

# VENTILACIÓN DE TÚNELES A GRANDES ALTURAS

EL TÚNEL CARRETERO DE AGUA NEGRA, QUE CONECTARÁ ARGENTINA CON CHILE, TENDRÁ 14 KILÓMETROS DE LARGO Y ESTARÁ SITUADO A UNA ALTITUD VARIABLE ENTRE 3.700 Y 4.000 METROS SOBRE EL NIVEL DEL MAR, EN LA PROVINCIA DE SAN JUAN. DEBIDO A SU GRAN ALTITUD, ES PROBABLE QUE LOS REQUISITOS DE VENTILACIÓN PARA EL TÚNEL DEBAN SER ESPECIALES, TANTO PARA LA OPERACIÓN NORMAL COMO EN CASO DE INCENDIO O EMERGENCIA. ESTE ARTÍCULO OFRECE UNA ORIENTACIÓN GENERAL SOBRE EL DISEÑO DE VENTILACIÓN DE TÚNELES A GRAN ALTURA, SOBRE LA BASE DE LAS RECOMENDACIONES DE LA ASOCIACIÓN MUNDIAL DE CARRETERAS Y LA EXPERIENCIA INTERNACIONAL DEL PROYECTO.



1. El Dr. Fathi Tarada es director del grupo de trabajo Calidad del Aire, Fuego y Ventilación del Comité C4 de la Asociación Mundial de Carreteras.

GRÁFICO 1: Sistema de ventilación del túnel semi-transversal.

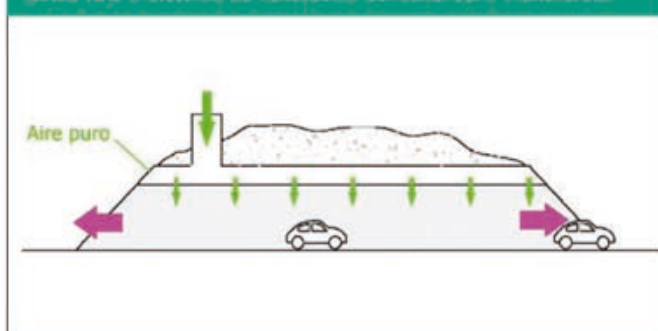
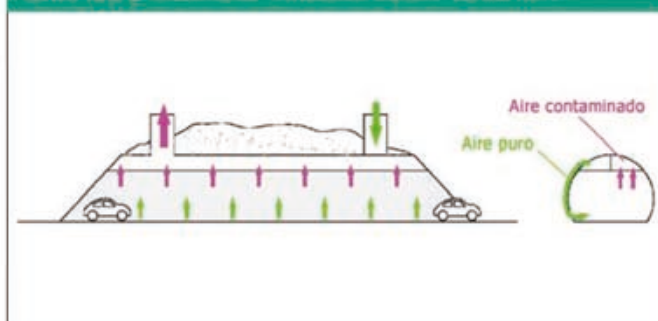


GRÁFICO 2: Sistema de ventilación transversal del túnel.



En general, los túneles requieren de sistemas de ventilación por dos razones principales: el mantenimiento de la calidad del aire y la temperatura (incluida la necesidad de diluir las emisiones vehiculares hasta concentraciones aceptables), y el control de humo en caso de un escenario de incendio.

Actualmente, en el mundo están disponibles diversos sistemas de ventilación de túneles para cumplir estos requisitos: el sistema longitudinal, el transversal y el semi-transversal. Sin embargo, para un túnel largo como el de Agua Negra, sólo puede optarse por los sistemas de ventilación semi-transversal y transversal (gráficos 1 y 2) como opciones realistas, ya que los sistemas longitudinales se limitan generalmente a túneles de tres kilómetros o menos (según la RABT, normativa alemana sobre el equipamiento y la operación de túneles de carretera, 2006). El actual proyecto de Agua Negra incluye la ventilación transversal a lo largo de la mayoría de sus intervalos, con algunas secciones longitudinales y semi transversales junto a los portales.

