

Construcción y caracterización de túnel de viento a bajas velocidades, parte I: Aspectos teóricos.

A propósito del túnel de viento construido por Roberto Martínez en el Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia
Junio, 2011.

Utilizando conceptos de pérdidas de presión de un fluido que viaja a través de un tubo, a través de pantallas y panales, y también cambiando la sección transversal, y utilizando datos empíricos disponibles en la literatura de túneles de viento, se busca sintetizar aquí algunos criterios para construir túneles de viento, que serán aplicados en un trabajo experimental que será la segunda parte de este artículo.

Using the concepts of pressure losses of a fluid travelling through a pipe, through screens and honeycombs, and also with different flow cross sections, and using empirical data available in the wind tunnels literature, this article seeks to clarify and synthesize some criteria for wind tunnel construction, which will be applied in the second part of the work.

1	Introducción.....	1
2	Marco teórico general	1
3	Flujo dentro del túnel.....	3
4	Pérdidas dentro del túnel.....	3
4.1	Honeycomb, en el ingreso al túnel.....	3
4.2	Malla	4
4.3	Contractor.....	5
4.4	Sección de prueba	5
4.5	Difusor	5
5	Generalidades instrumentales	6
6	Conclusiones	7
7	Preguntas y discusiones adicionales. Intento de ingeniería en reversa	7
8	Bibliografía	9

1 Introducción.

Uno de los problemas que se encuentran con rapidez en la literatura de túneles de viento, es que parece que las constantes experimentales, las relaciones y los resultados se presentan de una forma bastante entrelazada con la teoría, y así es difícil separar o distinguir la información que proviene de fuentes principalmente empíricas, de los conocimientos que se soportan en modelos y conceptos teóricos que permiten entender *por qué* ocurren ciertos fenómenos que obligan a tomar decisiones y elegir los valores de ciertos

parámetros. Intentaré señalar aquí de dónde provienen las diferentes afirmaciones.

2 Marco teórico general

En un túnel de viento se desea tener un flujo controlado para poner a prueba dos cosas: por una parte, los modelos teóricos y conceptos que se tienen para algunas situaciones controladas como el régimen laminar, y por otra parte los valores empíricos con los que deben manejarse situaciones más complejas como el régimen turbulento. Es la mezcla de ambas búsquedas lo que a menudo hace que la literatura de túneles de viento sea un poco abstrusa y confusa para un primerísimo acercamiento¹.

Lo primero que debe observarse, es ¿por qué si la teoría de Reynolds, Darcy, Bernoulli, y buena parte de la teoría de fluidos que se utiliza aquí, se dedujo en experimentos con líquidos, es válido utilizarla

¹ Retomando la inquietud de la introducción, tal parece que la teoría de fluidos está bastante más desarrollada para el régimen laminar, lo que permite aplicar allí más modelos que en el régimen turbulento, en donde muchas de las explicaciones deben apoyarse en resultados experimentales y relaciones empíricas ([5], p. 322).

para explicar el flujo de aire? Si la velocidad de un fluido es menor que 0.3 Mach, (o sea menor que 100m/s), la velocidad se considera subsónica [9]. En nuestro experimento se cumple esta condición², de forma que el valor de densidad del aire puede considerarse constante; además, el aire tiene asociados valores de viscosidad dinámica, de forma que parece que están dadas las condiciones para considerar es aplicable la teoría³.

Este régimen está genialmente asociado al número de Reynolds Re , que encontró este número adimensional tratando de distinguir en qué momento la resistencia de un fluido contra el movimiento de un cuerpo pasaba de ser proporcional a la velocidad del cuerpo, a ser proporcional al *cuadrado* de la velocidad del mismo [14]. Por otra parte, la dinámica del aire dentro del túnel tiene varios conceptos asociados: en la frontera del fluido en contacto con el sólido que lo contiene, se considera que la velocidad de las partículas es nula; en el régimen laminar ese flujo puede ser descrito en forma de capas que viajan paralelamente, y que ejercen entre sí una fuerza cortante, caracterizada por la constante de viscosidad que, como observó Reynolds en su artículo original [14], le aporta al fluido una estabilidad que hace que sea más difícil lograr la turbulencia en un fluido con alta viscosidad⁴; en

² Esto se justificará con más rigor en la sección 7 del presente escrito.

³ Es importante listar todas las suposiciones que se incluyen a lo largo de todo el experimento. Algunas de esas suposiciones tienen una mayor probabilidad de ser incorrectas, y serán las primeras en cuestionarse cuando los resultados no sean idénticos a lo esperado en la teoría. Esta suposición mencionada aquí, de la constancia de μ y ρ , será tomada como válida a lo largo de estos primeros trabajos, con el fin de concentrar los esfuerzos para buscar posibles errores de interpretación.

