AERODINÁMICA

Xabier Carrera Akutain 68972
Jon Hualde Garaikoetxea 68992
Miguel Mateos Pastor 71827

ÍNDICE

1.INTRODUCCIÓN	pág.2
2.EVOLUCIÓN HISTÓRICA	pág.4
3.CONCEPTOS CLAVE	pág.7
4.APLICACIÓN EN AUTOMÓVILES DE COMPETICIÓN	pág.9
5.TIPOS DE ANÁLISIS	pág.12
6.CONFIGURACIONES QUE MARCARON ÉPOCA	pág.13
7.AMG MERCEDES LE MANS 99	pág.15
8.BIBLIOGRAFÍA	pág.19
9.URL's	pág.19

AERODINÁMICA

1. INTRODUCCIÓN

La aerodinámica es un factor fundamental en el funcionamiento de un coche. Nos indica por un lado la resistencia al aire que opone el vehículo (arrastre o *drag*) y por otro cuánto se pega (sustentación o *lift*) al suelo o despega (carga aerodinámica o *downforce*) de él.

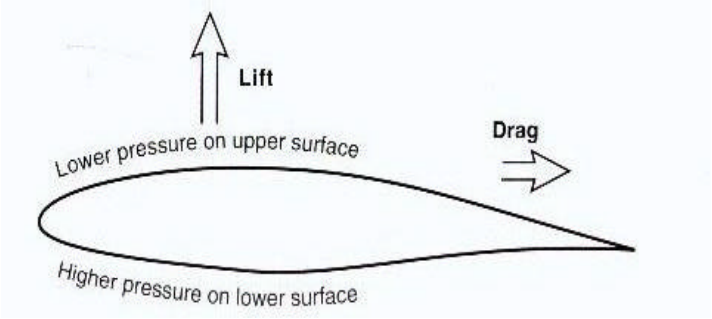

Fig. 1

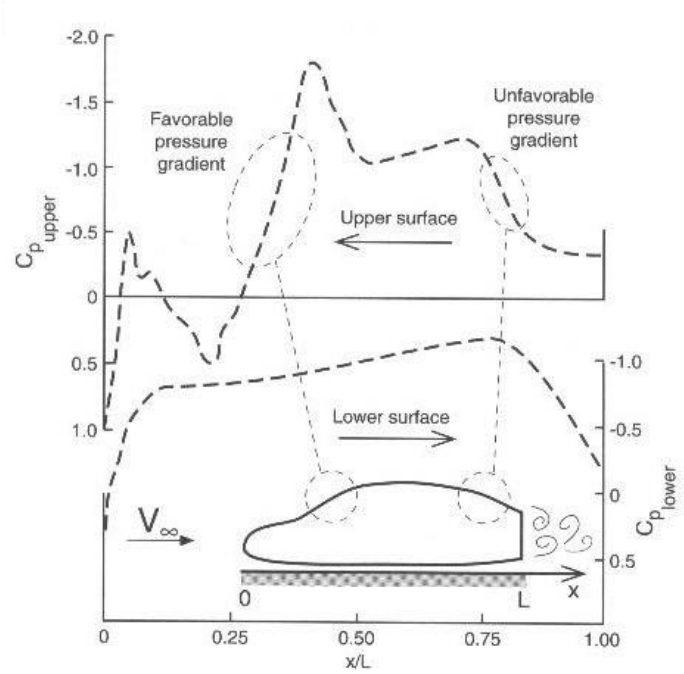

Fig. 2

El principio básico que nos dicta la eficiencia aerodinámica es la ley de Bernoulli. En esta configuración el aire circula por la parte de arriba del ala a una velocidad superior que por la parte inferior. La diferencia de presiones crea una fuerza de sustentación positiva hacia arriba (fig. 1). Sucede lo mismo en la dirección de desplazamiento del coche. En el morro hay un punto de velocidad cero llamado punto de estagnación, donde toda la energía es de presión (coeficiente de presión C_p=1). Se observa que al final del coche C_p es menor, por lo que habrá un *drag* penalizándonos. Además, hay que tener en cuenta los gradientes de presiones. Si estos son excesivamente negativos, ocurrirán separaciones de flujo parciales (burbuja) o totales, que siempre son perjudiciales (fig.2).

Como ejemplo introductorio, la fig.4 nos muestra un perfil aerodinámico y una circunferencia de sección de área diez veces menor que el ala. El *drag* inducido en los dos cuerpos es el mismo.

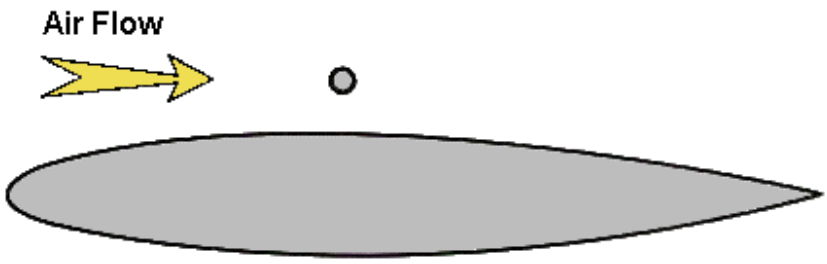

Fig.3

2. EVOLUCIÓN HISTÓRICA

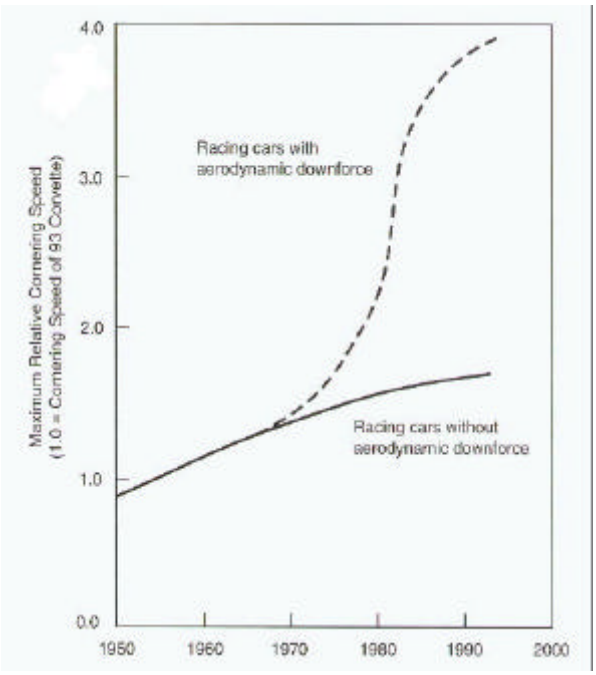

Fig. 4

El incremento exponencial de la velocidad de paso por curva se debe a un mejor estudio y aplicación de la técnica aerodinámica. A finales de los 60 comienza a utilizarse el perfil de ala de avión invertido, para conseguir de este modo mayor carga y pegar el coche al suelo. El aumento de la fuerza normal hace que los neumáticos puedan soportar fuerzas tangenciales mayores (?F) sin deslizar y por lo tanto la estabilidad se mejora en gran medida. La tendencia se aprecia en la figura 4.

