ESTUDIO AERODINÁMICO EN TÚNEL DE VIENTO DE UN ALERÓN FRONTAL DE UN COCHE DE COMPETICIÓN GP2

Autor: Juan Francisco Ortiz García
Tutores: Ramón Fernández Feria y José Francisco Velázquez Navarro

Máster Oficial en Hidráulica Ambiental – Especialidad en Aero-hidrodinámica de Vehículos
Universidad de Granada – Universidad de Málaga – Septiembre 2014

Resumen

Partiendo del alerón frontal de un vehículo de competición de GP2 cedido por el equipo de competición francés Racing Engineering, se ha estudiado la influencia del ángulo de inclinación del *flap* externo en el rendimiento aerodinámico de dicho elemento a través de su influencia en los coeficientes de sustentación y de arrastre. El estudio se hizo a números de Reynolds $Re = 3.32 \cdot 10^5$ y $Re = 4.99 \cdot 10^5$ y, para cada uno de ellos, el ángulo de inclinación se varió desde 0° a 32°. Para su análisis se dividió el alerón por la parte central, por ser simétrico, y se unió solidariamente a una balanza de precisión alojada en un túnel de viento, capaz de medir fuerzas en las tres componentes del espacio. Con este estudio, se ha logrado conocer la configuración óptima del alerón según el circuito en el que compita el monoplaza. Hay veces donde un coeficiente adquiere mucha mayor importancia que el otro, por lo que, la relación entre el coeficiente de sustentación y de arrastre se adaptará a las circunstancias del circuito de carreras. Dicho esto, la máxima eficiencia no es siempre la mejor opción. Se ha encontrado en los resultados tomados que a medida que aumenta el ángulo de inclinación del *flap*, lo hacen los coeficientes de sustentación y de arrastre. Con la singularidad de que a $Re = 4.99 \cdot 10^5$, a partir de los 17° de inclinación, el coeficiente de sustentación deja de aumentar y empieza a decaer bruscamente. Esto es porque hasta este ángulo, las líneas de corriente se adaptan más o menos bien a la curvatura del *flap*, pero a partir del ángulo crítico de la entrada en pérdida (en este caso 17°), se produce el desprendimiento de la capa límite, formándose una región con movimiento de recirculación en el borde de salida del perfil, generando una fuerte diferencia de presión entre los extremos del perfil, lo que aumenta la fuerza de arrastre y disminuye además la fuerza de sustentación.

---

1. Introducción

En los últimos años, no ha habido ningún otro aspecto de la tecnología de los coches de competición que haya afectado tanto a su evolución como ha sido el desarrollo de la aerodinámica. De hecho, se ha vuelto tan importante que, en la mayoría de los campeonatos, los diferentes organizadores se han visto obligados a modificar con regularidad el reglamento que afecta a los apéndices aerodinámicos que se permiten utilizar, incluso en algunas categorías estos apéndices están totalmente prohibidos.

La aerodinámica ha recorrido un largo camino en los últimos sesenta 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 (Figura 1) en el año 1956. El coche tenía un alerón montado encima del cockpit (cabina del piloto), actuando a través del centro de gravedad, que se podía inclinar entre -3° y +17°. Los comisarios de Nürburgring y Monza, donde pensaba competir, no permitieron su uso, por lo que nunca llegó a correr.

Figura 1. Porsche Spyder del año 1956.

Diez años después, en 1966, el innovador ingeniero/piloto Jim Hall, apareció con alerones montados en su Chaparral 2E (Figura 2) en Bridgehampton, Nueva York, y es Hall quien es conocido mundialmente por haber sido el primero en correr con un coche con alerones y por ser pionero en generar auténtico apoyo aerodinámico. Su principal motivo fue para fijar los coches al suelo y así aumentar el paso por curva. Esto provocó el comienzo de una revolución en lo referente a las prestaciones de los coches de carreras.

Figura 2. Chaparral 2E del año 1966.

A partir de este momento, los alerones fueron estudiados más a fondo, y comenzaron a surgir formas más complejas. Poco a poco se introdujeron más apéndices que ayudaran a aumentar el apoyo sin verse penalizados por la resistencia al aire [1].

Todo esto hace que sea primordial un estudio exhaustivo de cualquier alerón que se implemente en un coche de competición, ya que cualquier mínimo

detalle en este, hará que puedas ganar una carrera.

2. Fundamentos teóricos

Cuando un objeto se encuentra inmerso en un fluido en movimiento, aparece una fuerza resultante sobre el mismo que se puede descomponer en dos componentes: una paralela a la dirección del flujo, denominada fuerza de arrastre o de resistencia, que es la responsable de la resistencia al avance del vehículo, y la otra perpendicular a la dirección del flujo, denominada fuerza de sustentación. Los vehículos de competición están diseñados de tal forma que esta última componente tenga dirección hacia el suelo, generando toneladas de apoyo aerodinámico para mantener al vehículo con mayor agarre en el asfalto, originando mayor velocidad al paso por curva.

Por lo tanto, lo ideal será conseguir la máxima sustentación con el mínimo arrastre, es decir, la máxima eficiencia que será el cociente de la fuerza de sustentación entre la de arrastre o, en forma adimensional, el cociente entre el coeficiente de sustentación y el de arrastre (ver más abajo).

