

## TEMA 6: LA FUERZA DE SUSTENTACIÓN

- 1- PRINCIPIO DE BERNUIILLI . Aplicaciones a diferentes perfiles.
- 2-EFECTO MAGNUS. Aplicaciones a efectos de pelotas, balones y discos voladores
- 3- PRINCIPIO DE VENTURI . Aplicaciones a vientos orográficos, flujo sanguíneo y velas.

### Bibliografía:

**Adrian, M.J. y Cooper, J.M.** (1989). *Biomechanics of Human Movement*. Brown and Benchmark. Madison, Wisconsin.

**Aguado, X.** (1993). *Eficacia y técnica deportiva. Análisis del movimiento humano*. INDE . Barcelona.

**Aguado, X.; Izquierdo, M. y González, J.L.** (1998). *Biomecánica fuera y dentro del laboratorio*. Universidad de León. León.

**Carr, G.** (1997). *Mechanics of Sport*. Human Kinetics. Champaign Illinois.

**Carmona, A.** (1987). *Aerodinámica y actuaciones del avión*. Paraninfo. Madrid.

**Cromer, A.** (1985). *Física para las ciencias de la vida*. Reverté. Barcelona.

**González, M.A; Pérez, G; Martín, A.; Prieto, R.; Robledo, J.; Rodríguez, A.; Rosa, S. y Sánchez, C.** (1998): Aplicaciones del túnel aerodinámico en el entrenamiento y mejora de técnicas deportivas". *Revista ICD*, 19:7-71. CSD. Madrid.

**Hay, J.G.** (1993). *The biomechanics of Sports Techniques*. Prentice Hall. New Jersey.

**Kane, J.W.; Sternheim, M.M.** (1989). *Física*. Reverté. Barcelona.

**Kreighbaum, E. y Barthels, K.M.** (1996). *Biomechanics. A qualitative approach for studying human movement*. Allyn & Bacon. Boston.

**Sherwin, K.** (1971). *Man-Powered Flight Model and Allied Publications*. Londres.

## 1-PRINCIPIO DE BERNOUILLI

A una misma altura en una capa de fluido el valor de la suma de la presión estática y la dinámica es constante.

Así los cambios en la presión dinámica que se produzcan en dicha capa de fluido redundarán en cambios de la presión estática.

Si aumenta la presión dinámica disminuirá la estática.  
 Si disminuye la presión dinámica aumentará la estática.

La llamada “fuerza de sustentación” nace de dicho principio y es una fuerza Perpendicular a la dirección del flujo relativo y de sentido hacia la zona de menor presión estática en el perfil (extradós).

La fuerza de sustentación se da tanto en el medio aéreo como en el acuático.

Puede darse en diferentes casos:

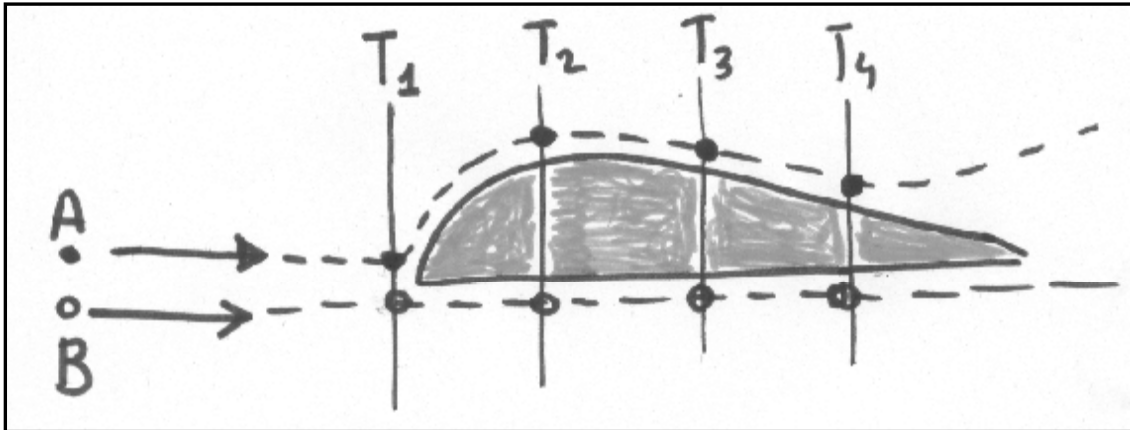
- 1- Balones o cilindros que giran: EFECTO MAGNUS
- 2- Canalizaciones de fluidos: PRINCIPIO DE VENTURI
- 3- Otros casos de aplicación del PRINCIPIO DE BERNOUILLI en la generación de fuerza de sustentación:  
 Ejemplos: una cuchara bajo el grifo, la mano contra el viento, una hoja de papel a la que soplamos por arriba, disco y jabalina de atletismo, ..

