

# ***Aerodinámica del automóvil de competición***

Simon McBeath



# Sumario

Presentación de Enrique H. Scalabroni . . . . .	9
Prefacio del autor . . . . .	11
Agradecimientos . . . . .	13
Prólogo de Gordon Murray, Director Técnico de McLaren Cars Motorsport . . .	15
1. Desde entonces hasta ahora: breve historia de la aerodinámica . . . . .	17
2. Sólo con el delicado aire: un poco de teoría práctica . . . . .	29
Que la fuerza te acompañe . . . . .	29
Desde Aristóteles a Bernoulli . . . . .	30
Las fuerzas implicadas . . . . .	33
Resistencia y potencia . . . . .	38
Carga aerodinámica y agarre . . . . .	40
Turismos y sustentación aerodinámica . . . . .	43
Complicaciones viscosas . . . . .	44
Los Números de Reynolds . . . . .	47
El flujo es tridimensional . . . . .	48
Gradientes de presión . . . . .	49
3. Los spoilers: spoilers delanteros, traseros y variaciones . . . . .	51
Años de inestabilidad . . . . .	51
Spoilers traseros . . . . .	52
Spoilers delanteros . . . . .	56
Variaciones en las cajas de aire . . . . .	62
El divisor de flujo . . . . .	63
No sólo coches carrozados . . . . .	67
Placas de hundimiento . . . . .	69
Ángulos de seguridad en la NASCAR . . . . .	70

4. Todo sobre los alerones: desde lo más básico hasta cómo diseñarlos . . . .	73
Definiciones . . . . .	73
La carga aerodinámica y los criterios de diseño de un alerón . . . . .	77
Alerones de un solo elemento . . . . .	79
Alerones de dos elementos . . . . .	83
Alerones de varios elementos: más flaps y estadísticas . . . . .	88
Alerones múltiples . . . . .	93
Elementos secundarios: derivas laterales y perfiles Gurney . . . . .	94
El ambiente de trabajo . . . . .	98
Efecto suelo y alerones delanteros . . . . .	99
Cómo seleccionar y diseñar un alerón . . . . .	101
Cálculos para la configuración de un alerón . . . . .	103
Monturas de los alerones . . . . .	107
Relaciones de aspecto, otra vez . . . . .	109
5. Corrientes «submarinas»: el efecto suelo . . . . .	113
Un poco de historia . . . . .	113
De vuelta al principio . . . . .	116
Fondos planos . . . . .	119
Difusores . . . . .	121
Los túneles . . . . .	125
Generadores de vórtice, canalizadores y acción de los escapes . . . . .	133
Interferencias con los alerones . . . . .	135
Algunos números . . . . .	138
Baja resistencia . . . . .	139
6. Eliminación de conjeturas: visualización y medición . . . . .	141
Visualización del flujo . . . . .	141
Adquisición de datos . . . . .	148
Túneles de viento . . . . .	152
Pruebas con modelos a escala . . . . .	154
Modelado por ordenador . . . . .	158
7. Manos a la obra: hágalo usted mismo . . . . .	165
La elección de los materiales . . . . .	166
Planchas de metal . . . . .	168
Plásticos reforzados . . . . .	172
Rigidez relativa de aluminio laminado de 2 capas y 1,2 mm . . . . .	181
Fuerza tensora relativa de aluminio laminado de 2 capas y 1,2 mm . . . . .	182
Costes relativos de aluminio laminado de 2 capas y 1,2 mm . . . . .	183
Técnicas profesionales . . . . .	184
8. Ejemplos prácticos: de la Fórmula 1 hasta las categorías inferiores . . . . .	185
Coches con ruedas descubiertas . . . . .	185
Fórmula 1 . . . . .	187

CART .....	193
Fórmula 3 .....	195
Fórmula Renault .....	197
Coches de montaña y de sprint .....	198
Otras categorías .....	201
Coches con ruedas cubiertas .....	204
Coches de sport y GT .....	204
IMSA/Coches de sport .....	205
GT FIA .....	206
Supersports 200 .....	209
Fórmula 750 .....	210
Coches de montaña y de sprint .....	212
Vehículos de competición basados en coches de calle .....	215
NASCAR .....	216
Turismos .....	218
Super Turismos .....	220
Coches de rally .....	222
Coches de montaña y de sprint .....	224
Hot Rods .....	228
9. Conclusiones .....	231
Una cuestión de equilibrio .....	231
Investigación y desarrollo .....	233
En resumen .....	234
Apéndice 1. Datos sobre alerones .....	235
Apéndice 2. Referencias y lecturas recomendadas .....	241
Glosario de términos y abreviaturas .....	243

# Presentación

Mucho se ha escrito y publicado sobre temas relativos al diseño de automóviles de competición, como son: preparación de motores, análisis de suspensiones, neumáticos, materiales especiales (metálicos y compuestos), chasis, estructuras, adquisición de datos, amortiguadores y dinámica del vehículo..., pero se ha escrito muy poco acerca de la aerodinámica de los vehículos de competición. Se ha de tener en cuenta que la aerodinámica propiamente dicha representa el 40 % de la eficiencia total del automóvil y que solamente el motor puede igualar este valor, ya que el resto representa únicamente el 20 %.

La principal razón de esta carencia de información se basa en que la mayoría de los proyectistas y diseñadores tratan de mantener un absoluto secreto sobre su trabajo, para evitar que sus competidores conozcan los detalles del aspecto aerodinámico de sus vehículos, lo que los convertiría en difíciles adversarios.

Es para mí un honor escribir el prólogo de este excelente libro de Simon McBeath, pues considero que es el eslabón que faltaba en el estudio de los automóviles de competición.

El autor se expresa en un lenguaje ameno y sencillo de entender, da conceptos claros, así como una matemática lógica y simple, y explica problemas típicos que todos los que nos dedicamos al diseño de automóviles encontramos continuamente.

Creo que este libro será de gran ayuda para estudiantes de ingeniería, ingenieros técnicos, mecánicos, jefes de equipo, periodistas y toda persona entusiasta que quiera adquirir un conocimiento claro sobre el mundo de la competición, ya que contarán con las herramientas teóricas y prácticas básicas para comprender la técnica aerodinámica de estos vehículos.

*Enrique H. Scalabróni*  
*Ex ingeniero de Williams, Ferrari, Lotus y Peugeot*

## Prefacio del autor

Mientras investigaba y escribía este libro, tuve el privilegio de escuchar a muchas personas interesantes provenientes de diferentes partes del mundo del automóvil, y, si hay una cosa que aprendí, es que nunca sabes lo suficiente. En efecto, un aerodinamista profesional, cuyo nombre merece permanecer en el anonimato, me dijo que si los aerodinamistas supieran lo suficiente sobre la materia, la mayoría de ellos, incluido él, se quedarían sin trabajo. Esto es lo que hace que este tópico sea tan interesante: reúne a la vez a la ingeniería, la ciencia, la tecnología y el arte en una sola cosa. Motivo por el cual hay materia para que, tanto los profesionales como los aficionados, la estudien, especulen, experimenten, y a veces consigan un descubrimiento, que quizá no sea de proporciones industriales, pero que será suficiente para ganar una fracción de segundo. En el competitivo mundo de la década de los noventa las fracciones de segundo se han vuelto muy importantes.

## Agradecimientos

Para escribir este libro me ha ayudado tanta gente, directa e indirectamente, que espero no haberme olvidado de nadie en la lista siguiente. Tengo que agradecer especialmente su colaboración a un pequeño grupo de personas; a Tracey, quien, a pesar de haber entendido el coeficiente aerodinámico como una medida de lo que le he hecho pasar en estos últimos meses, siguió a mi lado, y además hizo algunas fotos; a mi hermano Andy, con quien he compartido la conducción y el desarrollo de varios coches desde 1979; él me permitió jugar con la aerodinámica de esos coches más o menos a mi gusto, y esto me enseñó tanto como todos los libros que pudiera leer; a David Jeffrey, del Departamento de Aeronáutica y Astronáutica de la Universidad de Southampton, quien, con la ayuda y el patrocinio de Penske Cars, habrá obtenido su doctorado para el momento en que este libro sea publicado; de algún modo, encontró el tiempo no sólo para comprobar la precisión técnica de mis esfuerzos, sino que, además, me ayudó a rebatir algunas teorías erróneas sobre cómo funcionan realmente los alerones; a Gordon Murray, por tomarse la molestia de escribir el prólogo; y a Allan Staniforth, quien me dirigió hacia el camino correcto desde el principio; tenías razón, Allan, fue un trabajo muy duro.

Gracias también a Darryll Reach, Alison Roelich y Flora Myer de Haynes; John Wood, Graham Kendall, Paul Atkin, Anthony Baxendale, Keith Reid y Goeff Carr (quien desgraciadamente falleció poco antes de que acabara el manuscrito) de MIRA; Nick Goozee y David Johnson-Newell de Penske Cars; Brian O'Rourke de Williams GPE; John Russell de Williams TCE; Stuart Featherstone de Fluent Europe; Andy Scriven de Penske Racing South; Mike Pilbeam; Tom Hammonds; Dave Longhurst de Dave Longhurst Racing Developements; Rob Dominy; Chris Bernard; Jack Brown y Bernie (Smitty) Smith de Reclamation Racing; Andrew Chisholm y Mick Kouros de Martello Racing; Tony Broster; Tony Pashley; Bob Le Sueur de Haggispeed; Ed Nicholls de Professional Sports Car Racing; Martin Taylor-Wilde, de Multi-Sports Composites; Eric Taylor de Carr Reinforcements; Vic Claydon; Steve Bagnall y Steve

Black de SBG Sport; Matthew Lait de Benetton Formula; Giselle Davies de Jordan GP; Peter Coleby de GPC Motosport; Quentin Spurring, Steve Bennett, John Colley y Peter Wright; la FIA, RAC Motorsports Association, Silverstone Circuits, Brands Hatch Circuits; Castle Comb Circuit, Watkins Glen International, Gurston Down Hillclimb; Goodwood Motorsport y Santa Pod Raceway; y a todos los numerosos pilotos de carreras de montaña que han utilizado mis alerones en sus coches; y, por último, a mis padres, que me pagaron la universidad para que pudiera conseguir un buen trabajo, para que 20 años más tarde, yo siga jugando con coches de carreras.

Y no quiero olvidar a todos los entusiastas del mundo del motor, con los que he intercambiado ideas a lo largo de los años.

# Prólogo

Durante la corta historia de las carreras de coches, se han escrito pocos libros técnicos dedicados al diseño, desarrollo y aerodinámica de los bólidos de competición que hayan tenido una lectura accesible. Recuerdo haber estudiado de punta a punta el libro *Racing and Sports Car Chassis Design* de Phipps y Costin cuando diseñaba mi primer coche de carreras a los 18 años, y, como era el año 1965, no había ninguna sección dedicada a la aerodinámica. El libro tuvo un valor incalculable para mí en aquella época, ya que representaba el único trabajo práctico que trataba sobre el diseño de un coche de carreras.

*La aerodinámica en los automóviles de competición* es, sin duda, una de esas extrañas maravillas que se pueden encontrar en las librerías, y probablemente represente la primera guía práctica sobre aerodinámica en los coches de carreras.

Creo que este libro atraerá a una amplia gama de lectores, desde el aficionado corriente hasta los diseñadores y fabricantes en las cientos de categorías de deportes automovilísticos que utilizan la aerodinámica como una herramienta.

Después de consultar con algunos de los constructores y equipos de competición más importantes, Simon McBeath ha realizado un trabajo estupendo al presentar la información en un estilo fácil de leer, cubriendo aspectos tan variados como la teoría esencial (con un mínimo de matemáticas), y la creación de la resistencia aerodinámica mediante el uso de apéndices aerodinámicos, con una explicación de cómo funcionan. Al mismo tiempo, desmiente algunas de las más populares creencias erróneas. También explica cómo el competidor aficionado puede intentar visualizar, medir y cuantificar el rendimiento aerodinámico de un coche, e investiga el modo de trabajar de los constructores y equipos profesionales.

El autor ha utilizado su propia experiencia, acumulada a lo largo de 18 años, tanto conduciendo, como experimentando con la aerodinámica de los coches, para crear el libro, e incorpora en él casos estudiados en varias categorías automovilísticas disputadas a ambos lados del Atlántico.

Personalmente, recomiendo este libro a todos los entusiastas y profesionales, ya que se trata de una pieza única por la materia que trata y el estilo que utiliza, y es una herramienta muy útil cuando se trabaja con el «arte negro» de la aerodinámica.

*Gordon Murray,*  
Director Técnico de McLaren Cars Motorsport

# 1. Desde entonces hasta ahora: breve historia de la aerodinámica

No hay, seguramente, otro aspecto de la tecnología de los coches de competición que haya tenido una influencia mayor en el rendimiento como el desarrollo de la aerodinámica. En todos los campeonatos automovilísticos del mundo, incluidos los de Fórmula 1, CART, Fórmula 3000 y Fórmula 3, el apoyo aerodinámico es el elemento más importante en el rendimiento de los vehículos. En los coches de sport y GT, al igual que en los turismos, el apoyo aerodinámico también juega un papel primordial. En los rallies, en las carreras de dragsters, en carreras de montaña, en carreras en óvalos y en una larga lista de categorías automovilísticas, el apoyo aerodinámico es un elemento crucial para mejorar las prestaciones.

La aerodinámica se ha vuelto tan importante que, en la mayoría de los campeonatos de iniciación, los diferentes organizadores se han visto obligados a modificar con regularidad el reglamento que afecta a los apéndices aerodinámicos que se permite utilizar. En algunos casos, esto ha requerido de cambios drásticos con el fin de reducir las prestaciones, ya que el aumento de la velocidad de paso por curva y la reducción de la distancia de frenado comenzaban a ser peligrosos. Pero en algunas otras categorías, unas revisiones más lógicas sugeridas por especialistas han tenido una respuesta más acertada a este problema y, en cierto grado, se ha conseguido estabilizar los tiempos de vuelta.

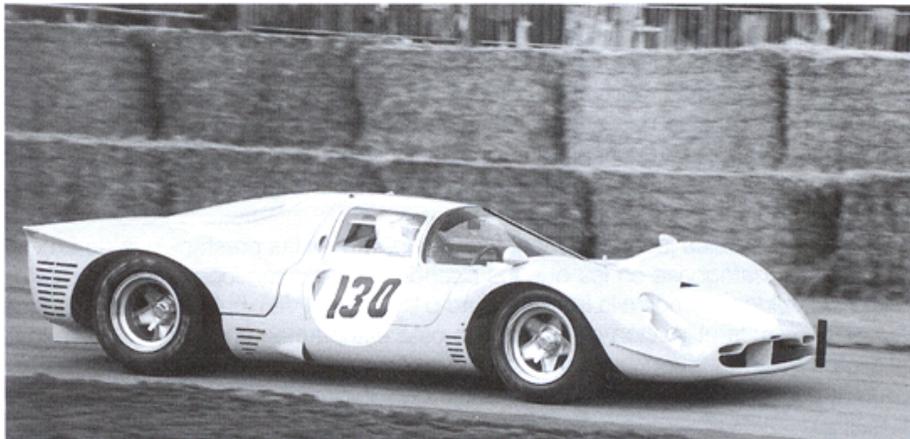
La aerodinámica juega un papel tan importante en las prestaciones de un coche, que hay categorías en las que los apéndices aerodinámicos están completamente prohibidos, como en la Fórmula Ford o la Fórmula Vauxhall Junior. En categorías superiores, la utilización de apéndices está estrictamente controlada para que los pilotos aprendan progresivamente el modo de manejarlos, explotarlos y ponerlos a punto, para que trabajen a su favor, antes de subir a categorías donde su uso es crucial.

La aerodinámica ha recorrido un largo camino en los últimos cuarenta años. El primer intento conocido de montar un alerón en un coche de carreras se considera

que lo llevó a cabo un ingeniero suizo, Michael May, en un Porsche Spyder en el año 1956. El coche tenía un alerón montado encima del cockpit, actuando a través del centro de gravedad, que se podía inclinar entre  $-3^\circ$  y  $+17^\circ$ . Los comisarios de Nürburgring y Monza, donde pensaba competir, no permitieron su uso, por lo que nunca llegó a correr.

Durante la primera parte de la década de los 60, diseñadores e ingenieros intentaron conseguir una ventaja a través de la aerodinámica mediante la reducción de la resistencia al avance, dando a la carrocería una forma lo más afilada posible, o construyendo un coche más bajo con el fin de reducir su área frontal. La reducción de la resistencia permitió unas velocidades punta más altas, pero, a pesar de que esto mejoró la velocidad en las rectas, sólo se mejorarían los tiempos de vuelta si se conseguía mejorar o mantener el rendimiento en las curvas. Y en el caso de los coches de sport, por ejemplo, construir un coche más bajo y afilado podría haber producido lo contrario del apoyo aerodinámico: sustentación o un efecto ascensional.

Es difícil decir si éste fue el caso, ya que otras áreas en las que se mejoró el rendimiento, tales como la suspensión o la mejora de los neumáticos, contribuían a alcanzar mayores velocidades de paso por curva, reduciendo así el efecto causado por la sustentación. Pero estos coches tenían las superficies en planta más grandes de todos los tipos de coches de carreras, y, en lugares como Le Mans, las velocidades punta eran mayores que en ninguna otra categoría, y, como veremos en el siguiente capítulo, estos dos parámetros, superficie y velocidad, están relacionados con la producción de sustentación aerodinámica (y con el apoyo aerodinámico). Así, el problema era mayor para los coches de sport que para cualquier otro tipo de vehículo. Por esto era más probable que aparecieran en estos coches las primeras soluciones aerodinámicas para resolver el problema de la sustentación positiva o levantamiento, mediante el uso de spoilers que provocaran turbulencia en el flujo suave (y ascensional) del aire acelerado por encima de la superficie superior del coche.



Coches de sport como este Ferrari 300 P3/4 fueron de los primeros en utilizar spoilers.



El Chaparral 2F, similar al primer coche con alerones, el 2E.

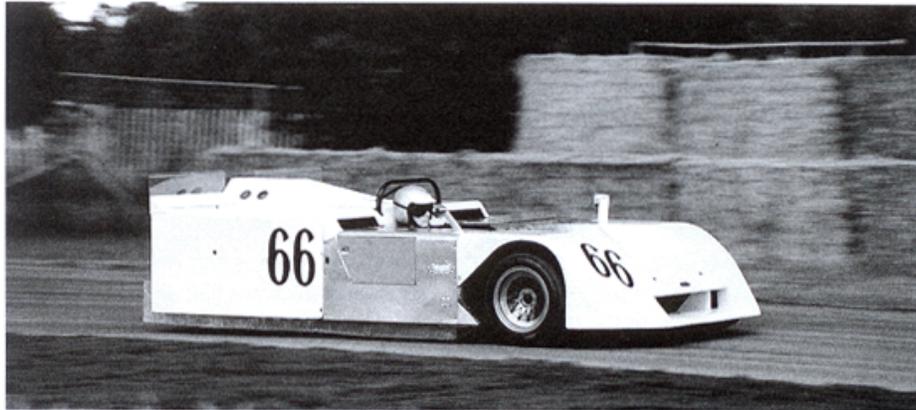
Los ingenieros habían experimentado constantemente con ideas que parecían mejorar el rendimiento, y no pasó mucho tiempo antes de que comenzaran a aparecer alerones en los coches de sport y en los turismos de todo el mundo. Así se descubrió que, a pesar de que las velocidades punta eran inferiores debido al incremento de la resistencia al avance, los tiempos por vuelta comenzaban a ser cada vez mejores. La conclusión de todo esto era que la velocidad de paso por curva estaba aumentando, y esto sólo podía ocurrir gracias al aumento de agarre del coche con el suelo. Por fin, se estaba generando auténtico apoyo aerodinámico.

Entonces, un ingeniero/piloto particularmente innovador recordó una vez más (según parece, todo el mundo se había olvidado o no había oído hablar del primer experimento de May) que las alas mantenían a los aviones en el aire mediante la creación de una fuerza de sustentación positiva, por lo menos tan grande como el peso del avión. Si eso era así, ¿por qué no podían los corredores fijar alerones invertidos a sus coches y crear una fuerza que los empujara contra el suelo más aún? Este innovador ingeniero/piloto era Jim Hall, quien apareció con alerones montados en su Chaparral 2E en Bridgehampton, Nueva York, en 1966, y es Hall quien es conocido mundialmente por haber sido el primero en correr con un coche con alerones.

Era el comienzo de una revolución en lo referente a las prestaciones de los coches de carreras. Casi inmediatamente, la Fórmula 1 adoptó la idea, y unos alerones de aluminio de simple fabricación comenzaron a montarse sobre unas varillas delgadas de bastante longitud. Pero, desgraciadamente, algunos equipos no dedicaron mucho esfuerzo a elaborar el diseño, ya que los fallos en las estructuras eran conti-

nuos, lo que hizo que las autoridades deportivas intentaran prohibir toda clase de alerones. Pero después de pensarlo detenidamente, la CSI (Comisión Deportiva Internacional) decidió permitirlos con ciertas restricciones, como que debían estar firmemente sujetos a la carrocería original del coche y que no fueran móviles. Muy pronto lo utilizaban todos los coches de Fórmula 1, y no pasó mucho tiempo antes de que comenzara a utilizarse en el resto de las categorías. En los años 70 se vivió un desarrollo gradual de los alerones en los monoplazas y en los coches de sport, mientras que los turismos comenzaban a experimentar. En Europa, los famosos turismos del Grupo 2 montaban algo más que simples alerones, con verdaderas «presas de aire» y «divisores de flujo» en la parte frontal de los coches, y auténticas alas en la parte trasera.

El siguiente avance, que provocó, muy probablemente, el mayor salto en las prestaciones, tuvo lugar en la última parte de los años 70, cuando otro ingeniero, Peter Wright, que trabajaba con Colin Chapman en Lotus y con el apoyo de éste, introdujo el concepto de «efecto suelo» en la Fórmula 1, con el Lotus 78. A pesar de todo, el concepto general no era nuevo. Una patente de 1930 describía cómo un alerón simétrico creaba apoyo aerodinámico cuando estaba cerca del suelo, y el diseñador de los vehículos que batían todos los récords de velocidad, Sir Malcolm Campbell, había encontrado una fuerza de succión contra el suelo por debajo de la carrocería. Entonces, Jim Hall mostró lo que podía hacerse con un coche que creaba bajas presiones en su parte inferior con su Chaparral 2J en 1970. La intención era pegar el coche a la carretera, y Hall lo hizo utilizando unas grandes turbinas empujadas por motores auxiliares que succionaban el aire de la parte inferior del coche, mientras que unos «faldones» (término que se volvió infame a finales de los 70 y principios de los 80) servían para sellar los laterales y permitir la creación de bajas presiones bajo el vehículo.



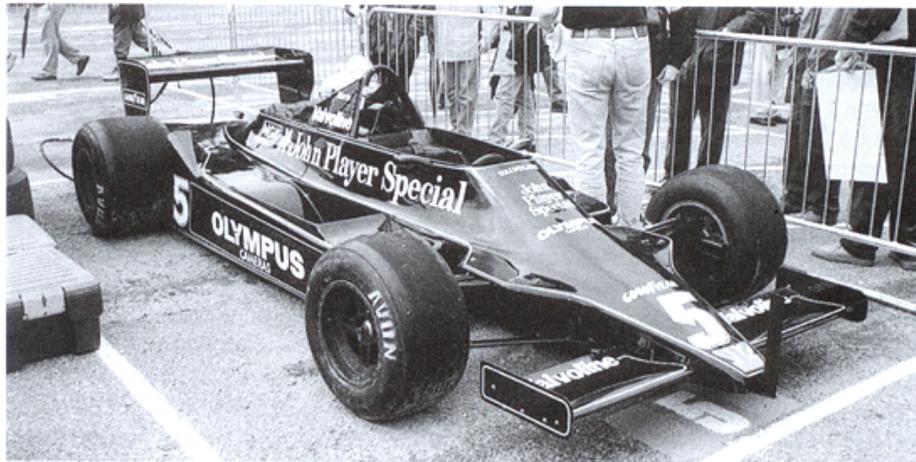
El Chaparral 2J «aspiradora».

Pero en la Fórmula 1, los «apéndices aerodinámicos» no podían ser móviles, lo que hacía que el concepto de las turbinas fuera ilegal. Hubo un intento de saltarse esta regla en 1978 con el Brabham «ventilador», cuando el principal propósito de la

turbina era refrigerar el motor, según declaró su creador Gordon Murray, lo que les permitió ganar una carrera antes de que fuera prohibido.

Así que, el gran paso adelante que dieron Wright y Chapman fue darse cuenta del hecho de que era posible crear una gran cantidad de succión debajo del coche utilizando solamente la velocidad de monoplaça, dándole una forma especial al fondo plano del mismo. En pocas palabras, toda la estructura central del coche se convirtió en un ala invertida que generaba baja presión en un área muy grande. Esto podía asimilarse a lo que sería un medio tubo Venturi, como el utilizado en los carburadores. Esto permitía la producción de unos niveles de apoyo aerodinámico no conocidos hasta ese momento, y, por tanto, unas mayores velocidades de paso por curva. Este incremento de velocidad, y la reducción de las distancias de frenado (y, en algunos casos, el hecho de ya no tener que frenar en algunas curvas), hizo que los diseñadores rivales comenzaran a tomarse muy en serio el concepto de «coche ala». Y hay que decir que el diseño del primer coche con efecto suelo, el Lotus 78, se mostró bastante ineficaz. Sin embargo, el Lotus 79 del año siguiente fue un elegante y eficiente monoplaça que le permitió a Mario Andretti dominar el campeonato del mundo y a Lotus lograr el título de constructores.

Pero los otros equipos comenzaron a ganar terreno rápidamente, y no pasó mucho tiempo antes de que Lotus fuera superado en su propio juego, por así decirlo. Williams Grand Prix Engineering realizó el más elegante de los coches con efecto suelo con el FW07. El principio del efecto suelo continuó su entrada en categorías a lo largo de todo el mundo, y así nació un número de diseños clásicos tales como el Ralt RT2/3/4, que tuvo tanto éxito en la Fórmula 2, 3 y en la Toyota Atlantic. Los coches de sport también explotaron este concepto y se beneficiaron de sus grandes superficies en planta para producir, literalmente, toneladas de apoyo aerodinámico.



El bello y muy efectivo Lotus 79.

Pero entonces las autoridades deportivas tuvieron una de sus famosas «reacciones rápidas», y de repente el efecto suelo había sido prohibido en la Fórmula 1 con la introducción de un «fondo plano» obligatorio entre las líneas de los ejes delantero y trasero. El hacha llegó más tarde a las otras categorías, pero llegó, aunque en la Indycar, donde cuentan con su propio comité técnico independiente, el efecto suelo se sigue utilizando hasta hoy en día, si bien es controlado estrictamente.

En Europa, la Fórmula 1, la Fórmula 3000 (que reemplazó a la Fórmula 2 a principios de los 80) y la Fórmula 3 tuvieron que buscar otros métodos para recuperar el apoyo aerodinámico perdido con los cambios de reglamento. Los coches de Fórmula 1 comenzaron a ser menos elegantes debido a la introducción de pequeños apéndices adicionales fijados en el exterior del alerón trasero. Fue alrededor de este período cuando se utilizaron los motores más potentes, durante la época conocida como «la era turbo», y todo el apoyo aerodinámico que se pudiera conseguir en la parte trasera era necesario para poder transmitir las enormes potencias al suelo. La resistencia aerodinámica se volvió algo casi irrelevante cuando los motores superaban las cuatro cifras de potencia, gracias a los turbos en los propulsores de 1,5 litros. Las categorías con monoplasas menos potentes tuvieron que preocuparse por conseguir un equilibrio razonable entre resistencia y apoyo, y los diseños de los alerones no eran tan grotescos como en la Fórmula 1.

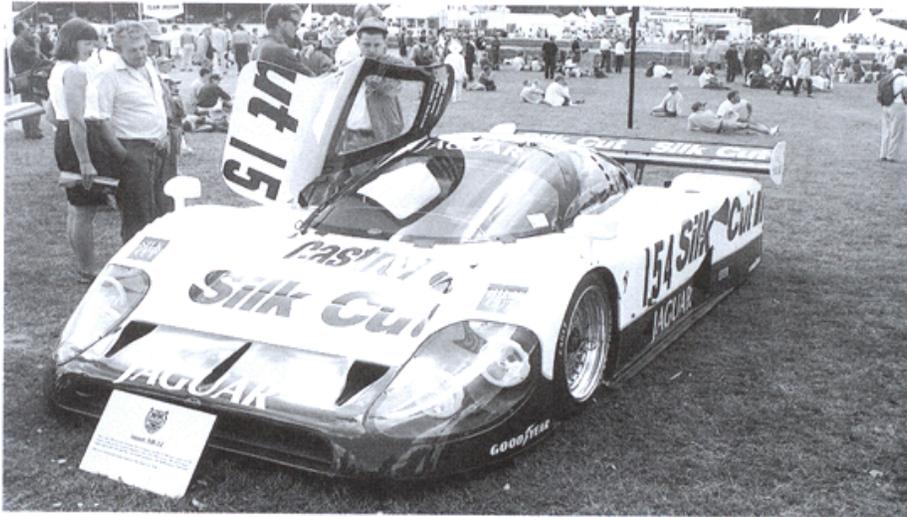
Los coches de sport siguieron con el desarrollo del efecto suelo, explotando la relativa libertad que su reglamento permitía, al igual que la enorme superficie en planta disponible para generar apoyo aerodinámico.

La Fórmula 1 vivió, en 1989, el regreso de los motores aspirados de 3,5 litros, con una reducción de la potencia a niveles más modestos. La cuestión de «apoyo contra resistencia» tuvo que ser reconsiderada, y los diseñadores comenzaron a mirar al fondo del coche como un productor de apoyo aerodinámico en potencia. Se llegó a la conclusión de que, con el suficiente espacio entre el coche y el suelo, y un morro delantero inclinado, se podía crear una forma cruda de sección VENTURI a pesar del fondo plano. Se comprobó que era vital que el aire que pasaba por debajo del coche saliera de la forma más eficaz posible por la parte trasera, y los difusores aparecieron para cumplir esa misión. Se había descubierto un aspecto del apoyo aerodinámico completamente nuevo; en los siguientes años la evolución fue constante.

La Fórmula 3000 y la Fórmula 3 siguieron también este camino, produciendo una generación de coches con muy poca distancia con respecto al suelo, y amortiguadores muy duros para mantener lo más constante posible esa distancia. La Fórmula 1 dio un paso adelante en esta área de control, y produjo sistemas de «suspensión activa», que ofrecían la habilidad de controlar la distancia con respecto al suelo de forma mucho más eficaz que un sistema de muelles. La razón principal de este invento fue la aerodinámica, y no una búsqueda de mejoras en el manejo del coche, así que, en realidad, la suspensión activa era ilegal, ya que los coches se habían convertido en apéndices aerodinámicos móviles, con controles creados específicamente por razones aerodinámicas. Si bien el coche en sí, al estar en movimiento, ya es un apéndice aerodinámico móvil.

Otras categorías por todo el mundo no permitieron el uso de suspensiones activas, y finalmente fueron prohibidas en la Fórmula 1 también. Pero el desarrollo del

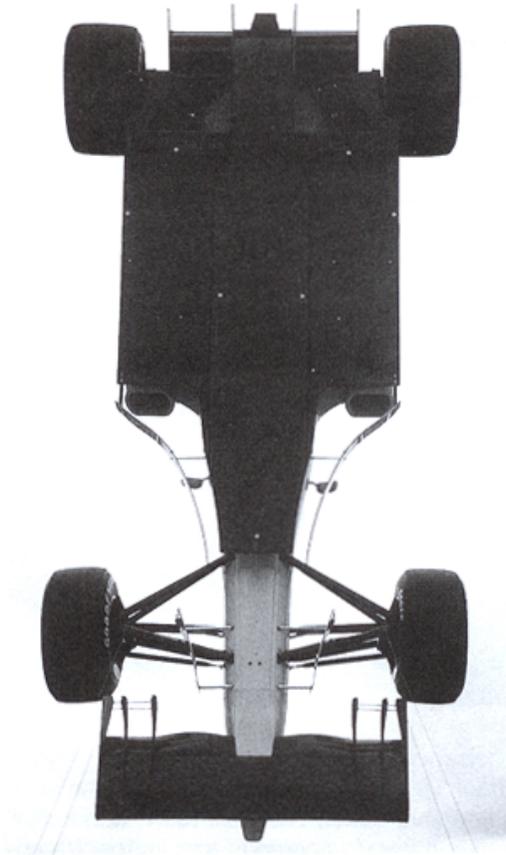
fondo y de los difusores continuó. También los alerones fueron estudiados más a fondo, y comenzaron a surgir formas más complejas, según los diseñadores empezaron a pensar en tres dimensiones, y el «control del flujo de aire» se convirtió en una frase de moda. Poco a poco se introdujeron más apéndices que ayudaban a aumentar el apoyo sin verse penalizados por la resistencia al aire.



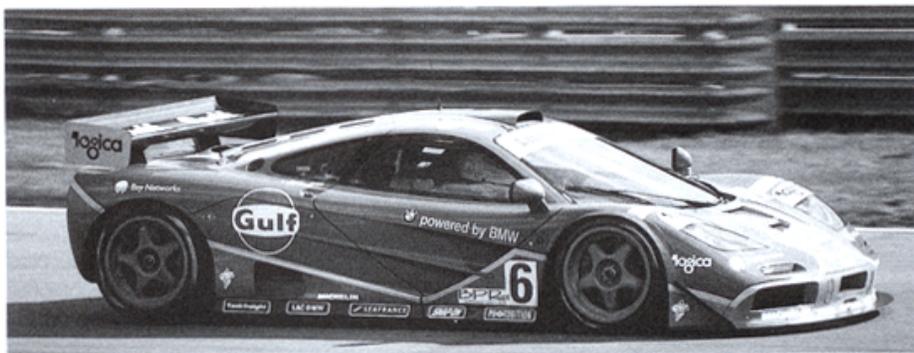
Los sport prototipos como este Jaguar XJR 12 vencedor de Le Mans en 1990 producían toneladas de carga aerodinámica.

Entonces, después del terrible fin de semana de Imola en 1994, donde Roland Ratzenberger y Ayrton Senna perdieron sus vidas en dos accidentes diferentes, la FIA, el organismo que rige los deportes del motor, realizó unos cambios destinados a reducir el apoyo aerodinámico de manera significativa. Algunos cambios tuvieron efecto inmediato, y sirvieron para reducir el apoyo en cierto grado. Pero una regla introducida en 1995, que también fue aplicada en la Fórmula 3000 y la Fórmula 3, limitó el espacio mínimo entre gran parte del fondo del coche y el suelo; era el «fondo escalonado». Esto produjo una reducción de los niveles de apoyo (quizás hasta un 40 %), y además mejoró la sensibilidad de los monoplazas a los cambios de altura relativos al suelo, lo que los hizo más predecibles y, por tanto, más seguros de pilotar.

A lo largo de este período de cambio en las competiciones automovilísticas europeas, la organización de la Fórmula Indy había estado realizando cambios frecuentes en las reglas con el fin de mejorar el rendimiento de los coches, e imponía casi cada año cambios en su reglamento. Este sistema parecía garantizar que no se produjeran cambios drásticos, y los organizadores limaban las impurezas para asegurarse de que las prestaciones no se les escaparan de las manos. Naturalmente, los diseñadores y aerodinamistas hacían todo lo posible para recuperar, por lo menos, lo



Desde 1995, los coches de Fórmula 1 están obligados a llevar fondos escalonados, como en este Ferrari F310 de 1996.

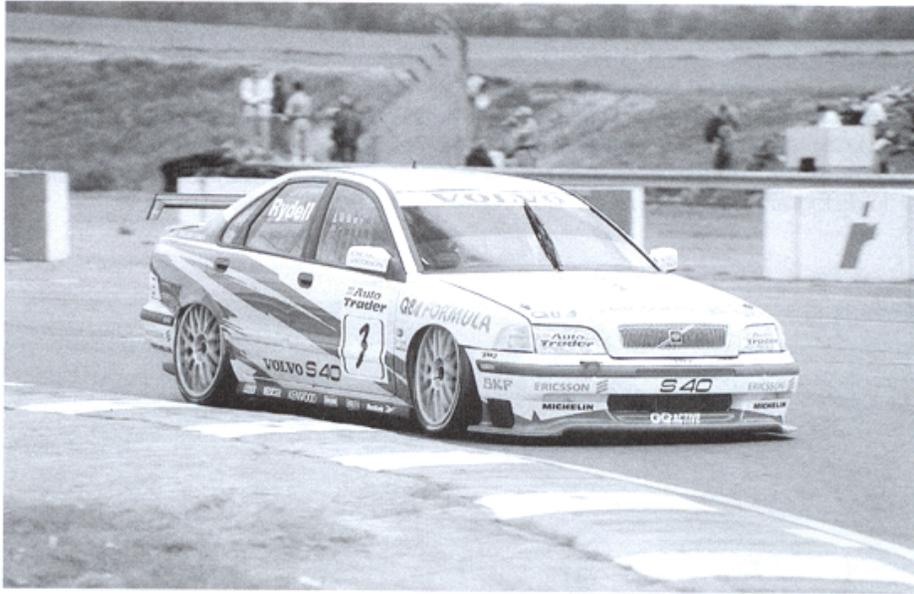


Los coches de GT han reemplazado a los sport prototipos; éste es el McLaren F1 GTR.

que se había perdido. Los cambios en el reglamento en lo concerniente a los neumáticos y a los motores han creado algo de controversia, y queda por ver si los cambios tienen el resultado deseado.

Mientras tanto, los coches de sport han sufrido un cambio total, y los gloriosos sport prototipos han sido reemplazados por coches de GT. Los apéndices para producir apoyo aerodinámico fueron permitidos, incluidos los divisores de flujo, alerones y fondos perfilados, pero de forma mucho más controlada que en la fórmula anterior.

Las carreras de turismos también han sufrido varios cambios durante este período, y ahora consisten en dos categorías, la Clase 1 y la Clase 2. La Clase 1 permite bastantes modificaciones a partir del coche inicial, y se pueden alcanzar altos niveles de apoyo aerodinámico. La Clase 2 comenzó con los coches prácticamente sin modificar, pero a partir de 1995 se permitieron alerones y divisores de flujo de tamaño limitado. Sin embargo, en el momento de escribir este libro, el reglamento estaba siendo revisado cuidadosamente.



Los Super Turismos de la Clase 2 permiten una producción limitada de carga aerodinámica con pequeños alerones y divisores de flujo; éste es el Volvo S40.

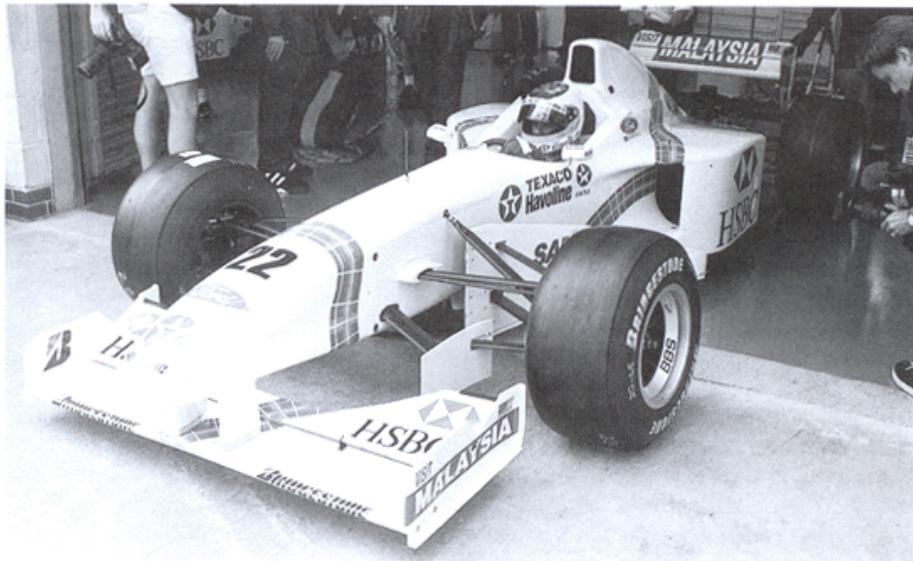
A lo largo de todo el periodo descrito brevemente aquí, algunas categorías han desaparecido y otras se han creado, algunas han seguido sin cambios y otras se han adaptado a las nuevas tecnologías. Pero sea cual sea el modo en el que ha sido permitido, el apoyo aerodinámico ha tenido una influencia enorme en las prestaciones de todos los coches de carreras.

Existen, por supuesto, otros factores que contribuyen a la mejora del rendimiento de los coches, y éstos incluyen, obviamente, los neumáticos. Esos cuatro

pequeños puntos de contacto entre el vehículo y el suelo definen y limitan la cantidad de agarre que un coche puede generar. Pero en el caso de los bólidos de carreras, donde se alcanzan cantidades significativas de carga aerodinámica, los neumáticos han avanzado paralelamente con las mejoras que los aerodinamistas han ido descubriendo.

Es interesante que la eterna lucha de los diseñadores para conseguir que los coches vayan más rápido es a veces considerada contradictoria con lo que supone el deporte del motor: dar espectáculo y diversión para los participantes y espectadores. En efecto, la aerodinámica es, para muchos, la principal causa de la falta de adelantamientos en muchas categorías. Los pilotos a menudo se quejan de que, en cuanto se acercan a otro coche en una curva con el fin de poder salir pegado y adelantarlo más adelante, su propio vehículo pierde tanta carga aerodinámica en la parte delantera que no pueden seguir al ritmo del coche que le precede. Además, se considera que el apoyo aerodinámico es el culpable de que las distancias de frenado se hayan reducido a unos pocos metros, lo que hace que la maniobra de «apurar la frenada» resulte mucho más difícil.

No se puede negar la existencia de estos efectos, pero si son o no la causa principal de la falta de adelantamientos, no está muy claro. Otros factores tales como el diseño de la pista, las dimensiones de los coches y la mentalidad de los pilotos de «no pasarán» tienen también parte de la culpa. Sin embargo, en 1996, la FIA realizó unos estudios sobre la aerodinámica de los coches cuando ruedan muy juntos, con el fin de lograr una configuración que permitiera los adelantamientos.



¿Dónde se colocarían los nombres de los patrocinadores si se prohibieran los alerones?

Con mucho interés, el énfasis de estos estudios cambió por un tiempo de la aerodinámica a los neumáticos. Parece que los estudios indicaron que, si se reducía la cantidad total de carga aerodinámica, lejos de permitir que los coches pudieran rodar juntos, las cosas empeoraron, y el efecto era más negativo aún sobre el coche que va detrás. Pero finalmente, en 1998, la FIA decidió introducir en la Fórmula 1 los neumáticos con dibujo, con la esperanza de que, reduciendo la cantidad de goma en contacto con el suelo, y con ello la velocidad de paso por curva, aumentarían las distancias de frenado. Al mismo tiempo, los coches se hicieron 20 cm más estrechos, lo que reduciría el área de planta que podía ser utilizada para generar carga aerodinámica, si bien las velocidades punta aumentarían. Todavía queda por ver cuáles serán los resultados. Pero esperemos que no se quite mucha libertad técnica mediante la imposición de reglas que prohíban los alerones y otros apéndices aerodinámicos, como parecen desear algunas personas. La ciencia (y el arte) de producir carga aerodinámica es demasiado fascinante como para permitir que eso ocurra. Además, ¿dónde pondrían los patrocinadores sus nombres? Pero, dejando de lado este argumento algo banal, existe una razón legítima por la que los alerones no deben ser prohibidos y ésta es la seguridad. Existen, afortunadamente, muy pocos casos en los que un coche de competición realice «loopings», excepto en las condiciones más extrañas, por lo que la prohibición total de los alerones sería muy peligrosa.

Existen muchas categorías que permiten la explotación de la aerodinámica, y en el resto de este libro se tratará la teoría y la práctica para crear carga aerodinámica en diferentes modalidades y categorías a lo largo y ancho del mundo.

## 2. Sólo con el delicado aire: un poco de teoría práctica

### Que la fuerza te acompañe

Cuando la vemos acelerar a lo largo de una pista, siempre parece increíble que una máquina tan vasta y pesada como un avión de pasajeros pueda levantar el vuelo. Y, sin embargo, las fuerzas que lo elevan y lo mantienen arriba son creadas solamente por sus estilizadas alas cortando el aire, mientras el avión se mueve. Parece igualmente increíble que un monoplaza de Fórmula 1 o de Fórmula Indy actual pueda generar suficiente sustentación negativa, o carga aerodinámica, como para ser capaz de rodar por el techo de una habitación grande y, mediante su propia carga aerodinámica, mantenerse ahí arriba, cabeza abajo, desafiando la gravedad. Por supuesto, tendría que ser una habitación muy grande, como para permitir al bólido alcanzar la velocidad suficiente, y dejaremos de lado cómo haría para llegar hasta ahí en primer lugar. Pero el principio en sí es válido, incluso si la parte práctica debe ser dejada un poco de lado. Entonces, ¿cómo es posible crear tales fuerzas sólo con el delicado aire?

Intuitivamente, conocemos de manera natural algunas fuerzas aerodinámicas. Si estamos viajando en coche y sacamos un brazo por la ventanilla abierta (que resulta más fácil que hacerlo por una cerrada), podemos sentir bastante fuerza haciendo presión sobre nuestro brazo. Si la palma de la mano está abierta e inclinada hacia arriba o hacia abajo, podemos sentir cómo esta fuerza nos empuja en esa dirección a la vez que empuja el brazo hacia atrás.

Pero éstos son los elementos obvios de las fuerzas que actúan sobre los objetos. Existen otros efectos más sutiles pero muy significativos, que crean fuerzas que se encuentran en diferentes ángulos con respecto al flujo de aire, en lugar de en su misma dirección. Un profesor de física me enseñó el siguiente experimento, que ilustra de manera gráfica cómo se crea la sustentación gracias al aire que circula por una superficie. Tome una hoja de papel corriente de tamaño DIN-A4 (297 mm × 210 mm)

por las esquinas de uno de los lados cortos, con los dedos índice y pulgar de cada mano. Ahora sujete la hoja de papel a la altura de su boca, tocando su labio inferior, de tal modo que el borde cerca de su boca quede horizontal y la flexibilidad del papel le permite colgar hacia abajo. Ahora sopla de forma horizontal, a lo largo de la superficie de la hoja. ¿Ve lo que ocurre? La hoja de papel se dobla hacia arriba en dirección al flujo de aire que sale de su boca. Se puede ver claramente que hay una fuerza actuando sobre el papel, que hace que suba contrarrestando la fuerza de la gravedad. Es el flujo de aire el que causa esta fuerza de sustentación, sin embargo, la fuerza está actuando de manera perpendicular a la dirección del flujo de aire. Ésta es la fuerza que mantiene a los aviones en el aire. También es la fuerza que empuja a los coches de carreras contra el suelo.

## Desde Aristóteles a Bernoulli

Entonces, ¿cómo se generan estas fuerzas obvias y no tan obvias? Aristóteles, conocido griego que vivió desde el año 384 al 322 a.C., un hombre modesto cuya especialidad eran «todos los campos del conocimiento», estudió el tema. Así, concluyó que cuando un cuerpo se mueve a través del aire, se creaba un vacío que hacía que el cuerpo siguiera en movimiento. Bueno, ya sabe adónde quería llegar... Después, en 1726, Sir Isaac Newton llegó a unas conclusiones más plausibles cuando se dio cuenta de que el aire y el agua se movían como respuesta a leyes físicas similares, y que estas fuerzas dependían de la viscosidad y la velocidad del fluido que rodeaba un objeto, y también de la forma y el tamaño del propio objeto.

Esto se acercaba mucho más a lo que conocemos hoy día, pero desgraciadamente su primer intento de cuantificar las cosas quedó lejos de lo cierto y subestimó en gran medida la realidad. Newton asumió que las fuerzas que actúan sobre un objeto están causadas por partículas de aire rebotando sobre el objeto, tal y como se muestra en la figura 2.1. En este caso, las fuerzas de sustentación y resistencia son el resultado de la transferencia de la cantidad de movimiento entre las partículas de aire y la placa con la que chocaban. Esto es, claramente, parte de la causa de las fuerzas que actúan; volvamos al ejemplo del brazo fuera de la ventanilla y nos daremos cuenta de que es cierto. La resistencia puede ser explicada parcialmente por el efecto de colisión de Newton, pero los cálculos de la sustentación y la resistencia no concordaron con el experimento.

Alrededor de 150 años más tarde, otro hombre, llamado Rayleigh, relacionó el flujo de aire alrededor de nuestra placa inclinada con el flujo inmediatamente en contacto con la misma placa que se desliza sobre la superficie de un cuerpo de agua. Pero todavía había una larga distancia entre esta teoría y los resultados de los experimentos, en los cuales las fuerzas de sustentación se medían en varios ángulos de inclinación, o ángulos de «ataque».

No fue hasta 1907, cuando un ruso llamado Joukowski dedicó atención al problema, que los patrones o «trazadas del flujo» fueron visualizados de manera correcta, y la fórmula derivada de las fuerzas de sustentación estaba muy cercana a los resultados de los experimentos. Joukowski se dio cuenta de que la influencia de la

placa inclinada se extendía, por los efectos de la viscosidad, dentro del aire a una distancia considerable de la propia placa, lo que le permitió elaborar teorías que concordaran con los resultados observados. Es interesante destacar que los hermanos Wright consiguieron que su avión se mantuviera en el aire 259,8 metros en 1903, unos cuatro años antes de que Joukowski encontrara «La Fórmula», lo que sirve para probar que no tienes que saber toda la teoría para hacer funcionar algo en la práctica. Incluso hoy día, éste es el sistema utilizado para el desarrollo aerodinámico de los coches de carreras.

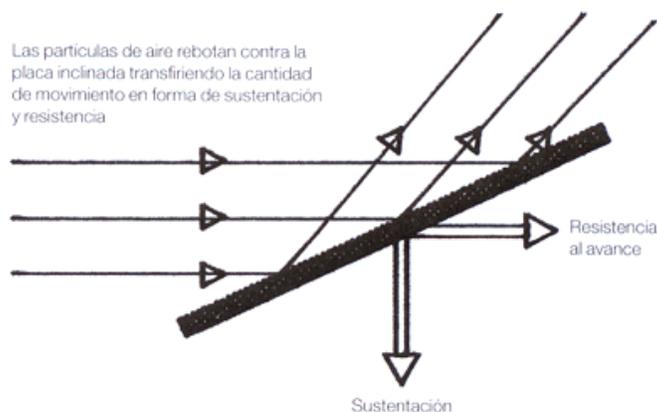


Figura 2.1. «Teoría de la carga aerodinámica» de Newton.

Pero tenemos que retroceder una vez más en la historia, al siglo XVIII, para encontrar las primeras explicaciones de la relación entre flujo y presión en un contexto general de dinámica de fluidos. Se dice que un físico italiano llamado Daniel Bernoulli encontró una relación directa entre presión y velocidad en 1738, en un libro de hidrodinámica. Pero la ecuación así en honor a Bernoulli, que describe matemáticamente esta relación, fue creada en 1755 por Leonhard Euler. Sin embargo, por razones que no intentaremos analizar aquí, Euler no se llevó ningún mérito, mientras que, por muy injusto que parezca, Bernoulli consiguió su propia ecuación, y aquí está:

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{una constante}$$

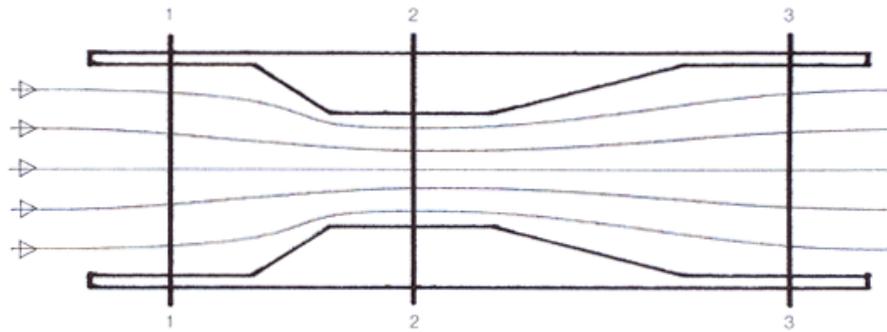
( $\rho$ , la letra griega rho, es densidad del aire,  $v$  es velocidad del flujo)

donde  $p$  es la «presión estática», y  $\frac{1}{2} \rho v^2$  es la «presión dinámica». ¿Qué nos dice esto? Bien, mi profesor de física me rescató una vez más, y parafraseó esta fórmula matemática como «donde el flujo alcanza su mayor velocidad, la presión alcanza su mínimo». En otras palabras, si la velocidad del flujo se incrementa, la presión local

debe disminuir. Observe que la ecuación es válida a lo largo de una línea aerodinámica dada.

El Principio de Bernoulli es lo que hace que un carburador funcione. La figura 2.2 muestra de manera esquemática el estrangulador de un carburador. El aire entra por el tubo gracias al tiempo de admisión del motor. La velocidad del flujo en la línea 2 ha sido acelerada debido a la reducción en el área del estrangulador, por lo que hay una bajada de presión en esa parte del tubo, y es esta reducción de presión la que chupa la gasolina a través del difusor(es) y la lleva hasta la zona de entrada del motor.

Volvamos ahora al experimento de soplar la hoja de papel, y podrá ver lo que causó la fuerza de sustentación. El aire de encima del papel se movió más rápido que el aire de debajo según soplabamos, y por esto la presión descendió. Esta reducción de la presión sobre la superficie de la hoja de papel creó una fuerza lo suficientemente grande como para levantar la hoja, a pesar de la fuerza de la gravedad.



El flujo de aire se acelera a través del estrechamiento y por eso la presión disminuye.

**Figura 2.2.** Esquema de la garganta o tubo Venturi de un carburador.

Y este principio también es aplicable a la sección de un ala, en su configuración invertida destinada a producir carga aerodinámica, como se ve en la figura 2.3. El aire que fluye bajo el ala, donde se encuentra la máxima curvatura, tiene que viajar una distancia mayor para llegar desde el borde de ataque al borde de salida que el aire que va por encima del ala. Así que, el aire que toma el camino más largo se acelera y adquiere mayor velocidad. Y, al igual que en el estrangulador de un carburador, esto causa una reducción en la presión, que en esta ocasión actúa en la parte inferior del ala, creando carga aerodinámica, mediante la succión del ala hacia abajo.

Los aerodinamistas profesionales explican la creación de la sustentación de un ala mediante la aparente circulación del aire alrededor de ésta. Miran los vectores de velocidad de encima y debajo del ala, junto con las perturbaciones en las zonas por delante y detrás del ala (en el contexto de producción de carga aerodinámica), y, después, se refieren a esto como la circulación que el ala ha impuesto al flujo de aire. Las líneas aerodinámicas se comportan como si hubiera un cilindro de aire rotando y

moviéndose, un vórtice cilíndrico por así decirlo, alineado con el eje del ala. Las fuerzas de sustentación, de hecho, pueden ser calculadas mediante la fuerza del vórtice. Todo esto está bien si eres un matemático, pero el concepto parece bastante abstracto si no es así; después de todo se trata más bien de un modelo matemático que de algo físico y real. Y en cualquier caso, habiendo considerado el patrón circulatorio, después se pasan a los principios de Bernoulli, por lo que para los propósitos de este libro, dejaremos de lado este principio matemático de circulación. Los estudiantes más serios deberán consultar uno o más de los textos teóricos señalados en el apéndice 2 para encontrar más lectura sobre esta materia. Para el resto de nosotros, Bernoulli será suficiente.

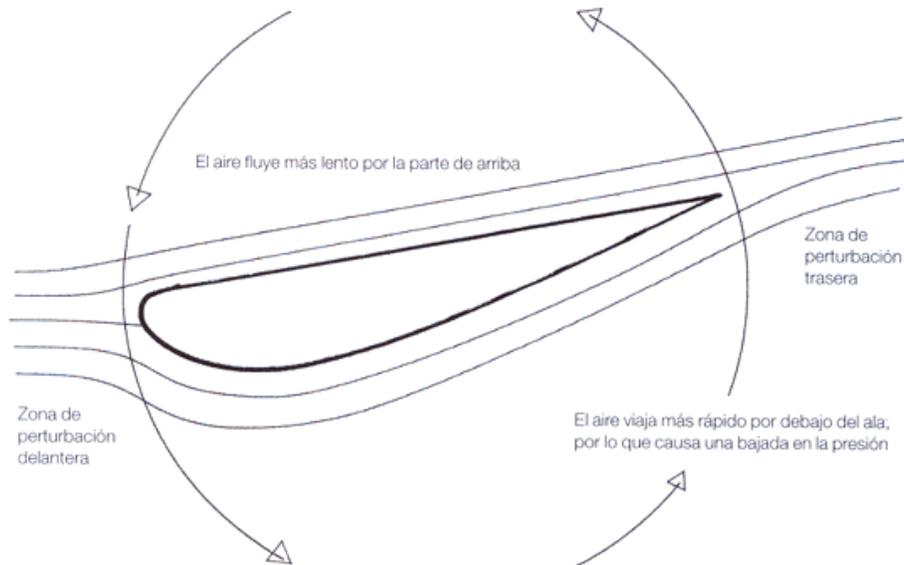


Figura 2.3. Cómo crea carga aerodinámica un ala.

## Las fuerzas implicadas

Los dos componentes de la fuerza aerodinámica son *resistencia* y *sustentación* (fig. 2.4). Éstas se combinan entre sí como vectores para dar la *fuerza aerodinámica total* resultante, y éste es el principio básico de todas las presiones que actúan sobre un cuerpo, tales como un ala. Las diferencias de presión pueden expresarse matemáticamente como el coeficiente de presión multiplicado por la presión dinámica, o sea:

$$p = C_p \times \frac{1}{2} \rho v^2$$

Para convertir una presión en una fuerza, es necesario multiplicarla por el área sobre la que la presión está actuando, ya que:

$$\text{presión} = \text{fuerza}/\text{área}$$

Así que, de la ecuación para la presión, podemos establecer ecuaciones para sustentación y resistencia del siguiente modo:

$$\text{Sustentación} = C_L \times \frac{1}{2} \rho v^2 \times A$$

$$\text{Resistencia} = C_x \times \frac{1}{2} \rho v^2 \times A$$

donde  $C_L$  es el coeficiente de sustentación,  $C_x$  es el coeficiente de penetración y  $A$  es el área. (NB: para un ala siempre se toma la superficie de planta, ya que es así como se expresan los coeficientes, pero en el caso de un vehículo entero, lo normal es utilizar el área frontal tanto para sustentación como para resistencia.)

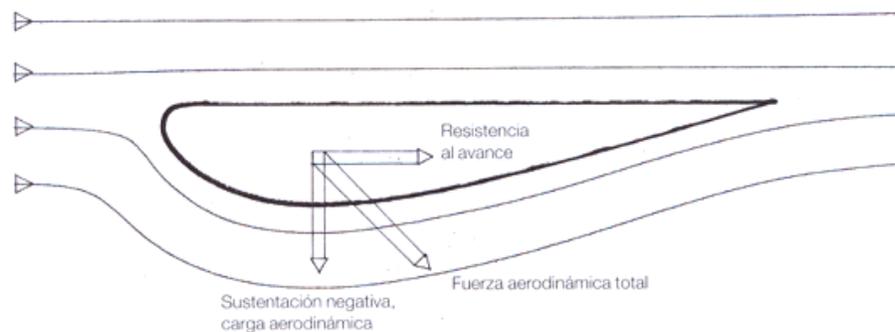


Figura 2.4. Los dos componentes de la fuerza aerodinámica.

Los coeficientes de sustentación y resistencia al avance son medidas relativas de cuánta sustentación y resistencia puede generar un cuerpo. Si miramos primero a la resistencia, una vez más nuestra intuición es increíblemente útil, hasta el punto de que *sabemos* que una placa con forma plana, puesta perpendicular a la corriente de aire, creará más resistencia que un objeto del mismo ancho con forma de lágrima (fig. 2.5). Sin embargo, no podemos decir, sólo con mirarla, que la placa tiene un coeficiente de penetración ( $C_x$ ) de quizás 1,25, y que el objeto con forma de lágrima, si la longitud es cuatro o cinco veces mayor que el ancho, tiene un  $C_x$  de alrededor de 0,12. Pero, normalmente, mirando a un coche podemos decir si tiene un  $C_x$  alto o bajo: un McLaren F1 GTR tiene un aspecto mucho menos «resistente» que el monoplaza de Fórmula 1 de McLaren, y los hechos así lo demuestran.

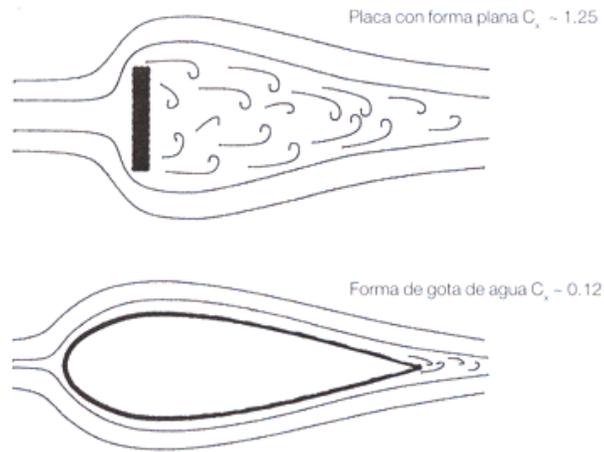
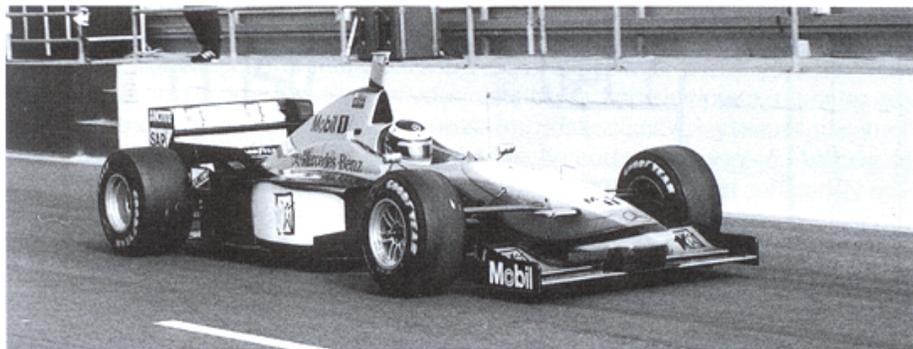
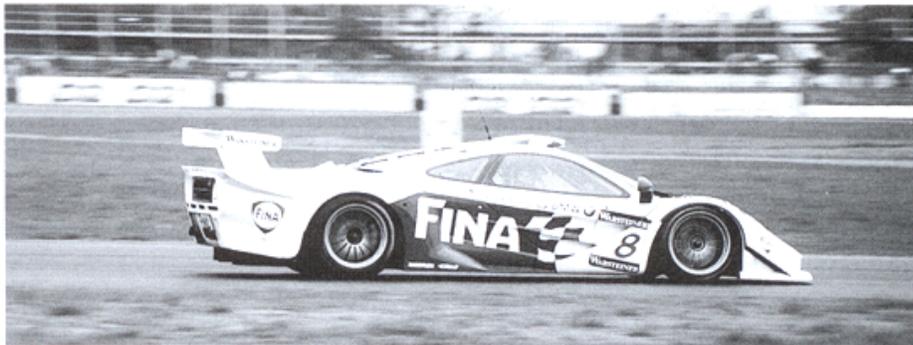


Figura 2.5. A diferentes formas, diferentes coeficientes de resistencia ( $C_x$ ).



El McLaren F1 GTR tiene una forma menos «resistente» que el McLaren de Fórmula 1.

Cuando se trata de coeficientes de sustentación, los juicios subjetivos no resultan tan fáciles (a menos que se pase todo el día midiéndolos), aunque algunos ejemplos pueden servir para intentar adivinarlos. Tomando los dos McLaren utilizados arriba, el coche de Fórmula 1 *debe* tener el coeficiente de sustentación (negativa) más alto, gracias a sus grandes apéndices aerodinámicos. El coche de sport, en su versión de calle, no cuenta con alerones, y a pesar de su perfilado fondo plano, del que hablaremos en los capítulos posteriores, no parece tener una forma que produzca mucha carga aerodinámica. Incluso en su versión de carreras, con sus divisores de flujo frontales y el alerón trasero, el F1 GTR parece estar a años luz del monoplaza en términos de coeficiente de sustentación, y por tanto, en producción de carga.

Pero lo que estos coeficientes no tienen en cuenta es que, como Newton observó muchísimo tiempo antes de que existieran los coches de carreras, ese tamaño es tan importante como la forma cuando se trata de la magnitud de las fuerzas aerodinámicas creadas. Volvamos a las fórmulas de sustentación y resistencia otra vez, y veremos que la «A», de área, está presente en ambas ecuaciones. Por tanto, está claro que si el área frontal de un coche es más grande que la de otro, producirá más resistencia al avance con el mismo  $C_x$  (a la misma velocidad).

Sin embargo, las cosas nunca son tan sencillas, así que vamos a ver un ejemplo basado en un coche real, utilizando muchas fuentes para conseguir los datos. Un Fórmula 1 típico puede tener un área frontal de apenas 1,5 m<sup>2</sup>, tal y como se ha medido en la figura 2.6, y un  $C_x$  de alrededor de 0,75 de acuerdo con varias referencias. Tomando la densidad del aire (y considerándola de ahora en adelante, y con el fin de evitar unidades confusas, 1,22 kg/m<sup>3</sup>, a 320 km/h u 89,4 m/seg) la resistencia resulta 560 kg. A la misma velocidad, un McLaren F1 GTR de sport, con un área frontal esti-

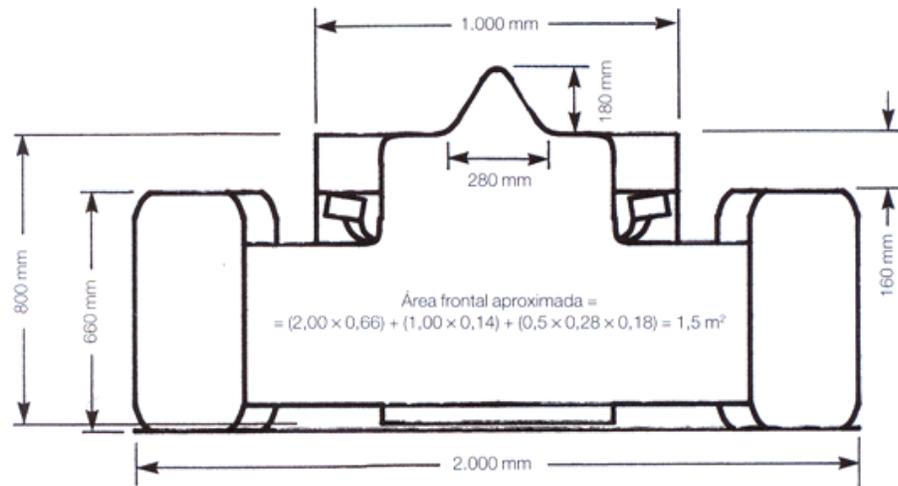


Figura 2.6. Un método para calcular el área frontal.

mada de  $1,81 \text{ m}^2$ , calculados con el ancho por la altura, generaba, a  $320 \text{ km/h}$  unos  $455 \text{ kg}$  de resistencia. Así, el coche con el área frontal más grande produce bastante menos resistencia, lo que implica que su  $C_x$  es inferior. Haga los cálculos al revés, y este coeficiente de penetración dará alrededor de  $0,5$ . Por lo que nuestra apreciación subjetiva del coche de Gordon Murray era correcta: el coche de sport es menos «resistente» que el Fórmula 1. Y es lógico esperar que la versión de calle del mismo coche tenga un  $C_x$  aún más bajo, ya que no cuenta con los apéndices utilizados para generar carga aerodinámica y que inducen resistencia al avance.

Es interesante hacer la misma comparación con la carga aerodinámica generada por las dos clases de coche, y calcular los valores generales de  $C_L$ . Se puede decir que un Fórmula 1 de 1996 producía una cifra de alrededor de  $1.820 \text{ kg}$  de carga aerodinámica a unos  $320 \text{ km/h}$  en los rápidos circuitos de Monza y Hockenheim, donde se utilizan unas configuraciones que generan poca carga y donde esta velocidad suele superarse con normalidad. Si tomamos los aproximadamente  $1.820 \text{ kg}$  y los reducimos hasta una cifra más conservadora,  $1.725 \text{ kg}$ , estaremos, a la hora de hacer los cálculos, más cerca de la verdad. El McLaren F1 GTR generaba entre  $273$  y  $682 \text{ kg}$  de carga, dependiendo de su configuración. Para la comparación utilizaremos la cifra más baja, ya que es la de la configuración análoga a la del Fórmula 1. Por tanto, el coche de sport produce alrededor de un  $15 \%$  menos de carga aerodinámica que un Fórmula 1 a la misma velocidad. Haciendo, de nuevo, los cálculos a la inversa, vemos que los valores generales de  $C_L$  son de  $2,32$  para el Fórmula 1 y de  $0,30$  para el coche de sport. Ésta es una diferencia significativa, y refleja, entre otros factores, los esfuerzos de los legisladores técnicos a la hora de intentar reducir la importancia de la aerodinámica y la de los aerodinamistas de la Fórmula 1 para sobreponerse al reglamento. Fijese que estos  $C_L$  deberían tener signos negativos delante de ellos para demostrar que se está generando carga aerodinámica en lugar de sustentación positiva. Pero ya que este libro trata sobre la carga aerodinámica, adoptaremos como norma el tratar a la carga como normal, y la diferenciaremos de la sustentación positiva utilizando un signo «+» cuando sea necesario.

La relación entre la sustentación aerodinámica con la resistencia al avance ( $L/X$ ) es, a menudo, tomada como una medida de la eficiencia aerodinámica de un ala o cuerpo aerodinámico. En los ejemplos con los que hemos trabajado aquí, el coche de Fórmula 1 tiene una relación de  $3,1:1$ , mientras que en el coche de GT es de  $0,6:1$ . Esto significa que el monoplace es cinco veces más eficaz aerodinámicamente que el coche de sport. Sin embargo, éste es un modo simplista de ver las cosas, ya que no tiene en cuenta el propósito de los dos vehículos, las metas que se intentan conseguir en cada categoría o las reglas de cada campeonato. Así que, la relación  $L/X$  es interesante para comparar los coches de una misma categoría y quizá para estudiar cómo un fabricante desarrolla un coche con el paso del tiempo, pero no debería ser utilizada para comparar vehículos de diferentes características.

Siguiendo con la Fórmula 1 de momento, en los años de 1994 a 1996 se hicieron muchos esfuerzos con el fin de reducir los niveles de carga aerodinámica, con cambios en el tamaño de los alerones, sus posiciones o incluso la forma de las carrocerías. Parece haber un acuerdo general en el hecho de que se redujo de manera considerable como resultado de estas medidas. Un diseñador dijo que su equipo in-

tentaba utilizar siempre la mayor carga aerodinámica posible en todos los circuitos. Con el fin de reducir las prestaciones de la aerodinámica, se tuvo que buscar relaciones L/X menos eficaces, por lo que ahora los coches generan más resistencia al avance que hace un par de años. Sin embargo, los récords de vueltas siguen siendo batidos casi todos los años, como resultado del progreso técnico en todas las áreas. Uno de los factores más críticos es la potencia de los motores, y la dura lucha entre los constructores más importantes ha hecho que se alcancen velocidades máximas de récord, a pesar de la resistencia generada por los apéndices aerodinámicos. En Hockenheim en 1996, los McLaren-Mercedes alcanzaron 339 km/h en las rectas más largas, y en una de ellas, y gracias a la ayuda del rebufo de otro coche, llegaron a alcanzar 344 km/h.

## Resistencia y potencia

Existe una relación matemática directa entre la velocidad punta y la potencia disponible de un motor, que está basada en la fórmula para calcular la fuerza de resistencia al avance. En términos simplificados es:

$$\text{CV absorbidos por la resistencia} = \frac{C_x \times A \times v^3}{146.600}$$

A se designa en pies al cuadrado y v está en millas por hora.

Para los lectores que prefieren el sistema métrico, la fórmula quedaría de la siguiente forma:

$$\text{CV absorbidos} = \frac{C_x \times A \times v^3}{1.225}$$

Donde A está expresado ahora en m<sup>2</sup> y v en metros por segundo. Para convertir en kilovatios, multiplicar por 0,746.

Observe que, en la ecuación, la velocidad se encuentra elevada al cubo (multiplicada por sí misma tres veces), por lo tanto, es evidente que los «CV de resistencia» son un parámetro muy sensible a la velocidad. Observe también la frase «potencia disponible», que se refiere al hecho de que la cifra que usa esta ecuación es la potencia disponible en las ruedas. O sea, la potencia que está disponible para acelerar el coche y para superar la resistencia al avance. Allan Staniforth, en el libro *The Race and Rally Car Source Book*, proporciona una tabla muy útil con la que se puede estimar la potencia disponible conociendo los CV en el volante motor. Los «factores de corrección» mencionados tienen en cuenta una serie de variables tales como las cargas del alternador, ventiladores, resistencia de los neumáticos, etc. Las correcciones están aquí expresadas para una serie de categorías de competición:

<i>Tipo de coche</i>	<i>Multiplicar los CV del volante motor por</i>
Monoplaza con motor trasero con neumáticos estrechos o fríos (Fórmula Ford, pequeño coche de montaña).	0,91
Monoplaza para circuito con neumáticos anchos y calientes (Fórmula 1, Fórmula 3000, Fórmula 3).	0,875
Turismo/coche de sport con motor en el mismo eje que las ruedas motrices (Le Mans, Imp, Mini).	0,85
Coche de competición con motor delantero y tracción trasera (turismos de serie).	0,82

Si calculamos las velocidades puntas de nuestros dos coches del ejemplo, el Fórmula 1 «genérico» y el McLaren GT, obtenemos los siguientes resultados (véase también la figura 2.7):

<i>Coche</i>	$C_x$	<i>A</i>	<i>CV</i>	<i>Pot. disp.</i>	<i>Velocidad punta</i>
Fórmula 1	0,75	16	700	612,5	314,5 km/h
McLaren GT	0,50	19,5	600	510	317,0 km/h

La *A* se encuentra en pies al cuadrado, y los valores de *CV* utilizados son los facilitados a la prensa en 1996, por lo que sirven para ilustrar, aunque no sean exactos. Las cifras de potencia disponible han sido corregidas de acuerdo en la tabla anterior.

Obviamente, cuando el McLaren de Fórmula 1 alcanzó los 339,2 km/h se tuvo que utilizar un  $C_x$  mucho menor, ya que para alcanzar esa velocidad es necesario 0,60 o menos.

La vasta mayoría de los equipos de competición no tienen el lujo de poder acceder a un túnel de viento, lo que significa, hablando en términos generales, que los valores de  $C_x$  son, más o menos, estimados «a ojo». Sin embargo, si se cuenta con una pista de pruebas en la que se puede alcanzar la velocidad máxima del vehículo, y conociendo todas las relaciones de la caja de cambios para obtener esa velocidad, entonces es posible estimar el  $C_x$  una vez que se haya medido el área frontal. Pero, aunque es un ejercicio académicamente interesante, hay que preguntarse, ¿importa realmente? La velocidad punta tiene poca importancia en la mayoría de las categorías del motor (con la excepción obvia de las carreras en circuitos ovals). Y sin embargo, como veremos en un próximo capítulo, es beneficioso ser capaz de estimar el  $C_x$  cuando se trata de calcular qué cantidad de resistencia adicional, inducida por la creación de carga aerodinámica, puede ser tolerada en algunos circuitos, o cuánta hay que quitar en otros.

## Carga aerodinámica y agarre

¿Por qué es útil la carga aerodinámica? ¿Por qué hace que el coche vaya más rápido en una curva cuando tiene el hándicap de la resistencia adicional? Todo se reduce al rozamiento, y al agarre. Imagine un objeto que es arrastrado por una cuerda a lo largo de una superficie plana a una velocidad constante. El rozamiento generado entre el objeto y la superficie se expresa por esta ecuación:

$$\text{Fuerza de fricción } F = \mu R$$

donde  $\mu$ , la letra griega «my», representa el coeficiente de rozamiento o de fricción, y R es la «fuerza normal» (normal como sinónimo de «perpendicular», o vertical) entre el objeto y la superficie, que es el peso del objeto (la gravedad de la tierra tirando de su masa hacia la superficie). El coeficiente de fricción está dictado por la naturaleza del objeto y la superficie sobre la que se encuentra. Así, por ejemplo, una pastilla de hockey sobre hielo encima del hielo tiene un coeficiente de fricción muy bajo, ya que el hielo no ofrece prácticamente resistencia. En contraste, los neumáticos de un Dragster sobre el pegajoso asfalto generan un coeficiente extremadamente alto, y por tanto existe un nivel correspondiente de agarre entre la superficie y el neumático.

Observe que el área de contacto entre el cuerpo y la superficie no entra en la ecuación. Entonces, ¿por qué los neumáticos anchos generan más agarre que los estrechos? Éste es un tópico fuera de nuestro alcance, por lo que se lo tendrá que preguntar a un técnico en neumáticos la próxima vez que lo vea.

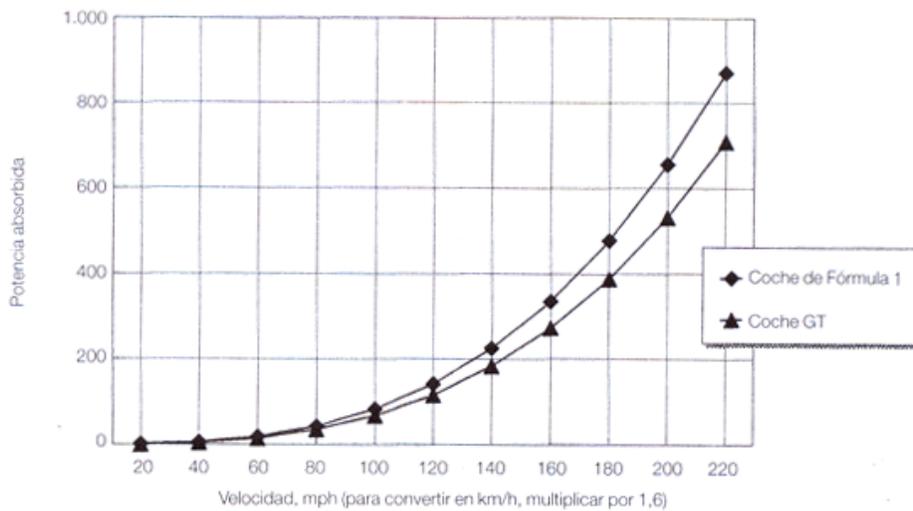
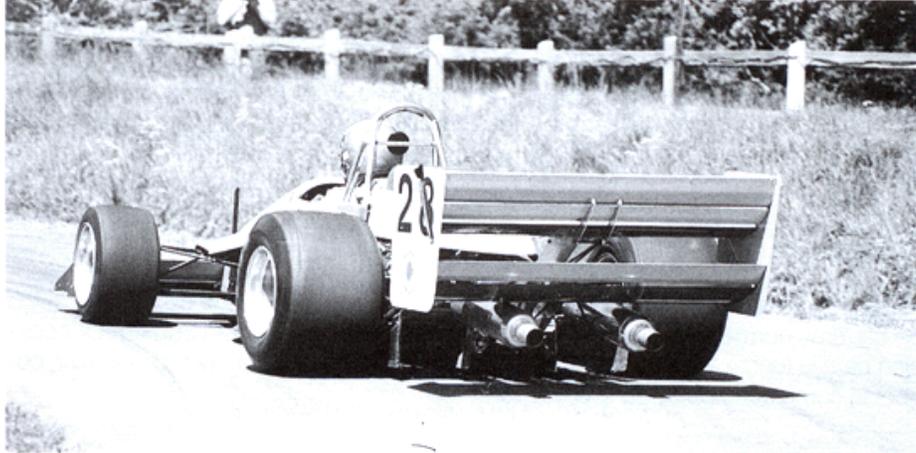


Figura 2.7. Potencia absorbida por la resistencia aerodinámica.



Sólo es una cuestión de fricción y agarre (Pilbeam MP72).

La «fuerza normal» es, como hemos mencionado arriba, normalmente el propio peso del objeto. Así que, un objeto que pese 2,25 kg ejerce el doble de fuerza normal que un objeto que pese 1,13 kg, y, como tal, genera el doble de rozamiento al ser movido. Además, requerirá el doble de fuerza para ser movido a una velocidad constante que el objeto más ligero. Ahora démosle la vuelta a este concepto para que el objeto sea un coche moviéndose por una carretera de asfalto. Para que el coche acelere, o frene, o gire, los neumáticos deben ser capaces de utilizar el rozamiento entre su zona de contacto y la carretera. El límite máximo de este rozamiento es una función de la fuerza normal, y del coeficiente de fricción entre los neumáticos y la carretera, como se define en la fórmula  $F = \mu R$ . En este caso,  $R$  es el propio peso del vehículo, y por eso las fuerzas horizontales máximas que se pueden generar están limitadas por el peso del coche, y por el agarre de los neumáticos.

Esto sería cierto en la luna o en cualquier otro lugar donde no tuviéramos la influencia del aire. Pero aquí en la Tierra, donde el aire es denso y viscoso, la aerodinámica entra en juego e interactúa con esta visión simplista de la dinámica de un coche. Como ya hemos visto, un coche puede crear fuerzas verticales sustanciales cuando viaja a través del aire, y éstas se suman, o restan, al propio peso del vehículo para modificar la fuerza normal,  $R$ , y por eso altera la fuerza de rozamiento máxima que los neumáticos del coche pueden generar. Si un coche crea sustentación positiva, entonces las fuerzas de rozamiento máximas que se pueden generar se ven reducidas, mientras que si el coche crea carga aerodinámica o sustentación negativa, las fuerzas de rozamientos máximas se ven aumentadas. Así, con todos los demás factores sin alterar, un vehículo con carga aerodinámica puede acelerar, frenar o girar con una fuerza mayor que un coche sin carga, o con sustentación positiva. Teniendo en cuenta que estas fuerzas puedan ser aprovechadas, el coche con carga aerodinámica debería ser capaz de completar una serie de curvas y rectas con mayor rapidez que el coche sin ella, ya que es capaz de acelerar, frenar y girar con mayor eficacia. Y de esto se trata todo.

Naturalmente, nada es así de fácil, y, como veremos más adelante, la carga aerodinámica no es una excepción. El hándicap que la resistencia al avance genera significa que toda la ciencia (y el arte) trata de equilibrar lo que se gana con la carga aerodinámica con lo que se pierde por la resistencia. Vamos a trabajar con un ejemplo sencillo de un coche de carreras ficticio viajando a lo largo de una curva de radio constante para ver los beneficios de la carga aerodinámica. Imaginemos que el coche pasa por la curva a una velocidad constante, sin fuerzas de aceleración ni deceleración (no es un ejemplo muy real, pero las matemáticas son más sencillas). La línea que traza el coche marca un ángulo recto (90°), con un radio de 50 m. Hemos visto que la fuerza limitadora que puede generarse se representa por  $F = \mu R$ , y asumiremos que el valor de  $\mu$  (coeficiente de fricción) corresponde al de un neumático de carreras normal con un valor de 1,4. La masa del coche es de 500 kg. La ecuación para la fuerza que mantiene a un cuerpo moviéndose en un trazado circular, conocida como centrípeta, viene dada por:

$$F = (mv^2)/r$$

donde  $m$  es la masa del cuerpo, y  $r$  es el radio del círculo. Así podemos decir que:

$$\mu R = (mv^2)/r$$

ya que el rozamiento equilibra la fuerza necesaria para mantener el trazado circular, y no se están generando fuerzas de tracción (aceleración o frenado). Esto significa que nuestro piloto es muy hábil, y puede equilibrar el coche de manera precisa en el límite de su agarre con la superficie. Ojalá eso fuera posible...