La causa de estas fuerzas son, debidas a esfuerzos cortantes viscosos sobre la superficie del cuerpo y diferencias de presión. Los esfuerzos cortantes (ζ) aparecen por la existencia de viscosidad (μ) en un fluido, y en consecuencia hace que en la superficie del objeto se cree un gradiente de velocidad ($\vec{\nabla}\vec{V}$) que para los altos números de Reynolds del problema está confinado en una capa límite adyacente a la superficie sólida. Conforme la capa límite avanza por la superficie, va aumentando su espesor afectando a más capas de flujo vecinas superiores, esto hace que el gradiente de velocidad sea cada vez menor y por lo tanto el esfuerzo cortante. El esfuerzo cortante es el que controla la tendencia a la turbulencia que tiene todo flujo y el régimen resulta laminar (las partículas del fluido avanzan siguiendo líneas de corriente). A una distancia determinada, del contacto inicial del flujo con el cuerpo, se hace tan pequeño el esfuerzo cortante que no controla la turbulencia y la capa límite deja de ser laminar para convertirse en turbulenta, originando un aumento brusco del esfuerzo cortante para seguir disminuyendo a medida que continúa por la superficie del objeto. La diferencia de presión es provocada por el desprendimiento de la capa límite, pues en la estela tras la separación la turbulencia uniformiza la presión a su valor en el punto de separación, que suele ser mucho menor que en la parte frontal donde se remansa la corriente. Cuanto antes se desprenda la capa límite, mayor será la estela y en consecuencia mayor será la diferencia de presión.

La fuerza de arrastre es provocada tanto por los esfuerzos cortantes como por la diferencia de presión, que será

mayor conforme mayores sean estos efectos.

La fuerza de sustentación a consecuencia de estos efectos es provocada de la siguiente manera. Tomando como ejemplo el alerón de un vehículo de competición, las líneas de corriente de la cara superior deben bordear la punta afilada de salida del objeto y unirse con las líneas de corriente de la cara inferior de un modo uniforme. Pero el fluido real no puede bordear la punta afilada de salida y se desprende, formando un "torbellino de arranque". Este torbellino es arrastrado por la corriente aguas abajo, formándose una corriente sobre el alerón con líneas de corriente que varían gradualmente, desprendiéndose del alerón en una dirección paralela a su cuerda. El punto de separación (desprendimiento de la capa límite) se encuentra cerca del borde de salida del perfil, de manera que si el ángulo de incidencia es negativo, el flujo que pasa por la superficie inferior del alerón recorre más espacio que el fluido que circula por la superior, por lo que debe ir más rápido; la ecuación de Bernoulli implica que la presión en la parte superior del alerón es mayor, generándose una fuerza descendente de sustentación.

Al aumentar la inclinación (α) del alerón (Figura 3) se aumenta la sustentación, pero también el gradiente de velocidad, lo que motiva que el punto de desprendimiento se desplace aguas arriba de la parte inferior del alerón.

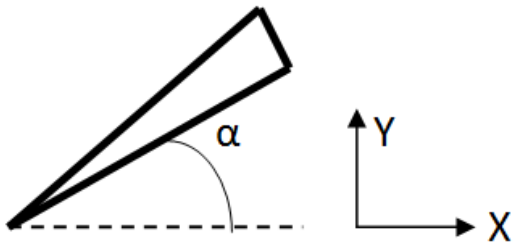


Figura 3. Inclinación del *flap*.

A partir de cierto ángulo de inclinación la corriente está totalmente desprendida y el perfil está en pérdida, la sustentación cae rápidamente, aumenta el arrastre y no funciona aerodinámicamente [2].

Para convertir las fuerzas de los ejes *X* e *Y* de la balanza (ver más adelante) en los coeficientes de arrastre y sustentación se usaron las siguientes ecuaciones provenientes de la teoría de la dinámica de fluidos y de cálculos propios a partir de la configuración de los ejes de la balanza:

$$\alpha = -27°, \tag{1}$$

$$F_{x\,neta} = F_x - F_{x0}, \tag{2}$$

$$F_{y\,neta} = F_y - F_{y0}, \tag{3}$$

$$D = (-F_{x\,neta} \cdot \mathrm{sen}(\alpha) - F_{y\,neta} \cdot \cos(\alpha)) \cdot K, \tag{4}$$

$$L = (F_{x\,neta} \cdot \cos(\alpha) - F_{y\,neta} \cdot \mathrm{sen}\,(\alpha)) \cdot K, \tag{5}$$

$$C_D = C_B \cdot \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 A}, \tag{6}$$

$$C_L = C_B \cdot \frac{L}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 A}. \tag{7}$$

Se han utilizado las siguientes magnitudes:

α, ángulo de desfase entre el eje *X* de la balanza y el eje longitudinal de la sección de medida;

F_x y F_y, componentes medias de la fuerza en cada ensayo;

F_{x0} y F_{y0}, componentes medias de la fuerza en el ensayo sin velocidad (*offset*);

$F_{x\,neta}$ y $F_{y\,neta}$, componentes medias de la fuerza aerodinámica neta en cada ensayo (ver más adelante);

D, fuerza de arrastre sobre el alerón en cada ensayo;

L, fuerza de sustentación sobre el alerón en cada ensayo;

C_D, coeficiente de arrastre del alerón;

C_L, coeficiente de sustentación del alerón;

ρ, densidad del aire en el túnel;

U_∞, velocidad de la corriente libre aguas arriba del alerón;

A, área de referencia proyectada del alerón en la dirección de la corriente de aire (con el *flap* a 0°);

K, factor de conversión entre salida eléctrica de la balanza y fuerza (ver más abajo);

C_L/C_D, eficiencia (ver más adelante);

C_B, coeficiente de bloqueo: como la sección relativa del alerón con respecto a la de la cámara de ensayos es alta, la interacción entre las paredes del túnel y el elemento ensayado se hace importante, por lo que la velocidad local del flujo cerca del cuerpo es mayor que la que correspondería a las mismas condiciones en pista, en un ambiente abierto. Para evitar que este efecto sobrestime los coeficientes aerodinámicos, se utiliza este parámetro cuya expresión es [3]:

$$C_B = \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{4} \cdot \frac{A}{C}\right)^2} = 0.9257. \qquad (8)$$

Donde:

A, área frontal del alerón;

C, sección transversal del área de ensayo del túnel de viento.