¿QUÉ PERFILES Y PORQUÉ PUEDEN GENERAR FUERZA DE SUSTENTACIÓN? (sin considerar efecto Magnus ni principio de Venturi):

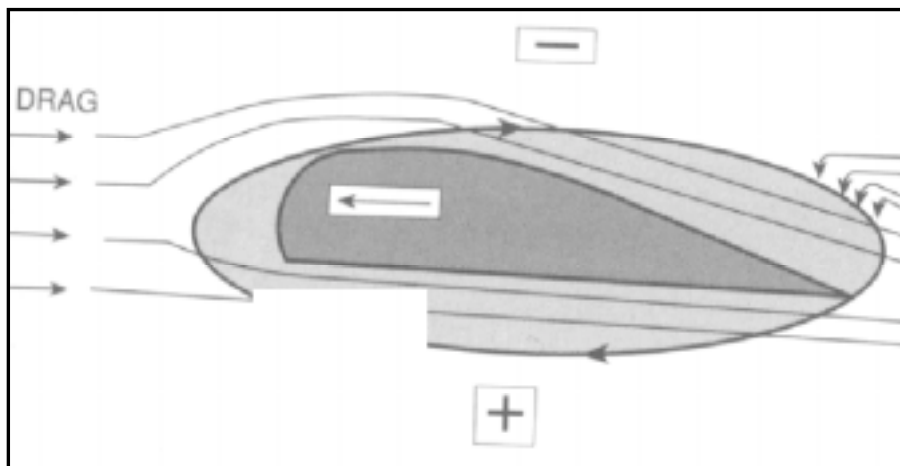
**A / Perfiles asimétricos:** pe mano de un nadador, ala de un avión, disco volador, ala delta, parapente, cuchara en bajo un chorro de agua, ..

**B/ Perfiles simétricos pero que adoptan una posición barriguda contra el flujo relativo:** disco de atletismo, jabalina, ..





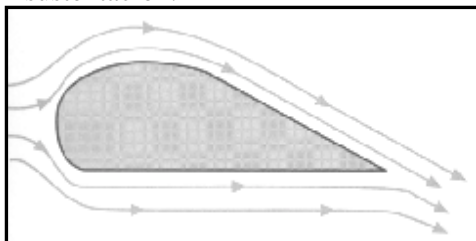
Explicación de porqué las moléculas que circulan por el extradós lo hacen a mayor velocidad.



(Carr, 1977).

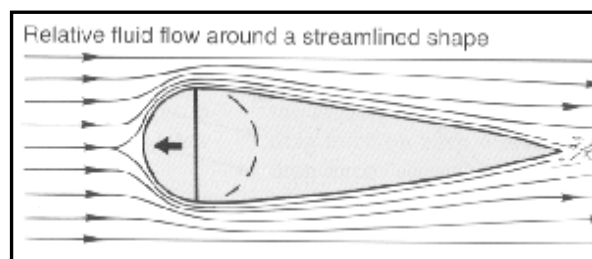
Dibujo simplificado de cómo se genera la fuerza de sustentación en un perfil asimétrico.

Un perfil asimétrico con un ángulo de ataque de  $0^\circ$  puede proporcionar sustentación.



(Carr, 1977).

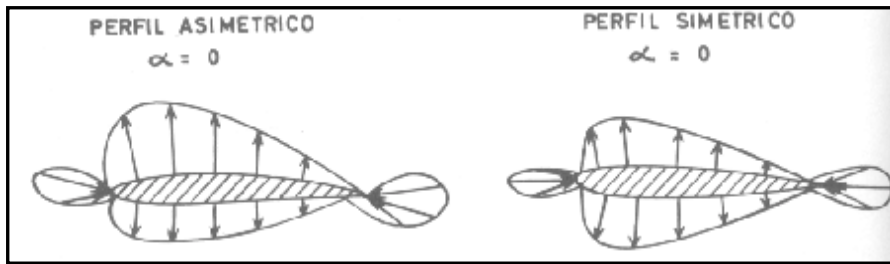
Un perfil simétrico con un ángulo de ataque de  $0^\circ$  no proporciona sustentación.



(Kreighbaum y Barthels, 1996).