## IMPACTO DE LA ALTITUD

Las cifras expuestas en la tabla 1 proporcionan una visión general de las condiciones dentro de una atmósfera estándar en fun-

ción de la altitud. En comparación con un valor al nivel del mar de  $1,225 \text{ kg/m}^3$ , la densidad estándar del aire cae a tan sólo  $0,74 \text{ kg/m}^3$  a 4.000 m de altitud, lo que representa una reducción de casi el 40%. Esta disminución de la densidad del aire tiene un efecto significativo sobre la fisiología humana, el rendimiento de los motores por combustión y la eficiencia de los ventiladores. Todos estos factores deben tenerse en cuenta al diseñar el sistema de ventilación de un túnel.



## I EXPO-TÚNELES

23 al 26 de marzo de 2010

Hotel Sheraton Retiro de Buenos Aires, Argentina.

Aunque la densidad del aire será significativamente menor en el túnel en comparación con el nivel del mar, el porcentaje de oxígeno se mantendrá en aproximadamente en 21%. Sin embargo, la cantidad absoluta de oxígeno disponible en el aire se reducirá, lo que tendrá un fuerte impacto en la respuesta del cuerpo humano a esa altura.

### FISIOLOGÍA HUMANA

La altitud de 4.000 metros propuesta se acercaría a condiciones de hipoxia, un estado patológico en el que se priva al cuerpo del suministro adecuado de oxígeno. Por consiguiente, los operadores del túnel, el personal de emergencia y otros trabajadores tendrían que ser aclimatados al aire, o podrían no ser capaces de realizar sus funciones adecuadamente. Asimismo, el conductor promedio del túnel podría estar incapacitado para su habilidad al conducir y no ser consciente de la dificultad de su cuerpo en la obtención de oxígeno. Esta situación puede redundar en una mala toma de decisiones al conducir a causa de bloqueos y, en consecuencia, el riesgo de accidentes puede aumentar considerablemente y el personal de emergencia puede tener una mayor carga fisiológica para responder ante un estado de emergencia.

Por su parte, debido a las esperadas condiciones de cercanía a la hipoxia en el túnel, las correspondientes emisiones de Monóxido de carbono (CO) y Óxido de nitrógeno

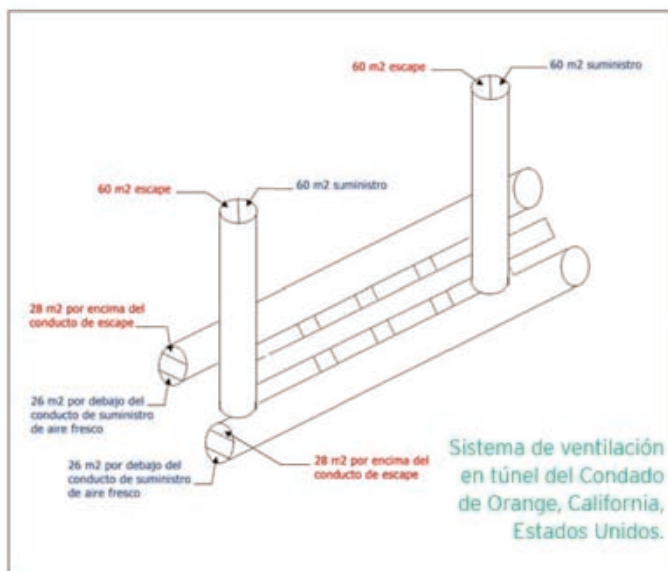


Tabla 1: Condiciones Atmosférica Estándar 1976.