Para obtener el número de Reynolds a las distintas velocidades de este estudio se ha usado la ecuación adimensional dada por el físico alemán Arnold Sommerfeld (1868-1951) [4].

$$Re = \frac{U_\infty \cdot L}{\vartheta}, \qquad (9)$$

siendo:

L, ancho máximo del alerón;

ϑ, viscosidad cinemática.

La viscosidad cinemática se ha hallado en función de la temperatura en el interior del túnel durante la toma de

medidas, $27.5\,°C$, a partir de la siguiente ecuación [5].

$$\begin{gathered}\vartheta = -1.555 \cdot 10^{-14} \cdot T^3 + \\ +9.5728 \cdot 10^{-11} \cdot T^2 + \\ +3.7604 \cdot 10^{-8} \cdot T - \\ -3.4484 \cdot 10^{-6},\end{gathered} \tag{10}$$

siendo:

T, temperatura a la que se tomaron las medidas.

3. Materiales y métodos experimentales

El objeto a analizar aerodinámicamente fue el alerón frontal de un coche de competición participante en la GP2 Series (Figura 4). Este fue cedido por el equipo Racing-Engineering (Francia).

Figura 4. Alerón frontal del equipo Racing-Engineering.

Su estudio se hizo en el túnel de viento del Laboratorio de Aero-hidrodinámica de Vehículos del Área de Mecánica de Fluidos de la Universidad de Málaga (Figura 5). Se trata de un túnel aerodinámico de circuito cerrado, cuya sección de ensayos tiene un área de $1\,m^2$ y una longitud total de $4\,m$. Además posee un sistema de impulsión de aire, formado por cuatro ventiladores, capaz de alcanzar velocidades de $30\,\frac{m}{s}$.

Figura 5. Túnel de viento de la Universidad de Málaga.

El alerón fue cortado por su parte central y se estudió sólo una de ellas debido a su simetría, además de para poder ser ubicado en el área de ensayo. Se colocó verticalmente atornillado por su parte central a una base rectangular de polietileno (Arnite), y esta a su vez, atornillada a una balanza de precisión (Figura 6), situada bajo el suelo de la sección de medida, capaz de medir fuerzas y momentos en las tres dimensiones ortogonales del espacio (Figura 7). La balanza se niveló de manera que su eje *Z* coincida con la vertical, y el plano *X-Y* fuera perpendicular al eje longitudinal del alerón (Figura 8).

Figura 6. Montaje del alerón en la balanza en el interior del túnel.

Figura 7. Balanza de precisión 3D.

Figura 8. Nivelado de la balanza.

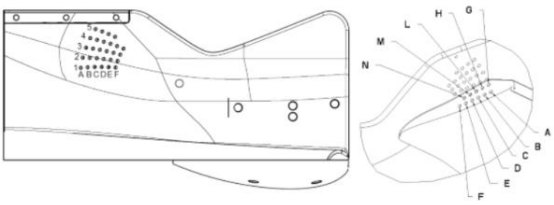
La balanza está conectada a un sistema automático de rotación, que puede variar la orientación de la misma entre $\alpha_r = [-180°, 180°]$. En 0°, el eje X de la balanza presenta una desviación de $\alpha = -27°$ respecto al eje transversal de la sección de medida del túnel.

Seguidamente se ajustó el sistema de calibración para poder calcular correctamente las componentes de la fuerza resultante con respecto al eje longitudinal del perfil, haciendo que éste quedara colocado con precisión respecto al eje del túnel.

La salida de la balanza 3D se conecta a un equipo de registro de datos que dispone de una tarjeta de adquisición de datos con convertidor A/D de 16 bits. Se registran datos de salida de voltaje en un rango de $0\,V \leq V_{output} \leq 5\,V$ y con frecuencia de muestreo de $f_s = 2500\,\frac{puntos}{seg}$, para las señales de fuerza en las tres dimensiones del espacio. El factor de conversión entre salida eléctrica de la balanza y fuerza es $K = \frac{32\,N}{5\,V}$.

El *flap* es un elemento móvil situado en el extremo lateral del alerón delantero que puede rotar alrededor de su eje central, cambiando así su ángulo de inclinación respecto al plano horizontal, permitiendo de este modo modificar la respuesta aerodinámica del mismo. Estos elementos se encuentran unidos entre sí por una serie de uniones atornilladas dispuestas de manera estratégica, de tal forma que en función de un código específico [6], tal y como se aprecia en la Figura 9,

permite fijar el ángulo de inclinación en una serie de valores determinados en un rango de 0° a 32°.



		G	H	L	M	N
1		0°	1°	2°	3°	4°
	A	B	C	D	E	F
1	5°	6°	7°	8°	9°	10°
2	11°	12°	13°	14°	15°	16°
3	17°	18°	19°	20°	21°	22°
4	23°	24°	25°	26°	27°	28°
5	29°	30°	31°	32°		

Figura 9. Conjunto de orificios para posicionar el *flap* en el ángulo deseado.

Para realizar los experimentos se procedió de la siguiente forma. Para un ángulo del *flap* fijado en una posición determinada y una vez alcanzado el régimen estacionario a la velocidad deseada se medía en continuo durante 20 segundos las fuerzas sobre el perfil. Con el fin de obtener resultados más precisos y reproducibles, cada caso se repetía tres veces, para luego poder calcular el valor medio y la dispersión de los resultados. Las velocidades escogidas fueron $10\,\frac{m}{s}$ y $15\,\frac{m}{s}$, correspondientes a números de Reynolds de $3.32 \cdot 10^5$ y $4.99 \cdot 10^5$, respectivamente, para la temperatura de trabajo $T = 27.5\,°C$.