⁴ De hecho esta dificultad para lograr turbulencia a una alta viscosidad puede ver matemáticamente en el número de Reynolds Re : a medida que es mayor el cociente $(\rho D v_{avg} / \mu)$, en donde μ es la viscosidad dinámica (y por lo tanto μ/ρ es la viscosidad cinemática), el fluido presenta una mayor turbulencia. En [17] proponen una interpretación: “si las fuerzas inerciales dominan sobre las viscosas, el fluido es turbulento; si dominan las fuerzas viscosas (baja velocidad, bajo Re), y son lo suficientemente grandes para conservar las partículas alineadas, el flujo es laminar”. Sin embargo, en el artículo original de Reynolds [14] este número no es tomado como un valor intrínseco al flujo para distinguir en forma tajante los dos regímenes de acuerdo a si el número de Reynolds es alto o es bajo, sino que es un indicador de *estabilidad*. Ello es, si Re es

esas capas la velocidad no es la misma, de forma que tenemos un perfil de velocidades normalmente descrito por la ley de Prandtl, y asimismo una velocidad promedio asociada a dicho perfil ([11], p. 224); en la variación angular de la sección transversal para la salida del aire, si el ángulo es demasiado grande, se corre el riesgo de tener un desprendimiento de capa límite; la turbulencia es reducida con ayuda de un honeycomb para eliminar la turbulencia en un rango de ángulos de velocidad, y posteriormente una malla con agujeros más pequeños que el primero, para eliminar turbulencias en nuevos ángulos de las componentes de velocidad de las moléculas de aire. Durante el paso por el honeycomb, así como en el paso por la sección de prueba, existen pérdidas de presión que se modelan con base en la ecuación de Darcy-Weisbach principalmente.

Así, parte de la caracterización del túnel de viento consiste precisamente en indagar estas pérdidas de presión y por lo tanto de potencia, aproximándonos a entender en qué se está gastando la energía al mover aire dentro del túnel, tratando de relacionar las partes del montaje.

Finalmente, sabemos que el cambio de escala en aerodinámica está validado por los parámetros de similaridad: si en un experimento pueden reproducirse el número de Reynolds, como indicador de viscosidad & turbulencia, y el número de Mach como indicador de compresibilidad del aire, se considera que las conclusiones del experimento son aplicables a escala real [2], [4]. También sabemos que en un túnel de esta escala el número de Reynolds es notablemente menor que, por ejemplo, experimentos de aviones en donde Re puede ser de varios millones [13]. No obstante, los conceptos, la instrumentación aplicada, y la velocidad que se ha logrado en el túnel, abre una línea de aprendizajes muy interesante con este tipo de montajes.

alto, *entonces es más inestable*, es decir, es más fácil o más probable que allí haya turbulencias, y si es bajo, es *más estable*. En el artículo de experimentación, al analizar el valor de Reynolds obtenido allí y el régimen obtenido en el túnel, habrá más discusiones acerca de este número.

3 Flujo dentro del túnel

En fluidos se escucha a menudo la expresión “pérdida de presión” de un fluido después de pasar por alguna parte. Pero, ¿cómo puede esto traducirse al diseño de un túnel de viento, y su caracterización una vez construido?

Las pérdidas de presión pueden traducirse a pérdidas de potencia al observar que buena parte de esas pérdidas pueden darse a una velocidad que varía dentro de un cierto rango, y por lo tanto se puede asociar una velocidad promedio a todo este rango. Así, tomando esta velocidad promedio⁵, y multiplicándola por las pérdidas de presión, tenemos un estimado para las pérdidas de potencia - y por lo tanto de energía- en un túnel.

$$\Delta Potencia = v_{avg} \Delta presión$$

La ecuación de Bernoulli puede deducirse como una forma del teorema de trabajo-energía, o si se quiere como una manifestación de la conservación de la energía. Sin embargo, estas pérdidas obligan a la necesidad de generalizar un poco esa ecuación. En general, la ecuación de Bernoulli tiene varias restricciones [11] (p. 191):

1. No hay pérdidas de energía debidas a fricción
2. No hay pérdidas de energía debidas a intercambio de calor. Se supone que no hay intercambios de calor con el medio externo o con el contenedor del fluido
3. Se supone que no hay bombas o fuentes de energía dentro del circuito
4. Se deduce para fluidos incompresibles

Como se ha dicho antes, la suposición No. 4 se considerará aplicable a lo largo del presente trabajo. Sobre el punto 3, hay que considerar que nuestro ventilador es una bomba en el circuito de aire del túnel. Una bomba es un dispositivo mecánico que añade energía a un fluido [11], por lo tanto dicho ventilador es la única fuente de energía dentro del túnel.

