

MODELO DE DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDAD MEDIA DEL FLUJO VENTILATORIO Y PRESIÓN A LO LARGO DEL TÚNEL “BOQUERÓN I”, (Autopista Caracas-La Guaira). Parte I

MARCO FALCÓN Y DAVID LEZAMA

RESUMEN

El objeto de este trabajo es determinar la distribución de velocidad media (sobre la sección transversal) del flujo ventilatorio a lo largo del túnel. El sistema consiste de dos pistas de subida y dos de bajada interconectados mediante cuatro portales. Por el techo se inyecta aire a través de ranuras equidistantes y existe un extractor local, situado a 350 m de la entrada a las pistas de subida desde La Guaira hacia Caracas.

Dependiendo de que la velocidad de los vehículos sea mayor o menor que la del flujo ventilatorio, en cualquier sección del túnel, se tiene dos casos: A y B. Esta separación se hace porque la resistencia (o empuje) de los vehículos al flujo de aire depende del cuadrado de la velocidad relativa vehículo-aire y la solución de las ecuaciones requiere conocer su signo.

Al aplicar los principios de cantidad de movimiento (a lo largo de tramos limitados entre dos portales “nodos” sucesivos) y de energía (entre dos nodos conectados por un portal) para calcular la velocidad media del flujo ventilatorio, obviamente interviene la distribución de presión media a lo largo del túnel. También se aplica el principio de conservación de la materia (continuidad) a lo largo de los tramos y en los nodos.

Para el caso A, en que los vehículos empujan el aire, se encuentra que la presión aumenta a lo largo del túnel, desde cero a la entrada hasta un máximo del orden de 10 cm H₂O cerca del centro del túnel y luego baja hacia la salida donde de nuevo llega a cero. El aumento de presión es mayor en el túnel de subida que en el de bajada, porque la inyección de aire por el techo es mayor en el túnel de subida. Debido a esto, y suponiendo caudales vehiculares iguales en ambas direcciones, se efectúa una transferencia de flujo ventilatorio del túnel de subida al de bajada a través de los cuatro portales de intercomunicación.

Para el caso B, en que los vehículos viajan lentamente y resisten al flujo de aire, se encontró que el gradiente de presión en la dirección del tráfico es negativo. Esto es lógico porque es la única forma como el aire puede salir. Así, pues, a partir de la entrada la presión se hace subatmosférica y va disminuyendo progresivamente hasta que muy cerca de la salida sube bruscamente hasta el cero atmosférico. Luego, si tenemos cola lenta subiendo hacia Caracas y tráfico rápido en bajada, habrá transferencia del flujo del túnel de bajada hacia el de subida, lo cual es conveniente desde el punto de vista de la descontaminación.

Un tercer caso, tratado como combinación de los anteriores, denominado caso C; representa la situación de una tercera fila de vehículos subiendo por el túnel de bajada. Se encontró que, similarmente al caso B, hay transferencia de flujo hacia el túnel de subida, lo cual parecería conveniente. Sin embargo, sucede que el flujo en el túnel de bajada se hace muy lento y, por lo tanto, la tercera cola lenta que por él sube lo contamina mucho, transfiriéndose este aire contaminado a las pistas de subida. En el trabajo siguiente (Parte II) se verá que el caso C es el más indeseable de todos.

INTRODUCCIÓN

El objetivo del presente estudio es calcular la variación longitudinal de caudales (las velocidades) de aire en los túneles viales de subida y bajada (Boquerón I) en la autopista Caracas - La Guaira, considerando los siguientes factores: a) La ventilación forzada por el techo; b) El extractor en el

túnel de subida del Boquerón I; c) La intercomunicación, mediante cuatro portales, de los túneles de subida y bajada en el Boquerón I, y d) El empuje - o resistencia - de los vehículos al flujo de aire.

Este modelo se basa en un estudio previo contratado por el MTC al Instituto de Mecánica de Fluidos de la UCV, en

el cual se calibró el valor del coeficiente de dispersión, E , dentro de los túneles, en base a mediciones tomadas por el MARNR.