Ahora vamos a tocar un punto algebraico algo confuso, y recomponer esta ecuación para hacer que  $v$ , la velocidad, se convierta en el sujeto:

$$v = \sqrt{[\mu Rr/m]}$$

Desde aquí podemos insertar los valores para el coeficiente de rozamiento, el peso, o el peso efectivo del coche, el radio de la curva y la masa del coche, y calcular la velocidad de paso por curva máxima en estas condiciones.

Si comenzamos sin generación de carga aerodinámica (valor 0), entonces  $R$  es igual que el peso del coche, y los cálculos son:

$$v_{\max} = \sqrt{[1,4 \times 1.100 \times 32,2 \times 164/1.100]}$$

que da como resultado:

$$v_{\max} = 86,0 \text{ pies/seg (26,2 m/seg), o } 58,6 \text{ mph (94,3 km/h)}$$

Observe que el peso del coche en esta ecuación está expresado como su masa, que es lo que representa 1.100 libras, multiplicada por la fuerza sometida a la gravedad, de 32,2 libras de fuerza por libras de masa.

Utilizando la ecuación para la sustentación aerodinámica, y sustituyendo los valores determinados anteriormente por el  $C_L$  de 2,32, y por el área referente, A, de 1,5 m<sup>2</sup>, podemos calcular cuánta carga aerodinámica produciría un coche a esta velocidad:

$$\text{Carga} = 0,5 \times 0,00238 \times 2,32 \times 16 \times (86,0)^2 = 326,7 \text{ lb} \\ (148,5 \text{ kg o } 1.457 \text{ newtons})$$

Esta cifra se suma al peso del vehículo para producir un valor efectivo de peso, el coche está siendo empujado contra el suelo no sólo por su propio peso, y el valor de R es el peso del coche más el valor de la carga aerodinámica, por tanto, la velocidad máxima de paso por curva se convierte en:

$$V_{\text{max}} = \sqrt{[1,4 \times (1.100 + 326,7) \times 3,22 \times 164 / 1.100]} = 97,9 \text{ pies/seg} \\ (29,9 \text{ m/seg), o } 66,8 \text{ mph (107,6 km/h)}$$

Hay un claro incremento en la velocidad de paso por curva, comparado con el valor sin carga aerodinámica, y para hacer que este incremento sea aún más exacto, podemos calcular el tiempo ahorrado gracias a la mayor velocidad. Habiendo dicho que la curva era de 90°, con 50 m de radio (164 pies), la distancia a través de ella es de un cuarto de circunferencia de un círculo de 50 m, cuya distancia vendría dada por  $2\pi r/4$ , o 78,5 m (257,6 pies).

$$\text{Tiempo utilizado} = \text{distancia/velocidad}$$

Así que en el caso sin carga aerodinámica, se tarda 2,995 seg, mientras que con ella se tarda 2,631, un ahorro de 0,364 seg en un tramo de pista tan corto. Añada a esto el hecho de que el coche entra en la siguiente sección de la pista 13,2 km/h más rápido que el coche sin carga, y se obtienen incluso más ventajas. Además, hay que tener en cuenta la carga aerodinámica extra que genera el coche al poder girar más rápido. Se trata de un proceso autoalimentado.

En realidad, la situación no es tan sencilla, ya que los neumáticos no se comportan de un modo completamente lineal. Debido a que la fuerza normal sobre ellos aumenta, su coeficiente de rozamiento disminuye, lo que significa dos cosas; primero, los cálculos se hacen más complicados, y segundo, las ventajas no son tan grandes como en nuestro ejemplo. Pero, a pesar de todo, se obtienen muchos beneficios, y la carga aerodinámica juega un papel crucial en el rendimiento de un coche de carreras.

## Turismos y sustentación aerodinámica

El caso de los turismos es, en términos generales, bastante diferente, ya que las formas modernas tienden a generar sustentación positiva. Para los que compiten con coches de carreras basados en los turismos, la reducción, siempre que lo permitan los reglamentos, de disminuir esta tendencia a producir sustentación aerodinámica positiva es una cuestión de considerable interés.

A lo largo de los años, esta tendencia de producir sustentación positiva ha ido empeorando, especialmente durante el período en el que los fabricantes se preocupaban de conseguir el  $C_x$  más bajo posible. La razón por la que tantos turismos producen sustentación positiva se encuentra, por supuesto, en la forma de sus carrocerías. Los diseños han intentado, cada vez más, conseguir formas lo más suaves posibles, con líneas más redondeadas con el fin de mejorar los coeficientes de penetración. De hecho, algunos coches vistos de lado recuerdan a un ala orientada para lograr sustentación positiva (fig. 2.8). Esto, por supuesto, significa que se crean bajas presiones encima del vehículo, lo que causa la fuerza de sustentación positiva.

Para poner este efecto en perspectiva, merece la pena detenerse para mirar algunos detalles. Los valores de carga aerodinámica en los coches actuales son siempre difíciles de obtener, pero una fuente sugirió al autor en 1996 que, en el mejor de los casos, un coche del campeonato británico de turismos (BTCC) o un «Super Turismo» llegaba a generar alrededor de 55-59 kg de carga aerodinámica a 160 km/h. Esto no parece una cantidad muy grande, pero los reglamentos tampoco permiten muchas libertades. Sin embargo, cuando esta cifra se compara con los turismos de serie, que no incorporan las cajas de aire, los divisores de flujo, ni los alerones traseros de sus hermanos de competición, y que se supone que producen una sustentación positiva de alrededor de 71-82 kg a 160 km/h, entonces los 55 kg de carga aerodinámica parecen bastante razonables. De hecho, esto significa que el peso efectivo de los coches es de 136 kg más en los de carreras que en uno de serie a la misma velocidad (160 km/h) como resultado de la carga aerodinámica. Esto representa aproximadamente un 13 % adicional de fuerza «normal» actuando sobre las ruedas, lo que se traduce en un 13 % más de fuerza de giro. En una categoría donde las centésimas de segundo son importantes, esto resulta muy significativo.

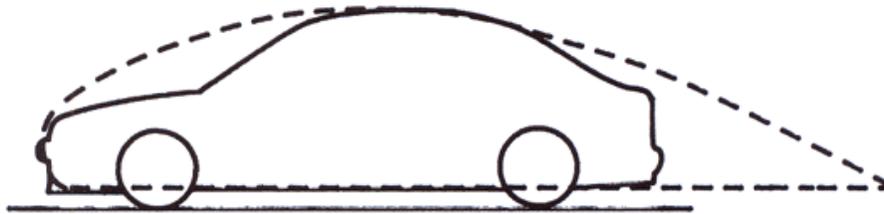


Figura 2.8. Perfil de un turismo moderno y la forma de un ala con sustentación positiva.

## Complicaciones viscosas

Existen algunas otras definiciones que no podemos ignorar, y que podrían parecer que complican más una materia ya de por sí bastante compleja. Pero la consideración de estos factores adicionales es bastante crucial si queremos entender sus influencias. Primero vamos a considerar los dos tipos de flujo que pueden existir, y a

definirlos. El flujo puede ser «laminar» o «turbulento» (fig. 2.9). Si todas las partículas dentro de un flujo o vena de aire se mueven en la misma dirección que la velocidad del aire, y que las líneas de flujo, entonces el flujo se considera laminar. Si, por otra parte, las partículas de aire viajan de forma errática, en caminos no paralelos a la velocidad media del aire, entonces el flujo es turbulento. Estos dos tipos de flujo pueden ser visualizados justo después de encender un fuego, cuando el humo sube desde el todavía ineficiente combustible. Inicialmente, el humo puede verse subir más o menos en líneas de flujo rectas, y por tanto se trata de un flujo laminar. Sin embargo, según comienza a subir, el humo empieza a mezclarse y retorcerse, y la línea de flujo deja de ser paralela. El flujo se ha vuelto turbulento.

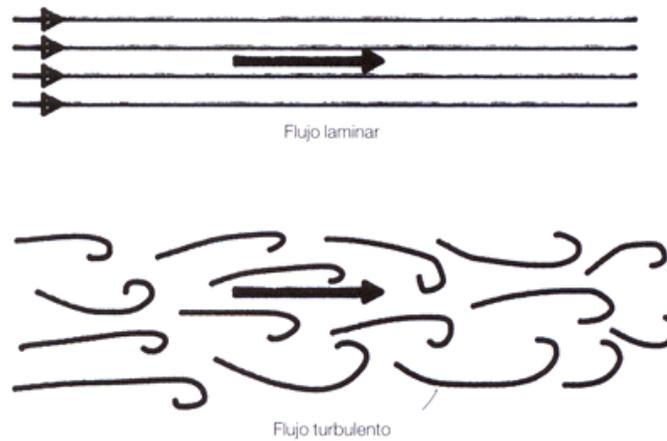


Figura 2.9. Flujos laminar y turbulento.

Volviendo al principio, mientras el aire fluye alrededor de un cuerpo como un coche, puede seguir la forma de su carrocería, en cuyo caso se llama «flujo adherido»; mientras que si se despega de la forma que sigue la carrocería será «flujo separado» (fig. 2.10).

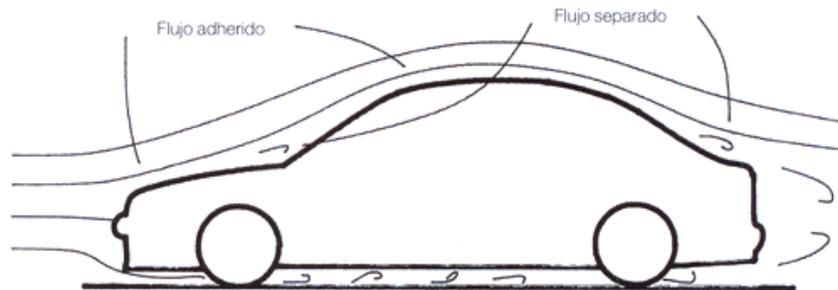


Figura 2.10. Flujos adherido y separado.

El poder mantener un flujo adherido tiene una gran influencia en la resistencia y la carga aerodinámica, como veremos en los capítulos sucesivos.

Hasta ahora, hemos asumido algunos hechos simples e implícitos sobre el modo en el que el flujo se mueve a lo largo de un cuerpo. Si el aire fuera un gas «ideal», sin viscosidad, entonces nuestros razonamientos hubieran sido válidos, pero en realidad, el aire es un fluido viscoso, y, como tal, cuando un cuerpo se mueve a través de él, el aire en sus proximidades genera un rozamiento interno. Las partículas de aire que están en contacto con la superficie están siendo frenadas por el rozamiento, y la capa de aire adyacente a la superficie del cuerpo se «pega» a esa superficie. Las capas de aire más alejadas de la superficie también son frenadas por este rozamiento viscoso, pero según aumenta la distancia con respecto a la superficie, este efecto se vuelve menos intenso, hasta que, a una cierta distancia, el aire no se ve afectado y se conoce como velocidad del aire del «flujo principal». Así, existe una capa de aire alrededor del cuerpo en la que existe un gradiente de velocidad, de cero en la superficie, hasta el flujo principal del borde exterior. Esta capa es conocida como la «capa límite».

Si las diferencias de velocidad entre las subcapas de la capa límite son pequeñas, deslizarán las unas sobre las otras con poca interacción entre ellas, creando así una capa límite «laminar». Si, en caso contrario, algo molesta a la capa límite, como puede ser una curvatura en la superficie del cuerpo, entonces la capa límite se convierte en turbulenta (fig. 2.11). La capa límite incrementará, además, su grosor a lo largo de la superficie de un cuerpo, por lo que puede ser delgada y laminar en la parte delantera de, por ejemplo, un turismo, pero aumentará su grosor y se volverá turbulenta en la parte trasera del vehículo (fig. 2.12) como resultado de las distorsiones causadas por el coche al pasar a través del aire.

Una capa límite laminar crea menos superficie de rozamiento que una turbulenta, y por eso la resistencia es menor, mientras la capa se mantenga laminar. Pero

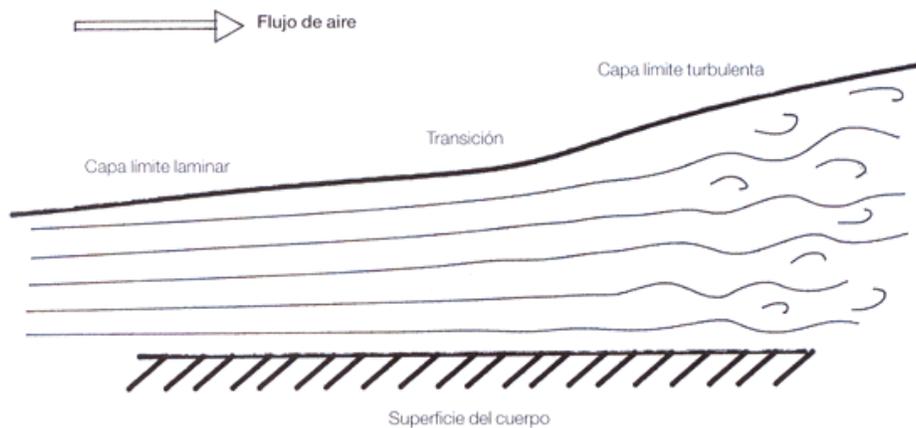
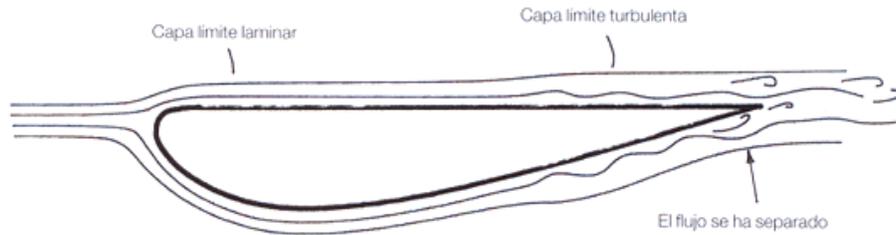


Figura 2.11. Capas límite.



**Figura 2.12.** Transición de una capa límite laminar a turbulenta a lo largo de un ala (aumentada).

una capa límite turbulenta también puede retrasar la embestida de la separación del flujo en algunas circunstancias, o incluso causar la unión de un flujo separado. Esto puede tener beneficios importantes debido a la creación de carga aerodinámica y la reducción de la resistencia, y por eso no sería correcto decir que la condición laminar es siempre la meta a alcanzar. Mientras que una capa límite laminar es beneficiosa en algunas circunstancias, los «generadores de vórtices» en la superficie de un ala, por ejemplo, pueden ser utilizados para darle más energía a una capa límite para evitar la separación.

## Los Números de Reynolds

Una de las ideas más raras de entender dentro de la aerodinámica es el concepto del Número de Reynolds. Definido por otra fórmula matemática:

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu}$$

donde  $\rho$  es la densidad del aire,  $\mu$  ahora representa la viscosidad,  $v$  es la velocidad y  $L$  es «alguna longitud», tal como la longitud de un coche o la dimensión de la cuerda de un ala. El Número de Reynolds es un método de comparar los datos, obtenidos a diferentes velocidades y diferentes escalas. Si deseamos utilizar unidades métricas, esta ecuación se reduce a:

$$Re = 67,778 \times vL, \text{ con } v \text{ en m/seg y } L \text{ en metros}$$

Para usuarios de unidades imperiales:

$$Re = 6,300 \times vL, \text{ con } v \text{ en pies/seg y } L \text{ en pies}$$

Es interesante observar que el Número de Reynolds es otra cantidad sin dimensión; o sea, cuando las unidades de densidad, velocidad, longitud y viscosidad se despejan de la ecuación, se anulan y dan como resultado un número.

Tomemos, como ejemplo, un coche de pasajeros de tamaño medio de 4,5 m de longitud viajando a 25 m/seg, entonces el Número de Reynolds da como resultado 7,6 millones, o  $7,6 \times 10^6$  en modo científico. ¿Y qué? Bien, considere el caso como el de un modelo a escala 1/4. A la misma velocidad, el Número de Reynolds será un cuarto del valor de la escala real, o 1,9 millones ( $1,9 \times 10^6$ ). Ahora, si el túnel de viento utilizado para estas pruebas sólo fuera capaz de producir velocidades de, por ejemplo, 10 m/seg, entonces el Número Reynolds caería hasta 760.000 o  $7,6 \times 10^5$ . Puede ser posible que los resultados obtenidos a esta escala y esta velocidad no puedan ser aplicables al modelo real, a la velocidad real, porque los efectos de la viscosidad y la densidad hacen que los patrones de flujo sean diferentes. Recuerde que la capa límite comienza siendo bastante estrecha y laminar en la parte delantera de un cuerpo móvil, pero según pasa por el cuerpo, se vuelve más gruesa y bastante más turbulenta. Por eso, no resulta muy difícil ver que, en un modelo a escala, la transición de la capa límite de fina y laminar a gruesa y turbulenta seguramente ocurrirá más atrás, hablando relativamente, que en el cuerpo de tamaño real.

Por esto, el Número de Reynolds resulta un modo conveniente de indicar la escala y la velocidad a la que se obtuvieron los datos, siempre y cuando se interpreten en su contexto, y se comparen con otros datos obtenidos con escalas y velocidades similares. Pero el Número de Reynolds también puede usarse como indicador de si un flujo será laminar o turbulento, ya que, en general, el flujo se vuelve más turbulento con el aumento de velocidad, además de con el aumento de la longitud (L) del cuerpo. De este modo, un Número de Reynolds alto puede indicar que el flujo es turbulento.

## El flujo es tridimensional

Es práctica común desplegar el flujo alrededor de una figura de modo bidimensional, principalmente porque resulta más sencillo dibujar las cosas en dos dimensiones, además de que es mucho más fácil *pensar* en sólo dos dimensiones. Pero un coche es un cuerpo tridimensional, y el aire usará las tres dimensiones en su búsqueda de las líneas que ofrezcan menor resistencia. Los diseñadores de los equipos de carreras utilizan un software muy sofisticado capaz de «dibujar» representaciones de objetos tridimensionales (componentes como alerones, o los coches completos), pero también de generar el flujo de aire alrededor de estos cuerpos en las mismas tres dimensiones. El resto de nosotros probablemente no contemos con dichas sofisticaciones, y por eso tendremos que utilizar nuestras facultades mentales para intentar imaginar el flujo en tres dimensiones. En un capítulo de más adelante, veremos los diferentes modos de visualizar el flujo sin la ayuda de un ordenador o un túnel de viento. Mientras tanto, intente pensar no sólo en términos de elevación lateral o vista de plano, sino en tres dimensiones y desde todos los ángulos.

## Gradientes de presión

Los fluidos siempre fluyen de manera más fácil desde áreas de alta presión a áreas de baja presión. Éste es un resultado de las leyes de la naturaleza, y en el contexto de flujo de aire alrededor de un coche, no es algo que normalmente cause problemas. Pero el aire que se acelera dentro de una zona de baja presión (por ejemplo, en el fondo plano de un monoplaza con efecto suelo), normalmente tiene que volver a frenar según aumenta la presión y regresa al exterior. Una zona de presión creciente es conocida como «gradiente de presión adversa». Esto en sí no es problemático, a menos que el flujo de aire deba hacer un cambio rápido de dirección en dicha zona con el fin de volver a la presión ambiental. En tal caso, es muy probable que el flujo se separe de la superficie en cuestión, tal como en el brusco cambio de ángulo en la zona trasera de la línea del techo de un coche de competición basado en un turismo. Esto causaría un incremento en la resistencia, a menudo, un descenso de la carga aerodinámica si el flujo se separa de la superficie creadora de esa carga. La separación del flujo en las zonas críticas de los apéndices aerodinámicos también puede tener lugar si el perfil crea un cambio de dirección demasiado rápido. Por esto, controlar el flujo de aire en zonas de gradiente de presión adversa es importante para conseguir una carga aerodinámica efectiva.

Pero ya es suficiente de teoría abstracta, por lo menos por ahora. Los siguientes capítulos examinarán una amplia variedad de apéndices inductores de carga y explicarán las aplicaciones prácticas de la teoría que explica su función.

### 3. Los spoilers: spoilers delanteros, traseros y variaciones

#### Años de inestabilidad

Como descubrimos en el capítulo 1, el intento fallido de Michael May de introducir auténtica carga aerodinámica en los coches de carreras en 1956 fue ignorado o, posiblemente, no comprendido. Fuera cual fuera el motivo, sus esfuerzos debieron haber sido olvidados por completo, porque pasó mucho tiempo antes de que las carreras volvieran a «descubrir» la carga aerodinámica, e incluso entonces parece haber sido por accidente. Fue durante los años 60 cuando los turismos y los coches de GT (coches de carreras con las ruedas cubiertas) comenzaron a preocuparse de verdad sobre la sustentación positiva a altas velocidades. Para esa época las velocidades máximas habían aumentado hasta el punto de que las fuerzas aerodinámicas eran bastante grandes, y los diseños destinados a generar poca resistencia aerodinámica comenzaban a dar formas que causaban sustentación positiva. El efecto de esta sustentación era, literalmente, muy perturbador, especialmente para los pilotos, ya que los coches se volvían muy inestables con el aumento de la velocidad. Este problema creó mucha más preocupación, como era lógico, en las categorías más veloces como Le Mans, y los circuitos de alta velocidad de Estados Unidos. Sin embargo, ya que su forma era intrínsecamente menos inductora de sustentación, los monoplasas no experimentaron la inestabilidad sufrida por sus homónimos carrozados.

Así que fue en las categorías con carrocería completa donde se materializaron los primeros apéndices destinados a reducir la sustentación. Spoilers o faldones sencillos y «cajas de aire» en la parte delantera, y rebordes aerodinámicos o «holders» en la parte de atrás fueron los primeros apéndices antisustentación. Los «divisores de flujo» delanteros hicieron aumentar el tamaño de las cajas de aire poco después, y con el paso de los años, a partir de los 60, mientras se han desarrollado y refinado estos mecanismos, se añadieron otras variaciones con el mismo propósito. Este capítulo intentará explicar el funcionamiento de estos apéndices, y qué se

puede esperar de ellos en términos de reducción de la sustentación y creación de carga aerodinámica.

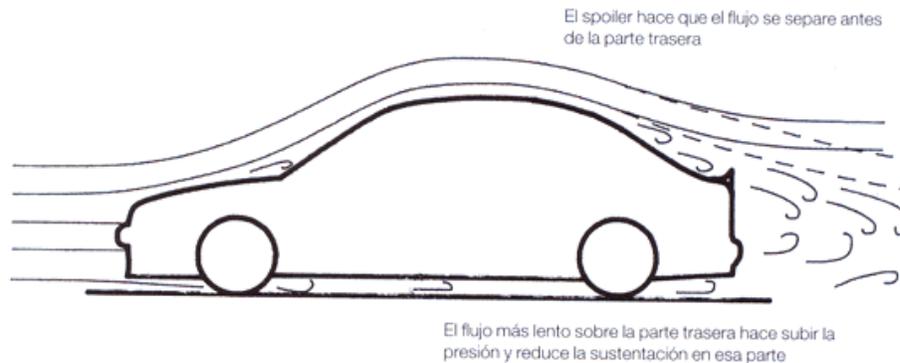
Tanto si fueron los rebordes aerodinámicos o nolders traseros o las cajas de aire delanteras las que aparecieron primero en el mundo de las carreras, es una cuestión para que discutan los historiadores. En el sentido práctico, la parte de los coches que los diseñadores de los años 60 comenzaron a estudiar primero sería, por lógica, la primera que comenzaba a perder agarre cuando se alcanzaban velocidades altas. Pero en lo relativo a nosotros, tenemos que comenzar por alguna parte, así que la moneda ha decidido que lo hagamos por los alerones traseros.

### Spoilers traseros

Pueden encontrarse spoilers traseros de todas las formas y tamaños, desde una simple placa inclinada como los utilizados en la NASCAR en los *stock cars*, hasta las formas tridimensionales integradas y que siguen cuidadosamente las líneas traseras del coche. Sea cual sea su forma, para nuestros propósitos consideraremos que un spoiler trasero es un apéndice que se alarga desde la superficie del coche, sin espacios entre el propio spoiler y la carrocería del coche. Los spoilers con espacios entre ellos y la carrocería serán considerados como alerones, por muy cruel que parezca, y serán estudiados en otro capítulo.



Spoiler trasero de un coche de la NASCAR.



**Figura 3.1.** El efecto de un spoiler trasero.

El propósito de un «spoiler» es, como sugiere su nombre (en inglés el verbo *spoil* significa, entre otras cosas, arruinar, estropear), estropear o perturbar el rápido flujo de aire que, desafortunadamente, es la causa de la sustentación positiva, y mientras se encarga de eso, de intentar deshacerse de esa sustentación.

Al extenderse verticalmente por encima de la parte trasera de un coche, como se ve en la figura 3.1, el spoiler hace que el flujo se separe, y cree una burbuja de separación bastante parecida a la que se ve en la base de la luna delantera. Si el flujo ya se ha separado de la parte trasera del coche, entonces el spoiler trasero inducirá al flujo a separarse incluso antes. El efecto de esto es el de reducir de manera drástica la velocidad del flujo de aire sobre la superficie trasera, que causa así un aumento de la presión sobre esa área. Por tanto, esto reduce la sustentación natural creada por el perfil del coche sin spoilers.

Curiosamente, añadir un spoiler a un coche no significa que se aumente la resistencia del aire. Existen circunstancias en las que fijar un spoiler trasero reduce la resistencia, pero generalizando, lo más inteligente sería usarlos sólo para reducir la sustentación y no intentar ser demasiado codicioso. Los pioneros de los años 60 descubrieron que la altura del spoiler podía ser aumentada sin por eso perjudicar la velocidad punta, y, en efecto, en algunas circunstancias la velocidad punta aumentó, demostrando que la reducción de la resistencia era una posibilidad. Pero a una determinada altura del spoiler, las velocidades comenzaron a bajar, y también lo hicieron los tiempos por vuelta. Esto, por supuesto, demuestra que a pesar de que la resistencia había aumentado, se había conseguido un beneficio derivado de la mayor estabilidad y mejor agarre.

Parece que puede existir una altura opcional para el spoiler trasero, sin embargo es importante tener en cuenta que lo que funciona bien en un coche puede no ser igual de beneficioso para otro. En un estudio se determinó que el mayor beneficio, representado por el cambio del coeficiente de sustentación trasero ( $\Delta C_{L_r}$ ) conseguido con un spoiler que era un 8 % de la batalla del coche (lo que supone unos 20-23 cm en un coche de tamaño medio con 2.700 mm de batalla), y dio un valor  $\Delta C_{L_r}$  de  $-0,45$ , lo que significa una reducción sustancial en la sustentación trasera, lo que

convirtió el coeficiente de sustentación de 0,10 (o sea, sustentación positiva) sin el spoiler a  $-0,35$  (auténtica carga aerodinámica) con un spoiler de esa altura. Si 20-23 cm parecen un spoiler bastante grande, échele un vistazo a la parte trasera de un coche de la NASCAR.

En otro estudio, se hallaron valores de  $\Delta C_{Lr}$  de  $-0,30$  y  $-0,40$  con spoilers de 50 y 100 mm, sin aumento en la resistencia. Efectivamente, con un spoiler de sólo 25 mm,  $\Delta C_{Lr}$  estaba alrededor de  $-0,20$ , y la resistencia había sido reducida en  $-0,03$ . La diferencia entre los datos en estos dos estudios surge, con toda probabilidad, porque *eran* dos casos diferentes, sobre dos perfiles de coche diferentes, y sirve para ilustrar cómo la efectividad de los spoilers depende del coche en el que vayan fijados, y qué ha ocurrido con el flujo de aire en su camino hacia la parte trasera del coche. Es muy difícil generalizar, y para enfatizar esto podemos visualizar un caso extremo con un coche familiar de los años 90 con un spoiler montado sobre la puerta del maletero, donde no puede hacer nada para producir carga aerodinámica o reducir la sustentación (fig. 3.2).

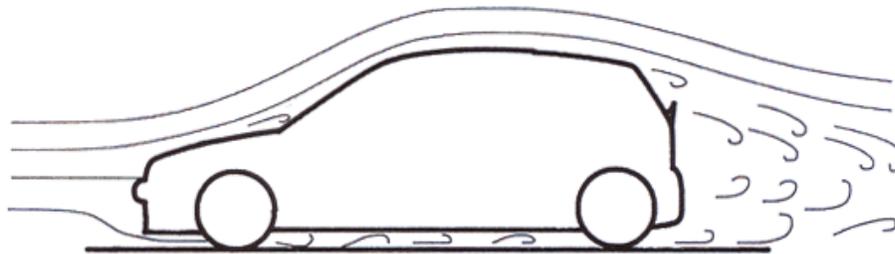


Figura 3.2. Un spoiler trasero no sirve para nada aquí.

Se ha demostrado que el ángulo de un spoiler plano, en un turismo, también influye de manera beneficiosa la aerodinámica en la parte trasera, y, no es sorprendente que cuanto mayor era el ángulo del spoiler, mayor era el beneficio, con un  $\Delta C_{Lr}$  de alrededor de  $-0,12$  con  $30^\circ$ , subiendo hasta  $-0,19$  con  $60^\circ$ . El beneficio comenzó a desvanecerse a partir de los  $40$  a los  $50^\circ$ . La resistencia aumentó más o menos de manera lineal con el incremento del ángulo, hasta un máximo de  $\Delta C_x$  de  $+0,08$  a  $60^\circ$ . Si este incremento de la resistencia es significativo o no, dependerá del tipo de coche de competición del que se trate, lo que determinará la velocidad a la que opera, así como cuán grande era el incremento comparado con el coeficiente de penetración del coche sin spoilers. Tal cambio en la resistencia sería algo mucho menos preocupante si el coche está compitiendo en, por ejemplo, carreras de subida de montañas, donde las velocidades máximas para los turismos quedan limitadas alrededor de 160-190 km/h, que si lo hace en la NASCAR, donde rozan los 300 km/h. De la misma manera, si el coche comenzara con un coeficiente de penetración de 0,30, entonces un incremento de 0,08 se notaría mucho más que el mismo incremento en un coche con un  $C_x$  de 0,50.

Discutiremos con más detalle las opciones y los sacrificios que se deben hacer a la hora de seleccionar cuánta carga aerodinámica se necesita en contra de la cantidad de resistencia que se puede tolerar en un capítulo próximo. Pero los puntos clave para el diseño de un spoiler trasero son que, cuanto más grande es el spoiler, hasta el punto en el que las diferencias sólo pueden verse llevando a cabo algún tipo de pruebas con el coche, mayor es el beneficio a la hora de reducir la sustentación; y que el incremento de la resistencia no tiene por qué ser grande, y que hay situaciones en las que incluso se ve reducida. Y una inclinación mayor del spoiler también crea una mayor reducción de la sustentación, sin embargo, la resistencia sí aumenta en este caso.

Es interesante ver qué significan realmente estos cambios en el coeficiente de sustentación en términos de las fuerzas que afectan a los coches, siguiendo el siguiente ejemplo. Si tomamos un coche familiar de serie con un área frontal de  $2,32 \text{ m}^2$  viajando a  $160 \text{ km/h}$ , podemos incrementar los valores de  $C_L$  en la ecuación de la sustentación aerodinámica y calcular así las fuerzas que actúan realmente.

$\Delta C_L$	Fuerza de sustentación
0,10	29 kg
0,15	43,6 kg
0,20	58,2 kg
0,25	72,7 kg
0,30	87,3 kg
0,35	101,8 kg
0,40	116,3 kg

Recuerde, cuando se calculan las fuerzas a cualquier otra velocidad, que la fuerza es proporcional al cuadrado de la velocidad, así que a  $80 \text{ km/h}$ , divida estas cifras por cuatro, y a  $320 \text{ km/h}$  multiplique por cuatro. A cualquier velocidad intermedia que le interese, digamos a  $120 \text{ km/h}$ , multiplique por el resultado de las velocidades al cuadrado, o sea  $(120/100)^2$ . Para que le quede claro, mire la gráfica de la figura 3.3, que muestra las fuerzas creadas por una serie de valores  $C_L$  a diferentes velocidades para un coche con un área frontal de  $2,32 \text{ m}^2$ .

Claramente, con el más modesto de los cambios en el valor de  $C_L$ , las fuerzas pueden ser sustanciales, y sería mucho mejor tener una cifra con símbolo negativo, para que así representara la carga aerodinámica, que con uno positivo, que indicaría que la sustentación aerodinámica está intentando levantar el coche del suelo. El significado de estas fuerzas puede verse relacionándolas con el peso estático del coche, como se describe en el capítulo 2. Por ejemplo, si el peso del coche es de  $1.000 \text{ kg}$ , con una distribución de  $50/50$ , y conseguimos un  $\Delta C_L$  de  $-0,25$ , entonces a  $160 \text{ km/h}$  el peso efectivo de la parte trasera se verá aerodinámicamente incrementado en  $72,7 \text{ kg}$ , que es un  $14,5 \%$  del peso estático de la parte trasera del coche. En

términos sencillos, esto se traduce en un 14,5 % más de agarre a esa velocidad, y ¿quién no quiere ese agarre adicional? E incluso, a la mitad de esa velocidad, cuando los beneficios son de un cuarto con respecto a los 160 km/h, se consigue un aumento del agarre de un 3,6 %. Esto puede no parecer mucho, pero, uniéndolo a la posibilidad de un aumento muy pequeño de la resistencia, incluso este pequeño beneficio puede hacernos ganar centésimas o incluso décimas de segundo a lo largo de una vuelta. Si sólo significara la diferencia entre una vuelta de 1 min 30,01 seg y otra de 1 min 29,99 seg, la subida de moral del piloto y del equipo harían que valiera la pena. Pero incrementar el agarre sólo en la parte trasera puede no ayudarnos tanto como esperábamos, a menos que antes produjera una enorme cantidad de sustentación aerodinámica. Es más probable, especialmente con un coche de pasajeros, que se cree más sustentación en la parte delantera del coche, y por eso tenemos que ver los métodos de combatir, y si es posible invertir, esa sustentación con el fin de mejorar el agarre en la parte delantera.

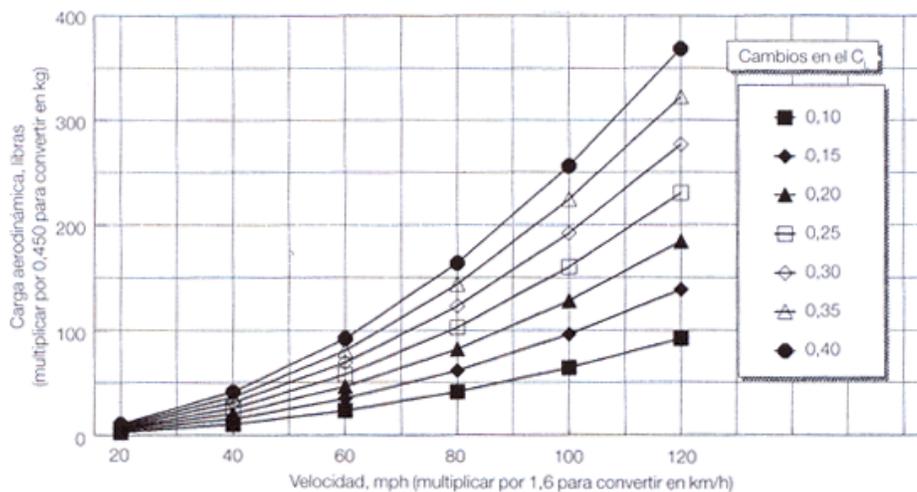


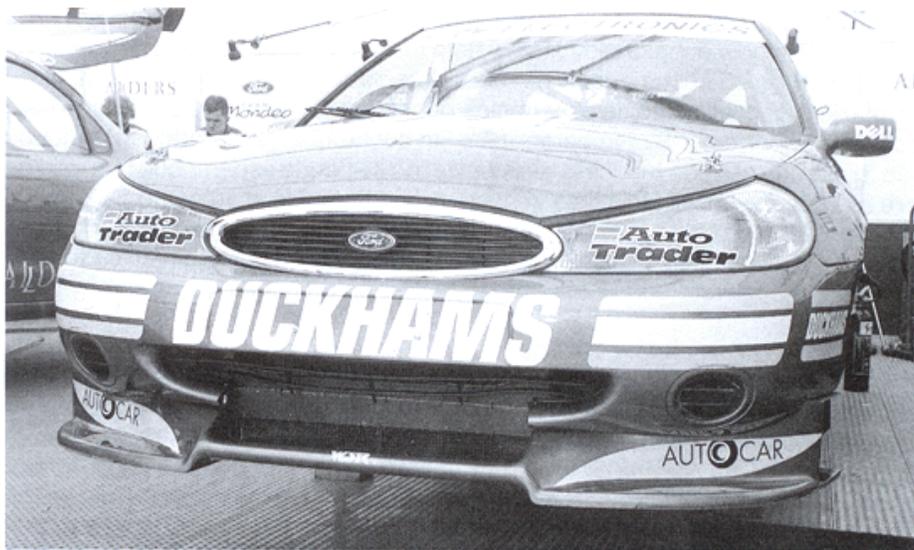
Figura 3.3. Fuerzas resultantes como consecuencia de los cambios en el  $C_L$ .

### Spoilers delanteros

Los spoilers delanteros también varían en la complejidad de sus diseños, desde los sencillos spoilers tipo «faldón» o «mandíbula», que son poco más que un trozo de panel casi vertical situado en la parte delantera del coche, hasta las estilizadas «cajas de aire» integradas en el diseño de los coches de calle de hoy en día, y con dimensiones extendidas para los coches de competición. Para los propósitos definidos aquí, vamos a asumir que el spoiler delantero es algo que se añade a la forma existente del coche, tanto si ya existe otro spoiler o caja de aire como si no.

Encontrar una explicación adecuada sobre el funcionamiento de un spoiler delantero es como encontrar el Santo Grial. Pero aún existen algunas variaciones sobre el tema que tienen funciones diferentes, y consiguen otros beneficios utilizando diferentes principios. Sin embargo, como todos estos apéndices van unidos a la misma parte de un coche, las descripciones pueden ser un poco confusas. Así que intentaré desvelar los misterios sin crear más confusión de la necesaria.

En su definición más sencilla, uná «caja de aire» se extiende hacia abajo desde el panel frontal inferior del coche con el fin de reducir el espacio entre el pro-



Los spoilers delanteros pueden ser complejos, como en este Ford Mondeo de Super Turismo, o muy sencillos, como en este Austin Healey Sprite.

pio vehículo y el suelo, y esto reduce la cantidad de aire que pasa por debajo de él cuando está en movimiento. Parte del aire que pasa por debajo del coche se desvía en dos direcciones. Pero ¿cómo puede esto ayudar? Existen dos ventajas potenciales, dependiendo del tipo y la forma del coche. Si el coche está basado en un turismo que no ha sido, o debido al reglamento no ha podido ser, alterado de manera sustancial respecto a como viene de serie, entonces el fondo de su chasis estará bastante lejos de ser plano. Así, estarán a la vista el cárter, la caja de cambios, los tubos de escape, las ruedas, las cavidades para las ruedas, el depósito de gasolina y toda clase de espacios y agujeros. Queda claro que el aire que pasa por debajo de un coche con ese fondo, no lo hará de forma suave, y es sencillo entender que la situación causa una gran cantidad de resistencia aerodinámica. Así que, si la masa de aire que fluye a través de esta zona se reduce, también la resistencia debería reducirse, y éste resulta ser el caso. A pesar de que el área frontal de un coche puede verse incrementada por la adición de esta clase de spoilers, el coeficiente de penetración puede reducirse lo suficiente como para compensar por esto. Sin embargo, para un coche que ya cuenta con un fondo liso, quizá con el fin de reducir la resistencia, no se puede esperar que una caja de aire reduzca esa resistencia más aún; en realidad, debido al aumento del tamaño del área frontal, puede que produzca el efecto contrario. A pesar de todo, los efectos positivos de la reducción de la sustentación/carga aerodinámica todavía pueden conseguirse, con el evidente beneficio para el comportamiento general del coche.

El segundo beneficio, y en el que nosotros estamos más interesados, es que la presión por debajo del coche queda reducida gracias a este tipo de spoiler. Pero ¿cómo ocurre esto? Tomemos un ejemplo extremo y consideremos lo que ocurre si bloqueamos el flujo de aire que va al fondo del coche, con una caja de aire que va hasta el suelo. Esto no sería práctico, y la mayoría de las categorías no lo permitirían, pero vamos a imaginarnos que lo hacemos. Si un coche con esta caja de aire se moviera, el aire de debajo de él estaría en el mismo estado que lo está el de la estela trasera, es decir, turbulento.

La parte trasera del coche es una zona de baja presión (sabemos esto porque no sólo podemos ver hojas, polvo y restos levantados por el coche al pasar, sino que podemos sentir que nuestro coche es absorbido por el rebufo de otro cuando nos ponemos cerca de él), y con la configuración descrita aquí, el fondo del coche se transforma, igual que la estela, en una zona de baja presión (fig. 3.4). La baja presión tiene todo el fondo del coche para actuar, y el resultado teórico es un coche con un coeficiente de sustentación negativa muy grande, o sea con uno con mucha carga aerodinámica (recuerde, fuerza = presión  $\times$  área). Por supuesto, lo poco práctico de este spoiler significa que los resultados teóricos no pueden obtenerse, pero el efecto, a pesar de ser reducido, todavía puede conseguirse incluso con una altura entre el coche y el suelo que no requiere que el spoiler tenga que ser reparado a cada vuelta. Así que la reducción de la sustentación es un hecho consumado, además de que se puede conseguir generar carga aerodinámica, dependiendo de la forma del coche, su separación con el suelo y los detalles del diseño del spoiler.

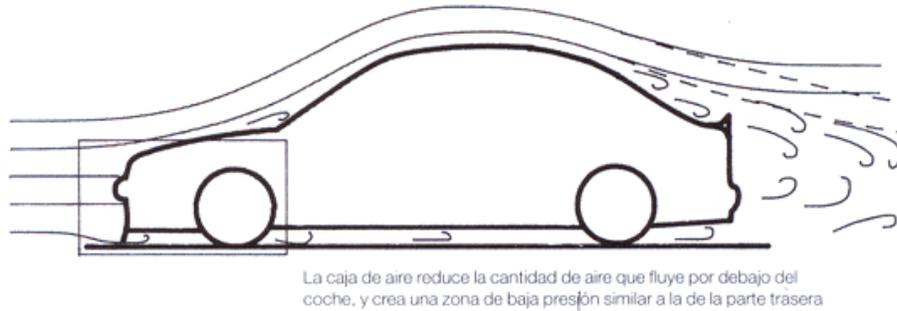


Figura 3.4. Una caja de aire delantera.

La efectividad de un spoiler delantero puede ser incrementada mediante el uso de faldas laterales, que ayudan a sellar el fondo e impiden que el aire entre por los lados. Está claro que si la presión debajo del coche ha sido reducida, el aire que pasa por los lados intentará mezclarse en esta área de baja presión, y si se le permitiera hacer eso, la presión volvería a subir, lo que reduciría cualquier beneficio que se hubiera logrado. Volvamos al ejemplo de antes donde el spoiler tocaba el suelo, y veremos que si los lados también estuvieran extendidos hasta tocar el suelo, entonces las condiciones debajo del coche serían las mismas que en la parte trasera. Levantar las faldas, si me permiten la expresión, para que ya no toquen el suelo permitiría que el aire se colara por los lados y se introdujera en la zona de baja presión, y la magnitud de la presión sería reducida, lo que reduce también la carga aerodinámica. Hablaremos de esto más adelante, pero comienza a estar claro por qué el efecto de un apéndice aerodinámico en la parte delantera del coche puede verse afectado por la forma y el diseño de los componentes o de los paneles situados más atrás.

Así que las cajas de aire generan una reducción de la sustentación, y, si tenemos suerte, incluso carga aerodinámica, bloqueando el flujo del fondo del coche. ¿Qué cantidad de este efecto podemos esperar? Un estudio llevado a cabo sobre un coche de pasajeros con una altura frontal de la carrocería con respecto al suelo de 300 mm mostró que, con sólo reducir esta distancia con una caja de aire improvisada, reducía de manera significativa el coeficiente de sustentación, y, además, por lo menos inicialmente, reducía el coeficiente de penetración del coche. Con un spoiler de 90 mm, el valor  $\Delta C_L$ , o sea el incremento en el coeficiente de sustentación de-

lantero, estaba alrededor de  $-0,21$ , y la resistencia había sido reducida con un  $\Delta C_D$  de  $-0,04$ . Esto, obviamente representa un cambio eficiente en el rendimiento aerodinámico. Sin embargo, la reducción de la sustentación era mayor cuanto mayor era el largo del spoiler, y con uno de 170 mm el  $\Delta C_L$  había bajado hasta  $-0,25$ , aunque la resistencia había subido hasta su nivel inicial. Pero por lo menos se había conseguido no generar más resistencia de la que ya se tenía. Con spoilers de tamaño superior a 170 mm, los cambios en el  $\Delta C_L$  comenzaron a estabilizarse y con 250 mm de longitud el valor era de  $-0,27$ . Sin embargo, la resistencia siguió subiendo, aunque con este último spoiler, el incremento fue de sólo 0,04, por lo que el hándicap no era muy grande (aunque su importancia debe ser valorada dependiendo de la categoría en la que se compitiera).

Un punto interesante que se ve en los datos de esta prueba es que los valores de  $\Delta C_L$  aumentaban mientras que los de  $\Delta C_D$  disminuían. En otras palabras, en esta prueba, el coeficiente de sustentación en la parte trasera empeoró mientras que el delantero mejoraba. Esto puede haber sido debido a que el flujo de aire en la parte trasera había sido modificado por la caja de aire, o tal vez era un efecto de palanca debido al voladizo de la caja de aire situada bastante por delante del eje delantero. Sea como sea, ésta es otra lección sobre cómo los cambios en un eje pueden influir en el otro.

De todas formas, prestaremos atención durante un momento sólo al eje delantero, sabiendo que es potencialmente arriesgado hacerlo, y daremos algunos valores al  $\Delta C_L$ . Una vez más podemos tabular las fuerzas reales para los niveles de incremento en el coeficiente de sustentación de la parte delantera. Usaremos nuestro típico coche familiar con unas dimensiones de  $2,32 \text{ m}^2$  de área frontal y a una velocidad de 160 km/h para este ejemplo:

$\Delta C_L$	Fuerza de sustentación
0,10	29 kg
0,15	43,6 kg
0,20	58,2 kg
0,25	72,7 kg

Estos valores son obviamente los mismos que utilizamos en la tabla anterior para el mismo incremento del coeficiente de sustentación, sólo que esta vez son aplicados a la parte delantera del coche. Además, se pueden hacer los mismos comentarios con respecto a la importancia de estos valores en relación con el peso estático del eje delantero del coche en cuestión. Así, 72,7 kg representan un 14,5 % de peso sobre el eje delantero de un coche de 1.000 kg con un reparto de masas de 50/50, y si se consigue esta reducción de la sustentación, entonces el incremento del agarre a esta velocidad se encuentra en proporción directa. Y, si recuerda, en el capítulo 2 dijimos que un coche de calle típico produce alrededor de

72,7-81,2 kg de sustentación positiva a 160 km/h. Por esto se puede esperar que una caja de aire delantera cancele toda esta sustentación, sino que además, con un apéndice efectivo, puede llegar a producir unos 35 kg de carga aerodinámica a esa misma velocidad. Sin embargo, el peligro aquí es el de generalizar demasiado, y en realidad el efecto en cualquier coche sólo puede ser determinado mediante la medición en una pista o en un túnel de viento. Pero, por lo menos, hemos visto que los cambios en el coeficiente de sustentación, tanto delante como detrás, de las dos clases de spoilers que hemos visto hasta ahora, pueden ser bastante similares, lo que significa que debería ser posible reducir la sustentación general (o ganar carga aerodinámica) y mantener el equilibrio aerodinámico, que tan importante resulta.

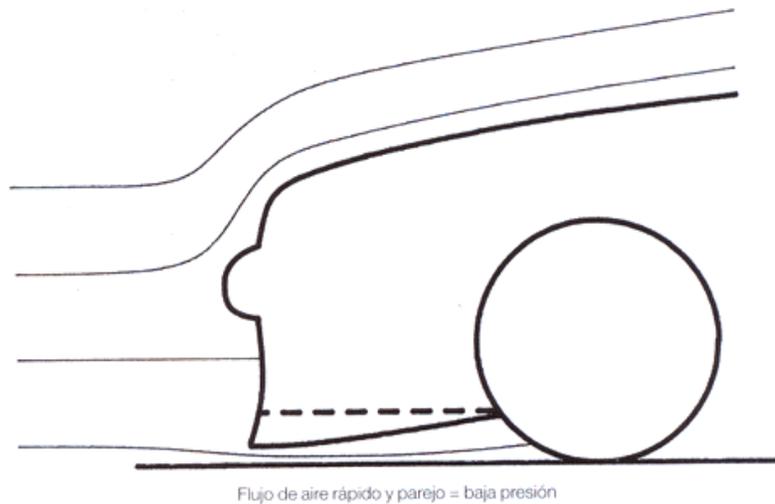
Existe un asunto más importante que hay que tener en cuenta cuando se plantea montar una caja de aire en su coche de carreras: la refrigeración. Y no sólo la refrigeración del motor, sino la de los frenos y, particularmente en los coches con tracción delantera, la refrigeración de la transmisión.

Resulta curioso que, al crear una zona de baja presión debajo del coche, el flujo de aire refrigerante que pasa por el compartimento del motor es, incluso, mayor. Aunque suene difamatorio, siempre me ha parecido que los diseñadores de los coches de calle incluyen un gran agujero en la parte delantera para canalizar el aire *hasta* los radiadores, pero se olvidan de cómo sacar el aire *de* los radiadores. De algún modo, se supone que el aire debe encontrar una salida, pasar por el motor, y probablemente también por la transmisión, y finalmente por el fondo del coche. Sin embargo, incluir una caja de aire delantera, que, según hemos visto, causa una reducción en la presión del aire en el fondo del vehículo, también puede crear algo de succión del aire que pasa por el compartimento del motor. El efecto de esto es extraer aún más aire que, a su vez, puede permitir que se adopte una toma de aire más pequeña para la refrigeración, lo que hará que se reduzca la resistencia al avance. Una solución de este tipo debe ser, sin embargo, el resultado de unos experimentos muy cuidadosos para evitar llegar al otro extremo y lograr que el motor sólo se recaliente.

Los coches con motor delantero utilizan el aire que pasa por su cárter para facilitar parte de su refrigeración, por lo que se debe tener mucho cuidado cuando se monta una caja de aire. Como mínimo, puede ser necesario incorporar conductos especialmente creados para llevar el flujo de aire a los puntos que más lo necesiten. Esto mismo puede aplicarse a un vehículo con tracción delantera si la transmisión requiere ser refrigerada de esta manera, y, al mismo tiempo, debe mantenerse la refrigeración mediante radiadores de aceite auxiliares. La refrigeración de los frenos no debe ser ignorada, aunque la necesidad de ventilarlos dependerá de la categoría en la que compita. Pero, igual que los demás aspectos de la refrigeración mencionados aquí, es posible que la instalación de una caja de aire interfiera en el flujo de aire que ventila los frenos delanteros (y probablemente también los frenos traseros, no lo olvidemos). Una vez más, unos conductos que dirijan el aire hasta los frenos puede ser de vital importancia. Todo este tópico de la refrigeración es un área en la cual las pruebas en la pista y las competiciones serán el único modo de descubrir cuáles son los últimos retoques que han de llevarse a cabo.

## Variaciones en las cajas de aire

Hemos visto que las cajas de aire sencillas reducen la presión de debajo del coche bloqueando la mayor parte del flujo de aire que entra en esa zona, lo que crea unas condiciones similares a las de la trasera del coche. Además de esto, lo que hace una caja de aire es acelerar la velocidad que sí pasa por debajo del spoiler, lo que también creará una zona de baja presión. Ahora, en muchos coches, esto no representa ningún beneficio, ya que el área de debajo y de detrás de la caja de aire es una cavidad vacía, por ejemplo bajo el radiador y por delante del motor en el caso de vehículos con motor delantero. Como hemos mencionado arriba, esta reducción en la presión local puede aumentar la eficacia de la refrigeración, pero a menos que hagamos algo para explotarla, no se conseguirá ningún beneficio en lo referente a la reducción de la sustentación. Entonces, ¿cómo podemos sacarle partido? Sencillo, añadir a la caja de aire un «retorno» que se extienda hacia atrás. O mejor aún, inclinar la extensión hasta arriba un poco hacia atrás, para formar una especie de «difusor» (fig. 3.5); este tema lo trataremos más adelante.



**Figura 3.5.** Una caja de aire delantera integrada con un difusor.

Lo que se tiene ahora es un apéndice que acelera el flujo de aire, y reduce la presión en el estrecho espacio entre la caja de aire y el suelo, así como una superficie en la que pueden actuar las bajas presiones. El resultado es que la carga aerodinámica actúa sobre la superficie horizontal o cerca de ella, superficie que, teniendo en cuenta que se encuentra bien fijada al coche, empuja la parte delantera del vehículo hacia el suelo. Los coches del campeonato británico de turismos utilizan este principio, aunque el reglamento prohíbe que la superficie plana se extienda más allá de la línea de eje frontal. Esta clase de apéndice no funcionaría si la caja de aire llegara justo hasta el suelo y boqueara todo el flujo, y, de hecho, esta solución requiere pro-

bablemente algo más de espacio entre el coche y el suelo de lo que pueda necesitar una caja de aire sencilla. Si se echa un vistazo a los turismos que explotan ese efecto, se verá que la parte central de la caja de aire delantera se encuentra más elevada que las esquinas. Y de modo similar, algunos de los ahora extintos Super Turismos de la Clase 1 que corrían en Europa en 1996, en particular los Opel y los Mercedes, incluían complejas y curvadas cajas de aire delanteras que estaban claramente diseñadas para hacer que el aire fluyera dentro de estas secciones «Venturi».

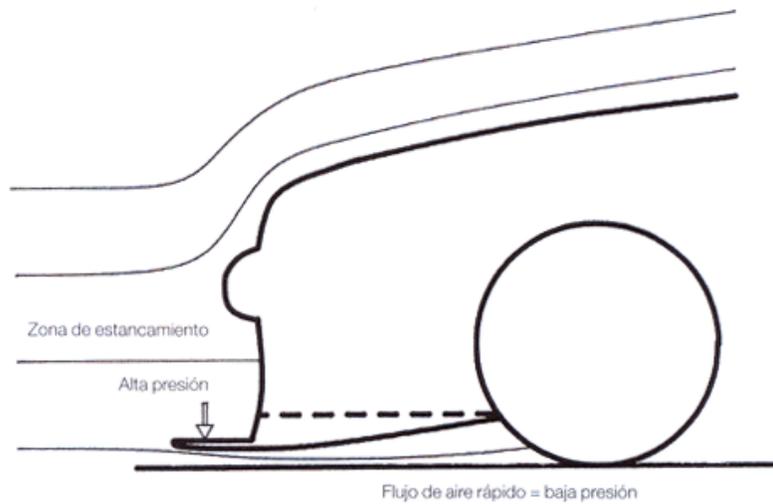


El Super Turismo Volvo S40, con la sección central de la caja de aire elevada. Compárelo con el Mondeo de las páginas anteriores.

## El divisor de flujo

Una extensión más larga, que puede ser añadida a la caja de aire, es lo que se conoce como «divisor de flujo» (splitter). Se trata de una extensión horizontal o labio inferior de una caja de aire y que se expande hacia delante. Por muy sencillo, e incluso tosco, que un divisor de flujo pueda parecer, en realidad es un apéndice aerodinámico extremadamente eficaz que puede crear carga aerodinámica sin prácticamente generar resistencia. ¿Cómo consigue eso? Básicamente por introducirse mucho en una zona de alta presión. La mayoría de los coches cerrados, excepto los que son muy «aerodinámicos», con muy poca resistencia, tienen un morro «brusco». Según se mueven, el aire se divide hacia arriba y pasa por encima o por debajo de

ellos. Pero justo por delante del morro se encuentra lo que es conocido como la «zona de estancamiento», donde el aire choca con la parte delantera del coche. Parte de este aire es conducido por el sistema de refrigeración, lo que resulta lógico porque el aire aquí está, hablando relativamente, a una presión elevada, y por eso sigue cualquier camino que le permita deshacerse de esa presión. La zona de estancamiento puede considerarse como una especie de burbuja de aire de alta presión fijada en la parte delantera del coche. Por tanto, una vez más, tenemos una parcela de aire que puede ser aprovechada, y de nuevo la técnica es bastante sencilla: fijar una placa plana con el fin de que la alta presión incida sobre la placa, y la empuje hacia abajo, creando así carga aerodinámica (fig. 3.6).



**Figura 3.6.** Una caja de aire delantera integrada con difusor y divisor de flujo.

Un divisor de flujo también tiende a colaborar con la función principal de la caja de aire, en lo que se refiere a restringir la cantidad de aire que entra en la parte de debajo del coche. En cierto modo, un divisor de flujo tiene el mismo efecto que una caja de aire más profunda, y como resultado de esto, aún más aire es redireccionado hacia los lados del coche. Esto puede ayudar a entender la eficacia de un divisor de flujo como apéndice inductor de carga aerodinámica, ya que con la incorporación de un divisor se genera muy poca o ninguna resistencia. (Se decía que un Super Turismo de 1996, cuando montaba todo el kit de caja de aire/divisor de flujo, producía menos resistencia que su homónimo de serie. La cantidad de resistencia sólo empeoró cuando se montaron unos neumáticos más anchos y un spoiler trasero.) La cantidad de carga aerodinámica creada puede ser controlada mediante la longitud del divisor de flujo, hasta cierto punto, y si el divisor es regulable, sirve para controlar el equilibrio delantero/trasero de carga. Por supuesto, algunas categorías, como los Super Turismos, prohíben cambios de esta clase, ya que los apéndices aerodinámicos deben ser fijos a lo largo de toda la temporada.

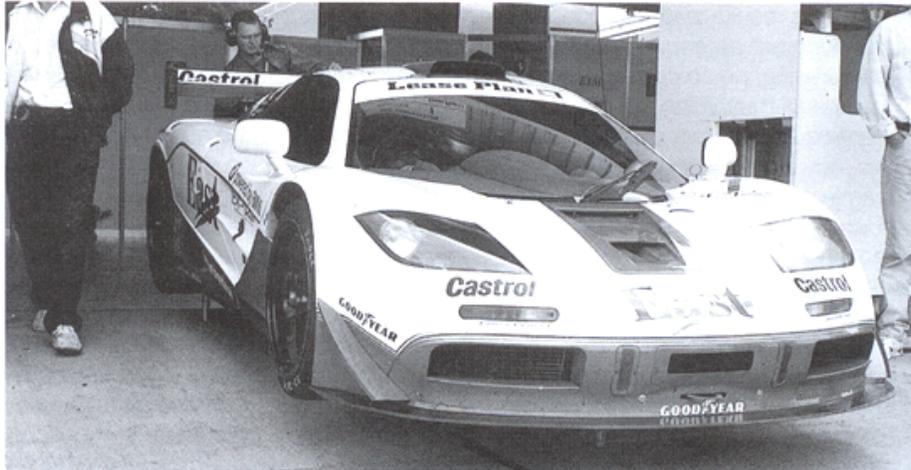
Tal vez resulta evidente que sólo merece la pena incorporar un divisor de flujo de una longitud determinada. Si se extiende más allá de la zona de estancamiento de alta presión, no se conseguirá ningún beneficio adicional. Además, se convertirá en una pieza muy vulnerable colgando delante del coche. También resulta igual de aparente que un divisor de flujo no servirá para nada en un coche que cuente con un morro muy afilado y que produzca poca resistencia. La creación de una zona de estancamiento de alta presión tiene lugar debido a los morros bruscos de los coches, y aquí un divisor puede sacar partido al área de alta presión delante de él. Sin embargo, si su coche tiene un morro estilizado y afilado, puede que no se genere zona de alta presión y, por tanto, tendrá que buscar otros métodos de generar carga aerodinámica.

Uno de los problemas aparentes cuando se monta un divisor de flujo es que puede ser muy sensible a los cambios en la altura del coche sobre el suelo. Los cambios en la altura del coche, causados por una combinación de cambios en la suspensión tales como el hundimiento del morro a la hora de frenar, y la compresión como resultado directo de la carga aerodinámica, alteran de manera regular el espacio entre el fondo del coche y el suelo.

Pero las cajas de aire y los divisores de flujo, de por sí ya se encuentran muy cerca del suelo, y, como hemos visto, su efectividad como apéndice aerodinámico depende directamente de su distancia del suelo. Cuanto más cerca del suelo estén, mayor será la cantidad de carga aerodinámica que generen. Así que es posible encontrarse en una situación en la que el coche produzca enormes cantidades de carga aerodinámica muy inconsistentes debido a que la altura con respecto al suelo está variando constantemente. Un modo de reducir este problema es endurecer las suspensiones del coche, lo que reduce la compresión de los muelles cuando se le aplican fuerzas, tanto mecánicas como aerodinámicas. Esto puede tener desventajas no sólo en confort de marcha, sino también porque se reduce potencialmente la habilidad del coche de agarrarse al suelo y traccionar, una condición que se puede notar especialmente en las curvas lentas donde la aerodinámica no ayuda demasiado. Así que los aerodinamistas más inteligentes buscarán soluciones que sean menos sensibles a los cambios en la altura del coche, y que por tanto permitan a los ingenieros poder contar con una cantidad de movimiento de suspensión decente.

Ya hemos visto cómo las cajas de aire estaban diseñadas para producir una menor sensibilidad a los cambios en la altura del coche. Conformando la entrada al Venturi situado debajo del divisor de flujo como en el Opel de la Clase 1 de Turismos de 1996, la posibilidad de bloquear el flujo de aire que pasa al fondo del coche quedaba completamente erradicada, y se lograba más apoyo aerodinámico. Pero si se mira detenidamente el diseño de éstos, y el de los Super Turismos de la Clase 2, se podrá ver que algunos de los apéndices de la parte delantera son una combinación de divisor de flujo, caja de aire y sección Venturi. Naturalmente, los diseñadores buscaban una eficiencia máxima, pero no podían dejar de lado la consistencia.

No existe ninguna duda de que los divisores de flujo pueden producir una gran cantidad de carga aerodinámica. En 1995, el McLaren F1 GTR había recibido muy



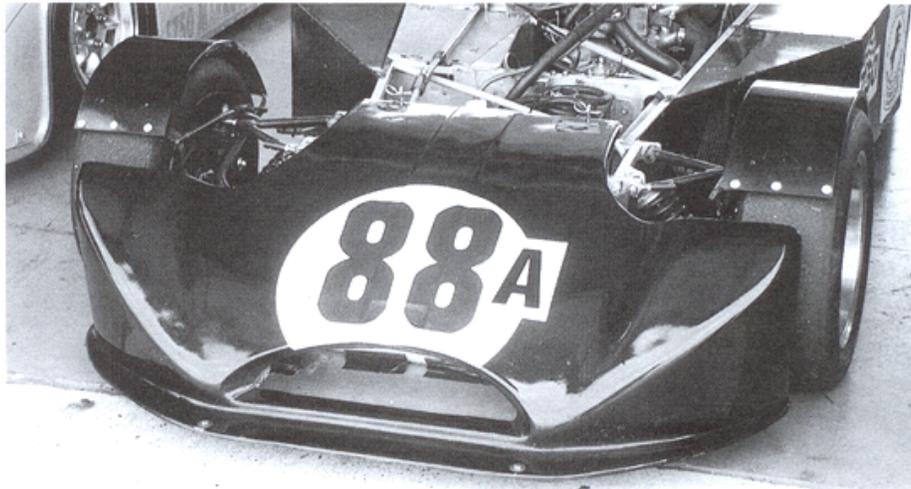
La extensión de 80 mm en el divisor de flujo del frontal sirvió para erradicar el subviraje en el McLaren F1 GTR de 1996.

pocas horas de desarrollo aerodinámico, habiendo pasado sólo un día en el túnel de viento antes de ser homologado para disputar la temporada. Tenía un alerón trasero de dos elementos, un difusor trasero y una sección delantera que incorporaba una caja de aire y un divisor de flujo muy pequeño. Tuvo problemas de subviraje durante toda la temporada, con las ruedas delanteras generando mucho menos agarre que las traseras. Para 1996, se llevaron a cabo una serie de cambios; el reglamento obligó a utilizar alerones traseros de un solo elemento, pero ahora permitía divisores de flujo de 80 mm de longitud. El coche fue retocado durante muchas más horas en el túnel de viento que el año anterior, y Gordon Murray comentó que la carga aerodinámica había aumentado en un 80 % con respecto a 1995. Además, estaba mejor equilibrado, y el problema de subviraje había desaparecido. Si bien algunas de estas mejoras fueron debidas a otros factores, el mayor tamaño del divisor de flujo ayudó al GTR a producir una cantidad mucho mayor de carga aerodinámica en la parte delantera.

Se ha medido que un coche de carreras basado en uno de pasajeros producía un valor de  $\Delta C_L$  de  $-0,20$  para un  $\Delta C_D$  de sólo  $0,02$  con la ayuda de un divisor de flujo con unas medidas sin especificar. Esto representa una clara ganancia en lo referente a la carga aerodinámica, y, si esto se suma a lo que se gana con una caja de aire, se puede ver que el resultado combinado puede llegar hasta un  $\Delta C_L$  de  $-0,40$  a  $-0,45$ . Para nuestro «coche de pasajeros de referencia», de  $2,32 \text{ m}^2$  de área frontal a  $160 \text{ km/h}$ , esto crearía alrededor de  $116,4$  a  $130,9 \text{ kg}$  de carga aerodinámica.

## No sólo coches carrozados

Los divisores de flujo pueden ser considerados como apéndices aerodinámicos que sólo se utilizan en coches carrozados como turismo o coches de sport. Pero esto no es así. Los divisores han sido utilizados con éxito en algunos monoplazas así como en coches de sport de «ruedas descubiertas», en categorías como la Fórmula 750 o la 1300 inglesa. A finales de los años 70, los monoplazas incorporaban lo que se conocía como «morro a todo lo ancho», lo contrario de los morros estrechos con alas, y coches como los March 782/783/793, Chevron B38/B40 y los monoplazas de Fórmula 2 y 3 tuvieron mucho éxito con esa clase de morro. La mayoría de ellos utilizaban alguna clase de divisor de flujo, que a veces era regulable, y no parecían tener muchos problemas para encontrar el equilibrio del alerón trasero con esta configuración. Otro tipo de ajuste que se aplicaba a esta clase de morro era el de incluir unas placas verticales, ajustables en altura, montadas sobre el labio superior del morro, justo por delante de las ruedas delanteras. Estas placas actuaban como los correctores de flujo en la parte trasera del coche, y cumplían la función de separar el flujo y crear pequeñas burbujas de alta presión delante de ellos. La carga aerodinámica adicional no era muy grande, pero era un efectivo método para afinar la puesta a punto. Los morros con esta forma todavía pueden encontrarse en algunos coches de estas categorías, y es porque en algunos coches ofrece un modo eficaz de generar carga aerodinámica sin resistencia adicional. Existe una escuela de pensamiento entre los que compiten en la Fórmula 750, los cuales cuentan con poca potencia para especular, y menos aún con la que experimentar, que opinan que el morro ancho ofrece menor resistencia alrededor de los neumáticos delanteros. Sin embargo, también es cierto que los coches de esta fórmula con morros estrechos y alerones delanteros tienen mucho éxito.

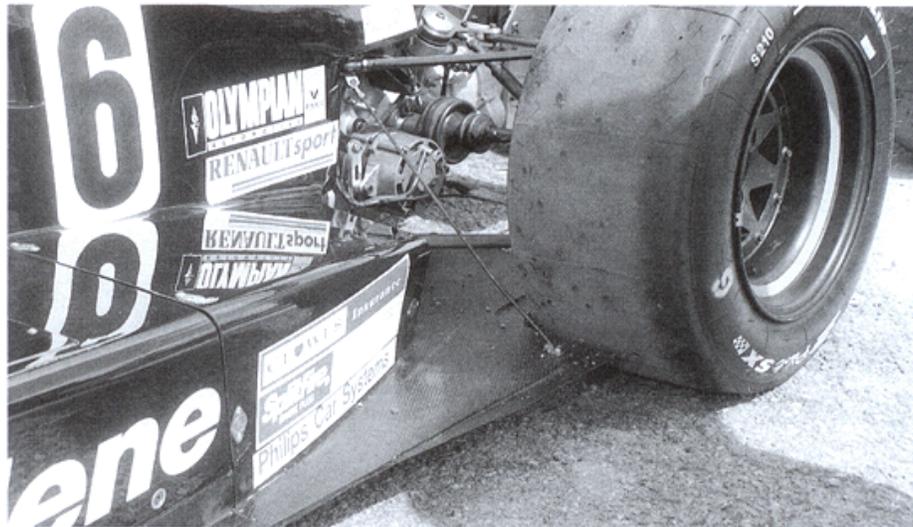


Algunos coches de la Fórmula 750 utilizan un conjunto de morro ancho carenado con divisor de flujo.



El divisor de flujo del fondo de un Jordan 196 de Fórmula 1. (Tracey Inglis)

Allan Staniforth, en su libro *The Race and Rally Car Source Book*, relata lo que observó en las carreras de montaña, donde él y algunos contemporáneos pilotaban sus propios monoplazas equipados con el morro ancho. Viendo los coches con unos binoculares donde se alcanzan velocidades de 80-120 km/h, era aparente que



El «divisor de flujo en estante» en el Van Diemen RF97 de Fórmula Renault.

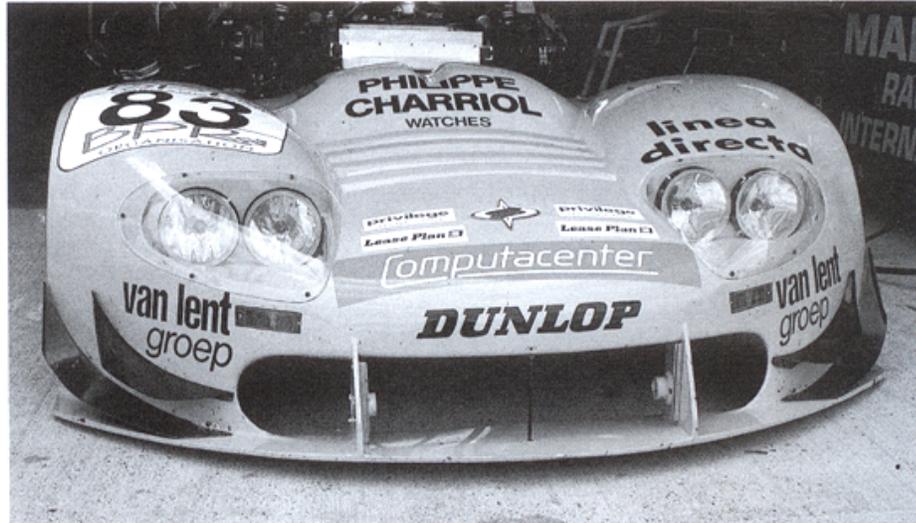
la carga aerodinámica generada era suficiente para comprimir las suspensiones de estos coches, por lo que tenían que aumentar la altura al suelo para no rozar contra el pavimento. También añade una advertencia bastante importante: que el divisor de flujo debe estar paralelo al suelo en condiciones estáticas, además de ser de una construcción robusta. Uno de los coches de montaña mencionados arriba, aparentemente, no tenía el centro de su divisor bien sujeto y vibraba cuando alcanzaba velocidades altas. Además, el coche parecía llevar la suspensión muy elevada, prueba de que no se estaba generando la cantidad suficiente de carga aerodinámica. Una pequeña abrazadera puede servir para solucionar este problema, pero utilicemos esta experiencia como una advertencia.

Puede que no sea tan evidente, pero todos los coches de Fórmula 1 actuales incorporan un divisor de flujo, aunque no se encuentra en la parte delantera del coche. La reglamentación de la Fórmula 1 exige que los coches tengan un área plana entre la tangente de las ruedas delanteras y la parte delantera de las ruedas traseras. La mayoría de los Fórmula 1 actuales también cuentan con el «morro elevado», y la parte inferior del morro se encuentra bastante más alta que la parte inferior del chasis. Así, en la mayoría de los diseños, el fondo plano sobresale hacia delante justo por detrás de la parte trasera del morro, del mismo modo que un divisor sobresale por delante de una caja de aire. De este modo, existe un espacio para crear una zona de estancamiento justo encima del divisor, lo que crea una diferencia de presión que crea algo de carga aerodinámica. En la parte trasera de los Fórmula 1 (y en muchos otros monoplasas) existen unas extensiones planas del fondo plano que sobresalen el máximo permitido por delante de las ruedas traseras. Una vez más, estos paneles explotan la zona de estancamiento que existe inmediatamente delante de las ruedas traseras para crear una diferencia de presión encima y debajo de ellas, y generar carga aerodinámica. En cada caso, estos paneles deben ser lo suficientemente rígidos para resistir y no doblarse al ser sometidos a presión, de transmitir la fuerza al chasis, y desde ahí a los neumáticos.

## Placas de hundimiento

Otro dispositivo que incluye este capítulo, ya que no puede ir incorporado en ningún otro, es la «placa de hundimiento», o «plano de hundimiento» si lo prefiere, llamado así por su parecido con los planos de hundimiento de los submarinos. En su forma más sencilla se trata de placas planas, inclinadas hacia delante, fijadas a ambos lados en la parte delantera de los turismos o los coches de sport. Estas placas crearán, efectivamente, carga aerodinámica, pero no puede esperarse que sea mucha ni muy efectiva. Una vez más, pueden considerarse como un medio de afinar la puesta a punto en caso de que sean regulables o intercambiables. Sin embargo, ha habido casos donde la cantidad de carga aerodinámica general ha aumentado considerablemente con estas placas fijadas, a unos niveles que no pueden ser sólo consecuencia de las propias placas.

En este caso, tuvo que existir una influencia secundaria sobre el flujo de aire que tuvo algún efecto beneficioso, y es probable que el efecto, en estos casos, fuera



Placas de hundimiento en la parte delantera de un Marcos LM600 GT2.

el de crear una especie de vórtices por los lados del coche, que dio como resultado el sellado del fondo que, de no ser así, hubiera dejado escapar el flujo de aire por los lados. Esto puede conducir a una producción más eficiente de carga aerodinámica en el fondo del coche (de lo que hablaremos más adelante) con la simple incorporación de una placas de hundimiento en el morro. Hay pocas posibilidades de que el corredor aficionado tenga la suerte de montar unas placas como éstas y conseguir que genere más apoyo aerodinámico. Hacen falta varios días en el túnel de viento para optimizar la posición e inclinación de las placas, pero cumplen su función para conseguir una configuración más afinada. Las placas de hundimiento se han mutado en varias formas más complejas, y en algunos casos es evidente que los diseñadores querían crear vórtices a los lados de los coches, mientras que otros dispositivos estaban orientados sólo a lograr afinar la configuración.

## Ángulos de seguridad en la NASCAR

Los *stock-cars* de la Copa Winston de Estados Unidos ruedan a velocidades muy altas en circuitos ovals y Superspeedways (los óvalos más rápidos), y, por esto, las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre ellos son enormes. La carga aerodinámica está bajo control, con unas reglas muy estrictas en lo referente a las cajas de aire y los spoilers traseros, y se llevan a cabo cambios específicos en la aerodinámica de las diferentes marcas que compiten, con el fin de garantizar un buen espectáculo y que todo el mundo pueda ser competitivo. Pero existe un problema en la NASCAR, que se convirtió en específico de esta categoría debido a la frecuencia

con la que ocurría. Por tanto, la solución debía ser algo único en las competiciones de coches.

El problema era que los vehículos que se mostraban estables cuando eran pilotados en la dirección correcta, es decir, hacia delante, despegaban del suelo cuando hacían un trompo y comenzaban a rodar marcha atrás. Los estudios llevados a cabo en el túnel de viento determinaron que a un ángulo de  $140^\circ$ , o sea rodando casi de espaldas, el perfil de la superficie superior del coche se convertía en una forma muy similar a la de un ala con sustentación positiva. A velocidades de alrededor de 260 km/h, se creaba suficiente sustentación positiva para que el coche despegara del suelo. Recuerde que estos vehículos pesan 1.590 kg, por lo que se estaba creando una cantidad enorme de sustentación. Fueron propuestas y probadas varias soluciones, hasta que se dio, finalmente, con algo que no existe en ninguna otra categoría. La parte más sencilla de la solución, probada durante los primeros intentos para resolver el problema y todavía utilizada hoy, era montar unas bandas metálicas de 12,5 mm a cada lado del techo. A cero grados u otro ángulo pequeño, estas bandas no tenían ningún efecto aerodinámico salvo el de estabilizar el coche. Pero a ángulos mayores, especialmente cuando el coche viaja de lado, actuarían como spoilers sobre el flujo de aire del techo, y eliminarían cualquier fuerza de sustentación que pudiera existir. Más adelante, fueron añadidas más bandas metálicas en la parte superior de las lunas, así como en la base.

Pero esto no solucionaba el problema cuando el coche rodaba casi de espaldas. Una solución que se probó fue la de hacer que toda la parte donde se encuentra el maletero se levantara cuando el aire incidiera en ella al rodar en la dirección

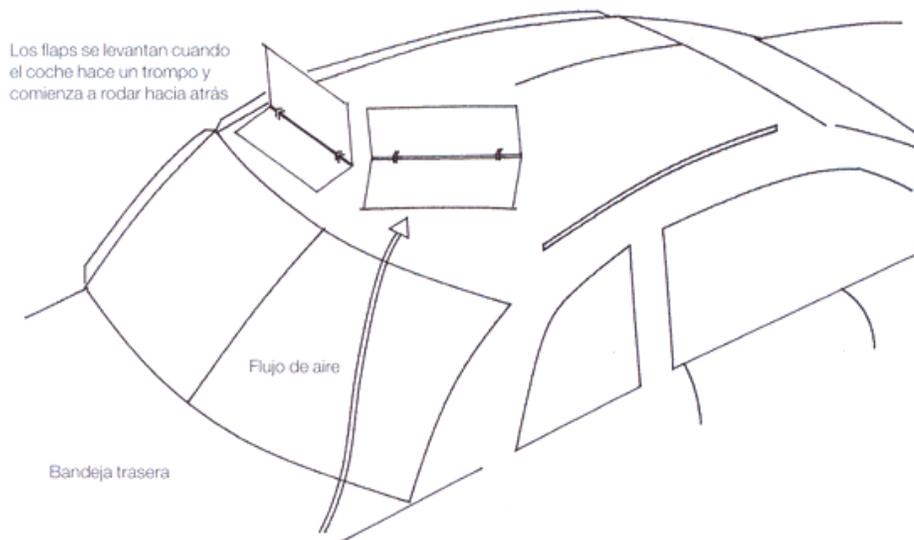


Figura 3.7. Flaps del techo en un coche de la NASCAR.

contraria, lo que crearía un enorme spoiler. Pero en las pruebas (utilizando el jet de la organización para conseguir un viento de más de 320 km/h) se descubrió que las fuerzas eran tan grandes que los cables que lo sujetaban se soltaban y toda la placa salía volando tras ser arrancada. Finalmente, la idea fue refinada para que el techo incorporara unos flaps, de 510 por 205 mm, que se levantaran del mismo modo que la tapa del maletero cuando el ángulo era muy grande. Un flap estaba orientado transversalmente, y el otro, cerca del primero, orientado en un ángulo perpendicular con respecto al flujo de aire en el peor de los casos, es decir a  $140^\circ$  (fig. 3.7). Los flaps se levantaban bajo la influencia de la baja presión generada cuando el coche alcanza ese crítico ángulo, pero permanecían cerrados mientras el vehículo rodara en la dirección correcta. La NASCAR tiene ahora mucha experiencia sobre el funcionamiento de estos dispositivos, y los resultados han sido muy positivos. Y es que la reducción de la sustentación tiene mucho que ver con la seguridad.

## 4. Todo sobre los alerones: desde lo más básico hasta cómo diseñarlos

Una vez que quedó claro que la reducción de la sustentación positiva era sólo una parte de lo que era posible hacer con los apéndices aerodinámicos con las formas y las posiciones correctas, comenzó una búsqueda para hallar cantidades de carga aerodinámica mayores y lograr así velocidades de paso por curva más altas. Después de la resurrección, por parte de Jim Hall, del uso del ala invertida, la revolución de la aerodinámica se volvió muy popular en la segunda mitad de los años 60, al tiempo que los Fórmula 1 incorporaban alas tanto delante como detrás, y ahora podemos mirar atrás, 30 años después, para ver dónde hemos estado (¡ah, si pudiéramos ver dónde estaremos...!). Los alerones utilizados en aquellos días tenían un diseño bastante sobrio si los comparamos con los complejos ensamblajes que adornan todos los monoplazas de carreras del más alto nivel, y el desarrollo continúa a un ritmo endiablado. No hay duda, los alerones ya no son lo que eran...

### Definiciones

Antes de comenzar, explicaremos algunos términos y definiciones con el fin de saber que nos estamos refiriendo a lo mismo. Probablemente no haga falta decir que la terminología de los alerones procede del mundo de la aeronáutica y los aviones, y la sección de referencias del final del libro enumera una serie de títulos con los cuales el lector obtendrá muchos más detalles y explicaciones teóricas que las que se dan aquí. Aunque las definiciones comienzan por la «A», no se encuentran ordenadas alfabéticamente, sino más bien como me vinieron a la mente (fig. 4.1).

*Alerón*, es considerada normalmente otra forma de decir *ala*, que es un cuerpo con tal forma que el aire que pasa a través de ella cree sustentación, o, en nuestro

caso, carga aerodinámica, sin causar una resistencia excesiva. Un alerón es la sección transversal que define la forma de un ala tridimensional y, debido a que las formas de los alerones pueden ser bastante complejas, es lógico decir que un alerón puede tener varias secciones a lo largo de él.

El *borde de ataque*, o BA, es obviamente la parte delantera de un ala, y normalmente tiene una forma poco refinada, con forma radial. El *borde de fuga*, o BF, se encuentra justo en la otra esquina del alerón, y normalmente es una zona estrecha. La línea recta que une el BA y el BF es la *línea de cuerda*, y la distancia a lo largo de esta línea desde BA a BF es la dimensión de la cuerda, especificada por la letra «c». El grosor máximo de un alerón es especificado por la letra «t», y se expresa como un porcentaje o fracción decimal de la dimensión de una cuerda. Así, si un ala tiene una dimensión de cuerda de 305 mm, y  $t = 0,18c$ , el grosor máximo es  $305 \times 0,18 = 54,9$  mm. La posición del máximo grosor se expresa normalmente con una fracción decimal de la cuerda, medida desde el BA, por lo que si  $t_{\max}$  es  $0,3c$ , se encontrará a 91,4 mm desde el BA de un alerón con una cuerda de 305 mm.