⁵ Por ahora nos olvidaremos del rango de variación de esa velocidad promedio.

El cuestionamiento a la suposición No. 2 será parte de uno de los experimentos, involucrando medición de temperatura.

Acerca del punto 1, ya se han mencionado las pérdidas debidas a la viscosidad y a las capas del fluido en la frontera con las paredes internas del túnel.

4 Pérdidas dentro del túnel

Si recorremos con el aire el túnel completo, podemos identificar las siguientes fuentes de pérdida de carga:

4.1 Honeycomb, en el ingreso al túnel

El honeycomb es un panal de celdas que busca reducir la turbulencia.

El aire debe pasar a través de cada tubo del honeycomb, de manera que tenemos una cantidad de fluido pasando a través de varios tubos paralelos. Usando la metodología convencional que se hace en teoría de fluidos para calcular las caídas de presión en tubos paralelos, se considera que la diferencia de presión entre el ingreso y la salida del tubo es la misma para todas las ramas⁶. Así que para cada rama se cumple la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$P_L = f \frac{L}{D} \frac{1}{2} \rho v^2 \quad \text{Ec. 1}$$

El factor f depende de la naturaleza del régimen: existe una fórmula diferente para f según si el régimen es laminar o turbulento. Para el caso laminar, combinando la ecuación de Darcy-Weisbach con la ecuación de Hagen-Poiseuille para obtener finalmente que

$$f = \frac{64}{Re} \quad \text{Ec. 2}$$

Para el caso turbulento es un poco más complicado el cálculo de f . En 1937 Colebrook logró extraer la

⁶ [6], p. 256; [16], p. 371; [17], p. 445.

siguiente ecuación empírica a partir de datos experimentales⁷:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log_{10} \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right) \quad \text{Ec. 3}$$

En el caso del túnel de viento en estudio, los tubos del honeycomb son de PVC, así que podemos tomar su rugosidad ε como cero, a diferencia de otros materiales como el concreto o la madera que sí requieren un valor de rugosidad en esta ecuación. De esta forma, la ecuación se reduce a la ley universal de Prandtl⁸:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log_{10} \left(\frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right) \quad \text{Ec. 4}$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.0 \log_{10} (\text{Re} \sqrt{f}) - 0.8$$

Esta ecuación debe resolverse numéricamente (o gráficamente usando el diagrama de Moody), aunque por simplicidad puede usarse una versión simple encontrada en 1983 por S. E. Haaland [5], y que tiene una precisión dentro del 2% respecto a los resultados según la Ec. 1 y la Ec. 3:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log_{10} \left(\frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right) \quad \text{Ec. 5}$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.0 \log_{10} (\text{Re} \sqrt{f}) - 0.8$$

En cuanto el aire ingresa dentro de cualquiera de los tubos del honeycomb, las paredes del tubo empiezan a ejercer una fricción sobre algunas partículas del aire, y aquella zona en que puede considerarse que las partículas sienten esa fuerza cortante, es llamada *capa límite*, que va abarcando cada vez una mayor parte de la sección transversal,

hasta que puede considerarse que todas las partículas en una sección transversal son afectadas por la fuerza de viscosidad que es causada por el contacto con las paredes externas del flujo. Entonces las capas más cercanas a la frontera reducen su velocidad, y a su vez ejercen una influencia sobre las capas más alejadas de la frontera, aunque la fuerza que se aplica sobre estas últimas es menor, de forma que en el centro del tubo hay una velocidad máxima. De esta forma, el flujo de aire dentro del tubo empieza a adquirir un perfil de velocidades, a medida que avanza dentro del tubo, y dicho perfil empieza a *desarrollarse* en una forma definida al cabo de una cierta distancia, y por eso, si el tubo es lo suficientemente largo, tendrá una región en la que está *completamente desarrollado* [5].

La distancia necesaria para lograr ese desarrollo se describe con dos conceptos: primero, al proyectar la capa límite en un plano axial, se ve que al cabo de una distancia las líneas provenientes de las zonas opuestas de la frontera empiezan a converger (que es lo que corresponde a que toda la sección transversal del flujo siente la viscosidad, como dije arriba); y, segundo, la fricción ejercida sobre el fluido, está dentro de un margen de 2% de lo que será en el valor totalmente desarrollado. A esa distancia necesaria para lograr el “total desarrollo” del flujo dentro del tubo, se le llamará *longitud de entrada*, que para el régimen laminar es del orden de $0.05 \text{ Re}D$, y para régimen turbulento es del orden de $10D$, donde D es el diámetro interno del tubo, y Re es el número de Reynolds.