Los casos contemplados en este estudio son los siguientes:
 1) Velocidad de los vehículos, V , mayor que la velocidad del flujo de aire, $U(x)$, en ambos túneles: de subida (hacia Caracas) y de bajada (hacia La Guaira). Este caso corresponde a una condición normal con poco tráfico o también al caso en que no hubiese ventilación forzada por el techo y el caudal del aire es empujado por los vehículos. (Fig. 1).

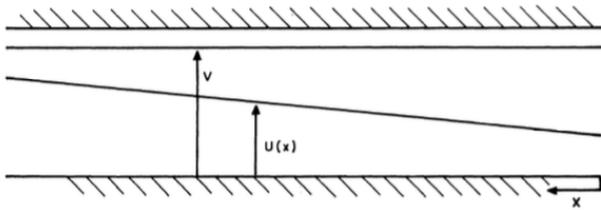


Figura 1. Distribución de velocidad para el caso 1

2) Cola de vehículos en el túnel de subida, desplazándose a pequeña velocidad (inferior a la del aire, ver Fig. 2) y el flujo normal en el túnel de bajada, siendo en éste la velocidad de los vehículos superior a la del flujo de aire. Esto corresponde a una situación crítica que se produce típicamente los días domingos a las 7:00 p.m., aproximadamente.

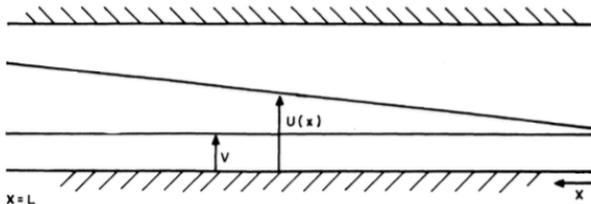


Figura 2. Distribución de velocidad para el caso 2

3) Cola lenta de vehículos subiendo por tres pistas: dos de ellas en el túnel de subida y la tercera subiendo por una de las pistas del túnel de bajada. En el túnel de bajada los vehículos que se dirigen hacia La Guaira se supone que se desplazan a una velocidad mayor que la del flujo de aire. Este caso es de especial interés, ya que se ha mencionado como una posibilidad de alivio para el tráfico, y este estudio permitirá evaluar los niveles de contaminación de monóxido de carbono correspondientes (Fig. 3).

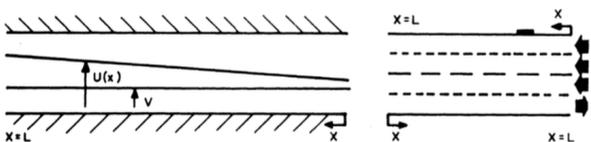


Figura 3. Distribución de velocidad para el caso 3

En esta primera parte se presentan las distribuciones de flujo y presión dentro de los túneles, mientras que en una segunda parte se presentarán las distribuciones de concentración de monóxido correspondientes a los casos arriba mencionados.

ANALISIS

Para el análisis del flujo ventilatorio en los túneles viales se aplicará el principio de la conservación de la materia para tramos y nodos, el de la cantidad de movimiento para tramos, y el principio de conservación de energía entre dos nodos de los túneles interconectados por portales (ver Fig. 4).

El análisis realizado para los casos estudiados involucra la fuerza de fricción entre el flujo de aire y las paredes del túnel, la fuerza de empuje que ejercen los vehículos sobre el aire (efecto pistón), y la fuerza debida al gradiente de presión existente.

El análisis, específicamente, fue realizado para dos casos estudiados, los cuales denominamos A y B. Estos representan situaciones específicas en cuanto a distribuciones de velocidades se refiere, correspondiendo el caso A a aquella distribución de velocidad en la cual la velocidad de los vehículos es superior a la del aire y ésta, a su vez, es superior a cero (ver Fig. 1). El caso B lo constituye una distribución de velocidad de aire que supera a la de los vehículos (ver Fig. 2). El tercer caso mencionado en la introducción caerá dentro del marco teórico caso B.

Para el análisis teórico, se dividió y enumeró el túnel como lo describe el esquema de la figura 4.

En los tramos se aplicaron los principios de conservación de la materia y el de la cantidad de movimiento y entre los nodos de los túneles de subida y bajada, el principio de la energía y de la conservación de la materia, tomando en consideración el caudal de aire que se establece por los portales de intercomunicación en el túnel de subida y el de bajada.

