

El túnel de viento

como herramienta de ensayo aerodinámico en la Fórmula 1

Un Fórmula 1 está plagado de pequeños alerones, superficies alabeadas y contornos caprichosos, fruto del esfuerzo de los ingenieros de aerodinámica de las distintas escuderías. El propio monoplaza tiene forma de ala de avión invertida.

Quizá al descubrir que, cuando el coche circula a una velocidad de unos 320 km/h, el viento puede hacer que se pegue al asfalto como si pesara alrededor de dos toneladas más de su peso real, unos 600 kg, podamos empezar a percibir la importancia de la forma exterior del cuerpo de un vehículo de competición.

Este artículo descubre los secretos tecnológicos de los túneles de viento, sus ventajas y limitaciones y su aplicación al mundo de la Fórmula 1.



Isaac Prada y Nogueira

Ingeniero Industrial del ICAI (2005).

Ha sido Ingeniero de I+D en el equipo Renault F1 y en la actualidad realiza su tesis sobre frenada regenerativa en la F1 para Renault.

Comentarios a:
comentarios@icai.es

Importancia del túnel de viento como herramienta para el diseño aerodinámico

Para ensayar y optimizar la aerodinámica de un vehículo de competición existen tres métodos fundamentalmente: pruebas en circuito, empleo de un túnel de viento y métodos computacionales.

La información que los ingenieros buscan obtener al realizar ensayos de la aerodinámica del coche incluye al menos alguno o, si es posible, todos los siguientes aspectos:

- Coeficientes aerodinámicos totales, como Lift (y su reparto entre el eje delantero y trasero del vehículo), Drag, etc.
- Distribución de presión en la superficie del coche.

- Visualización del flujo a lo largo del vehículo para localizar los puntos de separación de flujo (por ejemplo mediante el uso de inyector de humo que permiten ver las líneas de corriente sobre el chasis).

A pesar de que existe mucha otra información que sería deseable obtener, en la Fórmula 1 habitualmente no hay tiempo más que para estudiar los aspectos mencionados.

Cada uno de los tres métodos comentados para obtener estos datos sobre la aerodinámica del vehículo tiene ventajas y desventajas y, por ello, la solución adoptada por los equipos suele ser una combinación de varias de estas herramientas. Por supuesto, aparte de consideraciones técnicas, también se tiene en cuenta para la elección de un método u otro

el coste económico, en algunos casos muy elevado, de algunas de estas opciones.

Por ejemplo, los ensayos con el vehículo real en un circuito introducen problemas, principalmente por la falta de repetibilidad de las condiciones ambientales, de conducción del piloto, de la pista, etc. Además, otros aspectos como la vibración de la suspensión dificultan la medida de los coeficientes aerodinámicos y de su distribución en eje delantero/trasero. Por último, para ensayar en un circuito se debe disponer del vehículo ya construido, lo que invalida esta herramienta para las primeras fases del diseño aerodinámico. Si se emplea esta opción, cualquier modificación de la aerodinámica se debe fabricar a tamaño real para incorporarla al coche y ensayarla en la pista.

El uso de técnicas computacionales para el diseño y ensayo de la aerodinámica de coches de competición es relativamente reciente y, aunque su evolución es muy prometedora, en la actualidad exige una gran especialización en el personal que la utiliza, puesto que las simplificaciones que incorporan los modelos de ordenador hacen necesario un elevado conocimiento de estas técnicas para la correcta interpretación de los resultados. Esto es debido a la tremenda complejidad de las ecuaciones que rigen la Mecánica de Fluidos, lo que obliga a la aerodinámica de Fórmula 1 a ser una ciencia predominantemente empírica. Sin embargo, si se realizan comprobaciones de la correlación de los ensayos por ordenador con los ensayos sobre el coche real y se adoptan las correcciones necesarias en los modelos para mejorar dicha correlación, las técnicas computacionales se convierten en un complemento de gran utilidad, puesto que permiten ensayar multitud de modificaciones aerodinámicas sin necesidad de fabricarlas y ensayarlas en el túnel o en un circuito.