4.2 Malla

Para continuar la reducción de turbulencia, posteriormente al honeycomb, que filtraba principalmente turbulencias en sentido lateral o transversal, se coloca una malla cuyo efecto es reducir turbulencias en sentido axial [15]. Se encuentran varias fórmulas empíricas para calcular las pérdidas en la malla. En [12] se cita un trabajo según el cual el k sólo depende de la porosidad β , que es el área abierta dentro de la malla sobre el área total enmallada:

$$K = 0,52 \frac{1 - \beta^2}{\beta^2} \cos^2 \Omega \quad \text{Ec. 6}$$

⁷ [5], p. 341.

⁸ [5], p. 342; [12], p. 9

Donde Ω es el ángulo que se forma entre el vector velocidad de una partícula del fluido contra una línea perpendicular a la pantalla. Pero en los túneles de viento, después del honeycomb las partículas salen de forma que inciden casi perpendicularmente contra la malla, luego Ω puede tomarse como cero, con lo cual el factor $\cos^2 \Omega$ se convierte en 1. Pero en [13] (p. 76), proponen esta otra fórmula:

$$K = \left(\frac{1 - 0.95\beta^2}{0.95\beta} \right)^2 + \frac{55.2}{R_d} \quad \text{Ec. 7}$$

En donde R_d es el número de Reynolds basado en el diámetro interno de los agujeros de la malla.

4.3 Contractor

De nuevo es necesario separar aquí la teoría de la información técnica y empírica. Conceptualmente, para explicar las pérdidas en una contracción se utilizan conceptos como la *vena contracta*, que para evitarse, obliga a que el ángulo de contracción sea pequeño, pero no demasiado pequeño para que el contractor no sea demasiado largo con el consiguiente aumento de masa dentro del contractor y aumento de área superficial en el interior del contractor con el respectivo incremento en las caídas de presión.

Las pérdidas en el contractor son principalmente debidas a la fricción⁹, así que la caída de presión es:

$$\Delta p_f = \int_0^{L_c} \lambda \frac{\rho}{2} V^2 \frac{dL}{D} \quad \text{Ec. 8}$$

donde L_c es la longitud de contracción del cono.

$$K_0 = f \frac{L_c}{D_0} \int_0^{L_c} \frac{D_0^5}{D^5} \frac{dL}{D} \quad \text{Ec. 9}$$

⁹ [13], p. 90.

que implica asumir un valor promedio del factor de Darcy f ; se encuentran varias fórmulas empíricas para calcular las pérdidas en el contractor. Otros valores para K son¹⁰: $K_L = 0.02$ para un ángulo *total* de contracción θ de 30° ; $K_L = 0.04$ para $\theta = 45^\circ$. Debido a que buena parte de estas fórmulas son empíricas, no es extraño encontrar una tercera propuesta para calcular K_L para ángulos θ mayores o iguales a 45° :

$$K_L = \frac{0.5 \left(1 - \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^2 \right) \sqrt{\sin \frac{\theta}{2}}}{\left(\frac{d_2}{d_1} \right)^4} \quad \text{Ec. 10}$$

en donde d_2 es el área de la sección pequeña, después de la contracción, y d_1 es el área de la sección grande, antes de la contracción.

4.4 Sección de prueba

La caída de presión aquí puede calcularse utilizando la fórmula de Darcy-Weisbach, teniendo en cuenta que la sección de prueba es cuadrada, así que se debe utilizar el diámetro hidráulico D_h en la fórmula ya mencionada en la Ec. 1. Al aplicar estas ecuaciones debe tenerse conciencia de que sólo son válidas en teoría cuando el fluido está totalmente desarrollado.

Las pérdidas de cambio de sección transversal son mencionadas en la sección para el contractor y el difusor.

4.5 Difusor

Aquí de nuevo es necesario separar la teoría de la información empírica. La teoría explica que en el difusor existen pérdidas debidas a la expansión, si el proceso no es adiabático, además de las pérdidas por fricción. Adicionalmente, hay pérdidas por desprendimiento de capa límite si el ángulo es demasiado grande, de manera que el ángulo debe ser pequeño, igual que en el contractor, pero

¹⁰ [5], p. 350.

tampoco indefinidamente pequeño, o el largo del difusor –y por consiguiente el área interna del mismo, y también la cantidad de aire a mover dentro del difusor-, crecerían de tal forma que se desperdiciaría la misma potencia del ventilador o bomba cuyo rendimiento en el circuito se quiere optimizar.