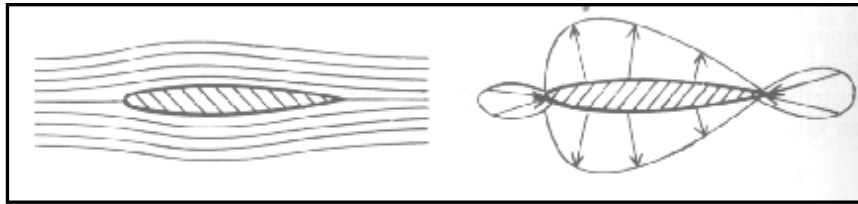


Dibujos detallados de cómo se genera la fuerza de sustentación en un perfiles.

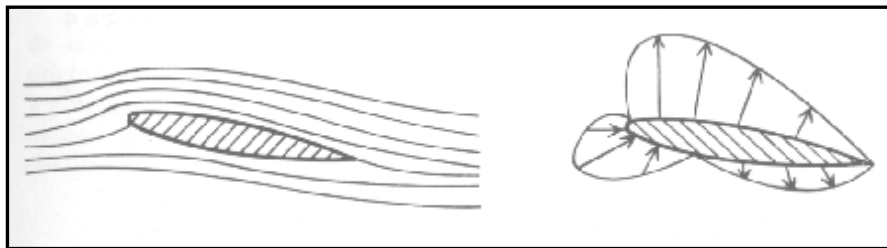


(Carmona, 1987).

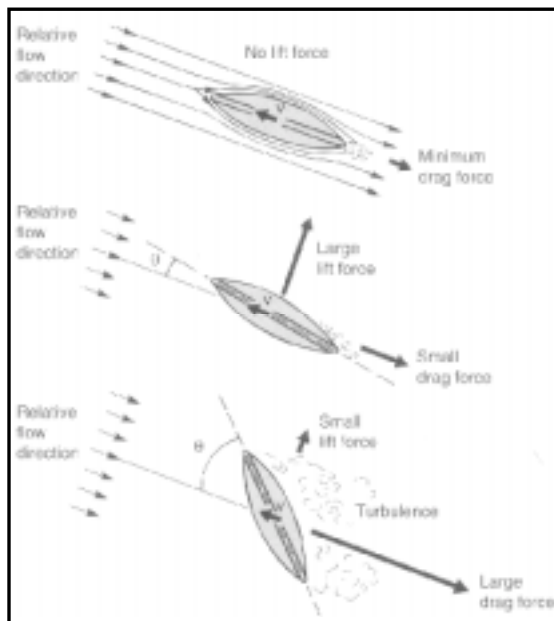
Perfil simétrico (izquierda) y asimétrico (derecha).



Perfil simétrico con ángulo de ataque de 0°.



Perfil simétrico con ángulo de ataque superior a 0°.



(Kreighbaum y Barthels, 1996).

Un mismo perfil simétrico, que es este ejemplo un disco de atletismo va aumentando la fuerza de sustentación a medida que aumenta el ángulo de ataque, hasta un punto en el que empieza a decrecer bruscamente y se genera turbulencia y desprendimiento prematuro de la capa límite.



## ¿CÓMO SE CALCULA LA FUERZA DE SUSTENTACIÓN?

$$F_L = S \cdot C_L \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \qquad \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 = \textit{Presión dinámica}$$

$F_L$  = Fuerza de sustentación

$S$  = Superficie que produce sustentación (mano, ala, pala hélice, pala, ..)

$C_L$  = Coeficiente de sustentación

$\rho$  = Densidad del fluido

$V$  = Velocidad del flujo relativo

Al aumentar la superficie del elemento (ala, pala, ..) que produce sustentación aumentará la sustentación