Diez años más tarde ocurre otro salto en la mejora con la aplicación del efecto suelo. Al estar los perfiles más pegados a él, el perfil de velocidades cambia y el flujo se acelera por el *underbody*. Se crea de este modo una gran succión, y la carga aerodinámica se dispara, tal y como se expone en la fig. 5.

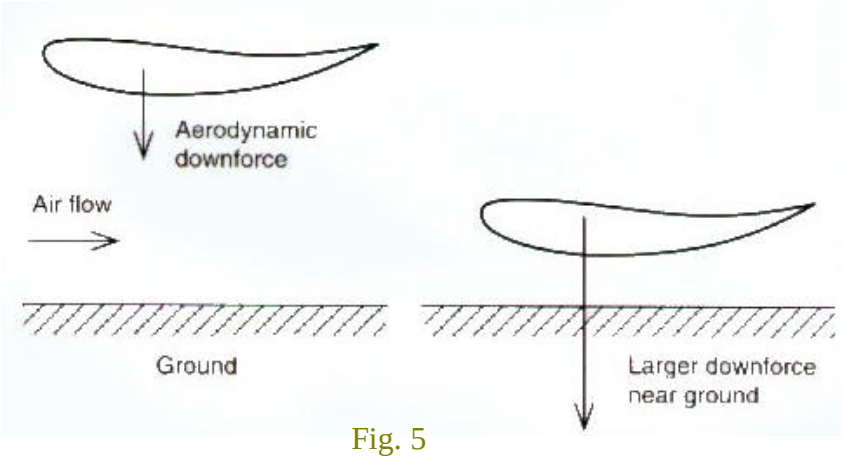

Fig. 5

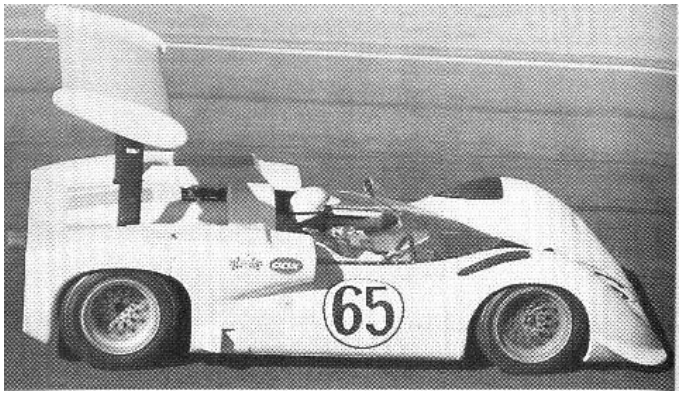

Fig. 6 Chaparral de 1966. Uno de los primeros bólidos con perfiles de ala invertida

En la evolución de la aerodinámica lo primero que se intento reducir fue el d*rag*, que se crea por tres aspectos principalmente:

- Rozamiento viscoso del aire
- Separación de flujo
- Inducido directamente por el *lift*

Se intentará buscar un camino fácil para que circule el fluido y evitar así la separación de flujo, como podemos observar en este *Tropfenwagen* (coche gota) de los años 30 de la figura 7. Este vehículo alemán tiene una clara forma de gota, gracias a la cual posee un coeficiente de *drag* C_d muy pequeño, menor que los turismos actuales.

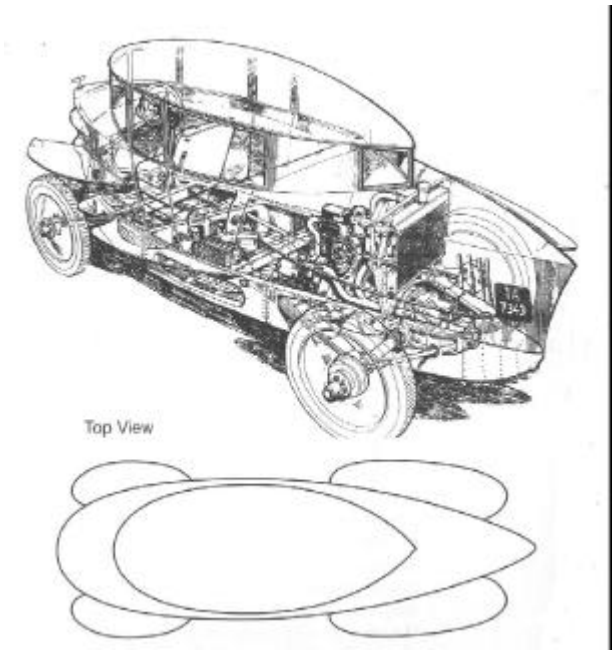

Fig. 7

En la competición como en la vida hay que llegar a situaciones de compromiso, con mayor importancia de la carga sobre el *drag*. En un circuito que fuera idealmente una sucesión de rectas largas, primaría la reducción de *drag* para conseguir velocidad punta. En el extremo opuesto, para los circuitos de curvas lentas es primordial buscar la máxima carga posible con objeto de conseguir estabilidad. Para cada circuito se busca la configuración idónea regulando principalmente el número e inclinación de alas y *flaps* del alerón posterior.

Fig. 8

En la fotografía se comprueba como el Bar de Ricardo Zonta durante unas pruebas de invierno (fig. 8) tiene “mucha ala” (varios elementos con una inclinación considerable en el alerón posterior). Se trata del circuito sudafricano de Kyalami, bastante lento. La necesidad de carga se ve aumentada por la lluvia. Por el contrario el Sauber de Jean Alesi en el GP de Monza de 1999 (fig. 9) lleva “poca ala” por ser un circuito rapidísimo.

Fig. 9

3. CONCEPTOS CLAVE

La carga nos la dan:

?? Forma del cuerpo del coche
?? Alas invertidas
?? Interacción de flujo entre alas y cuerpo

No debemos estudiar la forma del coche y las alas de forma separada sino que hay que tener en cuenta la interacción entre dichos elementos.