También se encuentran diferentes fórmulas en la literatura. Una de esas fórmulas empíricas, que se puede usar para tener un estimado teórico de la pérdida de carga, es¹¹:

$$K_L = \left(\frac{\lambda}{8 \tan(\alpha/2)} + 0.6 \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \right) \left(1 - \frac{D_1^4}{D_2^4} \right) \frac{D_0^4}{D_1^4}$$

Ec. 11

Otra fórmula, compuesta de un término teórico y un término también empírico, separa explícitamente las caídas debidas a la fricción y las caídas debidas a la expansión del fluido¹²:

$$K_D = k_{fric} + k_{exp}$$

$$K_D = \left\{ k'_{exp} + \frac{f}{8 \sin \theta} \left(\frac{A_R + 1}{A_R - 1} \right) \right\} \left(\frac{A_R - 1}{A_R} \right)^2$$

Ec. 12

donde $A_R = A_{grande}/A_{pequeña}$. Aquí θ es el ángulo entre una pared y el suelo, es decir, que es la mitad del ángulo entre paredes opuestas α mencionado en la ecuación de más arriba.

En otra fuente proponen los siguientes valores¹³, registro sólo los que podrían interesarnos para

¹¹ [13], p. 89. En esta fórmula, α es el ángulo de divergencia entre paredes opuestas; λ es un valor que depende de la forma del túnel, por ejemplo allí proponen que para secciones cilíndricas abiertas un valor razonable para λ es 0.08. Pero en nuestro montaje no tenemos un valor propuesto para este λ promedio. El D_0 que aparece allí, es el diámetro hidráulico de la sección de prueba. D_1 es el diámetro más pequeño, y D_2 es el diámetro más grande.

¹² [12], p. 15

¹³ [5], p. 350.

nuestro caso experimental: $K_L=0.30$ para $d/D=0.2$, $K_L=0.25$ para $d/D=0.4$.

Tampoco es extraño encontrar en la literatura una propuesta empírica adicional para expansiones súbitas:

$$K_L = \frac{\left(1 - \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^2 \right)^2}{\left(\frac{d_2}{d_1} \right)^4}$$

Ec. 13

en donde d_2 es el área de la sección pequeña, antes de la expansión, y d_1 es el área de la sección grande, después de la expansión.

5 Generalidades instrumentales

Como hemos visto, dentro del túnel puede haber pérdidas de energía debidas a causas como rozamiento con las paredes o fricción interna del fluido, turbulencias internas, cambios súbitos de áreas transversales en el flujo del aire generando ya sea situaciones de vena contracta, desprendimiento de capa límite, o cualquier perturbación por imperfecciones o rugosidades en los bordes; así que para caracterizar el túnel nos interesa medir diferencias de presión entre sus regiones internas, velocidad del aire en diferentes puntos, tener un estimado para el caudal, posibles variaciones de temperatura en las diferentes partes, y naturalmente medir distancias espaciales.

Debido a que los valores de viscosidad cinemática del aire son tan bajas, es fácil que una sutil perturbación del sistema genere turbulencias, por lo que los instrumentos y el proceso de medición debe hacerse lentamente, de forma que el mismo movimiento de un sensor o aparato de medición, no altere el régimen que se desea verificar. Un método para ello es realizar varias medidas en una posición específica del instrumento, con el fin de darle al sistema un tiempo para estabilizarse luego de haber movido el sensor.

Con esto en mente, la velocidad del viento no puede ser medida con un anemómetro común de aspas de

los que funcionan como un generador eléctrico en que el movimiento del motor genera una fuerza electromotriz, pues evidentemente esas aspas generan turbulencias. En algunos anemómetros el flujo de aire ingresa en una pequeña caja de manera que las aspas son internas en la caja y la turbulencia allí generada parece estar aislada: pero de todas formas este segundo modelo de anemómetro con aspas, está robando energía al sistema.

Un método que resuelve ambos problemas, de medir velocidad del viento *sin robar energía al sistema*, y además de una forma estática sin alterar el sistema más allá de la presencia del instrumento en reposo, es el del tubo Pitot. Al realizar los experimentos prácticos con este tubo, esta teoría necesita alguna información adicional para entender el aparato. Veremos este punto en el artículo experimental, la 2ª parte de este trabajo.

Existen múltiples posibilidades experimentales para medir otras variables, entre ellas algunos trucos ópticos, para describir cualitativamente las turbulencias, o mediciones que además permitirían verificar si existe un carácter adiabático o isoentrópico en la expansión de aire en un difusor, y se cumplen relaciones de cocientes de presión y temperatura [12]; o mediciones de fuerzas, verificar la manera como se mueve el aire alrededor de un obstáculo como un ala, el torque en un cuerpo; pero en el presente trabajo tendremos un testimonio experimental sólo para el instrumento o método mencionado, es decir el tubo Pitot.

