

Diseño y Ejecución de Obras Subterráneas

Ventilación de túneles en servicio: Ejemplo de cálculo de ventilación longitudinal



José Ramón Berasategui Moreno
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/)



VENTILACIÓN DE TÚNELES EN SERVICIO: EJEMPLO DE CÁLCULO DE VENTILACIÓN LONGITUDINAL.

(Adaptado de López Jimeno, C, López Jimeno, (1997) Manual de Túneles y Obra Subterránea. Madrid: Entorno Gráfico.)

Se requiere realizar el dimensionamiento de la ventilación longitudinal de un túnel caracterizado de doble sentido de circulación, caracterizado por los siguientes parámetros:

Sección recta de 46 m². Perímetro: 30 m.

Longitud: 1280 m.

Pendiente: 2,14%.

Sentido de la ventilación: descendente.

Velocidad de circulación: 60 km/h.

Densidad de tráfico: 1700 vehículos/hora.

Proporción de vehículos pesados: 13%.

Tráfico a contrapendiente y contraventilación: 2/3.

Revestimiento de hastiales y clave: hormigón liso.

Firme: asfaltado

Incremento de la temperatura entre la boca inferior del túnel y el punto medio: 4 K.

Temperatura del punto medio del túnel: 283 K.

Límites propuestos para los distintos contaminantes:

C_{CO}: 200 ppm. C_{NOx}: 15 ppm. C_{Hollín}: 1,5 mg/m³.

Se ubicará una pareja de ventiladores cada 200 m.

Supóngase un rendimiento de los ventiladores del 82 %.

RESOLUCIÓN DEL EJERCICIO.

En primer lugar se establecerá la categorización del tráfico circulante en base a la asimetría (desigual reparto de los vehículos en los dos sentidos), atendiendo a los dos sentidos, y a la distribución de los vehículos en ligeros y pesados (establecer esta división es especialmente interesante para la determinación de las emisiones de NOx y humos).

Tráfico ascendente (es decir, en este caso a contrasentido de la ventilación, 2/3 del total).

$$M_{ascendente} = \frac{2}{3} \cdot M_{total} = \frac{2 \cdot 1700}{3} = 1133 \text{ veh\u00edculos/hora}$$

DISEÑO Y EJECUCIÓN DE OBRA SUBTERRÁNEA
TEMA 12: VENTILACIÓN DE TÚNELES.



$$M_{ascendente\ ligeros} = 0.87 \cdot M_{ascendente} = 0.87 \cdot 1133 = 986 \text{ veh\u00edculos ligeros/hora}$$

$$M_{ascendente\ pesados} = 0.13 \cdot M_{ascendente} = 0.13 \cdot 1133 = 147 \text{ veh\u00edculos pesados/hora}$$

$$M_{descendente} = \frac{1}{3} \cdot M_{total} = \frac{1 \cdot 1700}{3} = 567 \text{ veh\u00edculos/hora}$$

$$M_{descendente\ ligeros} = 0.87 \cdot M_{descendente} = 0.87 \cdot 567 = 493 \text{ veh\u00edculos ligeros/hora}$$

$$M_{descendente\ pesados} = 0.13 \cdot M_{descendente} = 0.13 \cdot 567 = 74 \text{ veh\u00edculos pesados/hora}$$

DETERMINACIÓN DE LOS CAUDALES:

Seguidamente se determinarán las emisiones de CO:

$$Q_{0CO} = Q_{0COascendente} + Q_{0COdescendente} = q_{0CO} \cdot M_{ascendente} \cdot K_{hh} \cdot K_{s(ascendente)} \cdot K_f \cdot L + q_{0CO} \cdot M_{descendente} \cdot K_{hh} \cdot K_{s(ascendente)} \cdot K_f \cdot L$$

$$Q_{0CO} = 0.013 \cdot 1133 \cdot 1.1 \cdot 1.28 + 0.013 \cdot 567 \cdot 1.095 \cdot 1.28 = 29.7 \text{ m}^3 / \text{hora} \text{ Producidos de CO.}$$

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 DESCENDENTE
0	1
2	1,1 ASCENDENTE
4	1,2
6	1,3

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

Una vez establecido el volumen producido por hora de CO, se puede determinar el caudal de aire requerido para su dilución:

$$Q_{0aire} = \frac{Q_{0CO}}{C_{CO}} \cdot 10^6 = \frac{29.7}{200 \text{ ppm}} \cdot 10^6 = 148465.7 \text{ m}^3 / \text{hora}; \quad Q_{0aire} = \frac{148465.7}{3600 \text{ segundos / hora}} \text{ m}^3 / \text{hora} = 41.24 \text{ m}^3 / \text{s}$$

Nota: En la resolución del ejercicio, de carácter simplificado, no se considerará la variación del caudal en base al no cumplimiento de las condiciones de normalidad (283 K frente a 273 K).