Debido a lo extenso del desarrollo de las ecuaciones se hará un planteamiento genérico del principio de conservación de la materia, y el de la cantidad de movimiento para cualquier tramo. Lo mismo se hará para la ecuación de la energía, pero para dos nodos genéricos.

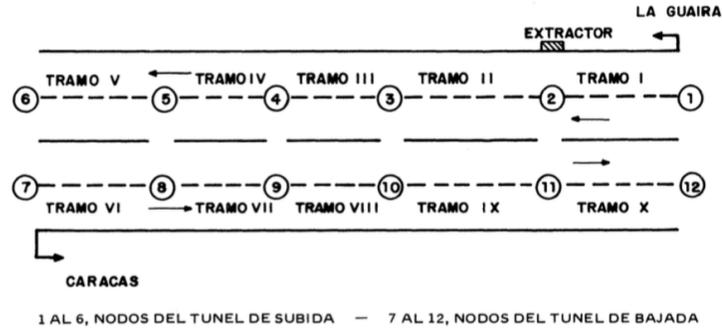


Figura 4. Esquema en planta del túnel Boquerón I de la autopista Caracas-La Guaira

Ecuación de la conservación de la materia (continuidad):

Sea un tramo cualquiera i , donde se plantea un volumen de control, al cual se le aplica el principio de conservación de la materia, obteniéndose la siguiente expresión:

$$\frac{dQ}{dx} = V_T \sin \alpha_T B \quad (1)$$

donde V_T y α_T se definen en la figura 5, y B es el ancho del túnel.

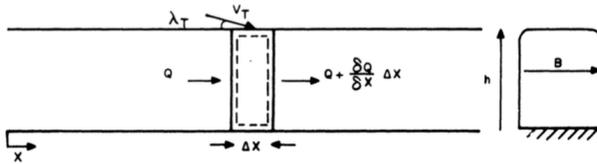


Figura 5. Volumen de control para cualquier tramo

Denominando q al caudal inyectado por unidad de longitud, se tiene:

$$\frac{dU}{dx} = \frac{q}{A_T} \quad (2)$$

donde $q = V_T B \sin \alpha_T$ y A_T es el área de la sección transversal del túnel. Al integrar (2) para un tramo i cualquiera, resulta:

$$U_i(x) = \frac{q}{A_T} X + C_i \quad (3)$$

lo cual, suponiendo que q es constante, indica que la velocidad media U en el túnel varía linealmente con la distancia a lo largo de él.

Adicionalmente, en cada nodo debe imponerse la conservación de la materia. Para esto se postulan velocidades U_{ia} y U_{id} (antes y después del nodo i) del aire y se agrega el caudal de aire que entra (o sale) del portal correspondiente. Uno de los nodos incluirá al extractor ubicado a unos 350 m desde la entrada del túnel de subida.

Como siempre habrá dos nodos interconectados por un portal, el caudal interportal correspondiente aparecerá en la ecuación de conservación de cada nodo, una vez como influjo y otra vez como eflujo. Los valores de U_{ia} y U_{id} se expresan mediante (3).

Principio de la cantidad de movimiento:

En la figura 6 se esquematizan las fuerzas y los flujos relacionados a un volumen de control, para expresar el principio arriba mencionado.

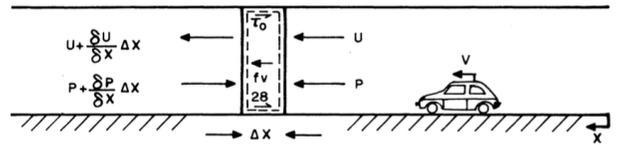


Figura 6. Volumen de control para un tramo cualquiera

El resultado es:

$$C_D A_P \rho (V - U)^2 \frac{n \Delta x}{2} - \frac{1}{8} \rho f U^2 P_T \Delta X - \frac{dP}{dx} A_T \Delta X = 2 \rho U \frac{dU}{dx} A_T \Delta X - \rho V_T^2 \sin \alpha_T \cos \alpha_T B \Delta X \quad (4)$$