El elemento principal es el perfil 2-D NACA. Se estudia ese perfil, pero además de eso hay que tener en cuenta varios factores:

- Al ala no le llega un fluido con perfil laminar de velocidades. Puede variar mucho dependiendo de dónde esté situado el ala, si tenemos un coche delante, etc. El hecho de tener un coche delante provoca grandes turbulencias que hacen ingobernable el seguidor. Esta es la causa de la escasez de adelantamientos los últimos años, donde la victoria se juega principalmente en los boxes.

- Cambiando ángulo de ataque, combadura, longitud, añadiendo elementos, usando multi - alas y un innumerable etcétera, se consigue variar el efecto.

- Existe riesgo de llegar al *Stall* o descalabro a partir de un cierto ángulo (fig.10)

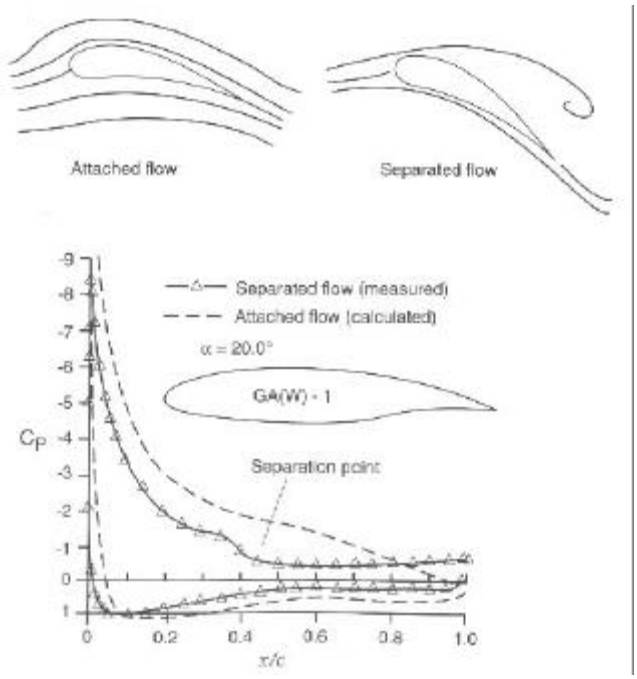

Fig. 10

- El efecto es distinto dependiendo de la altura libre al suelo, como ya se ha comentado anteriormente..

- 3-D es distinto a 2-D. El ala no es de anchura infinita como se supone en el análisis 2-D, por lo que en los extremos el aire va por el camino más fácil, rodeando el borde y creando un vórtice en lugar de crear una fuerza de sustentación (fig. 11). Esto además varía el perfil de velocidades de la zona central del ala, donde se llega antes a la separación de flujo.

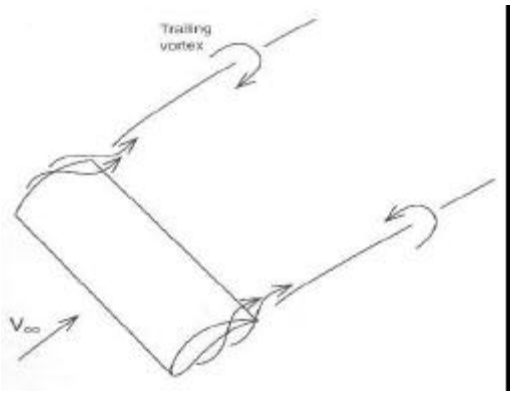

Fig. 11

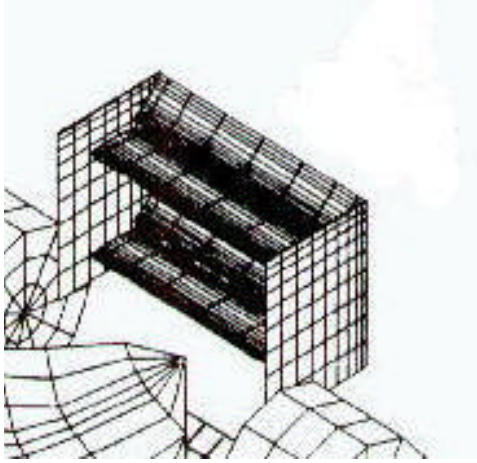

Fig. 12

Para evitar esto se colocan unas planchas en los extremos (fig.12). Además se consigue el efecto vela, que estabiliza el coche bajo fuertes ráfagas del viento lateral, ya que buscamos retrasar el centro de presiones del coche por detrás del centro de gravedad. Observamos una pequeña aleta de tiburón en el Penske de la figura 13 de Michael Andretti.

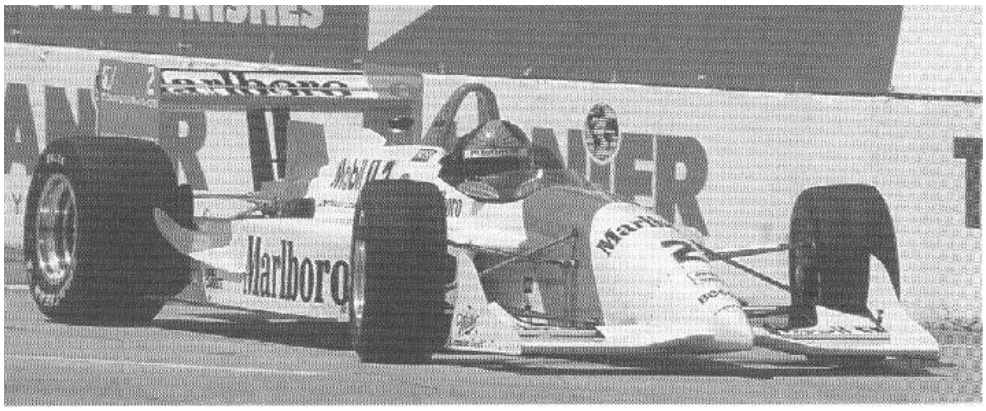

Fig. 13

- El sistema de refrigeración ha de ser cuidadosamente estudiado para que no provoque demasiado *drag* y no introduzca turbulencias. En los F-1 hay tres entradas principales, dos en los laterales (en parte para refrigerar la electrónica) y una gran toma detrás del piloto.