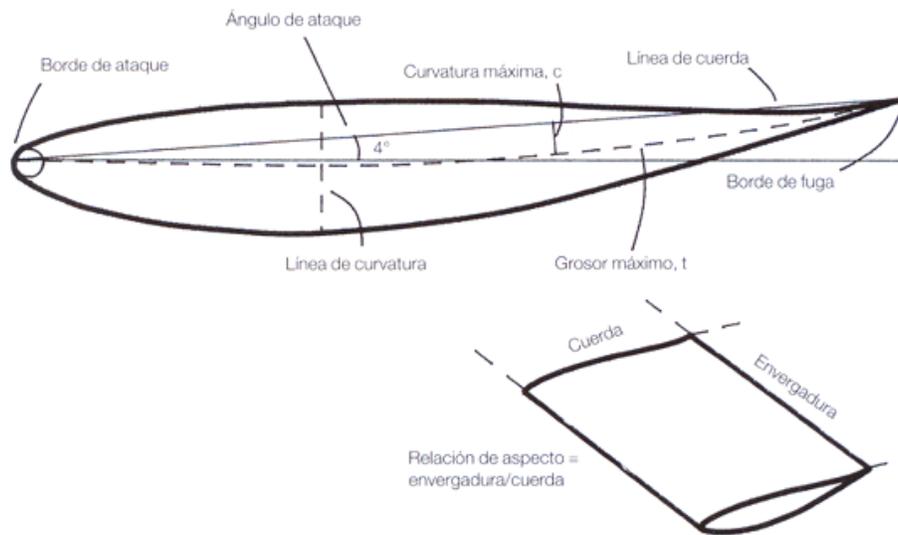


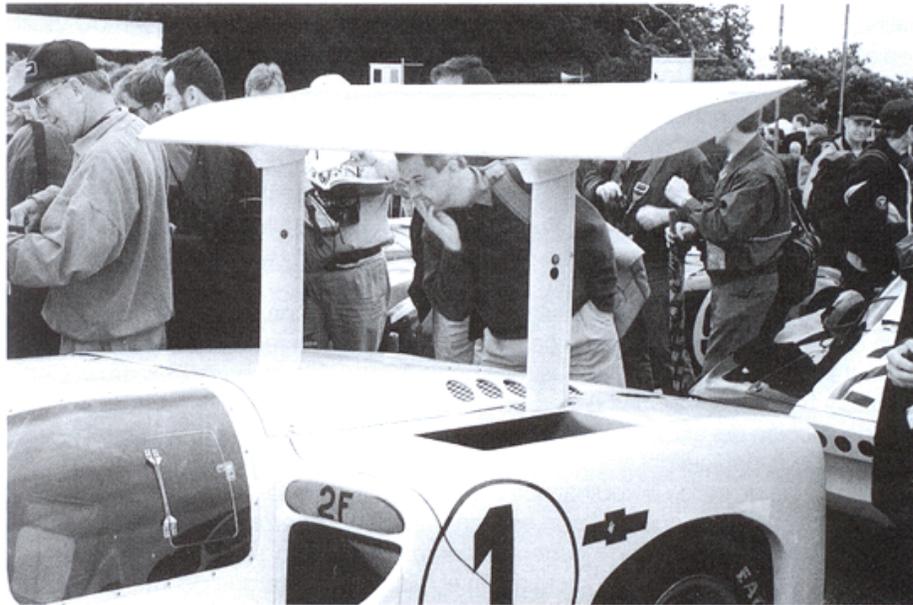
Figura 4.1. Terminología de un alerón.

La sección de un ala puede ser simétrica o asimétrica, y si se trata del segundo caso se dice que tiene *curvatura*, lo que significa que su superficie inferior (en el contexto de un coche de carreras) está más curvada que la parte superior. Los alerones de los coches de carrera de hoy en día generalmente tienen curvatura, mientras que en los primeros intentos las alas eran prácticamente simétricas. La línea que pasa por los puntos medios de un ala, desde el BA al BF, se conoce como *línea mediana* o

*línea de curvatura*. La cantidad de curvatura presente es a menudo definida como la distancia máxima entre la línea de curvatura y la línea de cuerda, expresada una vez más como una fracción decimal de la dimensión de la cuerda,  $c$ . La localización de la curvatura máxima se define del mismo modo que el grosor máximo, también como una fracción de  $c$ .

El ancho de un ala es conocido como su *envergadura*, y la relación de la envergadura con la cuerda es la *relación de aspecto*. Los aviones tienen unas relaciones de aspecto muy altas, mientras que los coches de carreras las tienen muy bajas. El *ángulo de ataque* o *ángulo de incidencia* de un ala es el ángulo entre el flujo de aire y la línea de cuerda del ala. A veces resulta tentador pensar que el flujo de aire que pasa por el coche es horizontal, paralelo al suelo. Esto puede ser cierto en los alerones delanteros (aunque no necesariamente), pero casi nunca es cierto en los alerones traseros.

Los alerones de los coches de carreras ya no pueden tener ángulos de incidencia variables mientras se encuentran en marcha, y los cambios en dichos ángulos sólo pueden realizarse en los boxes. El Chaparral 2E y 2F de 1966 y 1967 de Jim Hall contaba con alerones traseros con ángulo de incidencia variable, y los ajustaba el piloto mediante un tercer pedal (los coches tenían transmisión automática). El punto (o línea) teórico en el que actúan las fuerzas sobre un alerón, y en el cual no hay un par o momento incidente, se conoce como *centro de presión*. En realidad, la situación de este punto surge la suma de la *distribución de presiones* sobre todo el alerón, tanto



El Chaparral 2E y el 2F (en la foto) tenían un alerón con ángulo de incidencia ajustable por el piloto.

en las superficies inferiores como en las superiores. Como vimos en el capítulo 2, el objetivo de un alerón es reducir la presión bajo el *lado de succión* de la parte inferior, y aumentar la presión del aire en la parte superior o *lado de presión* (fig. 4.2). El resultado de esto es que se producen tanto carga aerodinámica como, desgraciadamente, resistencia.

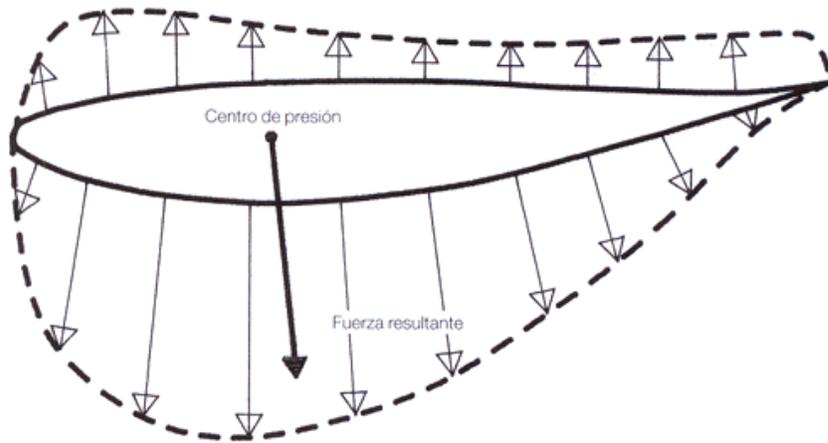


Figura 4.2. Distribución generalizada de la presión alrededor de un ala.

En el caso de los alerones de coches, la carga aerodinámica (o sustentación negativa) y los coeficientes de penetración,  $-C_L$  y  $C_X$ , se interpretan en relación con la superficie en planta de un ala, o sea, para un alerón rectangular, la envergadura multiplicada por la cuerda, en lugar del área frontal, que es la referencia para un coche completo.

La *relación sustentación/resistencia* ( $L/X$ ) se utiliza una vez más como medida de la eficiencia aerodinámica. La carga aerodinámica y la resistencia generalmente aumentan con un ángulo de ataque más pronunciado. Sin embargo, existe un cierto ángulo, y todos los alerones tienen uno, en el cual el flujo de aire se desvía por el lado de succión del ala y, en lugar de fluir suavemente, se vuelve muy inestable y se separa de la superficie del alerón (fig. 4.3). Este efecto es acompañado por una pérdida repentina de carga aerodinámica y un aumento de igual tamaño de la resistencia. Se dice entonces que el alerón está en pérdida. Este problema tiene una sencilla solución en los coches de carreras, siempre y cuando se sepa que ha tenido lugar. Con un avión, el piloto lo sentiría en el mismo instante que ocurriera, pero las consecuencias para él y para los pasajeros serían mucho más trágicas que para un piloto de carreras.

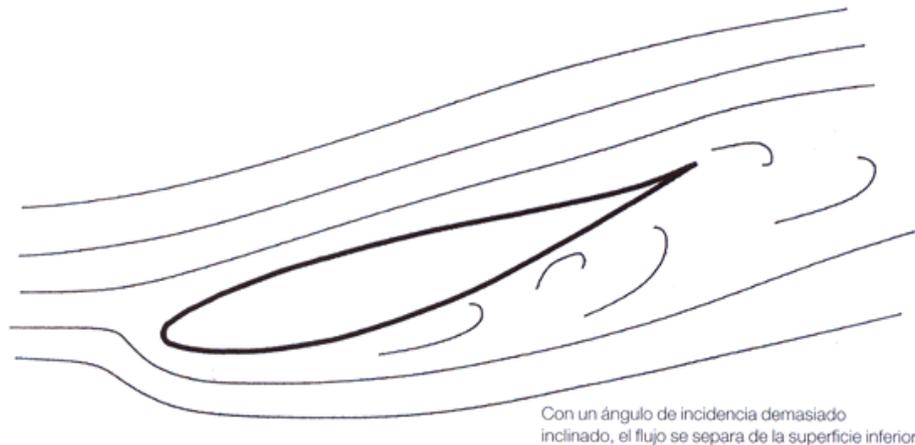
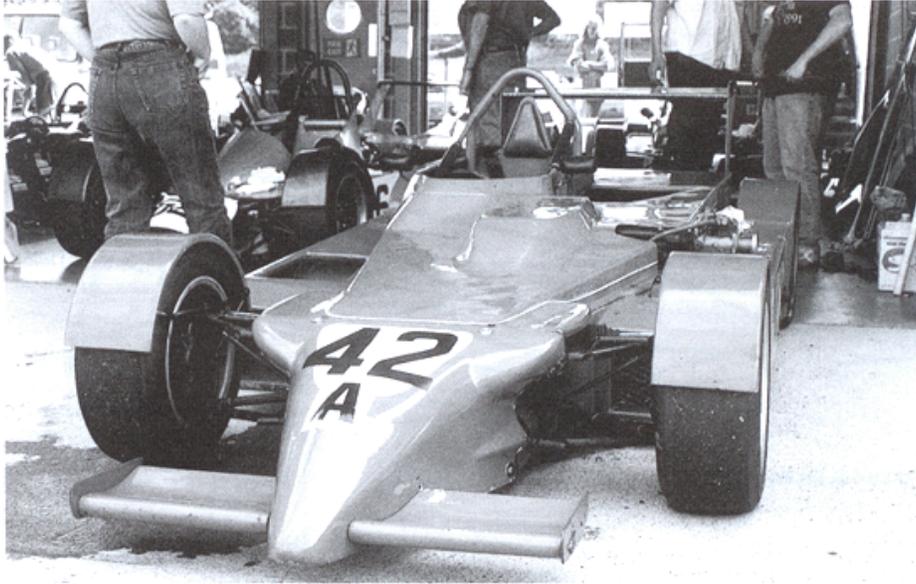


Figura 4.3. Un ala en pérdida.

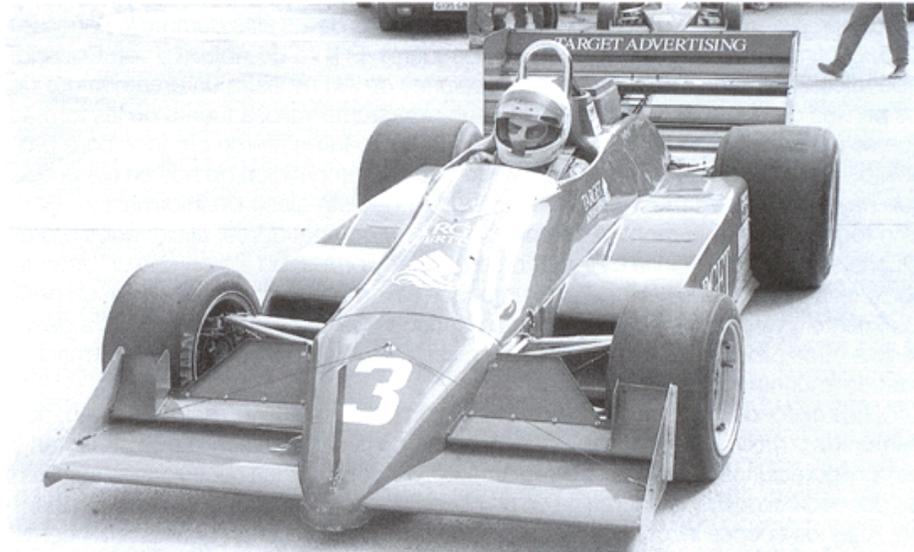
## La carga aerodinámica y los criterios de diseño de un alerón

Antes de comenzar a mirar con detalle la influencia de los criterios de diseño de un alerón, hay que mencionar primero los perfiles de alas de la NACA. El National Advisory Committee for Aeronautics (Comité Asesor Nacional de Aeronáutica) era una organización americana, el predecesor de la actual agencia espacial, NASA, que desarrolló un sistema para definir y catalogar las formas de las alas durante los años 20 y 30, continuando el trabajo alemán de posguerra. El libro de Abbott y von Doenhof (apéndice 2) llamado *La Teoría de las Secciones de Ala* muestra un gran número de los perfiles de la NACA, y este catálogo aún sirve como valiosa fuente de las formas que se pueden aplicar al mundo del motor. Sí, los perfiles fueron creados para propósitos aeronáuticos, y sí, los mejores equipos de competición de hoy en día puede que hayan avanzado más allá de la necesidad de esta clase de información. Pero esto todavía deja a un montón de constructores y competidores, aficionados o profesionales, que no tienen la capacidad de diseñar y probar un alerón con un ordenador, o refinarlo mediante el túnel de viento, que sin embargo no quieren crear un perfil totalmente a ciegas. Dicho libro, por muy antiguo que sea y aunque estuviera destinado a otros propósitos, es un regalo del cielo. Otras fuentes con similar información pueden encontrarse en el apéndice.

Los alerones de los coches de competición pueden tener un solo elemento, dos elementos o múltiples elementos, dependiendo de la categoría en la que compitan y las configuraciones que permita el reglamento, así como de las necesidades impuestas por cada circuito y la tolerancia de un coche a la carga aerodinámica y la resistencia. Algunos coches incorporan alerones sencillos porque tienen que hacerlo, como los GT de la FIA, mientras que otros los montan pequeños porque no pueden tolerar grandes cantidades de resistencia, tales como los Fórmula 750 de Inglaterra.



Los coches de Fórmula 750 utilizan alerones pequeños porque no pueden tolerar mucha resistencia al avance.



Los coches de montaña con reglamento más liberal y potencia no se preocupan por la resistencia.

Otros coches utilizan alerones con varios elementos debido a que su tolerancia a la resistencia es mayor, y la necesidad de grandes cantidades de carga aerodinámica es vital. Un buen ejemplo de esta categoría de apéndice alar sería un Fórmula 1 en un circuito «lento» como el de Mónaco, o un coche de subida de montaña con reglamento libre. Un punto crucial que hay que recordar es que el ambiente en el que trabaja el alerón de un coche de carreras es totalmente diferente al del ala de un avión. Así que, aunque mucha de la información disponible sobre alerones procede del mundo de la aviación, hay que tener en cuenta que las cosas ocurren de manera diferente, y normalmente de una forma mucho menos eficaz, en los coches de carreras.

### Alerones de un solo elemento

Los principios básicos para la creación de sustentación o carga aerodinámica comienzan por la premisa de que, como hemos definido más arriba, la carga aerodinámica es mayor cuanto mayor es el ángulo de ataque, hasta el punto o ángulo conocido como de pérdida. No sorprende que un alerón simétrico de un solo elemento, no produzca carga aerodinámica si tiene un ángulo de incidencia cero, pero la carga aumenta casi de forma lineal con el incremento del ángulo de incidencia, hasta que alcanza los 14-16° (fig. 4.4 y el apéndice 2). Sin embargo, observe que el ángulo de pérdida varía, dependiendo de la sección del ala y las condiciones del flujo.

El grosor,  $t$ , afecta a la carga aerodinámica, y, según el grosor aumenta hasta 0,12c, el ángulo de pérdida «llega» más tarde, permitiendo así una mayor cantidad de carga aerodinámica. Para algunos perfiles simétricos (como los NACA 0006, 0009 y 0012, que tienen una curvatura de cero, y un grosor de 0,06c a 0,12c) la pérdida es más abrupta según se acercan al ángulo de pérdida, mientras que en otros (como los NACA 2412, 2415 y 2418, con un 2 % de curvatura máxima en 0,4c, con un

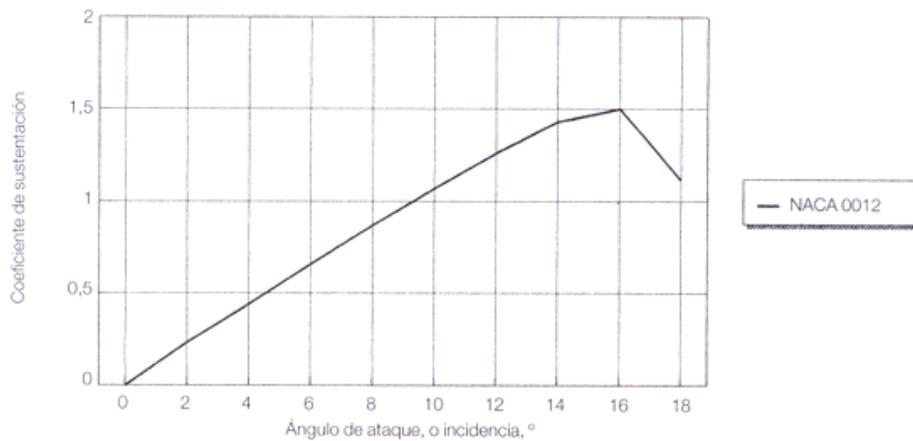


Figura 4.4. Sustentación contra ángulo de ataque.

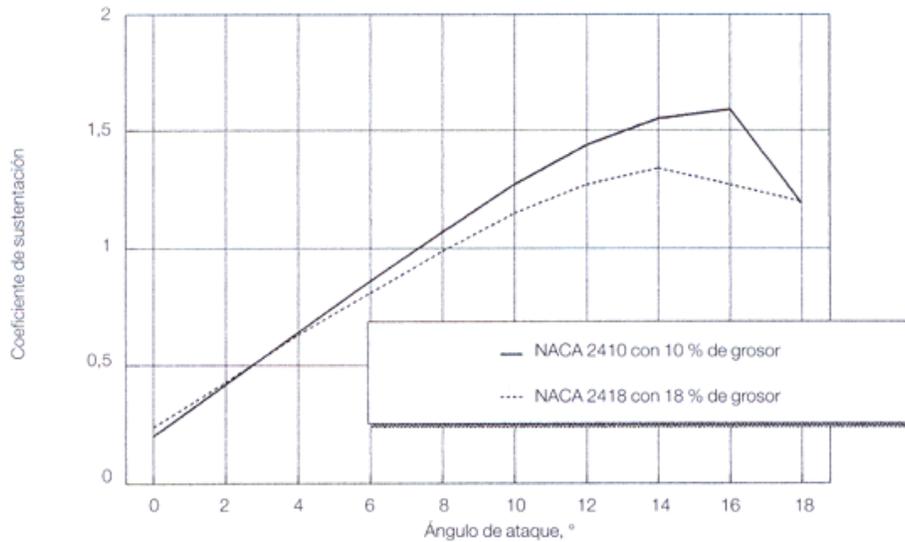


Figura 4.5. El efecto del grosor en la curva de sustentación.

grosor de 0,12c a 0,18c), el aumento del grosor tiende a generar una pérdida más suave (fig. 4.5). Si se incrementa el grosor por encima de 0,12c, el máximo valor  $-C_{Lmax}$  vuelve a bajar algo, y esto implica que, si el alerón tiene el fin de seguir constando de un solo elemento, un grosor de 0,12c puede ser interpretado como un parámetro válido para el diseño.

Sin embargo, los perfiles de ala muy delgados suelen estar relacionados con una pérdida abrupta, causada por la separación del flujo en el borde de ataque. En contraste con estos datos de Abbott & von Doenhof, McCormick (apéndice 2) muestra que con unos Números Reynolds de 2 millones o menos, el incremento del grosor en más de un 12 % tiene poco efecto en el  $-C_{Lmax}$ , y esto es muy importante para la mayoría de las categorías de competición, excepto, tal vez, las más rápidas.

El efecto de cambiar la curvatura es bastante diferente que el de cambiar el grosor. Agregar curvatura a un perfil de ala permite generar más carga aerodinámica a un determinado ángulo de ataque. De hecho, las alas curvadas crean carga aerodinámica incluso con un ángulo de ataque de 0° o menos. El ángulo de carga cero puede ser un ángulo de incidencia significativo en estas alas (fig. 4.6). La curvatura hacia atrás, o sea, con una curvatura máxima de 0,6c en lugar de 0,4c, tiene un efecto mayor en la creación de carga aerodinámica, y produce una pérdida más gradual que si la curvatura es hacia delante. Pero la curvatura situada más hacia delante puede tener más aplicaciones en una configuración con poca resistencia y con un ángulo de ataque bajo. Cambiando la geometría de las secciones traseras de un perfil de ala, pueden alterarse las características de carga y, la manera más fácil de hacerlo, es mediante flaps regulables, de los que hablaremos

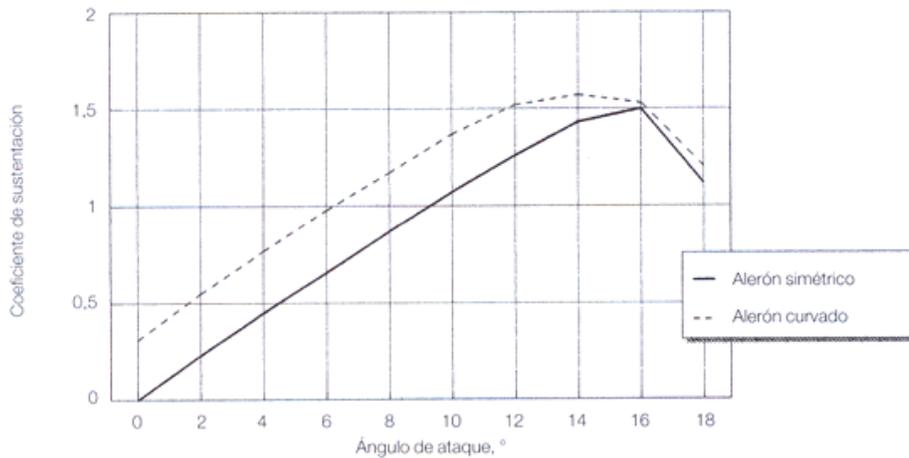


Figura 4.6. El efecto de la curvatura en la sustentación.

mos más adelante. Un ala curvada puede entrar en pérdida con un ángulo menor que un ala simétrica.

El radio del borde de ataque es otro parámetro en el que se pueden encontrar referencias contradictorias. Puede darse el caso de que un borde de ataque afilado, especialmente con una sección de ala estrecha, cause la separación del borde de ataque, creando así una disminución abrupta de carga cerca del ángulo de pérdida. Sin embargo, con un ángulo de ataque bajo, también puede darse el caso de que un borde de ataque afilado ayude a mantener una capa límite más estrecha sobre la primera parte de un ala, mejorando la eficacia, como lo determina la relación sustentación/resistencia. Ambos efectos pueden ocurrir en el mismo alerón, con diferentes ángulos de ataque. Además, en el caso de alerones de varios elementos con mucha carga aerodinámica, el incremento en la succión es tan pronunciado que el aire fluye significativamente más rápido alrededor del borde de ataque. Con el fin de evitar la separación prematura del flujo en el borde de ataque, puede hacer falta un cambio en la forma del mismo, y crear así un perfil más afilado. Históricamente, los perfiles de los bordes de ataque en las categorías más importantes de monoplazas de todo el mundo han ido cambiando de redondeadas y con grandes radios a formas más afiladas, quizá del orden de 1-3 % de la cuerda. Así, una cuerda de 300 mm puede tener un radio en el borde de ataque de 3 a 9 mm.

Por tanto, para un alerón de un solo elemento, los parámetros de selección incluyen:

1. Un ángulo de ataque bajo para conseguir poca carga aerodinámica y poca resistencia, un ángulo de ataque alto, hasta un máximo de 14-16° relativo al flujo de aire, para una mayor carga aerodinámica, con el consiguiente hándicap de la resistencia.

2. Poco grosor para poca carga aerodinámica y poca resistencia, y hasta  $0,12c$  para mayor carga, aunque a velocidades bajas, el grosor es mucho menos crítico.
3. Pequeñas cantidades de curvatura, de unos  $0,3c$ , para poca carga aerodinámica, y una curvatura mayor, de entre  $0,05c$  hasta  $0,15c$ , para mayor carga, junto con un desplazamiento hacia atrás, posiblemente hasta  $0,5$  o  $0,6c$ .
4. Radio del borde de ataque entre 1-3 % de cuerda.

Existe aún una interminable lista de opciones en lo que se refiere al grosor y la curvatura, pero este plan general de cuatro puntos puede ayudar a reducir la lista de posibles perfiles para una determinada categoría de competición y los circuitos que visite. Es imposible elegir un perfil que se adapte a todos los circuitos, pero la decisión de utilizar sólo un alerón, o contar con varias opciones, es suya. También se deben tener en cuenta varias consideraciones prácticas en el proceso de decisión, tales como si el alerón va a ser comprado o fabricado por usted. De cualquier modo que sea, los alerones que pueda obtener estarán determinados por la disponibilidad, o de las herramientas necesarias (y no hace falta ni mencionarlo, la habilidad) para crear la forma deseada. Pero ya hablaremos de esto en otro capítulo.

Entonces, ¿cuánta carga aerodinámica se puede generar con un alerón de un solo elemento? Obviamente, depende en parte de la superficie de planta del alerón, por lo que para el propósito de los ejemplos utilizados en este capítulo, nos referiremos a un alerón trasero de dimensiones fijas (a menos que se indique lo contrario) de una envergadura de  $0,91$  m y una cuerda de  $0,305$  m, con una superficie de planta de  $0,28$  m<sup>2</sup>. Los otros factores que limitan la cantidad de carga aerodinámica que se



Alerón trasero de un solo elemento en el McLaren F1 GTR de 1996.

crea, son la velocidad, que fijaremos a 160 km/h, y el coeficiente de sustentación, que es lo que realmente nos interesa aquí.

Los datos aeronáuticos suministrados por Abbott y von Doenhof sugieren que los coeficientes máximos de sustentación de un ala de un solo elemento van desde 1,2 a 1,6 justo antes de alcanzar al ángulo de pérdida, y un valor típico para un ala de grosor medio (0,12c) con una curvatura moderada (4 % de curvatura a 0,4c), tal como la NACA 4412, tiene un  $C_L$  máximo de 1,3 a 1,5°. Es interesante mencionar, de paso, que esta ala tiene, además, un  $C_L$  de 0,4 a 0° y de 1,2 a 8°. Sin embargo, todos estos valores de  $C_L$  se encuentran en Números de Reynolds de 3 millones o  $3 \times 10^6$ , y los ángulos de pérdida suelen reducirse cuanto menores son los Números Reynolds, lo que significa valores  $C_L$  menores. En el caso que estamos utilizando para nuestro ejemplo, el alerón tiene una cuerda de 0,305 m, y una velocidad, en pies por segundo, de 146,67. Volviendo al capítulo 2 por un momento, dijimos que el Número Reynolds podía calcularse de este modo:

$Re = 6.300 \times \text{velocidad} \times \text{longitud}$ , que en este caso es la dimensión de la cuerda. Así, nuestro Número Reynolds aquí es  $6.300 \times 146,67 \times 1,0$ , lo que da como resultado 924.000, o  $9,24 \times 10^5$ . Es una cifra mucho menor que el valor de los coeficientes de sustentación, y podemos asumir, con seguridad, que el coeficiente de sustentación con este valor inferior será también inferior, quizá del orden de 1,3 a 1,4 a un ángulo máximo de 12 o 13°.

Otros factores contribuirán a producir un  $C_L$  más bajo del que deseamos, tales como la turbulencia del resto del coche por delante del alerón trasero, y el hecho de que el alerón tiene una relación de aspecto pequeña (de la que hablaremos con detalle más adelante). Pero no nos pongamos pesimistas. Para simplificar las sumas de este ejemplo, asumiremos que el  $C_L$  efectivo ha bajado alrededor de un 25 %, y va a ser exactamente 1,0. Ahora podemos calcular la carga aerodinámica que nuestro alerón de un solo elemento producirá a 160 km/h:

$$\begin{aligned} \text{Carga aerodinámica, kg} &= \frac{1}{2} \rho A C_L v^2 = \frac{1}{2} \times 0,00238 \times 3 \times 1 \times (146,67 \times 146,67) = \\ &= 34,9 \text{ kg (76,8 lb)} \end{aligned}$$

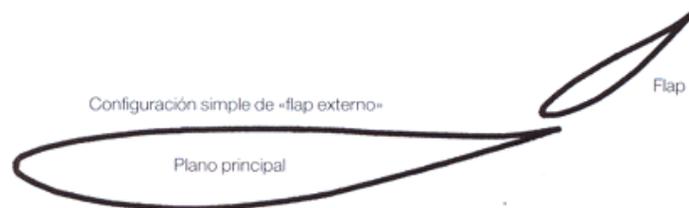
Así que, incluso si el alerón está trabajando en aire «sucio», en la parte trasera del coche, y se tienen en cuenta las pérdidas de carga que supone esto, se puede esperar que un alerón de un solo elemento genere unos 35-40 kg de carga en su ángulo máximo a 160 km/h. Esto se puede considerar como una cifra más realista que la calculada utilizando el valor  $C_L$  máximo teórico de una fuente tal como Abbott y von Doenhof.

## Alerones de dos elementos

Si se necesita una mayor cantidad de carga aerodinámica de la que se puede obtener con un alerón de un solo elemento, y además se puede tolerar la consiguiente resistencia adicional, entonces puede ser necesaria la utilización de alerones más complejos. De la ecuación básica de carga aerodinámica, donde vimos que la

carga =  $\frac{1}{2}\rho A C_L v^2$ , es evidente que a cualquier velocidad dada, la carga puede aumentarse aumentando el valor de A, el área del ala, o de  $C_L$ , el coeficiente de sustentación. En la mayoría de las categorías de competición, los reglamentos definen el tamaño máximo de los alerones, y tiene sentido explotar toda la libertad permitida lo máximo posible, hasta el punto de llegar a perjudicar la eficacia del alerón. Así que, por ejemplo, un ala debe tener toda la envergadura que el reglamento permita. Pero si la dimensión de la cuerda no está especificada en el reglamento, ¿debería el alerón tener la cuerda más grande que pueda admitir el coche? No necesariamente, ya que una relación de aspecto baja (envergadura dividido por cuerda) hace que el alerón sea menos eficaz en términos de sustentación y resistencia (aunque, curiosamente, puede ayudar a retrasar el punto de pérdida más que una relación de aspecto grande). Un modo más eficaz de aumentar la carga aerodinámica puede ser mantener una relación de aspecto moderada pero intentar aumentar el  $C_L$ , y esto se puede conseguir utilizando un perfil de un solo elemento con mayor curvatura, o, si se necesita mucha más carga, usando un alerón de varios elementos.

El diseño de varios elementos más sencillo es, por supuesto, el alerón de dos elementos, donde el *plano principal* va acompañado de un *flap* (fig. 4.7). Si se añade un flap a un alerón de un solo elemento en la posición apropiada, pueden ocurrir una serie de cosas. Primero, se aumenta el área de planta, que, como hemos visto, permite la creación de más carga aerodinámica. Segundo, la curvatura efectiva del ala de dos elementos se ve aumentada, y también aumentará la carga a un cierto ángulo de ataque. Y tercero, la crucial interacción entre el plano principal y el flap surgida por la posición relativa del uno con el otro, ayuda a la generación de más carga mediante la modificación del flujo de aire en el lado de la succión del alerón.



**Figura 4.7.** Un alerón de dos elementos, con una configuración de «flap externo».

Existen dos geometrías comunes para alerones de dos elementos, y se conocen como la configuración del «flap externo» (fig. 4.7), y la del «flap de ranura», conocido también como «flap tipo Fowler» (fig. 4.8).

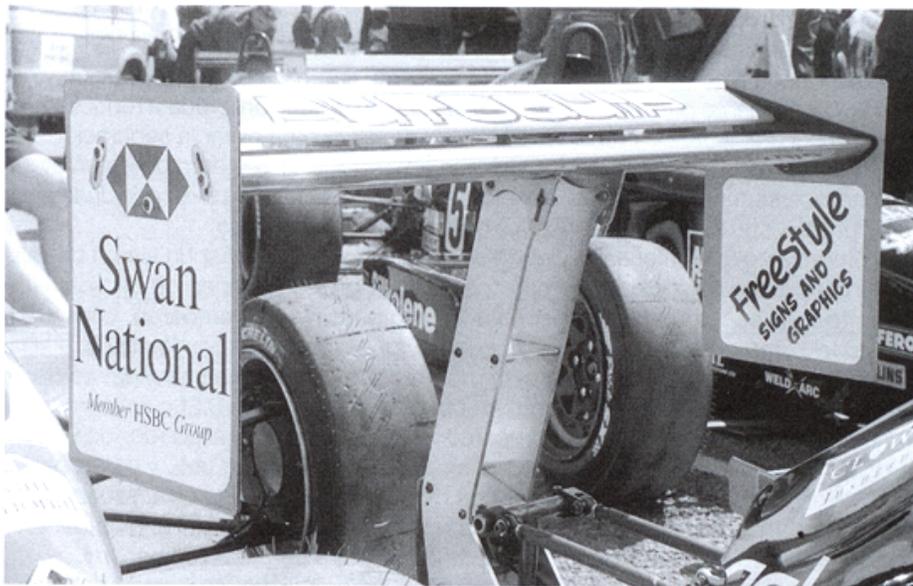
El flap de ranura, más complejo por su forma, y por tanto más difícil de construir, parece derivado de aplicaciones aeronáuticas, donde el flap es una pieza móvil que puede subir y bajar, así como rotar. La forma del plano principal es dictada tanto por la capacidad de albergar o «anidar» el flap dentro del perfil general del plano principal en el modo de poca resistencia, con el flap casi horizontal, como por las consideraciones del flujo de aire cuando se encuentra más elevado. El flap externo utiliza un plano principal más sencillo, y resulta más fácil de construir. Puede parecer que



Figura 4.8. Un alerón de dos elementos, con una configuración de «flap de ranura» o «flap Fowler».

existan ventajas en una u otra configuración. Sin embargo, hay algunas pruebas de que se consiguen mejoras en el  $-C_L$  y el  $C_x$  con la configuración Fowler pero, no obstante ello, la tendencia hoy en día es la de utilizar la configuración del flap externo.

Existen, sin embargo, ciertos puntos con respecto al tamaño del flap y, especialmente, con respecto a la posición que es importante mencionar. El tamaño del flap, o sea la dimensión de su cuerda, es generalmente del orden del 25-30 % de la cuerda *general* (plano principal más flap),  $C$ . También se utilizan cuerdas de flap mayores, del orden del 30-40% para generar incrementos en el coeficiente de carga aerodinámica. La forma del flap es normalmente una versión a escala de la forma del plano principal, pero también puede ser un perfil sencillo de la NACA y funcionar perfectamente. Las consideraciones prácticas pueden dictar que sea algo más ancho



Alerón de dos elementos en el Van Diemen RF97 de Fórmula Renault.

que el plano principal, en relación con su propia dimensión de cuerda, con el fin de darle una mayor rigidez.

Sin embargo, la consideración más importante con un alerón de dos elementos es la posición del flap en relación con el plano principal. La clave, aquí, es formar una ranura estrecha entre el borde de fuga del plano principal y el borde de ataque del flap. Para esto hace falta que se solapen, con el flap situado encima del borde de fuga del plano principal como elemento inductor de carga aerodinámica. El tamaño del espacio entre el plano principal y el flap es normalmente de 1-2 %  $c$ , y el solapamiento entre el borde de ataque del flap y el borde de fuga del plano principal, aunque no resulta crítico, es normalmente de un 1-4 %  $c$ . Sin embargo, el punto más crítico de todos es que la forma de la ranura debe ser convergente, o sea, que se va estrechando desde su apertura hasta su salida. El único modo de optimizar la geometría de un alerón y un flap es realizar muchas pruebas, preferiblemente en un túnel de viento. Pero las cifras de arriba permiten una aproximación bastante eficaz al tema.

Frecuentemente, se dice que la función de un flap es no sólo aumentar el área y la curvatura para mejorar la carga aerodinámica, sino también permitir que algo del aire de la zona de alta presión del alerón pase por la ranura hasta la zona de succión. Forzando al aire a pasar por una ranura convergente, éste se acelera, y así ingresa en la zona de succión con mayor energía y menor presión. Esto ayuda a controlar la capa límite y a retrasar la separación del flujo que, a cambio, debería permitir un mayor ángulo de ataque antes de que el ala entrara en pérdida. Sin embargo, ésta es una creencia popular errónea, ya que éste no es el mecanismo fundamental por el cual un flap aumenta la sustentación.

El efecto de montar un flap es demasiado grande para que esto sea un mecanismo primario de aumento de la sustentación.

La realidad es que ocurren al mismo tiempo una serie de fenómenos. El flap, en realidad, induce a que la velocidad del aire aumente sobre las zonas de succión y de presión del elemento principal; en el caso de la zona de succión ayuda a reducir la inclinación del gradiente de presión adverso, lo que sirve para evitar la separación del flujo. De manera que la combinación del área adicional, el incremento de la curvatura y la beneficiosa modificación del campo del flujo alrededor de plano principal sirve para conseguir un aumento significativo de la carga aerodinámica.

Entonces, ¿qué criterios se deben seguir a la hora de diseñar un alerón de dos elementos? Bien, algunos de los criterios básicos de los alerones de un solo elemento todavía son aplicables al diseño del plano principal. Sin embargo, unas secciones del plano principal más anchas pueden funcionar mejor con los flaps, y si la cuerda del flap se encuentra en su extremo más alto de la gama preferida, es decir de 30 a 40 %  $c$ , entonces, con un grosor del plano principal de 0,20 $c$  se logrará un aumento significativo en la carga comparado con un grosor de alrededor de 0,10 $c$ . La cantidad de curvatura en el plano principal dependerá de su uso, y es probable que esté entre el 5 y 15 %  $c$ , para usos con mucha carga aerodinámica, situado quizás un poco más adelante o por la mitad de la cuerda. El ajuste del ángulo del flap tendrá el efecto de alterar la parte trasera de la curvatura del alerón en general.

En lo que se refiere al propio flap, como ya hemos dicho, su cuerda debe estar alrededor del 30 %  $c$ , y el grosor podría ser, en términos relativos, mayor que el

del plano principal. La posición del grosor máximo del flap está a menudo bastante hacia delante, alrededor de  $0,20c$ , lo que puede ayudar a crear la forma convergente de la ranura entre el flap y el plano principal gracias a la producción de una curvatura desde el borde de ataque del flap hasta su superficie inferior. Pero la lógica dice que los mismos criterios que se aplican a los alerones de un solo elemento en lo referente a su forma y prestaciones deberían poder aplicarse a los flaps y sus prestaciones. Parecería razonable entonces suponer que un flap más curvado servirá para generar más carga aerodinámica que uno con menor curvatura. Además, el uso de un flap con más curvatura puede hacer que sea más fácil conseguir la forma convergente de la ranura, que en el caso de que el flap tuviera un perfil plano. De modo similar, si existe un grosor óptimo para un elemento principal, que, como hemos visto, puede ser más ancho en el caso de un ala de dos elementos que en el de uno solo, entonces lo mismo podría decirse del flap, con la aclaración de que el flap, probablemente, acabaría por ser relativamente más ancho con el fin de resistir adecuadamente las cargas sin romperse. El ángulo máximo de inclinación del flap en relación con la línea de cuerda del plano principal será determinado por las pruebas, pero probablemente no supere los  $40^\circ$ . A medida que la carga aerodinámica aumenta con ángulos de flap más pronunciados, los incrementos se volverán cada vez más pequeños, y mientras la resistencia aumenta, la eficiencia disminuirá. En términos aeronáuticos, el ángulo de ataque general que puede utilizarse no es tan pronunciado como puede serlo con un alerón de un solo elemento, aunque lo que es posible en un coche de carreras puede no servir de mucho para la aeronáutica práctica. El único modo de determinar esto de modo satisfactorio es realizando pruebas, bien en un túnel de viento o, probablemente, en la pista. Pero como punto de partida, quizá sería inteligente asumir que el ángulo de ataque máximo, en general, es de  $12^\circ$ , y que al menos con esto se evitará entrar en pérdida. Los ángulos mayores que éste, probablemente, no serían tolerables para su coche de carreras.

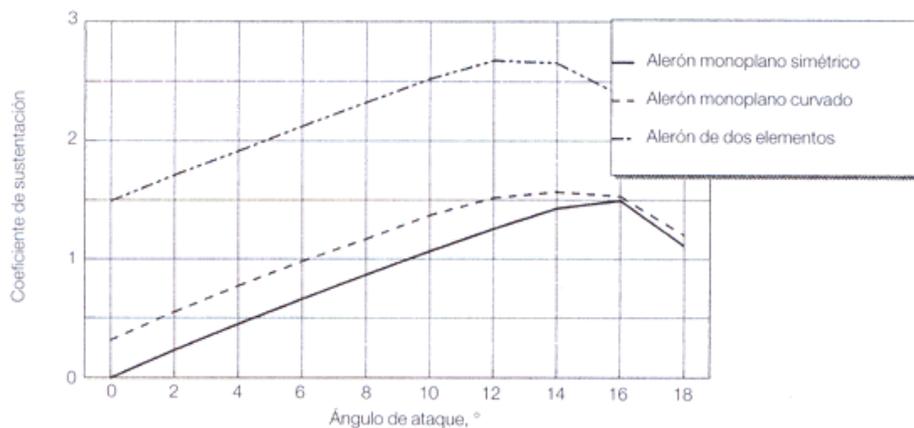


Figura 4.9. Curva de sustentación de un alerón de dos elementos.

El aumento de los valores disponibles de  $-C_L$  utilizando un alerón de dos elementos es considerable, y es posible que el  $-C_L$  máximo sea casi el doble (fig. 4.9 y apéndice 1). Sin embargo, como ya anotamos antes, la entrada en pérdida puede ocurrir con un ángulo de ataque algo menor en un alerón con flap, efecto que disminuye según aumenta su desviación. A pesar de todo, se puede conseguir un aumento sustancial en la carga aerodinámica en proporción directa al aumento del valor de  $-C_L$ . El flap, además, proporciona un método más sencillo de ajustar los alerones para una puesta a punto afinada del equilibrio del coche.

### Alerones de varios elementos: más flaps y estadísticas

Se pueden obtener valores  $-C_L$  mayores si se añaden aún más flaps a un alerón. La configuración de «doble flap ranurado», en la que se colocan dos flaps sobre el borde de fuga del plano principal, es una extensión lógica de la configuración de un solo flap, y sirve para aumentar la curvatura del ala incluso más (fig. 4.10). Las geometrías de los dos flaps se muestran a menudo en textos aeronáuticos con bastantes diferencias el uno del otro, con el primer flap un poco más pequeño y ancho que el segundo, y algunos coches de carreras han adoptado este principio. Sin embargo, la importante forma del huelgo de las ranuras entre todos los elementos del alerón aún resulta vital, y los coches de carreras con dos flaps utilizarán, con toda probabilidad, una construcción de dos flaps similares si no idénticos. El tamaño de la ranura entre el plano principal y el flap delantero, y entre éste y el segundo flap, puede ser similar o, si no, el primero debe ser más grande que el segundo. Los datos aeronáuticos nos dan una mezcla de información, pero esto puede ser así porque la geometría de los alerones utilizados en los aviones puede ser alterada en vuelo, y los espacios serán diferentes dependiendo del ángulo del flap desplegado. Sin embargo, en un coche de carreras, los flaps deben estar fijos una vez que el coche deja los boxes, y las posiciones de los flaps y los espacios entre ellos deben ser elegidos de antemano. A pesar de todo, esto permite una mejor forma de optimización de los espacios que en un avión, en el que se tienen que considerar aspectos como el ocultamiento de los flaps. Frecuente-

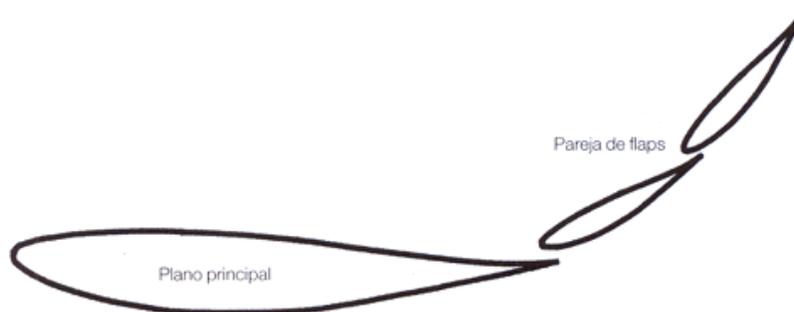
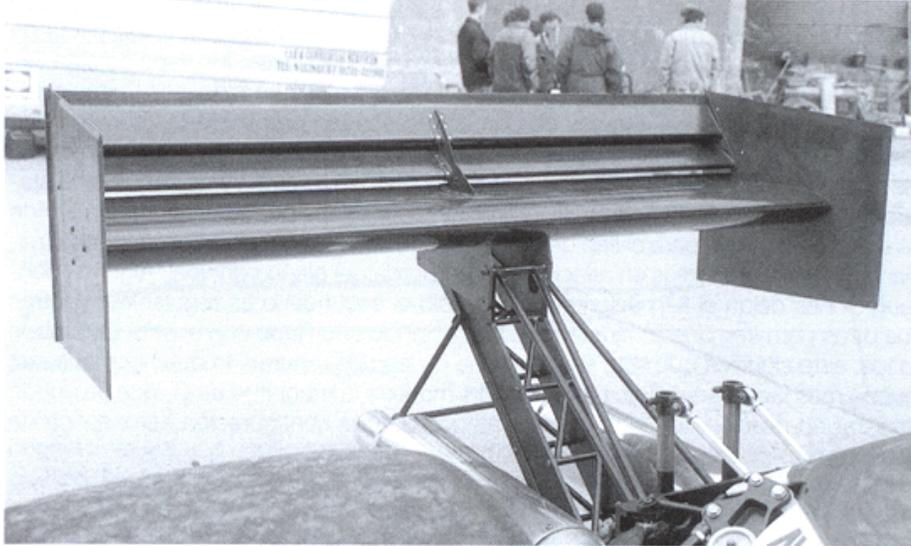


Figura 4.10. Un alerón de tres elementos.

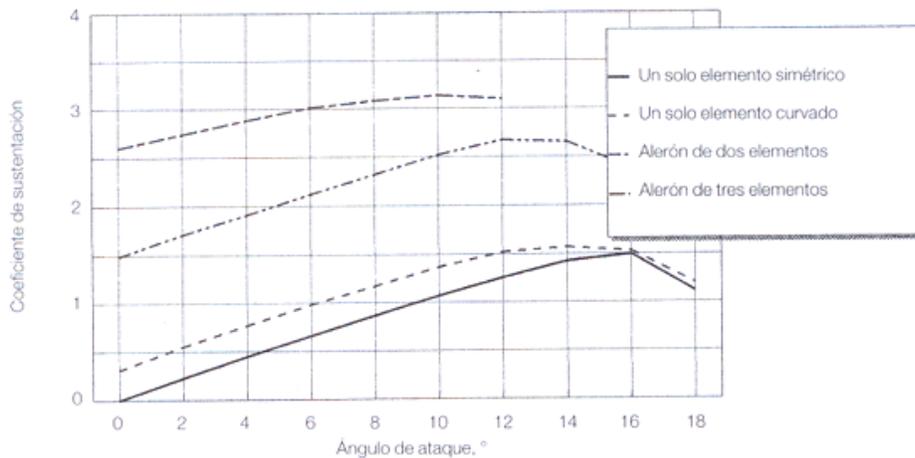


Alerón de tres elementos de un Gould-Rait GR37 de montaña.

mente, se puede ver que el segundo espacio es más pequeño que el primero. La mejor configuración sólo se alcanzará después de muchas horas de pruebas, aunque, sin la ayuda de un túnel de viento o algún aparato medidor, todas las pruebas que realicemos sólo servirán para tener un estimativo. En este punto, y en ausencia de cualquier información, es mejor configurar los dos espacios entre los flaps a la misma distancia sugerida para el alerón de un solo flap. Esto puede ser un buen comienzo.

La dimensión combinada de la cuerda de los dos flaps podría situarse, según los textos aeronáuticos, entre el 30 y 40 % de la cuerda total del ala, así que en términos relativos, los flaps, aquí, son más pequeños individualmente que en el caso de un alerón de dos elementos, donde el flap tenía un tamaño del 30 % de la cuerda total. Sin embargo, uno tiene que mirar a las diferentes categorías de competición para ver que los respectivos reglamentos en cada fórmula tienen un marcado efecto en el diseño de los coches. Los coches de Fórmula 1 tienen cuerdas de plano principal muy cortas en relación con las cuerdas de sus flaps, y es el resultado de la fuerte restricción en las dimensiones de la cuerda total. Los coches de la Indy tienen una serie de reglas diferentes (en realidad, diferentes conjuntos de reglas, dependiendo del tipo de circuito donde corran), y en esta categoría, los planos principales para los circuitos ovales y urbanos cortos tienen una cuerda mucho más profunda. Esto sugiere que mientras el técnico esté preparado para optimizar la configuración en las diferentes circunstancias, no existen reglas fijas preestablecidas a seguir. Una vez más, hay pruebas de que una sección del plano principal más ancha produce mejores resultados cuando trabaja con flaps dobles que una más fina, y los valores de  $-C_L$  que tienen hacia un 18 % están asociados con un incremento gradual del  $-C_L$ .

En términos de mejoras de las prestaciones, la adición de un segundo flap hace que aumente de forma sustancial el valor del  $-C_{L_i}$ , y se pueden alcanzar cifras de  $-C_{L_i} = 3,0$  con esta configuración. Pero en términos generales, los flaps adicionales consiguen aumentar la carga aerodinámica de forma más reducida. Los textos aeronáuticos indican que los ángulos de pérdida no son tan pronunciados como en los alerones de un solo elemento. Sin embargo, en los alerones de los coches de carreras (considerando el plano principal y los flaps) pueden llegar a verse ángulos de ataque de hasta el 20 %. El ángulo de inclinación de los flaps puede estar en una banda de entre los 25 a 30° para el flap delantero y entre los 30 y 70° para el secundario, midiendo todos los ángulos en relación con la cuerda del plano principal. Algunas configuraciones dejan el flap delantero fijo, y sólo el secundario es regulable, mientras que otras permiten que se ajusten a la par, estando uno fijado con el otro. En ambos casos, esto significa que sólo se altera una de las dos ranuras, lo que hace que sea mucho más fácil manejarlos. La figura 4.11 muestra la magnitud de  $C_L$  que se puede alcanzar en relación con el ángulo de ataque de una configuración aeronáutica de doble flap (apéndice 1).



**Figura 4.11.** Curva de sustentación de un alerón de tres elementos.

Para lograr más carga aerodinámica, se pueden añadir incluso más flaps, y en un caso extremo, conocido como la configuración del flap de la «Persiana veneciana», se llegan a añadir, incluso, cuatro flaps al plano principal. Está claro que optimizar el rendimiento de tal configuración ocupará mucho tiempo, ya que habrá muchas opciones que considerar. Este alerón es mejor dejárselo a los profesionales para que busquen las mejores soluciones. Sin embargo, como indicación de lo que puede conseguirse, en algunos monoplazas de la Indy de 1997 el flap trasero había sido inclinado a un ángulo superior a 90°, ¡con el borde de fuga orientado hacia la parte delantera del

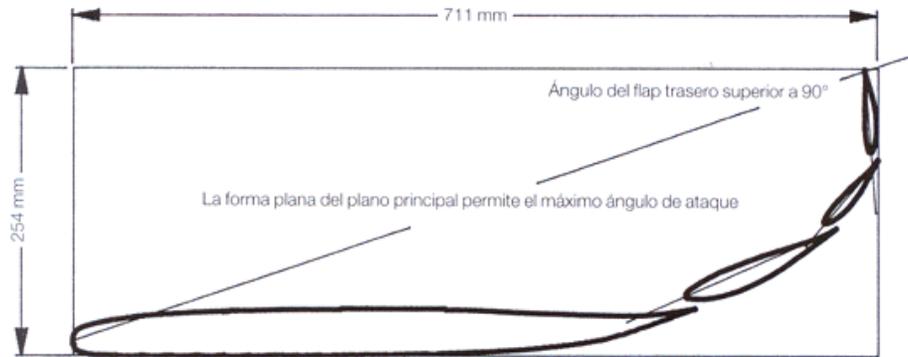


Figura 4.12. Un alerón de la CART de 1997.

coche! Ésta era una configuración de «máxima sustentación y olvídate de la resistencia» (fig. 4.12). Este peculiar perfil general fue el resultado de las restricciones dimensionales en el reglamento, que establecían que, en una vista lateral, el alerón debía entrar en una caja de 711 × 254 mm. De este modo el elemento principal era bastante plano con un borde de ataque bajo para conseguir el ángulo de ataque más inclinado posible, y la curvatura estaba, claramente, desplazada hacia atrás.

Mencionamos anteriormente que los alerones con mucha carga aerodinámica pueden sufrir separación del flujo en su borde de ataque, y que puede ser necesario un cambio en la geometría delantera del alerón para evitar que esto suceda. Un modo de lograr esto, que evita tener que modificar el plano principal, es el uso de una *aleta (slat)* en el borde de ataque (fig. 4.13). Este tipo de dispositivo puede verse en las alas de muchos aviones de transporte de pasajeros actuales.

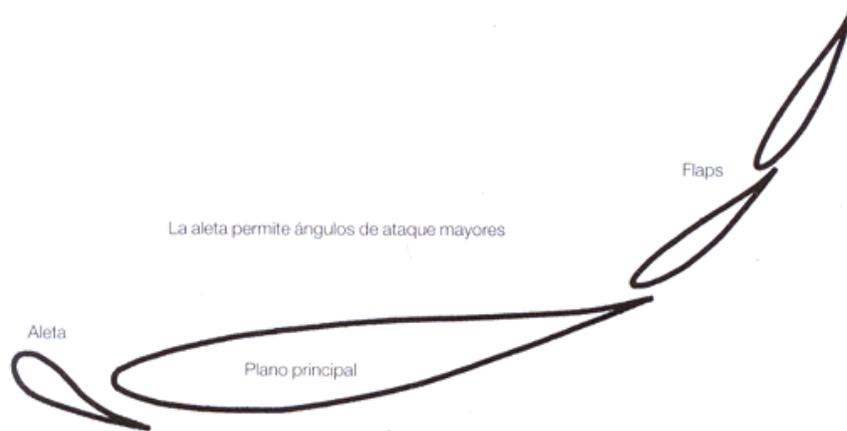


Figura 4.13. Un alerón de tres elementos con una aleta en su borde de ataque.

Se trata de un elemento que es bastante parecido a un flap, pero que está situado en el lado contrario del plano principal, en realidad, por debajo del borde de ataque. Hace el efecto de añadir «perturbación» por delante del ala, lo que reduce la velocidad en la parte inferior de la zona de succión, y con ello la posibilidad de separación que puede tener lugar como consecuencia de un ángulo de ataque muy pronunciado. La aleta, además, añade un incremento de sustentación por sí misma (fig. 4.14). El beneficio de una aleta sólo comienza a tener efecto con ángulos pronunciados y, además, se puede retrasar la entrada en pérdida hasta un ángulo mayor. Por lo tanto, dicho elemento permite que se cree un mayor  $-C_L$  antes de entrar en pérdida, y también se obtiene un aumento en la carga aerodinámica.

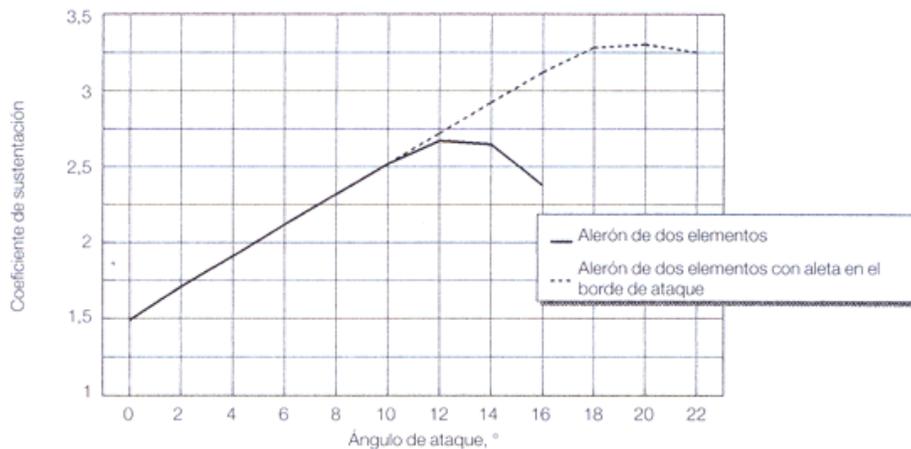
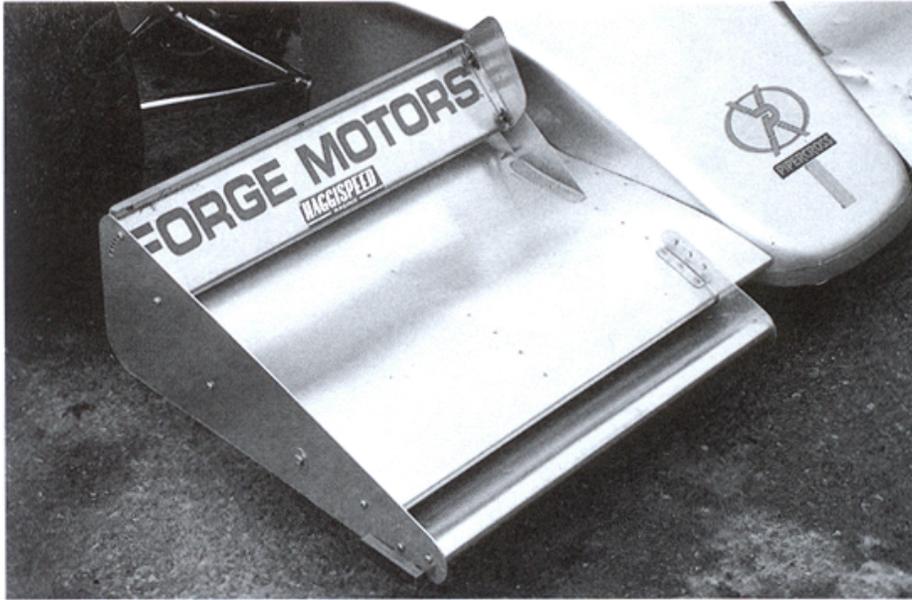


Figura 4.14. Curva de sustentación de un alerón con aleta.

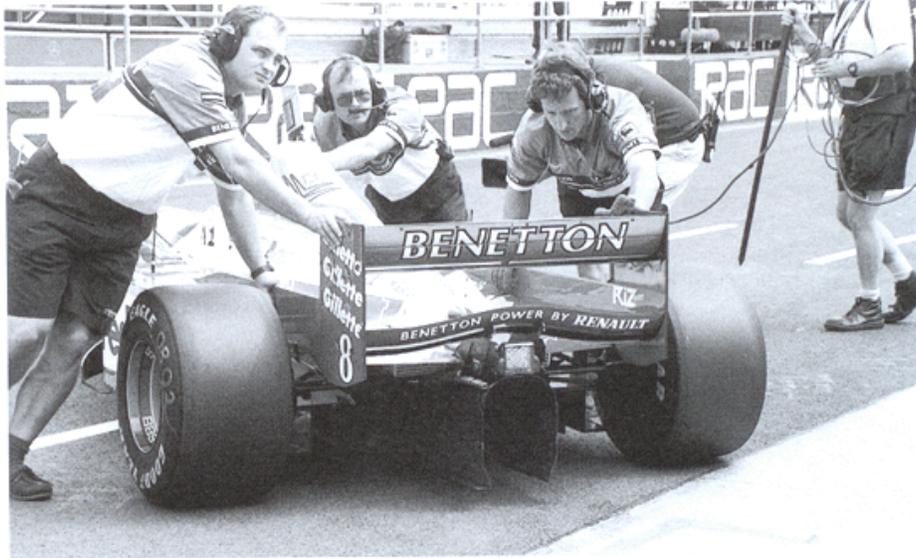
Los datos de los valores de  $-C_L$  que se pueden obtener con estos alerones extremos son bastante escasos, como era de esperar, ya que sólo son desarrollados por los profesionales del mundo del motor, una industria notoriamente secreta. Se mencionan cifras de 4, 5 e incluso 6, pero quizás un valor más realista pueda obtenerse indirectamente de un texto que trataba sobre las cargas estructurales que actuaban sobre el chasis de un Fórmula 1, en este caso de un Williams. La carga máxima para el alerón trasero era de unos 6.000 newtons (612 kg) e, insertando esta cifra en la ecuación de la sustentación, junto con una velocidad máxima de 320 km/h, y con un área aproximada de  $1,0 \times 0,3$  m, produce un valor  $-C_L$  de 3,7. Así que podemos asumir con seguridad que los coeficientes de sustentación del alerón trasero de 3,5, e incluso que de un máximo de 4, se puede conseguir con un alerón de varios elementos y múltiples planos principales visto en esa categoría.



Alerón delantero con flap y lámina en el borde de ataque.

## Alerones múltiples

Esto nos introduce en la materia de los alerones múltiples, o sea, con dos o más planos principales. El primer avión que realmente voló fue un biplano, así que el concepto de alas múltiples superpuestas no es precisamente nuevo. El beneficio aparente de incrementar el área del ala es la razón obvia para utilizar una configuración biplanar, especialmente cuando existen pocos lugares en los que fijar los alerones. Pero existe una desventaja que surge de este tipo de configuración. Basta pensar que el plano superior genera una zona de baja presión en su parte inferior. Ahora, imaginemos lo que ocurre cuando se coloca otro alerón más abajo. La zona de baja presión bajo el plano superior actúa sobre la superficie del ala inferior, y esto es tan útil como intentar levantarse uno mismo del suelo tirando de los cordones de los zapatos. Entonces, ¿por qué algunos utilizan alerones de múltiples planos? Pues porque no es tan malo como parece. Desde luego, existe interferencia entre los planos, y el resultado es que no se consigue el doble de carga aerodinámica sólo por tener dos alas superpuestas cuando éstas se encuentran relativamente cerca. Sin embargo, el efecto combinado puede dar beneficios, y conseguir más carga aerodinámica que con un solo plano. Efectivamente, con una separación vertical igual a la dimensión de la cuerda, se piensa que dos alas idénticas producirán, por lo menos, el doble de carga que una sola. Pero existen otros posibles beneficios en la configuración múltiple. El primero es que, aunque la eficacia del alerón, determinada por la relación de carga/resistencia, puede empeorar con el uso –insólito– de tres o cuatro



Alerón de doble plano en el Benetton B197 de Fórmula 1.

planos, el efecto del flujo de aire es tal que podría tolerar un incremento en el ángulo de ataque general, permitiendo generar más carga aerodinámica antes de que el alerón entre en pérdida. Y segundo, el plano inferior puede situarse de modo que interactúe de modo favorable con el flujo de aire del fondo plano del coche, ayudando y aumentando la producción de baja presión. De este modo, mediante el cuidadoso diseño y desarrollo de este aspecto se puede conseguir un aumento significativo en la cantidad de carga aerodinámica.

### Elementos secundarios: derivas laterales y perfiles Gurney

Existen dos apéndices casi siempre presentes que van fijados a los alerones, que tienen un profundo efecto en las prestaciones, y que no pueden ser olvidados: las derivas laterales y los flaps Gurney (o nolders). Las derivas no están ahí sólo para esconder la forma del perfil de un alerón para que no lo vea la competencia, o para poner el nombre del patrocinador. En realidad, tienen un propósito muy valioso, que es el de incrementar la carga aerodinámica del alerón de forma considerable, quizás hasta un 30 %, sobre el valor que se logra sin ellas. Sin derivas, la diferencia de presión de aire entre la parte inferior y superior de un alerón hace que el aire en la zona de alta presión intente escapar a la zona de baja presión, y se derrama por las alas con movimientos diagonales (creando el característico patrón de vórtices). Esto causa una pérdida de carga aerodinámica. Al incorporar las derivas, se reduce o se evita que ocurra este movimiento sobre la superficie del ala, lo que ayuda a mantener la dife-

rencia de presión por encima y por debajo (fig. 4.15). Las derivas necesitan ser bastante grandes para ser efectivas, aunque generalmente no existe mucho espacio para usar una deriva muy grande por encima del alerón trasero si éste, de por sí, ya se encuentra lo más arriba que el reglamento permite. Sin embargo, normalmente se tiene mucho espacio para extender las derivas hacia el suelo, y muchas veces las propias derivas constituyen la principal sujeción al coche, o por lo menos suelen servir como estabilizadores. Los alerones delanteros no suelen permitir grandes derivas debido a su proximidad al suelo.

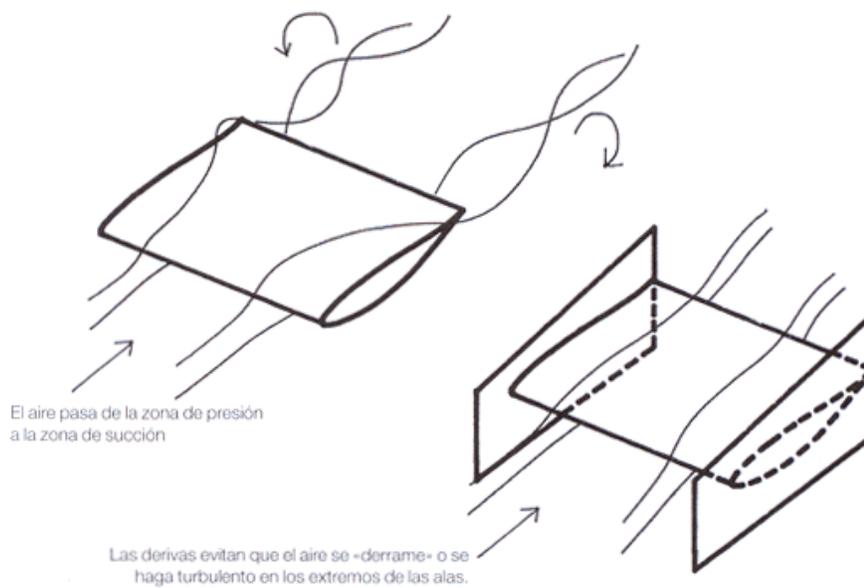
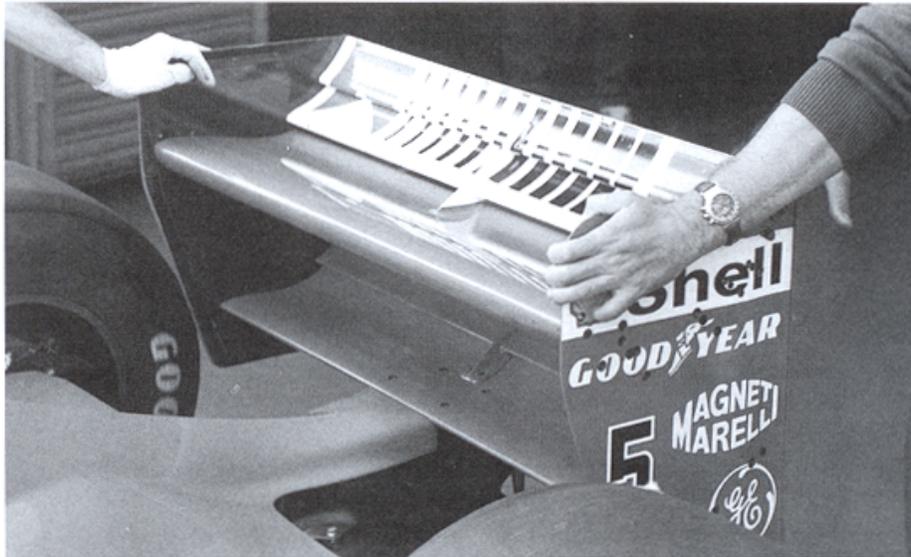
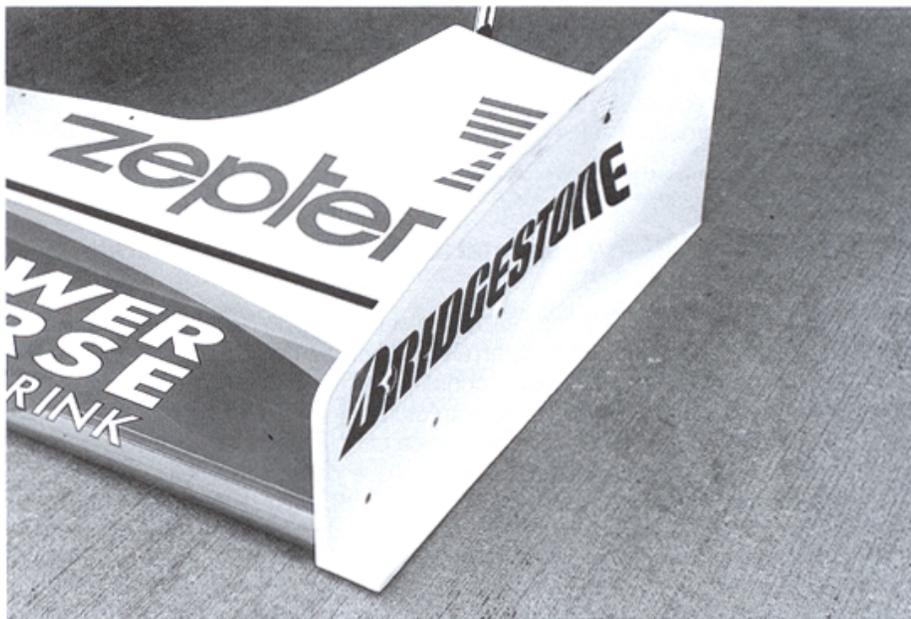


Figura 4.15. El efecto de las derivas.

El «flap» o perfil Gurney es una pequeña aleta en ángulo recto fijada al borde de fuga del elemento situado más atrás de un alerón. Este elemento, utilizado por primera vez por el americano Dan Gurney, quien contestó siempre a los competidores que le preguntaban que sólo servía para «fines estructurales» con el fin de mantener el secreto, es un medio de añadir carga aerodinámica casi sin aumentar la resistencia. Algunas investigaciones recientes han demostrado que los flaps Gurney forman un par de vórtices invertidos justo por detrás de ellos (fig. 4.16), los cuales tienen el efecto de añadir un componente vertical a la velocidad del borde de fuga. Esto desvía el flujo hacia arriba e incrementa la carga aerodinámica. El efecto es el mismo que el de añadir más curvatura a un alerón. Una de las principales ventajas prácticas de los Gurney es que se pueden poner y quitar rápidamente, o ser reemplazados por otros de diferentes tamaños, y por esto, son un elemento importante a la hora de afinar la puesta a punto.



Derivas laterales en el alerón trasero de un Ferrari F310B.



Derivas laterales en el alerón delantero de un Arrows A18.

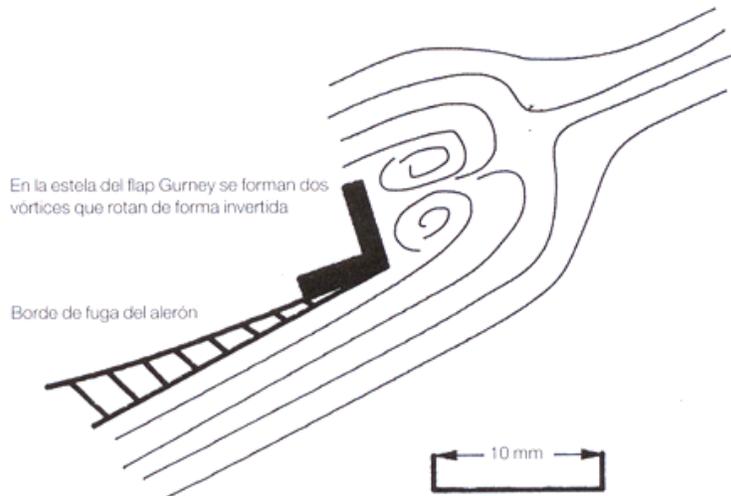
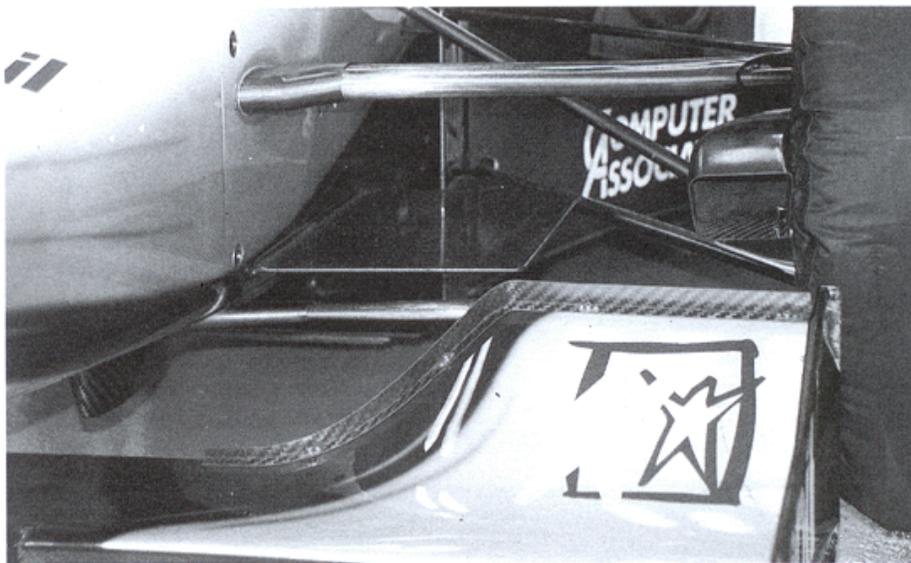


Figura 4.16. El flap Gurney.

Los perfiles Gurney pequeños dan lugar a importantes aumentos en la carga aerodinámica a cambio de un mínimo incremento de la resistencia, mientras que los más grandes proporcionan un pequeño aumento de la carga y uno mayor de la resistencia. Por esto, existen limitaciones lógicas en este apartado, y los flaps Gurney

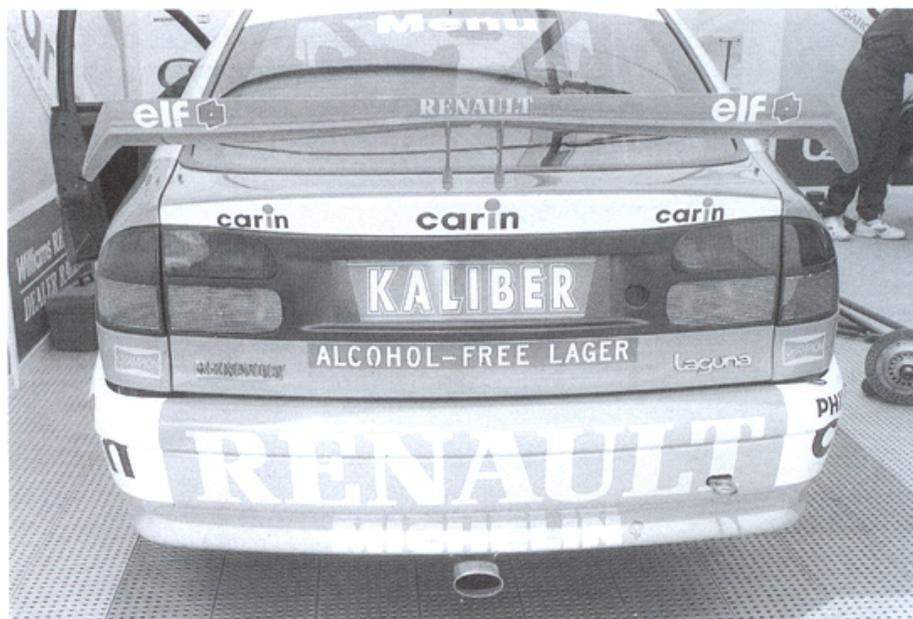


Flap Gurney en el alerón delantero del McLaren MP4/12.

son normalmente de menos de un 5 % de la altura de la cuerda. Cuanto más pequeño sea, más efectivo será, y un Gurney de alrededor de un 2 % de la cuerda puede aumentar hasta 0,30 el  $C_L$  con un mínimo aumento de la resistencia. Un experimento llevado a cabo por el autor con un alerón trasero de tres elementos de 500 mm en un monoplace de montaña en el túnel de viento de MIRA demostró que un perfil o nolder Gurney de 9 mm daba una carga aerodinámica adicional de 8,2 % con sólo 2,8 de resistencia extra.

## El ambiente de trabajo

Los alerones en los coches de carreras tienen que funcionar en unas condiciones menos que ideales comparados con los de un avión, cuyas alas trabajan en lo que se considera aire «limpio». Incluso los alerones delanteros de los coches, aunque siempre menos que los traseros, se ven afectados por la presencia adversa de las ruedas girando cerca de ellos, las piezas de la suspensión y el propio morro del coche. El alerón trasero debe trabajar con aire que ha sido «revuelto» por todas las protuberancias por delante de él, incluyendo las ruedas, la carrocería y los espejos, la cabeza del piloto, el arco de seguridad y el capó del motor. En el caso de un turismo de carreras, el alerón trasero se encuentra parcialmente bloqueado por la carrocería del coche y la calidad del flujo que le llegue dependerá de la forma del techo y de la



Complejo alerón trasero del Renault Laguna de Super Turismo.

luna trasera. Las complejas formas, que se ven en la elevación delantera o trasera, del alerón trasero de un Super Turismo demuestran cómo los diseñadores han intentado arreglárselas con las variaciones en la calidad del flujo de aire que pasa por las diferentes partes de la envergadura de un alerón.

## Efecto suelo y alerones delanteros

Muchas de las influencias sobre un alerón mencionadas arriba son esencialmente negativas, y van en contra de la carga aerodinámica que genera, y se alejan de la ventaja teórica que deberán generar. Pero existen influencias que tienen un marcado efecto positivo en la carga producida por los alerones delanteros, una de los cuales es el «efecto suelo». La carga aerodinámica producida por un alerón separado del suelo aumenta según el alerón se acerca al suelo. La causa puede ser explicada pensando en este sistema como un tubo Venturi análogo: la reducción de presión se vuelve mayor entre el alerón y el suelo de lo que lo haría debajo del alerón con el aire pasando libremente. El efecto se vuelve mayor cuanto más cerca está, hasta que se encuentra tan cerca que el efecto se invierte y la carga aerodinámica cae de nuevo. Esto ocurre cuando la capa límite interfiere con el suelo y bloquea el flujo que pasa por debajo del alerón (fig. 4.17).

Para intentar definir este efecto en números, un alerón operando en la zona de los 50 mm de distancia al suelo puede producir el doble de carga aerodinámica que produciría a una distancia considerable del suelo en zona de flujo «libre»; normalmente se considera que esta altura de flujo libre no debe ser menor que la dimensión de la cuerda. Esto se vuelve muy importante a la hora de seleccionar un perfil de ale-

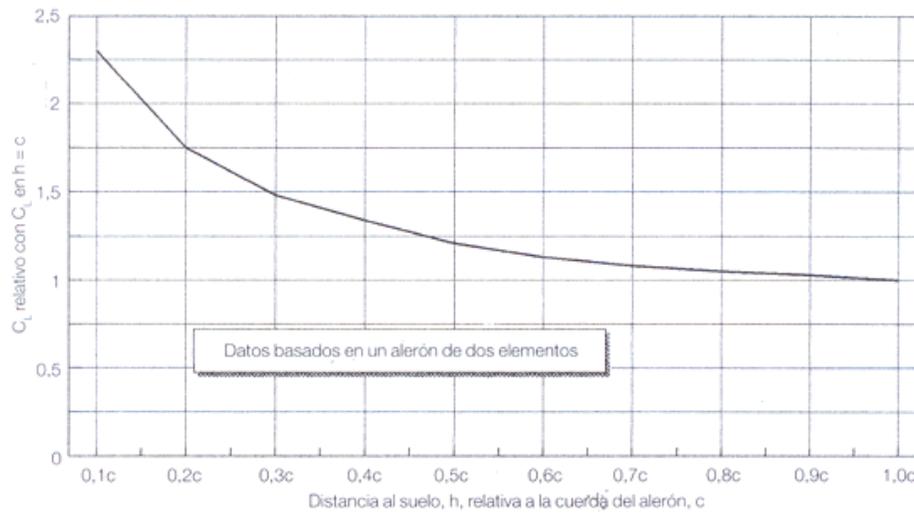
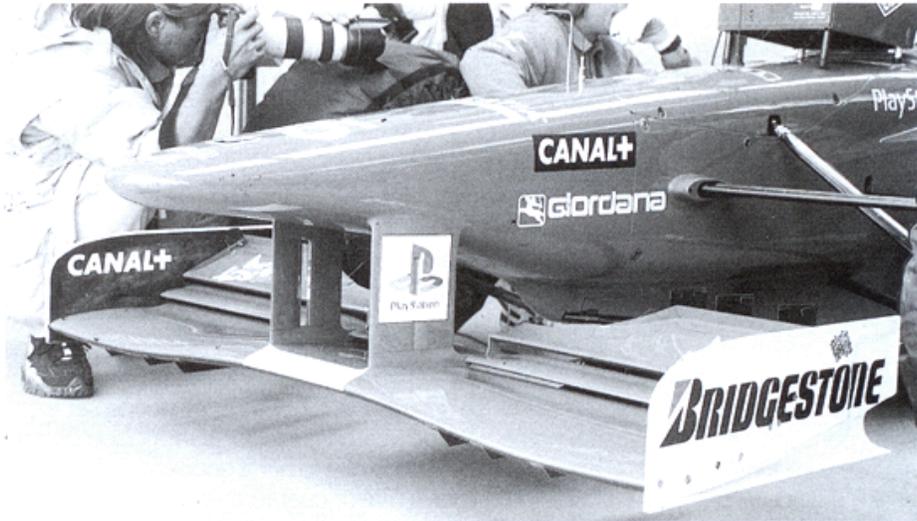


Figura 4.17. Efecto suelo.



Curvatura de la envergadura en el alerón delantero del Prost JS45.

rón delantero para equilibrar el alerón trasero, como veremos más adelante. Una comparación interesante es que el valor  $C_L$  con 50 mm de distancia del suelo puede ser hasta un 50-60 % mayor que el generado a 152 mm. Esto demuestra la sensibilidad del  $C_L$  con respecto a la proximidad del suelo  $\gamma$ , y, naturalmente, nos lleva a echar un vistazo rápido a la sensibilidad al cabeceo con respecto a los alerones delanteros.

En una situación dinámica, un coche se balancea continuamente, cabecea y varía el ángulo de orientación de su eje longitudinal en respuesta a las cargas mecánicas a las que es sometido y, según aumenta y disminuye su velocidad, la carga aerodinámica sobre el mismo sube o baja. Estos efectos se combinan para producir cambios en la altura del coche y en la actitud de cabeceo (el morro sube o baja), lo que puede tener una marcada influencia en la proximidad del alerón delantero con respecto al suelo, así como en su ángulo de ataque. Esto, a su vez, crea cantidades de carga aerodinámica variables, y el resultado es que el coche se vuelve impredecible, e incluso inestable, ya que la variable generación de carga sirve para confundir al piloto y le hace perder confianza en el coche. Existe una manifestación incluso peor de la sensibilidad al cabeceo, que puede ocurrir cuando los alerones delanteros se encuentran muy pegados al suelo. En esta situación, los alerones actúan en lo que puede llamarse efecto suelo extremo. En circunstancias que causan una reducción excesiva del espacio del alerón delantero con respecto al suelo, el alerón puede entrar en el área en la que la capa límite interactúa con el suelo, y bloquea el flujo de aire bajo el alerón. Esto causa que la carga decrezca rápidamente, con lo que el morro del coche vuelve a elevarse, permitiendo el paso del aire de nuevo, lo que crea otra vez carga aerodinámica y vuelve a pegarlo al suelo...