En el miembro izquierdo, el primer término representa el empuje de los vehículos sobre el flujo del aire (n es el número de vehículos por unidad de longitud). Si $V < U$ habría que cambiarle el signo a dicho término. Debido a lo complejo que sería, en general, contabilizar el signo de $V - U$, es por lo que se han considerado los casos A y B mencionados en la Introducción. El segundo término expresa la resistencia friccional de las paredes del túnel al flujo (f es el factor de fricción y P_T el perímetro resistente del túnel). Si $U < 0$ habría que cambiarle el signo a dicho término, por lo cual el análisis es válido sólo para $U > 0$. El tercer término representa al gradiente de presión, y los dos términos del miembro derecho expresan el eflujo neto de cantidad de movimiento desde el volumen de control.

Al adimensionalizar la ecuación (4), aparecieron cuatro parámetros adimensionales:

$$\pi_1 = C_D \frac{A_P nL}{A_T^2}; \quad \pi_2 = \frac{qL}{A_T V};$$

$$\pi_3 = \frac{fL}{8R_H}; \quad \pi_4 = \frac{q}{BV \tan \alpha_T}$$

estos representan el empuje vehicular, el caudal inyectado por el techo, el efecto de la fricción y la cantidad de movimiento que entra por el techo, respectivamente.

Es posible despejar dp/dx de (4), integrar y obtener $P_i(x)$ en cualquier tramo. Luego se supone que la presión en un nodo es única, lo cual impone condiciones a la presión para tramos adyacentes. Los detalles de la solución se explican en la referencia 1.

Pérdida de energía en el flujo interportal:

Suponiendo que la pérdida de energía entre dos nodos interconectados por un portal es el producto de la carga cinética interportal por un coeficiente de pérdida C_f se completa el sistema de ecuaciones necesario para determinar las incógnitas.

Solución del Sistema de Ecuaciones.

La técnica de solución consistió en suponer primero que los portales están cerrados. Esto permite obtener la velocidad, $U(x)$, como una ecuación de segundo grado, directamente. Luego se abren los portales, se calculan los flujos interportales, y se vuelve a calcular $U(x)$. El proceso se repite hasta la convergencia.

Para resolver el tercer caso (3 pistas de subida) se recurrió al siguiente artificio: el empuje de la tercera fila se transformó en una fricción de pared equivalente. Esto permitió resolver el flujo en el túnel de bajada mediante la técnica usada para el caso A. Se encontró que el factor de fricción equivalente de la tercera fila es como 100 veces mayor que el de la verdadera fricción de pared.

CASOS ESTUDIADOS. DISCUSIÓN

CASO A. (Tráfico normal en ambos túneles):

En los gráficos la y lb se presentan las distribuciones de velocidad del flujo ventilatorio a lo largo de los túneles de subida y bajada, respectivamente, para un caso considerado como tráfico normal típico. Los valores de las variables y parámetros adimensionales que determinan los flujos, se presentan en la tabla 1. Se observa que a excepción del primer portal (situado frente al extractor en $x/L = 0,22$ en

el túnel de subida), a través de todos los demás portales hay flujo del túnel de subida hacia el de bajada, y, como se observa en el listado, estos flujos van aumentando a medida que se progresa hacia Caracas. A pesar que el caudal unitario inyectado por el techo es mayor en el túnel de subida que en el de bajada, las magnitudes de las velocidades del flujo ventilatorio del túnel de bajada superan a las de subida. Esto se debe, en primer lugar, al efecto del extractor, que obviamente deprime la velocidad viento abajo de él. En segundo lugar, la transferencia de flujo del túnel de subida al de bajada, a través de los portales, contribuye al aumento de la velocidad de éste. Sin embargo, debido a que el extractor tiende a bajar la presión frente a él (por el efecto de succión) en el túnel de subida, es por lo que en el portal situado frente al extractor ocurre flujo del túnel de bajada hacia el de subida. Esto equivale a decir que el extractor no sólo extrae aire del túnel de subida sino del de bajada también, a través del portal situado justo en frente de la rejilla del extractor.