4. APLICACIÓN EN AUTOMÓVILES DE COMPETICIÓN

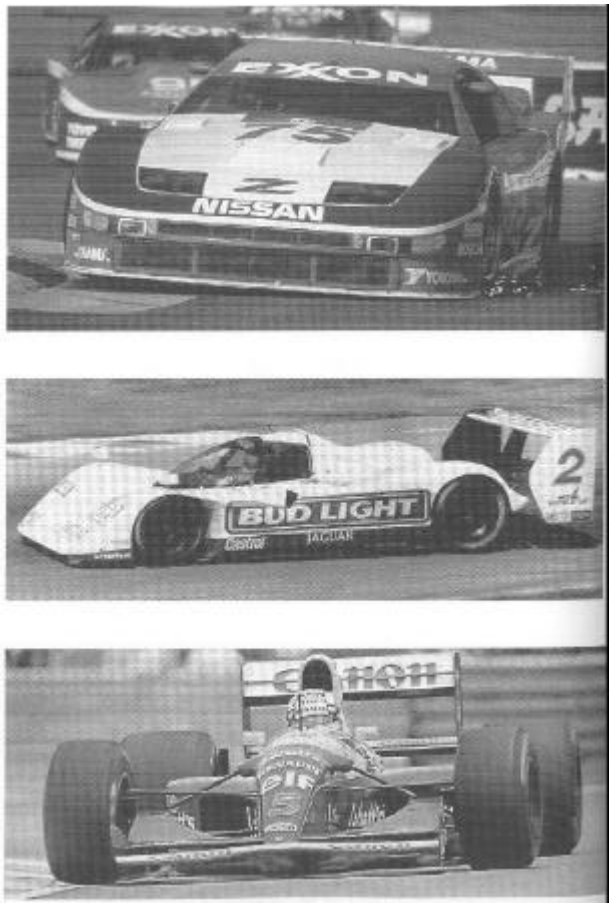

Fig. 14

GT: son coches de chasis tubular que sólo comparten la carrocería con el modelo de calle del que reciben el nombre. Se ven limitados por esta carrocería, a la que se le pueden añadir unos cuantos aditamentos más.

PROTOTIPOS: el sueño de cualquier aerodinamicista, ya que apenas sufren limitaciones legales en esta área.

F-1: limitadísimos aerodinámicamente, sobre todo por tener las ruedas al descubierto, que confieren mucho *drag* por producir gran estela y por lo tanto enormes separaciones de flujo.

Además la FIA(federación internacional de automovilismo) limita todos los años la aerodinámica de los F-1. Estas limitaciones suelen ser restricciones de dimensión, como anchura de ala, distancia libre al suelo, etc. o directamente prohibiciones, como los canales o venturis en el *underbody* o fondo. En la Indy se permiten estos canales, pero en la F-1 sólo puede inclinarse un poco el panel plano inferior a partir de una cota longitudinal. Se quiere por parte de la FIA reducir la velocidad de paso por curva ,pero los diseñadores siempre logran un avance más. En la F-1 hoy en día la limitación es el piloto y no el coche en este aspecto, ya que la aceleración lateral que soportan

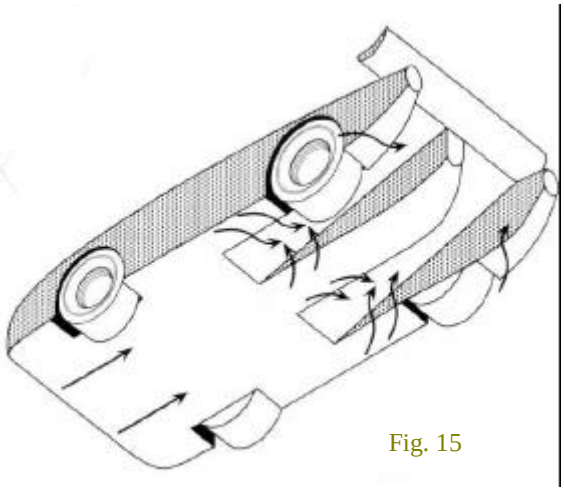

Fig. 15

actualmente en curva estos hombres es solo soportable por pilotos de cazas. La figura 15 muestra el efecto de estos canales. El flujo se canaliza por estos, de modo que choca menos aire contra la rueda, el fondo crea más succión, inyecta aire en la estela del coche y pone a disposición de la parte inferior del alerón posterior aire a alta velocidad y por lo tanto de baja energía de presión.

Diversidad de factores influyentes

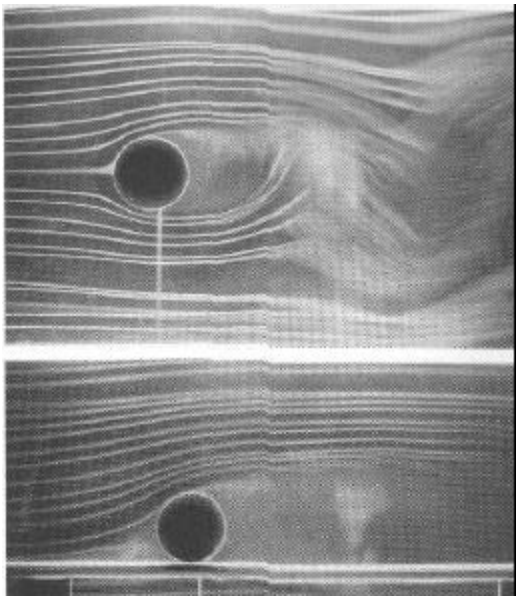

Fig.16

En la figura 16 observamos el cambio en las lineas de flujo dependiendo de la distancia al suelo, y en la 17 la influencia que tiene el que la rueda esté rotando (izda.) o parada (dcha.)

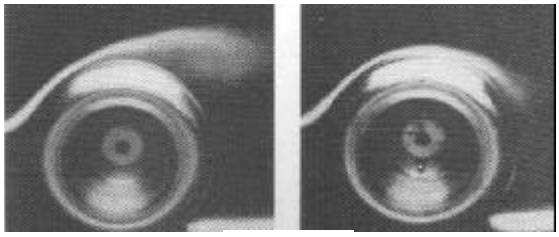

Fig. 17

Fig. 19

Para minimizar el perjuicio que causan las ruedas abiertas, se inyecta aire por elementos canalizadores de flujo en la estela formada por las ruedas (fig. 18).De este modo evitamos en parte la separación de flujo, conseguimos menos *drag* y logramos un aire más adecuado para los elementos aerodinámicos posteriores.

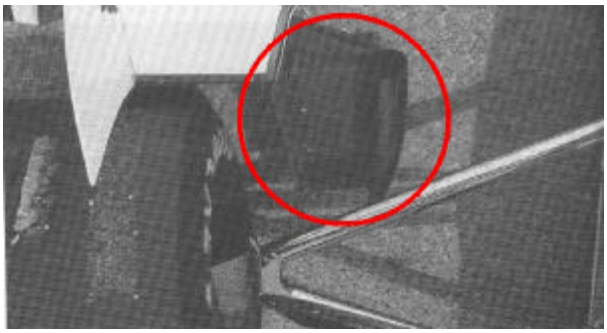

Fig. 18

De modo similar, con la forma del chasis de la figura 19 se intenta que el aire no choque tan frontalmente con la rueda. Además, el punto de estagnación se eleva, con lo que se consigue más carga.