Esta extraña oscilación es conocida como «porpoising» o cabeceo descontrolado, y fue un problema serio de la era de efecto suelo de los años 80. Por esto, la sensibilidad al cabeceo y los métodos para mejorar sus efectos, utilizando sistemas de suspensión activa y, hoy en día, sistemas de amortiguación que permitan el ajuste independiente de velocidades de pistón altas y bajas con el fin de controlar las reacciones a altas velocidades, se encuentran en la parte más alta de la lista de prioridades de los diseñadores.



**Figura 4.18.** Vista frontal de un alerón delantero complejo.

Se han conseguido aún más mejoras en la reducción de la sensibilidad al cabeceo mediante el uso de alerones delanteros con complejas formas a lo largo de las envergaduras. Muchos alerones delanteros de monoplasas de las altas categorías tienen cierto grado de curvatura o «diedro negativo» (fig. 4.18). En parte, esto se relaciona con el manejo del flujo de aire que pasa por la parte de abajo del coche y por los radiadores a través de los conductos de los pontones. Pero un beneficio añadido es que la sensibilidad al cabeceo se ve reducida porque el espacio entre el alerón y el suelo es variable a lo largo de la envergadura del alerón. De este modo, la situación en la que el flujo de debajo del alerón es bloqueado por completo cuando se reduce la distancia con el suelo, no puede darse. Este alerón, tal vez, no genera tanta carga aerodinámica como uno que está constantemente cerca del suelo, pero es más fiable y proporciona al piloto mayor confianza.

## Cómo seleccionar y diseñar un alerón

Lo que viene a continuación puede parecer matemáticas, pero no se deje engañar. Es, en realidad, altamente empírico, y sólo contiene un par de cálculos que pueden hacer que parezca más complicado de lo que realmente es. Pero para el competidor que quiere montar un alerón en su coche por primera vez, o si quiere conseguir una mejor configuración de sus alerones ya conocidos, los principios señalados aquí le servirán para lograr un primer análisis estimativo. La base del esquema es saber cuánta resistencia al avance se está dispuesto a aceptar de una determinada configuración de alerones y, habiendo determinado eso, es posible se-

leccionar los más apropiados. El esquema que viene explicado aquí es para un monoplaza de carreras, pero puede aplicarse parcialmente a otras categorías.

El plan de ocho puntos para lograr una configuración aproximada a la ideal es el que sigue:

1. Calcule la velocidad máxima teórica sin alerones. Para ello necesitará los valores del área frontal, la potencia disponible en las ruedas y el  $C_D$ .
2. Decida cuánta de esa velocidad máxima está dispuesto a sacrificar con el montaje de alerones. Una presunción implícita, basada en la experiencia y las mediciones, es que los alerones delanteros no añaden una cantidad significativa de resistencia. Sólo el alerón trasero contribuye de forma notable al incremento de la resistencia del coche.
3. Calcule la diferencia en cifras de la potencia absorbida entre la velocidad máxima sin alerones y la velocidad máxima que está dispuesto a aceptar con alerones.
4. La diferencia entre estas dos cifras de absorción de potencia es lo que se va a «donar» al alerón trasero en su búsqueda de la carga aerodinámica.
5. Calcule el valor  $C_D$  máximo para el alerón que esto representa. Para esto necesita los valores de la envergadura y cuerda del alerón, con el fin de calcular el área de planta del mismo.
6. Utilizando un valor estimativo para la relación de sustentación/resistencia, averigüe que valor  $C_L$  corresponde con el valor  $C_D$ , y después consulte los catálogos de alerones para buscar la primera configuración básica (esto incluye los alerones de uno, dos o varios elementos), un perfil específico que le dé este valor  $C_L$  y el ángulo de ataque aproximado. En el apéndice 1 del libro encontrará unas cuantas configuraciones de alerones, con sus perfiles y sus características de sustentación, pero existen muchas más opciones donde elegir.
7. Calcule la cifra teórica de carga aerodinámica que le dará el alerón trasero, y después calcule la carga necesaria en la parte delantera para equilibrar este valor. Aquí son necesarias las dimensiones del alerón delantero, así como la distancia que habrá con respecto al suelo, con el fin de que el efecto suelo nos ayude a determinar la cantidad de  $C_L$  delantero.
8. Consulte los catálogos de alerones una vez más para determinar la configuración apropiada, el perfil y el ángulo de ataque aproximado para los alerones delanteros.

A algunos puede sorprender la afirmación de que los alerones delanteros no generan una resistencia significativa. Las pruebas mencionadas anteriormente sobre un monoplaza de montaña en el túnel de viento de MIRA demostraron este hecho, e incluso con grandes cambios en el ángulo de ataque, que produjeron grandes cambios en la carga aerodinámica delantera, no alteraron los valores de resistencia del coche en más de un punto. De todos modos, unos pequeños cambios en el alerón trasero no sólo alteraron la carga, sino que además tuvieron una gran influencia en la cantidad de resistencia generada por el coche. Esta situación es típica y muy representativa de los monoplazas en general.

La cantidad estimada de cuánta velocidad máxima está dispuesto a sacrificar tendrá que estar basada en los conocimientos que tenga sobre los regímenes de velocidad de la pista en la que compita. Por ejemplo, seguramente se sabrá la velocidad máxima aproximada que se alcanzará en cada circuito. También se sabrá, al menos aproximadamente, cuánto tiempo permanece el coche a una determinada velocidad, y si su coche está equipado con sólo los más rudimentarios sistemas de adquisición de datos, tales como un cuentarrevoluciones con memoria, podrá averiguar exactamente cuánto tiempo ha rodado a una cierta velocidad. Con un sistema de adquisición de datos más sofisticado, podrá dejar que el ordenador haga estos cálculos por usted. Todo esto facilitará la decisión de cuán crucial es la velocidad máxima en los diferentes circuitos. Otros análisis, objetivos siempre que sea posible (pero los subjetivos valdrán si los datos no están disponibles), deben tener en cuenta cuánto tiempo se pasa acelerando, frenando y girando, y a qué velocidades. Esto le ayudará, primero, a encontrar una cierta confusión (!), pero en segundo lugar, a conocer la naturaleza de la pista y a ayudarlo a decidir si se trata de un circuito de «carga aerodinámica» o no. Naturalmente, no existen decisiones blancas o negras. Incluso los profesionales, equipados con programas de simulación en sus potentes ordenadores, trabajan con estimaciones, tanto como con los datos de sus experiencias anteriores. Así que, póngase a ello y comience a analizar.

Quizá lo más difícil a tener en cuenta es que el alerón trasero no dará tanta carga aerodinámica como se desea. Sin los beneficios de un túnel de viento, o pruebas con el coche, es imposible decir cuánta carga podrá generar el alerón trasero teniendo en cuenta lo que sufrirá el flujo de aire pasando por el resto del vehículo. Lo único que se puede decir es que será muy difícil conseguir los resultados teóricos, y tal vez se necesite un ángulo de ataque más pronunciado, o quizás un elemento más en el alerón. De todos modos, es muy instructivo y divertido probar las soluciones numéricas, así que veamos un ejemplo para ver cómo resulta.

## Cálculos para la configuración de un alerón

Tomando el anteriormente mencionado monoplaza de montaña con el que el autor tiene bastante experiencia tras haber colaborado en su ensamblaje y desarrollo, el área frontal sin alerones es de 1,17 m<sup>2</sup> (12,6 pies cuadrados), y el C<sub>x</sub> de 0,65. La potencia en las ruedas es de alrededor de 295 CV, lo que deja unos 260 CV para sobreponerse a la resistencia aerodinámica (la reducción de un 12 % es para compensar por las pérdidas en la transmisión y por la resistencia a la rodadura, un valor normal para un coche de este tipo con sus neumáticos fríos). Esta cifra de potencia se corresponderá exactamente con la potencia absorbida a la velocidad máxima del vehículo sin alerones, que sería:

$$V_{\text{MAX}} = 3\sqrt{[(260 \times 146,600)/(0,65 \times 12,6)]} = 167,0 \text{ mph (268 km/h)}$$

Esto representa una velocidad máxima muy superior a la que se alcanza en cualquier circuito. La velocidad máxima registrada en una carrera de montaña fue de

188,8 km/h. Por tanto, sólo para este ejemplo, asumiremos que una velocidad de 215 km/h será suficiente para que el coche ruede en el circuito más rápido. ¿Cuánta potencia será absorbida a 215 km/h (135 mph)?

$$\text{Potencia absorbida} = \frac{0,65 \times 12,6 \times (135)^3}{146,600} = 137,3 \text{ CV}$$

La diferencia entre esto y los 260 CV absorbidos a la velocidad máxima absoluta es el valor que vamos a «donar» a la resistencia del alerón trasero, = 260 - 137,5 = 122 CV. ¿A qué valor de  $C_x$  corresponde esto? Para descubrirlo, necesitamos conocer las dimensiones del alerón, y en este caso son 1,07 × 0,55 m (42,1 × 21,7 pulgadas), o 0,5885 m<sup>2</sup> (6,34 pies cuadrados). Utilizando la ecuación de la potencia absorbida otra vez, podemos decir que el  $C_x$  máximo del alerón será:

$$C_{x\text{MAX}} = \frac{122,5 \times 146.000}{6,34 \times (135)^3} = 1,15$$

Así que, ¿qué clase de alerón tendrá un  $C_x$  de 1,15? Desgraciadamente, no podemos buscar esto en los catálogos. Los textos que enumeran los datos de los alerones nos dicen cuáles son los coeficientes de resistencia del perfil o de la sección, pero esto sólo es parte de la resistencia que genera un alerón. También un alerón que produce carga genera una resistencia inducida que aumenta con el incremento de la carga y con la disminución de la relación de aspecto. Por lo tanto, el alerón de un coche de carreras en un apéndice ineficaz en términos de relación sustentación/resistencia. Así que, un pequeño atajo para encontrar qué clase de alerón corresponde a un  $C_x$  particular es utilizar la relación sustentación/resistencia, basada en datos reales de alerones estudiados en algunos libros, para determinar el posible  $C_L$  que le corresponde, y después utilizar los catálogos (apéndice 2) para buscar la configuración y el posible perfil que generará ese  $C_L$ . Es posible averiguar esto mediante la teoría, pero, de algún modo, estos datos nos dan una mayor seguridad...

El dibujo de la figura 4.19 muestra una correlación basada en datos publicados sobre la relación sustentación/resistencia en relación con el  $C_x$ , y la figura 4.20 muestra los valores de  $C_L$ , en relación con las cifras de  $C_x$ , derivadas de éste. Una vez más, esto debería llevarnos a la zona correcta. En nuestro ejemplo, un  $C_x$  de 1,15 debería corresponder a un  $C_L$  de alrededor de 2,95 (por tanto, la relación sustentación/resistencia sería de 2,57:1).

Consultando incluso los pocos ejemplos de gráficos de datos del apéndice 1, podemos ver que esto correspondería a un alerón de tres elementos. Un diseño de dos elementos podría quizás alcanzar este valor  $C_L$ , pero uno de tres elementos, con configuración de doble flap, podría situarse a un ángulo menor, para lograr un nivel de carga bajo, o con un ángulo mayor para obtener un coeficiente alto, dando así un mayor número de opciones. Por esto, la primera estimación para la configuración del alerón trasero, basándonos en lo que hemos visto aquí, sería un alerón de tres planos. Sin embargo, se han visto algunas sugerencias de que el coche podría salir perdiendo por utilizar demasiado alerón, y una posible forma de desarrollo es instalar un

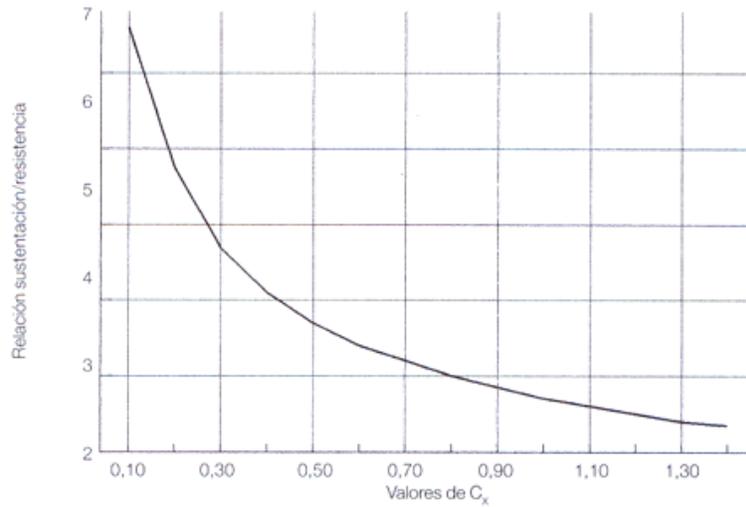


Figura 4.19. Relación sustentación/resistencia contra  $C_x$

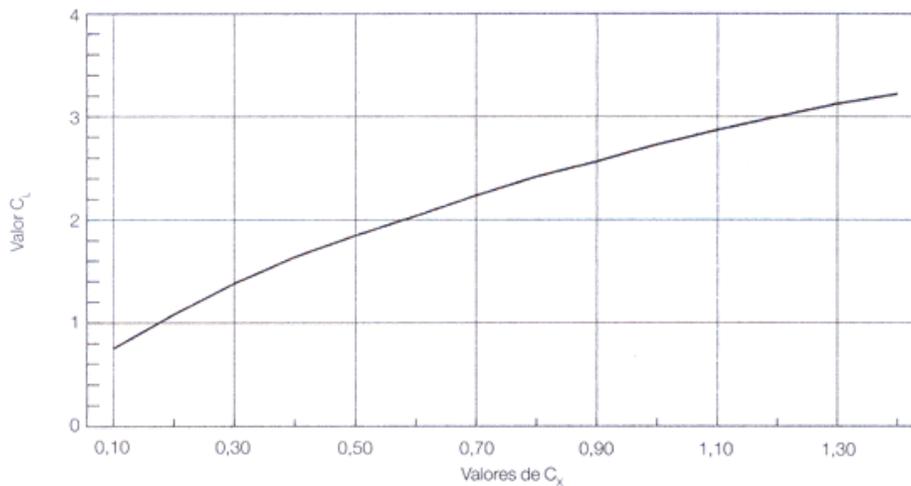


Figura 4.20.  $C_x$  contra  $C_l$ .

alerón de dos elementos con la envergadura máxima permitida de 1,4 m, y con una cuerda más pequeña para conseguir una relación de aspecto más alta, pero una superficie de planta similar a la del alerón original.

Al igual que sucede en todos los competidores amateurs, que no cuentan con un túnel de viento para probar un modelo a escala, o medir los efectos en condicio-

nes controladas, la única opción para este equipo es construir el alerón, montarlo, y ver si mejora los resultados en términos absolutos (contra el reloj) o en términos relativos (contra los rivales).

Pero todavía nos queda por descubrir la configuración del alerón delantero que debería, teóricamente, equilibrar este alerón trasero. Para hacer esto asumiremos un efecto de palanca igual en la parte delantera y la trasera (no son iguales, pero lo haremos así para que los cálculos sean más sencillos) y un equilibrio aerodinámico que estará en proporción a la distribución de pesos que, con el piloto montado, es de alrededor de 38:62 delante:detrás. El área del alerón delantero es aproximadamente de 0,4 m<sup>2</sup>. Por ello podemos decir que la carga aerodinámica en la parte delantera debe ser 38/62 veces la de la parte trasera, que, poniendo los valores relevantes en cada área, significa que podemos decir lo siguiente, utilizando la fórmula básica para la carga aerodinámica:

$$\text{carga}_{\text{trasero}} \times 38/62 = \text{carga}_{\text{delantera}}$$

así que

$$0,5\rho A_{\text{trasero}} C_{L\text{trasero}} v^2 \times 38/62 = 0,5\rho A_{\text{delantera}} C_{L\text{delantera}} v^2$$

El 0,5ρ y v<sup>2</sup> de ambos lados de la ecuación se anulan el uno al otro, lo que significa:

$$A_{\text{trasero}} \times C_{L\text{trasero}} \times 38/62 = A_{\text{delantera}} \times C_{L\text{delantera}}$$

así que

$$C_{L\text{delantera}} = \frac{A_{\text{trasero}} \times C_{L\text{trasero}} \times 38/62}{A_{\text{delantera}}}$$

Se establece el valor del C<sub>Ltrasero</sub> en 2,95, junto con las cifras para las áreas delantera y trasera, y la respuesta es que el C<sub>Ldelantera</sub> debe ser 2,67.

Pero todavía tenemos que tener en cuenta el efecto suelo, que, al hacer al alerón delantero generar más carga aerodinámica estando más cerca del suelo, significa que no necesitamos una sección con un valor C<sub>L</sub> alto para poder alcanzar el nivel de carga necesario. La figura 4.17 mostraba cómo la carga aerodinámica aumenta según el alerón delantero se acerca al suelo. El alerón delantero estará a unos 12,5 cm del suelo.

La cuerda del alerón es 35 cm, así que la distancia al suelo es de 0,36c en relación con la cuerda. La figura 4.17 nos dice que podemos esperar un incremento en el C<sub>L</sub> relativo con el alerón al «aire libre» (es decir, lejos de la influencia del suelo), de alrededor de 1,37, o 37 %. Así que sólo necesitamos utilizar una configuración de alerón que produzca un C<sub>L</sub> de 2,67/1,37, o 1,95. Esto corresponde a un alerón de dos elementos, quizá con un ángulo de ataque medio, con una moderada desviación en el flap de unos 30°, aunque existen otras configuraciones de dos elementos que encajarán en el mismo criterio. Lo importante es que hemos determinado que este co-

che puede correr con un alerón trasero de tres elementos y que quedaría equilibrado con un par de alerones delanteros de dos elementos. Los ángulos de funcionamiento deben descubrirse a base de práctica. Es interesante que el coche de este ejemplo está equilibrado mediante un par de alerones delanteros de dos elementos, aunque el ángulo de ataque es más pronunciado de lo que sugieren los cálculos. Esto puede ser así porque el coche tiene una vía delantera bastante estrecha, con neumáticos bastante anchos situados no muy por detrás del borde de fuga de los flaps del alerón delantero. Esto hará que disminuya el área de trabajo efectiva de los alerones delanteros, y requerirá un ángulo de ataque más pronunciado para conseguir equilibrar el alerón trasero.

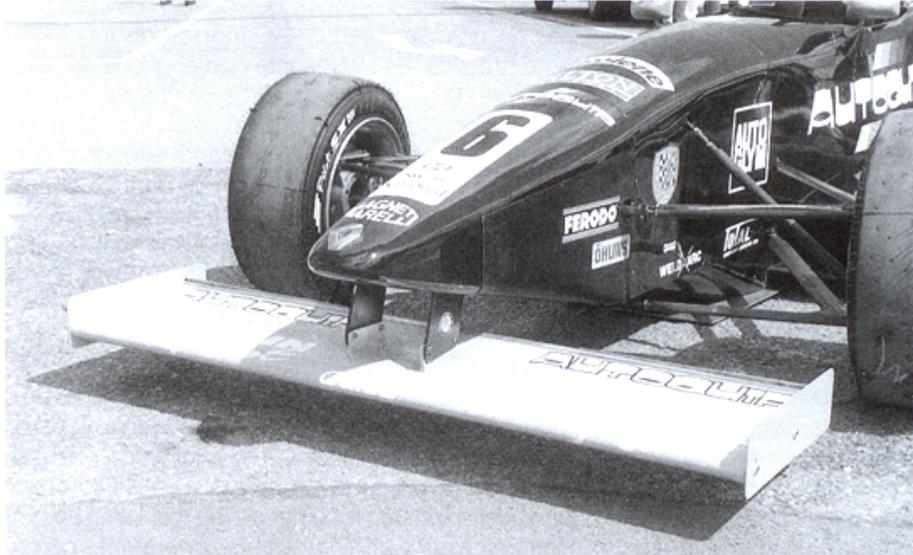
Lo que nada de esto tiene en cuenta, por supuesto, es la carga aerodinámica que puede ser generada por la parte inferior del coche.

Si, y se trata de un gran *si*, el fondo del coche produce su carga con una conveniente distribución entre ambos ejes, de acuerdo con la distribución de pesos, entonces, los cálculos para la configuración del alerón continuarán siendo válidos, ya que estaremos en condiciones de conseguir una puesta a punto equilibrada. Pero, si el fondo del coche produce una carga con un excesivo o mayor porcentaje aplicado hacia el eje trasero, es evidente que el alerón posterior no deberá ejercer tanto apoyo y que, por otra parte, el alerón delantero, por el contrario, deberá generar más carga para encontrar el equilibrio.

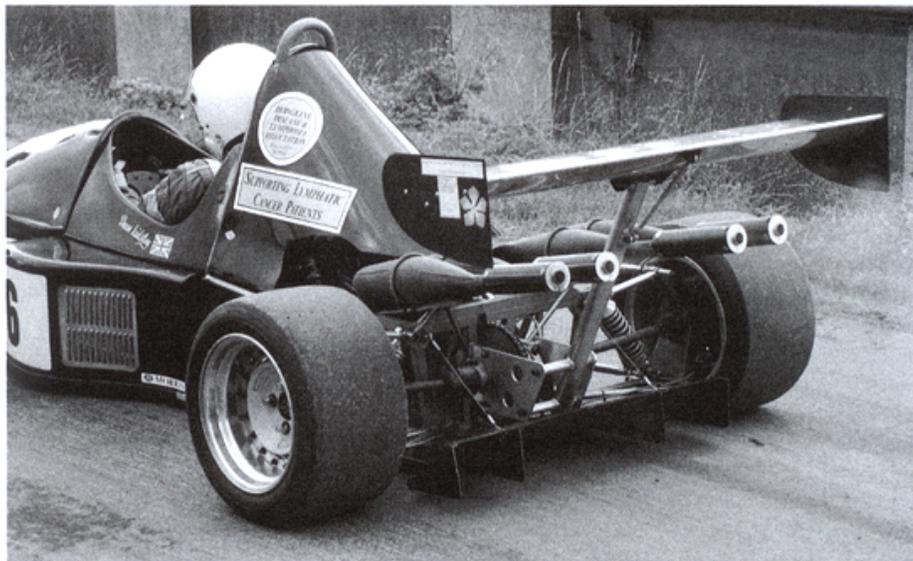
Éste puede ser el caso de los Fórmula 3 actuales; con sus pequeños alerones traseros y los relativamente grandes delanteros, hay que pensar que el fondo plano y el difusor deben estar contribuyendo de forma notable a equilibrar el monoplaça. Además, la interacción entre los alerones traseros, especialmente los del tipo de múltiples planos, y el difusor trasero no pueden ser configurados de manera empírica. Esto es algo que sólo puede llevarse a cabo mediante el uso de un túnel de viento y las pruebas en la pista.

## Monturas de los alerones

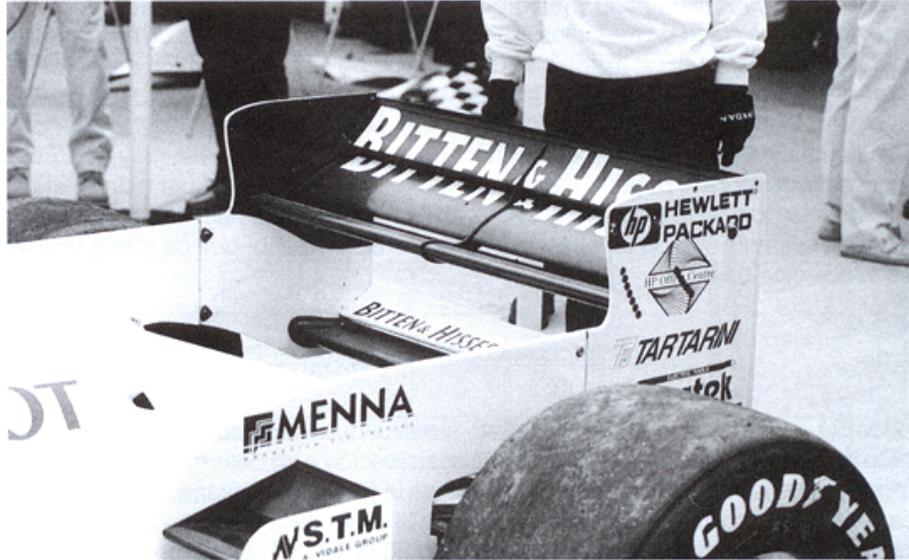
Todavía no hemos mencionado nada sobre algunos de los aspectos prácticos en la elección de un alerón. La forma de fijarlos, tanto delante como detrás, puede afectar de manera significativa su eficacia. Por ejemplo, en la parte delantera de un monoplaça, un par de alerones a cada lado del morro tendrán un área en planta limitada por el máximo permitido, menos el ancho del morro. Consecuentemente, cuanto más estrecho es el morro, mayor será el espacio disponible para el área de planta o de trabajo, y mayor será la relación de aspecto, lo que se combina para producir carga aerodinámica de un modo más eficaz. Es mejor aún si el alerón delantero es de solo plano, con una envergadura igual a la máxima anchura permitida, creando la máxima relación de aspecto posible. Esto puede conseguirse montando el alerón por debajo, o por encima del morro. Montarlo encima del morro no servirá de mucho, porque la parte central del alerón perderá su efectividad debido a la proximidad con el propio morro, y el propio alerón estaría tan lejos del suelo que perdería todos los beneficios del efecto suelo. Pero, montando el alerón por debajo, hace que se genere efecto suelo y se aprovecha toda la longitud del mismo.



El alerón delantero colgante del Van Diemen RF97 de Fórmula Renault.



Poste central del alerón trasero de un Jedi de montaña.



Montura a través de las derivas laterales, aprovechando su efecto aerodinámico en el Jordan 197.

Los alerones traseros tienen dos opciones para su montaje, opciones que a veces se combinan: el «poste central» y la montura con las «derivadas laterales», ambas son muy utilizadas. Con cualquiera de los métodos, es importante considerar el efecto que la estructura de sujeción puede tener en el flujo de la parte inferior del alerón. Si la montura es del tipo poste central, entonces, el poste, o los dos perfiles aerodinamizados que se utilizan a veces, deben tener una forma tal que interfiera lo menos posible con el flujo de aire que pasa por el alerón. En el caso de la montura por derivadas laterales, debido a que el grosor de las derivadas tiene influencia en su rigidez, es lógico pensar que probablemente se «comerán» algo del área disponible (si la envergadura está restringida por el reglamento, cosa que es así normalmente) y, además, afectarán al flujo de aire en los bordes externos del alerón. Una vez más, los bordes de ataque (por lo menos) de estas derivadas laterales de fijación deben tener la forma adecuada para molestar lo menos posible el flujo que se acerca al ala. Las consideraciones estructurales serán discutidas en el capítulo 7.

## Relaciones de aspecto, otra vez

Ya hemos mencionado de pasada que una relación de aspecto mayor hace que un alerón sea más efectivo. La figura 4.21 muestra cómo el coeficiente de sustentación, en relación con el ángulo de ataque, se altera con la relación de aspecto. Queda claro que una relación de aspecto muy baja produce un coeficiente de sustentación bajo. Pero, en el lado positivo, el ángulo de pérdida se retrasa, y la

pérdida se vuelve menos abrupta, lo que hace que un alerón con una relación de aspecto más bajo sea un apéndice menos sensible. Pero ése no es un motivo suficiente para seleccionar un alerón con una relación de aspecto baja. Es mejor maximizar la envergadura con el fin de conseguir la mejor relación de aspecto posible. Si volvemos un momento a los cálculos para el alerón trasero del coche de montaña, la máxima envergadura permitida en esta categoría es de 1,4 m, y no existe ninguna razón técnica para no tener un alerón con esta envergadura, con el fin de maximizar la posible relación de aspecto. Existe una fórmula para estimar el coeficiente de sustentación de un apéndice aerodinámico elíptico, que de forma simplificada nos dice que:

$$C_L \text{ es proporcional a } \frac{1}{1 + (2/RA)}$$

donde RA es la relación de aspecto. Esto significa que aumentar la relación de aspecto hace que aumente el coeficiente de sustentación a un determinado ángulo de ataque. Insertando algunos valores para RA en la fórmula, y pasándolos a una gráfica, relativa a la sustentación con RA = 1, sale la curva de la figura 4.22. Si el alerón del coche de montaña del ejemplo de 1,07 × 0,55 m (RA = 1,95) se reemplazara por uno de 1,40 × 0,42 m (RA = 3,33, con el mismo área de planta), entonces la gráfica sugeriría que su coeficiente de sustentación aumentaría un 25 % si todo lo demás quedara inalterado. Pero las cosas se vuelven cada vez mejores. Existe también una aproximación para calcular el componente de resistencia inducida de la resistencia total generada por un alerón. Como hemos visto, la resistencia inducida se vuelve mayor cuanto mayor es la carga aerodinámica.

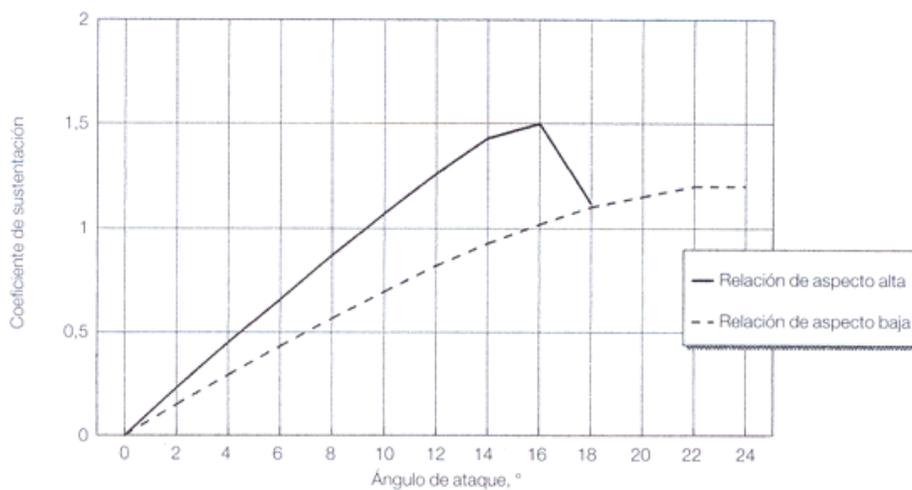
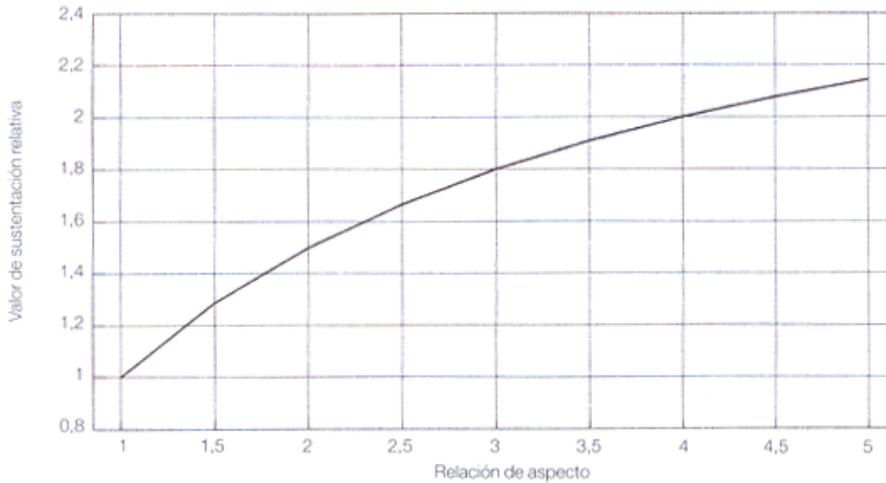


Figura 4.21. Efecto genérico de una relación de aspecto baja.



**Figura 4.22.** La sustentación y la relación de aspecto.

Pero también se ve afectado de forma beneficiosa por una relación de aspecto creciente, y una fórmula para calcular aproximadamente el valor de la resistencia inducida es:

$$C_{Di} = \frac{K \cdot C_L^2}{\pi R A} \quad (\pi = \text{la letra griega pi, } K = \text{aprox. } 1,2)$$

Si echamos un vistazo a las dos configuraciones para el alerón trasero del coche de montaña, una con  $RA = 1,95$ , que genera un  $C_L$  de 2,80, y otra con  $RA = 3,33$ , que teóricamente creará un  $C_L$  un 25 % mayor, o sea 3,50, entonces, el coeficiente de resistencia inducida será 1,54 para el primero y 1,41 para el segundo. De este modo, no sólo se ha aumentado la sustentación teórica, sino que además se ha conseguido reducir la resistencia inducida. Esto es demasiado bueno como para no explotarlo. También indica que la correlación anterior, basada en derivar los valores  $C_L$  de la relación sustentación/resistencia, que se obtenía de datos publicados, puede aplicarse solamente con confianza a las relaciones de aspecto de los alerones de los que se obtuvieron esos datos, que estaban entre 1,5 y 2,0. Los alerones con  $RA$  mayores darán mejores resultados.

Los alerones son la manifestación más evidente del uso de la carga aerodinámica para mejorar las prestaciones de un coche de carreras. Quizá sea por esto por lo que se les acusa de reducir el número de adelantamientos y de empeorar la calidad de las carreras. Tanto si se está de acuerdo con esto, como si no, es indiscutible el hecho de que los alerones han tenido, y seguramente seguirán teniendo, una importancia vital en el mundo del motor, aunque sólo sirvan para llevar los nombres de los patrocinadores.

## 5. Corrientes «submarinas»: el efecto suelo

### Un poco de historia

Si los alerones permitieron dar un paso hacia delante en lo referente a las prestaciones de los coches de carreras, entonces la explotación del flujo de aire que pasa por el fondo para la creación de carga aerodinámica supuso un salto enorme. Hacía mucho tiempo que se había descubierto que el flujo de aire que pasa por debajo de un coche se veía afectado por la proximidad del suelo, pero parece que al principio sólo se vieron las desventajas, y se intentó frenar el flujo de aire con el fin de reducir la resistencia. Los primeros ejemplos de esta tendencia incluyen los vehículos de MG que intentaron batir el récord de velocidad sobre tierra. Sin embargo, durante el acalorado debate sobre los alerones en los coches de Fórmula 1, durante 1968-69, cuando parecía probable que fueran prohibidos para siempre, BRM trabajó en el diseño de un chasis cuyo fondo utilizara su propia superficie para generar carga aerodinámica. Peter Wright, trabajando para Tony Rudd, había hecho algunas pruebas durante 1969 en el túnel de viento del Imperial College de Londres, y los resultados fueron lo suficientemente buenos para BRM, como para comenzar a construir en secreto un coche que explotara estos nuevos efectos. Desgraciadamente, la legendaria inestabilidad política de BRM intervino, y el monoplace nunca llegó a la pista. Rudd y Wright se marcharon, Wright a Specialised Mouldings, donde diseñó los pontones de forma de ala invertida para el March 701 de Fórmula 1, que, a pesar de estar utilizando el principio del ala invertida para generar carga aerodinámica, no estaba explotando realmente el efecto de la proximidad al suelo.

En esa misma época, el famoso piloto e ingeniero tejano Jim Hall volvió a dar la nota, produciendo la última versión de su coche sport el Chaparral 2J. Éste tenía un motor «suplementario», en realidad se trataba de un motor de moto de nieve, propulsando dos grandes turbinas que chupaban el aire del fondo del coche con el fin de

reducir la presión en esa zona. Para maximizar el efecto, prácticamente toda la parte inferior del coche estaba sellada con unas tiras o faldillas de un material plástico denominado Lexa, flexible y resistente. En síntesis, el vehículo era un hovercraft invertido, por así decirlo. Se estimó que la carga aerodinámica que el coche producía era de entre 590 y 910 kg, lo suficiente como para hacer que un coche relativamente pesado (910 kg) se volviera extremadamente competitivo, en manos de Vic Elford, contra los dominadores McLaren del campeonato CanAm de 1970. Sin embargo, la poca fiabilidad del motor auxiliar hacía que el 2J no fuera efectivo con la regularidad deseada. Lo más especial acerca del coche con turbinas era el hecho de que la carga aerodinámica no dependía de la velocidad, y podía generar tanta carga cuando estaba parado como cuando iba a toda velocidad, por lo que en las salidas y en las curvas rápidas el Chaparral era devastador.

Pero la lluvia de protestas generada por el concepto de las turbinas hizo que fueran prohibidas por la organización, y hasta el día de hoy, la regla del «apéndice aerodinámico móvil» ha sido utilizada para evitar, o al menos para *intentar* evitar, que vuelvan a aparecer semejantes conceptos.

El camino a seguir a partir de ese momento ya había sido marcado, y una vez más Peter Wright y Tony Rudd, ahora en el equipo Lotus, en Norfolk, Inglaterra, se vieron envueltos en la siguiente fase de desarrollo que comenzó en 1975: Colin Chapman había planteado una serie de cuestiones técnicas fundamentales a Tony Rudd, y como la mayoría de ellas eran de carácter aerodinámico, se contrató también a Wright.

Wright y su equipo volvieron a utilizar modelos a escala 1/4 en el túnel de viento del Imperial College, que estaba equipado con un «suelo móvil» para simular las condiciones del coche desplazándose por la carretera. Se dieron cuenta de que los pontones, diseñados para incorporar los radiadores y la gasolina, se movían demasiado y producían inestabilidad. Así que, después de sujetarlos, también sellaron los bordes de los pontones con «faldones», y comenzaron a obtener unos resultados increíbles. De hecho, repitieron las pruebas varias veces para convencerse de lo que realmente estaba ocurriendo. Chapman quería saber qué habría pasado si los pontones hubieran tenido la forma de un ala invertida, con lo que Wright apeló a sus fotos del BRM de 1969 que nunca llegó a correr. En poco tiempo, se diseñó un nuevo Lotus, se hizo un modelo a escala, y, durante la última parte de 1976, Mario Andretti probó en la pista el que sería el Lotus 78. El coche fue inmediatamente dos segundos más rápido que el modelo 77. En la presentación del coche a la prensa, los diseñadores se limitaron a comentar que habían conseguido «algo por nada», lo que hacía referencia al sustancial aumento de carga aerodinámica sin aumentar la resistencia. Por esto es por lo que supuso el salto más grande en la historia de los coches de carreras.

El Lotus 78 ganó algunas carreras en 1977, pero Wright y el equipo de I+D se pasaron todo el año perfeccionando la fiabilidad de los «faldones», que sellaban el fondo e impedían la migración del aire por los costados hacia la zona de baja presión, por lo que resultaban vitales. Las lecciones aprendidas con el 78 se trasladaron al 79, que fue el primer coche con verdadero efecto suelo, y con ello se consiguió dominar tanto el campeonato de pilotos como el de constructores de 1978. Sin em-

bargo, ese año surgió un pequeño bache para Lotus, en la forma del Brabham «turbina». Se habían intentado anteriormente otras soluciones para evitar el reglamento en lo referente a turbinas, pero ninguna con el ingenio de la de Gordon Murray, entonces el diseñador jefe del equipo. El modelo de ese año, el BT46 propulsado por motor Alfa Romeo de 12 cilindros en línea, necesitaba un nuevo sistema de refrigeración que reemplazara al poco efectivo concepto probado en 1978. Murray decidió incorporar un gran intercambiador de calor de agua/aire montado encima del motor, alimentado por una turbina que por «casualidad» absorbía el aire de debajo del coche. Además, el coche contaba, también por «casualidad» con dos faldones transversales y dos longitudinales sellando el fondo, por lo que la turbina hacía que el coche se pegara al suelo de manera muy efectiva. El monoplaza ganó su primera carrera en Suecia, con Niki Lauda al volante, pero las protestas de otros equipos hicieron que la organización prohibiera el uso de cualquier tipo de turbinas para crear carga aerodinámica. A pesar de esto, permitieron que se quedaran con la victoria en Suecia, quizá para compensar por haber dado luz verde al proyecto en su fase de concepción. Todavía existen algunas categorías donde la carga aerodinámica generada por turbinas no ha sido prohibida, pero la mayoría de los campeonatos no permiten esta clase de conceptos.

El desarrollo de «túneles» de efecto suelo, como se conocieron a los canales del fondo del coche, continuó, a pesar de los varios intentos del reglamento por reducir las increíbles velocidades de paso por curva. La mayoría de las categorías de competición de todo el mundo se vieron afectadas. Pero para 1982-83, la FISA ya había tenido suficiente, y prohibió los fondos perfilados como ala en la Fórmula 1 (y por tanto en otras categorías), y la siguiente fase del desarrollo se concentró en los «fondos planos». En los Estados Unidos, el campeonato de Indycar (ahora CART), entre otros, continuó utilizando los túneles, aunque, con el paso de los años, su efecto ha sido reducido gracias a los reglamentos con el fin de mantener las velocidades a niveles «seguros». Los túneles aparecieron en otras categorías importantes, y ahora, generalmente, se adopta la regla de «fondo plano entre las ruedas traseras y delanteras». Y así es más o menos como están las cosas hoy en día, la mayoría de las categorías insisten en el fondo plano, aunque otras permiten los túneles. Sin embargo, incluso donde se deben utilizar los fondos planos, existe un grado de libertad con respecto a la forma de dicho fondo por delante de las ruedas delanteras y, como veremos, esto resulta importante.

El largo, y tal vez incompleto, prelude histórico de este capítulo tiene su propósito, ya que no hay duda de que el desarrollo de la aerodinámica del fondo ha sido la más significativa en lo que se refiere a la generación de carga aerodinámica y la mejora de las prestaciones. Una vez que el Lotus 78 pavimentó el camino a seguir, todas las categorías de competición tuvieron, por lo menos, que considerar el concepto para averiguar si reportaba algún beneficio, y aunque en muchos campeonatos se restringe la libertad de diseño en esa zona, la explotación del efecto suelo no desaparecerá mientras los coches sigan rodando cerca del asfalto.

## De vuelta al principio

Todos los coches, por definición, funcionan con «efecto suelo». Esto significa que *habrá* una interferencia con el flujo de aire de debajo del coche como consecuencia de la proximidad del vehículo al pavimento. Esto tiene una gran importancia en el comportamiento general del flujo de aire de encima y alrededor del coche, y, siendo así, la influencia en las prestaciones puede ser considerable. Sin embargo, resulta interesante que los efectos pueden ser beneficiosos o perjudiciales, dependiendo de la naturaleza y el diseño del coche. Vimos en el capítulo 4 que la carga aerodinámica producida por un alerón con efecto suelo es mucho mayor que la del mismo alerón alejado del suelo, y el efecto aumentaba cuanto más se acercara el alerón al asfalto, hasta que, a una cierta altura, la capa límite alrededor del alerón interfería con el suelo y bloqueaba el flujo, lo que reducía la carga de nuevo. De modo similar, el desarrollo de la capa límite bajo un coche influye directamente en la habilidad del flujo de aire de producir carga aerodinámica.

Un coche normal de pasajeros tiene un fondo muy tosco, con elementos tales como los escapes, la suspensión, la transmisión, los semiejes y el depósito de gasolina estorbando, y cavidades tales como las de alrededor del motor y las ruedas, lo que se suma a esta «tosquedad». El capítulo 3 señalaba cómo esta tosquedad contribuye a aumentar la resistencia; lo que ocurre es que esta clase de fondo crea una capa límite ancha, la cual tiende a arrastrar el aire de debajo del coche con ella. Por esto, la capa límite se extenderá hasta el suelo, y en la parte trasera del vehículo se junta con la estela que para ese momento ya ha bajado hasta el suelo. El flujo a lo largo del fondo es lento y turbulento, si no es bloqueado por completo por esta interferencia, y el efecto en la distribución de la presión es el de crear justo lo que no queremos, una zona de alta presión debajo del coche. Sumado a la habitual generación de baja presión por encima de un coche de pasajeros, el aumento de la sustentación positiva no es bienvenido (fig. 5.1). Así que es bastante obvio que cualquier cosa que se haga para mejorar el flujo de aire debajo del coche será muy beneficiosa.

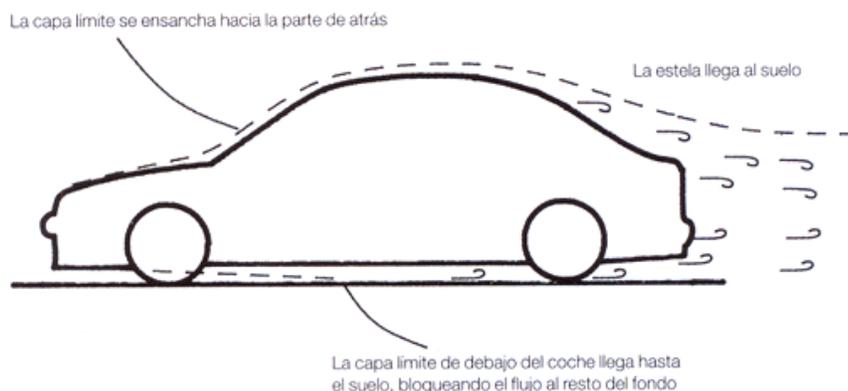
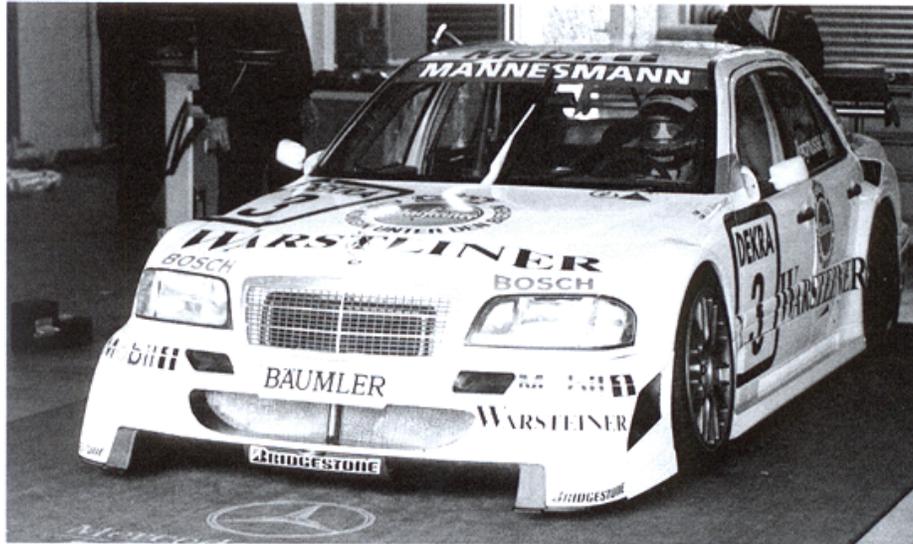


Figura 5.1. Las capas límite alrededor de un coche de turismo.



La parte delantera del fondo de este Mercedes del ITC estaba curvada para acelerar el aire entrante hacia abajo del coche.

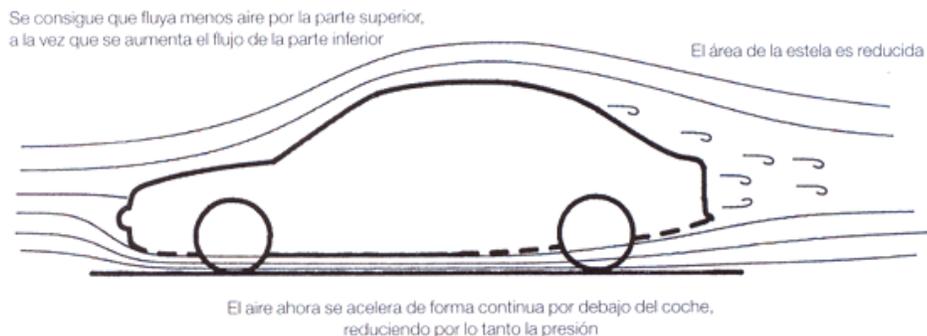
Existen tres factores que hay que considerar: la altura con respecto al suelo; la «tosquedad» del fondo; y la forma de ese fondo. El impacto de cada uno de estos factores afecta a los otros dos. Por ejemplo, si un coche tiene un fondo muy irregular, entonces un método de disminuir la sustentación positiva que produce será aumentar la distancia con respecto al suelo.

Contrariamente, reducir la altura libre que hay hasta el suelo con el fin de bajar el centro de gravedad, algo básico para mejorar la manejabilidad, puede hacer que la sustentación positiva empeore si el fondo del coche es muy irregular. La conclusión de todo esto es que los fondos «toscos» no son buenos. De hecho, es bastante evidente que fijar un panel en el fondo hará que el aire se mueva con mayor velocidad, y es igual de obvio que la resistencia se verá reducida si los salientes y entrantes ya no molestan al flujo de aire. Unos estudios sobre cómo afecta un panel de fondo en un coche normal el coeficiente de sustentación demostró que se podía conseguir alrededor de un 20 % de reducción en el  $C_L$ , y esta cifra podía ser superada cuando el coche rodaba más bajo de lo normal. Otro de los beneficios prácticos que surgirán es que el coche no necesitará de tanta limpieza después de ser utilizado; y si el panel inferior se extiende bajo áreas con contenedores de líquidos, entonces las pérdidas y derrames no afectarán tanto a los coches que marchan detrás. Hay que destacar que se pueden hacer unos arreglos especiales para la refrigeración, si la instalación del panel bloquea el paso del aire a los componentes más sensibles.

La forma del panel inferior también tiene una importante influencia en el flujo de aire del fondo del coche. Si la presión bajo el coche es positiva, caso que se puede

dar incluso con un suave panel inferior, entonces, el flujo de aire puede mejorarse a través de la forma del fondo del coche. Si se incorpora algo de curvatura lateral, incluyendo el redondeado de los bajos laterales, el aire con alta presión bajo el coche será desviado hacia los lados, lo que ayudará a que esta alta presión salga del fondo. Pero ésta sería una solución poco imaginativa y trataría los síntomas, pero no curaría la enfermedad. Sería mucho mejor crear una zona de baja presión por debajo del coche, donde el flujo tendería a emigrar de los lados del coche para entrar en la zona de baja presión bajo la carrocería.

Con el fin de crear una zona de baja presión, es necesario comenzar a pensar en la forma del fondo. Dándole una ligera curvatura hacia arriba a la parte delantera del fondo, y haciendo lo mismo en la sección trasera, podemos suavizar mucho el flujo, retrasando la formación de la capa límite, dando más velocidad al flujo y generando una zona de baja presión. De esta manera, el coche se convierte en una ala rodando cerca del suelo, con una sección Venturi formada entre el coche y el asfalto, y por tanto, existe ahora la posibilidad de generar carga aerodinámica. Subir la sección trasera del fondo permite que la baja presión que existe en la estela del coche ejerza una influencia importante en el flujo del fondo, y ayuda también a mantener la baja presión debajo de la parte trasera del vehículo (fig. 5.2).



**Figura 5.2.** Forma ideal del fondo de un coche.

La distancia exacta con respecto al pavimento que habría que tener con el fin de crear las condiciones para beneficiar el efecto suelo es específica para cada coche y resulta imposible generalizar. Pero para comenzar a hacernos una idea, podemos observar las cifras de unos experimentos realizados en vehículos de calle con fondos medianamente irregulares. Scibor-Rylski (apéndice 2) nos dice que con distancias entre 0,125 y 0,600 veces la batalla del coche, los vehículos «convencionales» producían sustentación negativa, ya que el «efecto Venturi» contribuía con el flujo del fondo. Pero, con distancias de menos de 0,125, los coeficientes de sustentación se volvían positivos. Consideremos que la distancia media al suelo es del orden de 0,05, y podremos ver por qué los coches convencionales con fondos irregulares operan dentro de un régimen de sustentación positiva altamente insatisfactorio. La con-

clusión que sacamos, una vez más, es que es imperativo montar un fondo plano si se quiere evitar la presión positiva, y que este panel debería tener tal forma que sirva para permitir el paso suave y rápido del flujo de aire.

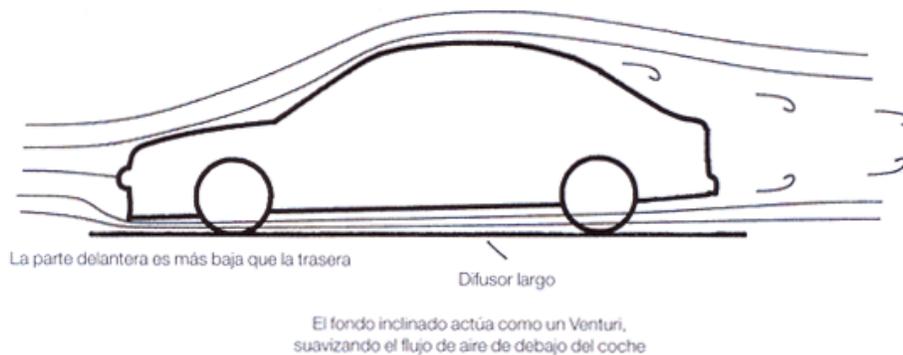
Por otra parte, la práctica nos ha enseñado que los coches de carreras son capaces de rodar muy cerca del suelo sin generar la presión positiva que generan los coches convencionales. Otra referencia, Katz (apéndice 2), nos da alguna esperanza aquí, y sugiere que un modelo a escala 1/5 con un fondo liso produjo un coeficiente de sustentación mínimo a 35 mm del suelo, lo que corresponde a 175 mm en el vehículo real. Sin embargo, las pruebas que dieron estos resultados fueron realizadas sobre un suelo fijo, y es posible que el resultado en un suelo móvil hubiera producido el  $C_L$  mínimo a una distancia menor con respecto al suelo. Esto se acerca a la clase de espacio con respecto al suelo que puede verse en los coches de competición, lo que es bastante útil, y significa que podemos comenzar a pensar en los beneficios de rodar cerca del suelo, y no sólo en las desventajas. Durante los primeros años de la década de los 90, la mayoría de los monoplazas de la FIA tenían en común unas alturas con respecto al suelo muy pequeñas, incluida la Fórmula 1, y aunque la lógica pueda sugerir que era imposible lograr un flujo significativo con esas distancias, éste no era el caso. Pero tanto los fondos planos como los difusores de estas categorías habían sido desarrollados durante horas en los túneles de viento con suelo móvil, donde la parte crítica de rodar tan cerca del asfalto podía evaluarse en condiciones cuidadosamente controladas. Consecuentemente, los diseñadores podían hacer rodar sus coches pegados al suelo con el fin de generar la máxima carga aerodinámica. Esto hizo universal el hecho de que los coches se volvieran muy sensibles a los cambios de altura y al cabeceo, lo que los convertía en inestables e impredecibles para los pilotos, otro ejemplo claro de que el piloto es una parte muy pequeña en la ecuación del diseño, algo incomprensible teniendo en cuenta que los coches no son controlados por radio control desde los boxes. De todas formas, regresaremos al tema de la altura del coche en breve.

A partir de aquí existen dos caminos que se pueden seguir para conseguir una zona de baja presión debajo del coche. El primero fue tratado en el capítulo 3, en la sección de cajas de aire y spoilers. El principio consistía en bloquear parte del flujo de aire que va a la parte inferior del coche, y es una técnica válida, particularmente donde el reglamento o cuestiones prácticas no permitan la incorporación de un fondo plano. Sin embargo, el segundo necesita que el flujo de aire entre en su totalidad, y al mismo tiempo sea controlado con cuidado para no crear sólo bajas presiones, sino para hacerlo en los lugares correctos. Si se consigue producir bajas presiones en una zona muy grande, puede verse que sólo una reducción pequeña de la presión hará que aumente de manera significativa la carga aerodinámica.

## Fondos planos

Si miramos primero la configuración más sencilla en lo referente a fondo, plano y sin cavidades, entonces, la distancia al suelo resulta tan crítica como la forma de dicho fondo. Mientras que «plano» y «forma» pueden parecer términos que se excluyen mutuamente, existe una forma sencilla pero muy importante de dar «forma» al

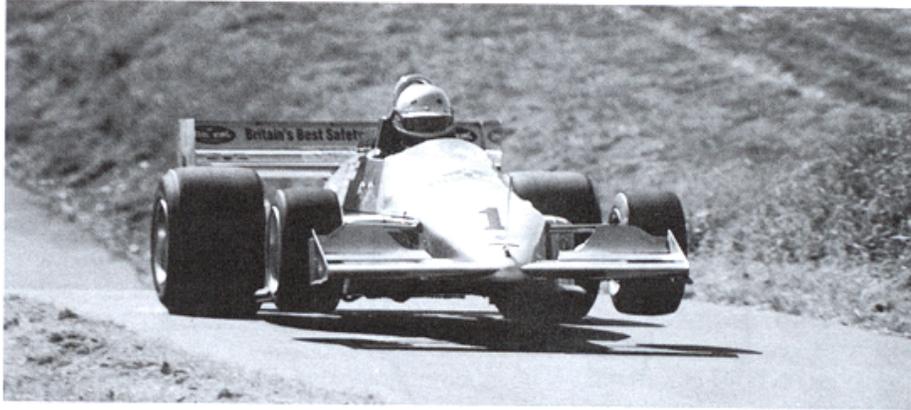
fondo plano y ésta es situarlo con un ángulo de incidencia negativo respecto de la horizontal también conocido como inclinación. En otras palabras, la parte delantera del fondo debe ser más baja que la parte trasera (fig. 5.3). Es de sentido común, y muy evidente, que si la parte delantera fuera más alta que la de atrás, el aire se acumularía y crearía una sustentación positiva muy peligrosa. Asegurarse de que el coche tenga este ángulo de incidencia negativo es tremendamente importante.



**Figura 5.3.** Fondo plano con ángulo de incidencia negativo.

En el peor de los casos, con un fondo inclinado se puede esperar una importante reducción en la sustentación positiva del coche, y las pruebas sugieren que sólo es necesario un ángulo de  $1^\circ$  o  $2^\circ$  para crear una gran diferencia. Pero ¿cómo genera esto beneficios? Esencialmente, todo el fondo del coche se ha convertido ahora en una sección Venturi. Hay un cuello estrecho bajo la parte delantera del coche, a través del cual el aire es acelerado, creando una zona de baja presión, y el resto del fondo se ha convertido en un largo difusor, que, si es plano, permite que el aire continúe fluyendo rápidamente, aunque perdiendo velocidad, hacia la parte de atrás. Aquí, la inclinación del fondo permitirá la interacción entre la estela y el flujo, lo que servirá de ayuda para garantizar que la presión continúe siendo relativamente baja en la parte trasera del coche.

Pero hay que recordar que la desviación y la altura de la parte delantera están inextricablemente relacionadas, y habrá un ángulo en el cual la parte delantera del coche estará lo suficientemente baja para que la interferencia de la capa límite bloquee el flujo de aire, lo que estamos intentando evitar. Es por esto que sólo se necesita un pequeño ángulo de inclinación. Sin embargo, la inclinación debe ser la adecuada para garantizar que no se vuelve positiva, o sea, hacia atrás, durante los movimientos de la suspensión u otras circunstancias. Afortunadamente, los coches que levantan vuelo y se invierten en el aire no son frecuentes hoy en día, en parte porque la carga aerodinámica los empuja contra el suelo, y es sólo en circunstancias muy extrañas cuando el morro del coche se levanta y ocurre la temida «voltereta».



Siempre es mejor mantener la parte delantera más baja que la trasera.

## Difusores

Ignoraremos la secuencia cronológica en la que tuvo lugar el desarrollo de la aerodinámica de fondo del coche, y pasaremos a una configuración más actual, que es la del fondo plano mejorado con un difusor trasero. Un difusor es definido en este contexto como una zona del fondo del coche, generalmente situado en la parte trasera, y que incorpora un incremento en el ángulo de desviación comparado con la parte delantera de dicho fondo. Esencialmente, se trata de la parte de la sección Venturi que es divergente, en contraste con la parte delantera convergente, y la parte más estrecha de la misma, la garganta (fig. 5.4).

Aunque el uso común de la palabra «difusor» dentro del mundo del motor tiene poca antigüedad, las aplicaciones prácticas del mismo se remontan probablemente a los años 60, por ejemplo, en el Jaguar Tipo E. El panel trasero de este deportivo tenía la forma similar a la de un difusor de un coche moderno (excepto que no tenía las «paredes» laterales), curvándose gradualmente hacia arriba a lo largo de un saliente relativamente largo.

El propósito del difusor es, en parte, abrir la parte trasera del flujo del fondo a la influencia de la zona de baja presión de la estela. Pero, al igual que el efecto de aspiración creado por la carrera de admisión de un motor fuerza al aire a acelerarse a través del Venturi de un carburador, el movimiento hacia delante de un coche hace que el aire se acelere por encima y por debajo de él. Un difusor divergente tiene un volumen expansible que debe ser llenado de aire mientras el coche se mueve (el difusor no puede trabajar sin aire) y, para llenar ese volumen, el aire se acelera a través de la garganta Venturi, creando una reducción de la presión en esa zona, antes de entrar en el difusor y volver, más o menos, a la velocidad ambiente en la que se une con la estela (fig. 5.5).

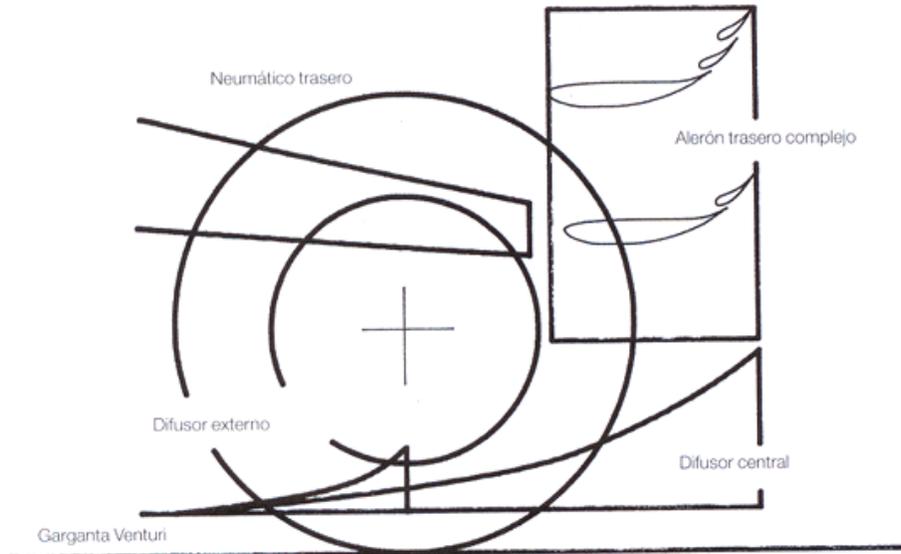


Figura 5.4. Esquema del difusor de un coche de Fórmula 1.

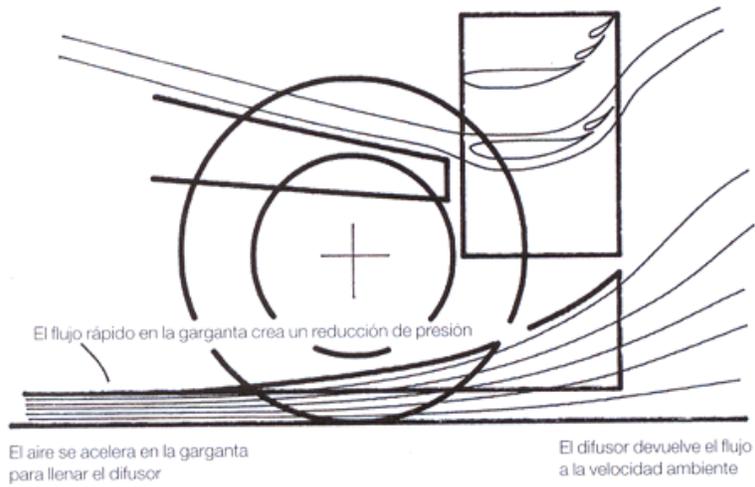
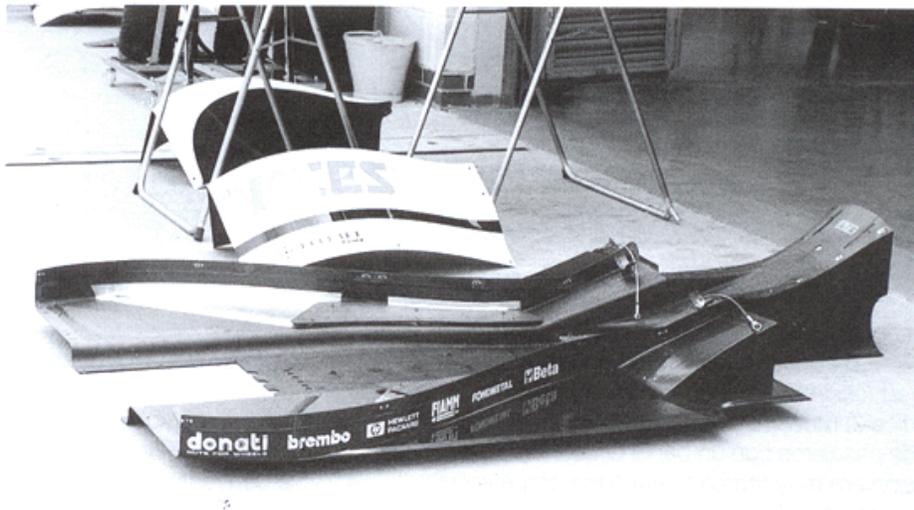


Figura 5.5. Flujo generalizado a través del centro de un difusor.

Así que el difusor, en efecto, fuerza el aire de delante de él, introduciéndolo bajo el coche, acelerándolo, y creando así una zona de baja presión y, por tanto, carga aerodinámica. También sirve para hacer regresar la velocidad de la masa del aire que fluye a través de la garganta a los valores que tenía antes de entrar en la zona Venturi. Esta tarea la realiza de una forma controlada y progresiva, de manera que evita la influencia negativa del gradiente de presión adversa y los riesgos asociados de separación del flujo. En otras palabras, el difusor tiene que sufrir un cambio gradual de ángulo con el fin de evitar que el flujo se separe del «techo» o de los laterales. No se habrá escapado a la atención de los lectores que todas las representaciones en diagramas de los tubos Venturi, incluyendo el esquema de la figura 2.2, muestran la parte convergente con un ángulo más pronunciado que la divergencia de la sección del difusor. Esto no es sólo una representación, sino una ley de la naturaleza, que dicta que debe haber un incremento gradual de la presión a lo largo de un difusor Venturi, y que es aplicable del mismo modo al difusor de un coche. Sin embargo, un coche que debe tener una sección plana en su fondo, que se extienda hasta las ruedas traseras, puede no tener mucho espacio para un difusor que se curve suavemente, y algunos difusores de Fórmula 1, que son muy cortos debido al reglamento, tienen unas divergencias muy pronunciadas. La influencia e interacción del alerón trasero, a lo que prestaremos más atención en breve, juegan un papel muy importante para explicar esta anomalía.

La configuración de fondo plano es predominante en muchas categorías de competición, y ha sido desarrollada hasta tal punto que, por ejemplo, los coches de Fórmula 1 son capaces de generar tanta carga aerodinámica como cuando estaban permitidos los «túneles», de los que hablaremos a continuación. Algunos estiman



El fondo del Minardi M197 ilustra el gran cambio de ángulo que tiene lugar, sobre todo, en el difusor.

que la cantidad de carga aerodinámica generada por el fondo plano de un Fórmula 1 es de alrededor de los 150 a 190 kg a 160 km/h, o lo que es lo mismo, un tercio de la carga total del coche. Para hacer una comparación interesante el desaparecido campeonato de Super Turismos de Clase 1 de la FIA, de cuyos coches se decía que generaban entre 90 y 180 kg de carga a 160 km/h, llegaban a producir sólo el 5 % de su carga aerodinámica total con el fondo y el difusor. La razón para esta proporción tan baja eran las protuberancias del diferencial trasero (se permitía tener tracción a las cuatro ruedas) y el sistema de escapes, que interferían con el flujo de debajo de los coches. Sin embargo, uno sospecha que este 5 % era una cifra estimativa bastante modesta difundida más para confundir a los competidores que para servir como información útil. La complejidad en la forma, y los desarrollos obvios que sufrieron los difusores, contaban una historia bastante diferente, y uno sospecha que la proporción real de carga generada por el fondo era bastante más alta de lo que sugiere esta cifra.



Las derivas laterales impiden que se cuele aire no deseado en el difusor, como en este Porsche 911 GTR.

En general, cuanto mayor es el ángulo de curvatura del difusor, mayor será la reducción de la sustentación, y la producción de carga aerodinámica. Katz (apéndice 2) muestra un caso simplista y generalizado de un experimento sobre un coche de pasajeros con un panel difusor inclinado pero plano. La reducción de la sustentación era muy marcada entre los ángulos entre  $0^\circ$  y  $4^\circ$ , y se convertían en valores de carga aerodinámica ( $C_{LR}$  negativo) con ángulos mayores de  $4^\circ$ , aunque las ventajas desaparecían gradualmente. Sin embargo, se midieron beneficios hasta un ángulo

de 11°. Añadiendo unos paneles laterales al difusor se consiguen unos beneficios aún mayores, y los valores de carga se ven incrementados, ya que los paneles laterales impiden que el flujo se escape por los lados. Esta configuración, que es en efecto un túnel Venturi, nos lleva hasta la siguiente sección.

## Los túneles

El precursor del fondo plano con difusor fue el diseño del «túnel» del efecto suelo, que, en formas posteriores más refinadas, produjo las cifras de carga aerodinámica más grandes jamás vistas en el mundo de la competición. Instigados, como hemos visto, por el equipo Lotus, los túneles causaron un cambio impresionante en los tiempos de vuelta de todo el mundo. Ese primer coche con efecto suelo (si ignoramos los que utilizaban potencia auxiliar antes que él) utilizaba pontones con una sección de ala invertida, fijados al chasis entre los neumáticos delanteros y traseros, para generar carga aerodinámica en el fondo del coche. La proximidad de las secciones de ala con el suelo mejoraba su funcionamiento, y su baja relación de aspecto, que normalmente reduciría su eficacia, dejó de ser un problema cuando se incorporaron las «derivadas laterales» o faldillas que llegaban hasta el suelo, sellando el fondo del coche. Para acomodar el movimiento vertical del coche sobre su suspensión, las faldillas podían subir y bajar con el fin de mantener el contacto con el suelo en todo momento (fig. 5.6). A pesar de su eficacia, no se tienen muy buenos recuerdos de las faldillas. Conseguió incrementar de forma dramática la carga aerodinámica mientras se movían hacia arriba y hacia abajo libremente, pero se sufría una enorme pérdida de carga cuando se quedaban atascadas en la posición superior.

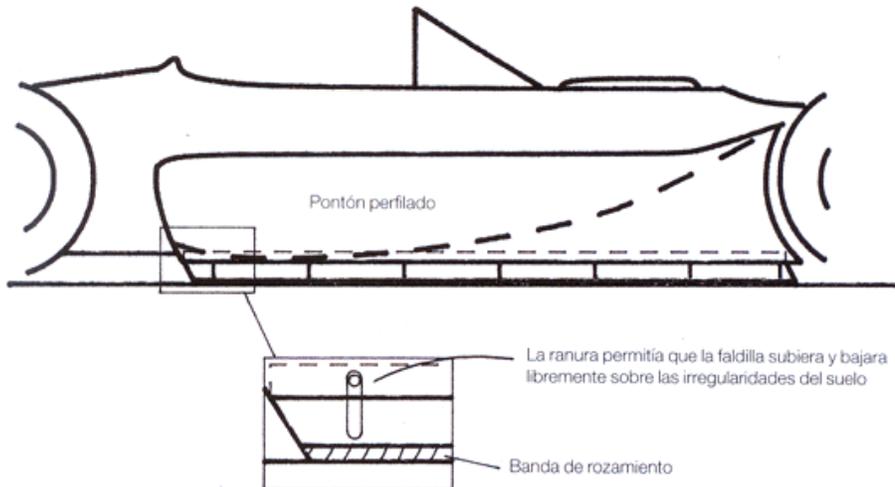
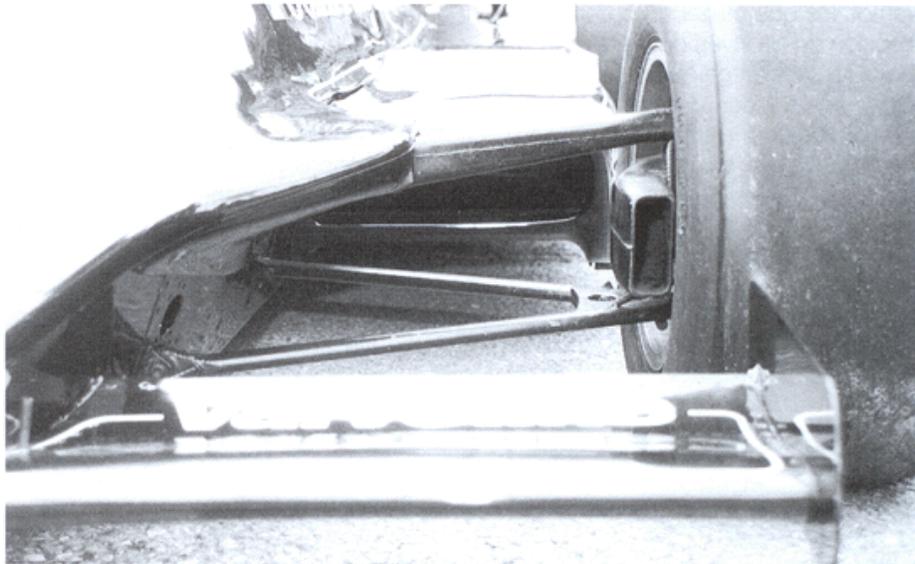


Figura 5.6. Las faldillas deslizantes en un coche con efecto suelo.

Eran poco fiables, y muchos pilotos tenían que volver andando a los boxes cuando la repentina pérdida de agarre, por culpa de una faldilla atascada, hacía que su coche se saliera de la pista. Las faldillas fueron finalmente prohibidas por razones de seguridad, pero no antes de que pasaran varios años.

El Lotus 79, que continuó con la línea marcada por el 78, era un magnífico ejemplo de la idea del coche ala, y fue el primer auténtico vehículo con efecto suelo.

Todos los demás aspectos del diseño del coche, excepto quizá la situación del motor, la caja de cambios, las ruedas y el piloto, eran secundarios para la efectividad de los túneles. El concepto del efecto suelo quedó refinado al máximo en este monoplace, y su éxito en la pista es el testimonio de su superioridad en aquella época. Lotus había encontrado la «ventaja secreta» que Chapman siempre había deseado.



Suspensión delantera despejada para permitir el paso de aire a los túneles de este Lotus 79.

El concepto de dos túneles Venturi a cada lado de la sección central, estaba dictado por la situación del motor y de la caja de cambios situados detrás del piloto en los monoplaces, en los sport prototipos y los GT (fig. 5.7). Claramente, un coche con motor y tracción delantera, si estuviera permitido, utilizaría un solo túnel que prácticamente abarcaría toda la longitud y anchura del coche (fig. 5.8). Pero sea cual sea la configuración del coche, los parámetros básicos de diseños para los túneles Venturi eran los mismos: el perfil tenía que consistir en una sección convergente corta, seguida de una garganta estrecha que llegara hasta un difusor divergente. La forma general, en tres dimensiones, estaba determinada por un lado por el suelo, y por el otro por el posicionamiento específico de los elementos de cada coche. La

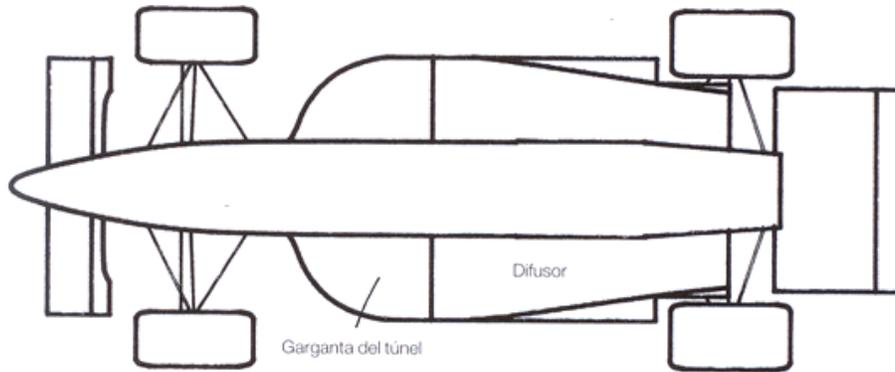


Figura 5.7. Configuración de doble túnel, vista desde abajo.

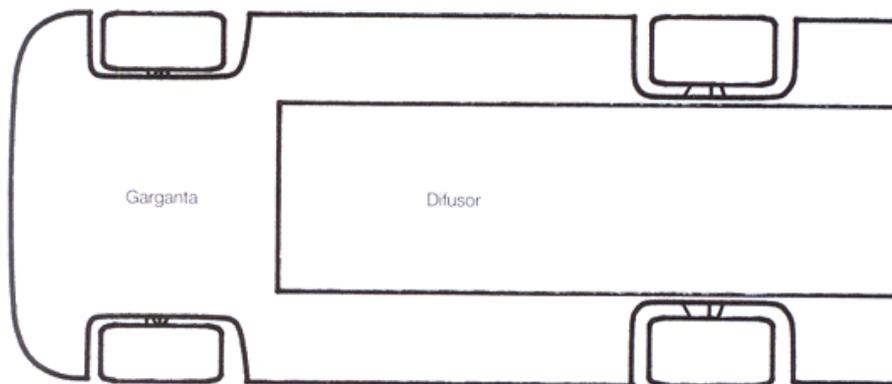
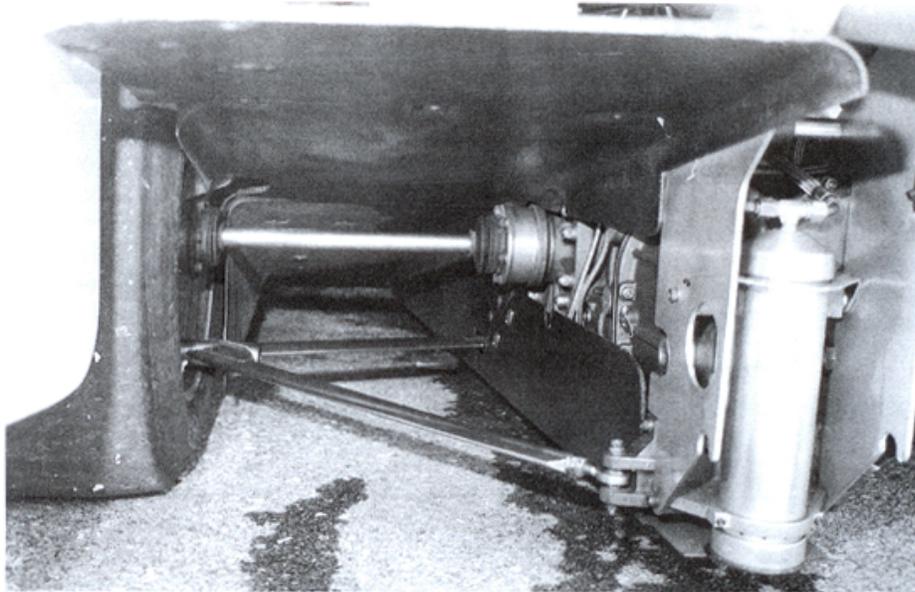


Figura 5.8. Configuración de túnel sencillo, vista desde abajo.

sección convergente y la garganta era fácil de conformar y posicionar y, gracias a una vía delantera ancha, se podía garantizar que las ruedas estaban lo suficientemente apartadas. Pero las secciones de difusor tenían que adaptarse a la parte trasera del coche, pasar por el motor y los escapes, preferiblemente sin recibir los efectos adversos de las ruedas traseras.

La importancia de expandir las secciones de difusión de los túneles puede verse en la cantidad de soluciones que los diseñadores intentaron con el fin de conseguir una zona lo más despejada posible. Las cajas de cambio se volvieron especialmente estrechas, los escapes fueron desviados hacia otra parte, los componentes adicionales del motor como los depósitos de gasolina y aceite fueron repositionados, y en un ejemplo particularmente notorio, en el McLaren MP4/2 de 1984 diseñado por John Barnard, el motor estaba diseñado en su forma externa



Túnel difusor izquierdo de un Jaguar XJR-6 de sport prototipo, separado del motor, la transmisión y la rueda.

de acuerdo con los criterios del proyectista del chasis y su aerodinamista, con el fin de optimizar al máximo la parte trasera de los túneles. El organismo gobernante le jugó una mala pasada a este proyecto cuando decidió prohibir los fondos perfilados en la Fórmula 1, pero todo el desarrollo previo sirvió, también, para obtener ventajas con el obligatorio fondo plano que se impuso.

Peter Wright, el hombre responsable del diseño y desarrollo de los primeros Lotus con efecto suelo, escribió un texto en 1983 (apéndice 2) en el que presentaba de forma gráfica el efecto en la carga aerodinámica de la altura del coche, el ángulo de cabeceo y el espacio entre los faldones y el suelo. Descubrió que la mayor cantidad de carga, y la mejor relación sustentación/resistencia, se conseguían con una altura de 65 mm, con un ángulo de cabeceo de alrededor de  $0,7^\circ$  a  $0,9^\circ$ . El coeficiente de sustentación, con respecto al área frontal, era de  $-2,25$ , con una relación de sustentación/resistencia de  $3,3:1$ , lo que representaba un coeficiente de penetración de  $0,68$ ; pero éstas son cifras del coche en general, incluida la contribución de los alerones delantero y trasero. El fondo contribuía en un  $80\%$  a los  $1.636$  kg de carga aerodinámica que se alcanzaban a  $290$  km/h. El efecto de la distancia de la faldilla con respecto al suelo fue interesante. Con una distancia de  $10$  mm la carga aerodinámica se veía reducida en un  $26\%$ , y con  $0,8$  mm alcanzaba casi el  $50\%$ . Obviamente, estas cifras se pueden aplicar solamente al coche de la prueba, pero deben haber sido muy representativas de los coches con efecto suelo de finales de los años 70.

Los túneles para el efecto suelo entre los ejes delantero y trasero crean un centro de presión situado bastante adelante, y la tarea de conseguir un equilibrio entre la parte delantera y la trasera es bastante diferente que el caso de un fondo plano con difusor. Así, se puede decir como una generalización bastante obvia, que, cuanto más adelante esté situada la garganta Venturi, más adelante se encontrará el centro de presión. Esto tenía la ventaja de que, con el fin de obtener el equilibrio entre el morro y la cola, se necesitaba muy poco o a veces ningún alerón delantero, que a su vez facilitaba el acceso del flujo de aire a los túneles. Esta situación duró tanto como lo hicieron las faldillas deslizantes, pero con la reducción de la carga aerodinámica debido a su prohibición, los alerones delanteros reaparecieron y volvieron a crecer una vez más. Sin embargo, todavía resultaba crucial que los alerones no interfirieran en el flujo que pasaba a los túneles, o, de igual manera, al sistema de refrigeración, que ahora era ventilado por unos conductos situados en los bordes de ataque de los pontones (fig. 5.9). Los coches actuales con túneles se benefician del uso de alerones delanteros asimétricos, con el fin de que la porción de alerón o de flap situada delante de la entrada del túnel sea menos extrema que las otras porciones.

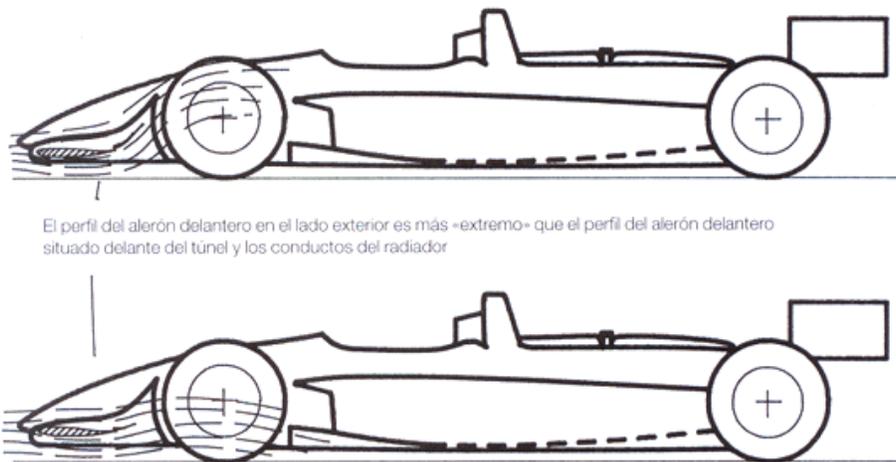


Figura 5.9. Coche actual con «túnel» y alerón delantero asimétrico.