El siguiente caudal a determinar es el requerido para la dilución de los NOx, por lo que se comenzará con la determinación del volumen de gas producido por hora. Como podrá apreciarse, en dicha determinación la metodología propuesta por López Jimeno distingue entre vehículos ligeros y pesados:

$$Q_{NOx} = Q_{NOxascendente} + Q_{NOxdescendente} = q_{NOx} \cdot (M_{ascendentes_ligeros} + K_t \cdot M_{ascendentes_pesados}) \cdot K_s(ascendente) \cdot L + q_{NOx} \cdot (M_{descendentes_ligeros} + K_t \cdot M_{descendentes_pesados}) \cdot K_s(descendente) \cdot L$$

$$Q_{NOx} = 1.310^{-3} \cdot (986 + 2.5 \cdot 147) \cdot 1.7 \cdot 1.28 + 1.310^{-3} \cdot (493 + 2.5 \cdot 74) \cdot 0.51 \cdot 1.28 = 4.39 m^3 / hora \cong 4.4 m^3 / hora \text{ de NOx.}$$

Pendiente (%)	Factor de corrección K _s
<0	0,5 DESCENDENTE
0	1
2	1,7 (ASCENDENTE)
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

Determinada la emisión, se establece el caudal para su dilución:

$$Q_{aire} = \frac{Q_{NOx}}{C_{NOx}} \cdot 10^6 = \frac{4.4}{15 \text{ ppm}} \cdot 10^6 = 293333.3 m^3 / hora; Q_{aire} = \frac{293333.3}{3600 \text{ segundos / hora}} m^3 / hora = 81.48 m^3 / s$$

El tercer aspecto a considerar es la producción de humos, que se determinará mediante la siguiente expresión:

$$P_{vis} = P_{vis(ascendente)} + P_{vis(descendente)} = P_{vis} \cdot (M_{ascendentes_pesados} + 0,08 \cdot M_{ascendentes_ligeros}) \cdot K_{hh} \cdot K_s(ascendentes) \cdot L + P_{vis} \cdot (M_{descendentes_pesados} + 0,08 \cdot M_{descendentes_ligeros}) \cdot K_{hh} \cdot K_s(descendentes) \cdot L$$

$$P_{vis} = 750 \cdot (147 + 0,08 \cdot 986) \cdot 1.1 \cdot 1.28 + 750 \cdot (74 + 0,08 \cdot 493) \cdot 1.0 \cdot 0.51 \cdot 1.28 = 444771.8 mg / hora$$

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
1500	1,93

Ojo: la tabla siguiente estaba incorrecta en los apuntes, sustituir por ésta.

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

Determinados los humos, se calcula el caudal:

$$Q_{\text{aire}} = \frac{P_{\text{vis}} (\text{mg} / \text{h})}{C_{\text{vis}} (\text{mg} / \text{m}^3)} = \frac{444771,8 \text{mg} / \text{hora}}{1.5 \text{mg} / \text{m}^3} = 296514,53 \text{m}^3 / \text{hora};$$

$$Q_{\text{aire}} = \frac{296514,53 \text{m}^3 / \text{hora}}{3600 \text{s} / \text{hora}} = 82,36 \text{m}^3 / \text{s}$$

Satisfaciendo el mayor de los requisitos anteriores de caudal, quedarán diluidos los restantes elementos a considerar, por lo que se ha de seleccionar el más restrictivo para el dimensionamiento, en este caso el asociado a los humos ($82,36 \text{m}^3 / \text{s}$).

DETERMINACIÓN DE LA SOBREPRESIÓN

La presión que han de generar los ventiladores para provocar el movimiento de aire, deberá de vencer tres elementos que pueden ocasionar pérdidas de carga:

- Rozamiento con las paredes, y las pérdidas en el emboquille y las singularidades.
- Fuerza aeromotriz de la ventilación natural.
- El efecto pistón de los vehículos.