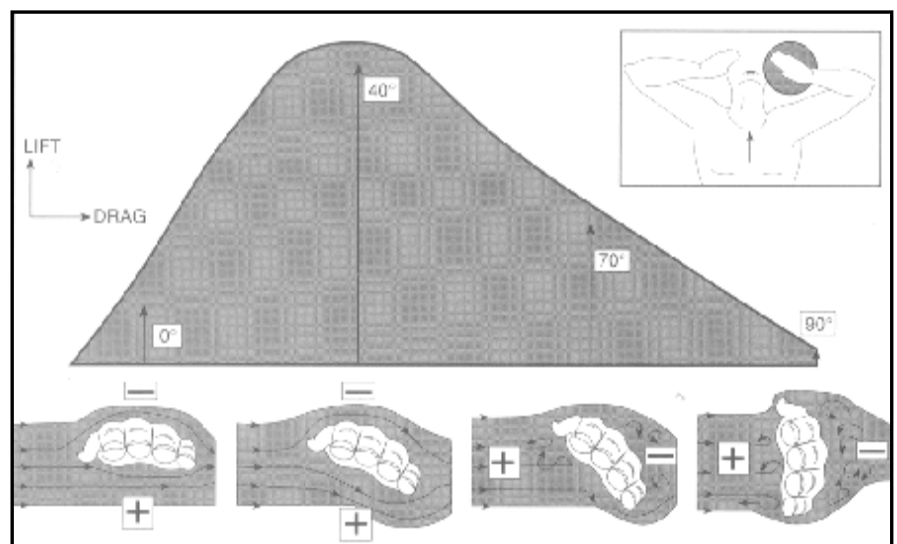
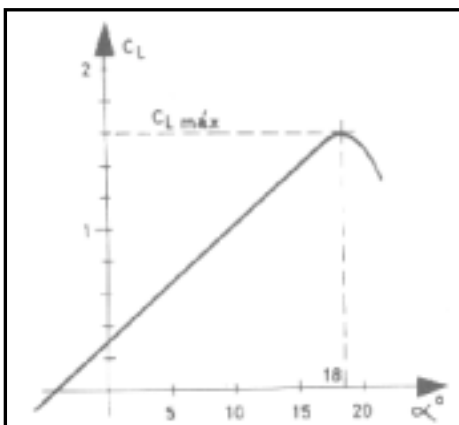
Al aumentar la densidad del fluido aumentará la sustentación

Al aumentar la velocidad del flujo relativo aumentará la sustentación

Cada perfil tiene su propio  $C_L$ . Además al variar el ángulo de ataque, partiendo desde  $0^\circ$  el  $C_L$  va aumentando hasta un límite a partir del cual disminuirá rápidamente

## RELACIONES DEL $C_L$ CON EL ÁNGULO DE ATAQUE Y A QUÉ ES DEBIDO:

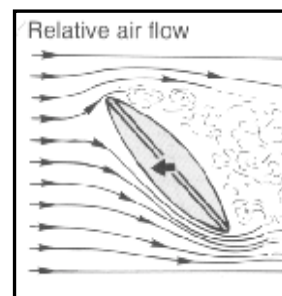
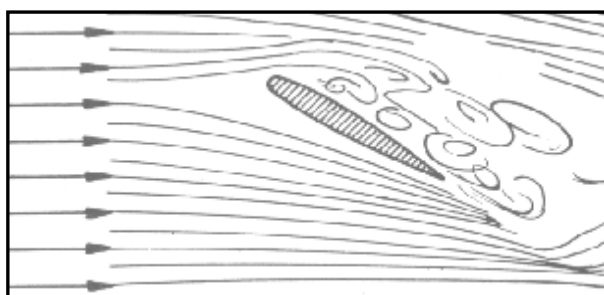
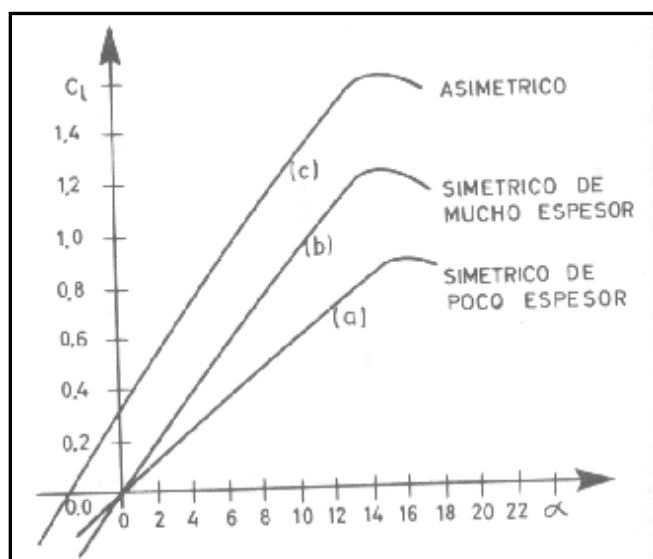
(Carmona, 1987).



(Adrian y Cooper, 1995)



(Carmona, 1987).



(Kreighbaum y Barthels, 1996).