Debido a que el elemento objeto de análisis en este estudio era una pieza real de un vehículo, no un modelo a escala, las fuerzas resultantes obtenidas fueron muy altas, por lo que para evitar daños mecánicos en el soporte de la balanza la velocidad máxima se limitó a $15\,\frac{m}{s}$, e incluso para ese caso, sólo se pudo medir hasta un ángulo del *flap* de $26\,°$ debido a los grandes esfuerzos generados.

La velocidad de la corriente libre en el túnel está calibrada empleando la técnica *Laser Doppler Anemometry* (LDA) según el porcentaje de potencia aplicada a los cuatro ventiladores del túnel (respecto a la potencia nominal de los mismos), siguiendo ambas una relación lineal. Los valores $\%P$, $U_\infty(LDA)$ y $\delta U_\infty(LDA)$ se encontraban tabulados previamente (Tabla 1) [7].

Tabla 1. Velocidades y números de Reynolds ensayados.

$\%P$	$U_\infty\left[\frac{m}{s}\right]$	$\delta U_\infty\left[\frac{m}{s}\right]$	Re
11.25	10	± 0.12	$3.32 \cdot 10^5$
21.43	15	± 0.16	$4.99 \cdot 10^5$

Antes de cada serie de ensayos, se hicieron tres medidas sin velocidad en el túnel para hallar el *offset* (F_{x0}, F_{y0}) de la fuerza en el plano *X-Y*, causado por las posibles desviaciones del eje *Z* de la balanza respecto a la vertical y el peso propio del alerón. La viscosidad cinemática para el cálculo del Reynolds se hizo en función de la temperatura dada en el interior del túnel en cada ensayo. Manteniendo el cálculo de las medidas a unos $27.5\,°C$ para que el valor del Reynolds no variase en demasía. Se optó por $27.5\,°C$ porque

era la temperatura a la que el túnel solía estar la mayor parte del tiempo.

Obtenidas las medidas, se procesan los datos de fuerza en los ejes *X* e *Y* de la balanza con el *software* de cálculo computacional *Matlab* para hallar los valores medios de los coeficientes de arrastre y de sustentación para cada ángulo del *flap* y número de Reynolds.

4. Resultados y discusión

4.1. Coeficientes de arrastre y de sustentación

Se mostrarán las gráficas correspondientes a los coeficientes de arrastre y de sustentación junto con la eficiencia para cada ángulo de inclinación del *flap* a ambos Reynolds (Figuras 10 y 11).

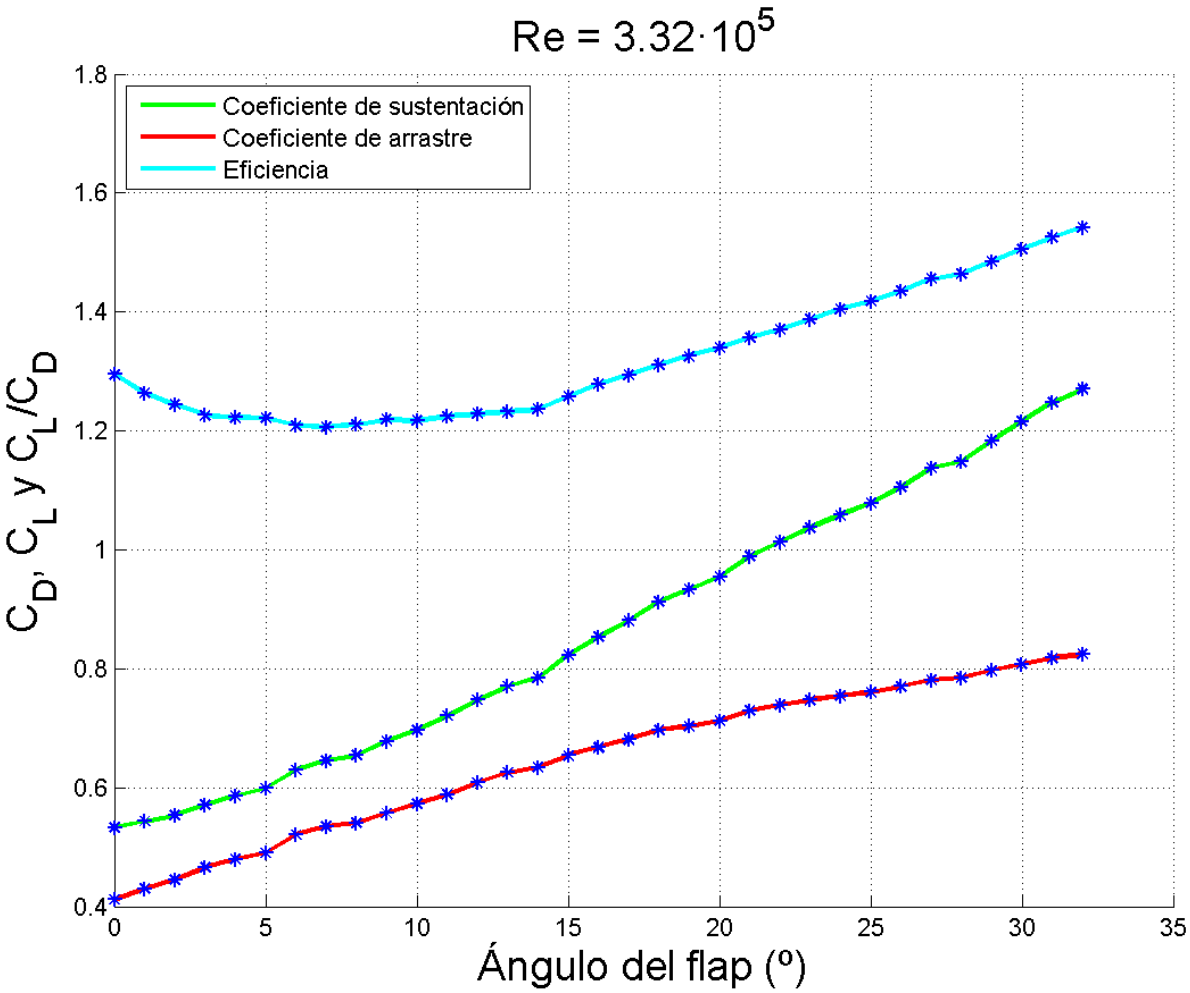


Figura 10. Coeficientes de sustentación y de arrastre, y eficiencia a $Re = 3.32 \cdot 10^5$.