Las pérdidas en el tramo se establecerán en base a la resistencia aerodinámica del mismo (R).

$$R = 153,03 \cdot \frac{\lambda \cdot P \cdot L}{s^3} = 153,03 \cdot \frac{(0,7 \cdot \lambda_p + 0,3 \cdot \lambda_s) \cdot P \cdot L}{s^3} = 153,03 \cdot \frac{(0,7 \cdot 0,022 + 0,3 \cdot 0,03) \cdot 30 \cdot 1280}{46^3} = 1,47 \frac{\text{N} \cdot \text{s}^2}{\text{m}^8}$$

SOSTENIMIENTO		λ_p
ROCA DESNUDA	Pared bien recortada	0,058
	Pared con acabado medio	0,084
	Pared irregular	0,108

DISEÑO Y EJECUCIÓN DE OBRA SUBTERRÁNEA
TEMA 12: VENTILACIÓN DE TÚNELES.



ROCA BULONADA	Pared bien recortada		0,058
	Pared con acabado medio		0,084
	Pared con acabado irregular		0,108
	Pared con tela metálica		0,130
ROCA REVESTIDA	Hormigón Liso		0,022
	Albañilería	Buen estado	0,025
		Estado medio	0,030
		Irregular	0,040

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

Habrà de considerarse igualmente la incidencia de las singularidades, en este caso únicamente se entra a considerar la del emboquille de acceso del aire, por no indicarse la existencia de otras singularidades.

$$R_{\text{sing}} = \xi \cdot \frac{\gamma}{2 \cdot g \cdot S^2} = \xi \cdot \frac{12 \cdot 01}{29 \cdot 81 \cdot S^2} = 0 \cdot 6 \cdot \frac{0 \cdot 61}{46^2} = 1 \cdot 73 \cdot 10^{-4} \frac{N \cdot s^2}{m^8}$$

TIPO DE SINGULARIDAD	ξ	
Cambio de dirección en ángulo recto de aristas vivas	1,4	
Cambio de dirección en 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	

Factor climático

Dada la situación comentada en el enunciado, existiendo una diferencia entre la temperatura del interior del túnel y de la boca inferior de +4K, la presión asociada al gradiente térmico hará ascender el aire a lo largo del túnel, oponiéndose a la ventilación descendente.

DISEÑO Y EJECUCIÓN DE OBRA SUBTERRÁNEA
TEMA 12: VENTILACIÓN DE TÚNELES.



$$\Delta p_c = \gamma \cdot \frac{\Delta T}{T_m} \cdot \Delta z = 12,01 \cdot \frac{\Delta T}{T_m} \cdot \Delta z = 12,01 \cdot \frac{4}{283} \cdot 1280 \cdot \frac{2,16}{100} = 12,01 \cdot \frac{4}{283} \cdot 27,65 = 4,69 Pa.$$

Efecto pistón:

Debe considerarse por separado la incidencia de los vehículos ligeros (tanto ascendentes como descendentes), y de los pesados, para posteriormente sumar las fuerzas asociadas a los efectos pistón, y dividiéndolas por la sección del túnel obtener la presión en Pascales. Para ello se empleará la formulación siguiente:

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

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

Como puede observarse, las expresiones dependen de los términos N, que aluden a la presencia de vehículos en un determinado momento en el túnel. Para poder determinar dicho parámetro, se debe multiplicar la intensidad vehicular horaria por el tiempo que tarde un determinado vehículo a la velocidad de régimen (60 Km/h):

$$\text{Tiempo de recorrido del túnel: } t = \frac{1,280 km}{60 km/hora} = 2,13 \cdot 10^{-2} \text{ horas}$$

Para la consideración de vehículos ligeros (refiriéndose N+ al sentido descendente, por ser el de la corriente):

$$N^+ = M_{descendentes_ligeros} \cdot t = 493 \cdot 2,13 \cdot 10^{-2} = 10,59 \text{ veh\`iculos}$$

$$N^- = M_{ascendentes_ligeros} \cdot t = 986 \cdot 2,13 \cdot 10^{-2} = 21 \text{ veh\`iculos}$$

Para la consideración de vehículos pesados:

$$N^+ = M_{descendentes_pesados} \cdot t = 74 \cdot 2,13 \cdot 10^{-2} = 1,57 \text{ veh\`iculos}$$

$$N^- = M_{ascendentes_pesados} \cdot t = 147 \cdot 2,13 \cdot 10^{-2} = 3,13 \text{ veh\`iculos}$$