La aerodinámica es una ciencia compleja y con muchas variables. Algunas de éstas son:

- Fig.20 superior: Coeficiente de *lift* (*lift* negativo es equivalente a *downforce*) y ratio *lift-drag* versus ángulo de incidencia. A mayor ángulo, menos carga, más tendencia a despegar. Mínimo en –1 grados. Si es menor, entra menos flujo por lo que induce menos carga.

- Fig.20 inferior: sucede lo mismo con la distancia libre al suelo.

- Fig.21: variación de *lift* y *drag* colocando *flips* y *flaps*.

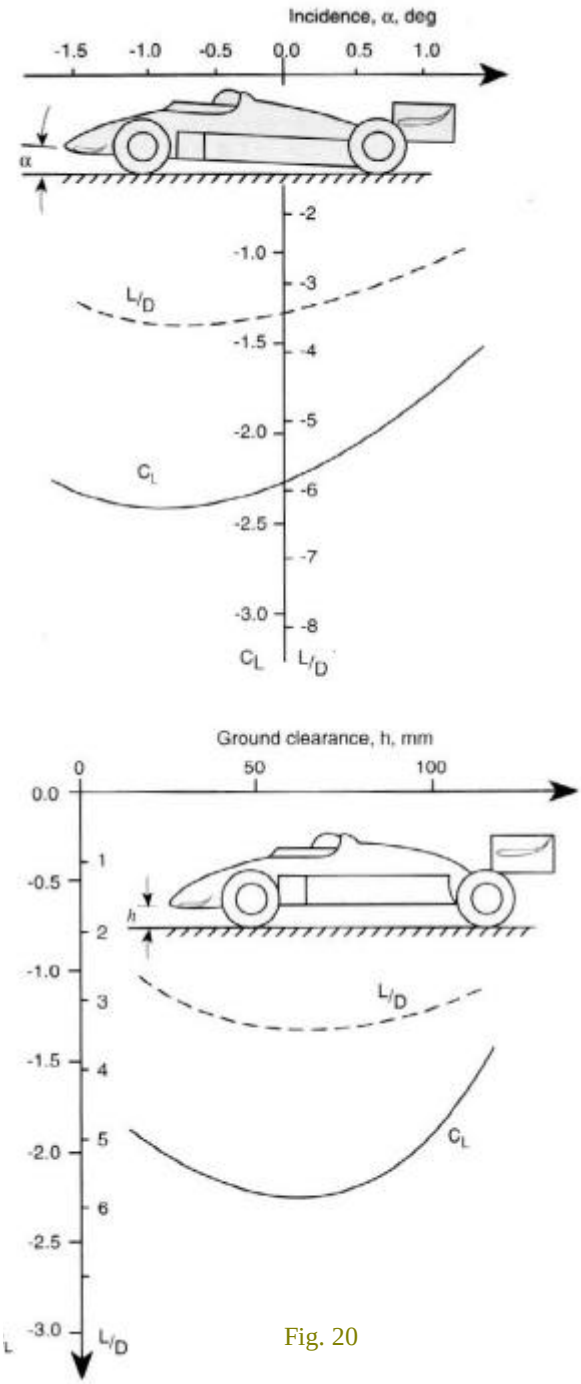

Fig. 20

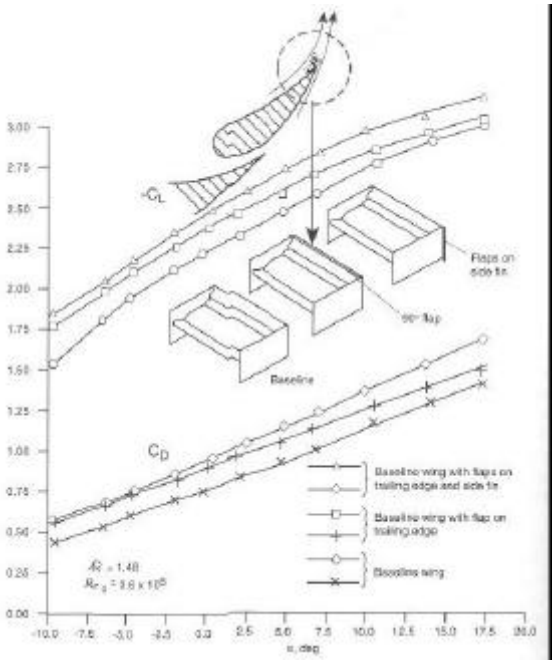

Fig. 21

5. TIPOS DE ANÁLISIS

El estudio computacional de la ecuación completa de Navier Stokes, sólo es posible hoy para perfiles 2-D mediante superordenadores (fig.22). Así hay que combinar esta técnica con las mediciones en pista de tiempos y de presiones con tubo de Pitot y los túneles de viento.

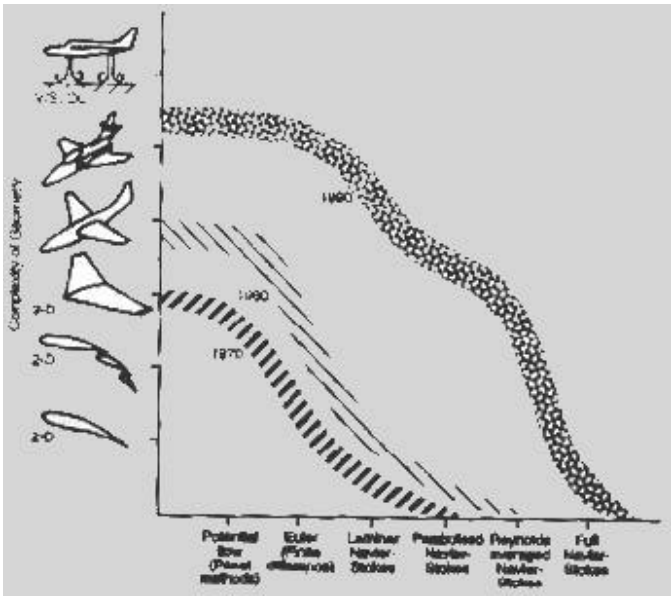

Fig.22

TÚNELES DE VIENTO

Hay que tener un gran conocimiento de mecánica de fluidos y un potencial económico considerable para lograr resultados de una cierta fiabilidad.
Primeramente la anchura limitada del túnel hace que el fluido se acelere por el hueco coche - pared, por lo que hay que buscar elementos que minimicen esto (fig.23).