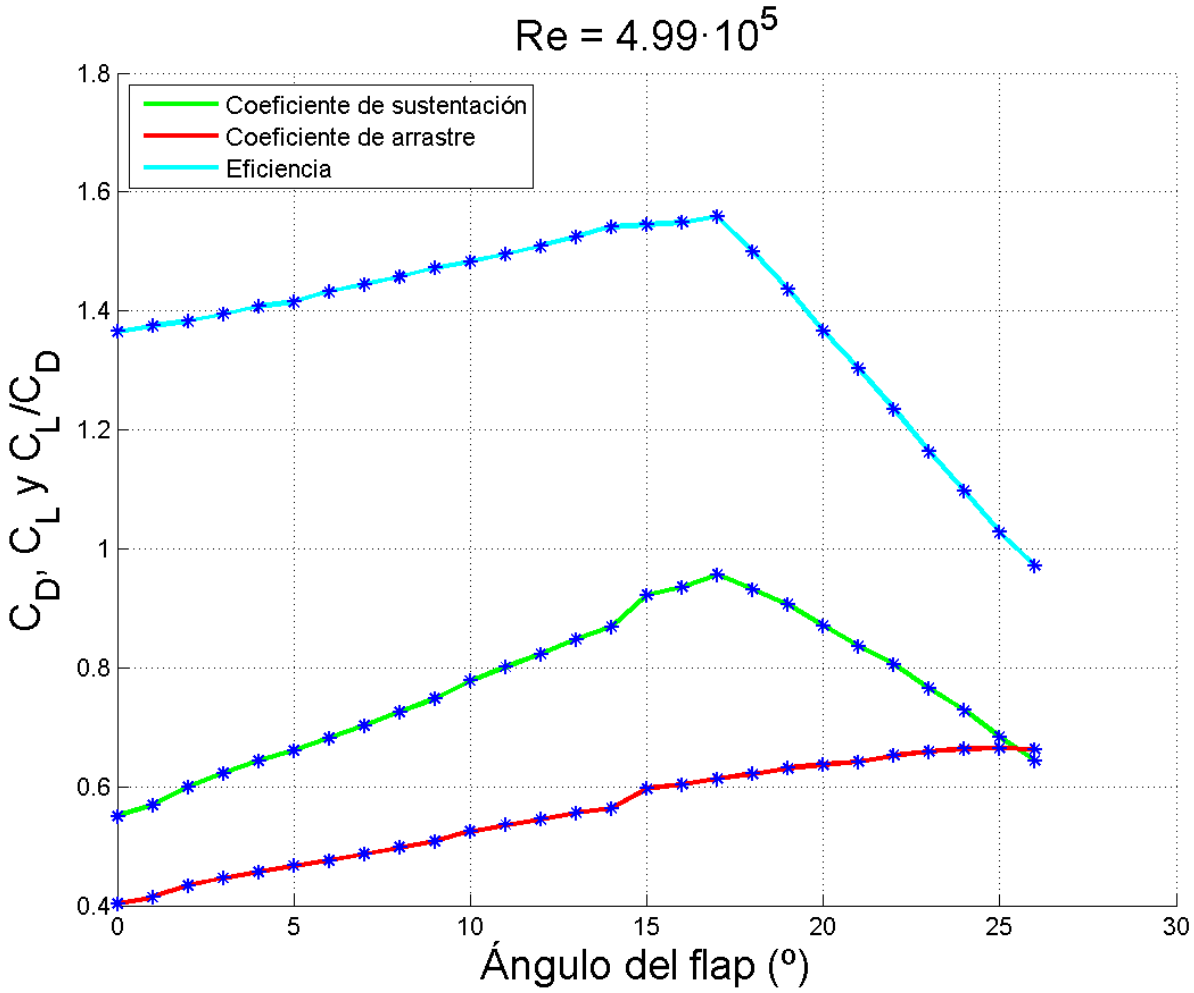


Figura 11. Coeficientes de sustentación y de arrastre, y eficiencia a $Re = 4.99 \cdot 10^5$.

A medida que el *flap* se colocaba con mayor inclinación, los coeficientes de sustentación y de arrastre aumentan en ambos Reynolds. Con la excepción de que a la velocidad del flujo de $15\ \frac{m}{s}$, a partir de una inclinación del *flap* de $17\,°$ la sustentación empieza a disminuir hasta los $26\,°$ estudiados en este caso. Esto ocurre porque, a $Re = 4.99 \cdot 10^5$ se alcanza un valor crítico de inclinación del *flap* en la que se origina el fenómeno de "entrada en pérdida" debido a que a ese ángulo se produce el desprendimiento de la capa límite, con la consiguiente pérdida de sustentación y aumento de la resistencia. A la velocidad de $10\ \frac{m}{s}$ no hay presencia de dicho desprendimiento, o una mayor intensificación de este a medida que se inclina el *flap*.