ALTITUD (M)	TEMPERATURA ABSOLUTA (K)	PRESIÓN (hPa)	DENSIDAD (kg/m³)	VISCOSIDAD DINÁMICA (Pa.S)	VELOCIDAD DEL SONIDO (m/s)
0	288.15	1013.25	1.2250	$1.79 \times 10^{-5}$	340.29
1.000	281.65	898.76	1.1117	$1.76 \times 10^{-5}$	336.44
5.000	255.68	540.48	0.7364	$1.63 \times 10^{-5}$	320.55

**IKSA DE ARGENTINA**  
*Sociedad de Responsabilidad Limitada*  
 Empresa líder en Seguridad Vial

**Desarrollos Industriales Argentinos Seguridad Vial**

Tucumán 766 • P. 14 •  
 Of. 284 • (1049) • Bs. As  
 Tel-fax: 4322-6263 /  
 4326-7433 / 5272-0559  
 e-mail: [iksa@iksar.com.ar](mailto:iksa@iksar.com.ar)  
[iksa@sion.com](mailto:iksa@sion.com)  
[www.iksar.com.ar](http://www.iksar.com.ar)







(NOx) y otros estándares de calidad del aire pueden tener que ser revisados. Por ejemplo, aunque la Asociación Mundial de Carreteras recomienda un límite de funcionamiento de 70 partículas por millón (ppm) de CO<sub>2</sub> en los túneles de carretera, este límite podría tener que reducirse a 40 o 50 ppm para el túnel de Agua Negra.

## RENDIMIENTO DEL MOTOR

En términos generales, los vehículos de pasajeros reducirán su rendimiento a esa altitud. En particular, los vehículos que utilizan el túnel emiten altos niveles de CO, a menos que se trate de motores de bajo consumo o amigables con el medio ambiente. Los datos de la tabla 2 extraídos de la selección de la Asociación Mundial de Carreteras (actualidad está siendo desarrollado por el

Comité de Operaciones en Túneles), indican que los niveles de emisiones de CO pueden duplicarse para motores de gasolina a 2.000 metros de altitud. Por lo tanto, es muy probable que las emisiones sean aún mayores en el túnel de Agua Negra, que estará emplazado al doble de esa altura.

Debido al incremento de las emisiones de producción y la reducción propuesta en las correspondientes normas en la calidad del aire del túnel, se anticipa que el caudal de aire fresco dentro de los túneles deberá aumentar de manera significativa en comparación a un túnel emplazado a nivel del mar. De esta forma, el efecto pistón de los vehículos en movimiento puede no ser suficiente por sí solo para proporcionar la calidad de aire adecuada, y podría ser complementado con alguno de los sistemas de ventilación semi transversal y transversal.

Con respecto a los efectos de la temperatura, los análisis de los grandes túneles de carretera (de más de 6 Km.) indican que si la utilización de vehículos del túnel proyectado es sustancial, las temperaturas en el túnel podrían convertirse en un problema debido al calor disipado por los motores de los vehículos. Asimismo, estos efectos pueden ser más importantes si la temperatura de la roca en la que se emplaza la infraestructura es alta. Por lo tanto, el mantenimiento de la temperatura aceptable puede, en última instancia, determinar los requisitos de ventilación durante el funcionamiento del túnel.

## DINÁMICA DEL FUEGO Y DE SUPRESIÓN DE INCENDIOS

Por lo ya referido a la calidad y cantidad de aire disponible a gran altura, la probabilidad que se inicien y desarrollen incendios se reduce. Este es un factor positivo al evaluar el riesgo de incendio en un vehículo y su posible propagación a objetos vecinos, incluyendo otros automóviles. Sin embargo, es difícil cuantificar los posibles beneficios debido a la falta de pruebas experimentales a alturas como la del túnel de Agua Negra.

Teniendo en cuenta las posibles dificultades para el cuerpo de bomberos en la lucha contra incendios de coches en Agua Negra, puede ser útil evaluar la efectividad de un sistema de extinción de incendios fijo en la lucha contra la evolución de esos siniestros y en la limitación de sus tasas de liberación de calor. Por ende, la Asociación Mundial de Carreteras recomienda un estudio de viabilidad, un análisis de costo / bene-

**Tabla 2:** Factor de altitud propuesta (FH) para 2.000 metros sobre el nivel del mar, automóviles de pasajeros y LDV hasta 3,5 toneladas, tecnología estándar A.