En Fórmula 1 se pueden ensayar en el túnel del orden de 14.000 modificaciones de la aerodinámica al año⁽¹⁾, por lo que la principal utilidad de los modelos de ordenador es simular un gran número de diseños y seleccionar los más prometedores, que serán los únicos ensayados en el túnel. De momento los modelos por ordenador no son, por tanto, capaces de sustituir a los ensayos reales.

El objeto de este artículo es estudiar el túnel de viento como herramienta para el diseño aerodinámico en Fórmula 1. Utilizar un túnel soluciona prácticamente todos los problemas de repetibilidad que aparecen en los ensayos en pista, puesto que se trata de un entorno muy controlado. Sin embargo, el túnel presenta el inconveniente del elevado coste de instalación, especialmente para el ensayo de vehículos de tamaño real. A pesar de que reducir el tamaño del túnel supone un ahorro para los equipos, no debemos olvidar que en túneles menores las condiciones de flujo simuladas no son tan realistas como en túneles de mayor tamaño para un modelo de las mismas dimensiones, puesto que el efecto de las paredes introduce errores en el flujo que no aparecen en el circuito. Es decir, el flujo que estamos simulando en esos casos no es el que el coche se encuentra en la realidad.

Por otro lado, existen los problemas derivados del análisis dimensional. Esta técnica estudia las condiciones que se deben cumplir para que los resultados obtenidos en el ensayo con un prototipo se puedan determinar a partir de los que se obtienen con un modelo a escala de ese prototipo⁽²⁾. El conocimiento de estas condiciones, que esencialmente exigen que una serie de números adimensionales coincidan en los ensayos realizados con prototipo y modelo, permite realizar ensayos sobre un modelo de tamaño menor que el prototipo y determinar los resultados que se habrían obtenido con el prototipo. En el caso concreto de los ensayos de la aerodinámica en un túnel de viento, el principal problema radica en la dificultad de que el número de Reynolds del ensayo con el modelo coincida con el del ensayo con el prototipo.

El objetivo inicial es reducir tanto el tamaño del modelo como la velocidad del aire (relacionada con la potencia del ventilador del túnel), para que los ensayos sean menos costosos y más rápidos. Para el propósito de este artículo, podemos considerar que el número de Reynolds establece simplemente el producto de la velocidad del aire y una longitud característica (del coche, habitualmente). Para que los ensayos con prototipo y modelo a escala sean dos fenómenos físicos semejantes, el número de Reynolds debe coincidir en

⁽¹⁾ Indica número de piezas aerodinámicas ensayadas (datos de 2005).

⁽²⁾ En sentido estricto, el análisis dimensional permite obtener los parámetros característicos de un fenómeno físico. Estos parámetros característicos son adimensionales y se dice que dos fenómenos físicos son semejantes si sus parámetros característicos son iguales. Este hecho es extremadamente útil para obtener los resultados de ensayos con prototipos a partir de ensayos realizados con modelos a escala de dichos prototipos.