Los alerones traseros nunca desaparecieron a pesar del efecto suelo, y esto se debe a dos factores: primero, el alerón trasero era el modo de equilibrar la aerodinámica, y si los alerones delanteros no estaban presentes era sólo un método de conseguir eso mismo, ya que los túneles no eran regulables; y segundo, la interacción entre el alerón trasero y el flujo a través de los túneles tenía el fin de aumentar la reducción de la presión en los túneles, por lo que el efecto del alerón trasero se sentía mucho más adelante. Esto será examinado con más detalle más adelante.

Un túnel bien diseñado era un elemento de tres dimensiones, y no sólo una forma Venturi de dos dimensiones con elevación lateral. Aunque consistía en un «techo» situado en ángulo recto con respecto a las «paredes», con el fin de maximizar el

área de sección transversal, el túnel y del mismo modo la masa de flujo de aire que pasaba por ahí, las uniones del techo con las paredes debían tener una forma redondeada, con el fin de evitar la separación del flujo en esas zonas. Contrariamente, en el caso de los túneles sin faldillas, las uniones inferiores del fondo de la pared del túnel con la porción exterior del techo debían ser anguladas. Esto tenía el efecto de crear un vórtice dentro del difusor a la vez que el inevitable flujo lateral se inmiscuía dentro del túnel, lo que en realidad servía para mantener el flujo fijo (fig. 5.10).

Los túneles pocas veces eran rectos desde el frente hasta la cola, sino que formaban un ángulo hacia dentro para dirigir el flujo de aire por el interior de las ruedas traseras. Permitir que el flujo llegara a las ruedas traseras hubiera causado una mayor turbulencia en el difusor, lo que habría afectado de manera significativa la eficacia de los propios túneles. Todas las transiciones dentro del túnel debían ser graduales, sin cambios bruscos en la forma que pudieran crear la separación del flujo. Y el borde de ataque de la entrada a la zona del fondo del coche era redondeada para facilitar el acceso del aire en esta área.

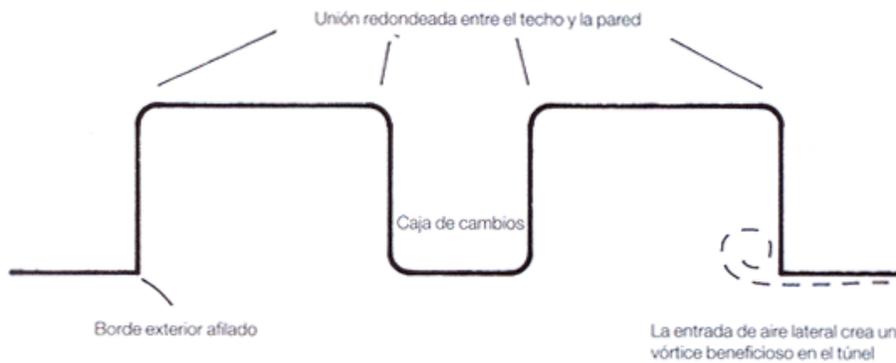


Figura 5.10. Sección transversal de un túnel doble.

Se descubrió que era imperativo que los túneles fueran lo más rígidos posible, con el fin de que los grandes cambios de presión no distorsionaran la estructura y dieran lugar a una carga inconsistente. Obviamente, las estructuras debían ser capaces, también, de soportar las enormes cargas aerodinámicas. Igual de importante que intentar sellar los bordes exteriores de los túneles, era sellar los bordes interiores contra el chasis, ya que la baja presión en los túneles podía fácilmente succionar aire de otras zonas.

Como hemos visto, las bajas presiones tienen lugar en la garganta de los túneles, y utilizando una garganta más larga, se puede conseguir mayor cantidad de carga aerodinámica. El lado negativo de esto era que se obtenía una mayor sensibilidad con respecto a la altura del coche y al ángulo de inclinación del coche, en suma, una mayor sensibilidad al cabeceo o «pitch». Se trata de una historia similar a la del

alerón delantero rodando con efecto suelo, como describíamos en el capítulo 4, y una vez más era una cuestión de los diseñadores tratando de encontrar una configuración que los pilotos pudieran controlar. Sin embargo, esto no detuvo la ridícula fase de desarrollo que llegó a hacer que la dureza de los muelles hiciera que al piloto le fuera imposible conducir, con el fin de mantener una plataforma aerodinámica consistente. Mientras la aerodinámica puede haberse beneficiado de la rigidez en los coches, los pilotos, desde luego, no lo hicieron.

Una vez que se prohibieron las faldillas y se especificó una distancia mínima con respecto al suelo, durante un tiempo hubo una pérdida sustancial de carga aerodinámica, pero pronto se encontraron nuevas soluciones para recuperar todas las pérdidas. Algunas fueron realmente inadecuadas, como la moda de utilizar aparatos controlados por el piloto que regulaban la altura del coche, lo que permitía que los coches rodaran pegados al suelo de la pista, y volvieran a su altura legal una vez entraban en boxes. Cómo las autoridades permitieron la existencia y la persistencia de estos sistemas es aún un misterio. Pero también se crearon soluciones más inteligentes, sutiles y legales, como la de darle forma a los bordes inferiores de los pontones para crear un «vórtice móvil» bajo los mismos, con el principio de evitar el paso de aire a esa zona, y así recuperar algo de las pérdidas causadas por la prohibición de las faldillas (fig. 5.11).

Todo lo anterior ha sido escrito en pasado pero, por supuesto, es aplicable a las categorías que todavía permiten el uso de túneles. El principal campeonato de Estados Unidos, la CART, permite los túneles, pero de un modo más reducido, con el fin de mantener las prestaciones bajo control.

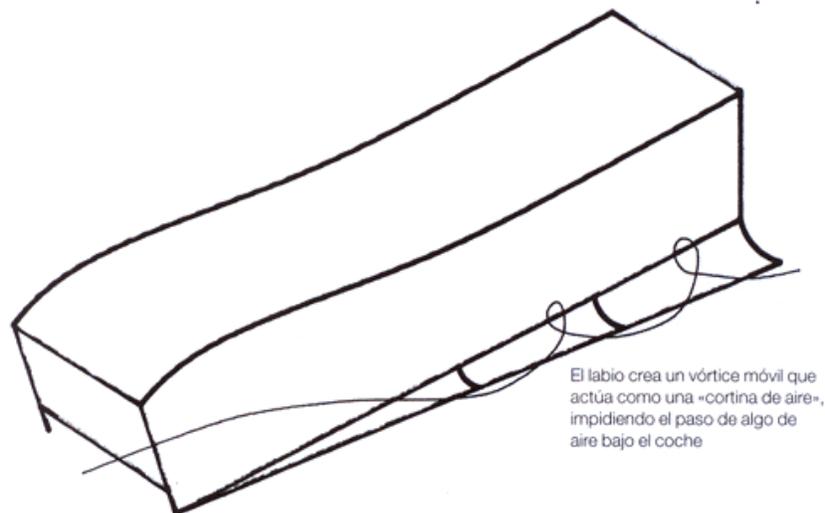
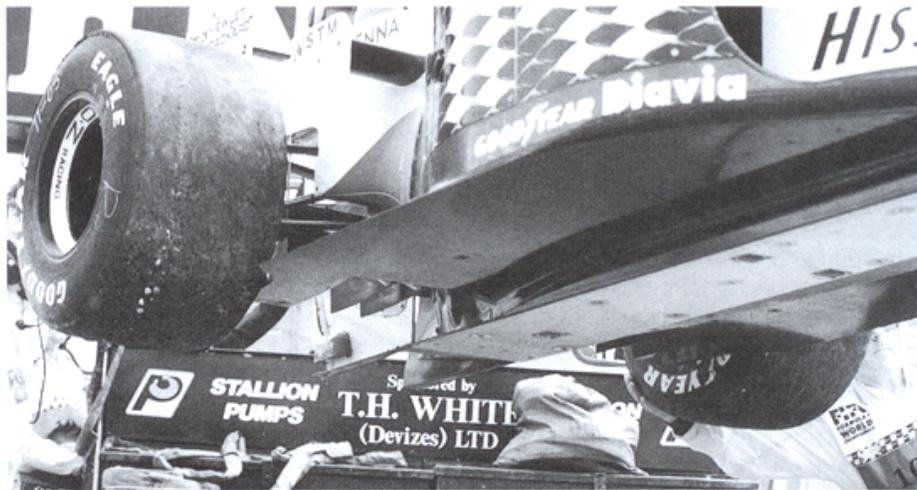


Figura 5.11. Esquema de un pontón con el labio exterior perfilado en lugar de un faldón.

Aunque no sea muy sorprendente que el dedo siempre apunte a la aerodinámica como responsable de la mejora en las prestaciones, la lucha entre los proveedores de neumáticos tanto de la CART como de la Fórmula 1 es la contribución más reciente a la mejora de los tiempos de vuelta. Indudablemente, se siguen encontrando mejoras aerodinámicas, pero con las estrictas reglas impuestas estos días, los beneficios resultan muy pequeños, y no son nada en comparación con la aparición de los alerones o la creación del efecto suelo.

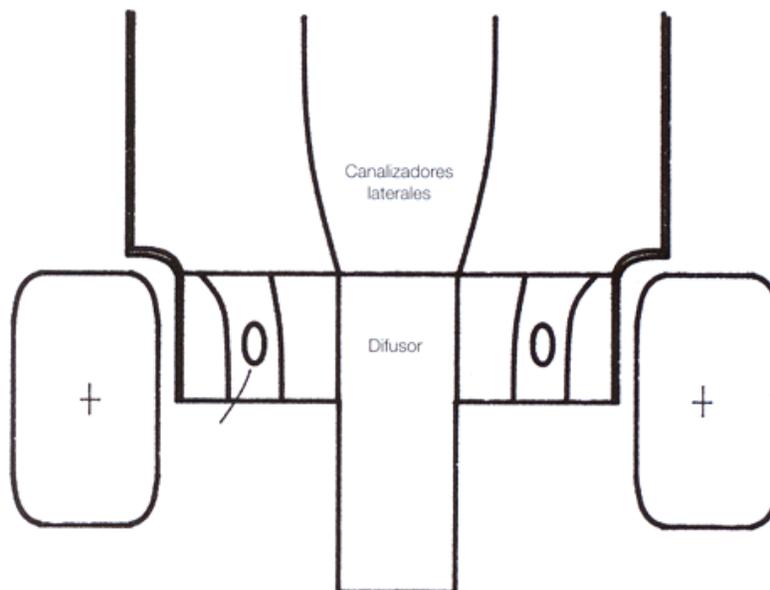


Los canalizadores laterales del difusor pueden verse en la parte trasera del Jordan 197, mientras que la foto inferior los muestra desde abajo.

## Generadores de vórtice, canalizadores y acción de los escapes

Otros elementos que trabajan en conjunto con la aerodinámica del efecto suelo son los generadores de vórtice y canalizadores laterales. Los generadores de vórtice pueden verse en los coches actuales de la CART, y son esos paneles laterales fijados a un lado del chasis, justo por delante de la entrada a los túneles. Su función es la de inducir un vórtice potente en la entrada del túnel con el fin de recuperar la fuerza perdida en el flujo de aire como resultado de pasar bajo el alerón delantero y alrededor del morro del coche. Por muy curioso que pueda parecer, el efecto de esto es incrementar la carga aerodinámica, lo que sugiere que el efecto persiste a lo largo del túnel, aumentado el efecto creado por las afiladas uniones entre el techo y las paredes que hemos comentado anteriormente.

Los canalizadores de flujo pueden verse en la mayoría de los difusores. Su propósito es el de controlar y suavizar el elemento lateral del flujo de aire que inevitablemente existe en la zona de la garganta, especialmente donde el área se encuentra en la misma línea que el eje delantero o trasero. Debido a que la baja presión en el fondo del coche chupa aire por los lados, y debido a que el aire tiene que pasar por las ruedas traseras, es muy posible que haya una convergencia del flujo en esta área. Los canalizadores laterales, montados verticalmente en el difusor, están situados así para alinear nuevamente el flujo lateral con el eje del coche, manteniendo así el deseado flujo controlado en el difusor (fig. 5.12).



Flujo de aire convergente controlado por los canalizadores

Figura 5.12. Vista inferior de un difusor de un coche de Fórmula 1.

La acción de los escapes se refiere a la práctica de encauzar la salida de gases del motor hacia el difusor trasero. El principio aquí es que los gases que salen a altas velocidades de los escapes se «inyectan» en el flujo del difusor, y aumenta la succión en esta área (fig. 5.13). El flujo de los escapes crea un vórtice en el difusor, que puede ayudar a retrasar la separación. Todo esto suena como un buen modo de utilizar la energía que de otro modo se desperdiciaría, hasta que se tiene en cuenta que el efecto varía dependiendo de la apertura del acelerador y las revoluciones por minuto del motor. Por tanto, el beneficio no resulta constante, y es mayor cuando el motor rueda muy rápido, una circunstancia que no siempre coincide con el paso por una curva o con el momento de la frenada. Sin embargo, algunos pilotos han aprendido a explotar este efecto mejor que otros, desarrollando la técnica del frenado con el pie izquierdo, lo que les permite mantener el pie derecho en el acelerador, y así consiguen el flujo de los escapes casi al máximo. Las configuraciones de dos pedales y los embragues de mano hicieron su aparición en la Fórmula 1 para mejorar algunos aspectos de la conducción, aunque se sacrifican los beneficios de un embrague normal en las salidas. La ganancia de carga aerodinámica gracias al flujo de los escapes se dice que es relativamente pequeña, pero algunos coches de Fórmula 1 todavía utilizan este efecto para conseguir esos pequeños beneficios.

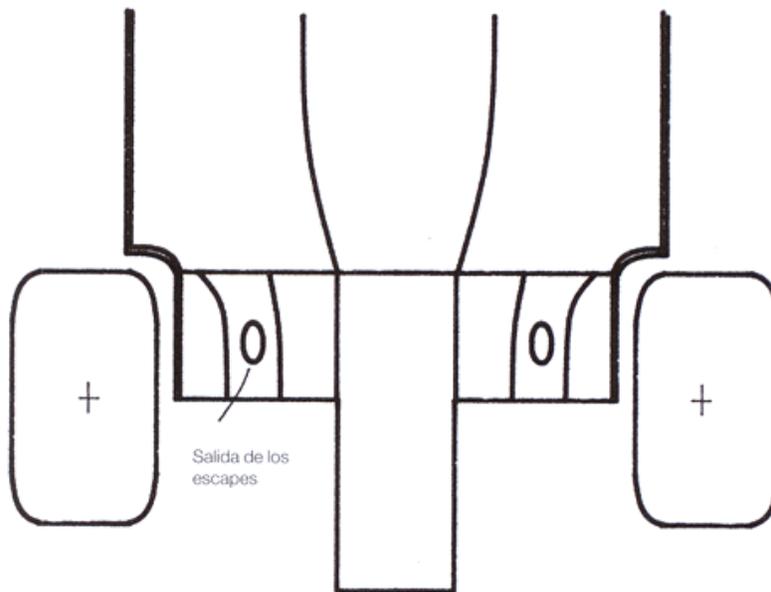


Figura 5.13. Salida de los escapes situada en el difusor.

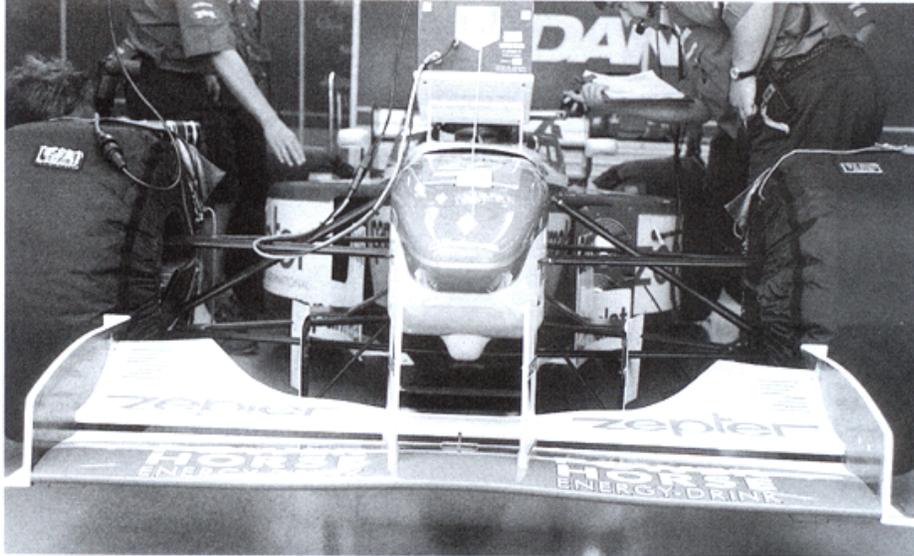
## Interferencias con los alerones

Las interferencias de los alerones con el fondo del coche han sido mencionadas en varias ocasiones hasta ahora, y está claro que pueden ser tanto perjudiciales como beneficiosas. El efecto de un alerón delantero mal diseñado puede ser muy negativo no sólo para el flujo del fondo, sino para el flujo de todo el coche. Sin embargo, el impacto puede ser minimizado prestando atención al cuidado por los detalles que tienen los mejores profesionales.

La cosa más obvia que un alerón delantero no debe hacer es entrar en pérdida. Si se necesita tanta carga aerodinámica que el alerón delantero está a punto de entrar en pérdida, entonces resulta mejor equilibrar el coche utilizando menos alerón delantero y quitando algo de alerón trasero, ya que las turbulencias causadas por un alerón delantero con tanta carga puede deteriorar no sólo el flujo del fondo, sino también el de los radiadores y, probablemente, el del alerón trasero. Una alternativa, y quizá de mayor duración, sería utilizar un alerón delantero con una cuerda mayor, o estrechar el morro del coche y montar alerones con mayor envergadura, con lo que se conseguiría aumentar la carga aerodinámica con el mismo, o menor, ángulo de ataque. Los elementos secundarios de un alerón delantero tienen normalmente un ángulo más pronunciado en sus extremidades exteriores que en la parte interior de su envergadura. Esto da lugar a un mejor flujo a los radiadores, pero también a la parte delantera del fondo. Una solución más sencilla y práctica es utilizar un flap de perfil sencillo, pero que sólo ocupe parte de la envergadura y que vaya montado sobre el exterior del elemento principal.



Los flaps asimétricos permiten el paso del flujo a los radiadores y al fondo.



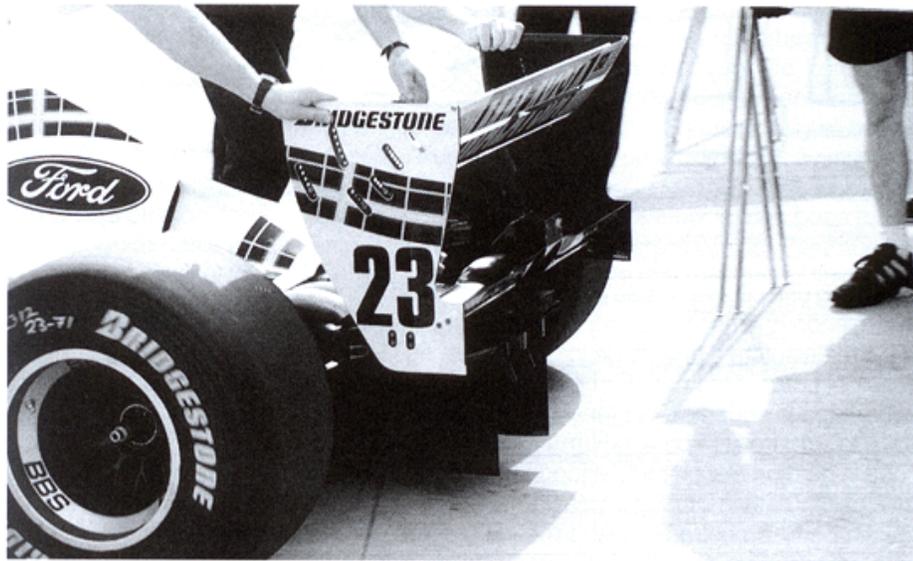
Los alerones delanteros de los Fórmula 1 tienen una forma que ayuda a canalizar el aire hacia los radiadores y el fondo.

Los alerones de los coches más potentes tienen aún más complejos detalles integrados en sus estructuras. Normalmente se encuentran curvados para que el borde de ataque del centro sea más alto que en los extremos exteriores. Esta tendencia la inició de una forma bastante extrema el equipo Tyrrell de Fórmula 1 con su diseño de diedro negativo en el alerón delantero del 019, que iba conectado con el primero de los ahora universales «morros elevados». El objetivo era, y es, mejorar el flujo de aire debajo del coche. Además se consiguió que el alerón delantero, y en general todo el coche, fuera menos sensible a los cambios de altura y cabeceo, ya que el flujo bajo el alerón no era bloqueado si el coche se inclinaba hacia delante. Los coches de Fórmula 1 de hoy en día llevan sus alerones delanteros suspendidos por paneles enganchados al morro elevado, lo que maximiza la envergadura útil del alerón, y permite que el morro tenga la forma adecuada para canalizar el aire a las zonas deseadas, tal como los radiadores o el fondo del coche.

El alerón trasero también tiene un impacto importante en las prestaciones del fondo del monoplaza. En general, los alerones traseros no sobresalen mucho en los coches de competición por la parte de atrás (excepto en los coches de montaña del campeonato británico, donde se permite que sobresalgan 1,5 m desde la línea del eje), lo que viene normalmente dictado por el reglamento. Por tanto, existe una interferencia entre la baja presión creada en el lado de succión del alerón trasero y el flujo de aire de los difusores en la parte de atrás del fondo del coche. Este efecto es aplicable prácticamente a todas las categorías que utilizan un alerón trasero, y en donde se intenta mantener bajo control el flujo de aire del fondo con el fin de reducir la presión.

Katz (apéndice 2) da ejemplos, una vez más, de una variedad de vehículos, desde coches de carreras en forma de turismos hasta monoplazas, en los que la distribución de la presión se midió con y sin alerones traseros. En todos los casos el alerón trasero tenía un profundo efecto positivo en la presión del fondo del coche, y el efecto se extendía hacia delante en cada caso, por lo que el incremento de la cantidad total de carga aerodinámica era muy significativo. El efecto es claramente similar al de montar un flap en el lugar apropiado para aumentar el efecto de un alerón de un solo elemento, en cuyo caso, el flujo alrededor del flap, y a través de la ranura entre el flap y el elemento principal, permitía que se creara más carga. En el caso de un coche con alerón, la escala es diferente, pero el efecto de succión del alerón aumenta la reducción de la presión en el fondo.

Es posible ver los esfuerzos de los diseñadores por explotar esta interacción estudiando la posición relativa y la forma de los alerones traseros y los difusores en los coches de Fórmula 1. La posición horizontal de los alerones y el difusor está regulada por el reglamento, pero su situación vertical ofrece algo más de libertad. Aquí, el plano inferior de los, a veces, alerones con varios planos, se encuentra muy cerca de la porción central extendida del difusor. Como ya dijimos anteriormente en este capítulo, la succión ejercida en esta parte por el difusor es a veces muy fuerte, y el único motivo por el que se puede usar esta configuración es porque el plano inferior del alerón ayuda a mantener el flujo fijado al techo del difusor. De hecho, un aerodinamista de Fórmula 1 declaró que el alerón trasero «controla» al difusor. Por esto, a pesar del reglamento que limita las dimensiones del difusor, su sección transversal puede expandirse hasta un área bastante grande, lo que tiene el efecto de incremen-



El alerón trasero «controla» el difusor.

tar la velocidad de flujo de aire a través de la garganta, creando así más carga aerodinámica. La increíble complejidad de la forma de los difusores de Fórmula 1 actuales refleja la búsqueda de los ínfimos beneficios, aquí y allí, en la interminable batalla por superar a los rivales.

## Algunos números

Al igual que en los capítulos anteriores, vamos a hacer una pausa para echar un vistazo a algunos números a través, en este caso, de unas sencillas sumas. Se explicó antes que el fondo de un Lotus de Fórmula 1, con túneles y faldillas, producía alrededor de 1.310 kg de carga aerodinámica a 290 km/h. Para poder compararlo con los cálculos anteriores, averiguaremos cuál sería la cantidad a 160 km/h, utilizando la regla de «la carga es proporcional al cuadrado de la velocidad». Así que a 160 km/h, este coche generaría unos 405 kg de carga en la zona del fondo.

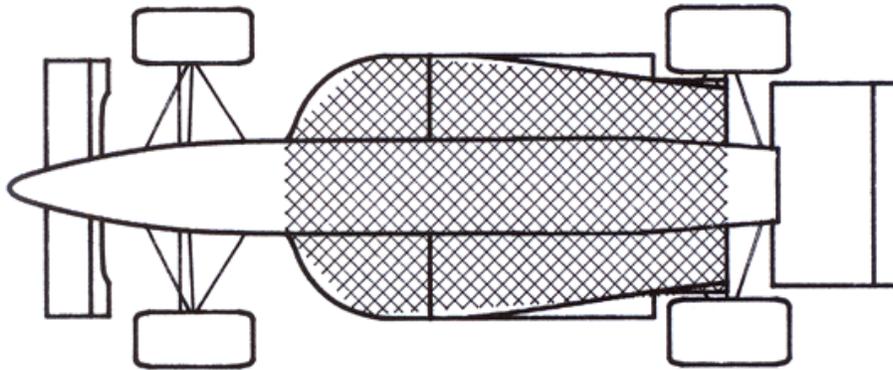


Figura 5.14. Área «activa» del fondo de un monoplaza para utilizarla en los cálculos.

Con una cifra estimada para la superficie de planta de la zona «activa» del fondo (asumiendo que es un rectángulo cuyas esquinas están definidas por los faldones, y la parte delantera y trasera de los pontones, fig. 5.14) de alrededor de 3,36 m<sup>2</sup> en el caso del Lotus. Esto nos permite averiguar la cantidad de pérdida de presión media sobre toda la superficie del fondo, dividiendo la carga por el área. Esto da como resultado 1,18 kpa (1 kpa = 1kN/m<sup>2</sup>). Claramente, la pérdida media de presión no describe la pérdida real en todo el fondo, ya que la presión mínima absoluta sería mucho más baja, y estaría situada en las gargantas de los túneles, mientras que la zona central sin perfilar mostraría mucha menos pérdida de presión. Pero de todas formas, este cálculo sirve para ilustrar cómo una presión aparentemente modesta genera mucha carga aerodinámica cuando se integra en un área grande.

El texto de 1983 de Peter Wright mostraba cómo la habilidad del Lotus para generar carga aerodinámica descendía con el incremento de la distancia de las faldillas con respecto al suelo. Para hacernos una idea mejor, es interesante mirar la pérdida de presión con una distancia al suelo de 40 mm, un valor impuesto como mínimo en muchas categorías de competición. Según Wright, el coeficiente de sustentación negativa con una altura de 40 mm era de alrededor del 20 % de valor sin separación entre las faldillas y el suelo, lo que implica que sólo el 20 % de la carga del fondo estaría disponible con esta altura. Esto daría como resultado unos 80,5 kg a 160 km/h, una cifra más modesta, pero a la vez muy útil.

El área del fondo de los Fórmula 1 actuales es de aproximadamente 3 m<sup>2</sup>, y, como hemos dicho anteriormente, se conseguían generar a 160 km/h entre 150 y 190 kg de carga aerodinámica sólo en esa área. Así, la pérdida media de presión es del orden de 0,49 a 0,62 kpa. Esta pérdida es considerablemente mayor que la obtenida con el Lotus de Fórmula 1 con los faldones a una altura de 40 mm, pero sólo la mitad del valor producido por el coche que realmente compitió. A pesar de todo, el progreso conseguido para recuperar la carga aerodinámica perdida, primero por la prohibición de las faldillas deslizantes, y después por la prohibición de los túneles, es considerable, y refleja el tiempo, el esfuerzo y la genialidad que se ha aplicado a esta tarea.

## Baja resistencia

Como ya hemos mencionado anteriormente, cuando Lotus presentó el modelo 78 al mundo, utilizaron la frase «hemos conseguido algo por nada». La importancia de las implicaciones de este comentario no puede ser mayor, aunque hay que decir que Lotus no consiguió romper ninguna ley de la naturaleza gracias a ello. Lo que había hecho era controlar el flujo de aire de alrededor del coche de una manera mucho más eficaz, por lo que el gran aumento de la carga aerodinámica se consiguió con un pequeño aumento de la resistencia. Al crear un método para que el aire fluyera suavemente por debajo del coche, con el fin de mantener la alta velocidad del flujo, y con ello la baja presión, también se creó un régimen de baja resistencia, con poca turbulencia, donde hasta el momento había existido un caos aerodinámico. Pero aún había más. Al elevar el fondo en la parte trasera del coche, y manteniendo el flujo hasta la parte trasera de los difusores, el área base efectiva del coche se vio reducida, y con ello también se redujo el área en la que el flujo se separaba. En otras palabras, el tamaño de la estela se volvió menor, y como resultado de esto se redujo la resistencia. Sin embargo, tuvo que haber un incremento en la resistencia como consecuencia del aumento de carga inducido, pero en general, las ventajas se consiguieron con un aumento de la resistencia muy pequeño. Así que «algo por nada» era un poco exagerado, y por muy apetecible que resulte la idea, nunca se consigue algo a cambio de nada. Esta ilusión surgió debido a las importantes mejoras aerodinámicas que se consiguieron.

Mientras que los túneles de efecto suelo fueron prohibidos en la Fórmula 1 desde el comienzo de 1983, la FISA, como se conocía entonces, permitió la conti-

nuidad del uso de los túneles en los sport prototipos del «Grupo C», hasta la desaparición de la categoría en 1992. Con el fin de limitar la efectividad del fondo, se creó una regla que obligaba a montar una placa de 1.000 mm × 800 mm justo debajo del compartimento del piloto, pero dejando de lado esto, los túneles no tenían ninguna restricción. La configuración básica de los sport prototipos, que también incluye los coches construidos bajo las reglas de la Professional Sports Car Racing (antiguamente IMSA) de Estados Unidos (aunque éstos cuentan con el fondo plano), permite un área del fondo muy amplia, y el hecho de llevar las ruedas cubiertas permite unos diseños muy afilados y con poca resistencia. Por esto, es en esta categoría donde se construyeron los vehículos más eficaces aerodinámicamente hablando. Coches como el Jaguar XJR, el Porsche del 956 al 962, el Peugeot 905, el Nissan P35, y el Mazda RX7-792 fueron desarrollados hasta tal punto que se alcanzaron valores de  $-C_L$  de hasta 4,0, con  $C_x$  de 0,7, y relaciones de sustentación/resistencia de hasta 6. Por supuesto, estas cifras están en relación con su área frontal, y reflejan que la carga aerodinámica era producida, en su mayor parte, por la gran superficie de planta de los coches.

Hemos visto que el fondo de un coche puede ser modificado para producir una gran cantidad de carga aerodinámica, y que los componentes situados encima y debajo pueden influir en la eficacia aerodinámica de dicho fondo. Sin embargo, existe en general una falta de información específica que sirva al competidor aficionado. Éste, si quiere construir o mejorar túneles, o el difusor trasero, se ve obligado una vez más a la angustiosa tarea de aprender de los errores en la pista y volver a modificar en el taller. Mientras tanto, los profesionales cuentan con el cálculo de la dinámica de fluidos mediante el ordenador (CFD), o dinámica de fluidos por computación, para comprobar la validez de sus ideas mucho antes de que se conviertan en un modelo a escala, para hacer toda clase de pruebas en los túneles de viento. El siguiente capítulo tratará con más detalle las herramientas utilizadas por los profesionales, y también aquellas que pueden ayudar a los aficionados en la búsqueda de una solución aerodinámica para lograr ir más rápido.

## 6. Eliminación de conjeturas: visualización y medición

La aerodinámica de los vehículos puede ser una rama de la ingeniería, pero no por ello deja de ser una forma de arte. Si fuera simplemente una disciplina científica, casi todos los coches tendrían un aspecto prácticamente idéntico, y probablemente sus prestaciones también lo serían. Afortunadamente, éste no es el caso, y aún existe lugar para el individualismo y la creatividad. Esto nos lleva a pensar que el aerodinamista aficionado tiene las mismas posibilidades de hacer que sus ideas funcionen. Pero, con el fin de mejorar las probabilidades de éxito, es bueno determinar qué está pasando en el aire que se mueve alrededor del coche. Existen varios modos de hacer esto, algunos más precisos que otros, y hay algunos que el diseñador amateur sólo puede ver desde la comodidad de su sillón. A pesar de todo, con observaciones cuidadosas y quizás unas inversiones prudentes, incluso el aficionado puede lograr obtener una gran cantidad de datos que le ayuden a diseñar y desarrollar un coche de carreras.

### Visualización del flujo

Cuando se le preguntó por qué vivía en Nueva York, el cómico Woody Allen contestó en una ocasión: «No confío en el aire que no puedo ver». Probablemente no se dio cuenta en ese momento, pero había dado con uno de los problemas principales que tanto los aerodinamistas profesionales como los amateurs tienen que afrontar: no pueden ver el medio con el que están trabajando hasta que lo contaminan con algo, o utilizan algún método de revelar la dirección en la que está fluyendo y el estado en el que se encuentra, o sea, turbulento o suavizado.

A veces es posible ver los movimientos del flujo alrededor de los coches desde la pista, o incluso en la televisión. Por ejemplo, en días particularmente húmedos, los coches de Fórmula 1 y de la CART/IRL pueden generar vórtices visibles en el alerón

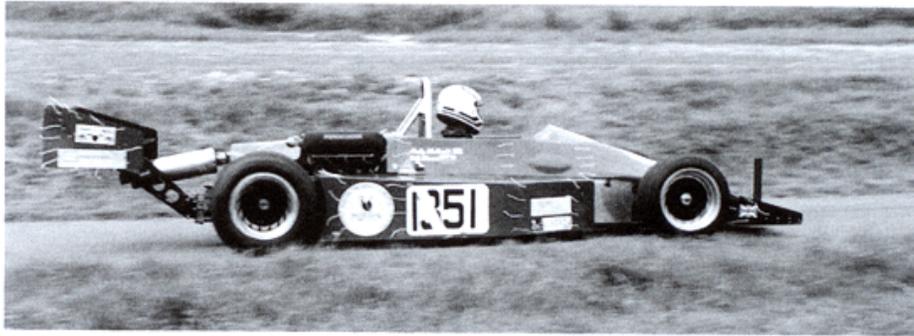
trasero. Por supuesto, los vórtices están siempre ahí cuando el coche está en movimiento, pero la especial naturaleza de las condiciones atmosféricas húmedas hace que la baja presión en el núcleo del vórtice haga que se condense el vapor de agua y se vuelva visible temporalmente. En condiciones mojadas, los extraordinariamente fuertes vórtices pueden verse en forma de altas colas de rocío. Otras ocasiones en las que se pueden ver los vórtices es cuando el motor de un coche explota y se forma una enorme nube de humo. La pérdida del propietario del motor es nuestra ganancia, ya que el humo se mete en los patrones circulares creados por el coche, y más que ver solamente el núcleo de los vórtices, lo que vemos es todo el flujo rotando durante un instante. La influencia de un coche en el polvo, las hojas y otros restos pueden hacer que algunos aspectos del flujo de un coche sean visibles momentáneamente, pero, por muy espectacular que resulte, todo esto no nos sirve para llevar a cabo estudios serios. Se necesitan otros métodos más controlados para conseguir algo.

La visualización del flujo no es una técnica primaria para los aerodinamistas profesionales del mundo del motor, pero suele ser utilizada como un método para comprobar el resultado de los cambios y modificaciones llevadas a cabo sobre algún elemento. Por ejemplo, durante unas pruebas en el túnel de viento, aumentar gradualmente el ángulo del alerón puede suponer mejoras hasta el punto en el que comienzan a disminuir. Se asume, obviamente, que el alerón ha entrado en pérdida, pero quizá sólo parte de éste lo ha hecho. Utilizando medios para la visualización del flujo alrededor del alerón en cuestión, se puede llegar a averiguar cuál es la parte de dicho alerón que está en pérdida. Y si esto resulta ser así, la envergadura del alerón puede ser modificada para que el flujo a lo largo de esa envergadura siga fijado durante más tiempo, lo que permite generar mayor carga aerodinámica antes de que tenga lugar la pérdida.

Ver lo que está ocurriendo en el aire de alrededor del coche, y en particular en las zonas más importantes como los alerones, spoilers, difusores y sistemas de refrigeración, puede ayudar en gran medida a comprender lo que está ocurriendo. Además, puede servir para hacernos pensar en cómo se puede mejorar aerodinámicamente nuestro vehículo. Existen varios modos de hacer esto, los cuales pueden utilizarse en la pista, tanto en los entrenamientos como en la propia carrera si no se dispone de tiempo para lo primero.

El más famoso y quizás el más utilizado de los métodos para ver los patrones del flujo cerca de la superficie del coche es el método de los «hilos de lana». Con cinta adhesiva, se fijan hilos de lana de aproximadamente 50 a 75 mm de longitud en las expuestas del vehículo, o sea, en los alerones, spoilers y todas las demás partes de interés (incluyendo posiblemente el casco del piloto), para que puedan moverse hacia atrás en la dirección del flujo. Después se comienza a rodar con el coche, quizás a unas velocidades determinadas de antemano, mientras los observadores miran y hacen fotografías. Esto se puede hacer desde el borde la pista, o desde otro coche que rueda al lado, asumiendo que la pista permita estas libertades. Sin embargo, se debe tener cuidado para asegurarse de que el segundo coche no se sitúa tan cerca del otro que interfiera en el flujo de aire. Las imágenes que se obtienen con esta prueba suelen ser sorprendentes, y el flujo de alrededor del coche suele ser

bastante diferente de lo que uno espera. Por ejemplo, el flujo que pasa por el alerón delantero de un monoplace puede verse muy poco uniforme, especialmente si la envergadura del alerón se extiende por delante de las ruedas delanteras. De manera similar, el flujo sobre el capó de un coche de pasajeros puede ser algo realmente complejo. Aquí es donde esta clase de estudio puede comenzar a ayudar a comprender qué es lo que hace el aire. Los efectos generales pueden verse, y recoger esta información es quizás el primer paso para ser capaces de dirigir y manejar el flujo del modo más eficaz y beneficioso.



Desde un costado de la pista se pueden tomar fotos de las tiras de lana. (Tracey Inglis)

Los hilos de lana pueden mostrarnos la dirección del flujo cerca de las partes más importantes, como los bordes de ataque de los alerones traseros, las entradas de aire del sistema de refrigeración o los conductos NACA que llevan el aire hasta los radiadores de aceite. También es posible ver si el flujo es turbulento o, por el contrario, fluye suavemente. Al mirar el coche en movimiento, se verá que algunos de los hilos se echan hacia atrás en la dirección del flujo, mientras que otros se mueven hacia todas partes de manera salvaje. En las fotografías, los hilos de las regiones uniformes se verán tal como son, mientras que aquellos que se mueven en todas direcciones se verán probablemente borrosos, siempre que el obturador de la cámara no sea demasiado rápido (quizá no más rápido de 1/60 seg). Claramente, éstos son indicadores de un flujo separado y muy turbulento, puede ser deseable hacer o no algo al respecto, pero por lo menos se sabe que está ahí.

Se ha dicho que un compresor normal de taller puede utilizarse para generar el flujo de aire necesario para poder realizar la prueba de los hilos en parado, dirigiendo el aire a lo largo de la carrocería para simular el flujo. Aunque esto puede resultar útil para sacar algunas conclusiones, el problema de este método es que resulta difícil saber si el aire está siendo esparcido en la dirección correcta. Y el aire que sale de un compresor lo hace en forma de cono, algo que es poco probable que haga un flujo auténtico. Otra fuente de aire posible, aunque nunca la he probado ni he oído de nadie que la probara, es un soplador de hojas, uno de estos aparatos que sirven para soplar las hojas caídas de los árboles. Con toda seguridad, el aire que emita será demasiado turbulento, pero vale la pena intentarlo, especialmente si se puede controlar

el flujo con, por ejemplo, una campana como la que se puede encontrar en los extractores de cocina.

A pesar de todo, las pruebas de los hilos de lana tienen un defecto. Por un lado, al igual que otras técnicas de visualización del flujo, sólo se ve el flujo inmediatamente adyacente a la superficie, lo que significa que hay que hacerse una imagen mental del flujo tridimensional, algo que por lo menos resulta más fácil una vez que se hayan visualizado los flujos de las superficies. Por otro lado, es imposible, en circunstancias normales, ver lo que está ocurriendo debajo de los alerones, los separadores y el fondo del coche. Sin embargo, uno se puede imaginar que, con algo de ingenio, sería posible fijar una cámara accionada a distancia, montada en un lugar seguro como el alerón trasero, con el fin de fotografiar la parte inferior de alerón o quizás el flujo de la parte trasera del difusor. Algunos métodos más determinados, apoyados por un poco de tecnología, podrían darnos imágenes del flujo del fondo, siempre y cuando el aparato que captase las imágenes fuera lo suficientemente pequeño como para no influir en el flujo.

Otro método de visualizar las direcciones del flujo sobre la superficie de un coche es mirar las marcas que dejan los líquidos que caen sobre su vehículo. Esto puede ocurrir en un día lluvioso, cuando la lluvia y el barro se combinan para dejar marcas por toda la carrocería, o cuando un coche ha estado siguiendo a otro que pierde algún líquido, como aceite, lo que también deja una marca en la superficie. En estas ocasiones es muy constructivo echarle un vistazo al coche cuando regresa a boxes, e incluso hacer dibujos o tomar fotos. Como ejemplo de lo que puede llegar a verse, la figura 6.1 muestra cómo la influencia del poste de sujeción central del alerón trasero de uno de los coches de montaña pilotados por el autor, un Delta T82, afecta al flujo en unas condiciones muy desfavorables. El poste estaba construido en aluminio carenado en su totalidad, excepto en los últimos 25 o 30 mm más cercanos al alerón, que con las pruebas dejadas por las marcas, queda claro que era el problema. Otros experimentos han mostrado en qué parte del alerón se producía una pérdida, evidenciada por la separación del flujo en partes de la envergadura del flap

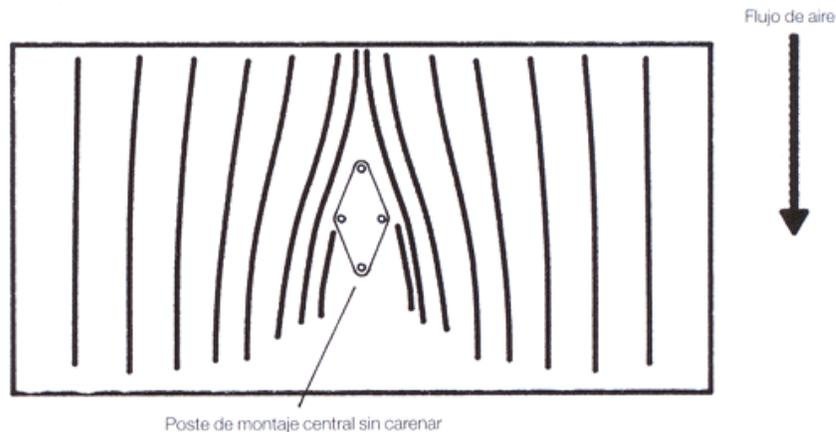
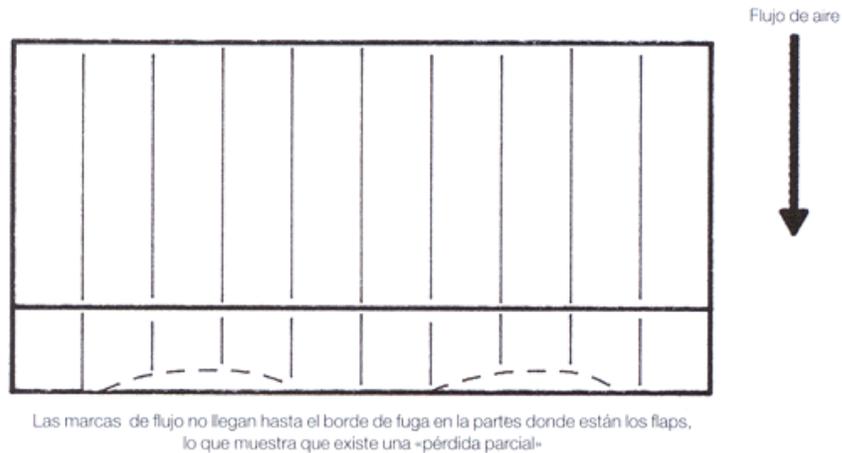


Figura 6.1. Marcas dejadas por el barro en la parte inferior de un alerón trasero.



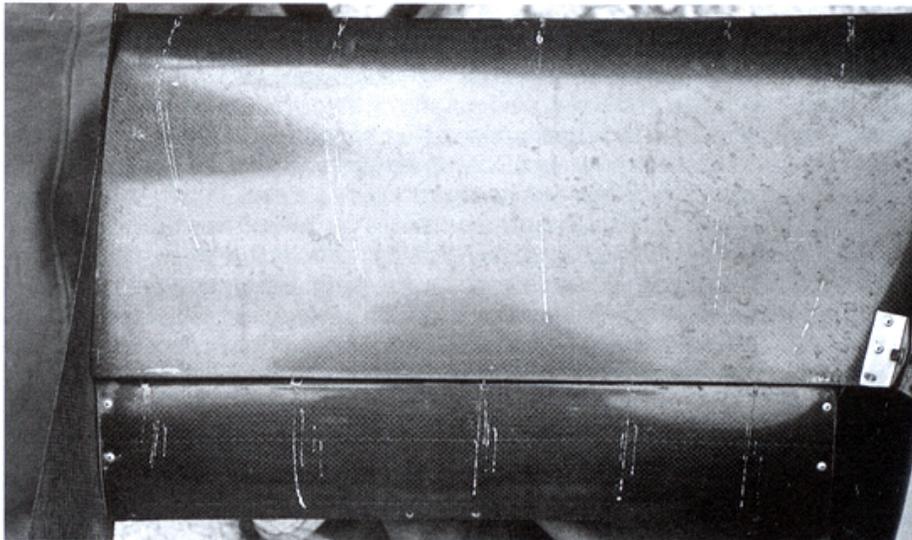
**Figura 6.2.** Marcas dejadas en la parte inferior de otro alerón trasero.

trasero (fig. 6.2), una situación que no afectaba para nada las prestaciones, pero que podía haber estado añadiendo resistencia sin aumentar la carga. Bajando un poco la inclinación del flap, se consiguió una configuración más eficaz.

Por supuesto, no es necesario esperar a un día con lluvia, o a un desafortunado rival que vaya perdiendo aceite delante de nosotros. Puede aplicar estas gotas de un líquido adecuado en las partes de interés antes de salir a la pista, y después comprobar los resultados cuando el coche haya vuelto a boxes. Los líquidos que se pueden utilizar para este ejercicio deben ser de una viscosidad relativamente baja y poco volátiles para que no se evaporen con rapidez. La parafina (queroseno), el gasoil de un motor Diesel, y el aceite lubricante fino han resultado ser excelentes para este propósito. Jamás se le ocurra utilizar un producto corrosivo sobre la pintura o cualquier otra parte de su coche. Con el fin de que las marcas sean visibles, a veces se debe añadir alguna clase de colorante, aunque normalmente hay suficiente polvo suelto para que se adhiera a las pegajosas gotas. La idea es que el líquido se evapore durante la prueba, dejando así una especie de marca impresa del patrón del flujo. Si el líquido no es lo suficientemente volátil, puede no evaporarse, y volverá a las partes más bajas cuando el coche frene o se pare, lo que da lugar a la confusión y crea inseguridad sobre los resultados obtenidos. Con un poco de ingenio se puede llegar a utilizar un sistema de bomba, para que el piloto pueda soltar el líquido en la parte del circuito elegida y a la velocidad deseada. Si se mantiene la velocidad adecuada durante unos instantes mientras el fluido se seca, dejando las marcas, éstas serían el patrón del flujo de esa velocidad determinada.

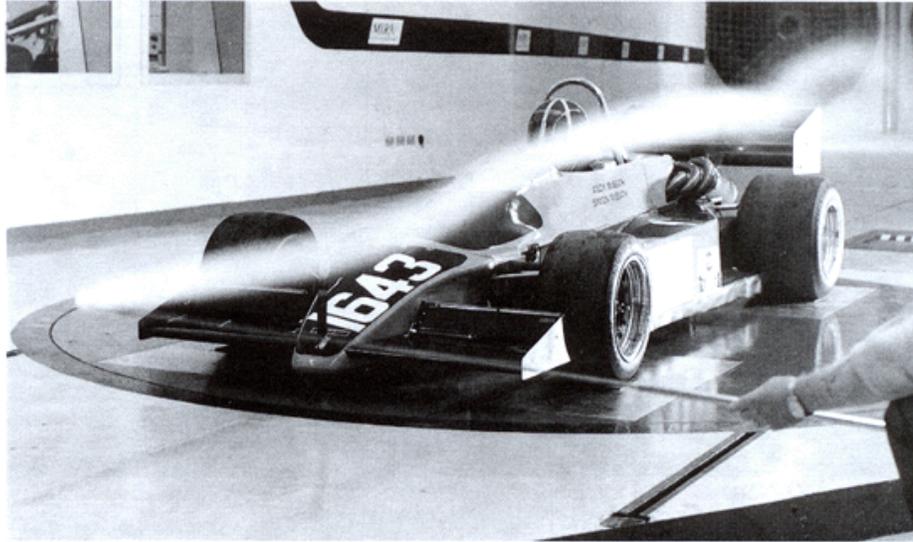
Como hemos mencionado con anterioridad, esta forma general de visualización de flujo es utilizada por los equipos profesionales durante las pruebas en los túneles de viento, a la hora de probar con condiciones o configuraciones diferentes. Habiendo pasado algo de tiempo con un monoplaza a escala en un túnel de viento, fue fascinante ver la colección metódica de datos sobre la carga aerodinámica y la resistencia, según

se probaban diferentes ángulos en el alerón delantero. Con un ángulo de incidencia razonablemente pronunciado en el alerón delantero, la cantidad de carga comenzó a caer, así que los técnicos aplicaron su propio líquido de pruebas (basado en gasoil Diesel) a los alerones delanteros y pusieron en marcha el túnel. Después de la prueba, utilizaron un espejo para examinar los patrones de la superficie inferior del coche y otras partes más atrasadas. La información que recogieron tuvo como resultado una llamada de teléfono al departamento de producción para averiguar si podían hacer los alerones con una cantidad diferente de curvatura en la envergadura. Y esto demuestra dos de las ventajas especiales que supone utilizar las marcas de líquidos para visualizar el flujo: en el coche queda un rastro de dos dimensiones, que puede ser estudiado, dibujado y fotografiado; y debido a esto, es relativamente fácil estudiar los patrones del flujo sobre las superficies inferiores de los componentes o del chasis. Algunos técnicos de los túneles de viento han utilizado incluso tintes fluorescentes para sus pruebas, para que la influencia de una luz ultravioleta muestre las marcas con especial luminiscencia.



Las marcas de pintura dan lugar a interesantes conclusiones en este alerón delantero. (Tracey Inglis)

Sin embargo, con la excepción de los casos mencionados al comienzo de esta sección, por ahora sólo hemos podido examinar las superficies del coche. Pero existe una técnica que permite estudiar el flujo en zonas alejadas de la carrocería: la visualización de flujo mediante el uso de humo. La mayor desventaja de esta técnica, por lo menos en lo que se refiere a los aficionados, es que se necesita un túnel de viento en el que realizar las pruebas, y probablemente uno a tamaño real, ya que es poco probable que los amateurs dispongan de modelos a escala para utilizar. Pero como veremos en una sección de más adelante, el flujo de un túnel de viento a tamaño real no es algo inalcanzable.

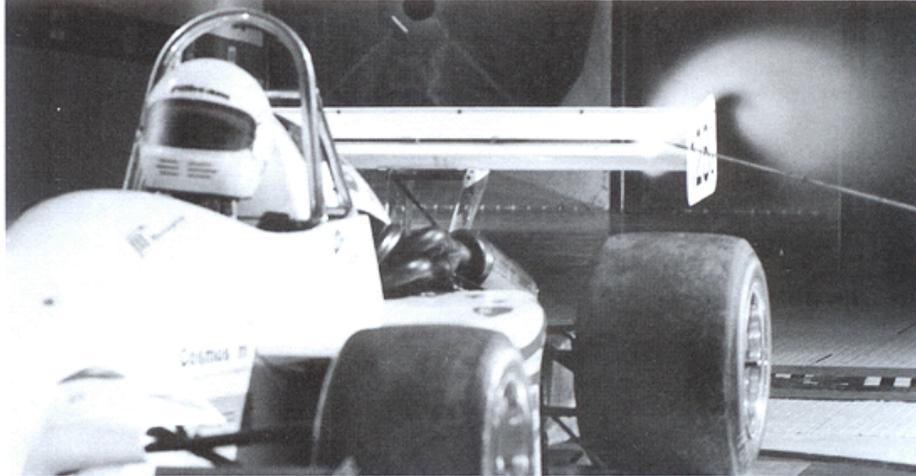


Las pruebas con estelas de humo permiten la visualización del flujo, pero hace falta un túnel de viento. (MIRA)

La generación de una estela de humo se lleva a cabo mediante el calentamiento adecuado de un aceite similar a la parafina, y pasando el humo por un tubo hasta una sonda, que puede ser situada en cualquier dirección en la que se quiera hacer llegar el humo. Para la visualización rápida del flujo en todo el coche, se puede utilizar una sonda móvil, o pueden usarse varias para estudiar el flujo en múltiples posiciones. Esta forma de visualizar el flujo hace que la naturaleza tridimensional del aire pasando por el coche sea mucho más fácil de comprender. Es muy sencillo, especialmente cuando se miran dibujos y fotos en dos dimensiones, permitir a la mente que restrinja los pensamientos en sólo dos dimensiones, pero podría ser un hábito muy peligroso. Con la estela de humo, es posible ver a qué altura con respecto al coche la superficie cambia de forma y ejerce una influencia sobre el flujo, mientras que los dos métodos de visualización anteriores sólo mostraban lo que ocurría sobre las propias superficies. Algunas cosas, como la información sobre los vórtices, por ejemplo, pueden verse en el borde de fuga del alerón trasero o a los lados de los pontones. El flujo de aire bajo los pontones con efecto suelo; la marcada influencia de los alerones delanteros en la parte trasera del coche; y las zonas donde hay separación del flujo; todo esto puede ser visto. Esto nos ayuda en gran medida a crear una perspectiva tridimensional de lo que realmente pasa con el aire alrededor del coche, y puede servir para determinar la existencia de efectos específicos, tales como la entrada en pérdida de un alerón.

Una última advertencia sobre la visualización del flujo. El medio utilizado para hacer que aparezca el flujo puede afectar al propio patrón del flujo....

¡Nadie dijo que esto fuera a ser fácil!



Con el humo pueden visualizarse detalles como los vórtices en un alerón, como en este Pilbeam MP82. (MIRA)



¡Quizás esto sea demasiado humo!

## Adquisición de datos

Un aspecto de la tecnología de los coches de competición que ha crecido y se ha desarrollado rápidamente en los últimos años es la adquisición de datos. Ahora es posible para el competidor aficionado comprar casi la misma clase de aparatos electrónicos de recogida de datos que utilizan los equipos profesionales, y amasar montañas de información sobre los parámetros del chasis y el motor. Pero la recogida de datos no tiene por qué ser cara. Lo importante es hacer observaciones cuidadosas, y anotacio-

nes igual de cuidadosas, de todo lo relevante que pueda ser medido. Si su presupuesto sólo alcanza para el ubicuo cronómetro, entonces asegúrese de que toma todos los tiempos realmente relevantes, los totales así como los parciales en las partes más críticas del circuito. Si lo que le interesa es añadir más carga aerodinámica para mejorar el paso por curva, entonces cronometre su coche en las curvas donde más se notará esa diferencia; si es resistencia lo que quiere evitar, entonces tome los tiempos de los segmentos de recta. Y después compare estos valores con los tiempos parciales para comprobar el impacto general de los cambios realizados. Esta clase de pruebas no requieren de un presupuesto muy grande, y se consigue una información muy útil.

Acompañar las anotaciones de los tiempos cronometrados con observaciones visuales objetivas puede servir a menudo de mucha ayuda. Un miembro del equipo que sabe lo que el piloto desea, situado en las partes importantes del circuito, puede conseguir datos muy útiles en lo referente al comportamiento del coche, y puede compararlos con los otros coches de la misma categoría. Así que, si su nuevo alerón trasero le permite ir más rápido en una determinada curva, algo que se reflejará en los tiempos parciales, pero será incluso más útil saber también los tiempos parciales de los rivales. Si después ese conocimiento es asistido por la observación de su compañero de que «el coche se movía mucho más en la curva 2 comparado con los demás», entonces todo se junta para mejorar el proceso de desarrollo.

Las observaciones detalladas a veces pueden darnos sorpresas, y no siempre agradables. Las fotografías de su coche en la pista tomadas con un teleobjetivo pueden ofrecer toda clase de información. Por ejemplo, una foto de esta clase del coche Pilbeam de montaña, que el autor pilotó en la subida a Prescott, Gloucestershire, Inglaterra, muestra al coche en la parte más rápida del revirado trazado, justo a punto de entrar en la curva más rápida. Es muy evidente que la suspensión del coche ha sido comprimida gran parte de su recorrido total, y teniendo en cuenta que el suelo era bastante liso y que todavía no había cargas ejerciendo fuerza sobre el coche, se debe llegar a la conclusión de que la suspensión está comprimida por la carga aerodinámica. No es de extrañar que la siguiente curva, que tiene un cambio de rasante, fuera la escena donde este coche se deslizaba de lado de forma exagerada. Todo parecía indicar que la combinación de la compresión de la carga aerodinámica, junto con la transferencia de peso de la curva, utilizaban todo el recorrido de la suspensión, y el coche ya se encontraba en los topes del recorrido. Ahora, el coche lleva unos muelles más duros. Pero sin la ayuda de la fotografía nos habría costado mucho más tiempo encontrar la solución al problema.

La información del piloto es también vital, y se deben anotar todos los comentarios para recolectar toda la información posible. Aunque el cronómetro le dirá el impacto de los cambios en la velocidad, a menos que el coche esté equipado con lo mejor de lo mejor en lo referente a aparatos de adquisición de datos, sólo el piloto será capaz de decirle si los cambios han afectado o no al comportamiento del coche. Ahora que se puede obtener tanta información objetiva mientras el coche está en marcha, al piloto le esperan tiempos difíciles. Esto no debería ser así, ya que sin el piloto, el equipo no tiene forma de saber realmente qué es lo que está ocurriendo. Es deber de los ingenieros y del piloto aprender a comunicarse de manera efectiva el uno con el otro para que los datos y la información subjetiva puedan ser unidos para

crear una idea general. Esta particular dificultad no ocurre, por supuesto, si es usted un hombre orquesta, que analiza, prepara, pilota y desarrolla el coche, lo que le supondrá menos discusiones. Pero eso no significa que no deba intentar medir todo lo que pueda y apuntarlo al lado de sus impresiones subjetivas.

Si el suyo es un equipo de una persona, o por lo menos uno con un número pequeño de componentes, probablemente se beneficiará mucho de alguna clase de adquisición de datos, dado que puede no haber suficiente gente para tomar parciales y cosas por el estilo. Sin embargo, una vez más, esto no significa que tenga que gastar enormes cantidades de dinero siempre y cuando sea prudente, y esté preparado a pasar parte de su tiempo libre en la pista, y en casa entre una carrera y otra, sacando toda la información posible de su sistema. No se equivoque al pensar que a menos que pueda conocer la velocidad, las fuerzas G laterales, las fuerzas G longitudinales, el ángulo de giro y la posición del acelerador, no conseguirá aprender nada de valor. Es posible aprender mucho de una gráfica de RPM en relación al tiempo, datos que facilita el contarrevoluciones «inteligente». Estos aparatos pueden mostrar las revoluciones alcanzadas por el motor durante una vuelta, y se pueden analizar con un programa de ordenador que el proveedor le venderá para este propósito. Por lo tanto, deberá estar familiarizado con los ordenadores, aunque no hace falta que sea un experto. Sin embargo, lo que sí necesita es un ordenador, probablemente uno portátil para que pueda descargar los tiempos en la propia pista. Así que el coste de todo esto será un poco más elevado de lo que haría falta para el tacómetro y el programa si no cuenta con un ordenador. Pero una vez que haya comprado todo el kit, la información que puede obtener valdrá mucho más.

La sorprendente variedad de información que puede obtenerse con una sola línea de RPM en relación con el tiempo, y que puede ser utilizada para investigar aspectos aerodinámicos de las prestaciones, incluye velocidad en recta y en curva (calculada a partir de la velocidad por cada 1.000 RPM en cada marcha), el tiempo total de una vuelta (si no se dispone de otro método para cronometrar), los tiempos parciales entre varias secciones de la pista, los valores de deceleración en la frenada (calculados a partir del valor de cambio de velocidad en el punto de frenada) y, si se conocen los radios de algunas curvas, incluso se pueden llegar a calcular las fuerzas G laterales. De este modo, es posible medir los beneficios en la velocidad de paso por las curvas al aumentar la carga aerodinámica, quizá con algo de pérdida de velocidad punta, y esto puede compararse con los tiempos de vuelta, para saber si se gana o se pierde tiempo. Incluso, se puede averiguar el coeficiente de rozamiento, por lo menos aproximadamente, siempre que sepamos las fuerzas G de frenado y de paso por curva, y que el suministrador de neumáticos nos diga el coeficiente de rozamiento de los mismos. Por muy simplista que pueda parecer este análisis, siempre será mejor que utilizar solamente un cronómetro, y además, los registros impresos le servirán permanentemente para realizar una inspección más a fondo de todas y cada una sus vueltas, siempre que pueda encontrar el tiempo para hacerlo.

Los sistemas de adquisición de datos más sofisticados le ofrecerán datos más fáciles de interpretar sobre lo que está ocurriendo, y, con su habilidad para controlar más «canales», le darán la oportunidad de medir directamente algunos parámetros influenciados por la aerodinámica, tales como el movimiento de la suspensión y los



Un simple sensor de revoluciones en la adquisición de datos revela mucha información útil.

cambios en la altura del coche, las cargas en la suspensión e incluso los cambios en la presión aerodinámica alrededor del coche. Controlar la altura del coche puede servir para determinar la carga aerodinámica producida por la carrocería del coche si se llevan a cabo pruebas en línea recta con velocidad constante. La compresión de la suspensión puede relacionarse con la carga generada si no existen fuerzas de paso por curva, y si el efecto de los cambios momentáneos, cuando las ruedas pasan por un bache, es «filtrado». Esta misma interpretación también puede llevarse a cabo con las mediciones de las cargas en la suspensión, siempre que se realice el mismo tipo de prueba. Esto permitirá medir la carga aerodinámica real en los dos ejes, pero no puede igualarse a la carga aerodinámica en las zonas de contacto de las ruedas, ya que la sustentación generada por las ruedas y los neumáticos queda separada de estas mediciones. Sin embargo, servirá para obtener unos muy buenos datos comparativos sobre las diferentes configuraciones aerodinámicas, y será muy útil para poder establecer un equilibrio aerodinámico entre la parte delantera y la trasera. También se conseguirán aproximaciones bastante exactas del coeficiente de sustentación. Los equipos profesionales son capaces de llevar esta clase de instrumentación mucho más lejos, y se sabe que llegan a colocar sensores en todo el coche para medir las presiones estáticas en varias zonas del coche, las cuales, comparadas con la presión dinámica, determinada por un sistema de medición situada a unos centímetros del coche, les permite construir mapas tridimensionales de las presiones del aire alrededor del vehículo. Por tanto, la recogida de datos relevantes puede ir desde los métodos más sencillos de medir parámetros indirectamente relacionados con la aerodinámica, hasta las altamente complejas mediciones directas de presión de aire en un coche.

## Túneles de viento

Es una prueba evidente de la importancia de la aerodinámica el hecho de que tantos constructores de coches de competición, desde la Fórmula 1 hasta la Fórmula Ford, utilicen los túneles de viento como parte vital del proceso de diseño y desarrollo. La cantidad de pruebas que se pueden realizar está, naturalmente, relacionada con el presupuesto, y en el caso de los equipos más poderosos, se dispone de un túnel de viento propio al que se pueda acceder de manera continua para probar. Los equipos con menos recursos usan los túneles de alquiler, y muchos equipos de la Fórmula 1 y la CART, por ejemplo, alquilan muchas horas de tiempo en los túneles de viento de la Universidad de Southampton, el MIRA o el Imperial College (de Londres) en Inglaterra, o el túnel de Swift en Estados Unidos.

Por lo tanto, es razonable pensar que el alquiler de los túneles de viento no es barato, y lo más probable es que esté fuera del alcance de un equipo pequeño, y ni pensar en el aficionado que trabaja en su garaje. Afortunadamente, esto no es necesariamente así. Es posible, por lo menos en Inglaterra, alquilar un túnel de viento durante un día o incluso durante unas horas, lo que permite llevar a cabo un buen número de pruebas, y conseguir hacerse una idea de las características aerodinámicas de su coche de carreras. El túnel en cuestión es de la Asociación para la Investigación de la Industria del Motor (Motor Industry Research Association - MIRA), situada en Warwickshire, Inglaterra, de tamaño real y en el que el tiempo de alquiler ofrece muchas opciones dependiendo del presupuesto que se tenga. Es incluso posible alquilar el túnel durante un día con un grupo de personas, y utilizarlo en turnos para probar tres o cuatro coches. Si el equipo está bien organizado y ha hecho las preparaciones necesarias, debería ser posible probar muchas configuraciones diferentes en cada coche, dependiendo del tiempo que se tarde en pasar de una a otra. Obviamente, los cambios en el ángulo de incidencia de los alerones son rápidos, mientras que fijar un nuevo fondo puede llevar bastante tiempo. A pesar de todo, se puede llevar a cabo un programa de pruebas altamente efectivo, y se pueden conseguir datos sobre los coeficientes de sustentación y penetración, las proporciones de sustentación delante y detrás, y el impacto que tiene la alteración de los apéndices aerodinámicos delanteros y traseros en la distribución de la sustentación.

Debemos reconocer que los túneles a escala completa tienen una desventaja inherente. La mayoría de ellos tienen suelos fijos, lo que significa que la capa límite se desarrolla a lo largo del suelo del túnel y, por lo tanto, las condiciones del flujo debajo del coche no son, en realidad, iguales a las que existen en la pista. De manera que los resultados obtenidos en un túnel con suelo fijo tienden a dar valores subestimados para las fuerzas totales de sustentación, especialmente si el coche rueda cerca del suelo y utiliza un fondo perfilado con el fin de crear carga aerodinámica. Los valores de carga de los alerones delanteros también suelen ser subestimados, ya que normalmente funcionan muy cerca del suelo. Por esto, los valores de carga se encuentran en la parte trasera en esta clase de túneles de viento.

Pero ¿por qué un túnel de viento tiene el suelo fijo? Porque no resulta una proposición muy práctica hacer funcionar una correa del tamaño necesario y a las velocidades relevantes. Sin embargo, existen tres túneles de viento que parecen ser la

excepción que confirma la regla: Lockheed, el gigante aeroespacial americano, tiene un túnel de viento con una sección muy similar a la del de MIRA, capaz de generar velocidades del aire tres veces superior gracias a una turbina unas siete veces más grande, y el túnel de MIRA tiene un megawatio de potencia disponible para alimentar sus turbinas. También existen túneles con el suelo móvil en el DNW en Holanda y en Pininfarina en Italia. La MIRA también tiene planes para introducir un suelo móvil en su túnel de tamaño real.

La ventaja más obvia de utilizar un túnel a escala real es que se puede colocar un coche a tamaño real y hacer pruebas sobre él. Sólo hace falta que los técnicos del túnel configuren las placas sobre las que se apoyan las ruedas del coche para la vía y la batalla determinada del vehículo, con el fin de que los pesos incidentes sobre las ruedas sean transmitidos a las células de carga situadas debajo, y a la vez enviados al ordenador que recoge los datos. Es bastante obvio que no existen problemas relacionados con los místicos Números de Reynolds cuando se trabaja con un coche a escala real, aunque las bajas velocidades del aire no consiguen emular por completo las condiciones a la velocidad a la que se compite. Pero cosas tales como las imperfecciones de panel del fondo, las canalizaciones para lluvia y los sellados de las ventanas, cosas muy difíciles de reproducir en un modelo a escala, están ahí en el modelo real, y afectan al flujo de aire de manera significativa. Así que, a pesar de sus desventajas, para los propósitos de generar los datos aerodinámicos básicos, quizá donde antes no existían o donde se necesita compararlos con las configuraciones anteriores, un túnel del viento a escala real con el suelo fijo es un elemento realmente útil. El hecho de que los equipos profesionales lo utilicen lo demuestra.

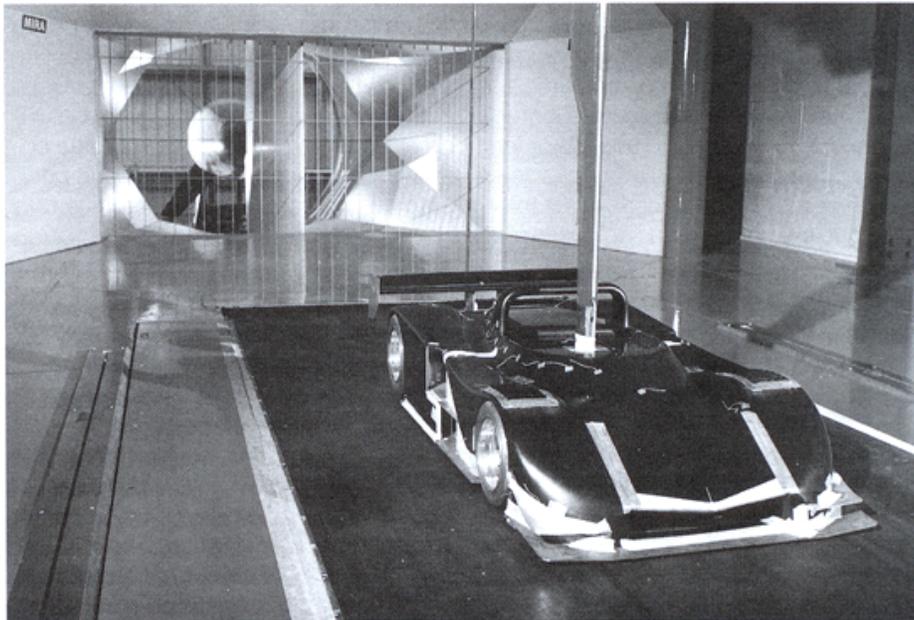
El autor tuvo la suerte de pasar medio día en las instalaciones de la MIRA hace un par de años, y se probaron un número de configuraciones diferentes en el coche de montaña Pillbeam, lo que nos dio por primera vez algunos datos aerodinámicos muy útiles. Esta sesión sirvió para lograr algunos desarrollos y modificaciones beneficiosos, y nos proporcionó una mejor forma de entender la aerodinámica de este coche en particular y de los monoplazas en general. Las clases de pruebas que pudimos llevar a cabo iban desde el establecimiento de una configuración aerodinámica base, que era la configuración desarrollada y equilibrada en la pista; varias configuraciones de los alerones delanteros y traseros; alerones con y sin Gurneys delante y detrás; fondo plano contra túneles; añadidas como generadores de vórtice para influenciar el flujo de aire en los túneles; modificaciones en la forma de la parte trasera de los pontones que proporcionó la misma resistencia pero mayor carga; y el efecto del peso del piloto, que alteraba la altura del coche y el ángulo de cabeceo, en la carga aerodinámica y su distribución. Al final, durante un período de cuatro horas bien aprovechadas, se realizaron un total de 22 pruebas diferentes. Nos habíamos preparado detenidamente para esta sesión, anotando con detalle todo lo que podía añadirse o quitarse. Por ejemplo, la modificación de la forma del pontón se realizó con varios trozos de madera y cartón que fueron colocados en su lugar antes de la sesión, así que esa prueba fue la primera que se llevó a cabo. Evidentemente, resulta más rápido quitar la madera y el cartón que añadirlo, con lo que se ahorra un tiempo precioso. Otros componentes habían sido preparados de antemano, tales como los paneles del fondo plano que se fijaron a los túneles del difusor antes de entrar

en el túnel de viento, con lo que esta configuración también fue probada al principio de la sesión.

Habiendo aprendido tanto en cuatro horas, ha sido una frustración constante no poder, por falta de fondos y de tiempo, continuar con el programa de pruebas. Pero los datos obtenidos y los principios establecidos en esa sesión son nuestros, y estamos mucho mejor que si no lo hubiéramos hecho. Incluso hubo tiempo para hacer algunas fotografías. Así que resulta muy recomendable, aunque pueda parecer tan costoso como un nuevo juego de neumáticos, realizar una de estas sesiones.

### Pruebas con modelos a escala

Si se vuelve imperativo llevar a cabo un programa continuado de pruebas aerodinámicas, un equipo deberá invertir en los recursos y los medios necesarios para permitir que sus modelos puedan probarse en túneles de viento a escala. Las razones para probar con modelos a escala en lugar de hacerlo con vehículos reales son que resulta mucho más sencillo, considerablemente más rápido y bastante más barato construir un modelo a escala que disponer de un coche de pruebas a escala real. También resulta más barato crear nuevas secciones para el coche a escala que para uno real, y por tanto los costes de la vida útil de un modelo también son mucho menores, hasta que el diseñador decide que es hora de crear una nueva forma general.



El túnel de viento a escala del 40 % de la MIRA. (MIRA)

Existen «economías de escala» con respecto al tamaño del túnel de viento necesario para probar los modelos. Está claro que un túnel que sólo puede albergar un modelo de un 40 % será bastante más pequeño que uno en el que quepan los coches reales. Esto significa que se tiene que mover menos cantidad de aire, por lo que la potencia de la turbina, y por tanto los costes, serán bastante inferiores. Pero quizá la ventaja más útil es que resulta más factible utilizar un suelo móvil en los túneles de hasta el 50 %; y se ha dicho que es inútil realizar pruebas de modelos a escala con poca distancia al suelo sin un suelo móvil. Por esto, los principales equipos de carreras como Williams tienen su propio túnel de viento al 50 % con suelo móvil, Benetton y Ferrari están construyendo unas instalaciones similares, y otros equipos importantes tienen sus túneles al 40 %, o alquilan alguno como el túnel R. J. Mitchell en la Universidad de Southampton, o el de la MIRA en el Reino Unido (figs. 6.3 y 6.4), o las instalaciones relativamente nuevas de Swift en Estados Unidos.

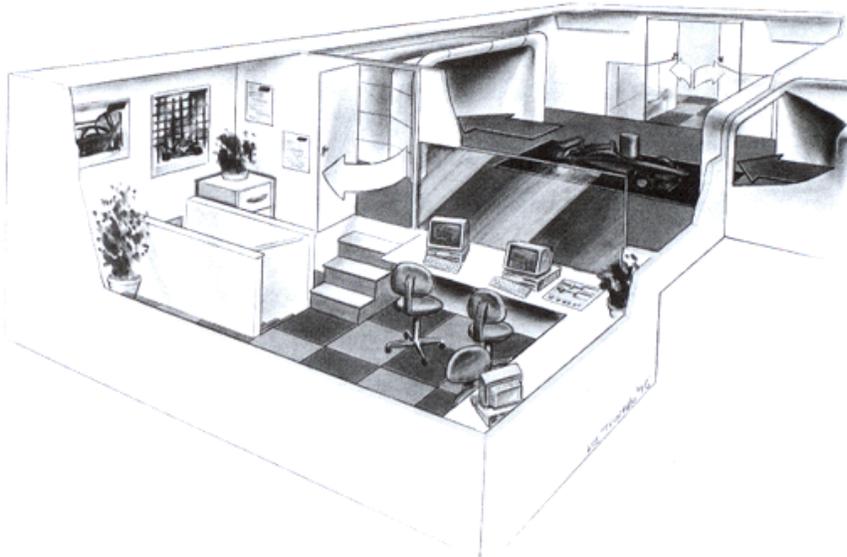


Figura 6.3. Dibujo de las instalaciones del túnel de viento del 40 % de la MIRA. (MIRA)

Esencialmente, todos los túneles de viento cumplen las mismas funciones básicas: el aire es absorbido a través de una abertura que se contrae y que acelera la velocidad del flujo y pasa por el modelo, que normalmente se encuentra suspendido, pero en contacto con el suelo, de un brazo vertical. El suelo es en realidad una cinta móvil, que se desliza a la misma velocidad que el aire. Con el fin de evitar que las capas límite lleguen hasta la cinta móvil (una capa límite se habrá desarrollado en la parte fija del suelo del túnel por delante de la sección de pruebas que está en movimiento), se aplica succión a través del suelo, justo por delante de la cinta móvil, y la capa límite es absorbida cuidadosamente.

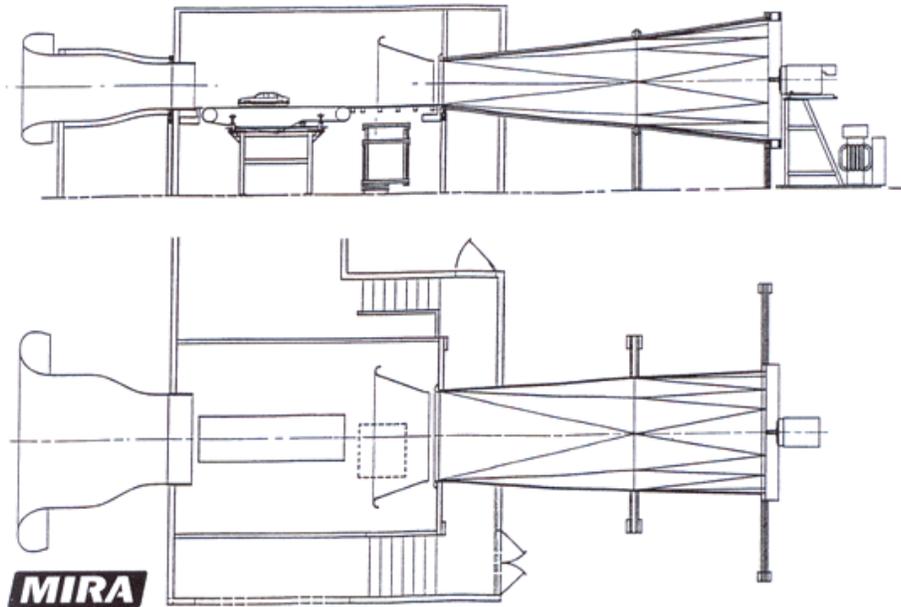


Figura 6.4. Plano esquemático de túnel de viento del 40 % de la MIRA. (MIRA)

El flujo de aire controlado (a ras del suelo) pasa por el modelo y sale por el final del túnel. Normalmente, el aire vuelve a las turbinas tras pasar por unos conductos de retorno.

Todo esto suena bastante sencillo en teoría, pero el esfuerzo necesario para conseguir que las cosas salgan bien, y para lograr resultados respetables que se correspondan con la realidad, es considerable. Por ejemplo, con el fin de que la cinta móvil se mantenga completamente plana debajo del coche, ésta debe funcionar sobre una placa perforada, y debe aplicarse succión desde la parte inferior de la placa. Recuerde que la parte inferior de los alerones montados a poca altura del suelo, y el fondo de muchos coches de competición, harán todo lo posible para chupar el suelo hacia arriba, ya que crean baja presión entre ellos mismos y el suelo, por lo que esto es crucial. Cuando la cinta se mueve a mucha velocidad, debido a los rodillos y la placa de succión, crea mucho calor como consecuencia de la fricción, y normalmente se emplea algún sistema de refrigeración líquido. La vida útil de la cinta está parcialmente relacionada con el desgaste físico de esta fricción, pero principalmente con la fricción de los neumáticos del modelo, que tienden a rodar en el mismo lugar siempre y a concentrar el desgaste en dos bandas estrechas.

Mantener la consistencia es absolutamente esencial en un campo de desarrollo que casi siempre busca mejoras muy pequeñas. Por esto, es imperativo que el modelo esté fijado al soporte de la forma más rígida posible, y que siga en la misma posición después de cada alteración de la configuración. La altura del coche y el ángulo

de cabeceo normalmente pueden ser alterados desde la sala de control mediante el movimiento del brazo de sujeción a través de motores de paso, mientras que los ángulos de balanceo y deriva (guiñada) respecto de la dirección del viento y demás se varían manualmente. Otra ayuda para conseguir siempre las mismas condiciones es controlar la temperatura. Tanto la viscosidad como la densidad del aire se alteran con la temperatura, y pueden darse resultados muy diferentes. Los parámetros aerodinámicos son medidos mediante células de carga o galgas extensométricas (*strain gauges*) situadas en el brazo de sujeción, y los datos son transmitidos electrónicamente a un ordenador que los recoge en la sala de control. También se puede medir la presión mediante unos pequeños agujeros realizados en la superficie del modelo, conectados a través de unos tubos a un transductor de presión, que después envía los datos al ordenador.

La principal desventaja de probar con modelos a escala viene derivada precisamente de su pequeño tamaño. Vimos en el capítulo 2 cómo las capas límite se desarrollaban, volviéndose más anchas cuanto más atrás de la carrocería llegaban. Si una capa límite se vuelve excesivamente gruesa y turbulenta, el flujo de aire puede separarse al menor indicio de un gradiente de presión adversa. Y ése es el principal problema a la hora de probar con modelos a escala: si un modelo es un 40 % del coche real, las capas límites que se desarrollan alrededor de él y de sus componentes, no serán las mismas que en el vehículo de escala real, y por tanto el flujo de aire no simulará la realidad. En el peor de los casos, los flujos en las partes críticas de los modelos seguirán fijados, pero se separan en el modelo real, causando muchos dolores de cabeza.

Entonces, ¿cómo puede evitarse esta trampa potencial? Esencialmente, haciendo que el flujo de aire vaya lo más rápido posible con el fin de conseguir un Número de Reynolds que esté tan cerca como pueda del modelo real. Vimos en el capítulo 2 que el Número de Reynolds era proporcional a la longitud del cuerpo multiplicado por la velocidad del aire. Así que, si un modelo es el 40 % de coche real, entonces el Número de Reynolds, y por tanto el comportamiento del flujo, sería el mismo si la velocidad del aire se multiplica por 2,5 veces. Esto suena como una solución obvia, pero expulsar aire a una velocidad de 800 km/h no es una proposición práctica, por la energía necesaria para alcanzar esa velocidad y además haría falta que el modelo resistiera la fuerza de este huracán sin desintegrarse. Además, a unas velocidades tan altas, el aire se vuelve un fluido compresible, y comienza a comportarse de manera muy diferente. Así que lo mejor que se puede conseguir es un equilibrio que se acerque lo máximo posible a una situación que pueda ser relacionada con la realidad. Por el momento, la mayoría de los túneles de viento pueden alcanzar velocidades máximas de 130-175 km/h, aunque las instalaciones californianas de Swift llegan hasta los 225 km/h.

Otro factor crítico a la hora de probar con modelos a escala es la exactitud de los detalles. Es importante que todos los aspectos del modelo estén a la escala correcta, incluyendo los brazos de suspensión, los conductos de los frenos, los espacios entre flaps y alerones, los grosores de las derivas, etc. Las ruedas deben rodar a la misma velocidad que el aire y que la cinta del suelo, y debe encontrarse en contacto firme con este último. Los flujos de refrigeración internos deben ser fieles a los

de tamaño real, junto con una presión trasera realista. Y quizá lo más difícil de lograr, la aspereza de la superficie. Alcanzar la perfección en todas las áreas resulta imposible, pero cuanto más se parezca el modelo al vehículo real, más significativos serán los resultados.