El coeficiente de sustentación en el caso de mayor velocidad es más elevado hasta el punto de la disminución de este, donde a partir de

$19\,°$, empieza a ser mayor en el caso de menor velocidad.

Con el coeficiente de arrastre ocurre lo contrario, a la velocidad de $15\,\frac{m}{s}$ es menor, en todos los grados de estudio, que en el caso de $10\,\frac{m}{s}$. A pesar de que para las medidas de mayor velocidad, se interprete elevada turbulencia a partir de 17°. Con el mayor número de Reynolds la capa límite se hace turbulenta antes, se desprende después, la resistencia de presión es menor y, por tanto, la resistencia total.

A partir de la entrada en pérdida, debido al desprendimiento de la capa límite, la sustentación cae bruscamente, mientras que el coeficiente de arrastre sigue aumentando, por lo que, obviamente, el desempeño aerodinámico a partir de ese ángulo crítico será muy pequeño.

La eficiencia a $Re = 4.99 \cdot 10^5$ es mayor que a $Re = 3.32 \cdot 10^5$ hasta el punto en el que la sustentación empieza a caer y a partir de 21° de inclinación del *flap* pasa a ser mayor la eficiencia para el caso de menor Reynolds.

Para las velocidades a las que circulan estos vehículos ($200 - 300\,\frac{Km}{h}$), los resultados serán cualitativamente similares. Hasta un cierto ángulo, las líneas de corriente se adaptan más o menos bien a la curvatura del *flap*, pero a partir del ángulo crítico de la entrada en pérdida, se produce el desprendimiento de la capa límite, formándose una región con movimiento de recirculación en el borde de salida del perfil, generando una fuerte diferencia de presión entre los extremos de este, lo que aumenta la fuerza de arrastre y disminuye además la fuerza de sustentación. Por lo tanto, observando que ya ha $Re = 4.99 \cdot 10^5$ ocurre esto, es evidente que los resultados pertenecientes a este Reynolds, se asemejen a los que circulan estos monoplazas.

La eficiencia máxima se produce para $Re = 4.99 \cdot 10^5$ a $17\,°$, mientras que para $Re = 3.32 \cdot 10^5$ es a la inclinación máxima de $32\,°$.

El *flap*, en definitiva, es un ala de avión invertida, y hay multitud de estudios en los que la entrada en pérdida, dependiendo del perfil y el Reynolds, oscila entre $12\,°$ y $20\,°$ en el caso de un vehículo de competición [8].

En la Figura 12 se compara la máxima eficiencia del alerón en cada Reynolds con su correspondiente coeficiente de arrastre.

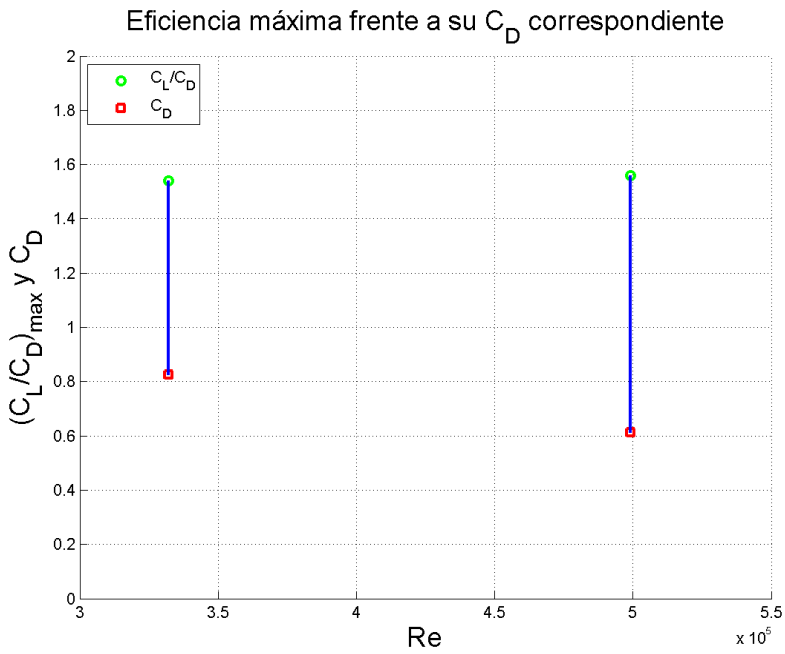


Figura 12. Máxima eficiencia frente a su respectivo coeficiente de arrastre.

El valor de la máxima eficiencia es ligeramente más elevado para el caso de mayor velocidad, como además, su coeficiente de arrastre correspondiente es menor. Ambos datos beneficiosos para la elección de que el alerón trabaje a un $Re = 4.99 \cdot 10^5$.

Se podría decir entonces que resulta poco adecuado diseñar el *flap* para una inclinación mayor de $17\,°$. Esto sería cierto si sólo circulara el alerón, pero obviamente no es así, detrás de este, está el resto del vehículo, y justo unos centímetros después las ruedas, las cuales, generan el $40\,\%$ de la resistencia aerodinámica total en el monoplaza [9]. Por lo tanto, aunque el alerón pierda sustentación y gane un poco de arrastre a inclinaciones superiores a $17\,°$, cuanto más siga inclinándose el *flap,* mayor será la desviación que este provocará en el flujo en dirección ascendente, y en consecuencia, evitará que menor cantidad de aire colisione directamente con las ruedas. Con lo que a pesar de que se pierda un poco de eficiencia en el alerón, se ganará una considerable mayor eficiencia en las ruedas, es decir, la eficiencia global del vehículo será mayor.