El suelo no permanece estático en la pista, por lo que se construyen platos de succión, plataformas elevadas, etc., y ejes que hagan girar las ruedas La solución más obvia, la de hacer una cinta móvil, ha sido limitada por la velocidad hasta recientemente. Nuevos materiales posibilitan velocidades de hasta 180 km/h. (fig.24, túnel de viento de Jaguar) Es muy utilizada la solución de inyectar flujo tangencial, que equilibre el momento del flujo

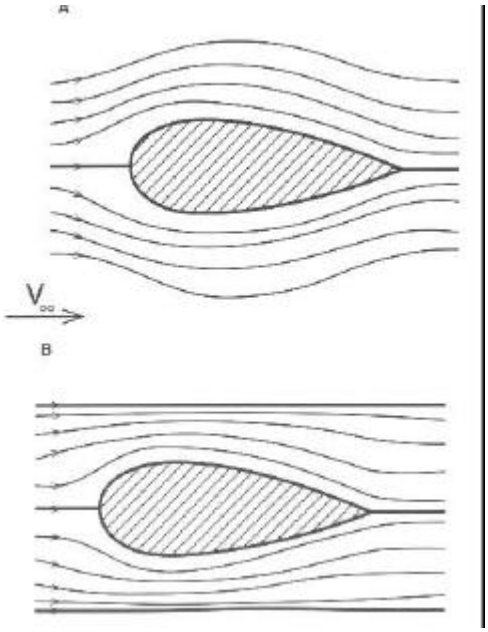

Fig. 23

original. Se presentan múltiples dificultades además de las citadas que aquí no se presentarán por brevedad.

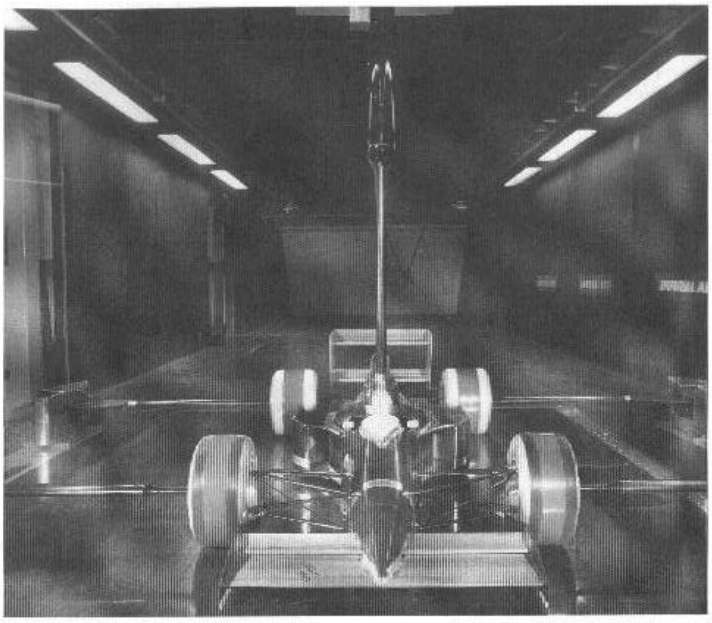

Fig.24

6. CONFIGURACIONES QUE MARCARON ÉPOCA

En la figura 25 se observa el Chaparral 2J de 1969, dominador de la CanAm de ese año. Los faldones de los extremos producen un mejor encauzamiento del flujo y de este modo mayor carga. Al ser rígidos estos faldones, el coche era muy susceptible al ángulo de balanceo, por lo que apenas debía inclinarse, además de por la circunstancia obvia de no romper el faldón. Las turbinas de la parte posterior del coche tienen un doble efecto: por una parte chupa el aire de debajo del coche, creando una succión y mayor carga, y por otro lado inyecta ese aire en la estela provocada por el vehículo, reduciendo así la separación de flujo.

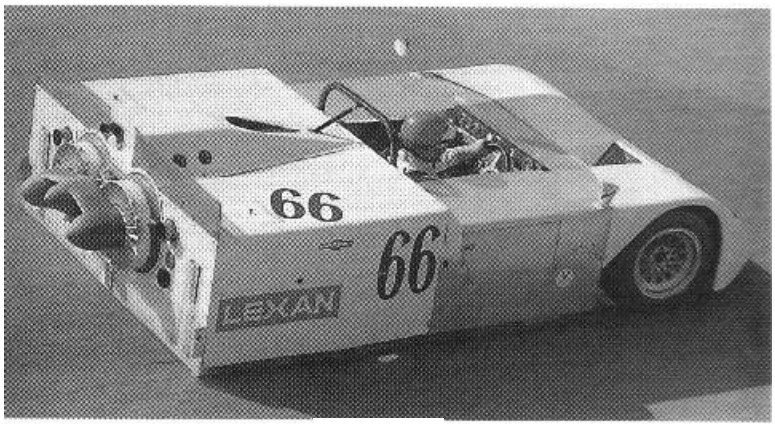

Fig.25

En el Brabham de Niki Lauda del gran premio de Suecia de 1978 (fig. 26) el faldón flexible y el enorme ventilador creaban una carga brutal, aspecto que le dio una victoria incontestable al genio austríaco en la primera y última carrera de este modelo. La FIA, siempre velando por el interés de todos, prohibió inmediatamente esta disposiciones.

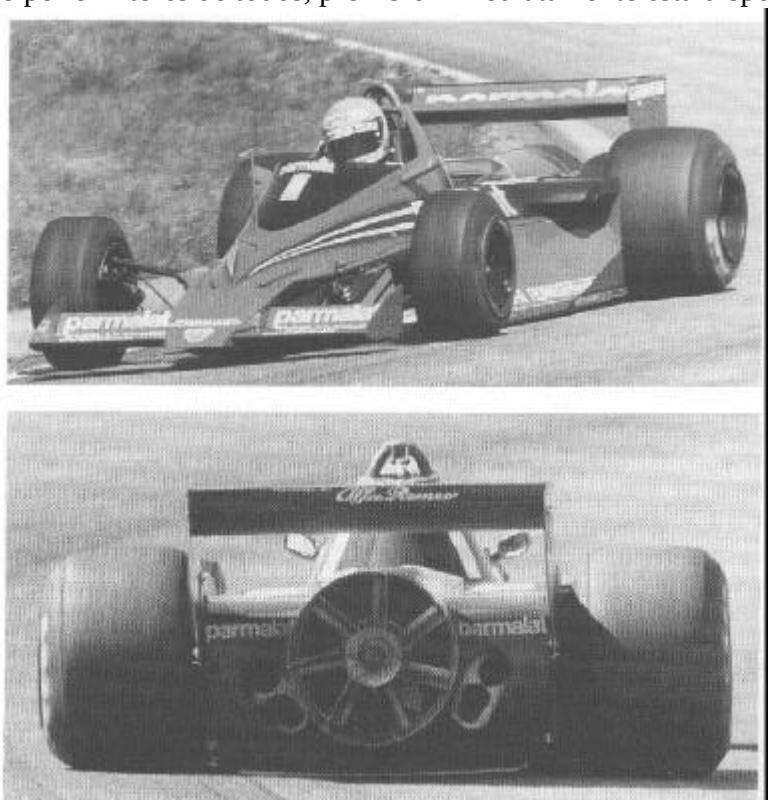

Fig.26

En este Lotus de 1978 del gran Mario Andretti (fig.27) se observa claramente cómo se le confiere forma de ala invertida al lateral del monoplaza, siempre buscando la máxima carga posible.