El coste del tiempo en un túnel de viento a escala, por un día en 1997 era de alrededor de 13.200 dólares en el Reino Unido. Todo indica que por lo menos se tardará una semana en sacarle partido a sus pruebas. Encontrar toda una semana disponible puede ser difícil, ya que los equipos reservan muchas horas con antelación en los túneles comerciales. Y, por supuesto, tendrá que construir su detallada maqueta de tal manera que se adapte a las estructuras de soporte del túnel y el sistema de adquisición de datos. Pero, para cuando haya ahorrado los 16.000 dólares para la semana de pruebas, y haya podido reservar el túnel durante una semana, probablemente ya haya tenido tiempo de sobra para construir su modelo.

## Modelado por ordenador

Si las pruebas con un modelo a escala en un túnel de viento parecen estar fuera del alcance de la vasta mayoría de los competidores, entonces, la simulación por ordenador del flujo de los fluidos, y la capacidad de generar modelos virtuales de coches y de sus características aerodinámicas, se encuentran un poco más allá de Júpiter en términos de accesibilidad. Pero los expertos dicen que esto no será así durante mucho tiempo más. Ya resulta posible modelar casos simples con lo que se puede definir en un ordenador casero de alta tecnología (en otras palabras, uno bastante potente), pero el problema es que, por el momento, se necesita un profundo conocimiento de los principios matemáticos involucrados para sacar el máximo partido al software. Éste es otro modo de decir que se necesita mucho desarrollo en el software hasta que usted y yo podamos comprarlo en una tienda y sacarle el mayor partido. Así que esta sección dará un breve repaso a este tópico con el fin de mostrar todas las posibilidades.

La Dinámica Computacional de los Fluidos, o DCF (CFD en inglés), es el uso de un ordenador para resolver complejas ecuaciones que han sido desarrolladas para modelar matemáticamente lo que ocurre en un fluido en movimiento. Si consideramos que se tardaría un buen rato con un lápiz, papel y una calculadora en resolver las ecuaciones para definir el flujo de aire alrededor de un punto dado de la carrocería, entonces está claro que averiguar los resultados para toda la superficie sería una tarea de proporciones muy grandes. Aquí es donde los ordenadores resultan útiles. Pero, como todos los que han sufrido las frustraciones de vérselas con el mare magnum de datos procedentes de un ordenador saben que lo que obtenemos es un resultado directo de lo que metemos. Así que la clave para producir unas predicciones útiles y significativas de flujo del aire, o de otro fluido cualquiera, es definir el problema y las técnicas para la resolución de mismo.

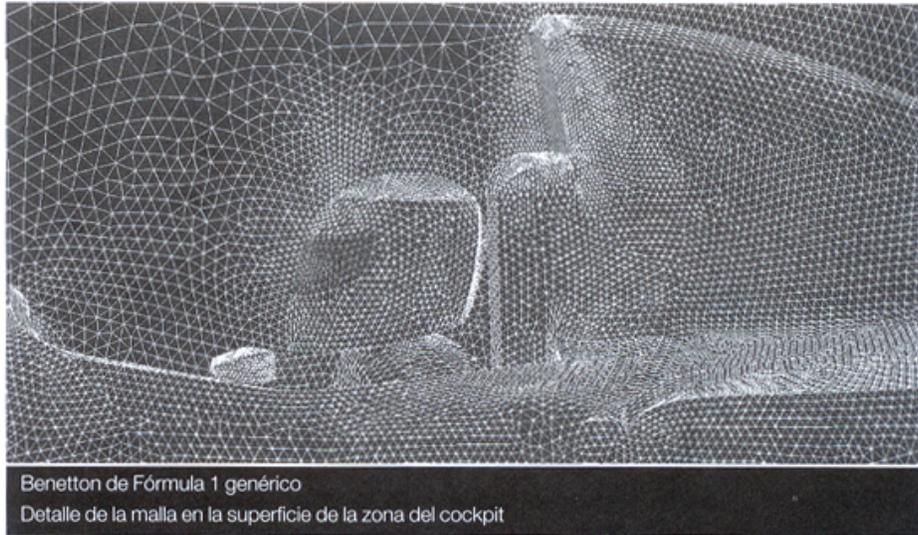
Existen varios aspectos del flujo con los que el código DCF, o programa, tienen que vérselas. Las ecuaciones relativas a la masa del fluido y su velocidad, junto con las fuerzas que hacen los fluidos, son el problema principal. Pero, con el fin de con-

seguir un modelo preciso, también se necesitan ecuaciones de flujo viscoso, que es donde el proceso se vuelve más complicado. Resolver los problemas relacionados con el flujo laminar puede no parecer muy complicado, pero donde el flujo es turbulento y está separado, las matemáticas se vuelven muy complejas, y consumen mucho tiempo. Con el fin de manejar esta complejidad, el software está escrito de tal manera que un problema dado pueda ser solucionado por varios ordenadores trabajando simultáneamente, o funcionando «en paralelo», como dicen los informáticos. Incluso así, un problema a gran escala, como puede ser el de averiguar el flujo alrededor de una porción sustancial de un monoplaza de carreras, puede necesitar de varios ordenadores trabajando juntos durante muchas horas. Se entiende entonces por qué un ordenador doméstico, por el momento, no serviría. Pero la potencia de los ordenadores aumenta constantemente, y puede que no pasen muchos años antes de que el problema pueda ser solucionado con una sola máquina.

La DCF es capaz de modelar prácticamente todos los problemas de un coche, pero en su actual etapa de desarrollo consume mucho tiempo. Así que los equipos que lo utilizan, tales como el equipo Benetton de Fórmula 1, que utiliza software de Fluent gracias a una relación de la que ambos se benefician, suele modelar partes del coche en cualquier momento. Pero, como ya hemos visto en este libro, es crucial que los componentes que interactúan sean estudiados de forma conjunta; por lo que, por ejemplo, cuando el equipo Benetton desea examinar una nueva configuración para su difusor trasero, lo hace en conjunto con el alerón trasero de coche y con una «parte delantera genérica» para crear un flujo virtual realista. De manera similar, cuando se estudia un nuevo alerón delantero, el problema es resuelto integrando también las suspensiones, las ruedas y los neumáticos. Y el software incluso tiene en cuenta la rotación de las ruedas...

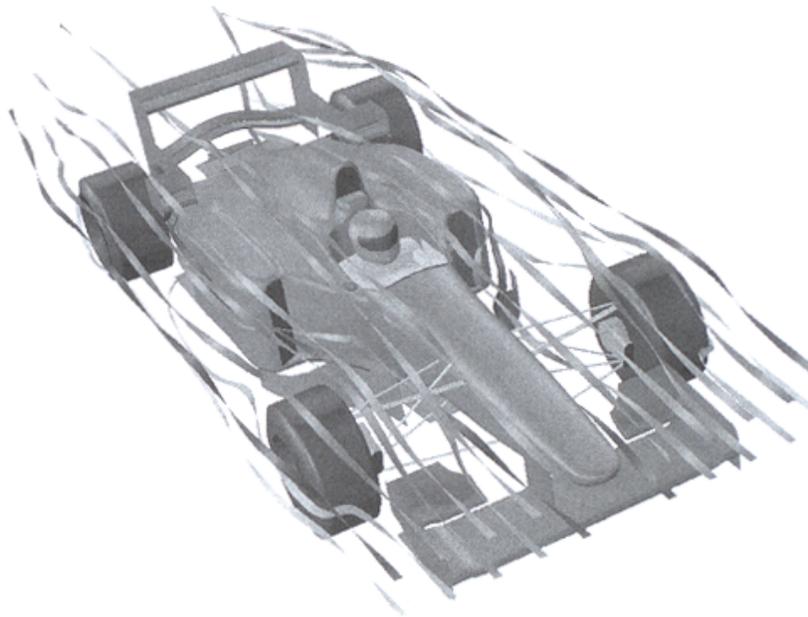
Entonces, ¿dónde encaja la DCF en el proceso de diseño de un constructor como Benetton? Esencialmente, la DCF es una herramienta complementaria al túnel de viento, pero es posible construir y probar modelos en el ordenador de manera más rápida que con las piezas sólidas. Por esto, se pueden examinar un número mayor de configuraciones básicas utilizando la DCF que con el túnel de viento. Así que, ¿para qué utilizar el túnel de viento? Porque las predicciones del ordenador necesitan ser validadas, y esto sólo puede hacerse utilizando el flujo real en los modelos sólidos. Pero, en cambio, si se encuentra un resultado interesante en el túnel de viento, entonces el ordenador puede ser utilizado para examinar el caso con más detalle. Así que las dos técnicas se utilizan en conjunto, y a menudo en paralelo, con el fin de encontrar soluciones aerodinámicas más eficaces.

La DCF funciona, básicamente, creando en primer lugar una forma, que es el componente o parte que será estudiado, utilizando el diseño asistido por ordenador (CAD). Alternativamente, un dibujo de CAD existente puede ser importado desde otro programa, si los diseñadores se encuentran utilizando un sistema CAD independiente para diseñar sus coches (los principales equipos lo hacen). El dinamista de fluidos entonces utiliza el software DCF para definir una «malla» de puntos unidos alrededor del componente (fig. 6.5). Éstos son los puntos que utilizará el ordenador para resolver las ecuaciones necesarias, y en un problema complejo puede haber más de un millón de ellos. La malla está ensamblada de tal modo que las



Benetton de Fórmula 1 genérico  
Detalle de la malla en la superficie de la zona del cockpit

**Figura 6.5.** El dinamista de fluidos utiliza el software de DCF para definir una «malla» de puntos unidos distribuidos alrededor del componente. (Fluent Europe Ltd)



**Figura 6.6.** Trama de DCF de un Benetton de Fórmula 1 genérico mostrando las «tiras» de la línea del flujo. (Fluent Europe Ltd)

áreas críticas o complicadas tienen una densidad mayor de puntos que las áreas menos críticas, así que lo que realmente importa es concentrar el tiempo en esas áreas. La generación de la malla es la parte más laboriosa, y requiere que un experto comience a tejerla de modo manual. Después de esto, el ordenador se encarga del resto y más tarde, o a la mañana siguiente, la nueva solución ha quedado definida. A partir de este momento es posible visualizar los datos obtenidos por el ordenador de varias maneras, mostrando líneas de flujo, distribución de la presión sobre la superficie, y otras ayudas visuales para estudiar la solución (fig. 6.6), junto con la predicciones de los valores de presión y, por supuesto, los valores de carga y resistencia aerodinámica.

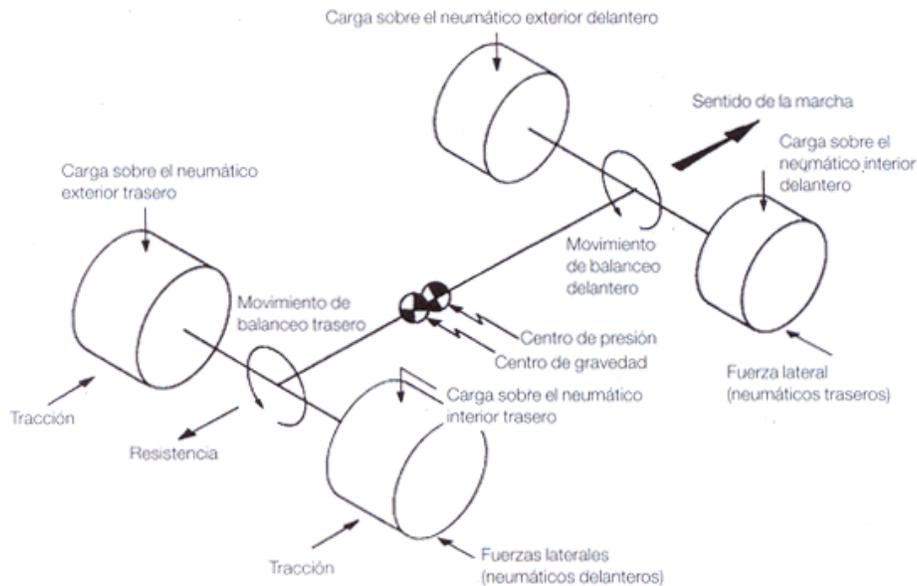
La DCF es cada vez más utilizada por los equipos y constructores de los estratos más altos de la competición en las fases iniciales del proceso de diseño, y no resulta muy difícil imaginar que gran parte del coche será diseñada utilizando solamente DCF en los próximos años. Por ahora, se trata sólo de una herramienta que contribuye con el proceso de diseño, y con el refinamiento de los diseños existentes, dando grandes imágenes para que los demás las admiremos. Pero mientras que el DCF genera datos que nos permiten predecir la eficacia aerodinámica, el efecto preciso en las prestaciones no calculado ni medido. Esta faceta solía ser investigada en la pista, hasta que aparecieron los ordenadores capaces de predecir las prestaciones.

La simulación de las prestaciones es otra forma de modelado matemático llevado a la práctica por los ordenadores. A pesar de que las prestaciones de un coche *en un determinado momento* pueden ser calculadas con un lápiz, un papel y una calculadora de bolsillo, no es un trabajo de un segundo. Después, le sigue la investigación de varias configuraciones, lo que llevaría mucho tiempo. Y el análisis de una vuelta, ni mencionar el de una carrera completa, no es algo que un ingeniero cuerdo llevaría a cabo. Pero una vez que los métodos matemáticos para esta clase de análisis han sido descritos, o sea, cuando el programa de ordenador ha sido escrito, un ordenador nos dará las soluciones para varias configuraciones, tales como los diferentes reglajes de los alerones, lo que permite a un equipo predecir el mejor reglaje para un determinado circuito antes de llegar a él. Ésta es una ventaja vital cuando el tiempo de práctica y entrenamientos está limitado, y no existen suficientes horas para probar todas las configuraciones aerodinámicas y mecánicas posibles en la propia pista.

La simulación de las prestaciones no necesita obligatoriamente predecir los tiempos de vuelta para una determinada pista, por muy interesante que pudiera resultar. Lo que realmente importa es que se pueden analizar los efectos relativos de los cambios, y que, con los suficientes datos, se puede conseguir una configuración aproximada. Por ejemplo, en términos generales es obvio que, aumentado el ángulo de incidencia de los alerones delanteros y traseros, se generará más carga aerodinámica, lo que permitirá pasar más rápido por las curvas y frenar un poco más tarde. También es obvio que la velocidad máxima se verá reducida debido al aumento de la resistencia. Al insertar diferentes valores de carga y resistencia, un programa de simulación de prestaciones predecirá los tiempos de vuelta en cada caso, y, teóricamente, permitirá seleccionar el equilibrio ideal, por lo menos entre el número de posi-

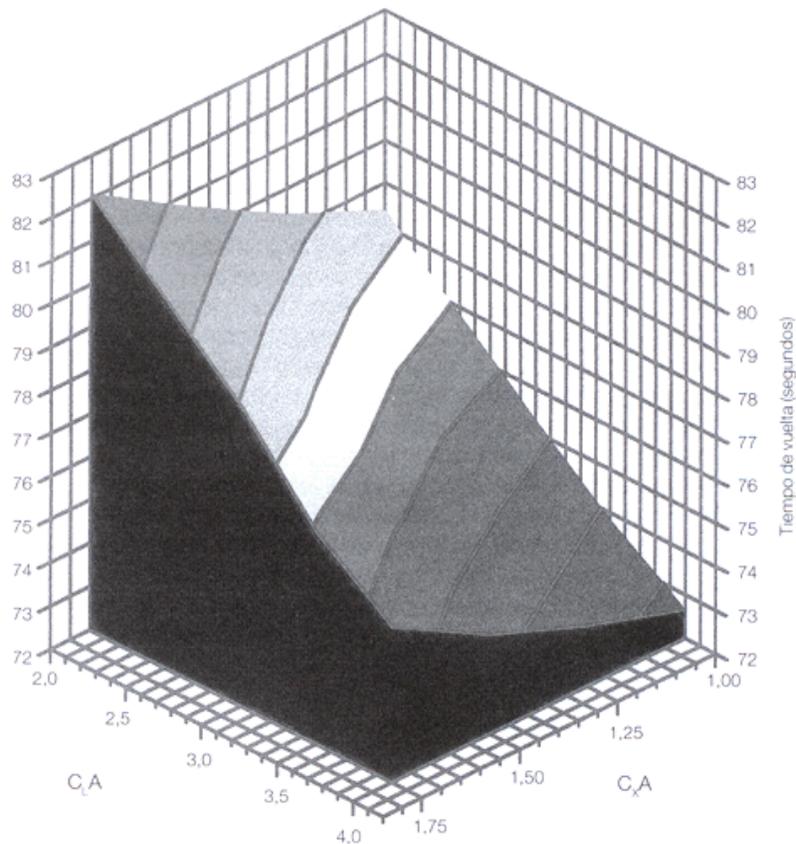
bilidades que fueron introducidas al principio. Lo que el modelo de simulación no puede hacer es tener en cuenta las variables incontrolables que se pueden encontrar en un circuito, tales como la temperatura cambiante de la pista, o el polvo acumulado, lo que afectará al agarre disponible. Pero al igual que el túnel de viento no tiene en cuenta los vientos laterales que pueden surgir en la vida real, esto beneficia al análisis desde el punto de vista de que permite probar los cambios en las mismas condiciones, algo que no puede conseguirse en la pista.

La predicción de las prestaciones se lleva a cabo mediante el modelado de una variedad de aspectos que influncian al vehículo, y la posterior integración de éstos en un «mapa» del circuito estudiado. Por esto se necesita un amplio conocimiento de las pistas, así como del coche en cuestión. Cosas tales como la masa, las dimensiones y la rigidez al balanceo del coche son necesarias para calcular las fuerzas y aceleraciones involucradas, y para averiguar la carga sobre cada neumático en cada momento (fig. 6.7). Después se incorpora un modelo aerodinámico, probablemente basado en los datos del túnel de viento, para que las influencias en las cargas del neumático y las prestaciones en línea recta puedan ser averiguadas. Y también existen modelos para calcular las prestaciones de aceleración de un coche, utilizando los datos de la curva de potencia y de cambio de marcha, las prestaciones de frenado, y quizá más importante, los neumáticos y su habilidad para transmitir todos los esfuerzos al suelo en las diferentes condiciones. Está claro que el equilibrio entre la carga aerodinámica y la resistencia juegan un gran papel en este análisis, especialmente para coches con mucha carga aerodinámica como los Fórmula 1 o los monoplazas de la CART/IRL.



**Figura 6.7.** Algunas de las variables averiguadas por la simulación de las prestaciones.  
(Dr. Rob Dominy, Universidad de Durham)

Esencialmente, el modelo puede analizar primero una curva, calculando la velocidad máxima teórica con la que puede trazarse, siempre que se conozca el radio de la misma, y el nivel de agarre esté fijado, quizás, en un valor medido en una visita anterior al circuito. El análisis puede asumir un paso por curva en una situación de velocidad estable, con poco o nada de aceleración, a lo largo de ella. Después, cuando la pista se endereza, el modelo tiene la misma velocidad de salida de la curva que en la anterior, que es la velocidad a la que se considera que comienza la aceleración y, calculando esa aceleración posible a esa velocidad, resulta también posible calcular la velocidad al final de la recta. Todo esto tiene en cuenta las fuerzas aerodinámicas cambiantes. La distancia requerida para frenar y la velocidad para entrar en la curva puede averiguarse, y después la siguiente curva es como la primera, y así se continúa. Toda la vuelta es construida de este modo, y el cálculo del tiempo de vuelta se consigue simplemente al dividir la distancia de la vuelta por la velocidad media de esa vuelta.



**Figura 6.8.** Gráfico de carga y resistencia aerodinámica en relación con el tiempo de vuelta en una simulación de prestaciones. (Dr. Rob Dominy)

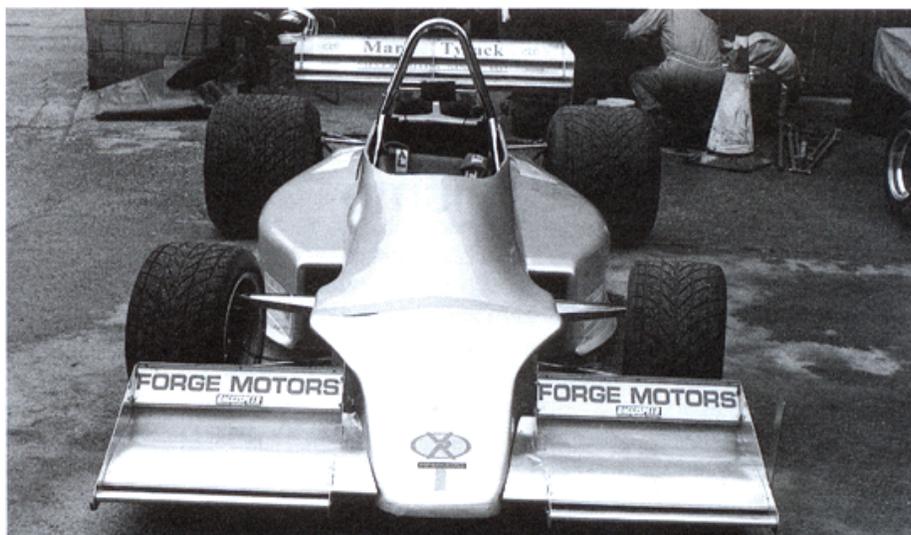
Un equipo de competición equipado con estas herramientas de análisis puede introducir varias configuraciones aerodinámicas, y hacer que el ordenador averigüe los tiempos de vuelta relativos conseguidos con cada configuración, lo que les permite llegar al circuito con la configuración adecuada para comenzar a rodar (fig. 6.8). Con suerte, lo único que necesitarán a partir de aquí es afinar la puesta a punto para adaptarlo a las condiciones. Una vez más, el uso de esta herramienta particular es, actualmente, un privilegio que sólo tienen los equipos más adinerados, pero no pasará mucho tiempo antes de que los ingenieros de software creen un producto barato que pueda utilizarse en un ordenador doméstico.

Este capítulo ha tratado un amplio número de herramientas para el análisis, desde las más sencillas y baratas hasta las más exóticas y complejas. Pero no importa cuál sea su presupuesto, ni qué clase de herramientas se vea obligado a utilizar. El requisito en todos los casos es utilizar las herramientas con cuidado y con sentido común, y esto le permitirá mejorar la comprensión de la aerodinámica de su vehículo, con lo que conseguirá mejorar sus prestaciones. Un desarrollo más avanzado requerirá, con toda seguridad, modificaciones en el coche, y el próximo capítulo tratará las formas de fabricar en su propio taller elementos destinados a generar carga aerodinámica y a reducir la resistencia

## 7. Manos a la obra: hágalo usted mismo

Si ha averiguado qué es lo que necesita su coche en lo referente a la aerodinámica, y diseñado los elementos que, se estima, le proporcionarán la carga aerodinámica deseada, es el momento de obtener los componentes. Si tiene suerte, puede que sea capaz de comprar lo que necesita al fabricante del coche, bien nuevo o de segunda mano, o a una compañía que fabrique los componentes, o tal vez a través de un anuncio en su revista de coches favorita. Pero si no tiene tanta suerte, o si simplemente no tiene el presupuesto para salir y comprar todo lo que necesita, entonces usted encaja en el grupo más numeroso de competidores del mundo del motor: los que se fabrican sus propias piezas, o que tienen amigos que las construyen para ellos. La mayoría de los competidores autosuficientes (o sus amigos) saben trabajar con madera, planchas de metal y, probablemente, también con plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV). Si usted también cuenta con esa habilidad, entonces la mayoría de los elementos aerodinámicos mencionados en este libro pueden ser fabricados en su propio taller, incluyendo los alerones, túneles y difusores. Este capítulo ofrece una breve guía sobre cómo crear algunos componentes, tanto con planchas de metal como con plástico reforzado con fibra (PRF), incluyendo en esta última definición los materiales compuestos avanzados, tales como la fibra de carbono, que puede emplearse utilizando herramientas y técnicas caseras.

Pero antes de comenzar con la parte práctica, unos consejos. Puede sonar bastante obvio, pero fabricar elementos para crear carga aerodinámica y transmitir esa fuerza a su coche de competición es una labor crítica desde el punto de vista de la seguridad. Los componentes y sus monturas tienen que estar a la altura en términos de integridad estructural, y deben ser resistentes en concordancia con las demandas de la dura vida que es la competición. Estos requisitos no serían difíciles de conseguir si no tuviéramos que enfrentarnos al dilema de hacer los componentes lo más ligeros posible, con el fin de que sirvan para mejorar las prestaciones del coche y no lo contrario. Las cargas que los alerones, túneles y demás elementos crean son sustanciales



Aluminio, una opción muy popular tanto para profesionales como aficionados para la construcción de alerones.

cuando el coche rueda a su máxima velocidad, y por esto los componentes deben estar a la altura de las circunstancias y resistir todas las cargas que se les impone. Una vez dicho esto, hay que recordar que todos los demás elementos del coche son importantes para la seguridad, así que nadie debería ponerse a fabricar sus propias piezas si no siente que está capacitado para ello. No hace falta ser un experto en el análisis del desgaste para diseñar y construir algo resistente a la vez que ligero, pero, probablemente, sea necesario hacer algunos experimentos con el fin de conseguir la experiencia y el conocimiento adecuados para construir, por ejemplo, un conjunto de alerones, eso si no tiene ya esa experiencia. Puede que ya esté lo suficientemente preparado para ponerse directamente manos a la obra. Sea cual sea la categoría en la que se encuentre, espero que este capítulo le proporcione un par de consejos prácticos.

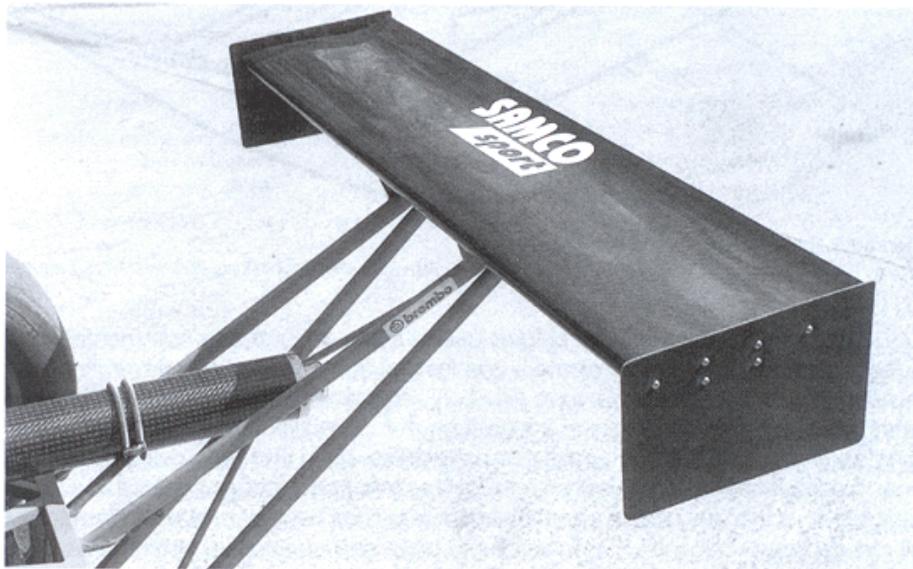
## La elección de los materiales

Elegir los materiales más apropiados para fabricar un componente en particular dependerá de una serie de factores, tales como la familiaridad que tenga con ese material (o sus ganas de familiarizarse con él) y los métodos de fabricación necesarios; los requisitos estructurales y físicos del componente; los costes del material en relación con su presupuesto; y el número de piezas de repuesto que quiera tener. El aficionado más valiente puede contar con muchos métodos de fabricación diferentes, y aunque los métodos de fabricación «tradicionales» son los más utilizados para trabajar con madera, metal y plástico reforzado, vale la pena echar una ojeada a los

métodos de construcción de los aviones a escala, donde la alta resistencia y el poco peso están a la orden del día. También vale la pena ojear los libros sobre diseño de aviones a escala real, como por ejemplo el que trata sobre el «Voyager», el primer avión en volar alrededor del mundo sin parar (apéndice 2).

Los componentes sencillos, tales como el difusor, o los separadores de flujo, que son prácticamente planos y sin curvatura, pueden fabricarse de madera contrachapada, metal en planchas o de PRF moldeado. Los componentes con una sola curvatura, o sea, aquellos doblados o curvados en un solo plano, tales como los alerones sencillos, pueden hacerse de metal o PRF, mientras que los componentes con curvaturas complejas, como las cajas de aire o separadores más complejos, es más conveniente fabricarlos con PRF, a menos que sea usted muy bueno trabajando con las planchas de metal y cuente con un buen equipo para ello. De esto podemos deducir que el PRF es el material que más aplicaciones tiene, pero para algo sencillo como un panel plano, que no va a ser reemplazado a menudo, no siempre merecerá la pena el tiempo que se tarda en crear la matriz, luego el molde y finalmente la pieza. Puede ser que para elementos como éstos tenga más sentido utilizar madera contrachapada o aluminio. Esta lógica práctica no impide que los equipos de Fórmula 1 fabriquen los elementos más sencillos de plástico reforzado con fibra, pero la estética y el dinero se han impuesto al sentido común.

Pero echemos un vistazo a la fabricación de los alerones como ejemplo de un componente que requiere prácticamente de todas las habilidades para fabricar un elemento inductor de carga aerodinámica. Los alerones pueden estar hechos de



Los alerones de plástico reforzados con fibra de carbono pueden construirse en su propio garaje, éste lo fue.

metal en planchas, probablemente de aluminio, sobre una subestructura hecha de madera, aluminio o acero, o pueden estar compuestos de PRF en su totalidad. Esto cubre una amplia gama de posibles métodos, pero algo común a las dos «tecnologías» es la necesidad de una subestructura que ofrezca al alerón la rigidez y la resistencia adecuadas, así como un método de sujeción.

## Planchas de metal

En el caso de un alerón de metal en planchas, el «forro» o la piel están hechos generalmente de aluminio lo suficientemente fino como para ser curvado o enrollado según se desee. Esto, en sí, no da la suficiente rigidez para aguantar las cargas, por lo que se utiliza una estructura interna, integrada por una serie de «costillas» con la forma de la sección del perfil, situadas a lo largo de la envergadura del ala con una o más «vigas» transversales uniéndolas (fig. 7.1).

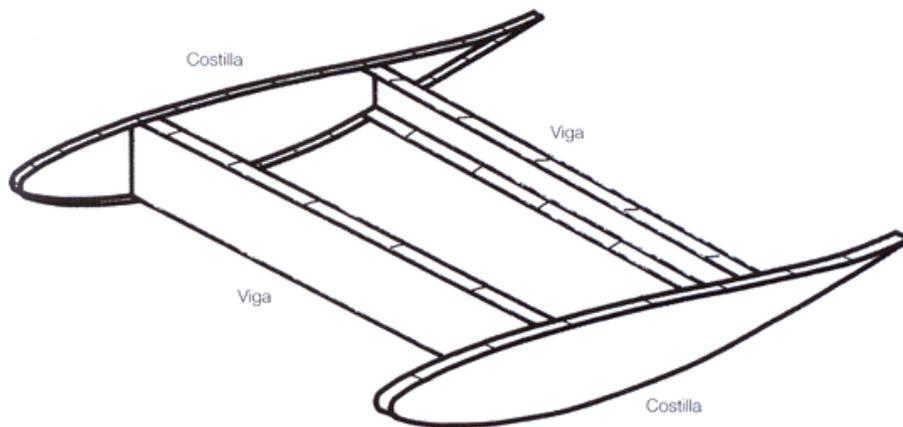


Figura 7.1. Subestructura de costillas y vigas.

Las costillas permiten que el forro quede fijado de tal modo que mantenga el adecuado perfil transversal, mientras que las vigas dan rigidez a la envergadura, y también se utilizan para fijar el forro (fig. 7.2). También se debe incorporar pie o estructura de montaje del alerón al coche. Los alerones delanteros van normalmente montados sobre un tubo que pasa por las costillas, o, en el de tipo colgante, tendrá unas placas atornilladas a la subestructura (fig. 7.3). Los alerones traseros van montados, bien sobre dos placas a ambos lados de la línea central, similar al principio del alerón delantero colgante, o bien mediante unas derivas laterales atornilladas a las costillas exteriores, y de ahí a una montura de soporte montada sobre una parte resistente del chasis, como, por ejemplo, la caja de cambios.

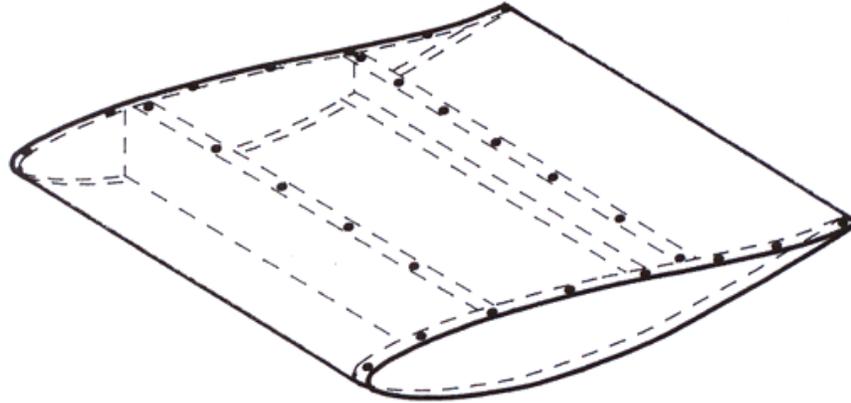


Figura 7.2. Forro remachado a la subestructura.

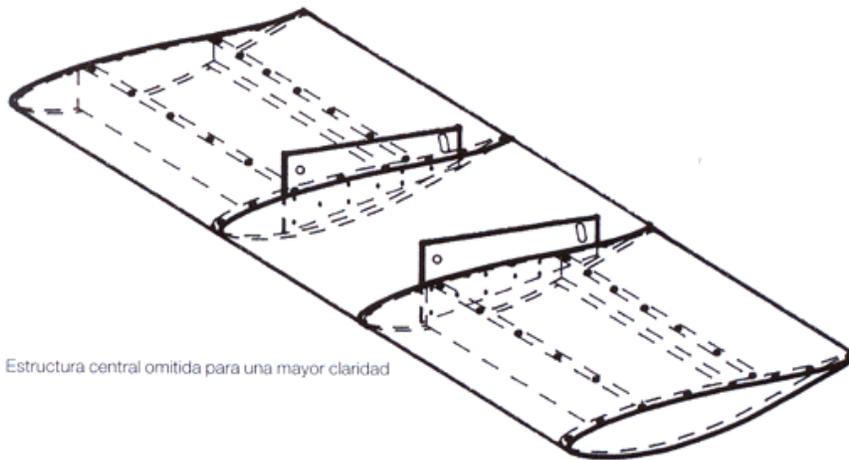


Figura 7.3. Montura de alerón delantero colgante.

Las costillas pueden estar hechas de madera o de metal. Se puede cortar una madera dura utilizando una sierra para darle el perfil deseado, y unos tornillos y/o un adhesivo epoxy serán un buen pegamento para el forro. Pero las costillas están hechas normalmente de aluminio de 0,7 a 0,9 mm de grosor, formando el perfil del ala situándolo sobre un molde guía sólido (fig. 7.4). Una plancha de acero fino sería una elección más sabia para conseguir una estructura más fuerte y resistente a la fatiga. Las vigas están normalmente hechas de acero fino, quizá del orden de 1,2-0,7 mm, para que pueda ser curvado. Consecuentemente, su perfil exacto dependerá de dónde, a lo largo de la cuerda del ala, estén situados (fig. 7.5). Si se va a utilizar el método de la montura con tubo, por ejemplo, para sujetar el alerón delantero al mo-

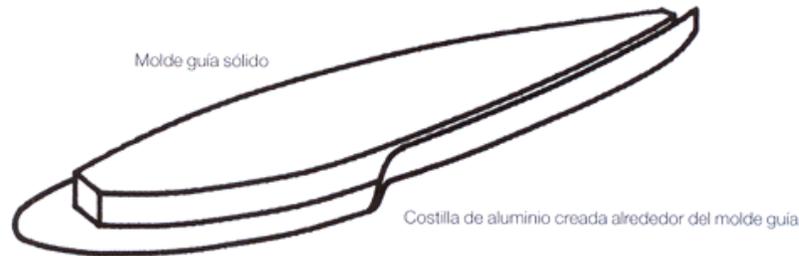


Figura 7.4. Creando una costilla alrededor de un molde guía.

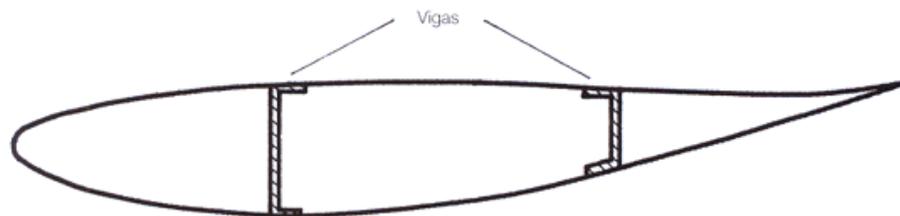


Figura 7.5. Forma de las vigas dentro del perfil de ala.

ro del coche, entonces las costillas deberán incorporar alojamientos prefabricados en los cuales poder fijar el tubo firmemente. Éstos, probablemente, estarán hechos de acero y fijados a una placa, lo que les permite ser remachados a la costilla en la posición deseada, o sea, aproximadamente en el centro de presión (fig. 7.6). Cualquier holgura que puede haber en el alojamiento del tubo de montura puede arreglarse con cinta adhesiva.

Los paneles para las pieles o forros de aluminio (y otros) de los alerones deben ser lo más ligeros posible, por lo que deben ser lo más finos posible. También deben ser lo suficientemente rígidos para no distorsionarse con las fuerzas y los cambios de presión a los que se ven sujetos, y deben ser lo más resistentes posible a los golpes. Además, naturalmente, deben ser sencillos de trabajar sobre ellos para poder darles la forma adecuada. Una vez más, un grosor de alrededor de 1,2 a 0,7 mm es el más utilizado, siendo el último un 40 % más ligero que el primero, más fácil de curvar, y más propenso a sufrir daños.

El forro del alerón está generalmente hecho de una sola pieza, unida en el borde de ataque mediante remaches o tornillos, y unido a las costillas y a las vigas por algún método similar. El aluminio no se lleva muy bien con el pegamento, y requiere de un especial cuidado en las superficies en las que va a ir adherido con el fin de que no se desprenda con los primeros signos de vibración del coche. Asegúrese de que no quedan uniones sin revisar, es sorprendente la cantidad de alerones que pueden verse en los paddocks con solapamientos erróneos en los bordes de fuga de muchos alerones (fig. 7.7). Éste es un fallo aerodinámico, y hará que el aire se vaya

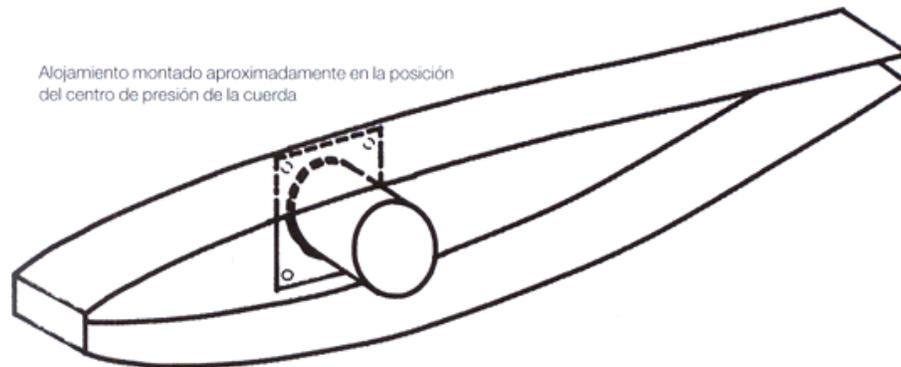


Figura 7.6. Pieza de alojamiento en la costilla para recibir el tubo de la montura.

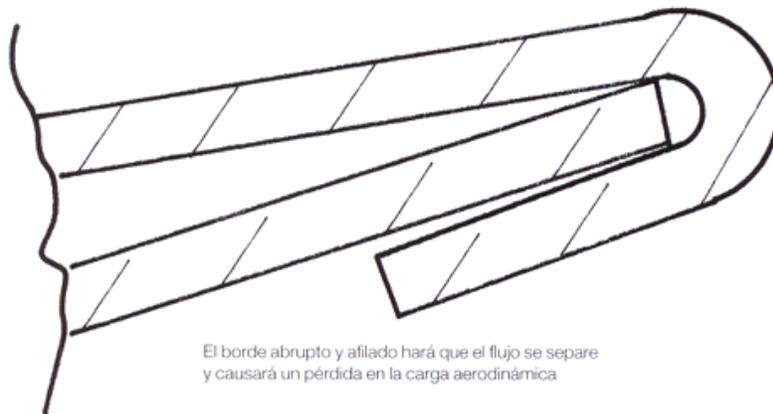


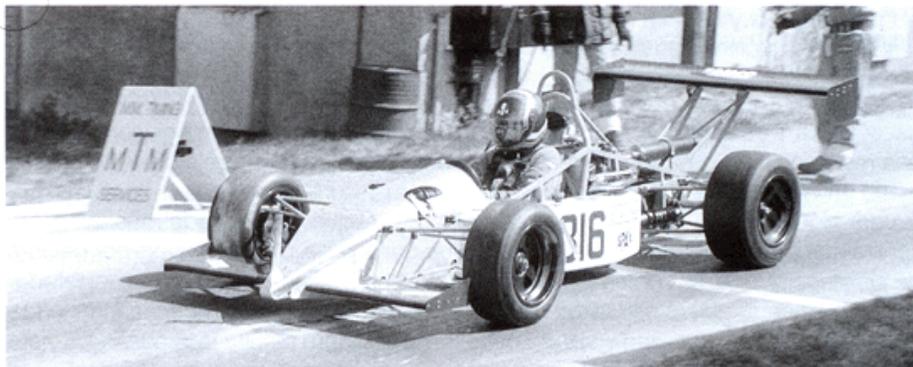
Figura 7.7. Cómo no debe acabar un borde de fuga.

hacia arriba y cause separación del flujo, perdiendo carga aerodinámica y ganando una resistencia no deseada. Si realmente *debe* haber un solapamiento, es mejor situarlo en la superficie superior, donde puede actuar como un pequeño flap Gurney y ayudar algo, siempre que este borde de fuga sea el que está situado más atrás. No servirá como ayuda si está situado en el borde de fuga del plano principal por delante de un flap, donde el controlado y constante flujo necesario se vería molestado. Ayuda, haciendo que la estela del alerón sea lo más pequeña posible, manteniendo el borde de fuga lo más fino y afilado posible. No siempre resulta fácil conseguir esto y tener un borde de fuga puro. Si se coloca correctamente, un Gurney ayudará en el aspecto estructural.

Los alerones de aluminio son razonablemente baratos de construir, y éste es el principal motivo de su popularidad entre los competidores de bajo presupuesto. Pero también tienen la desventaja de ser más pesados de lo necesario, además de que se abollan fácilmente con cualquier golpe. Las piedras que levanta otro coche que rueda delante pueden dañar fácilmente el borde de ataque de un alerón de aluminio, al igual que los golpes inadvertidos en el paddock o en el taller. Todo el cuidadoso esfuerzo de diseñarlos y construirlos puede verse tirado por la borda en un par de carreras, o incluso en un par de minutos. El problema es especialmente grave en los alerones delanteros, aunque los traseros no quedan inmunes. Y también es justo decir que las cajas de aire y los separadores de flujo, así como los spoilers traseros y otros elementos aerodinámicos, también son proclives a sufrir daños si están hechos de aluminio, aunque el efecto en las prestaciones aerodinámicas no suele ser tan crítico. La propensión a esta clase de daños puede ser reducida de manera significativa pasándose a la construcción en PRF, con los beneficios adicionales de una mayor rigidez y un pequeño ahorro de peso.

## Plásticos reforzados

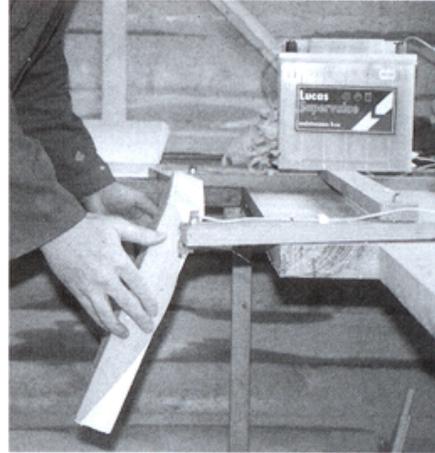
La mayoría de los que compiten en el mundo del motor están familiarizados con el plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV), también conocido coloquialmente como fibra de vidrio. En su forma más barata y sencilla, las fibras de vidrio («fibras cortadas en trozos», o CSM) entrelazadas al azar se sitúan en una matriz de resina de poliéster curada, con la que se consigue un medio duro, resistente y relativamente ligero, que puede extenderse o depositarse con pinceles u otras herramientas, en varias formas complejas, con el fin de crear paneles, morros, difusores, alerones y prácticamente todos los componentes mencionados en este libro. Se puede conseguir un aumento de la resistencia y un descenso del peso utilizando una tela de vidrio tejida, y aún pueden lograrse más beneficios si se crean estructuras de sánd-



Alerones delantero y trasero de PRFV en el Marengo de montaña.



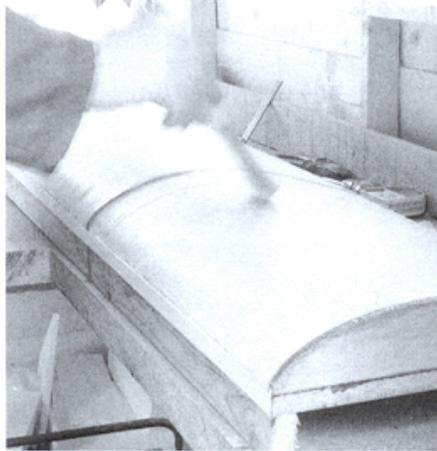
Lijando un formador de perfil para la mitad inferior de la matriz de un ala.



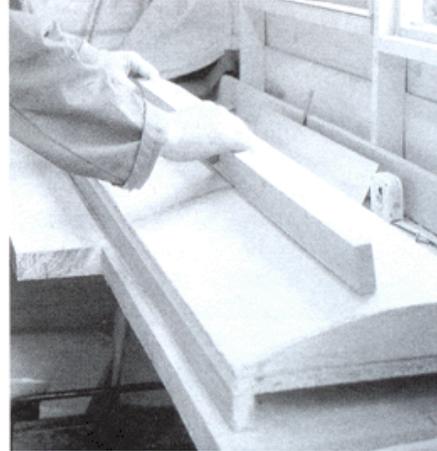
Cortando el poliestireno con alambre caliente.

wich, utilizando para el «jamón del sándwich», núcleo o alma, materiales que aumenten la rigidez de un componente en relación con su peso.

Después de esto entramos en el terreno de los compuestos avanzados, utilizando materiales reforzadores como la fibra de carbono, la cual ofrece altos niveles de rigidez, y el Kevlar, que ofrece una gran resistencia y capacidad de absorción a los golpes. Los materiales tipo nido de abeja permiten crear estructuras muy ligeras pero a la vez muy resistentes, y las propiedades estructurales de este grupo de materiales son tan superiores a las de los metales en plancha y a las formas tradicionales de PRF que, en los niveles más altos del mundo de la competición, sólo se emplean estos materiales compuestos para la carrocería y los elementos aerodinámicos. Pero pronto veremos cómo algunas de estas ventajas pueden ser disfrutadas por el competidor aficionado, ya que existen técnicas que permiten explotar los compuestos avanzados utilizando una tecnología relativamente sencilla. Primero, vamos a tratar los puntos básicos sobre la creación de un componente con PRFV. La buena noticia es que podemos crear prácticamente cualquier forma que queramos. La mala noticia es que lleva mucho tiempo, y puede ser un poco lioso, oloroso e irritante. Pero la habilidad de comenzar con una forma que ha diseñado usted, en lugar de utilizar la creación de otro, así como la capacidad de incorporar complejas curvaturas, hace que el ejercicio valga la pena. El proceso consta de tres pasos básicos: primero, se debe construir una matriz, que es una réplica exacta de lo que se va a crear; segundo, se hace un molde sobre la matriz; y tercero, se crea el componente dentro del molde. Mucha gente se pregunta en este punto por qué, habiendo creado una réplica exacta de la pieza, no para ahí y la monta sobre el coche. Bien, en efecto, eso es lo que se hace cuando se crea un alerón de aluminio, por ejemplo. Pero una de las ventajas de tomarse la molestia de fabricar un molde en primer lugar es que los componentes subsiguientes que sean iguales al primero pueden ser construidos



Cubriendo el núcleo de poliestireno con fibra de vidrio y resina epoxy.



Tras haber aplicado el relleno a las imperfecciones, la matriz es lijada para conseguir un acabado «perfecto».

mucho más rápido. Esto resulta especialmente útil para los elementos vulnerables como los morros, cajas de aire, separadores y alerones delanteros que suelen ser reemplazados a menudo.

Tomando de nuevo como ejemplo la fabricación de un alerón, es posible utilizar varias opciones a la hora de crear la matriz. Lo primero que se debe hacer es definir la forma tridimensional, y luego hay que crear la superficie exterior que permita que se extiendan los materiales del molde sobre ella. Los materiales utilizados para la matriz deben ser también compatibles con los que se utilizarán para fabricar el molde, y con las condiciones en las que dicho molde será curado. Si el alerón es sencillo, sin curvatura en su envergadura, entonces se puede utilizar forro de aluminio, quizás unido a una estructura interna de costillas y vigas, o un núcleo de espuma. Recuerde que cualquier imperfección en la superficie será transferida al molde, por lo que será mejor que evite el uso de remaches en la matriz. Alternativamente, y si se requiere una forma más complicada, se puede cortar un núcleo de espuma o lijarlo alrededor de un molde guía, y darle una capa de una resina compatible para formar una superficie sellada y rígida. La espuma de poliestireno puede cortarse con un arco de alambre caliente, después revestirse con resina epoxy (no poliéster, que disuelve el poliestireno) y acabarse con relleno antes de ser pintada. La espuma de poliuretano puede revestirse tanto con resina epoxy como con resina de poliéster. El proceso de acabado es la parte que más tiempo lleva, pero merece la pena hacerlo con tranquilidad para conseguir la forma exacta que deseaba. Tras haber pintado, aplanado, cortado y pulido hasta conseguir una superficie brillante, se aplica una sustancia despegante, que puede ser un líquido o cera, que al secarse se convierte en un forro impermeable, para después dar paso al proceso de creación del molde.

Teniendo en cuenta que no tenemos más remedio que llevar a cabo el proceso de moldeado a temperatura ambiente, entonces lo más probable es que el molde esté hecho de PRFV basado en un sistema de resina de poliéster. Esto requiere primero la aplicación de una «capa de gel» en la superficie de la matriz para dar al molde dureza y brillo en su capa exterior, y luego es necesario dejarlo que cure (un proceso iniciado al añadir un catalizador químico al gel). Luego se extienden las capas de CSM con una resina de poliéster catalizada sobre la capa de gel, que es bien impregnada con pinceles y rodillos para deshacerse de las burbujas de aire (por lo menos de la mayoría de ellas), antes de dejarlo curar una vez más. Normalmente, se fabrica una estructura externa de refuerzo en la parte exterior del molde para garantizar la rigidez una vez haya sido retirado de la matriz. Esto puede realizarse con PRFV sobre trozos de madera, o tubos de metal. El molde debe curarse totalmente antes de intentar retirarlo de la matriz, lo que significa un mínimo de 24 horas, y posiblemente bastante más en condiciones frías. El proceso de curación tarda varios días, incluso en condiciones de calor.



Laminando el molde sobre la matriz.

Una vez que el molde se ha curado, puede ser retirado de la matriz. Éste es un proceso que destroza los nervios, y es normalmente recompensado con un satisfactorio sonido «crack» cuando el molde por fin se despegas de la matriz. Ocasionalmente, las cosas pueden salir mal, tales como el desprendimiento de pequeños trozos de la superficie pegadas al molde, pero los problemas como éste son raros si ha seguido todas las instrucciones facilitadas por el fabricante de sus productos. La preparación final del molde consiste en aplicar varias capas de cera despegante.

Teniendo en cuenta que estamos tratando la construcción de alerones, es necesario también construir moldes para los componentes de la subestructura interna. No es necesario construir una superficie que sea estética para las costillas y las vigas, por lo que existen métodos más sencillos para hacer estas piezas que evitan construir una matriz. Un molde de una sección para las vigas puede fabricarse ator-

nillando dos piezas de plástico y madera con la distancia adecuada sobre una madera similar (fig. 7.8). Si una viga no tiene los lados paralelos, entonces hará falta cortar un ángulo en uno de los lados del molde, y antes de moldear este borde será necesario sellarlo con resina o incluso con cinta adhesiva transparente (aunque no todas las cintas son compatibles con la resina y el gel, así que compruébelo antes de empezar). La misma clase de madera puede utilizarse para construir los moldes de las costillas, si se corta un agujero con la forma del perfil del alerón en una de las tablas y luego se atornilla a la otra (fig. 7.9).

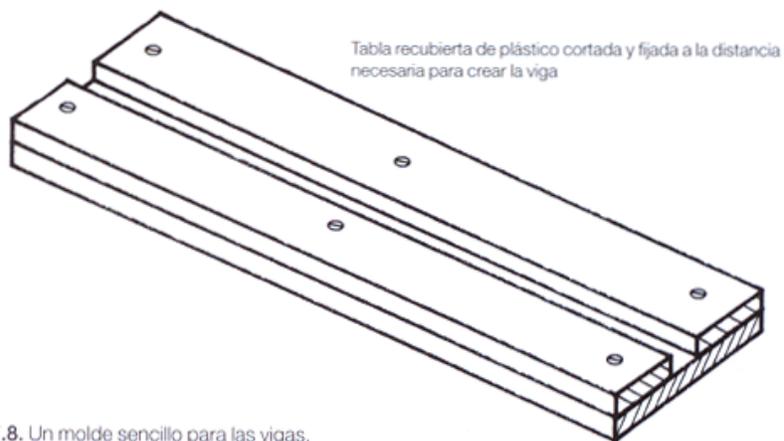


Figura 7.8. Un molde sencillo para las vigas.

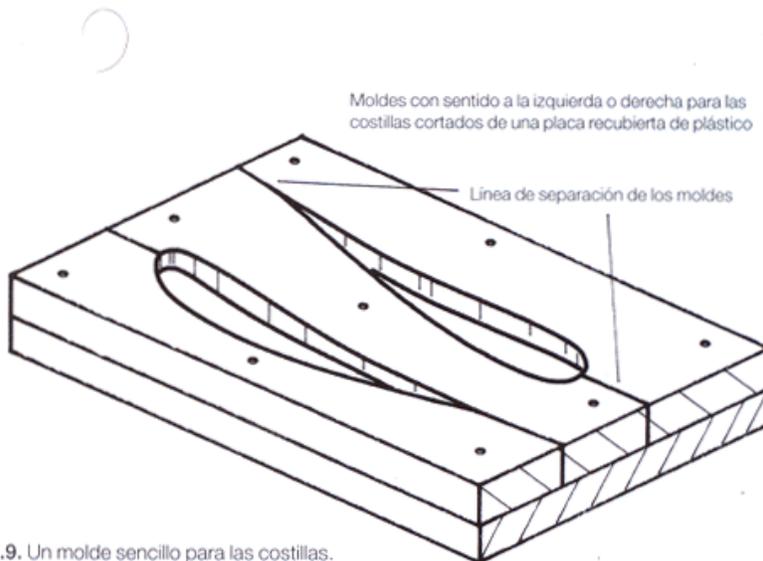


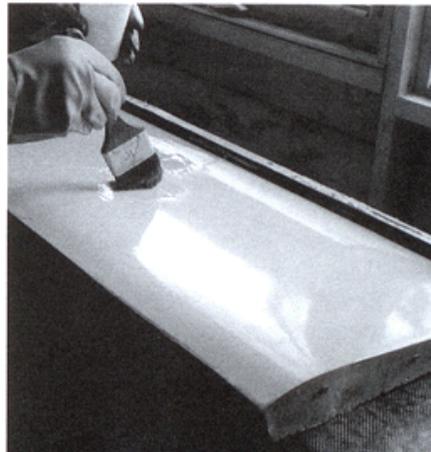
Figura 7.9. Un molde sencillo para las costillas.

Los alojamientos o insertos metálicos para recibir los tubos de refuerzo del alerón pueden hacerse con un trozo del tubo apropiado sujeto en su lugar mediante cinta de doble cara en el molde de las costillas. Fijese de nuevo que hemos utilizado un solo paso para fabricar estos moldes, y no fue necesario crear la matriz. Después se pueden aplicar la cera y la sustancia despegante antes de construir los componentes, que son fabricados utilizando el mismo método descrito en la construcción del molde de PRFV más arriba, aunque utilizando mejores materiales desde el punto de vista estructural. En el apéndice 2 pueden encontrarse más detalles sobre los métodos de construcción, aunque también pueden obtenerse de los proveedores de los materiales.

Los forros de los alerones, y los elementos internos, pueden construirse con PRFV y se obtendrá un resultado satisfactorio. Puede que resulte necesario añadir algún refuerzo a los forros de los alerones en las zonas no apoyadas en las costillas o las vigas, y aquí se pueden considerar una serie de materiales del núcleo, incluyendo la fibra corrugada (conocido también como el «nido de abeja de los pobres»), madera balsa y materiales del núcleo patentados, como el «Coremat» o la espuma de PVC fina. Los nidos de abeja (*honeycomb*) no resultan muy buenos con la resina de poliéster, debido a que la fuerza de adherencia o pegado de la resina no es lo suficientemente fuerte. Ya hablaremos de esto más adelante. Sin embargo, existen modos de fabricar componentes en PRF que nos den un resultado más rígido, fuerte y ligero aunque probablemente más caro. A pesar de todo, los costes no son necesariamente prohibitivos, y merece la pena considerar estos métodos, ya que sus técnicas pueden ser aplicadas a una amplia gama de las piezas inductoras de carga aerodinámica que nos interesan.



Encerando la parte inferior del molde de un alerón delantero.



Aplicando una capa de gel transparente sobre el molde. Observe el gel de color negro en el borde de ataque para ocultar la unión.



Aplicando la primera capa de carbono con resina transparente.



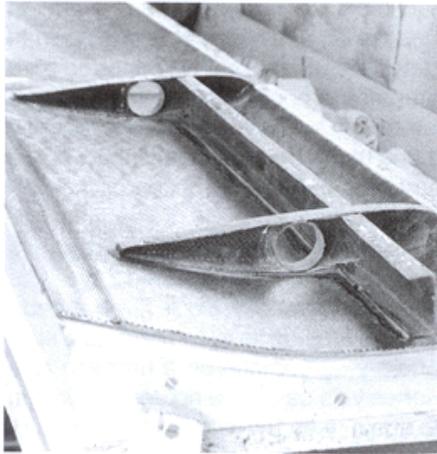
Aplicando resina negra al material de Coremat.

Los compuestos avanzados, en el contexto de automovilismo, normalmente incluyen materiales como la fibra de carbono, el Kevlar, y los materiales de nido de abejas. «Compuestos», después de todo, significa «hecho de varias partes», y lo de «avanzado» es una etiqueta puesta por aquellos que pretenden mantener un poco el glamour de la tecnología. No le daremos importancia a esto y seguiremos adelante. ¿Cómo puede el competidor aficionado beneficiarse de los materiales compuestos? La respuesta, especialmente si ya dispone de la tecnología y las habilidades para el PRFV, es *fácilmente*. Es posible, a pesar de una creencia popular de lo contrario, combinar el carbono y el Kevlar con los mismos tipos de resina de poliéster utilizados para hacer moldes reforzados con fibra de vidrio. Por esto, aunque los materiales de refuerzo son mucho más caros, aún se puede utilizar la barata resina para lograr una considerable mejora en rigidez y resistencia de nuestros componentes, generalmente con un ahorro significativo de peso. Si el carbono se aplica encima de una capa de gel, también podrá disfrutar de la apariencia de alta tecnología que le dará a sus alerones o a lo que sea; esto, por lo menos, hará que sus rivales murmuren a sus espaldas.

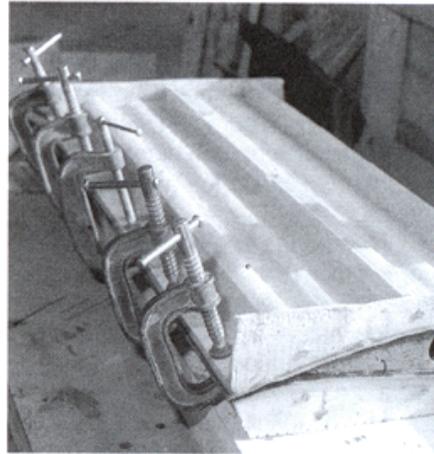
Si, estructuralmente hablando, se desea un mejor resultado, entonces se pueden adquirir resinas epoxy que curan a temperatura ambiente para lograr una mayor rigidez y fuerza, y que además permiten la adopción de núcleos de nido de abeja para crear algunos elementos extremadamente resistentes y, sin embargo, ligeros. Al contrario que las resinas poliéster, las resinas epoxy pueden trabajar con los materiales nido de abeja debido a su mayor fuerza de fijación o pegado. Será evidente que el área de contacto entre el nido de abeja y la superficie a la que será pegado es muy pequeña, debido a que el contacto está restringido a los bordes del material de nido de abeja. Por esto, para conseguir un contacto seguro, en un área

tan pequeña se necesita una gran fuerza de pegado, y las resinas epoxy apropiadas la ofrecen. Está claro que durante el proceso de curación se necesita algún método de sujeción para mantener unidos el nido de abeja y la superficie a la que va pegado. Para elementos planos o con una curvatura sencilla, esto puede conseguirse mediante una presión mecánica, por ejemplo en el caso de un alerón situando la matriz, con peso encima si es necesario, de vuelta en el molde en la parte superior de los materiales a curar (con una película protectora adecuada, como una plancha de polietileno, situada entre la matriz y los materiales impregnados de resina). Para formas más complejas, una solución más complicada: una bolsa de vacío, que permita que las molduras curvadas sean «absorbidas» por el molde, manteniendo así un contacto adecuado sobre toda el área del componente. Esta técnica requiere obviamente una nueva gama de materiales consumibles, tales como películas de despegado, tejidos «respirables» y materiales y selladores de vacío, junto con una bomba de vacío. Pero si se utilizan con cuidado se pueden conseguir molduras complejas y sólidas.

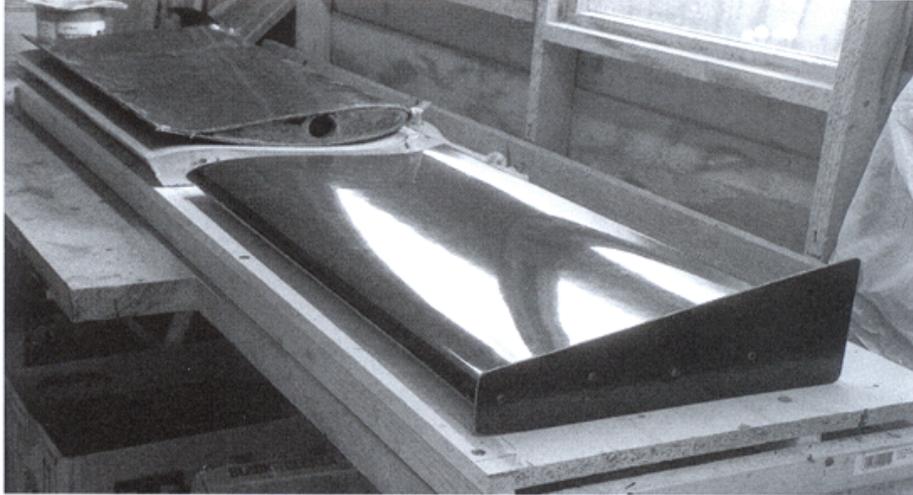
Con la compra de algo más de equipamiento es posible utilizar algunos materiales altamente sofisticados para conseguir un resultado profesional. Los «preimpregnados» (*pre-preg*) son telas de refuerzo que han sido preimpregnadas de resina, con las proporciones exactas para conseguir un resultado óptimo, algo que resulta virtualmente imposible de obtener a mano, donde casi siempre se aplica un exceso de resina en ciertas áreas. Los preimpregnados se conservan en un congelador (a una temperatura de entre  $-15$  y  $-18$  °C), y son curados a temperaturas elevadas de alrededor de 60 a 120 °C. Por tanto, está claro que se necesita un horno para utilizar esta tecnología, y bien se puede comprar uno incluso



La subestructura de costillas y vigas es pegada después de que se haya aplicado y curado la segunda capa de carbono.



Las dos mitades se unen y se sujetan.



El componente terminado, con las derivas laterales fijadas.

hecho a medida, o se puede construir uno utilizando algo de ingenio. El libro *A Practical Guide to Composites* (apéndice 2) es muy recomendable si quiere saber más sobre preimpregnados. Sin embargo, es necesario utilizar en la fabricación del molde, y hasta cierto punto en la matriz, materiales que puedan resistir estas condiciones extremas. Un molde de resina PRFV, por ejemplo, sólo podrá aguantar temperaturas de alrededor de los 90 °C, y sólo si se ha tomado la precaución de quitar todas las burbujas de aire; de otro modo las altas temperaturas podrían causar daños en el molde. Por tanto, sería necesario utilizar preimpregnados para la construcción del molde, lo que hace que aumente el coste. Pero la combinación de vacío, la curación a elevada temperatura, los sistemas de resinas epoxy y la fibra de carbono con nido de abeja nos da una tecnología difícil de superar para la construcción de los alerones y otros elementos inductores de carga aerodinámica.

Merece la pena hacer una pausa en este punto para echar un vistazo a las propiedades relativas de algunos de los materiales tratados, con el fin de ayudar a decidir cuál es el mejor material para un determinado trabajo. Se llevaron a cabo algunos tests sencillos en los que se cortaron unas tiras de igual tamaño de distintos materiales, se fijaron a una mesa de trabajo y se sometieron a un peso que colgaba desde arriba. Se midieron las deflexiones y se calculó la rigidez específica relativa. Los resultados son los de la tabla de abajo, y en forma de gráfica en la figura 7.10.

### Rigidez relativa de aluminio laminado de 2 capas y 1,2 mm

Material	Peso relativo	Deflexión, mm	Rigidez relativa
CSM/resina de poliéster	1,00	35	1,00
Kevlar/resina de poliéster	0,94	22	1,69
Carbono/resina de poliéster	0,79	25	1,77
Carbono/epoxy	0,84	21	1,98
Carbono/Coremat/resina de poliéster	1,87	1	18,72
Carbono/Nomex/epoxy	1,27	0,5	55,12
Carbono <i>pre-preg</i>	0,78	35	1,28
Carbono <i>pre-preg</i> /aluminio en nido de abeja/epoxy	1,27	0,35	79,05
Aluminio	2,62	2,5	5,34

Lo que estas sencillas pruebas no tienen en cuenta es el grosor de cada muestra probada, y esto tiene mucho que ver con la rigidez de un material. Pero a pesar de todo, estas muestras sirven para hacer comparaciones interesantes. Por ejemplo, el carbono con resina de poliéster es mucho más rígido que el PRFV hecho con CSM con poliéster. Los beneficios más grandes en cuanto a rigidez se obtienen usando un material con núcleo, y el Coremat es un modo barato de crear un laminado rígido, mientras que el Nomex y el aluminio en nido de abeja son los laminados más resistentes de todos. El carbono *pre-preg* no parece muy rígido, pero habiendo sido va-

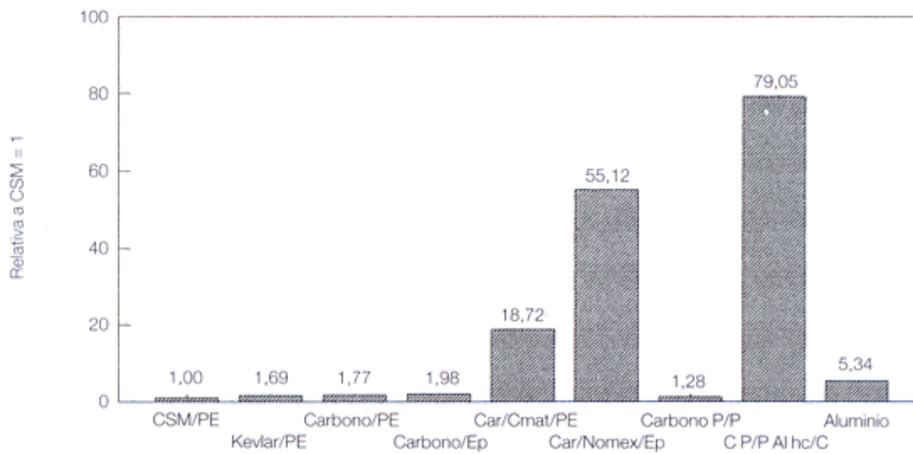


Figura 7.10. Rigidez relativa.

ciado, esta muestra era mucho más fina que las otras, lo que indudablemente da una falsa impresión. Curiosamente, el aluminio sale bastante favorecido en esta comparación, pero su mayor grosor nos da una idea equivocada.

Se añadió carga a cada material hasta que se alcanzaba el punto de rotura, o hasta que el límite elástico se sobrepasaba, y los resultados fueron utilizados para calcular las fuerza tensoras relativas específicas. Éstas son las de la tabla de abajo y las de la figura 7-11.

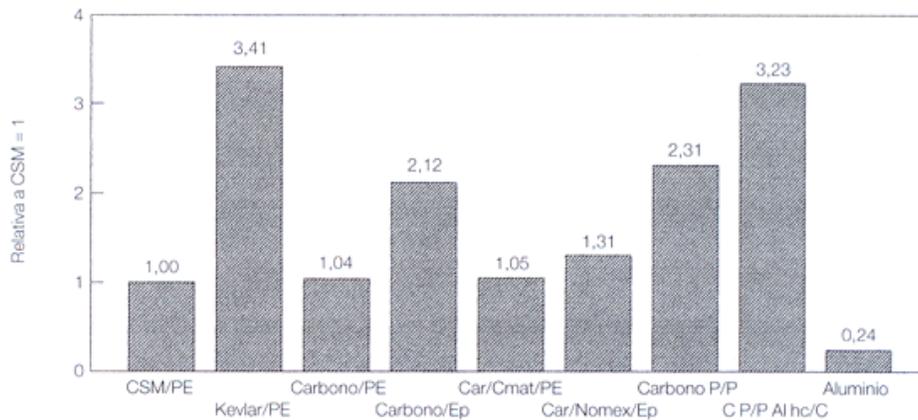


Figura 7.11. Fuerza tensora relativa.

### Fuerza tensora relativa de aluminio laminado de 2 capas y 1,2 mm

Material	Peso relativo	Peso de ruptura, kg	Fuerza relativa
CSM/resina de poliéster	1,00	2,525	1,00
Kevlar/resina de poliéster	0,94	8,1	3,41
Carbono/resina de poliéster	0,79	2,075	1,04
Carbono/epoxy	0,84	4,5	2,12
Carbono/Coremat/resina de poliéster	1,87	4,95	1,05
Carbono/Nomex/epoxy	1,27	4,2	1,31
Carbono <i>pre-preg</i>	0,78	4,55	2,31
Carbono <i>pre-preg</i> /aluminio en nido de abeja/epoxy	1,27	10,325	3,23
Aluminio	2,62	1,56	0,24

En el caso de la resistencia, los materiales caen en magnitudes o campos diferentes, y el Kevlar resulta el vencedor. Está claro que la resina epoxy en lugar de poliéster crea un aumento de la fuerza en el caso de los carbonos laminados. El alumi-

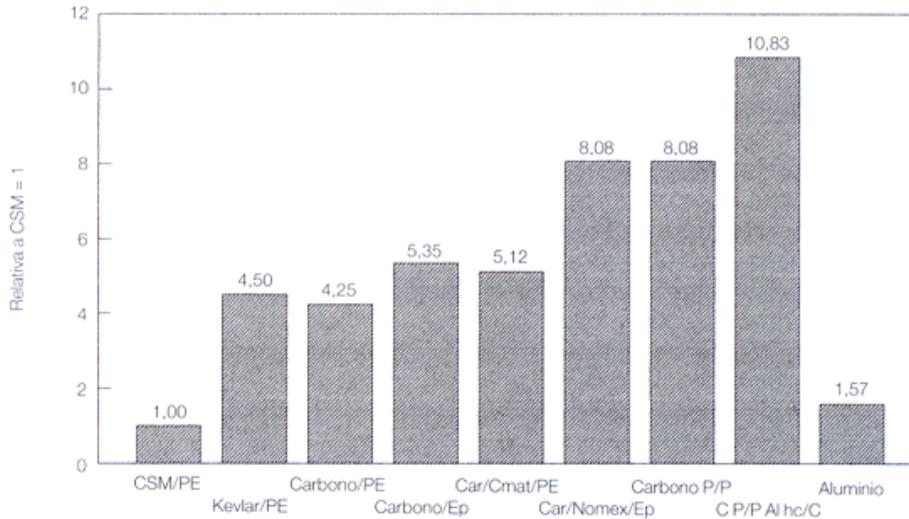


Figura 7.12. Costes relativos.

no *pre-preg* en nido de abeja vuelve a dar muy buen resultado, y es el mejor material combinando las dos pruebas. La plancha de aluminio se muestra pobre en la prueba de resistencia, quedando curvada permanentemente con poca carga, aunque finalmente no se rompa. Mientras que esto es lo que permite que se pueda curvar y manejar fácilmente, es también la cualidad que hace que sea muy propenso a abollarse.

Para completar esta comparación de materiales, deberíamos también mirar sus costes relativos. Para hacer una comparación razonablemente justa, los costes en la tabla de abajo (fig. 7.12) están basados en un metro cuadrado, y son para laminados, incluyendo la resina, el catalizador donde se necesite, y el propio material. Las cifras del aluminio están basadas en una plancha de 1,2 mm escogida entre un vendedor al azar. Todos los precios están basados en los que regían en 1997 en el mercado británico.

### Costes relativos de aluminio laminado de 2 capas y 1,2 mm

Material	Coste Relativo
CSM/resina de poliéster	1,00
Kevlar/resina de poliéster	4,50
Carbono/resina de poliéster	4,25
Carbono/epoxy	5,35
Carbono/Coremat/resina de poliéster	5,12
Carbono/Nomex/epoxy	8,08
Carbono <i>pre-preg</i>	8,08
Carbono <i>pre-preg</i> /aluminio en nido de abeja/epoxy	10,83
Aluminio	1,57

Los costes de los laminados PRF están en función del coste de los materiales, el consumo de resina y el coste de ésta. Claramente, la forma barata de PRFV es muy económica, mientras que el uso de materiales avanzados hace que se vuelva bastante más caro. Pero si un alerón, por ejemplo, cuesta 80 dólares en materiales en lugar de 10, pero pesa la mitad y es casi cinco veces más resistente que la versión barata, es sin duda una opción que merece la pena considerar.

Antes de pasar a ver cómo los profesionales fabrican sus elementos compuestos, debemos mencionar que los componentes prototipo de PRF pueden fabricarse con un proceso de un solo paso si se da la forma de la pieza a un trozo de espuma de poliuretano, un material que resulta fácil de cortar y lijar, y que después es cubierto con fibra de vidrio y resina de poliéster. Una vez que el componente ha sido probado, teniendo en cuenta que sobreviva al proceso, puede ser utilizado como base para una matriz apropiada. De este modo, se pueden construir una serie de diferentes componentes de manera rápida y barata, y sólo cuando esté seguro de que la pieza es la correcta, comenzará a fabricar el molde.

## Técnicas profesionales

La sección anterior sobre el uso de los preimpregnados describía técnicas no muy diferentes de las utilizadas por los profesionales, siendo la tecnología similar a la empleada por los equipos más importantes hace un par de años. Pero los tiempos cambian, y los moldes de materiales de alta calidad ahora son curados en autoclaves, que, además de permitir que se alcancen altas temperaturas y vacío, también ejercen presiones de hasta 7 bar sobre los moldes. Consecuentemente, la consolidación laminar, la ausencia de burbujas de aire y la relación óptima de resina/material se combinan para producir componentes con una rigidez y fuerza increíbles considerando su poco peso. Esto es algo necesario, teniendo en cuenta que todos estos elementos se combinan para generar enormes cantidades de carga aerodinámica. En un texto escrito en 1992, Brian O'Rourke, Ingeniero Jefe de Compuestos de Williams Grand Prix (apéndice 2), indicaba que la estructura del alerón delantero de los entonces modernos Fórmula 1 llegaba a soportar cargas de hasta 5.000 Newtons. Aunque los cambios en la reglamentación han reducido estas cifras desde ese día, las fuerzas involucradas son todavía muy sustanciales, y los expertos como O'Rourke, cuyo trabajo estaba en la aeronáutica antes de unirse a Williams en 1982, son una parte esencial en el diseño de un coche de carreras de un gran equipo.

Pero sea cual sea el nivel de carga aerodinámica que espera conseguir, haga todo lo posible para asegurarse de que sus alerones, o separadores, o lo que sea, son los suficientemente fuertes para resistir lo que espera de ellos. Su diseño y construcción son completamente su responsabilidad, y ni el autor ni la editorial aceptarán ninguna responsabilidad si algo sale mal.

## 8. Ejemplos prácticos: de la Fórmula 1 hasta las categorías inferiores

Después de intentar averiguar en los primeros siete capítulos cómo los elementos aerodinámicos producen carga, cuánta producen, cómo puede uno «verla» y cuantificarla, los efectos que tienen y cómo fabricar componentes que la generen, utilizaremos este octavo capítulo para echar un vistazo a las diferentes categorías del mundo de la competición que permiten la explotación de la aerodinámica con el fin de averiguar qué es lo que se hace en cada caso. Llevar a cabo esto hace que surjan más preguntas que respuestas, pero esto no es malo si se consigue mejorar el entendimiento de los principios que actúan. Merece la pena recordar que las ideas, o la ejecución específica de las ideas, que funcionan en un coche, pueden no funcionar en otro diferente. Esto es lo que hace que el tema sea tan fascinante, y significa que hay suficiente lugar para probar todas nuestras ideas, incluso las que les robamos a los demás.

Se puede decir que los coches de competición están divididos en dos categorías: los de ruedas descubiertas, que incluyen a los monoplazas, los dragsters, los stock cars, y demás; y los de ruedas cubiertas, que incluyen a los coches de sport así como a toda la familia de vehículos de carreras basados en coche de calle, en los que se incluyen los de rallies. Esta clasificación resulta conveniente, tanto en términos de las diferencias visuales obvias, como sus diferentes características aerodinámicas. Comenzaremos primero con los coches con ruedas descubiertas.

### **Coches con ruedas descubiertas**

La mayoría de los coches de competición con las ruedas descubiertas son muy sencillos conceptualmente: la idea, normalmente, es crear la estructura más básica posible para soportar el motor, la transmisión y el piloto, y para transmitir la potencia y la dirección a las ruedas. Por lo menos, así es como comenzó todo. Con el paso

del tiempo, el desarrollo que se ha llevado a cabo ha convertido a estos vehículos en los más complejos del mundo. Y esta complejidad se manifiesta en la aplicación de la aerodinámica a este grupo genérico de vehículos. Es debido a su naturaleza, la de ruedas descubiertas, que el flujo de aire a su alrededor es tan complicado, difícil de controlar y laborioso de explotar. Aunque, debido a que las categorías tecnológicamente más avanzadas del mundo son los coches con ruedas descubiertas, en esto es, irónicamente, donde se gasta mayor cantidad de dinero para encontrar una carga aerodinámica eficiente.

Literalmente, al igual que metafóricamente, las ruedas descubiertas son una verdadera carga. Más del 40 % de la resistencia de los coches de esta clase está causada por las ruedas. El aire que fluye alrededor de una rueda descubierta se vuelve turbulento cuando pasa hacia atrás, lo que crea resistencia, y tiene un profundo efecto negativo en el flujo que pasa por las demás partes del coche. Esto puede llegar a afectar al coeficiente de penetración del vehículo, su capacidad de refrigeración y la eficiencia de la creación de carga aerodinámica en la parte inferior y trasera del coche. Las ruedas delanteras también influyen sobre los alerones delanteros, y esto, generalmente, tiene un efecto menos que beneficioso en la carga y su eficiencia.

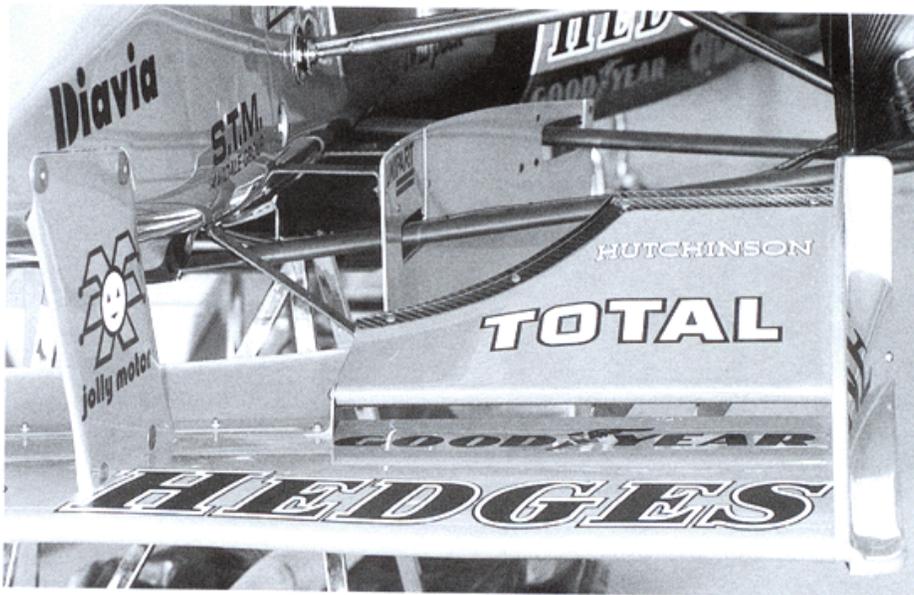
Pero al igual que crear grandes cantidades de resistencia complica el flujo de aire sobre el resto del vehículo, las ruedas, al rotar, generan también una cantidad significativa de sustentación positiva. Esto no ayuda para nada, pero es como es, ya que las leyes de la naturaleza han determinado que el aire que se acelera sobre la parte superior de una rueda causa una reducción de la presión en la superficie superior del neumático que crea una fuerza hacia arriba. Hasta cierto punto esto se ve reducido por la presencia del suelo, y la influencia de éste sobre un proceso conocido como efecto Magnus, que describe cómo los cuerpos cilíndricos o esféricos al moverse y pasar por el aire crean un componente de fuerza que es perpendicular a la dirección del movimiento. La dirección de la fuerza perpendicular viene dictada por la dirección de giro en relación con la dirección del movimiento, y un cilindro en el aire libre, rotando como lo haría una rueda, normalmente crearía una fuerza dirigida hacia abajo como resultado del efecto Magnus, igual que una pelota de tenis liftada. Sin embargo, una rueda no está normalmente al aire libre, y como el flujo no puede pasar por debajo de la rueda, el aire es forzado a acelerar sobre ella, lo que crea una fuerza de sustentación. El efecto Magnus, debido a la fricción viscosa entre el aire y la rueda, tiende a retardar el flujo en la parte superior de la rueda, y esto reduce algo la fuerza de sustentación, pero, desafortunadamente, la sustentación sigue siendo positiva.

Así que un coche de carreras con las ruedas descubiertas es una bestia difícil de convertir en algo aerodinámicamente eficiente. Vamos a echar un breve vistazo a una serie de coches con las ruedas descubiertas para ver cómo los diseñadores han hecho para conseguir la carga aerodinámica que necesitan, y qué medidas han tomado para conseguir una carga lo más eficiente posible. Comenzaremos, como es casi inevitable, con un ejemplo de la Fórmula 1.