No siempre interesará la configuración del alerón con la máxima eficiencia, hay veces donde un coeficiente adquiere mucha mayor importancia que el otro, es decir, la relación entre el coeficiente de sustentación y de arrastre se adaptará a las circunstancias del circuito de carreras en el que se compita. Si sólo se tiene en cuenta al alerón, no al vehículo completo, para los casos en donde corra en circuitos rápidos (escasez de curvas y abundancia de rectas), sería conveniente usar una configuración del

flap en torno a 5 °, es decir, relaciones sustentación/arrastre pequeñas. Si en cambio corriese en circuitos lentos (predominio de curvas y pocas rectas) sería interesante usar una inclinación de 17 °, la que para esta ocasión coincide con la máxima eficiencia. Se caracteriza por una relación sustentación/arrastre elevada.

4.2. Desviaciones en los coeficientes y errores.

La balanza de precisión con la que se han tomado los valores durante los 20 segundos de medida da cierto error en los resultados debido a pequeñas fluctuaciones de la pieza, el alerón en este caso, además de las generadas por la propia turbulencia del flujo. Estos resultados corresponden a las medidas tomadas en los ejes *X* e *Y* de la balanza, recogidas por una tarjeta de adquisición. Para hallar el error, se calculará la desviación típica. Esto es, tomando las tres medidas de cada caso de inclinación del *flap* estudiado en cada Reynolds, se hallará el valor medio de estas y la desviación típica será cada terna de valores.

Se presentarán las desviaciones típicas producidas en cada ángulo de inclinación para ambos Reynolds en los ejes *X* e *Y* de la balanza junto con su valor medio (Figuras 13 y 14). Para una mejor visión de los resultados, estas desviaciones están representadas en porcentaje.

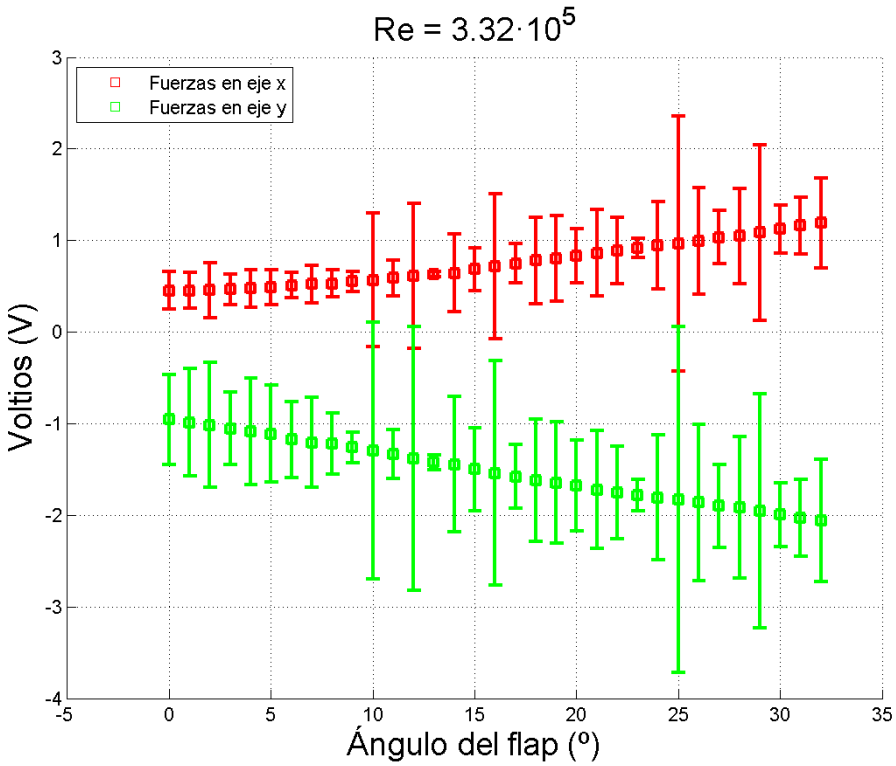


Figura 13. Desviación típica para cada ángulo a $Re = 3.32 \cdot 10^5$.

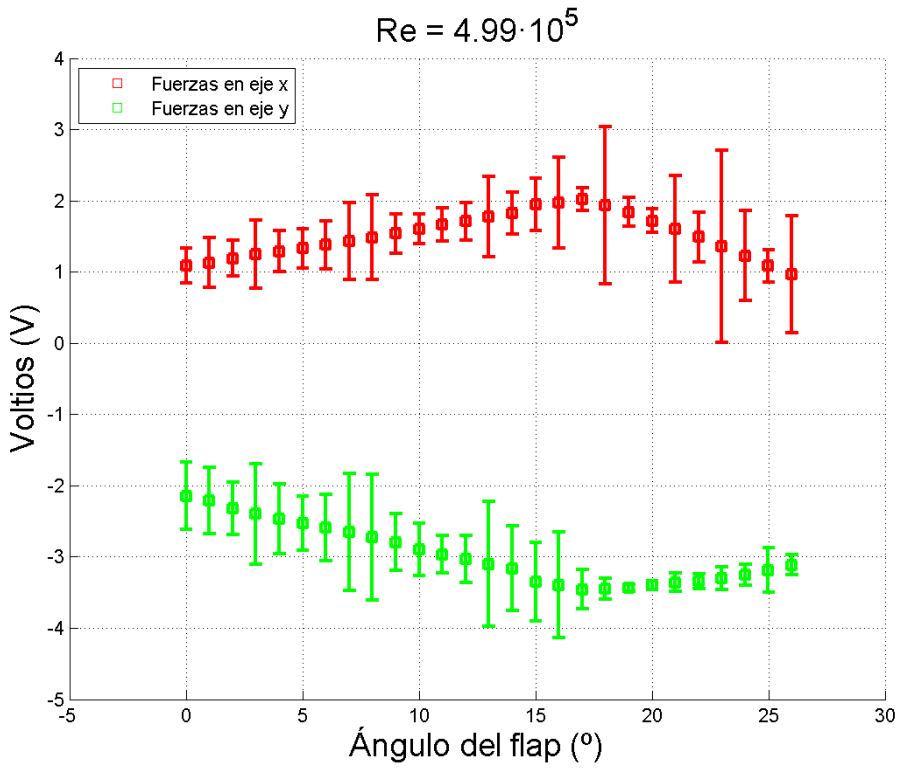


Figura 14. Desviación típica para cada ángulo a $Re = 4.99 \cdot 10^5$.