FH	CO		NOx		TURBIEDAD
	COMBUSTIBLE	DIESEL	COMBUSTIBLE	DIESEL	
AUTOS DE PASAJEROS					DIESEL
2010	2.6	1.0	1.0	1.0	1.0
2015	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0
2020	1.6	1.0	1.0	1.0	1.0
2025	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
2030	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

ficio y la evaluación del riesgo antes de la instalación de un sistema de extinción.

Para túneles de carretera largos, la extinción de incendios puede permitir mayores longitudes entre los dispositivos para el diseño, manteniendo, al mismo tiempo, un nivel aceptable de seguridad. Por su parte, para túneles de carretera convencionales, los requerimientos de ventilación de humo normalmente se establecen en los requisitos para el dimensionamiento de ventilación.

## CONCLUSIÓN

La ventilación del túnel de Agua Negra presentará a los diseñadores un desafío de ingeniería única. La elevada altitud del túnel significará que los conductores y los trabajadores del túnel, incluyendo a los encargados de responder en caso de emergencia, se verán ante un desafío fisiológico. En tanto, los motores de los vehículos en general funcionarán de forma menos eficiente, dando lugar a una mayor demanda de aire fresco para mantener los niveles de calidad del aire. Además, las normas de calidad del aire deberían ser más onerosas que a nivel del mar, para contrarrestar la reducción en los niveles de oxígeno.

Por último, a pesar del hecho de que los incendios no arden con facilidad a gran altura, puede ser prudente considerar la instalación de un sistema de extinción de incendios fijos, con el fin de compensar la dificultad que los bomberos puedan tener en caso de un incidente grave. Por lo tanto, lo aconsejable es el desarrollo de un estudio de viabilidad, un análisis del costo/beneficio y la evaluación del riesgo antes de la instalación de cualquier sistema de incendios. ●

\*El Dr. Fathi Tarada es director gerente de la firma Mosen Ltd. de Reino Unido, y director del grupo de trabajo Calidad del Aire, Fuego y Ventilación del Comité C4 de la Asociación Mundial de Carreteras.

# Tunnel Ventilation at High Altitudes

*Dr Fathi Tarada*

Managing Director, Mosen Ltd, United Kingdom

Co-Chairman, World Road Association Working Group on 'Air Quality, Fire and Ventilation'

## Abstract

The "Agua Negra" Road Tunnel will be a 14 km long road tunnel situated at 3,700- 4,000 m above sea level, in the province of San Juan, connecting Argentina to Chile. Due to its high altitude, the ventilation requirements for this tunnel are likely to be particularly onerous, both for normal operation and in case of fire. This paper provides some general guidance on the design of tunnel ventilation at high altitudes, based on the recommendations of the World Road Association and on international project experience.

## The Need for Tunnel Ventilation

In general, tunnels require ventilation for two main reasons: the maintenance of air quality and temperature (including the need to dilute vehicular emissions down to acceptable concentrations), and the control of smoke in case of a fire scenario. A number of tunnel ventilation systems are available to meet these requirements, including (listed in increasing cost scale): longitudinal, semi-transverse and transverse systems. For a long tunnel such as Agua Negra, only the semi-transverse and transverse ventilation systems (Figs. 1 and 2) are realistic options, since longitudinal systems are generally limited to tunnel chainages of 3km or less (e.g. German RABT, 2006). The current Agua Negra scheme includes transverse ventilation along the majority of its chainage, with some longitudinal and semi-transverse sections adjacent to the portals (Böfer, 2010).