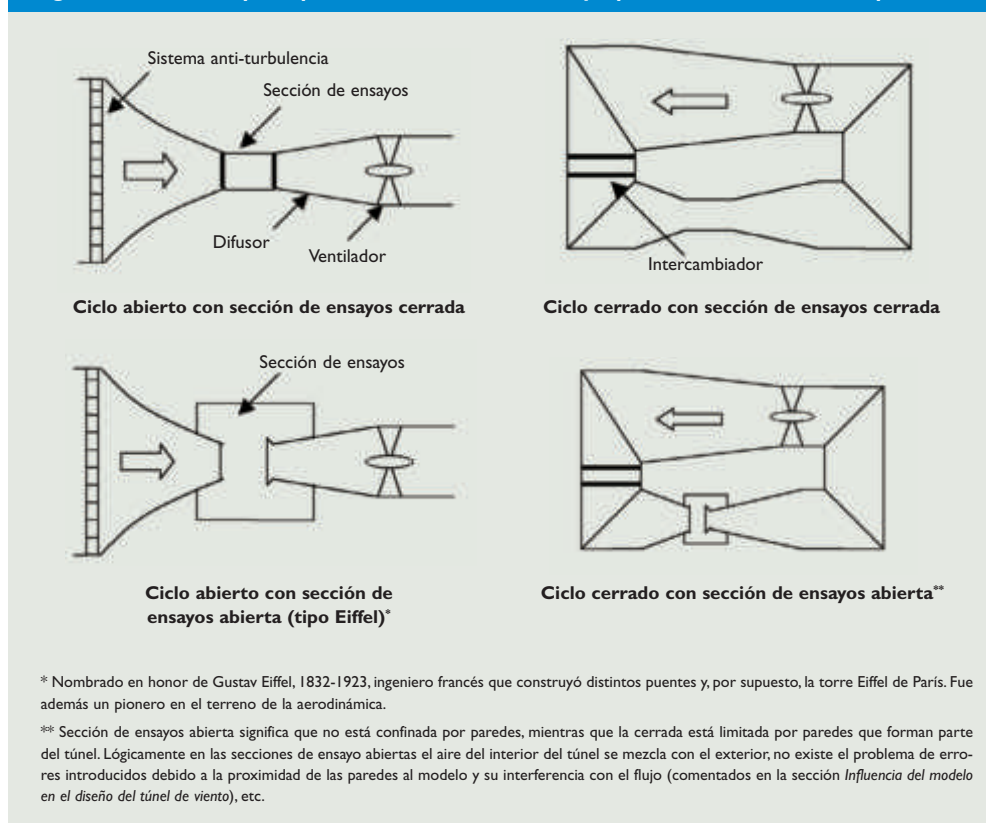
ambos casos. Si, por ejemplo, reducimos el tamaño del prototipo a la mitad, la longitud característica del Reynolds se reduce a la mitad y deberemos duplicar la velocidad del aire para que el número de Reynolds no cambie. Sin embargo, lo habitual es que no se aumente tanto la velocidad del aire por la gran potencia que necesitaría el ventilador (ver nota al pie número 4 sobre la dependencia de la potencia del ventilador respecto a la velocidad de flujo). La consecuencia es que el Reynolds cambia y esto puede hacer que los resultados obtenidos en el túnel no sean representativos. Esto es especialmente importante si se realizan ensayos con modelos muy pequeños (escala 1:5, por ejemplo⁽³⁾), porque en estos casos el flujo del ensayo con el modelo puede ser laminar cuando en la realidad debería ser turbulento. Por ello, el uso del túnel de viento puede conducir a resultados que no siempre son trasladables directamente al coche real. Por supuesto, existen algoritmos de corrección de estos errores, pero si no se tienen en cuenta los problemas derivados del número de Reynolds, el diseño aerodinámico será conserva-

dor (i.e. por ejemplo el nivel de downforce de un modelo a escala del vehículo, es decir; la fuerza que se genera por la interacción del flujo de aire con su aerodinámica y que lo aprieta contra el suelo será menor que la que generaría ese mismo modelo a tamaño real y, por tanto, no se estará aprovechando al máximo el potencial aerodinámico del coche —el nivel de downforce que generaría el vehículo real podría ser hasta del orden del doble del nivel del modelo a escala—). Otros problemas del túnel de viento se analizan con más detalle en la sección *Influencia del modelo en el diseño del túnel de viento*.

Buscando velocidad en el viento

El túnel de viento es sin duda una de las joyas de la corona de todos los equipos. Su objetivo es recrear las condiciones que los monoplazas experimentan en un circuito. Lo más sencillo sería tomar las diversas medidas cuando el coche va circulando, pero esto añade la complejidad de tener que poner en el propio vehículo todos los sensores y equipos que los ingenieros necesitan y plantea además los problemas ya comentados de re-

Figura 1. Elementos principales de un túnel de viento y tipos constructivos más importantes



⁽³⁾ En la actualidad, hay equipos que cuentan con túneles de viento para modelos a escala 1:1 (equipo Honda, por ejemplo).

petibilidad, etc. Por eso se recurre al túnel, que es un entorno perfectamente controlado donde, en lugar de tener un coche en movimiento a través de un circuito y aire en reposo (si olvidamos el viento), tenemos un coche estacionario, una cinta en movimiento bajo el monoplaza para simular el circuito y el viento generado por un gigantesco ventilador, que consume una potencia similar a la de un tren de alta velocidad (ver Figura 4).