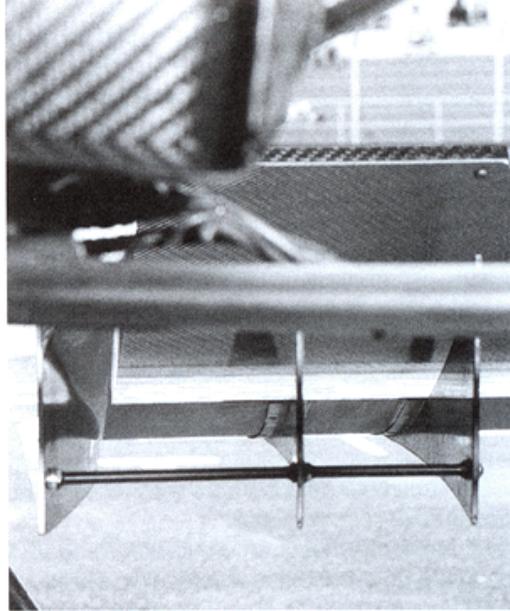
## Fórmula 1

Todos los coches de Fórmula 1 son aparatos muy bien ensamblados, con unos chasis artesanales y con carrocerías que cubren el motor, la transmisión y el compartimento del piloto. Dentro de los problemas dimensionales impuestos por el reglamento, y las necesidades prácticas de instalar el propulsor y el sistema de tracción, así como los sistemas de refrigeración requeridos por los otros sistemas, la porción central de un coche de Fórmula 1 es todo lo «aerodinámico» que puede ser. El chasis es lo más estrecho posible, teniendo en cuenta que el piloto debe ir situado cómodamente para realizar un buen trabajo, y teniendo también en cuenta que las necesidades estructurales se cubren mejor con un chasis lo más ancho posible. Este conflicto de intereses entre la aerodinámica y la integridad estructural pone a prueba la capacidad de los ingenieros y hay que añadir el hecho de construir un chasis seguro que esté acorde con los resultados de la DCF y las pruebas en el túnel de viento. Aunque la parte central del chasis sea muy afilada, las ruedas hacen todo lo posible para molestar la eficiencia visual y aerodinámica del diseño, y los alerones delanteros y traseros parecen ser dejados para más tarde, aunque finalmente sean integrados cuidadosamente en el conjunto.

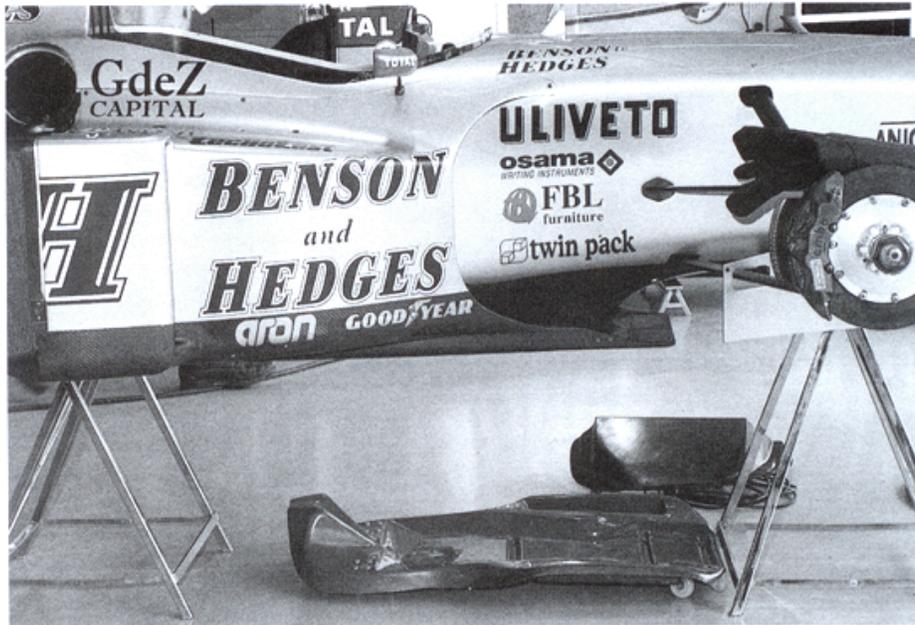
Las fotos muestran un Jordan Peugeot 196 en los boxes de Estoril, Portugal, en 1996, un circuito que favorece las configuraciones con mucha carga, con una serie de curvas rápidas en la que se alcanzan hasta 3G, y sólo una recta larga. En la parte delantera del coche, el Jordan utiliza el ubicuo alerón delantero, suspendido



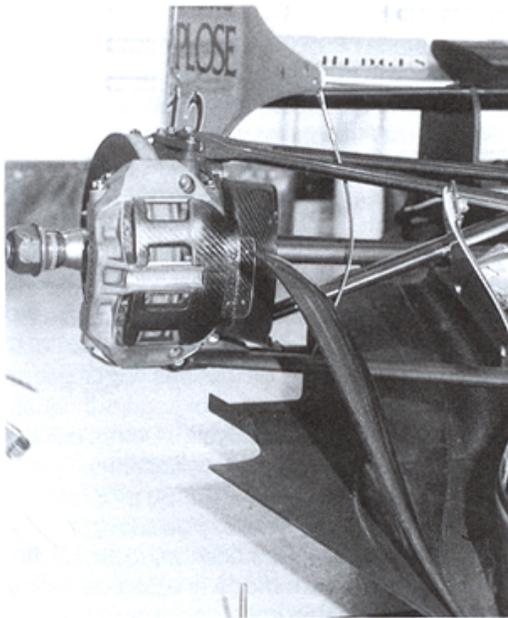
El alerón delantero asimétrico del Jordan 196, una pieza colgante de dos elementos. (Tracey Inglis)



Canalizadores curvados debajo del alerón delantero vistos por detrás. (Tracey Inglis)



El principio de «fondo plano» obligatorio crea un divisor de flujo bajo el cockpit. (Tracey Inglis)



La carcasa y el carenado de la rueda.  
(Tracey Inglis)



El capó del motor, los pontones traseros y los «winglets». (Tracey Inglis)

desde el morro. El alerón es, en efecto, uno de dos elementos, con flaps sencillos, aunque el plano principal es una estructura de una pieza que ocupa toda la longitud permitida (1.400 mm). La porción central del plano principal delantero está algo elevada, lo que reducirá la sensibilidad del alerón con respecto a la altura del coche, y permitirá un paso más limpio del flujo a la parte central del fondo del monoplaza. Los flaps del alerón son asimétricos, con su máxima cuerda en los extremos exteriores. La reducción de la cuerda en la parte interior de los flaps permitirá un mejor paso del aire a los radiadores, que incorporan unos conductos para su ventilación.

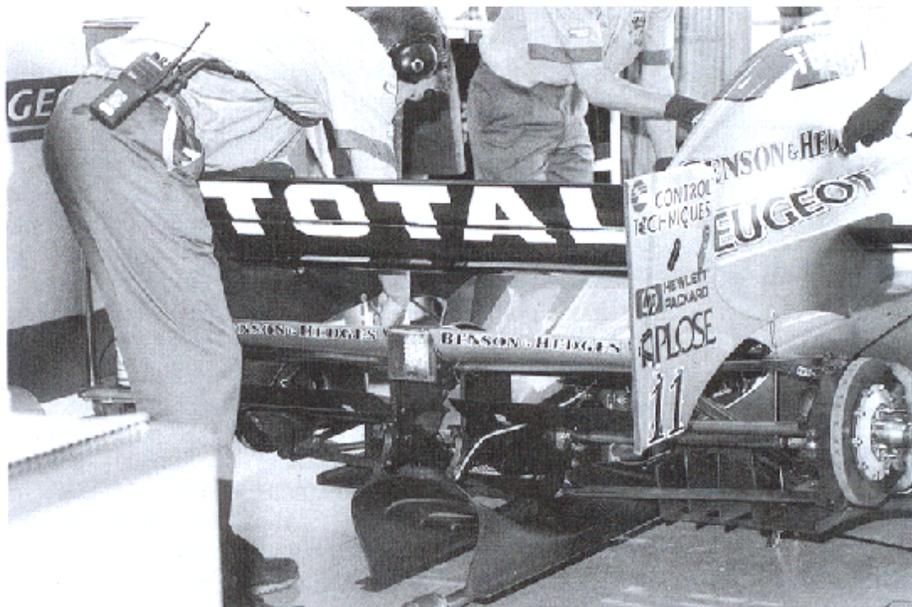
Las derivas laterales del alerón delantero son tridimensionales, con un labio horizontal situado en el borde inferior con el fin de reducir que el aire se cuele a la parte de abajo del alerón. El labio vertical en el borde trasero, junto con la parte trasera escalonada, sirven para intentar mantener el flujo fijado a lo largo del alerón en esta complicada área donde estaría el neumático. En los bordes de los flaps hay Gurneys, y el equipo puede alterar el ángulo y el tamaño de éstos para conseguir un ajuste más exacto del equilibrio aerodinámico del coche si fuese necesario. Detrás del alerón delantero se puede ver un «deflector» vertical. Estos elementos varían de un coche a otro, y algunos equipos utilizan más de uno, fijados en pareja. Su propósito es el de reducir los efectos adversos de las ruedas en el flujo de aire, y de suavizar la estela turbulenta de detrás de las ruedas delanteras. Lo que hacen es redireccionar algo del aire hacia detrás de la rueda, reduciendo de este modo la estela de ésta y, consecuentemente, la resistencia. También dirigen un flujo controlado hasta los conductos que refrigeran los radiadores. Apenas visible desde la parte delantera, pero que puede verse desde detrás, se encuentran un par de placas verticales curvadas situadas en la parte inferior del plano principal del alerón delantero, que se extienden hacia el borde trasero de los flaps. Éstas tienen esa forma para dirigir el flujo de aire hacia abajo del alerón, que va en contraposición a la tendencia natural del flujo de converger hacia dentro entre las ruedas. Uno puede pensar que esto garantiza una mejor fijación del flujo en la superficie inferior del alerón, y sumado al efecto de los «deflectores», sirve para volver a fijar el flujo detrás de las ruedas.

Moviéndonos hacia la parte de atrás del coche, la obligación de tener un fondo plano entre el borde trasero de las ruedas delanteras y el borde delantero de las ruedas traseras comienza en este coche con un divisor de flujo plano central, situado justo por delante de los conductos del radiador. La parte inferior elevada de la estructura del morro llega hasta el separador en un punto donde el flujo de aire tiene una alta presión (zona de estancamiento), y, como tal, este separador sentirá presión en su parte superior, lo contrario que en la parte de abajo donde el aire convergerá y se acelerará hacia el fondo del coche. De este modo se consigue que en esta zona se genere algo de carga. Es interesante ver cómo el separador tiene la forma para entrar en el conducto del radiador, con una extensión efectiva del propio separador que regresa al conducto. Los dos conductos son altos y estrechos.

El capó del motor es una pieza muy estilizada que, además de servir como conducto de aire hacia el motor, tiene la misión de controlar el flujo de aire que va al alerón trasero después de que haya sido perturbado por la zona de alrededor del cockpit y la cabeza del piloto. La parte trasera de los pontones, junto con el capó del motor de este coche, se estrechan hacia el centro con el fin de permitir que el aire

fluya alrededor del interior de las ruedas traseras. Dos elementos situados más atrás modifican y mejoran este efecto. La forma curvada, obviamente dirige el aire de manera más controlada alrededor de la parte inferior de las ruedas traseras, mientras que los «winglets» (aletas en los extremos), que están situados por delante de la parte superior de las ruedas traseras, tienden a desviar el aire sobre las ruedas. Estos winglets, aunque aún se usaban en 1997, se han visto reducidos en su tamaño, y sólo están permitidos en algunas áreas por delante de las ruedas traseras, con el fin de reducir su contribución a la hora de crear carga aerodinámica. Una extensión horizontal del fondo, la «carcasa», se extiende hasta el espacio situado delante de la parte inferior de las ruedas traseras, el cual funciona en la zona de alta presión que existe delante de las ruedas, generando, de este modo, algo de carga adicional prácticamente sin resistencia.

El alerón trasero es un elemento complejo que consiste, básicamente, en seis piezas. La sección superior es una pieza muy curvada con un Gurney situado en su extremo más alto. La sección central consta de dos piezas con una forma compleja, que incorpora algo de curvatura en la envergadura de su perfil, y con la correspondiente forma compleja en su elemento secundario. La luz de aviso trasera interrumpe la envergadura de esta parte, al igual que el elemento inferior. Las derivas laterales ofrecen el soporte estructural para el alerón, que se fija a la caja de cambios a través de los elementos inferiores del alerón. Existen unas extensiones hacia delante en las derivas laterales que también soportan los bordes interiores de los «winglets», y ade-



Complejo alerón trasero, y no menos complejo difusor.

más de este papel estructural, estas derivas extendidas también sirven para aislar el flujo perturbado alrededor de las ruedas traseras del alerón trasero, contribuyendo así a mantener el flujo al alerón lo más limpio posible. Los bordes verticales traseros de las derivas laterales tienen un Gurney situado verticalmente que sirve para mantener el flujo fijado a la superficie inferior del alerón. La parte trasera más alta del alerón coincide con el mismo punto de las derivas laterales, que se encuentra, por supuesto, lo más arriba y atrás que permite el reglamento. Fijese también que el borde superior de la deriva lateral se extiende horizontalmente hacia delante, lo que ayuda a evitar que el aire con alta presión de la parte superior del alerón se escape, lo que haría que se perdiera carga aerodinámica.

La complejidad de los difusores traseros también puede verse claramente. Las partes exteriores, que, al igual que todas las partes del difusor de un Fórmula 1, están limitadas a comenzar en el borde delantero de las ruedas traseras, tienen la limitación de acabar en la línea del eje trasero. Por tanto son extremadamente cortos (330 mm), y sin embargo están bastante inclinados. Cada lado tiene un par de canalizadores laterales para dirigir el flujo en la dirección deseada. El difusor central, que puede extenderse hasta el alerón trasero (500 mm) por detrás de la línea del eje, se curva más gradualmente hacia arriba y hacia atrás. Tiene una forma redondeada, con labios en los bordes inferiores externos para evitar la entrada de aire por los lados. Existen unas ranuras en el «techo» del difusor central para permitir que el aire salga por esta zona con el fin de intentar mantener el flujo fijado, un factor absolutamente crucial para la generación de carga aerodinámica en el fondo de esta clase de coches.

En el momento de acabar este libro, parece que la FIA tenía la intención de introducir algunos cambios importantes en la Fórmula 1 para la temporada de 1998 en un intento de reducir las velocidades y, posiblemente, mejorar las oportunidades de adelantamientos. Además de añadir dibujo a los neumáticos, para reducir el nivel de agarre y con ello la velocidad de paso por curva, los coches serán aproximadamente unos 200 mm más estrechos. La reducción en el ancho tendrá varios efectos secundarios, pero aerodinámicamente significará la reducción del área frontal, lo que permitirá que las velocidades máximas sean mayores, y puede también significar que se genere, por lo menos al principio, una menor cantidad de carga aerodinámica, ya que será más difícil hacer llegar el aire limpio a los elementos aerodinámicos. Todavía queda por ver si se conseguirá lo que se espera a largo plazo. Desde luego, está causando que se deba dedicar mucho más tiempo al diseño y al desarrollo, y, al igual que con todos los cambios importantes, hay opiniones para todos los gustos sobre cuáles serán los resultados que se obtendrán. Sólo el tiempo dirá.

La atención al detalle es obviamente la palabra clave en la Fórmula 1, al igual que lo es en la otra categoría de monoplazas más importante del mundo, la CART, o Indycar como se la conocía hasta 1996. Ya que la CART es una fórmula con elección de chasis libre y su competidora, la IRL, tiene sólo dos opciones de chasis para elegir, hablaremos de la CART debido a su mayor interés técnico.

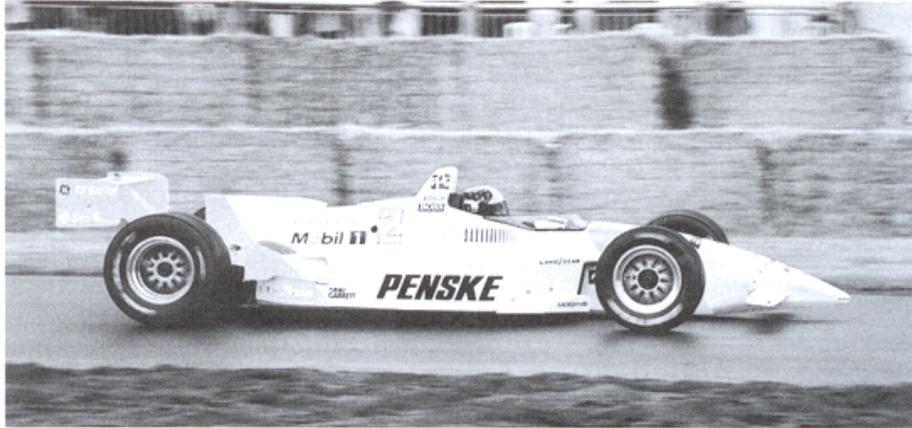
## CART

La gran diferencia entre la CART y la Fórmula 1, aerodinámicamente hablando, es que la CART todavía permite el uso de túneles en el fondo para generar carga aerodinámica. Pero debido a la dispar naturaleza de las carreras de la CART, existen cuatro categorías en las que los monoplazas deben ser configurados: óvalos rápidos, óvalos cortos, circuitos urbanos y circuitos normales, cada uno con sus requerimientos aerodinámicos específicos. Existen además ciertas reglas para cada diferente circuito, lo que garantiza, por ejemplo, que sólo se puedan ver alerones traseros de un solo elemento con una caja de 305 mm por 38 mm en los óvalos rápidos, o que en los circuitos normales y en los óvalos cortos sólo se pueda utilizar un alerón de dos elementos con una caja de 356 mm por 203 mm, con un extremo trasero inferior con un radio de 200 mm. Además, para 1997, se introdujo una nueva regla para reducir las velocidades en los Superspeedways (óvalos rápidos), que consistió en la continuidad del mismo fondo, pero con la inserción de un bloque triangular que reducía el ancho de las salidas de los túneles. Se dijo que esta medida redujo en un 20-25 % la cantidad total de carga aerodinámica.

La configuración general de un coche de la CART tiene algunas similitudes con los de Fórmula 1, pero también algunas diferencias. Los alerones delanteros deben ir montados de forma conjunta con el morro, y los morros elevados no están permitidos, por lo que los alerones delanteros dobles son la norma, como se puede ver en la foto del Penske PC25 de 1996 (con su configuración para un óvalo rápido en el trazado de la subida de Goodwood). Sin embargo, al igual que en la Fórmula 1, la parte central de los alerones delanteros está algo elevada para permitir un mejor flujo de aire a los radiadores y el fondo, y para reducir la sensibilidad a la altura con respecto al suelo. Los flaps de alerón delantero (no utilizado en la configuración para los óvalos rápidos) son simétricos, como en la Fórmula 1, con una cuerda más larga en sus extremos, lo que ayuda a controlar el área turbulenta de las ruedas.

Los deflectores no están tan presentes en la CART, probablemente porque los pontones empiezan mucho más adelante, y ayudan a controlar el flujo detrás de las ruedas sin la ayuda de ningún otro elemento. Las entradas a los túneles en los diferentes chasis utilizados emplean varios métodos para llevar el aire a los propios túneles, mientras que las entradas de los radiadores son bastante pequeñas estos días. Debajo de los pontones, el perfil del túnel viene dictado por el reglamento en lo que se refiere al área máxima del difusor (las dimensiones máximas para el difusor son de 914 mm de ancho y 152 mm de alto), así como a su longitud total. La forma exacta depende de las pruebas en el túnel de viento de cada constructor. Los túneles están curvados como para dirigir la salida del difusor al espacio entre las ruedas traseras y la caja de cambios, aunque los túneles no pueden extenderse más allá de la línea marcada por el eje trasero.

La superficie superior de los pontones contiene los conductos de salida de aire de los radiadores, junto con algunos winglets, similares a los de los Fórmula 1, por delante de las ruedas traseras. Los divisores de flujo de la carcasa situados por delante de la parte inferior de las ruedas delanteras mantiene ahí la zona de alta presión. Los winglets se han vuelto un elemento de uso común, para añadir algo



El Penske PC25, con una configuración para un óvalo rápido, no muy ideal para una pista mojada.

de carga aerodinámica y para controlar el flujo alrededor de las ruedas y el alerón trasero. Éstos son un poco más eficientes que las simples «rampas» que los precedieron.

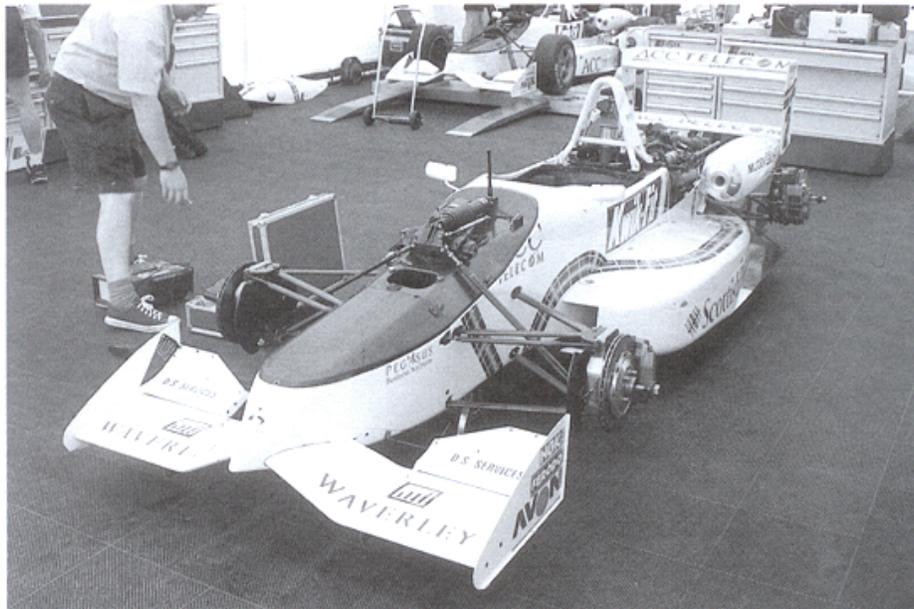
Una faceta particularmente interesante a la que los ingenieros de la CART parecen dar más importancia que los de la Fórmula 1 es la configuración del coche para rodar en el tráfico. Las carreras en los óvalos crean circunstancias donde los coches tienen que ser capaces de rodar pegados unos a otros, adelantarse, correr cerca de los muros y todo sin salirse de la pista. Mientras que los pilotos de la CART, al igual que los de Fórmula 1, se quejan a menudo de la falta de adherencia de la parte delantera del coche cuando ruedan justo por detrás de otro vehículo, asumen como parte de su trabajo el poner el coche a punto para minimizar este efecto, con el fin de poder adelantar a los demás. Los ingenieros de la CART, obviamente, juegan un papel importante en este proceso. Este método de trabajo de pilotos e ingeniero no está ausente en la Fórmula 1, pero, dada la incapacidad de los coches de Fórmula 1 de adelantar a algo que vaya más rápido que un camión, o bien el problema es más grave, o hay algo que no funciona. ¿No tienen los pilotos de Fórmula 1 la habilidad de adelantar? ¿Son incapaces de poner el coche a punto para que pueda adelantar a otros? ¿Son tan sensibles los coches cuando ruedan uno pegado al otro? ¿Son los circuitos los culpables? Sea cual sea la causa del problema, tanto aerodinámica como de otra índole, la CART ofrece más adelantamientos que la Fórmula 1, así que quizá sus propuestas aerodinámicas merecerían la pena de ser adoptadas.

Existen tantas categorías de coches con las ruedas descubiertas que nos tendremos que limitar a los ejemplos más interesantes. Espero que nadie se sienta ofendido por la omisión de su categoría.

## Fórmula 3

Limitada no sólo por las reglas que especifican los perfiles de los alerones traseros, y un fondo plano escalonado similar al de Fórmula 1, la Fórmula 3 está también limitada por lo restringidos motores utilizados en la categoría. Aunque las cifras de potencia se elevaron de 175 CV a alrededor de los 200 CV en 1997 al incrementar el diámetro de la entrada de aire de 24 mm a 26 mm, los coches de Fórmula 3 necesitan evitar la resistencia aerodinámica a toda costa, lo que significa que no pueden utilizar alerones con ángulos muy pronunciados. Las reglas especifican que se puede utilizar un máximo de tres elementos en el alerón trasero, y esto se manifiesta en un plano superior de dos elementos y uno inferior de un solo elemento. El ángulo de instalación es regulable, y depende del equipo y de los ingenieros el establecer una configuración óptima para cada circuito. Los alerones delanteros cuentan con dos elementos, con flaps asimétricos montados sólo sobre la parte exterior de la envergadura del ala.

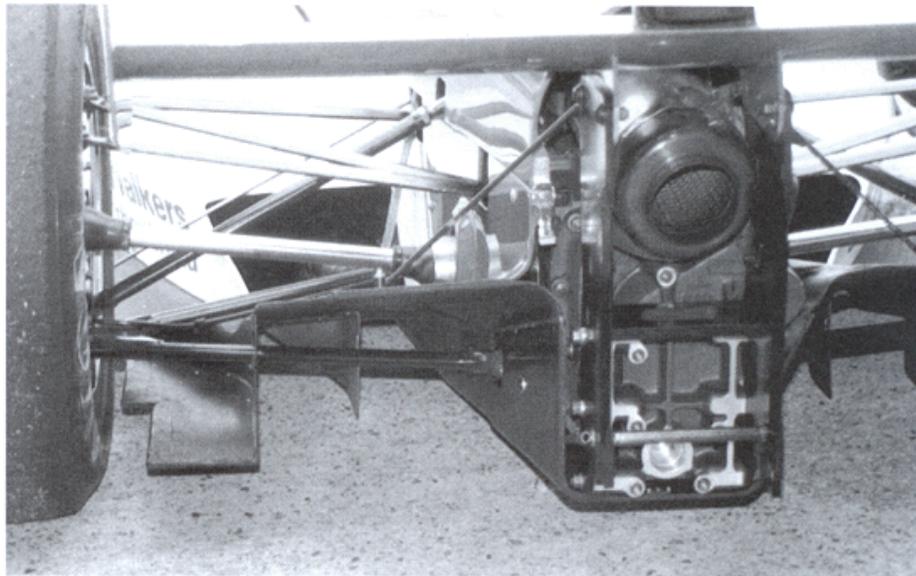
Uno de los más exitosos coches de Fórmula 3 es el italiano Dallara, y no es una coincidencia que la compañía lleve a cabo las pruebas en su propio túnel de viento, capaz de albergar modelos de un 25 % del tamaño real. El Dallara incorpora un morro elevado, con el alerón delantero montado sobre la estructura del propio morro. La parte central de los alerones está inclinada hacia abajo para conseguir un ángulo de diedro negativo y así permitir el paso de aire al centro del fondo. El monocasco es es-



El Dallara F397.

trecho y muy afilado, y los pontones están lo más bajo que pueden estar, dado que los radiadores, que están colocados casi tumbados, necesitan estar algo inclinados para que el flujo de aire sea efectivo. La parte superior de la carrocería se adapta perfectamente alrededor del motor y de la transmisión, mientras que el capó motor se encuentra situado bastante bajo. El plano superior del alerón trasero está fijado a través de las derivas laterales a un plano inferior de un solo elemento, que se fija a la caja de cambios mediante dos placas rígidas. El fondo escalonado entre los neumáticos comienza con un pequeño separador situado bajo el piloto, y se extiende hacia fuera por debajo de los pontones, por delante de las ruedas traseras para controlar las altas presiones en esa zona, igual que lo hacen en la Fórmula 1 o en la CART. Es interesante denotar que el borde inferior de la parte delantera de los pontones es redondeado, mientras que la parte trasera es cuadrada, y continúa hacia atrás del mismo modo que el separador situado delante de las ruedas traseras. Lo que esto sugiere es que el aire es acelerado bajo la parte inferior de los pontones, y además se evita que fluya lateralmente hasta la zona del fondo situada más atrás.

Los coches de Fórmula 3 utilizan unos difusores con formas bastante complejas, aunque nunca tanto como los de un Fórmula 1. El difusor no puede comenzar su inclinación hacia arriba hasta que se encuentra en la misma línea que la parte delantera de los neumáticos traseros, y está limitado en su extensión hacia atrás de un modo similar a la Fórmula 1, restringiendo que las partes exteriores pasen de la línea del eje, mientras que la sección interior no puede sobrepasarlo en más de 500 mm. Para dirigir el flujo de aire dentro del difusor se utilizan unos canalizadores curvados



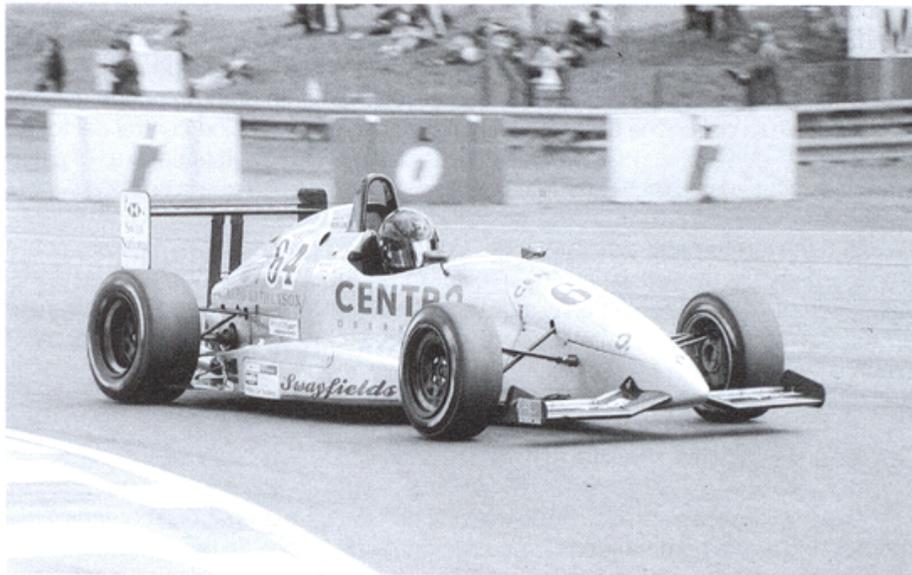
Un difusor de un Fórmula 3, con canalizadores.

situados verticalmente. La carga aerodinámica en el fondo es un factor crítico en lo referente a las prestaciones de un Fórmula 3, y el menor de los cambios en la altura del coche altera de manera radical el equilibrio aerodinámico y el agarre general de un monoplace.

En 1995, el reglamento obligó a utilizar el fondo escalonado, siguiendo los cambios efectuados en la Fórmula 1 y la Fórmula 3000. Dallara descubrió que, dependiendo de la configuración del coche, se perdía entre un 17 (en los circuitos rápidos) y un 24 (en circuitos lentos), por ciento de la carga aerodinámica total debido a la utilización del fondo escalonado. Sin embargo, se obtuvo un gran beneficio en lo referente a la sensibilidad con respecto a los cambios en la altura y en el cabeceo, y los coches, aunque pasaban más despacio por las curvas, eran más predecibles. Y es que antes de este cambio en el reglamento, eran extremadamente sensibles.

## Fórmula Renault

El aspecto más interesante de esta categoría es que se trata de una fórmula en la que pueden elegirse varios chasis, con seis marcas diferentes compitiendo en el campeonato de Inglaterra. Esta categoría, además cuenta con varios campeonatos a lo largo de toda Europa, así como de una Eurocopa Intercontinental. Como tal, existen muchas variedades para que los diseñadores creen su propio paquete aerodinámico específico, y existen muchas concepciones diferentes. Los coches cuen-



El Tatuus Rc97 de Fórmula Renault, un diseño influenciado por Dallara.

tan con un motor de 2 litros de inyección procedente del Renault Laguna, que alcanza unos 170 CV, por lo que, una vez más, la resistencia aerodinámica es crucial. En 1995, el año del comienzo de la categoría, el fabricante italiano Tatuus produjo un diseño ultra compacto, muy influenciado por el Dallara, que iba a ser el mejor monoplaza durante los dos años siguientes. Aunque perdió el título a favor de Van Diemen, Tatuus arrasó en el campeonato europeo de 1996 y en los certámenes nacionales de Inglaterra, Alemania y España, con un chasis que apenas fue modificado.

Una gran parte del éxito del Tatuus era debido a lo compacto de su diseño. El coche estaba unos 240 mm por debajo de la anchura máxima permitida, y el chasis central fue construido lo más estrecho posible, y las medidas venían dictadas por la célula de combustible y el arco de seguridad. Los radiadores se colocaron lo más planos posible, y los pontones, muy bajos, similares a los del Dallara, ayudaron a reducir el área frontal.

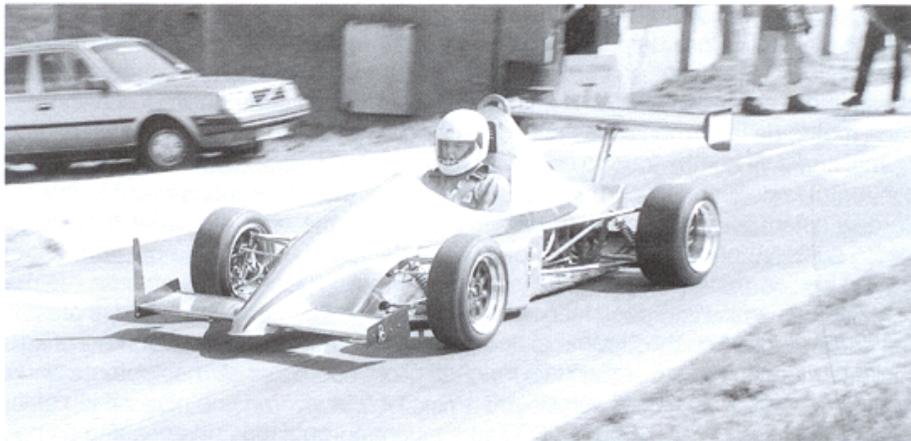
Esta categoría tiene un alerón trasero de control, con un diseño de dos elementos con unos perfiles bastante especiales. Éste controla la cantidad total de carga aerodinámica que puede ser generada, ya que no tendría sentido generar más carga en la parte delantera si lo que se quiere conseguir es un equilibrio aerodinámico. El alerón delantero debe tener un solo elemento, con unas dimensiones máximas limitadas, y unos bordes de ataque y de fuga que deben ser continuos y paralelos. Esto permite a los diseñadores algo de libertad a la hora elegir el que consideren será el mejor perfil, y en efecto, cada marca tiene su propio diseño. La mayoría de los coches incorporan el alerón colgante sencillo debajo del morro, y aunque éste fue creado por Tatuus en 1997, la mayoría de los pilotos que utilizan este monoplaza han optado por seguir utilizando el alerón delantero con diedro negativo correspondiente al modelo de 1996.

El fondo tiene un diseño con un plano escalonado, pero los difusores no están permitidos, y esto limita claramente la cantidad de carga que puede generarse en esta zona. Sin embargo, el área plana, que es relativamente grande, puede generar carga si la altura del coche es pequeña, y normalmente la sección central del fondo se encuentra a 10-15 mm en la parte delantera y 25-30 mm en la trasera. El plano exterior escalonado es, debido al reglamento, 50 mm más alto que la sección central («plano de referencia»).

El camino marcado por Tatuus ha sido seguido por las otras marcas, sobre todo por Van Diemen, quien en 1997 produjo un fabuloso diseño, igual de compacto, con su RF97 FRS, que en el momento de escribir esto comenzaba a alcanzar al Tatuus en términos de competitividad, y es muy probable que luchara por el campeonato inglés.

## **Coches de montaña y de sprint**

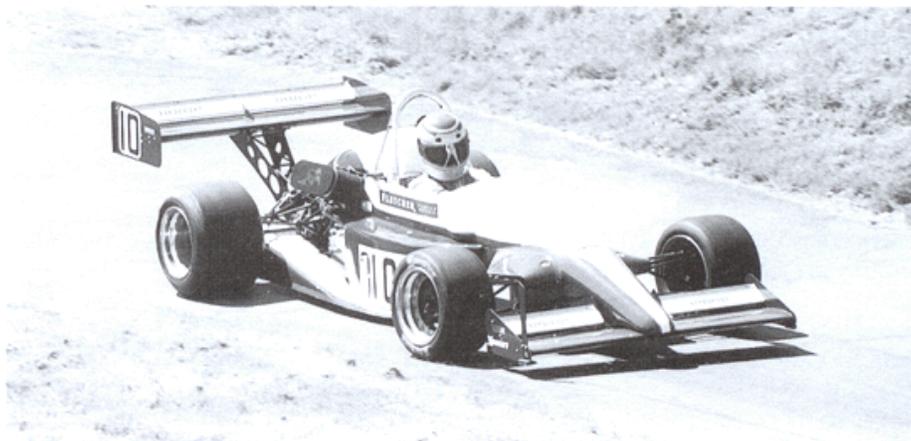
Las así llamadas categorías de «velocidad» de las carreras de montaña y de sprint de Inglaterra comprenden una amplia gama de clases de monoplazas, separadas solamente de acuerdo con la capacidad de su motor. Las reglas en lo referente a la carrocería y la aerodinámica son idénticas en cada clase, y, con algunas restric-



El Jedi es un pequeño coche muy efectivo en el campeonato británico de montaña.

ciones, la categoría es quizás una de las últimas en permitir total libertad a los diseñadores e innovadores para que prueben sus ideas y conceptos.

Las capacidades para los Campeonatos Nacionales de Montaña se dividen, por ejemplo, en 600, 1.100, 1.600 y 2.000 c.c., y las dimensiones y las ayudas aerodinámicas tienden a progresar de manera lógica de acuerdo con el incremento de potencia. Los coches con motores de motocicleta ultracompactos y muy ligeros son los que prevalecen en las dos categorías de menor cubitaje, y los elementos inductores de carga aerodinámica consisten generalmente en alerones con poca curva-



El Pilbeam MP62 domina la división de 2 litros del campeonato británico.

tura y poco ángulo de ataque, a menudo explotando las envergaduras máximas permitidas de 1.500 mm por delante de las ruedas delanteras, y de 1.400 mm por detrás. No parece haber una opinión mayoritaria en lo referente a si es mejor utilizar alerones de uno o dos elementos, ya que dependerá de la potencia que desarrolla cada motor, de las dimensiones del coche y de la naturaleza de los circuitos que se visitan, como ya hemos tratado en este libro con anterioridad. Algunos de los coches con motores pequeños incorporan un panel difusor trasero, y curiosamente, a pesar de que están permitidos, pocos utilizan pontones que aprovechen al máximo el efecto suelo. Aunque algunas estructuras pueden añadir peso, una cuidadosa selección de los materiales reduciría esto al mínimo, y podría proporcionar mucha carga aerodinámica con poca resistencia adicional. Habiendo dicho esto, las prestaciones de algunos coches, como el Jedi y el OMS, con poca explotación del efecto suelo, han hecho pasar vergüenza a muchos pilotos con coches más potentes y de mayor capacidad, incluido el autor.

Las categorías de 1.600 y 2.000 se encuentran pobladas de coches más potentes, y lo normal es que utilicen perfiles de alerones más radicales, con una clara mayoría de alas de dos elementos e incluso de tres elementos en la categoría de 2 litros. La regla del alerón trasero colgante, que permite que un alerón se extienda hasta 1.500 mm por detrás del eje trasero, también es más explotada en esta categoría. El alerón trasero puede beneficiarse de un aire más puro cuanto más lejos esté de las ruedas.

Los pontones con efecto suelo son más comunes en esta clase, ya que no sufren una penalización inherente en lo referente al área frontal y la resistencia, dado que la mayoría de los coches necesitan incorporar un sistema de refrigeración eficaz para soportar las temperaturas que alcanzan los motores más potentes. Como ejemplo, el Pilbeam MP62 quizás ejemplifica mejor que ninguno el coche de mon-



El Gould-Ralt, con un fondo plano y difusor derivados de la Fórmula 3, un alerón delantero similar a los de Fórmula 1, y uno trasero de tres elementos.

taña de 2.000 c.c, con alerones de dos elementos tanto delante como detrás, y túneles de efecto suelo dobles que se extienden más allá de la suspensión trasera. Los coches incorporan normalmente motores que alcanzan los 300 CV, lo que, en la mayoría de los trazados que se visitan, les permite correr con ángulos de incidencia grandes.

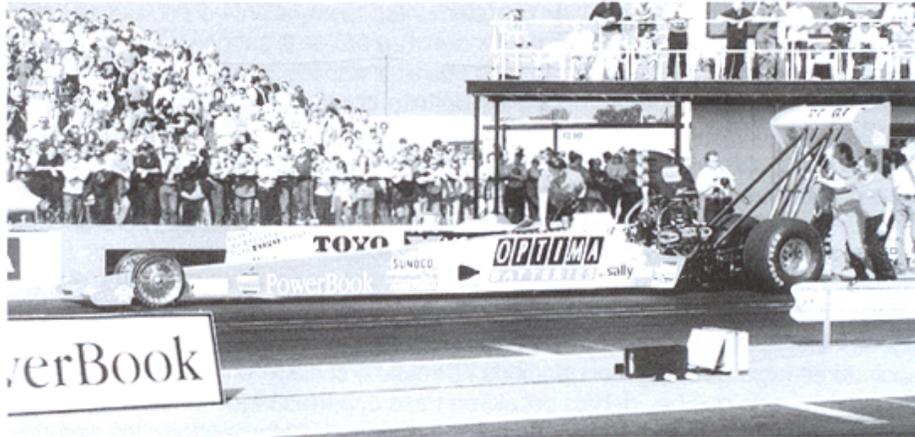
La clase con capacidad ilimitada está dominada por coches con antiguos motores de Fórmula, algunos con su capacidad aumentada y con unas cantidades de potencia prodigiosas. Por esto, la resistencia aerodinámica es algo que no preocupa demasiado, y lo más importante es encontrar la mayor carga aerodinámica, y para ello se utilizan alerones muy inclinados, con mucha curvatura y compuestos por varios elementos. Los alerones traseros suelen ser por lo menos de tres elementos, y algunos monoplazas utilizan también dobles planos inferiores. La necesidad de silenciadores (algo que no preocupa en la Fórmula 1) suele rellenar una parte importante del espacio que hay debajo del alerón trasero, pero aunque esto afecta al flujo de aire de manera adversa, debe ser aceptado como tal. Hasta ahora, los alerones delanteros han sido de dos elementos, aunque poco a poco van aumentando su complejidad en busca de un coche que pueda ser equilibrado cuando se rueda con mucho alerón trasero.

El efecto suelo es generalmente, aunque no universalmente, explotado, ya que los pocos kilos adicionales de los pontones y el fondo no significan nada comparados con el agarre y la estabilidad que se obtiene en las partes más rápidas de los circuitos, como en la curva a izquierdas en el final de trazado de Gurston Down, en Inglaterra, donde los más valientes pasan a más de 200 km/h (en un carretera de 3,5 metros de anchura). Los ubicuos chasis Pilbeam MP58 y MP72 utilizan túneles convencionales a ambos lados del monocasco, mientras que el chasis Gould-Ralt, utilizado anteriormente en la Fórmula 3, continúa usando el fondo plano y el difusor de su progenitor.

## Otras categorías

No parece justo hablar sólo de algunas categorías más, pero para hacer justicia a todas las modalidades del mundo del motor necesitaríamos varios libros más, y simplemente no tenemos espacio suficiente. Pero sería una grave falta omitir las carreras de dragsters y de stock cars, al igual que sus primos de los óvalos.

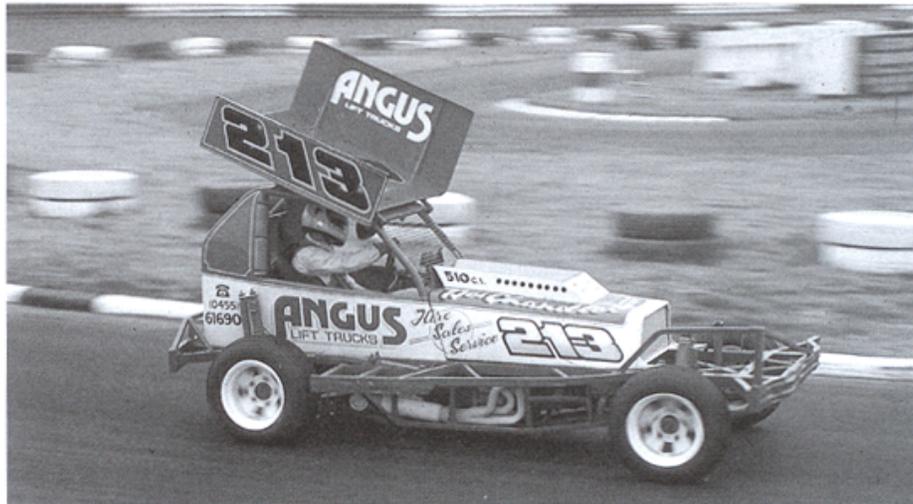
Los dragsters, especialmente en las clases como los Top Fuel, son máquinas increíblemente rápidas, construidas con una sola meta: recorrer 400 metros en el menor tiempo posible. Con una cantidad de potencia casi increíble, que hace llegar una onda de choque al espectador cuando el piloto pisa el acelerador y lanza su misil por la pista, la carga aerodinámica juega un papel importante a la hora de mantener la tracción y la estabilidad. Estos vehículos alcanzan los 160 km/h en un abrir y cerrar de ojos, y alrededor de unos 480 km/h al final de los 400 metros que recorren, por lo que se puede conseguir una gran cantidad de carga. Se utilizan unos enormes alerones de tres elementos colgados encima y detrás de las ruedas traseras y con el fin principal de evitar que el coche despegue del suelo, se colocan unos alerones relati-



Las velocidades altas significan grandes cantidades de carga aerodinámica para los dragsters.

vamente pequeños en la parte delantera, donde su pronunciado efecto de palanca puede contrarrestar las fuerzas sustentadoras.

Las fuerzas generadas por los grandes alerones traseros son sustanciales a velocidades de 480 km/h, sólo hay que mirar el tamaño y el perfil del alerón para estimar que se puede llegar a generar una cantidad de más de 2.200 kg de carga aerodinámica. No es de extrañar que las estructuras tubulares de sujeción sean

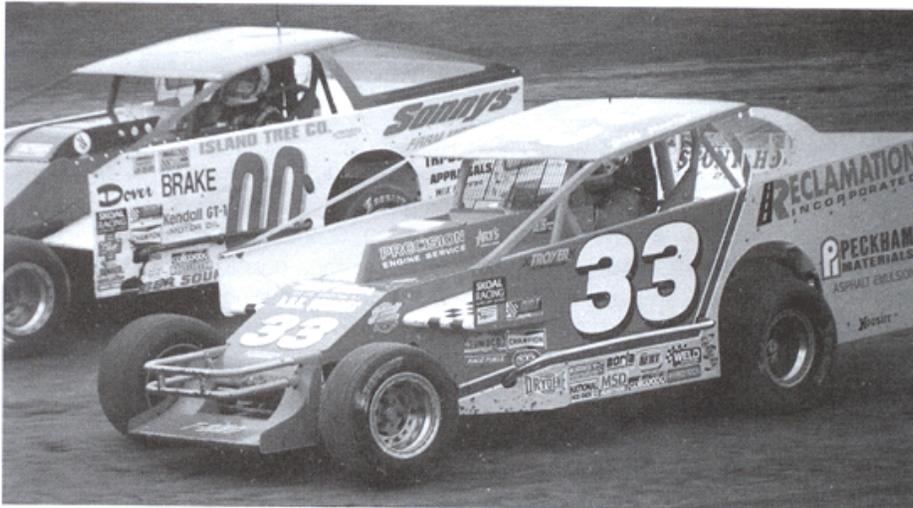


Los alerones de los stock cars sólo están disponibles en un tamaño, muy grande y muy inclinado. (John Colley)

tan contundentes. Por otra parte, la resistencia generada a esa misma velocidad también tiene que ser enorme, utilizando gran parte de los más de 5.000 CV disponibles.

Los stock cars también saben bien de los beneficios de la carga aerodinámica, a pesar de las relativamente limitadas velocidades máximas que se alcanzan en los estrechos circuitos ovals. En efecto, estas velocidades limitadas significan que prácticamente puedan olvidarse de la resistencia, e intentar sólo preocuparse de obtener la mayor cantidad de carga posible. Esto normalmente se consigue mediante el uso de alerones de un solo elemento, con una relación de aspecto baja, muy inclinados, con una gran área, y situados justo por encima del compartimento del piloto. Es altamente probable que la mayoría de estos alerones estén inclinados mucho más allá del ángulo de pérdida, pero a pesar de esto se nota una clara mejora en las prestaciones. Un alerón razonablemente eficiente con las dimensiones típicas para un stock car debería ser capaz de generar 45 kg de carga a 80 km/h, y cuatro veces ese valor a 160 km/h, aunque es bastante improbable que estos coches alcancen esas cifras. Una vez más, si fijar la mesa de cocina al techo del coche ayuda a que éste vaya más rápido, entonces merece la pena hacerlo.

Por el contrario, los Dirt Modifieds (vehículos que corren sólo sobre tierra) con motores V8 de 800 CV, tienen especialmente prohibido el uso de alerones, y sólo pueden utilizar la forma de su carrocería para generar carga aerodinámica. Pero de nuevo, hacen todo lo que está en sus manos para conseguir la mayor carga posible, utilizando paneles frontales escalonados y perfiles con formas especiales, en un intento de conseguir poder acelerar antes en los óvalos de tierra en los que alcanzan los 160 km/h.



Los morros escalonados y sus perfiles en cuña crean algo de carga aerodinámica en estos vehículos. (Bob Perran)

Esto completa el breve resumen de cómo consiguen generar su carga aerodinámica algunas de las más destacadas categorías de vehículos con las ruedas descubiertas. En la siguiente sección echaremos un vistazo a los modelos con las ruedas cubiertas.

## **Coches con ruedas cubiertas**

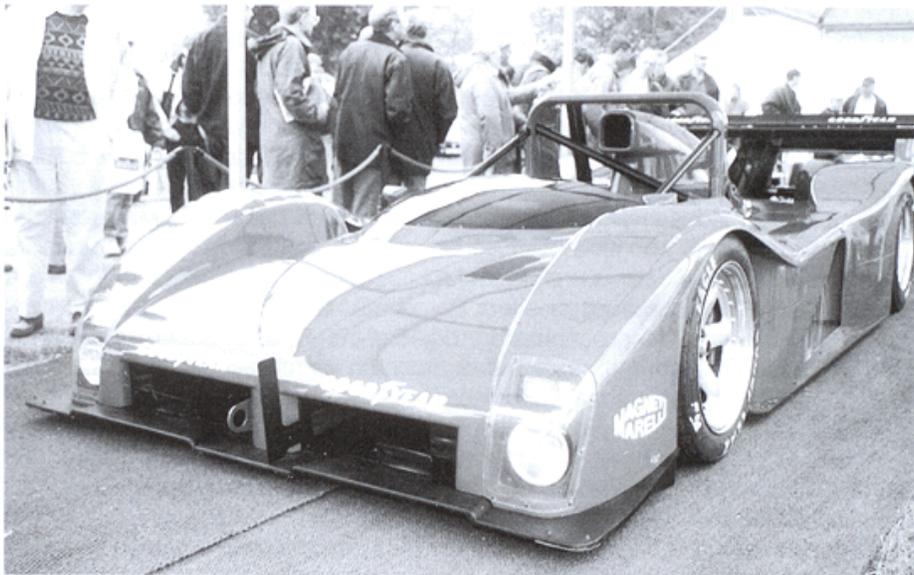
Los coches con las ruedas cubiertas son, por norma, vehículos que generan mucha menos resistencia, pero en algunos casos son, o al menos eran, capaces de generar cantidades prodigiosas de carga aerodinámica, con relaciones sustentación/resistencia mucho más eficientes que las conseguidas por un monoplace. Sin embargo, existen muy pocas categorías que permitan la libre explotación de la aerodinámica, y los coches que una vez produjeron las relaciones sustentación/resistencia más grandes, tales como el Jaguar XJR, los Porsche del 956 a 962, y otros de los que ya hablamos en el capítulo 5, capaces de conseguir una relación de sustentación/resistencia el doble de grande que un Fórmula 1, son una cosa del pasado. A pesar de todo, es interesante e instructivo analizar los diseños de hoy en día para ver cómo puede conseguirse carga aerodinámica a pesar de los reglamentos que intentan hacerla desaparecer. Naturalmente, una categoría tan extensa como «coches con ruedas cubiertas» incluye a los coches de sport y a los GT al igual que a los coches de carreras basados en turismo de calle.

## **Coches de sport y GT**

A pesar de que ya no existe un campeonato del mundo para sport prototipos, aún existen categorías en las que el término sport prototipo o coche GT, si tomamos la definición como «coches de competición con ruedas cubiertas, con dos asientos, y construido especialmente para correr», todavía es válido. La categoría americana conocida como Professional Sports Car Racing, antes llamada IMSA, es una de éstas, y por supuesto hay una categoría en las 24 horas de Le Mans específicamente para los sport prototipos. Otros campeonatos en los que compiten coches de GT incluyen las inglesas tales como la Supersports 200, varios campeonatos regionales de GT como el Castle Combe, y las carreras de montaña donde se utiliza el término de «fórmula libre». El campeonato del mundo actual es para coches de GT, basados en coches de calle, aunque si nos creemos algunos informes de la prensa, algunas marcas construyen antes el coche de carreras en el que se basará el de calle. Sea como sea, McLaren, Porsche y Mercedes han afrontado el desafío de los GT, seguidos de Lotus, Panoz, Lister y Chrysler, por lo que existe un serio apoyo de las marcas, y aunque la carga aerodinámica está restringida por el reglamento, los trucos aerodinámicos abundan. Vamos a comenzar echando un vistazo a un coche construido para el campeonato IMSA americano por el más famoso de los fabricantes europeos: el Ferrari 333SP de 1996.

## IMSA/Coches de sport

El 333SP, fotografiado en el Festival de la Velocidad de Goodwood, es un prototipo bastante típico de esta época en lo referente a su aerodinámica, con su habitáculo abierto, aunque algunos prototipos, entre los que destaca el TWR Nissan que corrió en Le Mans en 1997, son cerrados. En la parte delantera, el Ferrari tiene un pequeño divisor de flujo con muy poca distancia con respecto al suelo, aunque observe que las dos partes del divisor a cada lado de la línea central tienen algo más de distancia al suelo para evitar el completo bloqueo del flujo de aire cuando el coche cabecea, con lo que se mantiene así el flujo constante. El divisor está explotando la zona de alta presión que se forma delante de la sección del morro y la entrada del radiador. Las pequeñas placas de hundimiento que se extienden desde el divisor a los lados del morro imitan el perfil del fondo del divisor en la parte de delante de las ruedas, lo que hace que funcionen como un minidivisor. Las propias placas de hundimiento, al estar inclinadas hacia el flujo de aire, generan algo de carga aerodinámica, y además benefician la creación de vórtices en la parte inferior del coche, lo que ayuda a evitar que el aire se escape por los lados. Los orificios situados en la carrocería encima de las ruedas sirven para permitir que el aire con alta presión abandone la rueda, y vuelve a unirse al flujo en la zona de baja presión encima de los cubrerruedas curvados, lo que sirve para reducir la magnitud de esa zona de baja presión con la consiguiente reducción de la sustentación.



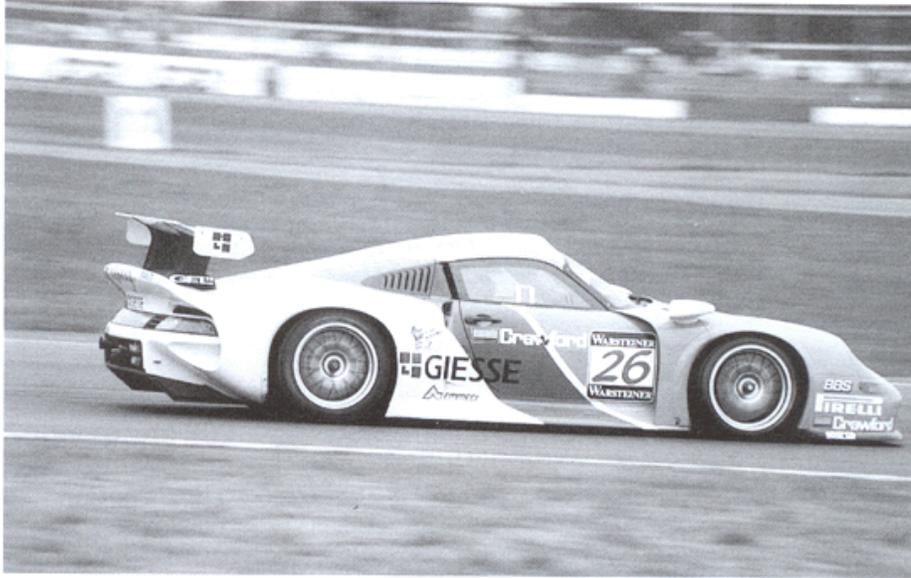
El Ferrari 333SP de la categoría anteriormente IMSA.

Más atrás, la carrocería se curva alrededor de las ruedas traseras, antes de volver a bajar en la terminación trasera. Esta curvatura hacia abajo es común en todos los prototipos de hoy en día, y sirve para minimizar el área del coche, lo que reducirá la estela lo más posible. Éste es un aspecto crucial en las carreras de largas distancias, donde el consumo de gasolina es un factor clave. Por detrás de la cola, se sitúa el alerón trasero, con una relación de aspecto alta, y con la máxima envergadura y cuerda que permite el reglamento, montado sobre dos placas sólidas, y que suele llevar ángulos de ataque no muy pronunciados por el bien de reducir la resistencia y con ello el consumo. Debajo del coche, el fondo plano obligatorio se extiende desde el eje delantero hasta el eje trasero, y los difusores traseros están expresamente prohibidos, aunque la parte del fondo por delante de la línea del eje delantero está libre de reglas. El ángulo de fondo plano también es libre, lo que permite que se consiga generar algo de carga aerodinámica en esa parte. Otros detalles interesantes incluyen el perfil de la carrocería justo por detrás de las ruedas delanteras, que sirve para ayudar a conducir el aire a los radiadores. Observe los dos pequeños divisores en la parte inferior de estas áreas, que servirán para aislar el fondo del flujo turbulento que se crea alrededor de las ruedas, así como para beneficiarse de las diferencias de presión que existen por arriba y por debajo de él. El 333SP ha sufrido muchos pequeños cambios desde su chasis 01, en la foto, incluyendo un divisor de flujo que no tiene la parte central elevada en su borde de ataque. Sin embargo, el diseño general ha mantenido su forma original.

## GT FIA

En la categoría de GT de la FIA, que forma el actual campeonato del mundo, las restricciones del reglamento limitan la aerodinámica, pero, como en casi todas las demás especialidades, no pueden evitar que los diseñadores utilicen todas sus habilidades para encontrar la carga aerodinámica tan codiciada. Las tres marcas más importantes que compiten en este campeonato, el McLaren BMW F1 GTR, el Porsche 911 GT1 y el Mercedes CLK GTR son, por lo menos superficialmente, parecidos en su aspecto, aunque con diferencias en muchos detalles. El McLaren es el que más tiempo lleva, y el coche de 1997 era la tercera evolución de diseño básico. Sin embargo, hay que decir que el nuevo McLaren con la parte trasera alargada fue introducido en 1997 como respuesta al Porsche 911 GTR, que hizo su debut en Brands Hatch, Inglaterra, en septiembre de 1996. El Porsche subió las apuestas desde el punto de vista de la aerodinámica con su parte trasera extendida, y por tanto un difusor trasero de mayor tamaño, y el McLaren, bastante más corto en comparación, no tuvo más remedio que imitarlo. Mientras tanto, Mercedes había construido su primer coche de GT después de los prototipos con motor Sauber que tan poco éxito tuvieron hace un par de años, y éste también incorporaba la cola más larga introducida en la categoría por Porsche.

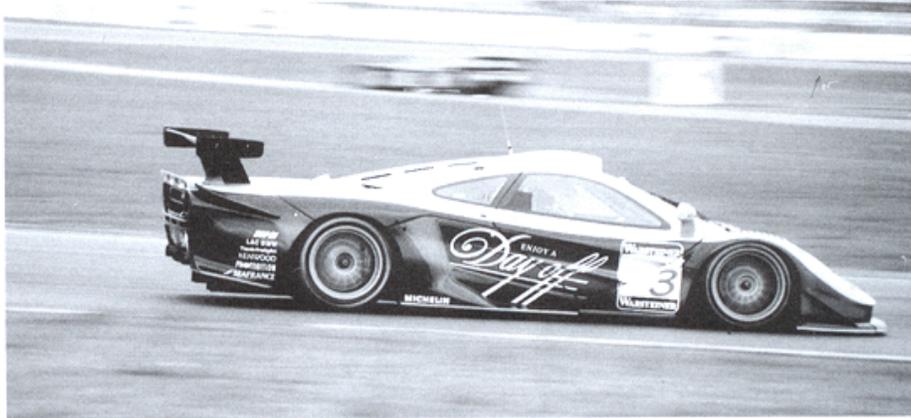
La parte delantera del McLaren es ahora más larga y menos profunda que la del diseño original, con el fin de equilibrar la carga aerodinámica trasera adicional, pero aún incorpora un conjunto de divisor de flujo bastante sencillo. Sin embargo, debajo



El Porsche 911 GTR subió las apuestas aerodinámicas en las carreras de GT.

se esconde un complejo sistema de difusor delantero, con paneles intercambiables para poder ajustarlo. Las placas de hundimiento se extienden hacia arriba a lo largo de los lados de la sección del morro, y están disponibles en varios tamaños para conseguir una puesta a punto más afinada. Las ranuras situadas en la parte delantera de la carrocería ayudan a dejar escapar el aire con alta presión de esa zona, y también frenando el flujo de alta velocidad, inductor de sustentación que se crea sobre la parte superior. El pequeño ángulo desde el borde de ataque del morro hasta el techo, y la curva hacia arriba desde el techo hasta la cola, garantizan un coeficiente de penetración muy bajo comparado con la forma del primer vehículo, estando entre un 0,50 y un 0,60, dependiendo de su configuración. La cola alargada sigue hacia arriba en forma de spoiler, lo que ayuda a crear una zona de alta presión en la bandeja trasera, haciendo que este spoiler se proyecte por los lados formando unos strakes inclinados se consigue crear más carga aerodinámica. Por encima de la cola, con una separación aproximada de la dimensión de una cuerda, se encuentra el alerón de un solo elemento. Debajo del coche, el fondo plano obligatorio puede ser suplementado con un difusor trasero, y esta libertad la explota el McLaren al igual que en los otros coches de la categoría. El McLaren F1 GTR de 1997 podía generar hasta 1.000 kg de carga aerodinámica a 320 km/h, y, con un pequeño aumento de la resistencia, logró un aumento en la relación sustentación /resistencia de un 60 % con respecto al coche del año anterior.

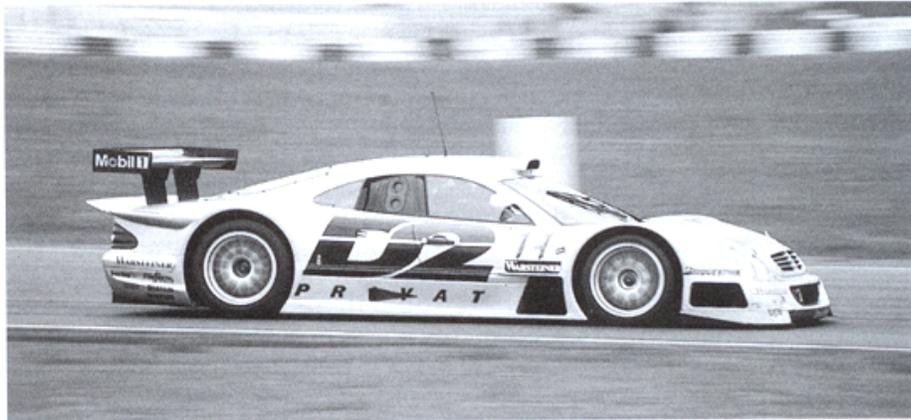
La estética del Porsche es muy similar a la del McLaren, y la única diferencia obvia es el ángulo más pronunciado del parabrisas del 911. Esto puede generar



En su tercera evolución aerodinámica, el McLaren F1 GTR estuvo a la altura del desafío de Porsche en 1997.

algo más de resistencia que el McLaren, pero si existe una diferencia, no se refleja en la pista.

Sin embargo, el Mercedes tiene por lo menos una diferencia visual significativa, y ésta es la forma de su conjunto de caja de aire/divisor de flujo delantero. Al igual que el Mercedes Clase 1 del ITC que precedió al CLK GTR, el centro de la caja de aire tiene la forma de una entrada de Venturi, con un labio elevado y curvado para acelerar el flujo de aire bajo el borde de ataque de la caja de aire. Las partes exteriores de la caja de aire forman un divisor de flujo bastante convencional y grande. El Mercedes parece capaz de canalizar una mayor cantidad de aire hacia el fondo del



El Mercedes CLK GTR combina lecciones aprendidas en el ITC y en los sport prototipos del Grupo C.

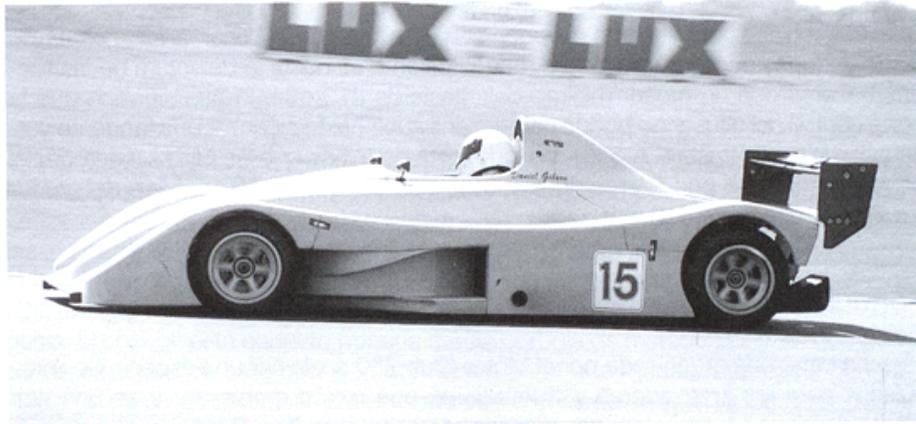
coche utilizando este elemento. Sin embargo, en los demás elementos exteriores, el Mercedes parece seguir las líneas generales de las otras dos marcas.

Un comentario interesante aquí es sobre la estrategia utilizada por los coches de McLaren Motorsport para conseguir una configuración para la carrera de las 24 horas de Le Mans. Básicamente hace una evaluación de posible tiempo de vuelta que hará falta para ser competitivos. Después se meten los datos en un programa de simulación de vueltas para producir la carga aerodinámica necesaria. El nivel de carga es probado en el modelo del túnel de viento, y se llevan a cabo varias pruebas para intentar reducir la resistencia lo máximo posible. Finalmente, esto da como resultado la mayor eficiencia aerodinámica que se pueda conseguir, reglaje con el cual los coches salen a la pista. La estrategia parece funcionar bastante bien desde 1995 (año en que ganaron la carrera en su primer intento).

## Supersports 200

Anteriormente conocida como la fórmula Clubmans, la Supersports 200 ya no es exclusivamente para los coches con motores delanteros, tracción trasera y biplazas. Ahora también se permiten vehículos con motores centrales, y aunque todavía pueden utilizarse coches con motor delantero, parece probable que la configuración con motor central acabará por imponerse en un futuro próximo. A estas alturas, los Mallock, Nemesis, Slique y Phamton, todos ellos con motor central, abarcan la mitad de la parrilla.

Empujados por motores Vauxhall de 200 CV (de ahí el 200 en el nombre de la categoría), estos sofisticados vehículos demuestran tener algunos aspectos aerodinámicos muy pensados y uno de los más interesantes es el Némesis RME 97. Por su forma general, el Némesis parece un sport prototipo a una escala más pequeña, pero si miramos un poco más de cerca nos damos cuenta de que este coche es muy



El Nemesis RME97 está lleno de ingeniosos detalles aerodinámicos.

sofisticado, y adornado con muchos detalles aerodinámicos. Sin embargo, sorprendentemente, a pesar de su apariencia, nunca ha estado dentro de un túnel de viento, y esto dice mucho sobre el ingenio del equipo que lo diseñó.

Comenzando por delante, la parte inferior de borde de ataque de la carrocería es, esencialmente, un divisor de flujo convencional, pero con una sección central elevada. Pero lo que no es obvio a la vista es lo que está detrás del divisor, por debajo de la parte que cubre la sección delantera. La parte inferior del chasis en el centro entre las ruedas delanteras monta una placa divisora, y la cubierta situada encima del divisor tiene esa forma para conducir el aire que entra por el conducto central hacia detrás de las ruedas. Lo que se pensó aquí era en hacer funcionar esta sección como un divisor situado debajo del cockpit de un coche de Fórmula 1. El equipo ha intentado rodar con un divisor convencional en la parte delantera, el cual bloquea el flujo de aire en esta área, pero tuvo como resultado que el coche subvirara a altas velocidades, lo que indicaba que el divisor elevado que alimentada al divisor «secundario», como deberíamos llamarlo, generaba más carga aerodinámica.

La parte superior de la carrocería se curva gradualmente hacia los alrededores del cockpit, que es más alto que el resto de los coches de esta categoría. Por detrás y debajo de la cabeza del piloto hay un conducto de ventilación para el motor, y el capó sirve para controlar el flujo detrás de la zona del cockpit. La parte de atrás de la carrocería se curva por encima de las ruedas traseras, y después vuelve a bajar, como en un sport prototipo, para minimizar el área del coche y evitar el aumento de la resistencia aerodinámica. El alerón trasero es uno de Fórmula 3 ensanchado de dos planos, con una relación de aspecto alta, una pequeña cuerda, un plano superior de dos elementos y un plano inferior de un elemento, fabricado en fibra de carbono. El plano superior va fijado al inferior mediante unas placas de fibra de carbono, y el plano inferior va enganchado a la caja de cambios mediante dos placas sólidas. La parte trasera de la carrocería envía el aire directamente a elemento inferior del alerón, que se encuentra razonablemente cerca de la salida del difusor. La zona de baja presión creada bajo el plano inferior del alerón ayudará al flujo del difusor a ser más rápido y a mantenerse fijado, lo que hará que la presión en el fondo del vehículo sea baja.

Las reglas sobre el fondo del coche en esta categoría obligan a llevar un fondo plano desde la parte trasera de las ruedas delanteras hasta la delantera de las ruedas traseras con un grosor mínimo del chasis de 812 mm, lo que significa que la parte central del difusor no puede comenzar a subir hasta alcanzar una tangente vertical con la rueda trasera. A pesar de todo, está permitido que las partes externas del difusor comiencen por delante de esta línea siempre que estén por fuera del grosor mínimo del chasis de 812 mm.

## Fórmula 750

La categoría organizada por el Motor Club 750 suele ser una especie de «parvulario» para los innovadores y diseñadores que recién empiezan, y es una rica fuente de ideas interesantes, novedosas y, a veces, extrañas. Pero el hecho de que la imaginación y la innovación no sólo estén permitidas, sino positivamente apoya-

das, es uno de los más grandes beneficios de esta clase, de la que han salido algunos de los más brillantes ingenieros, incluidos Colin Chapman, Arthur Mallock y Gordon Murray.

Los coches de la Fórmula 750 tienen poca potencia, sin embargo no existe un solo camino a seguir en lo referente a la aerodinámica, y los ejemplos de las fotos muestran la variedad de soluciones que existen. El Jennicar Mk 1, fotografiado en el capítulo 3, combina un morro ancho con un divisor de flujo corto y un radiador montado en la parte delantera, con un alerón trasero de un solo elemento. Las ruedas delanteras están cubiertas con los así denominados guardabarros de «bicicleta». El Darvi Mk 5 (coche 42a) utiliza la otra clase de parte delantera, con un morro estrecho que soporta un par de alerones de un solo elemento. Los radiadores están montados en los pontones, que al extenderse desde la parte de atrás de las ruedas delanteras hasta justo por delante de las traseras, ayuda a reducir la resistencia minimizando la estela de las ruedas delanteras.



El Darvi Mk 5 utiliza un morro estrecho con alerón delantero.

El Marrow utiliza una fórmula completamente diferente, y está claro que tiene la misión de reducir el coeficiente de penetración lo máximo posible. La carrocería cubre las ruedas delanteras casi completamente, y las traseras van totalmente tapadas. La parte delantera monta el divisor más pequeño en el borde de ataque inferior de la carrocería, que está equilibrado con unos pequeños spoilers traseros fijados a los bordes exteriores de la carrocería. La entrada del radiador está situada en el morro. El cockpit está cubierto por una media burbuja de metacrilato, y las compactas dimensiones de este coche lo convierten en el que menos resistencia genera. Crea algo de carga aerodinámica sellando casi completamente el fondo, y gracias al pequeño divisor y los spoilers, pero con toda probabilidad, los coches con dos alerones generarán más carga, pero con una mayor cantidad de resistencia.



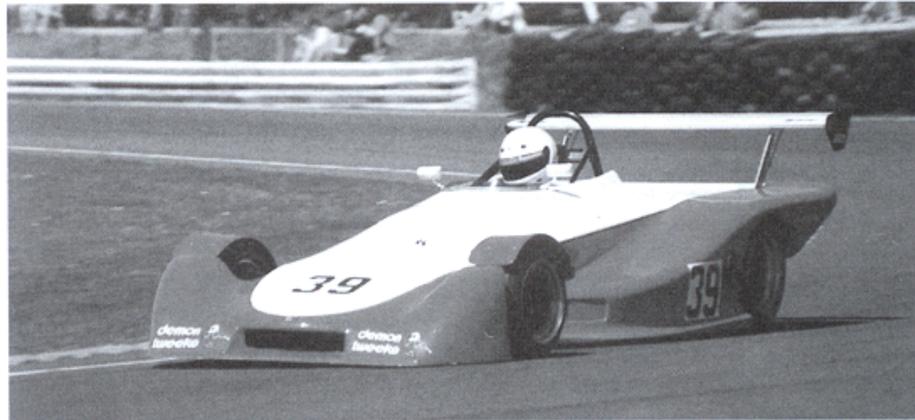
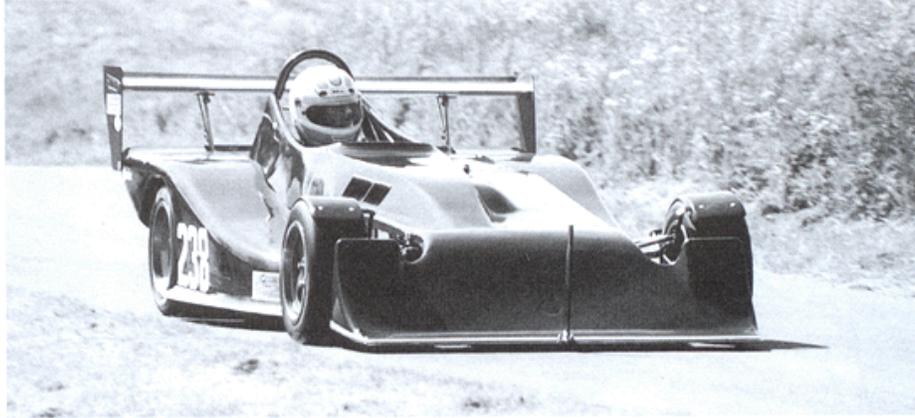
El Marrow utiliza el método de «todo cubierto».

Ahora existen coches en la categoría que utilizan una fórmula híbrida, como el competitivo Darvi 877, que tiene una carrocería que cubre todo el chasis y un alerón trasero convencional, demostrando quizá que la mejor solución es un punto medio entre los dos ejemplos anteriores.

## Coches de montaña y de sprint

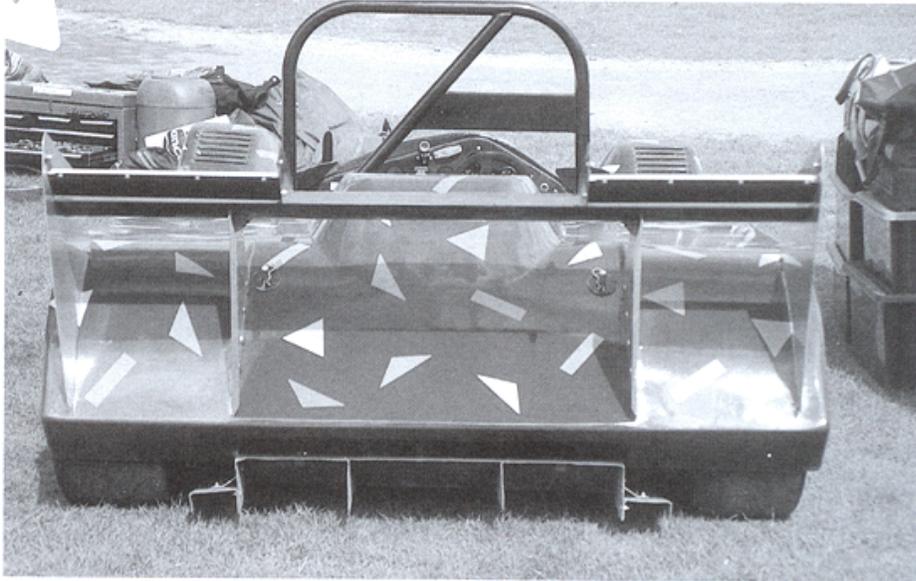
Estas categorías incluyen a la mayoría de los coches de competición, y es por eso por lo que continúan apareciendo en esta sección del libro. Básicamente, existen dos especialidades dentro de las carreras de montaña y de sprint, llamadas Supersports y Sports Libre. La primera refleja los cambios realizados en su equivalente de los circuitos, y solía ser conocida como Clubmans Cars, donde los Mallock U2 competían contra otros modelos más escasos como los Visions o los Phantom. Por el momento, la revolución de los coches con motor central no ha llegado a los vehículos de montaña o de sprint, y los monoplazas con motor delantero siguen siendo el camino a seguir. La Sports Libre es para los coches de dos plazas que no encajan en los Supersports, y está dividida en varias clases dependiendo de su capacidad. Por esto, como es de esperar, la apéndice aerodinámicos suelen variar de acuerdo con la potencia disponible.

Existen diferencias entre los elementos inductores de carga aerodinámica de los coches de montaña y sus homónimos de los circuitos. Tomemos, por ejemplo, los dos modelos de las fotos: un Mallock Mk 21/24 (coche n.º 238) y un Mallock Mk 28 (coche n.º 39) para circuitos. El coche de montaña tiene una sección frontal completamente diferente, con un ángulo de incidencia completamente diferente, y esto refleja el régimen de velocidad más bajo en el que opera este vehículo, ya que esta clase de morro creará más carga aerodinámica que el modelo utilizado en los circui-

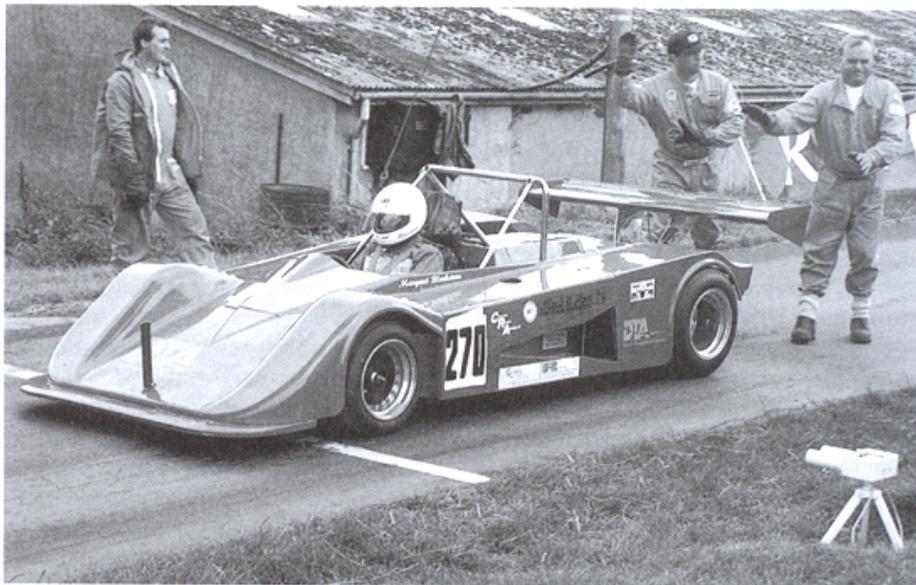


Un Mallock Mk 21/24 de montaña comparado con un Mallock Mk 28 de pista.

tos. Sin embargo, existen muchas más diferencias: el de montaña no tiene entrada frontal para el radiador, mientras que el coche de pista utiliza un conducto de ventilación en su morro. En este caso, el radiador del coche de montaña está situado a lo largo de la parte trasera del vehículo, expuesto a la estela, y con un conducto NACA en la carrocería para alimentarlo. La corta duración de las mangas de las carreras de montaña (de 30 a 50 segundos) permite la refrigeración sin peligro de sobrecalentamiento, mientras que el coche para circuitos se recalentaría si no tuviera una buena entrada de aire. Así que, mientras que el morro del coche de montaña puede estar pensado para generar más resistencia que el modelo para circuitos, esto puede no ser así, y el primero puede tener una mejor relación sustentación/resistencia. Ambos utilizan un alerón trasero con un solo elemento, con una relación de aspecto alta, con poco ángulo de incidencia, y son similares en otros detalles.



El OMS de la categoría Sports Libre del campeonato de montaña con unas interesantes características.



Este Pilbeam MP43 parece funcionar mejor con poca carga aerodinámica.

La clase de Sports Libre, para vehículos con motores más pequeños, se ha convertido en un terreno dominado por los coches con motores de motocicleta tales como el OMS. La configuración aerodinámica está basada en los sport prototipos, con la carrocería cubriendo totalmente las ruedas, con un alerón trasero ancho, y un difusor en el fondo, que aquí tiene dos extensiones exteriores así como un par de canalizadores verticales intermedios en el difusor principal. Más adelante, se pueden ver unas ranuras encima de las ruedas delanteras, y el coche es equilibrado aerodinámicamente mediante un pequeño divisor de flujo frontal.

Más arriba en la escala de capacidad y potencia de la Sports Libre se encuentra el Pilbeam MP43, el de la foto tiene un motor Hart 428R de cuatro cilindros y 2,8 litros. La carrocería tiene una forma muy afilada, pero sigue también las líneas generales de los sport prototipos. Sin embargo, resulta interesante que a pesar de la respetable cantidad de potencia del coche, y su aerodinámica poco «resistente», parece llevar unos apéndices aerodinámicos muy modestos. La parte de la carrocería situada encima del divisor de flujo delantero está lejos de ser una forma tosca, lo que significa que sólo tendrá una pequeña zona de estancamiento. Esto está bien para que la resistencia sea pequeña, pero el divisor no tendrá mucha alta presión en su parte superior. Del mismo modo, el alerón trasero, a pesar de utilizar la máxima longitud y una relación de aspecto alta, tiene poca curvatura y poco ángulo de incidencia. De todo esto se concluye que no generará grandes cantidades de carga aerodinámica. Los Pilbeam siempre han sido famosos por su gran cantidad de agarre mecánico, y este coche en particular es muy competitivo en su clase. Pero ¿sería más rápido con más carga aerodinámica? Aparentemente no. Este coche tiene unas suspensiones blandas, y tras probarlo con suspensión dura, se obtuvieron los mejores tiempos con la primera configuración. Esto, evidentemente, no permite cargarlo mucho aerodinámicamente, e incluso se debe bajar el alerón, quitar el Gurney y reducir al mínimo el efecto del divisor para evitar que el coche no roce con el suelo en las pistas rápidas. Por tanto, de aquí la lección de que «más no es necesariamente mejor». Sin embargo, el coche es rápido en línea recta, a menudo más rápido que rivales con motores más potentes. A pesar de todo, uno no puede evitar preguntarse si el chasis podría modificarse para trabajar con muelles más duros y poder generar así más carga aerodinámica...