Sustituyendo en las expresiones del efecto pistón:

$$F_{p_ligeros} = \frac{\rho}{2} \cdot \frac{i_F \cdot A_v}{\left(1 - \frac{A_v}{S}\right)^2} \left| N^+ \cdot (V_t - v)^2 - N^- \cdot (V_t + v)^2 \right| = \frac{1,23}{2} \cdot \frac{0,52}{\left(1 - \frac{2}{46}\right)^2} \left| 10,59 \cdot (16,67 - 1,79)^2 - 21 \cdot (16,67 + 1,79)^2 \right| = 3234 N$$

$$F_{p_pesados} = \frac{\rho}{2} \cdot \frac{i_F \cdot A_v}{\left(1 - \frac{A_v}{S}\right)^2} \left| N^+ \cdot (V_t - v)^2 - N^- \cdot (V_t + v)^2 \right| = \frac{1,23}{2} \cdot \frac{1,35 \cdot 6}{\left(1 - \frac{6}{46}\right)^2} \left| 1,57 \cdot (16,67 - 1,79)^2 - 3,13 \cdot (16,67 + 1,79)^2 \right| = 4737 N$$

Siendo:

$$v = \frac{\text{Caudal}_{\text{dimensionamiento}}}{\text{Sección}} = \frac{82,36}{46} = 1,79 m/s$$

DISEÑO Y EJECUCIÓN DE OBRA SUBTERRÁNEA TEMA 12: VENTILACIÓN DE TÚNELES.



$$V_t = 60 \frac{km}{h} \cdot 1000 \frac{m}{km} \cdot \frac{h}{3600s} = 16.67 m/s$$

A_v Sección recta de los vehículos, considerando:

- Turismos: $A_v = 2 m^2$
- Camiones y autobuses: $A_v = 6 m^2$

i_f Factor de forma a emplear en la determinación de la superficie resistente efectiva:

- Turismos: $i_f = 0,5$
- Camiones y autobuses: $i_f = 1,0-1,7$

Con lo que la presión asociada al efecto pistón será

$$P_v = \frac{F_{p_ligeros} + F_{p_pesados}}{sección} = \frac{3234 + 4737}{46} = 173.28 Pa$$

Las pérdidas asociadas al tramo y a las singularidades responderán a las expresiones:

$$\Delta X_{\text{sing}} = R_{\text{sing}} \cdot Q^2 = 1.73 \cdot 10^{-4} \frac{N \cdot s^2}{m^8} \cdot 82.36^2 \frac{m^6}{s^2} = 1.17 \frac{N}{m^2} = 1.17 Pa \quad (\text{Pérdidas en las singularidades})$$

$$\Delta X_T = \sum R_i \cdot Q_i^2 + \sum \Delta X_{\text{sing}} = 1.47 \frac{N \cdot s^2}{m^8} \cdot 82.36^2 \frac{m^6}{s^2} + 1.17 Pa = 9972.43 Pa \quad (\text{Pérdidas tramo+singularidades})$$

Para la determinación de las pérdidas totales de presión, se debe tener en cuenta también el efecto climático y el de pistón:

$$\Delta H = \Delta X_T + \Delta p_c + P_v = 9972.43 + 4.69 + 173.28 = 10150.4 Pa$$

Para el cálculo de la potencia por ventilador se tiene que tener en cuenta que se distribuyen por parejas (por lo que cada uno de ellos "asumirá" la mitad del caudal), y espaciados cada 200 metros, con lo que en total habrá 6 parejas de ventiladores. Cada pareja asumirá por tanto una depresión de $10150.4 Pa / 6 = 1691.73 Pa$.

Teniendo en cuenta lo anterior, y asumiendo un rendimiento 0,82 (dicho dato suele obtenerse de las tablas características del ventilador, que presentan zonas de iso-rendimiento).

$$W = \frac{Q \cdot \Delta H}{\eta} = \frac{(82.36 / 2) \cdot 1691.73}{0.82} = 84957.86 W$$

POR VENTILADOR, CON LO QUE CONSIDERANDO LOS 12 VENTILADORES, SE TENDRÁ:

$$12 \cdot 84957.86 W = 1019494.264 W = 1.02 MW$$