La razón por la que en los demás portales hay flujo del túnel de subida hacia el de bajada es porque las presiones en aquel son bastante mayores que en éste. Ello se debe a que el gradiente longitudinal de la velocidad del flujo ventilatorio, dU/dx , es proporcional al caudal unitario inyectado por el techo, q , lo cual, observando la ecuación (8), demuestra que el gradiente de presión, dp/dx , y, por lo tanto, las presiones, también aumentan a medida que se incrementa el valor de q . En la tabla 1 se ve que el valor del q de subida es el triple del inyectado en el túnel de bajada.

Tabla 1. CASO "A"

VARIABLES	TUNEL SUBIDA LA GUAIRA - CARACAS	TUNEL BAJADA CARACAS - LA GUAIRA
π_1	0.454	0.454
π_2	0.147	0.052
π_3	2.47	2.47
π_4	0.0	0.0
V (m/s)	22.2	22.2
q (m ² /s)	0.0606	0.0214
Q _{EXT} (m ³ /s)	50.0	—
Q _V (veh/h)	1.800,00	1.800,00
n (veh/ml)	0.011/pista	0.011/pista

Los resultados correspondientes a este caso sugieren la conveniencia, desde el punto de vista estrictamente aerodinámico, de cerrar los portales total o parcialmente, a objeto de que puedan pasar personas pero que fluya menos aire, ya que, obviamente, conviene tener mayores velocidades del aire en el túnel de subida que en el de bajada.

CASO "A"

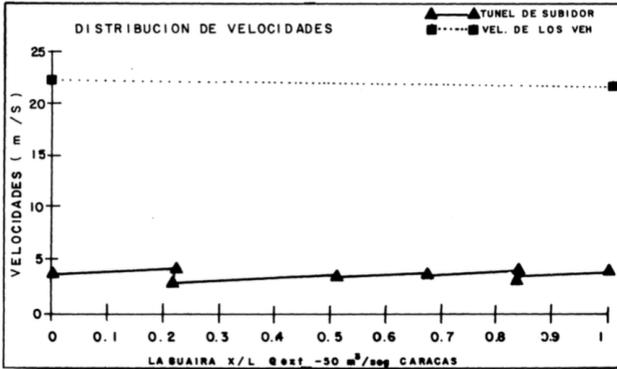


Gráfico 1a. Velocidad del aire en el túnel de subida

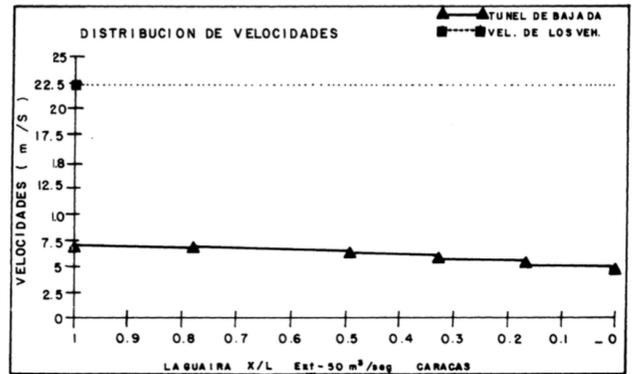


Gráfico 1b. Velocidad del aire en el túnel de bajada

Tabla 2. CASO "B"

VARIABLES	TUNEL SUBIDA LA GUAIRA - CARACAS	TUNEL BAJADA CARACAS - LA GUAIRA
\bar{n}_1	- 20.0	0.484
\bar{n}_2	2.17	0.055
\bar{n}_3	2.42	2.42
\bar{n}_4	0.0	0.0
VS (m/s)	1.5	-
q (m ² /s)	0.0606	-
Q _{EXT} (m ³ /s)	75.0	-
Q _V (veh/h)	1.080,00	-
n (veh/ml)	0.1/pista	-
V ₀ (m/s)	-	16.66
q ₀ (m ² /s)	-	0.02145
Q _V (veh/h)	-	2.100,00
n (veh/ml)	-	0.0175/pista

CASO B. (Cola en subida y tráfico normal en bajada):

Las variables y parámetros adimensionales determinantes se presentan en la tabla 2, y las distribuciones de velocidades en los gráficos 2a y 2b. En este caso se supuso un caudal máximo posible del extractor algo exagerado ($Q_{EXT} = 75 \text{ m}^3/\text{s}$), ya que al estudiar, para un futuro segundo informe, la contaminación de monóxido de carbono correspondiente, se desea, precisamente, estimar la capacidad de limpieza del sistema ventilatorio bajo condiciones extremas.