Observando la gráfica correspondiente a $Re = 3.32 \cdot 10^5$, se ve como la tendencia de aumentar o disminuir el valor de la desviación típica en cada ángulo, coincide en ambos ejes. Aunque con mayor intensidad en el eje *Y*. A $Re = 4.99 \cdot 10^5$, se observa una tendencia similar a $Re = 3.32 \cdot 10^5$ en los ángulos de inclinación del *flap* en los que no se ha originado aún el desprendimiento de la capa límite. A partir de la entrada en pérdida, cambia la tendencia y las desviaciones pasan a ser mucho mayores en el eje *X* que en el *Y*, además de no guardar relación alguna entre ambos. Por lo tanto, la balanza da garantía a los resultados dados al comportarse de igual manera según qué condiciones.

En la Tabla 2 se muestran los errores medios, máximos y mínimos de cada eje para ambos Reynolds en porcentaje.

Tabla 2. Medias, máximas y mínimas desviaciones.

	$Re = 3.32 \cdot 10^5$	$Re = 4.99 \cdot 10^5$
Max e_x (%)	1.39	1.35
Max e_y (%)	1.89	0.88
Min e_x (%)	0.025	0.16
Min e_y (%)	0.081	0.048
Med e_x (%)	0.39	0.44
Med e_y (%)	0.64	0.40

En esta tabla se han definido:

Max e_x, máximo error en el eje *X*;

Max e_y, máximo error en el eje *Y*;

Min e_x, mínimo error en el eje *X*;

Min e_y, mínimo error en el eje *Y*;

Med e_x, media del error en el eje *X*;

Med e_y, media del error en el eje *Y*.

Estos datos no arrojan mucha claridad para decidir en qué caso se dan mayores errores, ya que el error medio es mayor en el *X* a $Re = 4.99 \cdot 10^5$ y en el eje *Y* a $Re = 3.32 \cdot 10^5$. Con el error mínimo ocurre lo mismo, se dan para cada eje en distintos casos. El error máximo sí se da para los dos ejes a $Re = 3.32 \cdot 10^5$. Por lo tanto, se puede decir que para el caso de menor velocidad, se pueden dar mayores desviaciones típicas.

5. Conclusiones

De los dos Reynolds estudiados, el que más se acerca a los reales de un coche de competición es obviamente el mayor, $Re = 4.99 \cdot 10^5$.

Una mayor velocidad puede implicar unos coeficientes de arrastre menores. Lo que una mayor velocidad no provocará mayor gasto de combustible, teniendo en cuenta sólo la aerodinámica.

A medida que aumenta la velocidad, también lo hará la sustentación. Siempre que no se desprenda la capa límite excesivamente a cierta inclinación, haciendo que la sustentación baje drásticamente.

La eficiencia también será mayor conforme aumente el Reynolds, pero tendrá el mismo inconveniente que la sustentación cuando la capa límite se desprenda, es decir, también disminuirá bruscamente.

La eficiencia máxima no se dará siempre al mismo ángulo de inclinación para distintos Reynolds. Por lo que será determinante conocer la velocidad media del vehículo en pista, y así, hallar de manera correcta la máxima eficiencia.

Dependerá el circuito en el que competirá el monoplaza para una relación del coeficiente de sustentación y de arrastre idónea. Para circuitos rápidos interesarán relaciones de sustentación/arrastre pequeñas y para los lentos, relaciones elevadas.

Independientemente de la configuración que se le quiera dar al alerón para que realice un comportamiento óptimo, podrá ser interesante disminuir su eficiencia para provocar un aumento de esta en las ruedas. Podrá coincidir que la configuración con la máxima eficiencia del alerón, sea lo más idóneo para evitar la máxima colisión de aire en las ruedas del monoplaza.

El valor de las desviaciones o errores en los resultados no sigue tendencia alguna. Por lo que el hecho de un aumento de la velocidad o de la

inclinación del *flap,* no influye en un mayor o menor error en los resultados.

6. Bibliografía

[1] McBeath, S. (2005): “Aerodinámica del automóvil de competición”, Barcelona (España), Ceac.

[2] Fernández Feria, R. (2001): "Mecánica de Fluidos", Málaga (España), Servicio de Publicaciones de la Universidad de Málaga.

[3] Barlow, J. B., Rae, W. H. y Pope A. (1999), “Low - Speed Wind Tunnel Testing”, Nueva York (EUA), John Wiley & Sons.

[4] Anderson, Jr. (2007): "Fundamental of Aerodynamics", Nueva York (EUA), McGraw-Hill.

[5] White, F. M. (2003): “Mecánica de Fluidos”, Madrid (España), McGraw-Hill.

[6] Racing Engineering Development S.L.: “Influence of parameters in a Race car front wing flap aerodynamics”, (Confidential).

[7] Martínez, S. (2013): “Medida de los coeficientes de arrastre y sustentación y análisis de vibraciones en un ala con perfil NACA 0012”, Málaga (España), Universidad de Málaga.

[8] Katz, J. (2006): "New directions in Race Car Aerodynamics", Cambridge (EUA), Bentley Publishers.

[9] Messeguer, J. (2010): "Algunas consideraciones sobre la aerodinámica de los automóviles de carreras", X Conferencia Heraclio Alfaro, Vitoria (España).