El objetivo del túnel es conseguir mayores niveles de downforce, o fuerza que aprieta el coche contra el suelo, y menor drag, o resistencia del aire al paso del vehículo. Hay que tener en cuenta que a mayor downforce, mayor drag, lo que significa que, al introducir elementos que generan una mayor atracción al asfalto, también aumentamos la resistencia del aire. Por eso es necesario, como casi siempre ocurre en Ingeniería, hallar un compromiso entre ambos efectos.

Necesitamos que el coche se pegue al suelo especialmente en circuitos con curvas lentas, en las que al salir es necesaria mucha aceleración y hay riesgo de que la rueda derrape. Una rueda muy apretada contra el asfalto (mayor nivel de downforce) no derrapa tan fácilmente. Por el contrario, en circuitos con largas rectas, es preciso reducir la resistencia del aire, lo que supone reducir también el nivel de downforce, para conseguir una mayor velocidad punta.

Tipos constructivos

A pesar de que el uso de un túnel de viento para ensayos aerodinámicos puede parecer muy interesante, especialmente por tratarse de un entorno controlado de muy buena repetibilidad, existen distintos tipos constructivos y ninguno de ellos está libre de problemas y desafíos para los ingenieros que los diseñan.

Los elementos principales de un túnel, que aparecen en casi todos los tipos, son:

sección de gran tamaño antes de la zona donde se coloca el monoplaza (aquí se instalan elementos como paneles tipo nido de abeja o varias rejillas finas para conseguir una turbulencia más uniforme). El flujo de aire se acelera aguas abajo gracias a una contracción justo antes de la sección de ensayos, con objeto de obtener un perfil de velocidades más uniforme para las pruebas. Generalmente, una mayor contracción consigue un mejor perfil pero obviamente requiere un mayor espacio, a igual tamaño de la sección de ensayos, y tiene un mayor coste. Aguas abajo de la sección de ensayos se sitúa un difusor que, al aumentar la sección de paso, reduce la velocidad del aire que entra en el ventilador. Estos elementos principales, junto con los tipos constructivos más importantes, se muestran en la Figura 1. La diferencia entre los distintos diseños de túnel radica en el hecho de que sean de ciclo abierto o cerrado y en el diseño de la sección de ensayos.

En primer lugar se encuentran los túneles de viento de ciclo abierto, en los que un ventilador succiona aire a través de un túnel y expulsa después el aire de nuevo al exterior. Dado que la densidad del aire permanece casi constante, la mayor velocidad se da en la menor sección y es ahí donde se coloca el modelo del vehículo (sección de ensayos). Esta zona puede tener sección circular, rectangular, oval, etc.

En general, la ventaja de un túnel de ciclo abierto suele ser su menor coste de construcción y es especialmente adecuado cuando se debe evacuar el humo de inyectores de humo (empleados para visualizar las líneas de corriente) o los gases de escape del motor del vehículo ensayado. Asimismo, y si las condiciones ambientales son suficientemente constantes, la temperatura del aire en la sección de ensayos no irá aumentando durante

Tabla 1. Características de algunos túneles de la Fórmula 1

Equipo	Anchura [m]	Altura [m]	Longitud [m]	V máx. aire [km/h]	Tipo	Potencia [MW]
Ferrari	3,4	3,36	9	250	CC + C	-
McLaren	2,77	1,96	12	-	CC + C	1
Renault	3,5	3,5	8	250	CC + C	2,2
Sauber	5,2	2,9	-	288	CC + C	3
Toyota	4,3	3,5	-	288	CC + C	-

Anchura, altura y longitud se refieren a la sección de ensayos.

CC: ciclo cerrado.

C: cinta móvil para simular el circuito (para una explicación del porqué del uso de esta cinta, ver "Influencia del modelo en el diseño del túnel de viento").