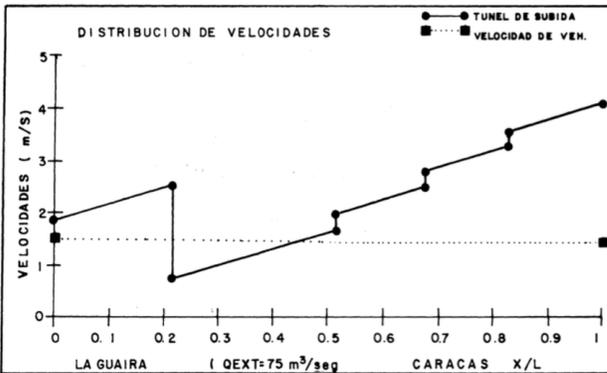


Gráfico 2a. Velocidad del aire en el túnel de subida. (Caso B)

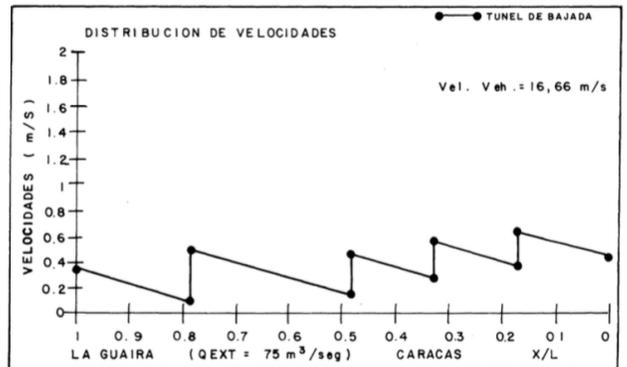


Gráfico 2b. Velocidad del aire en el túnel de bajada. (Caso B)

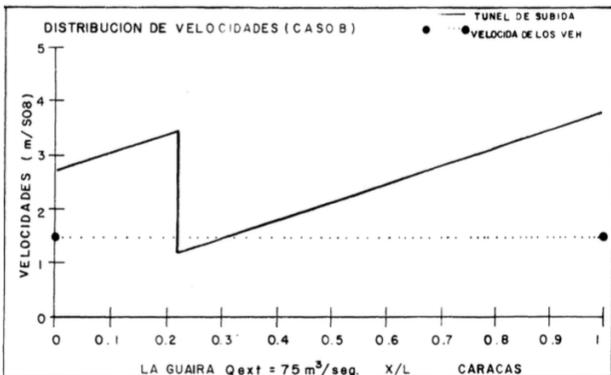


Gráfico 2c. Efecto del cierre de los portales. (Caso B)

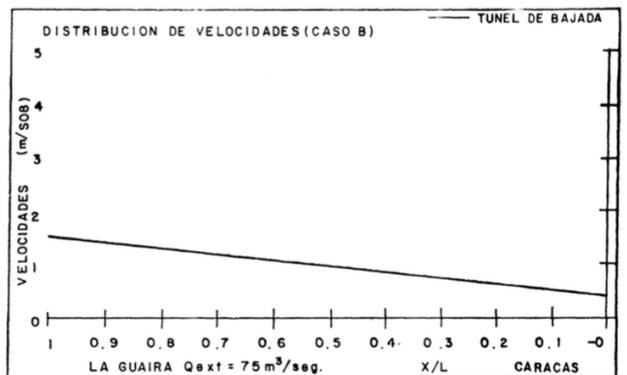


Gráfico 2d. Efecto del cierre de los portales. (Caso B)