## Vehículos de competición basados en coches de calle

A pesar del vasto número de vehículos en las dos categorías anteriores, este grupo envuelve una cantidad de categorías de competición que no es superada por ningún otro, ya que compiten en circuitos, óvalos, montañas, óvalos cortos, óvalos de tierra, pistas de dragsters y etapas especiales. También incluye a los coches que una vez fueron capaces de llevar de dos a cinco pasajeros, así como coches de sport e incluso coches familiares: en otras palabras, prácticamente cualquier vehículo que haya sido diseñado originalmente para el transporte de personas y que haya sido transformado para competir. Una vez más, repasaremos un par de categorías para comparar sus cualidades.

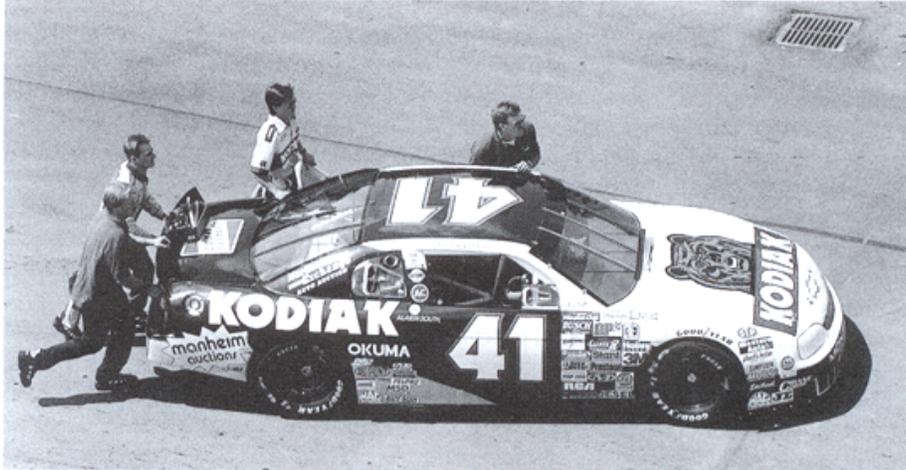
## NASCAR

Se ha dicho en el pasado que la Winston Cup NASCAR es la categoría con mayor éxito del mundo, aunque irónicamente en la primera mitad de 1997 un piloto había ganado la mayoría de las carreras, algo muy poco común en una categoría controlada estrictamente por el reglamento. Se trata, sin duda, de la categoría con más seguidores en Estados Unidos, y esto es en parte debido a lo impredecibles y espectaculares que resultan las carreras. Y sin embargo, los coches de la Winston Cup son técnicamente muy sencillos, con el control regular de la organización para mantener la igualdad entre los Ford Thunderbirds, los Chevrolet Montecarlo y los Pontiac Grand Prix. El personal técnico de la NASCAR impone pequeños cambios en cosas como los spoilers traseros o las cajas de aire para hacer que los coches estén lo más igualados posible, y para evitar el aumento de las velocidades. Por supuesto, esto hace que los equipos que se ven más perjudicados se quejen continuamente, y los que se benefician se alegren. Los coches de la NASCAR ruedan a velocidades muy altas en algunos circuitos, y los únicos elementos que se les permite utilizar para evitar la sustentación son las cajas de aire delanteras y los spoilers traseros. Los divisores de flujo no están permitidos, al igual que los fondos perfilados. Además, los coches deben ser capaces de rodar muy pegados los unos a los otros, con muros de contención en la parte exterior, a más de 320 km/h.

Las sencillas cajas de aire tienen especificada una distancia mínima con respecto al suelo para cada marca de coches, «normalizada» para el Chevrolet, lo que significa que los demás se ajustan para intentar mantener las mismas prestaciones de éste. Por ejemplo, a mediados de 1997 el Ford Thunderbird debía tener una separación de la caja de aire de 101,6 mm en todos los circuitos excepto en los óvalos rápidos de Talladega y Daytona, donde todos los coches debían estar a 88,9 mm del suelo. Los Chevrolet podían estar a 95,3 mm y los Pontiac a 88,9 mm. Éstos son los mínimos, por lo que si un equipo lo creía necesario podía subir su caja de aire. Los paneles lisos para el fondo no están permitidos por detrás de la caja de aire, con lo que quedan 25 mm, lo que no sirve para generar carga aerodinámica.

En cuanto a los spoilers, existe un ángulo mínimo especificado de 45° para los óvalos rápidos, y los equipos pueden aumentarlo si así lo desean, mientras que en los demás circuitos el ángulo es libre. La resistencia llega a su punto máximo con un ángulo de alrededor de 67° a 68°, por lo que los equipos pueden configurar sus alerones con un ángulo muy pronunciado, normalmente alrededor de los 68-70°. La altura del spoiler está controlada y es medida utilizando unas plantillas, con unos límites mínimos y máximos muy estrechos. Cada marca de coches tiene una altura máxima específica, que en 1997 era de 146 mm para el Ford, 152,4 para el Chevy y 165,1 para el Pontiac, aunque son variadas con regularidad para mantener la igualdad. La excepción para esto es que todos los coches deben llevar spoilers de 165,1 mm en los Superspeedways (óvalos rápidos).

Los demás aspectos de la aerodinámica también son controlados estrictamente, incluyendo la altura del techo, la altura de la bandeja trasera y el fondo, que es igual en todos los coches y está basado en el del Ford Thunderbird de 1960. El reglamento se mantiene lo más firme posible no sólo para mantener las



La NASCAR controla sus coches muy de cerca.

prestaciones controladas, sino también para regular la seguridad. Así que, las cifras de carga aerodinámica, aunque no son espectaculares, son suficientes para conseguir una estabilidad razonable. El equipo Penske Racing South, que lleva el coche de Rusty Wallace, midió en un túnel de viento, a 320 km/h, unos 430 kg de carga con la configuración para circuitos lentos, dando un coeficiente de penetración de alrededor de 0,400, mientras que, con la configuración para circuitos rápidos, llegó a unos 236 kg, con un coeficiente de 0,320. Es interesante observar que las pruebas en los túneles de viento con estos coches se llevan a cabo con un ángulo de 3° a la izquierda, que es lo que se considera tienen las curvas peraltadas de un circuito. El efecto de esta deriva es crítico en las prestaciones, y los equipos buscan un equilibrio para dar estabilidad al coche, y al piloto la confianza necesaria.

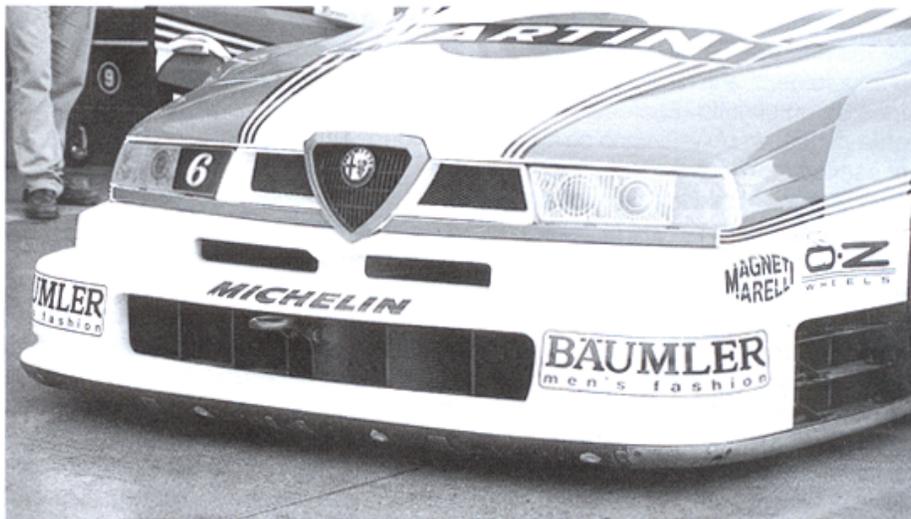
Estas cifras deben ser consideradas en relación con el peso del coche de 1.590 kg. También merece la pena señalar que los motores alcanzan unos 740 CV en su configuración «normal», mientras que en los Superspeedways, unas restricciones muy controvertidas sobre los carburadores, mantienen la potencia alrededor de los 430 CV. Esto ayuda a explicar por qué los coeficientes de penetración bajos son muy importantes en Talladega y Daytona. Como parte de la configuración de poca resistencia para las carreras con restricciones, el ancho del «guardabarros», o ancho entre los alerones delanteros, por delante de las ruedas es reducido, mientras que en las pistas que requieren mucha carga, se aumenta. Para los entrenamientos de una sola vuelta, es normal tapar con cinta los conductos de refrigeración de los radiadores y los frenos, para reducir la resistencia y para ganar apoyo en la parte delantera. Las medidas de seguridad que la NASCAR utiliza para evitar que los coches vuelquen cuando ruedan rápido están explicadas en el capítulo 3.

Así que la NASCAR controla su reglamento, especialmente aquello relacionado con la generación de carga y resistencia aerodinámica, de un modo diferente al que lo hacen las demás categorías del mundo, y desde luego ofrece carreras muy emocionantes y en las que los coches ruedan muy juntos. ¿Es ésta una lección de la que deben aprender otras organizaciones?

## Turismos

Hasta finales de 1996, lo que había comenzado como el campeonato alemán de turismos de Clase 1, y que después se convirtió en el campeonato internacional de turismos (ITC) controlado por la FIA, produjo los turismos más sofisticados jamás vistos. Finalmente, la propia sofisticación de los coches, y los costes asociados a ellos, acabó por hacer desaparecer la categoría a finales de 1996. Pero aunque ya no compiten, estos espectaculares vehículos siguen frescos en nuestra memoria, y merecen que se les eche un vistazo, especialmente porque incorporaban algunas características aerodinámicas interesantes.

En el último año del ITC, había tres constructores compitiendo: Alfa Romeo, Mercedes y Opel. Cada marca creó un coche muy distintivo, con sus propios elementos generadores de carga aerodinámica y reductores de resistencia. Tomando primero el Mercedes, en su parte delantera este coche incorporaba una entrada Venturi, claramente orientada a acelerar el flujo de aire en la parte inferior del coche (ver capítulo 5). Las reglas permitían alerones inferiores cortos que llegaran hasta alcanzar las ruedas delanteras. También estaban permitidos los fondos planos (cubrir

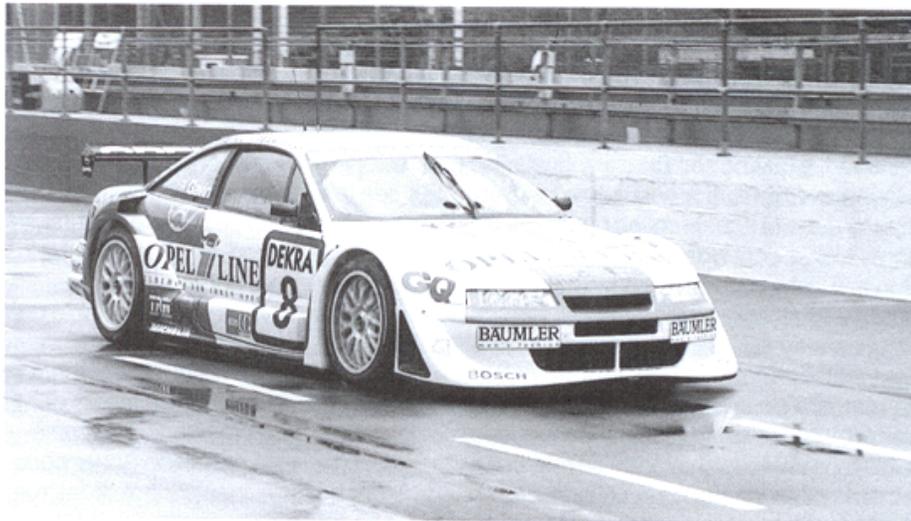


La parte delantera del Alfa permitía controlar el aire de refrigeración.

el fondo con paneles era legal) y los difusores traseros. Por esto, aunque hubo queja por parte de un fabricante de la categoría de que sólo se podía generar un poco de carga aerodinámica en el fondo de los turismos de Clase 1, había espacio de sobra para hacer que el fondo contribuyera creando apoyo aerodinámico. Claramente, Mercedes, junto con los otros, estaban intentando eso. Las salidas visibles a los lados de la caja de aire, justo por delante de las ruedas, son las salidas para el aire de refrigeración. Muy populares en los turismos porque permiten una extracción más eficaz del aire de la refrigeración que si se lo dejara escapar solo, se dice que estos conductos laterales producen un rápido cambio en la dirección del flujo y un incremento efectivo del área frontal.

El Alfa tenía una parte delantera más convencional, en lo que se refiere a un turismo, con un divisor de flujo montado en la parte inferior. Pero observe que el fondo del divisor está generosamente redondeado, con el fin de que el aire que pase por ahí se acelere con el fin de incrementar la presión en el labio delantero del coche. Por encima del divisor, observe los canalizadores verticales para controlar el flujo de aire hasta las matrices de refrigeración, y fíjese también en las salidas del aire de refrigeración justo por delante de las ruedas delanteras, también con canalizadores verticales y horizontales. Estos canalizadores podían ser movidos para controlar el aire que refrigeraba el motor, pero hubiera afectado claramente la eficiencia aerodinámica.

El Opel tenía una parte delantera que se encontraba a medio camino entre el Mercedes y el Alfa, con un divisor de flujo redondeado que contaba con una porción central elevada. Los primeros Opel con el divisor plano aparentemente eran muy sensibles al cabeceo, hasta el punto en que cuando el divisor se acercaba al suelo, bloqueaba totalmente el flujo, con la consiguiente pérdida de carga aerodinámica. La



Y el Opel fue diferente una vez más.

sección central elevada solucionó este problema. También pueden verse unos canalizadores verticales rotables en el orificio de entrada del radiador del Opel. Los extremos exteriores del divisor se tuerquen hacia arriba para dirigir el flujo hacia allí y hacia fuera.

Todos los coches explotaban la regla que permitía la fijación de unas extensiones de 100 mm en los bordes inferiores de la carrocería entre las ruedas. Ya que la parte principal del fondo debía mantenerse a la misma altura que el coche de calle original, estas extensiones formaban unos faldones que servían para prevenir que el flujo se escapara por los lados hacia la zona del fondo plano. En la parte de atrás, los alerones podían ser de dos elementos que, vistos de lado encajarían en un rectángulo de 200 × 200 mm, mientras que los difusores tenían restringido su tamaño por la regla del fondo plano, y a una altura máxima nivelada con el centro de las ruedas. Cada fabricante se había tomado mucho trabajo para mejorar el flujo en sus difusores con la ayuda de canalizadores verticales.

Los valores de carga aerodinámica para los coches del ITC no eran especialmente altos, situándose alrededor entre 89 y 177 kg, que, para una categoría con un peso mínimo de 1.040 kg, representa entre un 8,5 y un 17 % de peso del coche.

## Super Turismos

Los organizadores y los constructores de la que era conocida como la Clase 2 de turismos, y que ahora son conocidos como Super Turismos, están (a mediados de 1997) pasándolo mal para equilibrar los argumentos a favor y en contra de la aerodinámica en esta categoría. Aunque generar carga aerodinámica está restringido a las cajas de aire, los divisores de flujo y a unos pequeños alerones traseros de un solo elemento, suplementado con algunos trucos aquí y allá para conseguir algo más con el fondo, existe, a pesar de todo, mucha gente que piensa que la carga aerodinámica ha arruinado la competición en la categoría. Existe otro grupo de gente, que incluye a los que están más involucrados, que piensa que la carga aerodinámica no ha hecho daño a nadie, ya que, relativamente hablando, se genera muy poca cantidad, y que ha servido para igualar las prestaciones de los coches. La realidad es probablemente que la calidad de las carreras, o sea la relativa falta de adelantamientos, se debe al agarre de los neumáticos y a los pilotos que no se dejan adelantar sin antes luchar con todas sus fuerzas. Pero sea cual sea la verdad, el hecho es que los Super Turismos pueden generar algo de carga aerodinámica, aunque según parece para 1998 el reglamento intentará reducir las cantidades. Parece poco probable que se aumenten así las posibilidades de adelantamiento.

Actualmente, el conjunto de caja de aire/divisor de flujo no puede extenderse más allá de la periferia plana del vehículo, por lo que no puede sobresalir por la parte más adelantada del parachoques delantero. Además, no puede acercarse al suelo más de 45 mm cuando se mide en parado. Debajo, está permitido poner paneles en la parte inferior de la caja de aire y puede llegar hasta la línea central de las ruedas delanteras, aunque por detrás de éstas el fondo original del coche no puede ser alterado. A pesar de todo, existe algo de libertad para utilizar los tubos de escape y el



El Honda Accord de Super Turismo.

depósito de gasolina para aplanar el fondo lo máximo posible. En la parte de atrás, y en la bandeja superior, debe fijarse el alerón trasero de un solo elemento, que debe caber, visto de lado, en un rectángulo de  $150 \times 150$  mm, y no puede extenderse hacia atrás más allá de la periferia del plano, ni por lados cuando se mira de frente. Sin embargo, también aquí existe libertad para incluir detalles, y la mayoría de los equipos llevan a cabo muchas pruebas en el túnel de viento cada invierno, antes de homologar sus conjuntos aerodinámicos para la temporada siguiente. No está permitido ningún ajuste de los elementos aerodinámicos, así que una vez que se ha homologado su conjunto aerodinámico, un equipo tiene que seguir con él durante toda la temporada, por lo que la pretemporada resulta de vital importancia.

Al igual que la mayoría de los coches en los que están basados los Super Turismos, la forma general de la caja de aire delantera y el divisor han sido muy parecidos en todos los modelos durante 1997. Ha habido una tendencia general a utilizar una sección elevada en el centro del divisor, aunque cada diseño tiene sus detalles propios. Quizás el más elegante haya sido el Peugeot, pero en cada caso parece que la meta era acelerar el aire en la parte inferior del divisor, mientras controla la zona de estancamiento de alta presión en la parte delantera de los coches. Existe también cierto grado de igualdad en lo referente a las canalizaciones laterales de las cajas de aire, que conducen parte del aire de la refrigeración a los lados inferiores del vehículo, de tal modo que se genera un vórtice beneficioso. Lo que no es evidente en las fotografías es que algunos coches incorporan un minidifusor por delante de las ruedas delanteras, donde el divisor se extiende hacia atrás y se gira hacia arriba en la línea del eje.

Los alerones traseros tienen formas y perfiles diferentes. La mayoría no son simples alas, y parecen tener elementos que, a primera vista, no parecen muy eficientes, tales como el escalón vertical en la parte inferior del alerón trasero del Renault Laguna. De forma similar, el Gurney bastante extremo que incorpora el alerón trasero del Vauxhall Vectra parece, comparado con la cuerda, estar en el límite de lo aceptable en lo referente a la altura de los Gurney. Pero estos alerones no operan en un ambiente particularmente bueno, dado que están tapados por la cabina del pasajero y que son bastante pequeños. Claramente, uno de los beneficios de ser capaz de llevar a cabo un programa de pruebas en el túnel de viento es las radicales ideas que se pueden probar, y si producen los suficientes efectos beneficiosos, o sea, más carga por poca resistencia, entonces pueden ser utilizados en la pista. Sin el beneficio de poder probar antes las soluciones, las posibilidades de que aparezcan soluciones radicales son bastante pocas.

Anteriormente en este libro, las cifras estimadas de carga aerodinámica que generaba un Super Turismo eran de entre 55 y 59 kg a 160 km/h. El progreso llevado a cabo antes de la temporada de 1997 sugiere que se había encontrado un 20 % más de carga con la misma resistencia, lo que significa una cifra de 66 a 70 kg. Esto es alrededor de un 7 % de los 975 kg de peso mínimo que debe tener un Super Turismo, por lo que la carga aerodinámica todavía es modesta. Estas cifras de carga aerodinámica suben 2,25 veces a 240 km/h. Sin embargo, es crucial para las prestaciones la eficiencia aerodinámica, por lo que mantener baja la resistencia es vital, quizá más que la propia carga aerodinámica.

## Coches de rally

En los últimos años, los coches del campeonato del mundo de rallies han estado regidos por las reglas del Grupo A, que requieren que la aerodinámica sea la misma que los coches de producción que se pueden adquirir en la calle. Así que si un coche tiene un spoiler trasero, o lo que sea, entonces puede ser utilizado en los rallies, pero no puede ser modificado ni mejorado. Los únicos cambios permitidos son la incorporación de protecciones debajo del motor y de la caja de cambios debajo de los componentes relevantes, lo que por lo menos tenía el efecto secundario de aplanar el fondo del vehículo. Sin embargo, el aspecto más importante de la aerodinámica de un coche de rallies era, y todavía es, garantizar que el aire para la refrigeración llega a todos los sistemas que lo necesitan. Pero unos cambios recientes en el reglamento han permitido la introducción de «kit cars» de 2 litros, con tracción en dos ruedas, y hace muy poco, de los «World Rally Car», una variación de los modelos con turbo y tracción a las cuatro ruedas. Estas dos nuevas categorías han permitido un poco más de libertad en lo que se refiere a la aerodinámica, con lo que se puede generar algo de apoyo aerodinámico o, por lo menos, reducir algo de la sustentación natural de un coche a altas velocidades. Los elementos aerodinámicos están restringidos dentro de unas dimensiones muy estrictas, y su localización está también muy controlada. Pero ahora, cada año pueden homologarse nuevos componentes, por lo que año tras año veremos desarrollarse esta área.



Alerón trasero del VW Golf «Kit Car» de Fórmula 2.

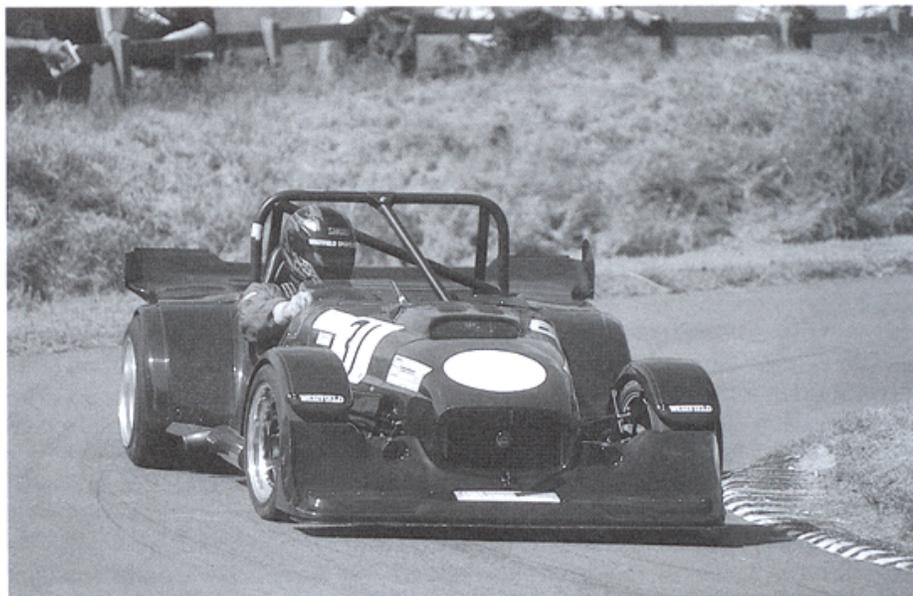
En la categoría de los Kit Car, la diferencia más discernible comparados con sus antecesores de Fórmula 2 es que está permitido situar un alerón trasero, que es capaz de generar algo de carga aerodinámica a pesar de su pequeño tamaño. El VW que compite en el campeonato británico de rallies desarrolló su alerón trasero en el túnel de viento de Wolfsburg, Alemania, antes de su homologación, y los pilotos declararon que los coches eran mucho más estables cuando se iba rápido. De manera similar, en la categoría de los WRC, la libertad para homologar un diseño específico del conjunto aerodinámico empujó a los equipos a trabajar muchas horas en el túnel de viento. Ford declaró que a pesar de que las reglas prohibían el alerón trasero del tamaño del Ford Escort Cosworth de calle, el diseño que se desarrolló posteriormente producía más carga que la versión original. Subaru también comentó que su WRC generaba carga aerodinámica, lo contrario que hacía el modelo anterior del Grupo A, y esto supuso un coche que mantenía su equilibrio tanto a velocidades altas como bajas. El modelo original tenía problemas de sobreviraje cuando rodaba rápido, por lo que era obvio que estaba generando sustentación en la parte trasera.

Los spoilers traseros están prácticamente prohibidos debido a la suspensión tan blanda y con tanto recorrido que utilizan los coches de rally, especialmente en las etapas con piedras y en los terrenos tan sinuosos en los que compiten. A pesar de todo, se ha hecho un gran esfuerzo para darle la forma apropiada a la parte delantera de los WRC no sólo para garantizar una buena ventilación, sino también para mantener un buen equilibrio aerodinámico cuando ruedan rápido.

## Coches de montaña y de sprint

Una vez más vamos a hablar de estas categorías. Es, por supuesto, una total coincidencia que el autor haya pasado los últimos 20 años de su vida dedicados a esta particular categoría del motor... Las carreras de montaña permiten competir a los turismos con una gama de diferentes motores en las llamadas clases de Producción Modificadas. La anteriormente tratada división de Sports Libre también permite correr a los vehículos basados en turismos que también pueden ser modificados para entrar en la clase de Producción, pero debido a sus raíces como coche de producción, les echaremos un vistazo aquí.

El ubicuo Lotus/Caterham/Westfield 7 se encuentra entre los más numerosos y competitivos de los coches en estas clases, aunque existen algunas alternativas que también compiten con éxito. Pero unos de los modelos con un aspecto más radical de los Westfield es la temida variante de 5,3 litros en su motor de 0 cilindros en V. Con un aspecto más parecido al Mallock Supersports que a su predecesor, el Lotus 7, este Westfield ha sido desarrollado a conciencia para poder generar carga aerodinámica. En la parte delantera, el morro nos recuerda mucho al del Mallock tratado en la sección de coches de sport/GT, con la entrada para el radiador descubierta, pero con un spoiler/divisor que dirige el aire hacia arriba por encima de las ruedas y de los guardabarros, probablemente para evitar la resistencia y aumentar el apoyo. Observe las entradas circulares para refrigerar los frenos delanteros. La sección central



El temido Westfield 7 está adornado con toda clase de elementos aerodinámicos.

del coche permanece prácticamente inalterada, aunque se ha tapado el hueco del acompañante para reducir la resistencia que pueda haber en esa zona. En la parte de atrás, un spoiler ocupa todo el ancho del coche, e incorpora un Gurney vertical en su borde de fuga. El fondo no ha sido ignorado, con un difusor con paneles laterales y tres canalizadores verticales intermedios para controlar el flujo de aire en esa zona.

En el extremo más modesto de la escala presupuestaria se encuentra el Rover Metro 1.4 de la foto. Sin embargo, se trata de un coche particularmente fascinante porque es el de Graham Kendall, el ingeniero que se encarga del túnel de viento de la MIRA, quien comparte el coche con su hija Claire. No es sorprendente, pues, que el coche haya pasado por el túnel de viento. Incorpora varios elementos aerodinámicos, incluyendo la caja de aire/divisor de flujo delantero, esas franjas longitudinales a lo largo del capó, faldones laterales y un pequeño spoiler trasero en la parte superior del maletero. La entrada de aire para la refrigeración ha sido reducida. Las modificaciones llevaron al coche de sufrir sustentación positiva a generar carga aerodinámica en la parte delantera y prácticamente nada de sustentación detrás. El Metro fue probado en varias etapas, primero con la caja de aire/divisor, y después con todos los demás elementos. Los datos antes de la modificación no fueron medidos.



El Metro modificado del ingeniero del túnel de viento de la MIRA Graham Kendall y de su hija Claire. (Claire Kendall)

En la primera etapa, con tan sólo la caja de aire/divisor de flujo, el coche dio los siguientes coeficientes:

$$\begin{aligned} C_x &= 0,364 \\ C_{LD} &= -0,099 \end{aligned} \qquad C_{LT} = 0,138$$

Después de incluir los faldones, el spoiler y demás elementos, las cifras fueron las siguientes:

$$\begin{array}{l} C_x = 0,384 \\ C_{LD} = -0,099 \end{array} \qquad C_{LT} = 0,020$$

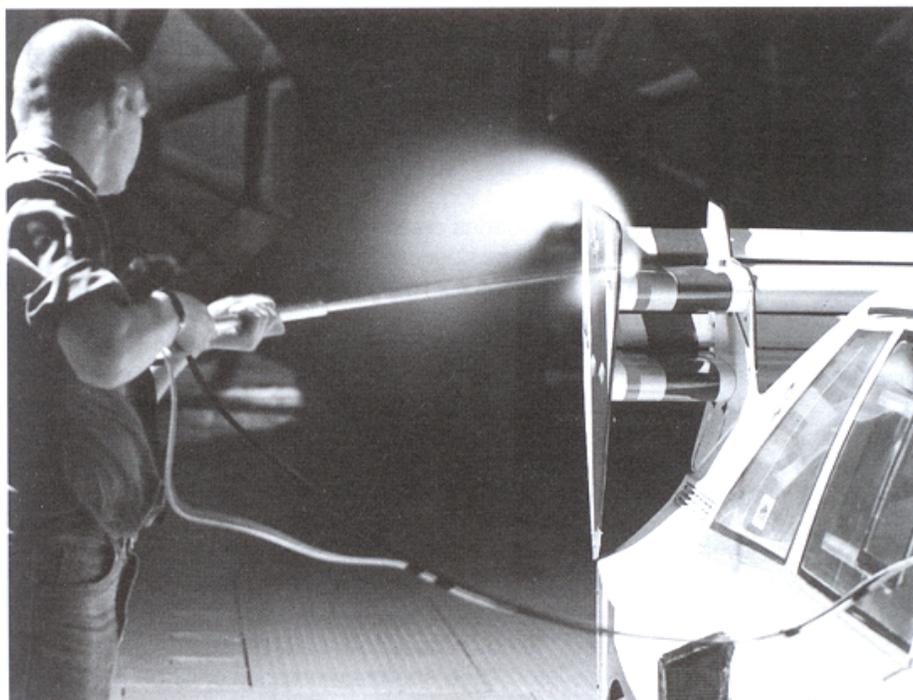
El efecto de las tiras longitudinales también se probó de manera independiente, llevando el  $C_L$  delantero de  $-0,072$  a  $-0,099$ , y el  $C_L$  trasero de  $0,035$  a  $0,020$ .

Estas cifras ilustran un número de puntos interesantes. Primero, siguiendo el reglamento, que impone bastantes restricciones en el spoiler trasero de un coche de esta clase, es más difícil conseguir una reducción de la sustentación en la parte trasera que sea igual que la delantera. A pesar de todo, se han conseguido modificar las cifras de sustentación tanto delante como detrás de manera significativa, lo que hará que el coche sea más estable cuando rueda rápido. La parte delantera realmente está produciendo carga aerodinámica. Otro punto particularmente interesante es el beneficio que se logra gracias a las tiras longitudinales del capó, que mejora tanto la sustentación delantera como la trasera, mientras que se produce una pequeña penalización en forma de la resistencia. Para intentar explicar de dónde vienen estos efectos beneficiosos, uno debe asumir que, en la parte delantera, evitar que el flujo de aire se escape por los lados ha hecho aumentar el flujo en la zona de separación con alta presión en la parte trasera del capó, y esto puede haber agrandado el ancho de la zona de separación, incrementando así la presión en la parte trasera del capó. Y en la parte de atrás del coche, puede que el spoiler consiga una mayor cantidad de aire, ya que se está llevando mayor cantidad por encima del techo, y que esto haya tenido un efecto similar al del capó, con una burbuja de separación de alta presión más grande justo por delante del spoiler, en la parte trasera del techo. En lo referente a la pequeña reducción de la resistencia que tiene lugar al colocar las tiras longitudinales, quizás el reducido escape del aire hacia los lados disminuyó la formación de resistencia creando vórtices a los lados del vehículo. Los resultados obtenidos con las tiras son otro ejemplo de cómo es prácticamente imposible generalizar en el tema de la aerodinámica: si estas tiras hubieran ido fijadas a un coche familiar más curvado, tal como un Super Turismo, existe la posibilidad de que aumentara la sustentación debido a la mayor aceleración del aire por encima del techo.

Por último en esta categoría, tenemos que parar y admirar este Audi Quattro, una réplica de los coches construidos para competir en la ascensión al Pikes Peak en Colorado, USA. Debido a lo poco que este coche se parece a un Audi de calle, debe competir en la clase de Sports Libre, pero está claramente basado en un turismo igual que lo puede estar un Super Turismo o un coche de la NASCAR. Es sólo que lleva incorporados muchos elementos aerodinámicos, por todas partes. Además tiene un motor turbo que alcanza más de 600 CV, sin olvidar la tracción a las cuatro ruedas. En la parte delantera, el Quattro monta una enorme caja de aire/divisor de flujo que se extiende bastante más allá de la carrocería, y por los lados de ésta, por encima de las ruedas, hay, una vez más, tiras longitudinales. La función de estas tiras es controlar el flujo de aire que pasa por esa zona. En la parte de atrás va montado un alerón de doble plano, con cada plano incorporando un ala de tres ele-



La réplica del Audi Quattro de Tom Hammonds en la carrera de montaña de Gurston Down, Wiltshire, Inglaterra.



El alerón trasero del Audi cumple con su misión. (MIRA)

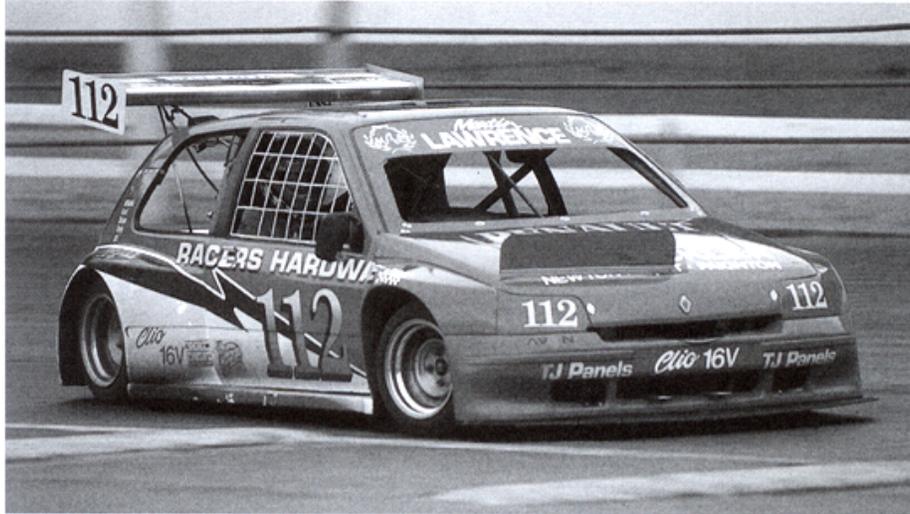
mentos. Con la potencia que tiene este vehículo, y las velocidades que alcanzará en las carreras de montaña inglesas en las que compite ahora, la resistencia no es un problema. Pero la carga sí lo es.

Según acababa este libro, el propietario del coche, Tom Hammonds, llevó el Quattro al túnel de viento de la MIRA, y se obtuvieron algunos datos que merece la pena ser publicados. Con la configuración con la que se probó el coche en el túnel por primera vez, el alerón trasero generaba 180 kg de carga sobre las ruedas traseras, mientras que a pesar del considerable tamaño del spoiler delantero, se podía sentir algo de sustentación en la parte delantera. Está claro que la caja de aire reducía algo la sustentación, pero el efecto del alerón trasero, junto con la acción de palanca, estaba causando que el centro de presión estuviera echado muy hacia atrás. Así que se probaron una serie de experimentos, que culminaron en añadir una extensión de 60 mm al borde inferior de la caja de aire, combinado con una pequeña disminución del ángulo de los flaps traseros. Esto hizo que se transmitieran unos 91 kg de detrás adelante, logrando un equilibrio razonable. El coche tiene más peso en la parte delantera, así que, aunque no era perfecta, esta distribución de la carga aerodinámica dio un mejor equilibrio a altas velocidades. Muchos de los «consejeros de paddock» se habían mostrado escépticos sobre los beneficios de los apéndices aerodinámicos de este coche, pero Tom Hammonds declaró que después de los cambios llevados a cabo, el coche funcionaba mucho mejor. Y lejos de hacer aumentar el coeficiente de penetración del coche (0,56), la nueva caja de aire lo redujo, con lo que a 160 km/h se utilizaban 3 CV menos. El dueño del coche declaró que era suficiente como para cortar el césped.

## Hot Rods

El primo cercano, pero con las ruedas cubiertas, de los stock cars que compiten en los óvalos cortos de Inglaterra, se conoce como Hot Rod. Éstos están basados generalmente en turismos pequeños como el Peugeot 105, el Renault Clio o el Ford Fiesta, y con velocidades de 120 a 130 km/h, existe un buen motivo para prestarle atención a la parte aerodinámica. Sin embargo, existe una diferencia aerodinámica fundamental entre un Hot Rod y los demás coches de carreras basados en turismos, y es que los Hot Rods corren sin ventanas de cristal. Esto los hace parecerse, en cierto sentido, a los coches de sport/GT, y las áreas frontales se verán claramente reducidas en comparación con los turismos de calle originales. El flujo sobre el vehículo es totalmente diferente al de un coche con cristales, y con toda probabilidad, la sustentación es mucho menor. Pero también está permitido utilizar elementos inductores de carga aerodinámica, y consisten en una caja de aire/divisor de flujo en la parte delantera, con una distancia con respecto al suelo definida por el reglamento que dice que ninguna parte de la carrocería puede tocar el suelo cuando los neumáticos están deshinchados. También pueden montarse alerones de un solo elemento con Gurneys y derivas laterales, o spoilers montados en la parte superior del techo, de los que ninguna parte puede superar los 152 mm por encima de éste.

Las velocidades de paso por curva son considerablemente inferiores a las que



Quitarle al alerón trasero a un Hot Rod acarrearía serios problemas. (Cars & Car Conversions)

se pueden alcanzar en las rectas, y, a pesar de que pueda existir la sensación de que la carga aerodinámica no es importante, el piloto de un coche similar al de la foto realizó dos pruebas seguidas, quitando el alerón trasero, lo que causó muchos problemas con el bloqueo de los frenos. Para resaltar lo obvio, el frenado comienza a la máxima velocidad, y termina en la entrada de la curva. La experiencia del bloqueo de los frenos traseros ilustra el hecho de que, por lo menos a la velocidad a la que se comienza a frenar, existía suficiente carga aerodinámica creada por el alerón trasero como para mejorar la tracción de las ruedas (los pilotos que conducen coches con mucho apoyo aerodinámico, como los de Fórmula 1, han aprendido a soltar un poco el pedal para controlar la pérdida de agarre que tiene lugar debido a la pérdida de apoyo cuando se reduce la velocidad). Así que, una vez más, incluso en las carreras en óvalos relativamente lentos, al igual que en las carreras de montaña, es un error subestimar los beneficios de la explotación de la carga aerodinámica.

## 9. Conclusiones

### Una cuestión de equilibrio

Hemos pasado bastante tiempo estudiando cómo se genera la carga aerodinámica, cómo crear componentes que la generen y cuáles son los diferentes elementos utilizados en varias categorías de competición con el fin de explotarla. Así que, a estas alturas, puede que ya haya diseñado alguna pieza inductora de carga, y quizá ya la haya construido y montado en su coche de carreras. Pero antes de salir corriendo a correr su primera carrera, piense en pasar algo de tiempo probando, si le es posible, con el fin de crear una base de datos que le sirva como referencia para la puesta a punto de su coche. Podrá utilizarlos siempre que compita, tanto si ya ha estado antes ahí o no, y sean cuales sean las condiciones meteorológicas. No le será posible dar con la configuración adecuada para un circuito a la primera, pero si se toma la molestia de crear un cuadro de configuración, desde una con poca carga hasta una con mucha, estará un paso por delante de los rivales que no lo hacen. Aquí hay que asumir que sus elementos aerodinámicos son regulables, y que el chasis puede soportar la carga aerodinámica que ha decidido ponerle.

Quizás una de las cosas más sensatas que puede probar es separar el equilibrio mecánico de su coche del equilibrio aerodinámico. Es una situación bastante frecuente que alguien intente solucionar un desequilibrio mecánico mediante un ajuste aerodinámico, o viceversa. Esto no es sólo aplicable a los escalones más altos de la competición. Pero, por ejemplo, no parece haber ninguna razón lógica, en ninguna categoría, para intentar curar un desequilibrio de un chasis en las curvas lentas haciendo cambios aerodinámicos. Puede enmascarar los efectos del desequilibrio a altas velocidades, y esto puede dar la impresión de tener unos buenos reglajes en una pista rápida. Pero ¿no sería mejor tener primero un chasis que esté equilibrado mecánicamente, y después optimizar su aerodinámica? De acuerdo, la vida nunca es tan sencilla como para que llevar a cabo esto sea siempre posible. Y existen, indu-

dablemente, ramas de automovilismo y circuitos y ocasiones cuando es una ventaja tener un coche que, por ejemplo, sobreviva en las curvas lentas, pero que es neutral en las rápidas. Pero para poder recolectar una serie de datos aerodinámicos que puedan utilizarse en diferentes circuitos y condiciones, y que permitan conseguir una configuración aproximada sin rodar, es mejor conseguir equilibrar primero la parte mecánica del chasis.

Así que, ¿qué tal si comienza la próxima sesión de pruebas sin apéndices aerodinámicos? Esto puede resultar difícil en el caso de un fondo con los radiadores montados, por lo que esto no va a funcionar en muchos coches que dependen de forma casi exclusiva de la carga aerodinámica generada por el fondo. Pero será muy efectivo para muchos otros, así que, adelante, quite los alerones de su coche y compruebe que su chasis está equilibrado. Si no es así, entonces trabaje con la suspensión, los muelles, la presión de las ruedas y las barras antivuelco hasta que encuentre el equilibrio. Con suerte, los cambios de un circuito a otro serán pequeños después de haber llevado a cabo ese ejercicio. Después de esto, tendrá una base con la que comenzar a recopilar datos aerodinámicos, ya que los cambios que realice ahora en el coche serán sólo aerodinámicos.

Con los alerones montados, existen varios modos en los que puede llevar a cabo su primera sesión de pruebas. Depende de lo confiado que se sienta sobre el posible equilibrio que sus alerones, o spoilers, van a darle, pero un punto de inicio «seguro» es el que crea una condición de comportamiento dinámico estable, o lo que es lo mismo, subviraje a velocidades medias o altas. Así que regule la parte delantera con la menor carga posible, y con la trasera en la posición que crea que generará más apoyo que la delantera. Si eso significa ponerlo en el punto máximo, entonces hágalo. Después, salga y pruebe el coche. Si encuentra que sufre de subviraje en las curvas rápidas, y con suerte será así, puede reducir el apoyo trasero hasta que encuentre un equilibrio. Una vez que haya hecho esto, tiene que establecer la menor carga posible. Si el subviraje sigue presente con el alerón trasero al mínimo, entonces deberá aumentar la cantidad de apoyo en el delantero hasta que el subviraje desaparezca.

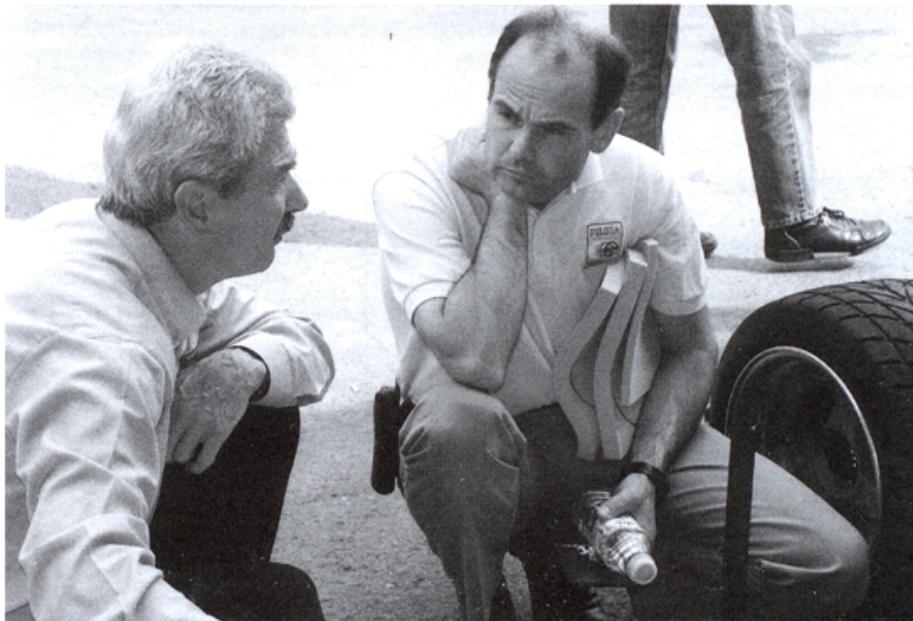
Ahora puede aumentar el ángulo del alerón trasero, rodar con el coche hasta volver a sentir el subviraje y después ajustar la parte delantera hasta que el coche esté equilibrado. Esto le proporciona otro punto de equilibrio que está generando más carga aerodinámica que la primera configuración. Si sigue reiterando este proceso hasta que alcance la mayor carga trasera que puede conseguir, tendrá una tabla de referencia de configuraciones equilibradas desde la mínima hasta la máxima carga aerodinámica. Naturalmente, habrá estado recogiendo todos los datos de las vueltas durante la sesión, para ver cuál es la configuración que ha dado mejor resultado en el circuito en el que se encuentra. Esto le dará una buena idea del nivel de carga que necesitará en los demás circuitos a los que irá. Si también ha podido recoger algunos datos sobre el coche, mejor aún, porque podrá estudiar los cambios en las velocidades de paso por curva y en las rectas, y comparar los tiempos parciales con los totales.

Éste es un modo simplista, y que consume mucho tiempo, de lograr la puesta a punto aerodinámica, y además hace que se desgasten todos los componentes del

coche. Pero la información recogida de ese modo evitará que tenga que hacer conjeturas más adelante, cuando tenga que competir, por ejemplo, en el mismo circuito en el que realizó las pruebas, pero esté lloviendo y necesite todo el apoyo aerodinámico que pueda obtener. Todo lo que tiene que hacer es mirar los reglajes de los alerones que equilibran el coche cuando el alerón trasero esté al máximo, y se habrá ahorrado una buena cantidad de tiempo, que ahora puede ser utilizado para aprenderse el circuito sobre mojado en lugar de en equilibrar el coche.

## Investigación y desarrollo

Existen dos motivos por los que debería probar nuevas ideas en su coche de carreras: una es la curiosidad natural, y la otra es que existe siempre la necesidad de mejorar. Ambas son válidas para experimentar, y sólo haciéndolo podrá descubrir qué es lo que funciona y lo que no. Puede observar lo que prueban primero otros equipos que tienen el mismo coche y puede imitar sus éxitos y aprender de sus fracasos. Pero esto nunca lo llevará hasta lo más alto; copiando nunca se consigue el máximo. El único modo de encontrar la «ventaja decisiva» es pensando, construyendo y probando. Pero jamás diga «nunca», o sea tan orgulloso como para no volver a su antigua configuración si su idea no ha funcionado. En el automovilismo hay más carreteras con obstáculos que autopistas doradas.



«Hablar es bueno». El aerodinamista de Ferrari Willem Toet y el diseñador Mike Pilbeam en plena charla.

También recuerde que, como dice un anuncio de una compañía de telecomunicaciones, «hablar es bueno». Discutir las ideas con otras personas es la mejor manera de ampliar sus conocimientos.

## **En resumen**

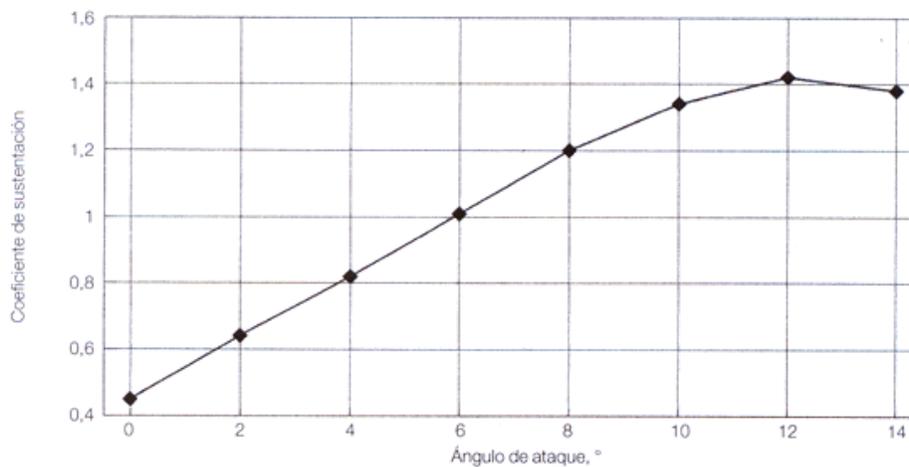
Espero que este libro le haya proporcionado suficiente información e ideas, a cualquiera que esté interesado en el automovilismo, pero especialmente a aquellos, que igual que el autor, están interesados en cómo «trabajar con el viento» para ir más rápido. Sin embargo, por encima de todo, espero que ahora sea evidente que es muy difícil generalizar en muchos aspectos de la aerodinámica de los coches de carreras. Lo que funciona en un coche puede no funcionar en otro muy parecido. Probar y equivocarse son partes fundamentales del proceso de desarrollo, en cualquier nivel de este deporte. Así que, si tras haber leído este libro, ha descubierto algo que le permite ir más rápido, me alegro mucho. Sin embargo, si ahora va más lento, no me eche la culpa. Simplemente diga «así son las carreras», e intente algo diferente.

Buena suerte.

## Apéndice 1. Datos sobre alerones

Aquí encontrará una pequeña lista de perfiles de ala y sus características de sustentación. La fuente de estos datos es el clásico libro «Theory of Wing Sections» (*La Teoría de las Secciones de Ala*) de Abbott y von Doenhof (ver apéndice 2), del cual se han extraído los gráficos y dibujos de esta sección. Les ofrezco estos ejemplos simplemente para mostrar algunos de los efectos de las distintas configuraciones. Los textos de la lista en el apéndice 2 le proporcionarán más perfiles para su estudio.

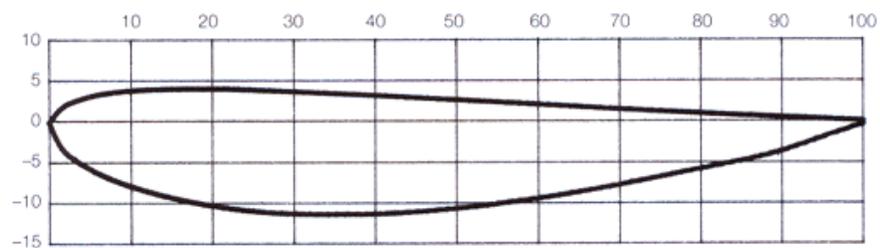
El perfil NACA 4415 es una de las secciones de un solo elemento más sencillas, y es relativamente fácil de construir en aluminio o PRF. Se trata de uno de la familia de



Características de sustentación de un ala de un solo elemento: el perfil NACA 4415.

perfiles sencillos de diferentes grosores y curvaturas. Como puede verse en el gráfico del coeficiente de sustentación en relación con el ángulo de ataque, el perfil proporciona una sustentación moderada a 0°, subiendo hasta su punto más alto con 12°, el punto de pérdida. Pero observe que estos datos son para alas de dos dimensiones, es decir, de envergadura infinita. Con unas relaciones de aspecto reales, el ángulo de pérdida será mayor.

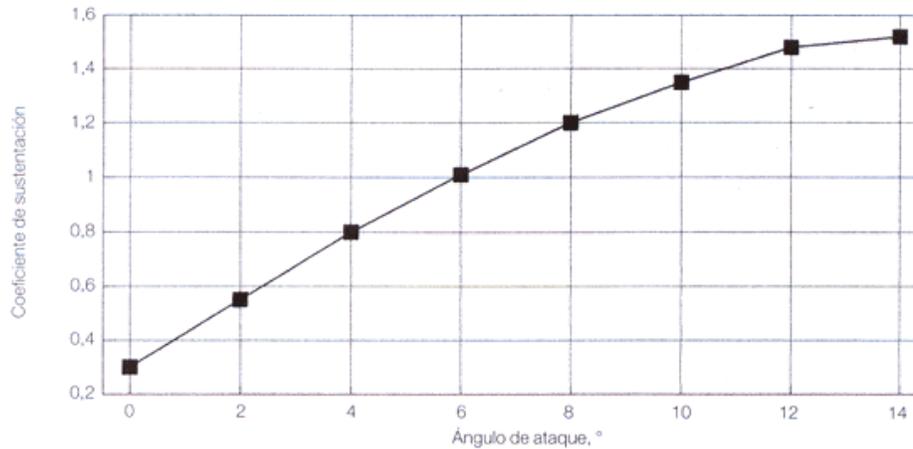
Sin embargo, el ángulo de pérdida exacto de un ala dependerá de las condiciones del flujo y es probable que varíe a lo largo de la envergadura.



Sección de ala NACA 4415.

Las ordenadas que permiten el cálculo manual de este perfil a cualquier tamaño son las siguientes:

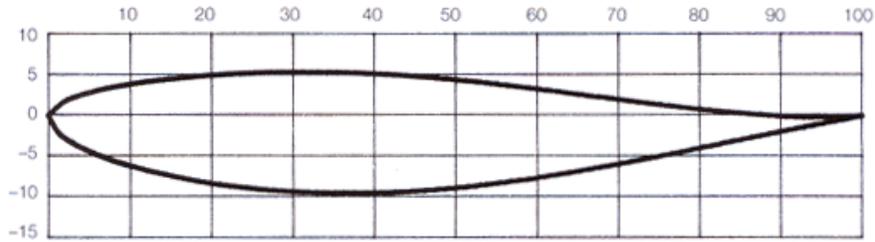
%	Superficie inferior	Superficie superior
0	0,00	0,00
1,25	-3,07	1,79
2,50	-4,17	2,48
5,00	-5,74	3,27
7,50	-6,91	3,71
10,00	-7,84	3,98
15,00	-9,27	4,18
20,00	-10,25	4,15
25,00	-10,92	3,98
30,00	-11,25	3,75
40,00	-11,25	3,25
50,00	-10,53	2,72
60,00	-9,30	2,14
70,00	-7,63	1,55
80,00	-5,55	1,03
90,00	-3,08	0,57
95,00	-1,67	0,36
100,00	0,00	0,00



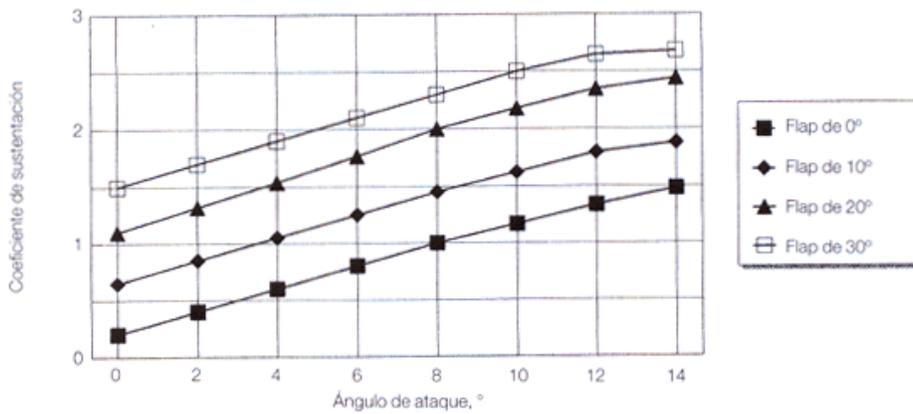
Características de sustentación de un ala de un solo elemento: el perfil NACA 63<sub>2</sub>-514.

La sección NACA 63<sub>2</sub>-415 es un perfil bastante más sofisticado. Proporciona un perfil de resistencia más bajo que el NACA 4415 con un  $C_L$  de 0,2 a 0,8 con un ángulo de ataque de 0° a 4° y, gracias a una forma más eficiente, su ángulo de pérdida es mayor (14° en el de dos dimensiones), lo que permite generar un  $C_L$  máximo de 1,52, como se ve en el gráfico. A simple vista, la forma parece más eficiente que la del 4415, y esto es respaldado por los datos. Sería más difícil construirlo en aluminio, pero igual si se elige como material el PRF. Las ordenadas para este perfil son las siguientes:

%	Superficie inferior	Superficie superior
0	0,00	0,00
1,25	-2,07	1,24
2,50	-3,08	2,01
5,00	-4,34	2,85
7,50	-5,35	3,50
10,00	-6,11	3,94
15,00	-7,37	4,59
20,00	-8,29	5,03
25,00	-8,94	5,32
30,00	-9,26	5,41
40,00	-9,40	5,14
50,00	-8,76	4,40
60,00	-7,51	3,29
70,00	-5,85	2,00
80,00	-3,91	0,80
90,00	-1,93	-0,08
95,00	-0,96	-0,22
100,00	0,00	0,00



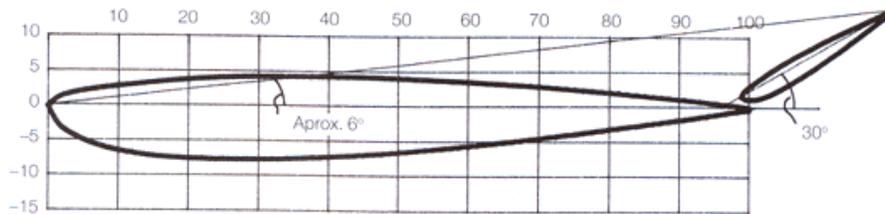
Sección de ala NACA 63<sub>2</sub>-415.



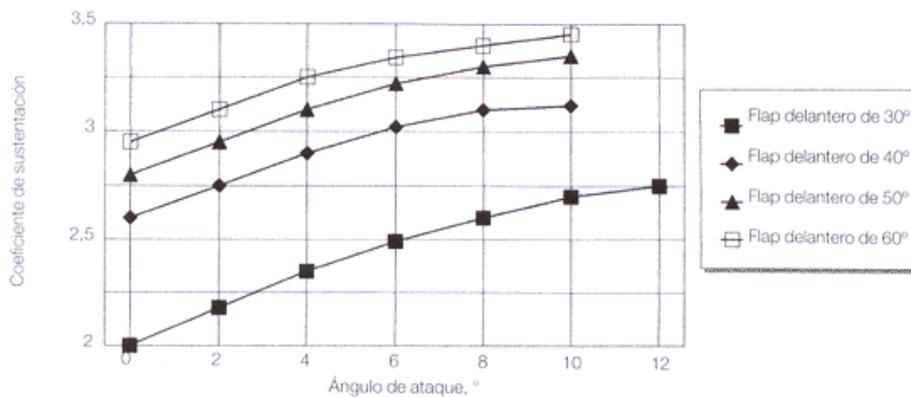
Características de sustentación de un ala de dos elementos: el perfil NACA 23012 con un flap de 0,25c.

El ala de dos elementos de la imagen está basada en una combinación del poco convencional perfil NACA 23012, con un flap con el mismo perfil pero con una cuerda de 0,25 veces el tamaño de la cuerda del plano principal; no es exactamente como viene en el libro de Abbott y von Doenhof, pero sirve para ilustrar. Los datos de los que se derivó el gráfico están tal y como son en el libro.

Se puede ver que con un alerón de dos elementos se puede alcanzar una amplia gama de coeficientes de sustentación, desde un mínimo de 0,2 hasta el máximo alcanzado de 2,6. El máximo absoluto no es mucho más alto que éste, dado que la desviación máxima del flap es de 40°, y los aumentos de sustentación se vuelven más pequeños con el aumento del ángulo del flap en los extremos superiores de la zona práctica. Observe, también, que el ángulo de pérdida comienza a decrecer con los ángulos generales más altos y con un ángulo del flap pronunciado, un hecho que no es sorprendente dado el rápido cambio de dirección que el flujo de aire debe tomar en estas circunstancias. Claramente, la eficiencia con la que un diseño de dos elementos funciona será controlada por los perfiles utilizados, y por la posición del flap y el plano principal. Vea el capítulo 4 para más detalles.

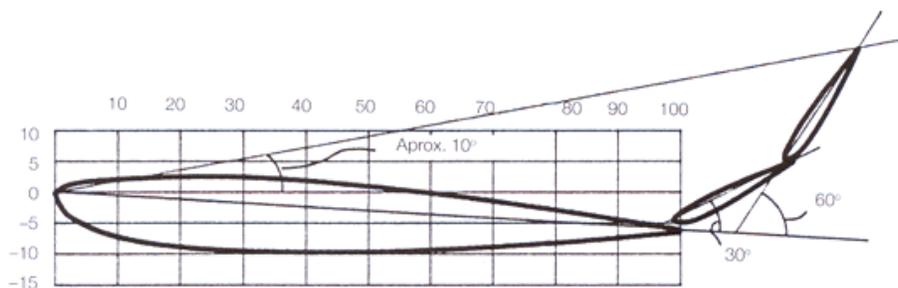


Sección de ala NACA 23012 con flap.



Características de sustentación de un ala de tres elementos: el perfil NACA 23012 con doble flap de 0,40c.

La configuración de tres elementos que aparece aquí es la de un plano principal NACA 23012 con un flap doble, consistente en dos secciones 23012 a escala. No es así como aparece en el libro de Abbot y von Doenhof, ya que la de su libro es más compleja con los flaps sin definir. Así que, una vez más, las formas de los flaps aquí son genéricas, y sólo para ilustrar. Los datos en el gráfico aparecen tal y como lo hacen en el libro.



Sección de ala NACA 23012 con doble flap.

El gráfico muestra que el ala de tres elementos retoma, más o menos, donde lo deja el ala de dos elementos. El reglaje más bajo para el flap delantero es de  $30^\circ$ , el mismo que para el flap trasero, y da un mejor resultado que el flap sencillo del gráfico anterior con un ángulo mayor. Existe, por tanto, un gran aumento en el coeficiente de sustentación con el incremento del flap, seguido de unos aumentos menores si el ángulo se incrementa. El ángulo de pérdida disminuye con el aumento de la desviación del flap delantero, situándose alrededor de los  $10^\circ$  con la inclinación máxima de los flaps. Una vez más, la eficiencia exacta dependerá de la instalación y de la geometría de los flaps en relación con el plano principal y con respecto al otro flap.

## Apéndice 2. Referencias y lecturas recomendadas

\* Indica libros que catalogan los perfiles de ala

- \*ABBOT, I.H. y von DOENHOF, A.J.: *The Theory of Wing Sections*, Dover, 1959.
- ALLEN, J.E.: *Aerodynamics: The Science of Air in Motion*, Allen Bros & Father, 1986.
- \*ALTHAUS, D. y WORTMANN, F.X.: *Stuttgarter Profilkatalog*, Vieweg, 1981.
- ANDERSON, J.D.: *Fundamentals of Aerodynamics*, McGraw Hill, 1991.
- \*BENZING, E.: *Ali/Wings*, Automobilia, 1991.
- CAMPBELL, C.: *Design of Racing Sports Cars*, Chapman and Hall, 1976.
- CIMAROSTI, A.: *The Complete History of Grand Prix Motor Racing*, Guild, 1990.
- DYMOCK, E.: *The Guinness Guide to Grand Prix Motor Racing*, Guinness Superlatives, 1980.
- HENRY, A.: *Brabham. The Grand Prix Cars*, Hazleton, 1985.
- *Grand Prix Car Design and Technology in the 1980s*, Hazleton, 1985.
- HERBERT, P. y HARVEY, D.: *750 Racer*, Patrick Stephens, 1996.
- HOUGHTON, E.L. y CARPENTER, P.W.: *Aerodynamics for Engineering Students*, Edward Arnold, 4.<sup>a</sup> edición, 1993.
- HOWARD, G.: *Automobile Aerodynamics*, Osprey, 1986.
- HUCHO, W.H.: *Aerodynamics of Road Vehicles*, Butterworth, 1987.
- KATZ, J.: *Race Car Aerodynamics. Designing for Speed*, Bentley, 1995.
- KERMODE, A.C. (actualizado por Gunston, B.): *Flight Without Formulae*, Longman, 5.<sup>a</sup> edición, 1989.
- (actualizado por BARNARD, R.H. y PHILPOTT, D.R.): *Mechanics of Flight*, Longman, 10.<sup>a</sup> edición, 1996.
- MCCORMICK, B.W.: *Aerodynamics, Aeronautics and Flight Mechanics*, Wiley, 1995.
- NYE, D.: *McLaren: The Grand Prix, CanAm and Indy Cars*, Hazleton, 1988.
- RUDD, T.: *Tony Rudd: it was Fun! My fifty years of high performance*, Patrick Stephens, 1993.
- SCIBOR-RYLSKI, A.J., *Road Vehicle Aerodynamics*, J. Wiley & Sons, 2.<sup>a</sup> edición, 1984.
- \*SIMONS, M.: *Model Aircraft Aerodynamics*, Argus, 3.<sup>a</sup> edición, 1989.
- SMITH, C.: *Engineer to Win*, Osprey, 1985.
- *Tune to Win*, Osprey, 1985.
- STANIFORTH, A.: *High Speed, Low Cost*, Patrick Stephens, 2.<sup>a</sup> edición, 1973.
- *Race & Rally Source Book*, Haynes, 2.<sup>a</sup> edición, 1989.

- TAYLOR WILDE, M.: *A Practical Guide to Composites*, Multi-Sport Composites, 1995.
- TERRY, L. BAKER, A.: *Racing Car Design and Development*, Motor Racing Publications, 1973.
- WILEY, J.: *Working with Fiberglass: Techniques and Projects*, Tab, 1986.
- WILLS, J.A.: *Glass Fiber Auto Body Construction Simplified*, Dan R. Post, 1964.
- YEAGER, J.: *Voyager*, Knopf, 1986.

## Artículos y textos

- ANSELL, J.: «Aerofoils», *Short Circuit*, septiembre, 1996.
- DAOMINY, J.A. y DOMINY, R.G.: «Aerodynamics Influences on the Performance of the Grand Prix Racing Car», *Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers*, vol. 198, 1984.  
— «The Power of Simulation», *Racecar Engineering*, vol. 6, n.º 2, 1996.
- DOMINY, R.G.: «The influence of Slipstreaming on the Performance of a Grand Prix Car», *Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers*, vol. 204, 1990.  
— «Aerodinamics of Grand Prix Cars», *Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers*, vol. 206, 1992.
- DUNCAN, L.T.: «Wind-Tunnel and Track Testing an ARCA Race Car», *Vehicle Aerodynamics, Recent Progress*, SAE SP 855, 1991.
- FRÈRE, P.: «The Force is with Them», *Car Design and Technology*, agosto/septiembre 1991.
- HENRY, A.: «Mr. Downforce», *Car Design and Technology*, abril 1992.
- JEFFREY, D., XIN ZHANG y HURST, D., «A Wind-Tunnel Investigation of Aerofoils Fitted with Gurney Flaps», *MIRA International Conference on Vehicle Aerodynamics*, 1996.
- KATZ, J.: «Aerodynamics Model for Wing Generated Downforce on Opel Wheel Racing Car Configurations», *SAE Technical Paper Series 860218*, 1986.
- MCBEATH, S.: «Tunnel Visions», *Cars & Car Conversions*, noviembre 1994.  
— «Wind Cheaters», *Cars & Car Conversions*, junio 1995.  
— «Have a Go Aero», *Cars & Car Conversions*, marzo 1996.  
— «DIY Composites», *Racecar Engineering*, vol. 7, n.º 3, 1997.  
— «An Empirical Method for Wing Set-up», *Racecar Engineering*, vol. 7, n.º 7, n.º 4, 1997.
- NELSON, G., «Flight Control», *Racecar Engineering*, vol. 4, n.º 5, 1995.
- O'ROURKE, B.P.: «The Design and Manufacture of Grand Prix Racing Car Components Employing Composite Materials», *Proc. Verbundwerk*, 1992.
- SCARLETT, M.: «Broadley Speaking», *Car Design and Technology*, febrero 1992.
- WRIGHT, P.G.: «The Influence of Aerodynamics on the Design of Formula 1 Racing Cars», *International Journal of Vehicle Design*, SP3, 1983.

Algunas revistas que incluyen frecuentemente artículos sobre la aerodinámica de los automóviles de competición, y que vale la pena leer, son: *Racecar Engineering*, *Autosport*, *Cars & Car Conversions* y *Race Tech*.

# Glosario de términos y abreviaturas

Las palabras en *cursiva* dentro de las definiciones tienen su propia explicación en otra parte del glosario.

**Adquisición de datos:** también conocido como tabulación de datos, es un sistema de recogida de datos de los parámetros del motor y el chasis que sirve para obtener información del comportamiento del coche y las respuestas del piloto.

**Aerodinámica:** el estudio de la interacción entre el aire y los cuerpos sólidos que se mueven a través de éste. En el contexto de este libro, los «cuerpos sólidos» son los coches de carreras y sus componentes.

**Alerón:** en automovilismo, es sinónimo de ala. Es un elemento para crear *carga aerodinámica* e incluir los nombres de los patrocinadores.

**Alerón inferior:** término general para designar un fondo perfilado, tanto si incorpora túneles, como su fondo plano y difusor.

**Altura de rodadura:** la altura del chasis al suelo es considerada como el huelgo existente entre el fondo del coche y el suelo. Se suele tomar en dos puntos, uno sobre el eje delantero y otro sobre el trasero

**Ángulo de ataque:** el ángulo entre la *línea de cuerda* del ala y el flujo de aire incidente.

**Área frontal:** generalmente es el área que se ve desde delante de un coche (corte frontal), aunque a veces se simplifica a ancho multiplicado por alto.

**Cabeceo:** el movimiento de un vehículo en el cual la parte delantera se mueve hacia arriba y hacia abajo en relación con su posición estática.

**Caja de aire:** un elemento que bloquea parte del flujo de aire a la zona inferior de un coche.

**Canalizadores laterales de difusor:** placas planas o curvadas, normalmente montadas de manera vertical, cuyo propósito es el control del flujo de aire.

**Capa límite:** una capa en la que el aire se mueve lentamente de manera adyacente a las superficies del cuerpo. El rozamiento entre el cuerpo y el aire frena el flujo que se encuentra más cerca de la superficie, mientras que el aire del *flujo principal*, más alejado del cuerpo, fluye sin problemas.

**Carcasa:** una placa plana, horizontal, montada en la parte inferior justo por delante de los neumáticos traseros y que se extiende por delante de éstos, normalmente es una extensión del fondo.

**Carga o apoyo aerodinámico:** lo contrario de *sustentación* aerodinámica, algunas veces conocido como sustentación negativa.

**CART:** Championship Auto Racing Teams, el organismo regulador del campeonato Champ Cars (ex Indycar).

**Centro de presión:** el punto en el cual las fuerzas aerodinámicas actúan sobre un cuerpo, y en el cual no hay momento aerodinámico. En terminología mecánica es análogo al centro de gravedad.

**Coefficiente de penetración o  $C_x$ :** un valor sin unidades que permite la comparación de la resistencia inducida por cuerpos de diferentes formas y tamaños.

**Coefficiente de presión o  $C_p$ :** un valor que actúa como medio para indicar la presión local en un punto de interés alrededor de un cuerpo, y que es independiente de la velocidad del aire.

**Coefficiente de sustentación o  $C_L$ :** un valor que permite la comparación de la sustentación en cuerpos con diferentes formas y tamaños. Un coeficiente de sustentación positivo representa la *sustentación*, mientras que uno negativo representa la *carga aerodinámica*.

**$C_L$ :** abreviatura de **coeficiente de sustentación**.

**$C_p$ :** abreviatura de **coeficiente de presión**.

**$C_x$ :** abreviatura de **coeficiente de penetración**.

**Cuerda:** la distancia entre el borde de ataque y el borde de fuga de un ala.

**Curvatura:** cuando un *perfil de ala* tiene una superficie curvada más que la otra se dice que tiene curvatura.

**Deflector lateral:** una placa curvada, generalmente vertical, situada por detrás de las ruedas de un coche de competición descubierto, cuyo propósito es dirigir y controlar el flujo de aire.

$\Delta$ : la letra griega «delta», utilizada para representar una variación (incremento o decremento) en un parámetro: por ejemplo,  $\Delta C_D$  sería un incremento en el *coeficiente de penetración*.

**Densidad:** la masa por unidad de volumen de una sustancia. En el caso del aire, este libro usa la cifra de 0,00238 libras por pie cuadrado (lb/ft<sup>3</sup>).

**Deriva (o guiñada):** el movimiento de un vehículo alrededor de su eje vertical, de tal modo que apunta en diferente dirección que la de su trayectoria real.

**Deriva lateral:** también conocida a veces como deriva de desborde, es una placa más o menos plana y vertical de un material rígido situada en los bordes de un ala.

**Diedro negativo:** el ángulo entre un ala y su horizontal cuando el *alerón* está inclinado hacia delante.

**Difusor:** la sección divergente de un conducto que frena el flujo de aire. En un coche de competición es un panel o paneles curvados hacia arriba en la parte trasera del *fondo* o al final de los *túneles*.

**Dinámica Computacional de Fluidos (DCF):** el uso de los ordenadores para calcular las ecuaciones dinámicas de los fluidos complejos que resuelven los problemas de flujo alrededor de un cuerpo.

**Distribución de presión:** la representación de las presiones locales en los puntos de un cuerpo que pasa por el aire. La suma de todas las presiones en un cuerpo es la *fuerza aerodinámica*.

**Divisor de flujo:** una extensión hacia delante, horizontal y generalmente plana de una *caja de aire*.

**Efecto suelo:** la modificación aerodinámica del flujo de aire debajo de un vehículo causada por su proximidad con respecto al suelo. Todos los coches sufren el efecto suelo, aunque no todos lo explotan de manera beneficiosa.

**Envergadura:** la dimensión de lado a lado de un ala.

**Estela:** el aire perturbado de detrás de un cuerpo que pasa por el aire. El aire dentro de la estela tiende a moverse a lo largo del cuerpo.

**Faldón:** un elemento que sirve para reducir o tapar el hueco entre los lados de un vehículo y el suelo con el fin de controlar el flujo de aire de debajo del coche, y sellarlo del exterior.

**FIA:** la Federation International d'Automobile, el organismo regulador del automovilismo en todo el mundo.

**Flap:** parte de un alerón de varios elementos, montado justo arriba (en un coche de carreras) y por detrás del elemento principal, con el propósito de aumentar la carga aerodinámica.

**Flap Gurney:** una pequeña tira fijada al borde de fuga de un alerón, perpendicular a la superficie superior del ala, que tiene el propósito de mejorar la carga aerodinámica.

**Fluido:** normalmente una sustancia líquida o gaseosa que tiene la capacidad de fluir. En condiciones normales, el aire es un fluido.

**Flujo adherido:** un régimen en el que el flujo de aire sigue los contornos de las superficies del cuerpo por el que pasa.

**Flujo laminar:** flujo en el que las capas de aire adyacentes a un cuerpo se mueven suavemente las unas sobre las otras.

**Flujo principal:** es la parte del flujo de aire alrededor de un cuerpo que está lo suficientemente alejada para no verse afectada por el rozamiento del cuerpo. Por esto, la velocidad del flujo principal siempre será igual, aunque en dirección contraria, a la velocidad del cuerpo.

**Flujo separado:** un régimen en el cual el flujo no sigue el contorno y las superficies del cuerpo por el que fluye.

**Flujo turbulento:** flujo cuyas capas de aire adyacentes a un cuerpo no se desplazan las unas sobre las otras, sino que se mezclan y se enredan. La velocidad media del flujo puede ser la misma que en el caso laminar, pero las líneas de flujo dentro de un flujo turbulento son mucho más complejas.

**Fondo:** término general para designar la parte inferior de un coche de carreras.

**Fuerza aerodinámica:** la fuerza creada por el movimiento de un vehículo en su paso a través del aire. Es la combinación de *resistencia* aerodinámica y *sustentación* aerodinámica.

**Garganta:** la parte más estrecha de un *Venturi*.

**Gradiente de presión:** cuando el aire es acelerado la presión se reduce (*Teorema de Bernoulli*). Una región con presión decreciente constituye un «gradiente de presión favorable». Donde el flujo de aire comienza a frenarse de nuevo, la presión local aumenta, constituyendo un «gradiente de presión adversa».

**Indycar:** nombre genérico para los monoplazas de la *CART* (ahora *Champ Car*) y la *IRL*.

**IRL:** Indy Racing League, un certamen competidor de la *CART*, cuyos coches son muy similares en su forma general a los de ésta.

**Lámina:** parte de un alerón de varios elementos, fijada (en un coche de carreras) justo por delante y debajo del borde de ataque del elemento principal, con el propósito de aumentar la carga aerodinámica.

**Línea de cuerda:** una línea que une el borde de ataque con el borde de fuga.

**Línea de flujo:** la trazada del flujo de una partícula de aire al atravesar un cuerpo. Las líneas de flujo son representadas gráficamente como un conjunto de curvas alrededor de un objeto definiendo las direcciones del flujo.

**NACA:** National Advisory Committee for Aeronautics (Comité Asesor Nacional de Aeronáutica), el predecesor de la NASA, la agencia aeroespacial americana. Entre otras cosas, la NACA catalogó un gran número de perfiles de ala.

**NASCAR:** National Association for Stock Car Auto Racing (Asociación Nacional de Carreras de Coches de Stock), el organismo regulador de la Winston Cup, el campeonato más importante de USA.

**Número de Reynolds:** un valor sin dimensión que es proporcional a la velocidad del aire de un cuerpo multiplicada por «una longitud característica», como la longitud de un vehículo, o para un ala, su *cuerda*. El Número de Reynolds es utilizado para indicar efectos a escala.

**Perfil de ala:** una sección de ala es, estrictamente hablando, la sección transversal de un *alerón*. Pero en automovilismo se utiliza normalmente para designar al propio *alerón*.

**Perturbación inferior:** la parte de un flujo de aire que se desvía hacia abajo mediante un *perfil de ala*. En el caso de un ala inductora de carga aerodinámica, la perturbación ocurre justo delante del ala.

**Perturbación posterior:** la parte del flujo de aire desviado hacia arriba por un ala. En el caso de un *alerón* inductor de carga aerodinámica, la perturbación se produce por detrás de éste.

**Placa de hundimiento:** una placa inclinada, fijada a la parte delantera de un vehículo para modificar y ajustar el flujo de aire.

**Placa desviadora:** una placa plana, normalmente inclinada, fijada a los lados de un vehículo para modificar y ajustar el flujo de aire.

**Presión:** cuando un cuerpo está quieto, y no hay aire pasando por él, la suma de las presiones en el cuerpo se equilibran. Sin embargo, cuando un cuerpo pasa a través del aire, las presiones pueden cambiar, y, en el caso de una ala, tienen lugar las fuerzas de *sustentación* y *resistencia* como resultado de los cambios en la *distribución de presión*.

**Ranura:** el hueco entre los elementos de un *alerón*, es decir, entre el elemento principal y el *flap*.

**Relación de aspecto:** es la relación aritmética de la dimensión de una *envergadura* dividido por la dimensión de la *cuerda*.

**Relación sustentación/resistencia:** la relación aritmética de la *sustentación* dividida por la *resistencia*, a menudo utilizada como una medida de la eficiencia aerodinámica de un vehículo.

**Resistencia aerodinámica:** es el componente de la *fuerza aerodinámica* que es paralelo, pero opuesto, al movimiento de un cuerpo en su paso por el aire. La *resistencia de forma*, la *resistencia inducida* y la *resistencia por rozamiento superficial* son componentes de la resistencia que pueden afectar a un vehículo.

**Resistencia de forma:** la porción de la resistencia de un cuerpo causada por el componente horizontal de la *distribución de presión* general. La resistencia de forma, a veces conocida como resistencia de presión, tiene lugar cuando hay presiones más altas en la parte delantera que en la trasera. Un cuerpo con forma de «gota» tiene por tanto una resistencia de forma baja, mientras que en la mayoría de los coches, la resistencia de forma es significativa.

**Resistencia inducida:** es la porción de la resistencia causada por la generación de *sustentación* (o carga aerodinámica).

**Resistencia por rozamiento:** la parte de la *resistencia* causada por el rozamiento entre el aire y la superficie de un cuerpo. En el caso de los vehículos, contribuye de forma mínima a la resistencia general.

**Rugosidad:** describe la variación de, por ejemplo, el fondo de un vehículo de una «superficie media». Por esto, un vehículo de serie con sus cavidades y protuberancias tiene un fondo rugoso, mientras que un coche con paneles tiene un fondo plano.

**Sensibilidad al cabeceo:** la cantidad de carga aerodinámica puede verse alterada con los cambios de altura de la parte delantera como consecuencia del *cabeceo*. Esto puede afectar las prestaciones y las sensaciones del coche.

**Spoiler:** cualquier elemento cuyo propósito sea deshacerse del flujo de alta presión para reducir la sustentación de un vehículo.

**Superficie de planta:** el área definida por la silueta vista desde arriba, o en el caso de un ala rectangular, la dimensión de la *envergadura* multiplicada por la de la *cuerda*.

**Sustentación:** el componente aerodinámico de la fuerza aerodinámica que es perpendicular a la dirección en la que se mueve un cuerpo, dirigido verticalmente hacia arriba o hacia abajo.

**Teorema de Bernoulli:** de éste se deriva que, esencialmente, donde el flujo de aire se acelera, por ejemplo alrededor de un cuerpo, la presión de esa zona disminuye.

**Túnel:** un nombre genérico para las secciones Venturi tridimensionales del fondo de un coche, especialmente cuando van montados a pares, con uno a cada lado de la unidad de chasis/motor/transmisión.

**Túnel de viento:** una sala en la cual se hace pasar un flujo de aire rápido a través de un vehículo real o uno a escala, con el propósito de recoger datos aerodinámicos.

**Túnel de viento con suelo móvil:** un túnel de viento equipado con una cinta que simula el suelo pasando por debajo del coche. Esto permite igualar la velocidad del aire a la del suelo, garantizando un flujo de aire realista adyacente al suelo, y por debajo del vehículo.

**Venturi:** estrictamente hablando, se trata de un tubo estrecho que une dos secciones más anchas, cuyo propósito es acelerar el flujo y causar una reducción en la presión. En el contexto de los coches de carreras, Venturi es sinónimo de *túnel*.

**Viscosidad:** resistencia a fluir, o moverse a través de un fluido, y análogo a la fricción mecánica.

**Visualización del flujo:** término general para designar los métodos mediante los cuales el flujo de aire alrededor de un cuerpo se vuelve visible.

**Vórtice:** un movimiento rotatorio en una parcela de aire.

**Zona de estancamiento:** un punto, normalmente cerca de la parte delantera de un cuerpo en movimiento, donde la velocidad del aire es cero y la presión es alta (el coeficiente de presión es 1).



Este libro es, probablemente, la primera guía práctica sobre aerodinámica de los automóviles de competición y atraerá, sin duda, a una amplia gama de lectores, desde el aficionado al deporte del motor hasta los diseñadores y fabricantes en los cientos de categorías del deporte automovilístico que utilizan la aerodinámica como herramienta de trabajo.

Simon McBeath ha conseguido tratar aspectos tan variados como la teoría esencial (con un mínimo de matemáticas), la creación de la resistencia aerodinámica mediante apéndices aerodinámicos, con una explicación de su funcionamiento. El autor ha utilizado su propia experiencia, acumulada a lo largo de 18 años tanto conduciendo como experimentando con la aerodinámica de los automóviles, para escribir su obra, e incorpora casos estudiados en diversas categorías del deporte automovilístico en Europa y en Estados Unidos.



ISBN 84-329-1147-X



9 788432 911477