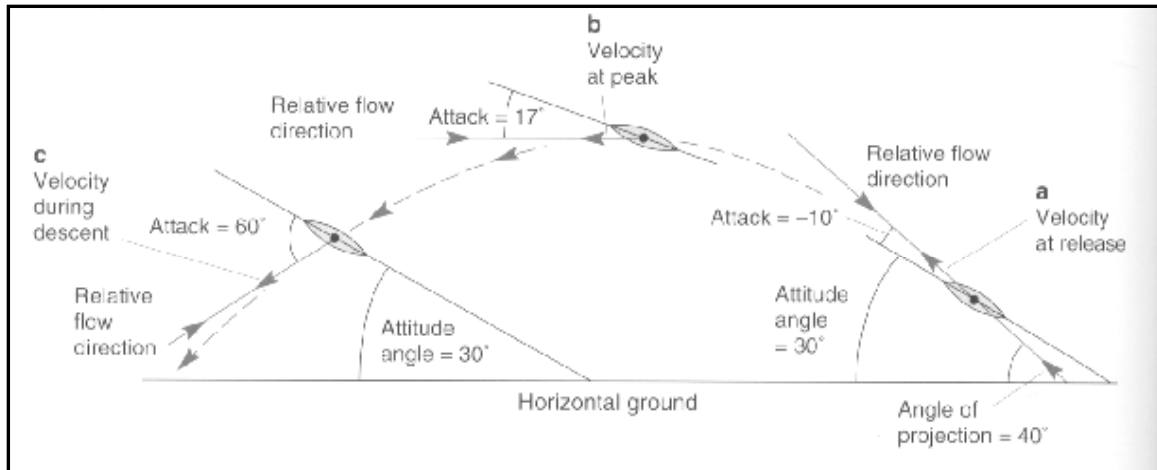
**PARA COMPLICAR LAS COSAS EN LANZAMIENTO DE DISCO y JABALINA SE DEFINEN 3 ÁNGULOS DIFERENTES: ATAQUE, ACTITUD Y SALIDA (O DESPEGUE)**

**ATAQUE:** Ángulo entre la cuerda aerodinámica y viento relativo. Es un ángulo que varía a lo largo del vuelo del disco.

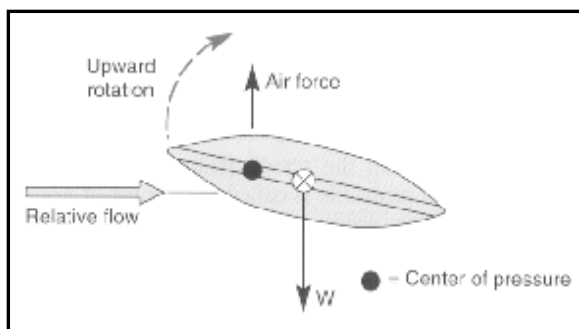
**ACTITUD:** Ángulo entre el eje longitudinal del disco y la horizontal. Puede variar en mayor o menor medida a lo largo del vuelo del disco

**DESPEGUE:** Ángulo entre la trayectoria inicial del disco y la horizontal. Después del despegue se podría hablar de ángulo de trayectoria, que va variando a lo largo del recorrido.