6 Conclusiones

En síntesis, y de una manera muy simplificada, pueden tenerse los siguientes conceptos en cuenta para tener un primer acercamiento a la descripción teórica de un túnel:

Tabla 1 Conceptos físicos para estudiar las diferentes partes del túnel.

Pérdidas en...	Conceptos físicos asociados
Sección de prueba. Perfil de velocidades y pérdidas	Viscosidad; ley de Prandtl; Desprendimiento de capa límite?

Difusor	Cambio de presión al salir, y cómo se adapta el aire a la forma de un boquete de salida; flujo isentrópico; entalpía; relación entre presión y temperatura en expansión adiabática.
Contractor	Desprendimiento de capa límite
Ventilador	Aspas
Honeycomb	Darcy-Weisbach Rugosidad
Malla	β
Forma del túnel	Bernoulli

7 Preguntas y discusiones adicionales. Intento de ingeniería en reversa.

Puede verse que algunos de los contenidos y recomendaciones citadas arriba y encontradas en la literatura parecen cobrar en ocasiones la forma de una receta, e igual que en una receta es difícil distinguir qué partes provienen de una teoría cuestionable y qué partes provienen del tanteo y el error de toda una tradición experimental. Intentaré a continuación discutir algunas decisiones sobre la construcción de los túneles.

Por qué la forma del túnel de viento abierto?

Se considera que el primer túnel de viento data de finales del s. XIX, y uno de los pioneros más famosos fue el túnel abierto de los hermanos Wright. Este túnel presenta una forma recta, como puede verse en las fotos de las réplicas¹⁴, y ya así fue muy útil. Pero al indagar en la historia se encuentran fotos de otro túnel de 1901, de Albert Zahm en Washington, en donde ya presenta la forma general que hoy en día conocemos para un túnel abierto: contracción antes de ingresar en la zona de prueba, y luego de atravesar la zona de prueba, la sección para el flujo de aire se dilata

¹⁴ En la Nasa tienen una réplica. Ver por ejemplo [9].

nuevamente, e incluso un honeycomb a la entrada del aire¹⁵.

Una primera forma de entender esta forma es la siguiente, válida para dos posiciones distintas del ventilador: el aire que ingresa impulsado por una bomba es constreñido a una región de menor área transversal, para incrementar su velocidad; y en la zona opuesta del túnel se incrementa nuevamente el área transversal, para que el contraste de presiones con el medio exterior sea lo suficientemente pequeño como para que no genere turbulencias. El cuestionamiento importante aquí, es: en [10] citan un túnel que no funciona por *absorción* de aire, sino que es un túnel impulsado por un ventilador centrífugo que está soplando, sin embargo tiene una forma similar. Tal parece que la justificación de dicha forma, es la misma si cambiamos la posición del ventilador, esto es, si lo ponemos ya no como extractor que chupa, sino como ventilador que empuja el aire, tal como se evidencia en túneles como el citado en [10].

¿Por qué la relación recomendada entre el diámetro y el largo de las celdas del honeycomb?

En [10] recomiendan que la relación entre diámetro y longitud de los tubos del honeycomb sea de 1:6 a 1:8; una explicación para esta recomendación, es que se esté buscando lograr un *flujo desarrollado* después de que el fluido recorra cierta distancia dentro de los tubos, y se establece la longitud mínima experimentalmente válida para lograr ese desarrollo. En efecto debía tratarse de una longitud *mínima* porque el flujo dentro de los tubos implica una caída de presión (o equivalentemente una pérdida de potencia), de modo que la eficiencia de consumo energético en el túnel caería ahora irónicamente debido al mismo esfuerzo de tratar de mejorar dicha eficiencia.

En [5] explican que la longitud de entrada hidrodinámica para obtener un flujo desarrollado, para régimen laminar, es del orden de

$$L_{h,la\ min\ ar} \cong 0.05\ Re\ D$$

Ec. 14

Pero recordemos que nuestro Reynolds es extremadamente alto, así que si utilizáramos esta fórmula tendríamos una longitud de 3450 cm (!!), de manera que esta fórmula no era aplicable. En [5] continúan sugiriendo otras fórmulas, y plantean que en muchos casos prácticos los efectos de entrada se hacen insignificantes más allá de 10D, de manera que es válido tener un orden de magnitud de

$$L_h \cong 10D$$

Ec. 15

que es del orden de magnitud de la proporción recomendada en [10].