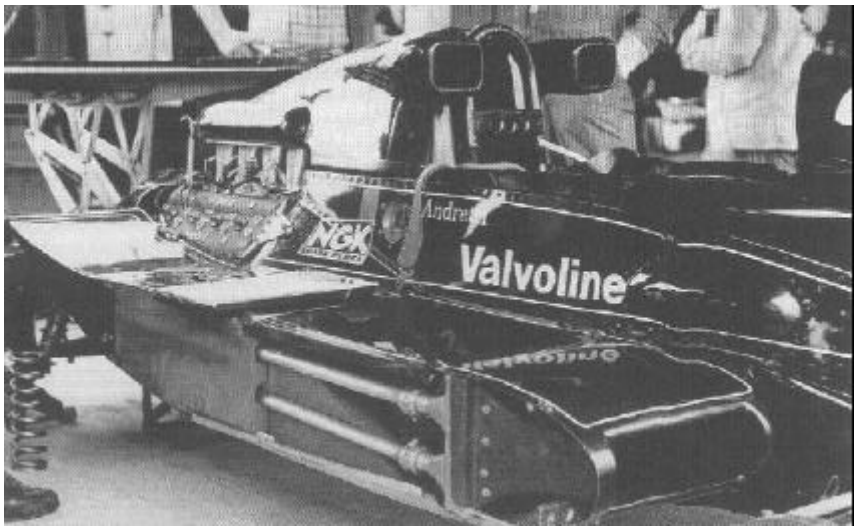

Fig.27

Ferrari fue la primera que fabricó las salidas de gases integradas en el chasis (fig.28), aunque hubo ciertos problemas iniciales debido al calor que transmitían los gases a los alerones. Las placas que se observan a ambos lados del habitáculo encauzan el fflujo hacia las bocas laterales de refrigeración.

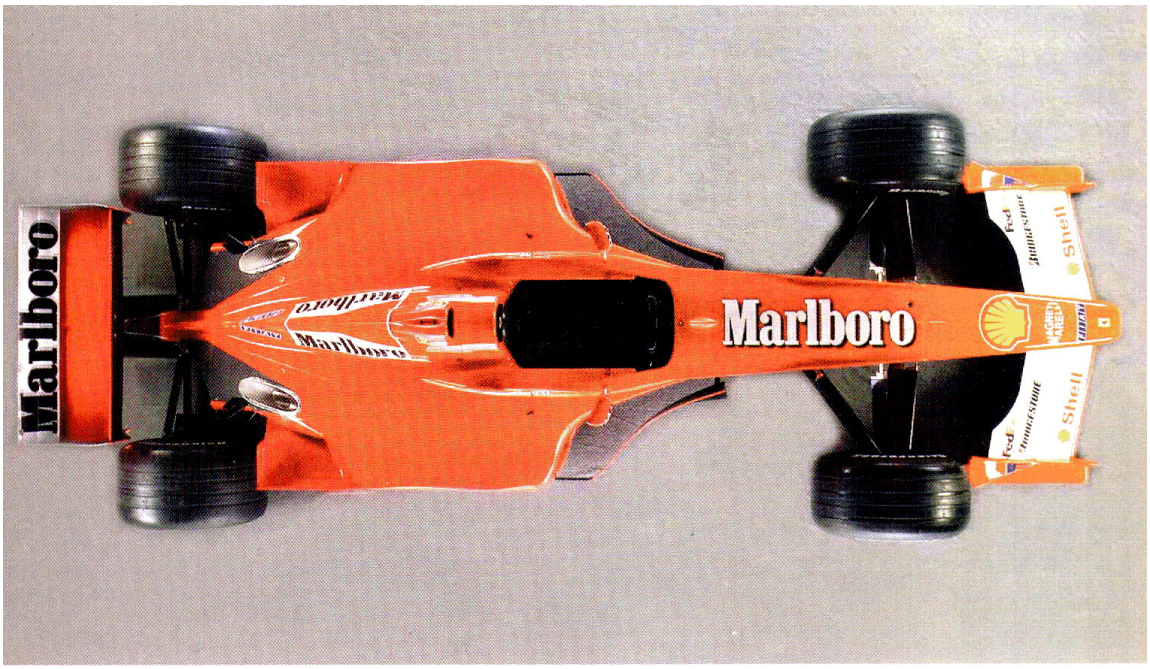

Fig.28

7. AMG MERCEDES CLR en LE MANS'99

Recordamos como los tres Mercedes volaron en las 24 horas de Le Mans de 1999. Los AMG Mercedes CLR, favoritos para conseguir la victoria, fueron los únicos coches de ese tipo que "volaron". Los coches similares de techo cubierto desplegados en la carrera, Audi y Toyota, no encontraron ningún problema, y tampoco los descubiertos de fondo plano: Audi, BMW, Nissan y Panoz, y los modelos "cliente" de LMP producidos por Courage, Ferrari, Lola y Riley & Scott.

En el CLR se encuentran diversos factores para explicar el suceso:

- Morro en voladizo muy largo (fig.29). Esta característica significaba que una pequeña cantidad de recorrido de la suspensión frontal creaba grandes variaciones en la distancia libre al suelo bajo el frontal y por lo tanto, en la cantidad de aire fluyendo entre las ruedas delanteras y en el resto de la parte inferior del coche. El diseño aerodinámico se ve muy afectado. Una variación de 5 mm en el movimiento de la suspensión, con las ruedas comprimidas, traslada en al menos 10 mm de movimiento el eje principal del

morro (una variación del 25-30%). Para controlar la disposición (o, al menos, limitar la variación de espacio entre la superficie de la pista y la cara inferior del frontal), se desarrolló un *antidive* (antienclavamiento) de alto grado en la suspensión frontal, con lo que la sensibilidad a tracción en el muelle aumenta. A esto hay que unir el hecho de que el CLR era particularmente sensible a los baches en la superficie de la carretera .