En el presente caso los flujos a través de los portales son todos del túnel de bajada hacia el de subida, por lo cual las velocidades ventilatorias en el túnel de bajada no superan los 0,5 m/s, lo cual parecería demasiado bajo a los efectos de transportar (por convección) el contaminante a lo largo de este túnel. En este caso, la presión debe ir disminuyendo a lo largo del túnel, ya que su gradiente debe ser negativo para poder evacuar el flujo de aire; todas las demás fuerzas resisten al flujo de aire; muy cerca del final del túnel el gradiente de presión cambió de signo, pero el flujo de aire sale por inercia. La depresión de la presión frente al extractor por el mayor efecto de succión, combinado con la resistencia que ejerce la cola de vehículos contra el flujo de aire, conlleva a un patrón de presiones negativas en el túnel de subida, lo cual explicaría la dirección de los flujos interportales arriba mencionados. Estos flujos son convenientes desde el punto de vista de evacuar los contaminantes del túnel de subida. Sin embargo, sólo después de calcular los niveles de contaminación se podrá concluir algo respecto al túnel de bajada.

CASO C. (Cola subiendo por tres pistas y tráfico normal bajando por una pista):

Esta posibilidad se ha mencionado en la prensa como medida de alivio a los usuarios que suben hacia Caracas. El túnel de subida lleva cola y se permite una cola adicional que suba por una de las pistas de bajada, suponiendo que por la otra pista de bajada fluye, normalmente, el tráfico desde Caracas hacia La Guaira.

Como se observa en la tabla 3, el patrón de flujo se parece al del Caso B. De nuevo la succión frente al extractor provoca presiones negativas en el túnel de subida; los caudales interportales van del túnel de bajada hacia el de subida, y las velocidades ventilatorias en el túnel de bajada son bastante pequeñas. Este caso puede ser crítico, ya que la cola de vehículos que sube por el túnel de bajada produce una cantidad importante de contaminante que se le agrega a un túnel de menor capacidad de ventilación y de poca capacidad de transporte (por convección), como lo indica la distribución de velocidad obtenida para este caso. Por eso es de esperar niveles altos de contaminación en esta situación.

Tabla 3. CASO "C"

VARIABLES	TUNEL SUBIDA LA GUAIRA - CARACAS	TUNEL BAJADA CARACAS - LA GUAIRA
π_1	- 20.0	2.15
π_2	1.21	0.064
π_3	2.42	2.42
π_4	0.0	0.0
V (m/s)	2.7	18.05
q (m ³ /s)	0.06066	0.0214
Q _{EXT} (m ³ /s)	100	-
Q _V (veh/h)	3.600,00	900
n _s (veh/ml)	0.185/pista	-
V _s (m/s)	1.75	-
n _s (3ª pista)	0.29	-
C _D	0.5	-
Q _V (veh/h) (3ª pista)	1.800,00	-
UTI	0.4	-

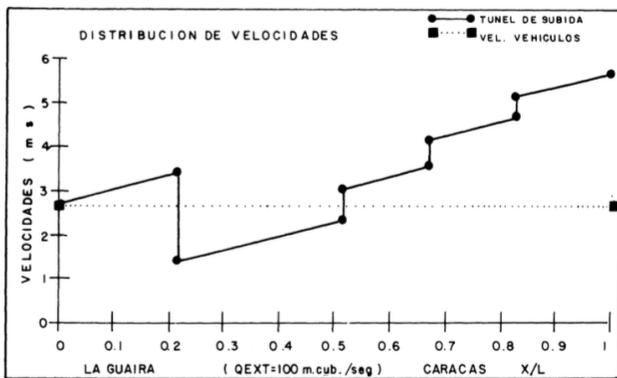


Gráfico 3a. Velocidad del aire en el túnel de subida. (Caso C)

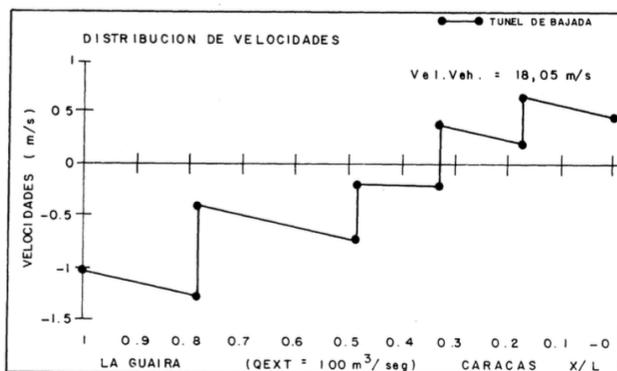


Gráfico 3b. Velocidad del aire en el túnel de bajada. (Caso C)