Me parece que a esta explicación le podemos añadir lo siguiente, ver Fig. 1: al extender un tubo en el régimen turbulento, por la condición de no-deslizamiento se filtran componentes transversales demasiado grandes de velocidad de las partículas, sobreviviendo únicamente los componentes transversales de velocidad tales que la partícula lograba pasar sin chocar contra las paredes del tubo, o más en general, sin chocar contra la capa límite.

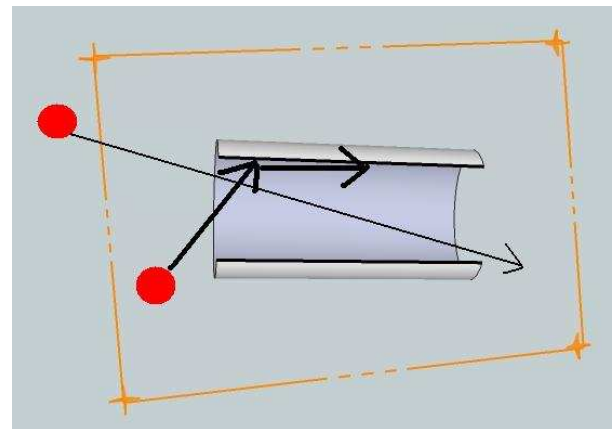


Fig. 1 Para explicar por qué el honeycomb reduce la turbulencia lateralmente, sugiero esta hipótesis complementaria al concepto de desarrollo de flujo.

Para afirmar que el flujo es de carácter subsónico, y que por lo tanto el aire puede considerarse

¹⁵ En [3], disponible en línea, ver Chapter 2: *A heritage Lost and Regained*, sección *An Earthbound American Aeronautical Pioneer*.

incompresible, se utiliza la ecuación de continuidad $A_1V_1=A_2V_2$, pero en esa ecuación ya se está presuponiendo que la densidad es constante. ¿No se está suponiendo precisamente aquello que se quiere demostrar?

Si esta parte no se hace con cuidado, se corre el riesgo de hacer suposiciones descuidadas sobre la *compresibilidad* del aire, que nos lleven engañosamente a la misma conclusión que buscamos (suponer sin darnos cuenta que el aire es incompresible, para aplicar una ecuación que nos prediga que el flujo es subsónico, y luego así concluir de nuevo que el aire es incompresible, es decir precisamente lo que se supuso).

Pienso que uede argumentarse de la siguiente forma: más preciso que suponer una conservación de caudal, es suponer que existe en el circuito del flujo de aire una conservación del flujo de masa por unidad de tiempo $dM/dt = \rho_1 A_1V_1 = \rho_2 A_2V_2$ que se sostiene en el tiempo, *ad infinitum* (indefinidamente) mientras esté encendido el ventilador. Si el fluido es comprensible, puede ser que durante un breve instante el caudal que ingresa no sea igual al caudal que sale, pero esta condición no podría sostenerse *ad infinitum*. Esto es la premisa de la ecuación de continuidad, que es válida independientemente de que el fluido conserve o no su densidad. Pienso que una argumentación más nítida, por lo tanto, podría ser que sí se admite como hipótesis una pequeña variación de la densidad, pero dentro de un rango muy pequeño, lo suficiente como para acotar una velocidad máxima predicha por la ecuación de continuidad, y que esta velocidad máxima aún pueda considerarse subsónica. Con más precisión, matemáticamente funcionaría de la siguiente manera: expresemos $\rho_2 = \rho_1 + \Delta \rho_1$, de manera que en la ecuación de conservación del flujo de masa podemos escribir $(\rho_1 + \Delta \rho_1) A_2V_2 = \rho_1 A_1V_1$; más adelante, en el artículo experimental que sucede a esta parte teórica, veremos que las dos áreas que nos interesan para este cálculo de velocidad tienen una relación de 1 a 4, así que $V_2 = (1/4) V_1$, y también veremos que $V_1 = 14.92$ m/s de manera que despejando V_2 , tenemos:

$$V_2 = \frac{4V_1\rho_1}{(\rho_1 + \Delta\rho_1)} = (56.69m/s) \frac{\rho_1}{(\rho_1 + \Delta\rho_1)} \text{Ec. 16}$$