Figura 2. Sección de ensayos del túnel de viento del equipo Renault FI. ©Renault FI Team

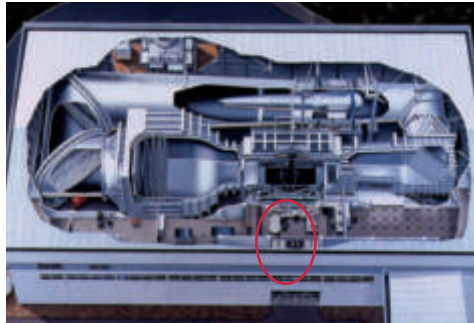


Figura 3. Vista general del edificio del túnel del viento del equipo Renault. El círculo muestra la sección de ensayos © Renault FI team

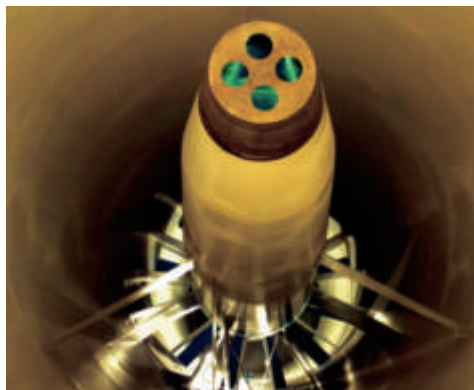


Figura 4. Aspecto del ventilador del túnel de viento del equipo Renault FI. ©Renault FI Team

una prueba larga como en túneles de ciclo cerrado, en los que este efecto debe ser controlado mediante la introducción de enormes intercambiadores de calor en el túnel (para compensar el calor generado por fricción del aire con las paredes y con el modelo).

Por otro lado, las desventajas de un ciclo abierto son la posible influencia de las condiciones ambientales externas en el perfil de velocidades de la sección de ensayos (debido a vientos, etc), el ruido de la instalación y las bajas temperaturas en la sección de ensayos si el túnel está situado en climas fríos (esto último dificulta el trabajo de los opera-

rios en el interior del túnel). Además, se debe tener en cuenta que el motor que mueve el ventilador de un túnel de ciclo abierto deberá ser más potente que el de su ciclo cerrado equivalente.

Por todo lo anterior, la mayor parte de los túneles de gran tamaño son de ciclo cerrado. Por supuesto, el sueño de cualquier ingeniero de aerodinámica es un túnel del mayor tamaño posible para aproximarse más a la realidad, pero esto está muy limitado por el presupuesto con el que cuenta cada equipo.

Cabe comentar también que el área transversal de la sección de ensayos de un túnel de viento es la menor de todo el conjunto, por lo que la presión será mínima y la velocidad máxima (ecuación de Bernoulli). En el resto del túnel las condiciones de velocidad y presión serán otras, de acuerdo con la citada ecuación de Bernoulli. Esto se tiene en cuenta a la hora de reforzar la estructura del túnel en unas zonas u otras, dependiendo de los valores de presión en cada área.

Desde los años ochenta, el número de túneles de viento para el ensayo de vehículos de competición ha crecido enormemente. Una lista con algunos de los túneles empleados en la Fórmula 1 y sus características se incluye en la Tabla 1.

Un coloso desconocido: los secretos de un túnel de viento de Fórmula 1

La Figura 2 muestra el interior del túnel del equipo Renault. El tamaño del modelo de monoplace que se coloca habitualmente es la mitad del tamaño real, aunque se puede emplear una versión de tamaño real.

Del tamaño de un gran edificio, pocos se imaginan lo complejo que puede llegar a ser un túnel de viento de Fórmula 1. Un túnel para desarrollo de automóviles en general y, en particular, para monoplazas de F1 es un gigantesco conjunto que realmente necesita de un edificio entero para albergarlo. En la Figura 3, la sección de ensayos en la que se coloca el modelo del coche (mostrada en la Figura 2) es únicamente la pequeña zona señalada. Por tanto, la sección de ensayos es sólo una parte muy reducida del conjunto del túnel de viento.

Un túnel de viento para monoplazas de tamaño real puede costar en la actualidad alrededor de 50 millones de dólares (para hacerse una idea de lo que esta cantidad de dinero supone, se puede comparar con los

más de 350 millones de dólares que, según estimaciones, gastan al año los equipos más acaudalados de la Fórmula 1). Lo ideal es poder utilizar un túnel 24/7, es decir, 24 horas al día, todos los días de la semana. Por eso el mantenimiento de los equipos del túnel, las mejoras que se quieran introducir o hasta incluso las limitaciones de la red eléctrica, que en ocasiones no puede suministrar la tremenda cantidad de potencia requerida, pueden reducir el tiempo que el túnel está disponible y esto puede ser crítico para el programa de desarrollo del monoplaza y el resultado de las escuderías en el circuito. Algunos equipos intentan aumentar el número de horas que pueden ensayar en el túnel con la construcción de un segundo túnel (como el equipo Honda, por ejemplo).