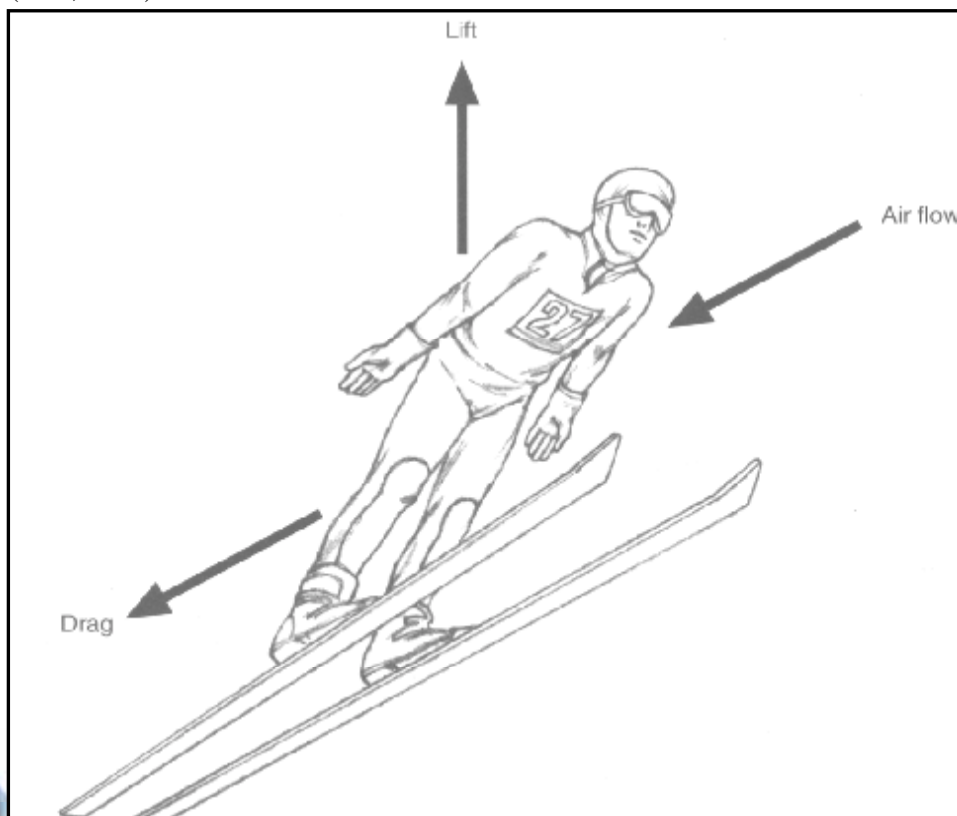




(Kreighbaum y Barthels, 1996).



(Carr, 1977).



Guiones de las clases. Tema 6. Profesor: Xavier Aguado Jódar



Las ruedas lenticulares de ciclismo, al igual que ocurre con el disco generan fuerza de sustentación cuando el viento relativo sopla de costado. Así el Cx con un ángulo de ataque de 0º es 0,0103; con 10º es 0,0101; con 20º es 0,0077; con 30º es 0,0075 y con 40º es 0,0040.

Ángulo de salida, ángulo de ataque, ángulo de actitud, velocidad de salida y distancia del lanzamiento en el lanzamiento de disco de los primeros 6 competidores en los Juegos Olímpicos de 1976 en Montreal.

ATLETA	ANG. SALIDA (°)	ANG. ATAQUE (°)	ANG. ACTITUD (°)	VELOCIDAD AD SALIDA (°)	DISTANCIA LANZAMIENTO (m)
Wilkins (USA)	37	-19	18	25.9	67.5
Schmidt (Alemania Este)	34	-12	22	27.3	66.22
Powell (USA)	36.5	-27	9	25	65.7
Thiede (Alemania Este)	33	-15.5	17.5	24.2	64.30
Pachale (Alemania Este)	36.5	-12.5	24	25.2	64.20
Kahma (Finlandia)	39.5	-10.5	29	25.7	63.12

TERAUDS, J. (1978): "Computerized biomechanical cinematography analysis of discus throwing at the 1976 Montreal Olympiad". Track and Field Quarterly Review, 78: 25-28.

Influencia de la resistencia del aire y sustentación en la distancia recorrida en el lanzamiento de disco de los primeros 6 competidores en los Juegos Olímpicos de 1976 en Montreal.

ATLETA	DIST. VUELO (m)	DIST. TEORICA SIN AIRE (m)	GANANCIA O PERDIDA (m)	GANANCIA O PERDIDA (%)
Wilkins (USA)	67.50	68.87	-1.37	-2
Schmidt (Alemania Este)	66.22	72.93	-6.71	-10.1
Powell (USA)	65.70	63.20	2.51	3.8
Thiede (Alemania Este)	64.30	57.29	7.01	10.9
Pachale (Alemania Este)	64.20	64.07	0.13	0.2
Kahma (Finlandia)	63.12	68.19	-5.07	-8

TERAUDS, J. (1978): "Computerized biomechanical cinematography analysis of discus throwing at the 1976 Montreal Olympiad". Track and Field Quarterly Review, 78: 25-28.





Lanzamiento a 24 m / s.

ANGULO DE ATAQUE (°)	FUERZA DE SUSTENTACIÓN (N)	FUERZA DE RESISTENCIA (N)	RELACIÓN SUSTENTACIÓN/RESISTENCIA
0	0	1.17	0
10	4.33	1.50	2.89
20	10.64	4.13	2.58
25	12.83	5.79	2.22
27	13.80	6.88	2.01
28	13.80	7.41	1.86
29	11.01	7.94	1.39
30	11.21	8.18	1.37
35	10.12	8.74	1.16
40	8.50	9.55	0.89
45	8.90	11.13	0.80
50	8.62	12.22	0.71
60	6.88	14.98	0.46
70	4.77	16.43	0.29
80	2.55	16.88	0.15
90	0	17.73	0

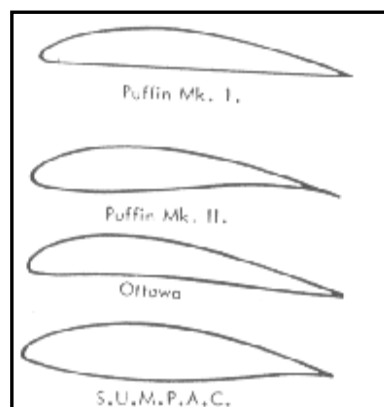
GANSLEN,R.V. (1958): "Aerodynamic factors which influence discus flight". Memoria de investigación. Universidad de Arkansas, 1958.