Para que V_2 fuera supersónica (de más de 100m/s), tendría que ocurrir que el cociente $(\rho_1/ \rho_1 + \Delta \rho_1)$

tuviera un valor de más de 2, lo que significaría que $\Delta\rho_1$ debería representar un enrarecimiento o reducción de densidad de por lo menos $-\rho_1/2$, pero no tenemos evidencia ni teórica ni experimental para presuponer un cambio de densidad del aire de un orden tan alto (del 50% o más), así que en el modelo inicial podemos suponer que no se da. En síntesis, una argumentación más pausada de la incompresibilidad del aire consiste en que, si se supusiera que el aire es comprensible por causa de la alta velocidad, ello sólo podría darse si dicha variación de densidad fuera muy alta, y el modelo no contempla esa variación tan alta, con lo cual, la densidad varía en un rango más pequeño y, por lo tanto, al utilizar esto en la ecuación de continuidad, tenemos que la velocidad predicha V_2 es de carácter subsónico, y dicha velocidad no será causal de variación en la densidad del aire dentro del túnel, con lo cual el aire puede considerarse incompresible y modelarse utilizando varias ecuaciones de la teoría de fluidos que se dedujeron o verificaron originalmente para líquidos.

8 Bibliografía

- [1].ALLEN, John E., *Aerodinámica*. Traducida de la obra original *Aerodynamics. A Space-Age Survey*, Editorial Labor S.A., España (1969).
- [2].ANDERSON, *Fundamentals of Aerodynamics*, Mc Graw Hill Book Company, USA (1984).
- [3].BAAS, Donald, & CORLISS, William, *Wind Tunnels of NASA*, National Aeronautics and Space Administration (Nasa SP; 440), Washington D.C., 1981.
- [4].BENSON, Tom, *Begunners's Guide to Aerodynamics*, publicado en el sitio web del Glenn Research Center, en www.grc.nasa.gov. Acceso en mayo de 2011.
- [5].ÇENGEL, Yunus, & CIMBALA, John, *Fluid Mechanics*, Mc Graw Hill International Edition, Singapore, 2006.
- [6].MATAIX, Claudio, *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*, Ediciones del Castillo, S.A., Segunda Edición, Madrid, 1982.
- [7].MEHTA, R., *A Turbulent Boundary Layer Perturbed By a Screen*, AIAA J., Vol 23, No. 9, p. 1335-1342 (1985).
- [8].MEHTA, R., & BELL, J.H, *Boundary-Layer Predictions for Small Low-Speed Contractions*, AIAA Journal, Vol. 27, No. 3, Pages 372-374. (1989)
- [9].MEHTA, R, & BRADSHAW, P., *Wind Tunnel Design*, guía publicada por el profesor Peter Bradshaw en el sitio web de la Universidad de Stanford, en la URL

<http://www.htgl.stanford.edu/bradshaw/tunnel/index.html>

(Versión de 2002-2003. Acceso en mayo de 2011).

[10]. MEHTA, R., & BRADSHAW, P., *Design Rules for Small Low-Speed Wind Tunnels*, reprinted from the Aeronautical Journal of the Royal Aeronautical Society, Vol 73, p. 443 (1979).

[11]. MOTT, Robert L., *Mecánica de Fluidos Aplicada*, PEARSON-Prentice Hall, 4ª Edición, México, 1996.

[12]. PATIÑO, Gustavo, *Diseño de un túnel de viento a bajas velocidades*, Tesis de Grado del Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia (julio de 2010).

[13]. POPE, A. y RAE, W., *Low-Speed Wind Tunnel Testing*, John Wiley & Sons, USA (1984).

[14]. REYNOLDS, Osborne, *An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous and of the law of resistance in parallel channel*, Philosophical Transactions of the Royal Society, 174, P. 935-982. Recibido y publicado en 1883.

[15]. SCHEIMAN, J., *Comparison of Experimental and Theoretical turbulence reduction from screens, honeycomb and honeycomb-screen combinations*, NASA Technical Paper 1958, December of 1981.

[16]. SHAMES, Irving, *Mecánica de Fluidos*, Mc Graw Hill, 3a edición en español. (1995).

[17]. SLEIGH, Andrew, *Fluid Mechanics CIVE 2004 y An Introduction to Fluid mechanics CIVE 1400*, University of Leeds, School of Civil Engineering, 2007-2009.

[18]. STREETER, Victor L., & BENJAMIN WYLIE, *Mecánica de los fluidos*, McGraw-Hill, Octava Edición (3ª Edición en español), México. Copyright de 1988.

[19]. TATMAN, Nathan, *Wind Tunnel Design and Operation*, investigación apoyada por el Dr. Rhett Herman. Descargado del sitio web de Radford University, Virginia, USA (publicado entre 2006 y 2008. Acceso en mayo de 2011).

[20]. VARGAS B., Andrés Alejandro, *Ingeniería del túnel de viento*, tesis de maestría de la Universidad de Los Andes, 2007.