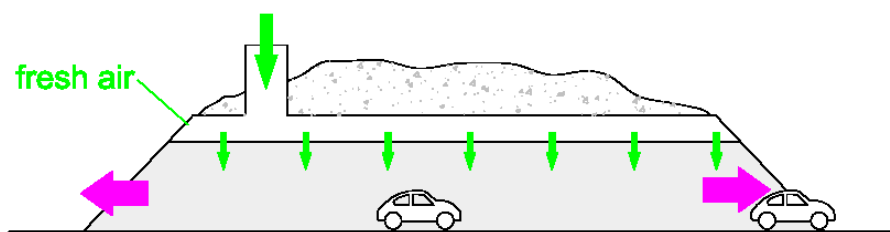


Fig. 1: Semi-Transverse Tunnel Ventilation System

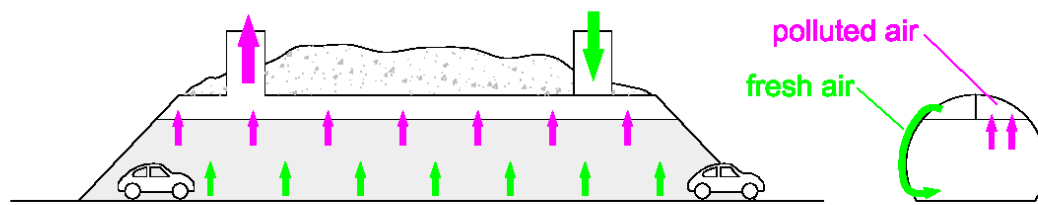


Fig. 2: Transverse Tunnel Ventilation System

### Impact of Altitude

Table 1 provides an overview of the conditions within a standard atmosphere as a function of altitude. Compared to a value at sea level of  $1.225 \text{ kg/m}^3$ , the standard density of air drops to only  $0.74 \text{ kg/m}^3$  at 4,000m altitude, which represents nearly a 40% reduction. This reduction in air density has a significant effect on human physiology, combustion engine performance and fan efficiency. All of these factors should be taken into account when designing the tunnel ventilation system.

Although the density of air will be significantly lower within the tunnel compared to sea level, the percentage of oxygen will remain at approximately 21%. However, the absolute quantity of available oxygen in the air will be reduced, and this will have a marked impact on human response at that altitude.

Altitude (m)	Temperature absolute (K)	Pressure (hPa)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Dynamic viscosity (Pa·s)	Sound velocity (m/s)
0	288.15	1013.25	1.2250	$1.79 \times 10^{-5}$	340.29
1000	281.65	898.76	1.1117	$1.76 \times 10^{-5}$	336.44
5000	255.68	540.48	0.7364	$1.63 \times 10^{-5}$	320.55

Table 1: Standard Atmospheric Conditions 1976

## Human Physiology

The proposed altitude of 4,000m would approach hypoxic conditions, which is a pathological condition in which the body is deprived of adequate oxygen supply. Tunnel workers, emergency personnel and other workers would have to be acclimatised to the air, or they may not be able to perform their functions adequately. The average tunnel driver may be impaired in his/her driving skills and not be aware of it, due to their bodies' difficulty in obtaining oxygen. This may lead to poor decision making, black outs, etc. The risk of accidents may therefore rise correspondingly, and emergency responders may face additional physiological burdens when attempting to respond to such accidents.

## Air Quality Limits

Due to the expected near-hypoxic conditions in the tunnel, the relevant CO, NO<sub>x</sub> and other air quality standards may have to be revised downwards. For example, although the World Road Association (2004) currently recommends an operating limit of 70 ppm for CO in road tunnels, this limit may have to be decreased to 40-50 ppm for the Agua Negra Tunnel. This is to account for the dual effect of the low oxygen availability in the air, and the effect of CO in hindering the delivery of oxygen to the body, through the production of carboxyhaemoglobin in the blood.