Finalmente los estudios en lanzamiento de disco concluyen:

- 1- La velocidad de salida es el factor más importante.
- 2- A igual velocidad de salida, el ángulo de salida tiene la mayor importancia. Los buenos lanzadores (45-60 m) utilizan ángulos de 35-40°. Los lanzadores de menor nivel deberían incrementarlo, pero nunca por encima de 45 °.
- 3- El ángulo de actitud debería estar entre 35 y 45 °. Cuando el viento relativo fuera menor de 23 m / s este ángulo debería disminuir.

Pero el disco o la jabalina no son ni de lejos los mejores perfiles para crear sustentación o para minimizar la resistencia. (gráfico de Sherwin, 1971)

- $$C_L = \begin{matrix} \text{Puffin I: } 0.8 \\ \text{Puffin II: } 1.15 \\ \text{Ottawa: } 1 \end{matrix}$$
- $$C_x = \begin{matrix} \text{Puffin I: } 0.009 \\ \text{Puffin II: } 0.0092 \\ \text{Ottawa: } 0.011 \end{matrix}$$
- $$C_L / C_x = \begin{matrix} \text{Puffin I: } 89 \\ \text{Puffin II: } 125 \\ \text{Ottawa: } 91 \end{matrix}$$



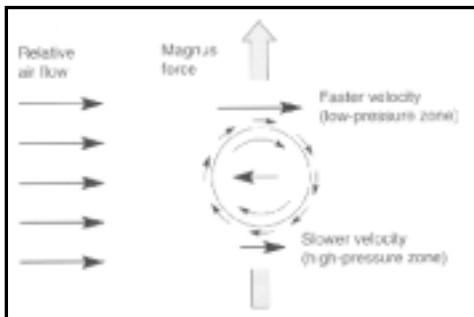
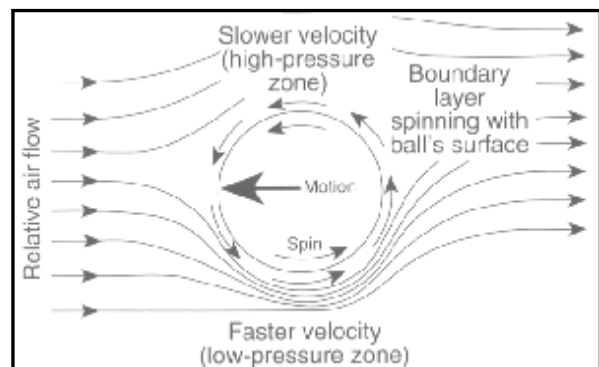
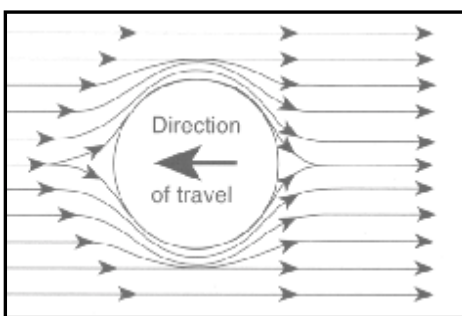
Disco con 10° de ángulo de ataque: el ratio de fuerza de sustentación / fuerza de resistencia: 2.89



## 2- EFECTO MAGNUS

Es la aplicación del principio de Bernoulli a esferas o cilindros que giran en su desplazamiento.

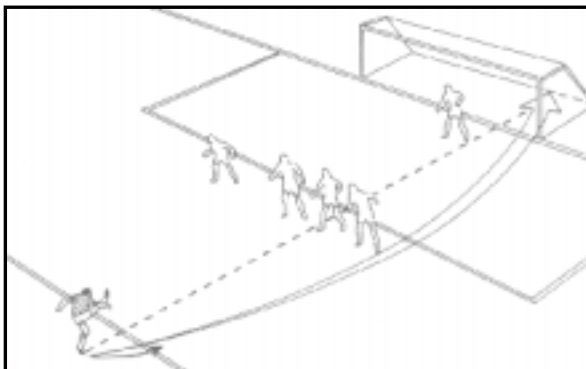
Al encontrarse el flujo relativo contra la capa límite de estos objetos que avanzan girando afectará a la capa de aire que envolverá al perfil ya que por un lado circulará más rápidamente que por el otro. En el lado en el que se produzca una mayor presión dinámica se dará una presión estática más baja y por lo tanto la fuerza de sustentación (según una dirección perpendicular al flujo relativo y sentido hacia donde haya menor presión estática).