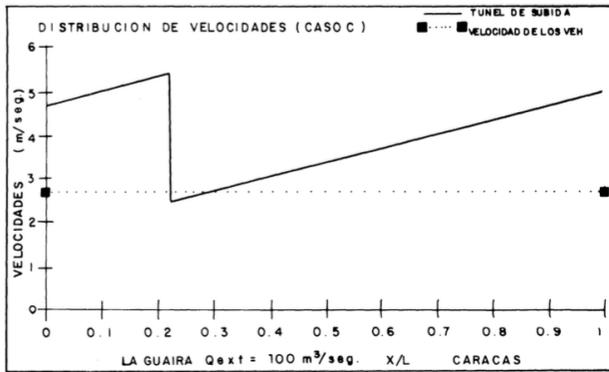


Gráfico 3c. Efecto del cierre de los portales. (Caso C)

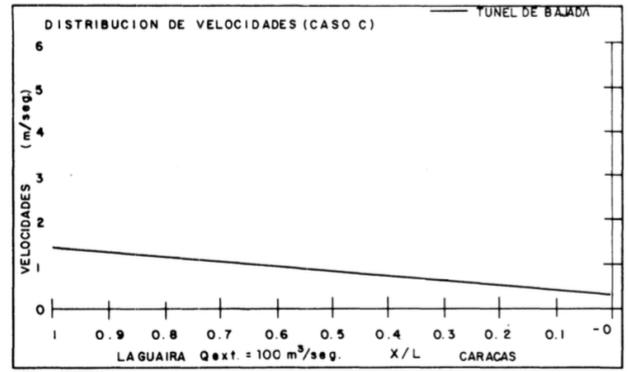


Gráfico 3d. Efecto del cierre de los portales. (Caso C)

En los casos B y C se observa en el túnel de subida una zona, al pasar el extractor, en que la velocidad ventilatoria se hace inferior a la de los vehículos. Esto significa que en esa zona los vehículos empujan al aire hacia la salida del túnel en lugar de resistirlo, lo cual no ha sido considerado en el modelo matemático. Sin embargo, debido a lo pequeño de las diferencias de velocidades vehículo-aire, a lo relativamente corto de la zona donde ocurre la discrepancia, y a la presencia de otras fuerzas actuantes, se considera esto como de poca importancia.

En el caso C ocurren velocidades del aire negativas, lo cual implicaría que la fricción de las paredes sobre el aire se modela en la dirección contraria a la correcta. Debido a la pequeña magnitud de las velocidades, la fricción es muy despreciable respecto a otras fuerzas actuantes. Es de notar que el factor de fricción equivalente de la cola (en el túnel de bajada) es casi cien veces mayor que el de las paredes, lo cual refuerza el argumento anterior.

CONCLUSIONES

- 1) El flujo ventilatorio en los túneles interconectados del Boquerón I es un fenómeno aerodinámico complejo y es sensible al volumen succionado por el extractor, al flujo de vehículos y a los caudales inyectados

por los techos. Las presiones a lo largo del túnel de subida pueden ser positivas o negativas respecto a la atmosférica.

- 2) Para tráfico normal en ambos túneles, el flujo ventilatorio resulta mayor en el túnel de bajada que en el de subida.
- 3) Para los casos de colas subiendo, estudiados, se encontró que el flujo ventilatorio en el túnel de bajada es bastante menor.
- 4) Hasta no estudiar la distribución de la contaminación correspondiente a los casos arriba mencionados, no se podrá concluir respecto a la conveniencia de disminuir la abertura de los portales.

REFERENCIA

1. FALCÓN, M.; GARCÍA, R. Y LEZAMA, D.: Estudio de la concentración de monóxido de carbono en los túneles Boquerón I y II en la autopista Caracas-La Guaira, Distrito Federal. Instituto de Mecánica de Fluidos; Facultad de Ingeniería, UCV. Caracas, 1986. (Estudio contratado al IMF por el MTC).

