_p = F_{pl} + F_{pp}$$

- P_v = presión del efecto pistón de los vehículos (Pa).
- F_p = fuerza de efecto pistón de los vehículos.
- S = sección recta del túnel (m^2).

INCREMENTO DE CARGA TOTAL (SOBREPRESIÓN) A PROPORCIONAR POR EL VENTILADOR

$$\Delta H = \Delta X_T + \Delta p_c + P_v$$

- ΔH = sobrepresión producida por los ventiladores (Pa).
- ΔX_T = pérdida de carga en el circuito de ventilación.
- Δp_c = fuerza aeromotriz de la ventilación natural (N/m^2).
- P_v = presión debida al efecto pistón de los vehículos.

La curva característica del ventilador a emplear cortará a la del túnel en el punto superior más cercano posible a los valores de caudal y pérdida de carga calculados.

Determinación de los requisitos de potencia

En el punto de funcionamiento, la potencia que el ventilador tomará de la red eléctrica viene determinada por la expresión siguiente:

$$W = Q \cdot \Delta H / \eta$$

- W = potencia que el ventilador toma de la red.
- Q = caudal que el ventilador suministra (m^3/s).
- η = rendimiento del ventilador; en las curvas características de los ventiladores se indican los rendimientos de los mismos para los distintos puntos de funcionamiento.
- ΔH = depresión producida por el ventilador (Pa).