El túnel de viento de Renault F1 es un ciclo cerrado. A lo largo de este ciclo se encuentran una serie de dispositivos para asegurar que el aire tiene todas las condiciones requeridas cuando alcanza la zona donde se ubica el modelo. Además, los ingenieros intentan aislar el túnel lo máximo posible de cualquier fuente externa de vibraciones, como pueden ser otros bancos de ensayo del equipo.

A modo de ejemplo, este túnel fue construido en 1998 y era entonces el más avanzado tecnológicamente de toda la Fórmula 1. Desde su concepción a su construcción en la factoría del equipo en Enstone (Reino Unido), el proyecto duró tres años y el coste ascendió a 12 millones de libras esterlinas. El túnel ocupa un edificio de tres plantas y su longitud mayor es de 100 metros.

Si recorremos el interior del túnel en sentido antihorario encontramos lo siguiente: el elemento que más llama la atención es el ventilador, que se ve en la parte superior de la imagen y cuya forma esbelta y aerodinámica busca reducir su interferencia con el flujo de aire. Puede alcanzar una velocidad máxima de flujo de 250 km/h y el motor eléctrico que mueve este ventilador de 12 aspas y 5 metros de diámetro consume hasta unos 2,2 MW. Después de recibir el empuje colosal de este ventilador, el aire se dirige hacia la sección de ensayos. Para

forzar al aire a cambiar de dirección 90°, existen unos canales que permiten un giro progresivo. Estos canales, con aspecto de rejilla, se pueden ver en cada uno de los vértices del túnel, que tiene forma de rectángulo. Dado que el flujo va acumulando calor, ciclo tras ciclo, por fricción con las paredes y con el modelo ensayado, ha de atravesar un intercambiador de calor que lo refrigerará. Este intercambiador lo constituyen algunos de los paneles que se observan en la parte inferior, localizados justo antes de la contracción que acelera el flujo hasta la zona donde, por fin, se encuentra el monoplaza. Finalmente, y tras atravesar la sección de ensayos, el aire retorna al ventilador y comienza un nuevo ciclo.

Influencia del modelo en el diseño del túnel de viento

Además de los aspectos ya descritos acerca del diseño de un túnel de viento, cabe mencionar la influencia del modelo de vehículo que se pretende ensayar en los siguientes tres apartados:

- Tamaño del modelo y obstrucción que supone al paso del aire en la sección de ensayos.
- Simulación del suelo moviéndose bajo el coche.
- Instalación del vehículo y las ruedas (que giran durante las pruebas) en la sección de ensayos.

Obstrucción debida al modelo

En cuanto al primer punto, las paredes del túnel habrán de estar lo más alejadas que sea posible del vehículo para tener un perfil de flujo más similar al real, puesto que si el cociente entre área frontal del modelo y área de la sección de ensayos es mayor que 0,075 (otros autores sugieren 0,1), la obstrucción que supone el modelo al paso del aire provoca un flujo poco realista con el que se introducen errores en las mediciones (la obstrucción provoca mayores velocidades de flujo entre el modelo y las paredes y los coeficientes Lift y Drag estimados se desvían de los reales). Por ello es deseable que el área de la sección de ensayos sea lo mayor

⁽⁴⁾ La potencia del ventilador depende fuertemente del área de la sección de ensayos y sobre todo de la velocidad de aire que se desee alcanzar. En concreto, la potencia mecánica requerida por el ventilador se puede aproximar por la siguiente expresión:

$$P = Z \cdot \rho \cdot A \cdot v^3$$

donde Z es una cantidad adimensional que representa las pérdidas en el sistema normalizadas con respecto al área de la sección de ensayos, ρ representa la densidad del aire, A es el área de la sección de ensayos y v la velocidad del aire. La potencia eléctrica consumida por el motor que mueve el ventilador será obviamente algo mayor que la calculada a través de la expresión anterior, debido al rendimiento.

posible. A mayor área, el coste de construcción y la potencia necesaria en el ventilador aumentan considerablemente (la potencia del ventilador de un túnel de viento puede alcanzar unos 3 MW)⁽⁴⁾. Todo esto supone que el tamaño del modelo venga condicionado por el tamaño de la sección de ensayos disponible y por el límite al cociente de áreas frontales de modelo y sección de ensayos.