Fig.29

- Al tener un conjunto muelle - amortiguador especialmente rígido, al pasar un bache, la compresión era suministrada por las ruedas más que por la suspensión. El hecho es que la rueda era esencialmente un muelle sin amortiguamiento. Sobre pistas con una superficie irregular, los recientes GT de carreras de Mercedes brincaban con una frecuencia que se creía en orden de 2,5-3 Hz. El curioso espectáculo de "cabeceo" exhibido por mercedes durante 1997 y 1998 puede ser atribuido a esto.

- Pequeñas variaciones de estado produjeron grandes movimientos en la posición del centro de presiones aerodinámico y en consecuencia en el reparto de carga en los ejes. Esto se agravaba por la propensión del coche a rebotar sobre sus ruedas debido a la rigidez del muelle y amortiguador, la excesiva longitud del voladizo frontal y la enorme carga proporcionada por el descomunal alerón posterior, que hacía levantar el coche.

- Este efecto, conocido en sus formas más graves como "*porpoising*", significa que, cuando la aerodinámica del CLR operaba como debía, el coche creaba una carga aerodinámica. Cuando el coche pasaba por un bache, sin embargo, la carga se reduce considerablemente y va botando.

- Las largas ondulaciones del asfalto de Le Mans, como las del final de la recta Mulsanne y en la sección entre la curva Mulsanne e Indianápolis, actuaron como rampas de lanzamiento, particularmente cuando los coches corrían en la estela de aire perturbado de otros coches en la pista.

- Una vez que el morro alcanzaba la altura crítica -quizás tan poco como 100 mm- las fuerzas actuantes en el coche se invertían. La carga se convertía en sustentación. El conductor era entonces solo un pasajero en un objeto volante gracias a una superficie plana inferior tan grande como 10 m^2. Enseguida se llegaba al ángulo crítico de *Stall*, y el descalabro fue inevitable, aunque las consecuencias no fueron trágicas gracias al alto grado de seguridad pasiva de los automóviles.

Fig.30

Antes de la carrera y debido a la experiencia, los ingenieros de Mercedes decidieron aplicar más carga en eje delantero para mejorar la distribución de la misma(fig. 31). Evidentemente, no consiguieron lo que pretendían. El problema principal se seguía manteniendo: era aún relativamente fácil llegar al ángulo crítico de cabeceo, y una vez alcanzado éste, el despegue era inevitable.

Fig.31

Este hecho reabrió un viejo debate, el de permitir los elementos aerodinámicos activos. En la Nascar existe un riesgo en los *Superspeedways*, o grandes circuitos ovales. Un cambio brusco del ángulo de guiñada puede producir un ángulo de balanceo, que a partir de un valor crítico produzca el vuelco. Para evitar esto se permite una sensorización que active un alerón en el techo. En la F-1 y en la mayoría de las categorías los elementos activos están prohibidos.

En los coches de calle, hay modelos en los que se levanta un alerón posterior a partir de cierta velocidad. El McLaren F-1 de calle producido de 1995 a 1998 es conocido por dos destrozos famosos: uno de ellos protagonizado por Rowan Atkinson, el popular Mr Bean, y el otro por Bernd Pischetsreider, presidente de BMW por entonces y actualmente de Seat. Este modelo tiene alerones que se despliegan más o menos en función de diversas distancias y ángulos que mide además de un ventilador. En la versión de carreras GTR no se permite esto. En la figura 32 vemos el McLaren F-1 GTR particular, preparado para calle del batería de Pink Floyd, Nick Mason.

Otro modo de actuar en el coche es con sistemas neumáticos, que inyectan aire comprimido en diversas partes interiores del coche y crear así *downforce* controlado.

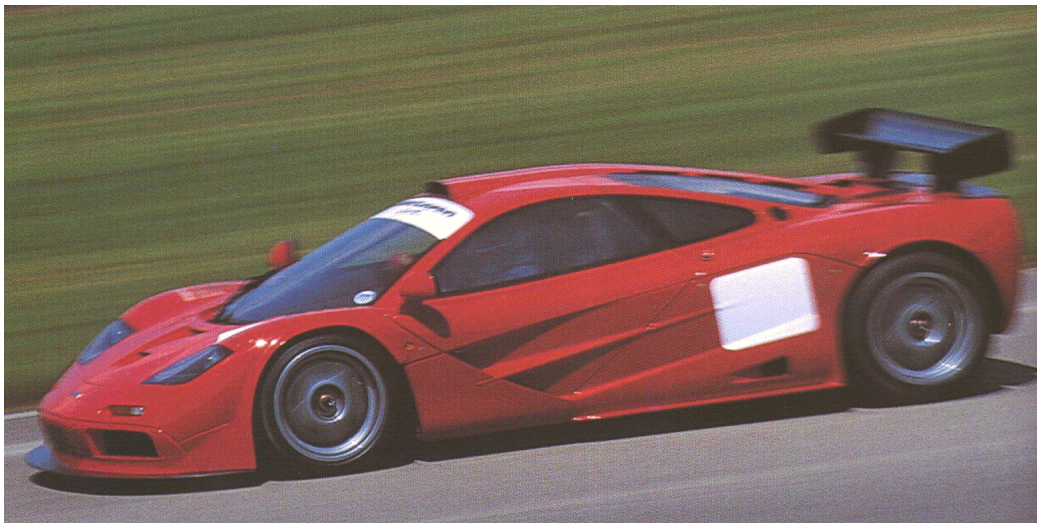

Fig.32

8. BIBLIOGRAFÍA

1.Joseph Katz, *Race Car Aerodynamics*, Robert Bentley Publishers, 1995
2.Paul Lane Jr, "Ground Controls", *RaceCar Engineering*, Vol. 9 No. 8, pp 20-23, 1999
3.Paul Lane Jr, "Born-Again Blower", *RaceCar Engineering*, Vol. 10 No. 3, pp 44-49,2000
4.Peter Wright, "Stability Stakes", *RaceCar Engineering*, Vol. 10 No. 3, pp 16-24, 2000
5.Paul Lane Jr, "Streamlining", *RaceCar Engineering*, Vol. 10 No. 8, pp 24-26, 2000
6.Racing Line, September 2000
7.Racing Line, October 2000

9. URL's

www.fia.com	Web site de la Federation Internationale de l'Automobile
www.ifrance.com/Brothier/	Web site sobre las 24 horas de LeMans 1999
www.mclaren.com	Web site de McLaren
www.ferrari.it	Web site de Ferrari