## Combustion Engine Performance

Passenger vehicles would generally have reduced performance in such high altitudes. In particular, vehicles using the tunnel would emit higher levels of carbon monoxide, unless the vehicle was tuned to the atmosphere. Table 2, extracted from draft World Road Association guidance currently being developed by the Tunnel Operations Committee, indicates that carbon monoxide emission levels can be doubled for gasoline engines at 2,000m above sea level. It is likely that carbon monoxide emissions will be even greater in the Agua Negra Tunnel, which is 4,000m above sea level.

fh	CO		NO <sub>x</sub>		Turbidity
Passenger cars	Gasoline	Diesel	Gasoline	Diesel	Diesel
2010	2.6	1.0	1.0	1.0	1.0
2015	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0
2020	1.6	1.0	1.0	1.0	1.0
2025	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
2030	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

Table 2: Proposed altitude factor (fh) for 2000m above sea level, passenger cars and LDV up to 3.5 tonnes, technology standard A.

Due to the increased emissions production and the proposed reduction in the relevant in-tunnel air quality standards, we anticipate that the flowrate of fresh air within the tunnels will have to be increased significantly compared to a tunnel at sea level. Thus, the piston effect of the moving vehicles may not be sufficient on its own to provide adequate air quality, and may have to be supplemented with a large quantity of fresh air provided by the semi-transverse and transverse ventilation systems.

## Temperature Effects

Analyses of long road tunnels (in excess of 6km) indicate that if the projected vehicle usage of the tunnel is substantial, in-tunnel temperatures could become an issue, due to the heat dissipated by the vehicles' engines. Temperature effects may also be significant if the rock temperature is high, due to the deep ground cover in the mountain. The maintenance of acceptable temperatures may thus ultimately dictate the ventilation requirements during operation of the tunnel.

## Fire Dynamics and Fire Suppression

The likelihood of fires starting at high altitude, and their subsequent development, are reduced at high altitude. This is a positive factor when assessing the risk of any vehicle fires breaking out, and their possible spread to neighbouring objects, including other vehicles. However, it is difficult to quantify any possible benefits, due to the lack of experimental evidence.

Due to the possible difficulties for the fire brigade fighting a vehicle fire at the high altitudes of the Agua Negra tunnel, it may be useful to assess the effectiveness of a fixed fire fighting system in suppressing the development of such fires, and in limiting their heat release rates. The World Road Association (2008) recommends a feasibility study, a cost/benefit analysis and risk assessment prior to installation of a fixed fire fighting system. For long road tunnels, fire suppression may allow longer lengths between cross-passages to be designed, while maintaining an acceptable safety level.

For conventional road tunnels, the smoke ventilation requirements normally set the dimensioning requirements for the tunnel ventilation. Due to the onerous air quality requirements, this may not be the case for the Agua Negra Tunnel, particularly if a fixed fire fighting system is employed.



Fig. 3: Fire Test with a Fixed Fire-Fighting System

## **Conclusions**

The ventilation of the Agua Negra Tunnel will present designers with a unique engineering challenge. The high altitude of the tunnel (4,000m) will mean that motorists and tunnel workers, including emergency responders, may be physiologically challenged. Vehicle engines will generally burn less efficiently, leading to a greater demand for fresh air to maintain air quality levels. In addition, air quality standards may have to be more onerous than at sea level, to counter the reduction in oxygen levels. For example, the relevant limits for carbon monoxide (CO) may have to be reduced from 70ppm (sea level) to only 40-50ppm at 4,000m altitude.

In spite of the fact that fires do not burn readily at high altitudes, it may be judicious to consider the installation of a fixed fire fighting system in the Agua Negra Tunnel, in order to compensate for the difficulty that fire-fighters may face in case of a serious incident. The World Road Association recommends a feasibility study, a cost/benefit analysis and risk assessment prior to the installation of any fixed fire-fighting system.

## **References**

Böfer, M. (2010) 'Tunnel Agua Negra – Conceptual Design', 2<sup>nd</sup> International Seminar on Tunnels and ITS Applications, Buenos Aires.

Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit, Deutschland, 2006.

World Road Association (2004), 'Road Tunnels: Vehicle Emissions and Air Demand For Ventilation'

World Road Association (2008), 'Road Tunnels: An Assessment of Fixed Fire Fighting Systems'