Simulación del suelo

Si comparamos el perfil de velocidades que tenemos cuando un vehículo recorre un circuito con el obtenido en un ensayo en el interior de un túnel, observaremos que es deseable tener un suelo móvil en la sección de ensayos. Esto se debe a que en el circuito el aire y el suelo están en reposo (si olvidamos el viento) y el coche está en movimiento, mientras que en el túnel, si el suelo es fijo, tendríamos un vehículo y un "circuito" estacionarios y únicamente el aire en movimiento.

En los túneles de FI se utiliza una cinta especial que se mueve a gran velocidad, de forma similar a las cintas de correr de un gimnasio, y que simula el circuito. Las velocidades del aire y la cinta están sincronizadas, para representar más fielmente la realidad. Esta cinta plantea multitud de problemas constructivos en la sección de ensayos.

Por ejemplo, el modelo se debe suspender del techo mediante una pieza unida al vehículo en su zona central (ver la columna oscura en el centro de la Figura 2) o trasera, puesto que con la cinta ya no es posible mantenerlo fijo de otra forma. Este soporte distorsiona el flujo de aire y afecta a las medidas (aunque su perfil es aerodinámico). Otro problema que plantea el uso de una cinta móvil para simular el movimiento del circuito es que algunos vehículos de competición generan una gran succión por el diseño de su parte inferior y arrancarían la cinta con velocidades de flujo elevadas (téngase en cuenta que se ensaya con velocidades máximas del orden de 250 km/h). Es necesario, por tanto, instalar un sistema que succione la cinta y la mantenga pegada al suelo de la sección de ensayos.

Adicionalmente, los túneles con cinta móvil suelen incorporar una zona de succión de la capa límite aguas arriba del modelo y otra zona de soplado de la capa límite aguas abajo del modelo, para limitar en lo posible el tamaño

de la capa límite que se desarrolla en el suelo del túnel y su impacto en las medidas.

Instalación del vehículo y las ruedas en la sección de ensayos

Sobre este aspecto, es importante destacar que, en los ensayos en monoplazas de FI, ensayar las ruedas unidas al vehículo como lo están en realidad introduce errores en las medidas y por ello se recurre a un montaje en el que las ruedas se sujetan desde las paredes del túnel y no están en contacto con el resto del modelo, mientras que éste se suspende del techo, como se ha descrito. Los soportes de las ruedas desde las paredes se adivinan en la Figura 2. Se trata de los soportes horizontales oscuros que van de las paredes al centro de cada rueda. Esto no permite medir el efecto de las ruedas de forma directa en los coeficientes aerodinámicos, efecto por otro lado importante, y es necesario cuantificar dicho efecto mediante otro tipo de pruebas.

Conclusiones

En primer lugar, hay que destacar que, para una cierta inversión económica, la aerodinámica es, en general, la forma más rentable de obtener mejoras en los tiempos de un monoplaza de FI.

Hoy en día, el túnel de viento es la herramienta fundamental para el ensayo de la aerodinámica en la FI. A pesar de que los problemas descritos introducen errores en las medidas, no suele ser necesario, por ejemplo, medir un coeficiente Lift con más de dos decimales. Es más importante contar con una instalación que permita entender dónde radican los problemas de nuestro diseño aerodinámico y nos ofrezca resultados relativos entre distintas configuraciones, que obtener resultados absolutos muy precisos. Finalmente, hay que tener en cuenta que un diseño optimizado en un túnel de viento con un modelo a escala será bastante conservador, lo que significa que será posible obtener todavía mejores resultados en el vehículo real. ■

Bibliografía

Isaac Prada y Nogueira, blog *Tecnología de Fórmula 1 en Yahoo!*.

Joseph Katz. *Race Car Aerodynamics*. Bentley Publishers.com, 2006.

Publicaciones varias, Renault FI Team.