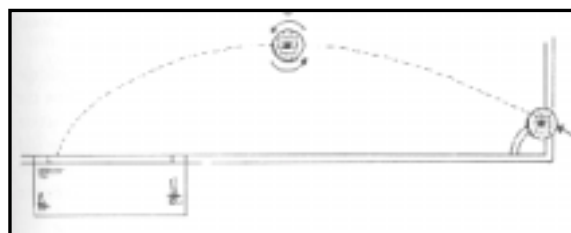
(Carr, 1977).

Gracias al efecto Magnus, popularmente referenciado simplemente como **efecto** se puede meter gol en **fútbol** con la trayectoria del balón rodeando la barrera y también desde un saque de esquina.

(Carr, 1977).

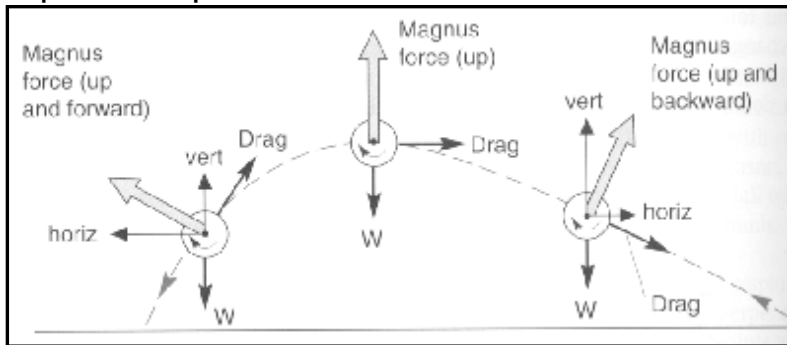


(Hay, 1993).



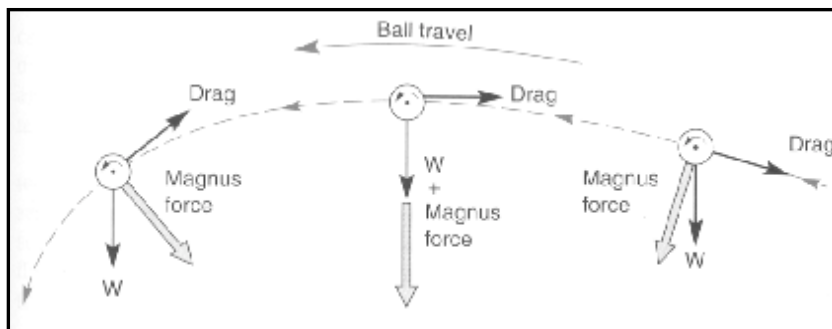
Algo parecido al saque de esquina sucede al lanzar un **disco volador** ya que a lo largo de su trayectoria va girando en sentido hacia donde apunta la mano en el lanzamiento.

En **tenis** los "**liftados**" gracias al efecto entran en la pista a pesar de su gran velocidad de avance y los "**cortados**" se levantan y sobrepasan la red para caer poco después de ella.



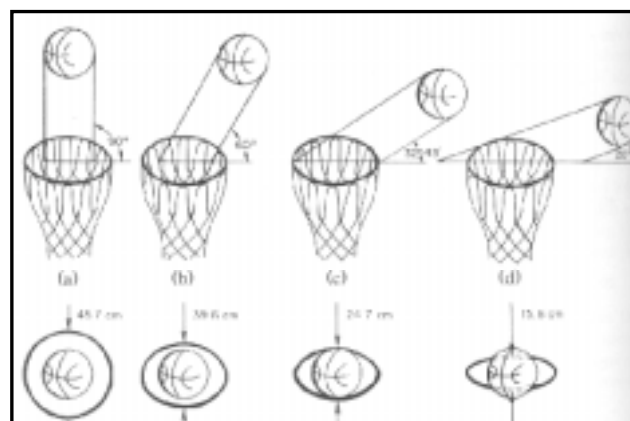
(Kreighbaum y Barthels, 1996)

(Kreighbaum y Barthels, 1996).



(Kreighbaum y Barthels, 1996).

En **baloncesto** el efecto dado con la muñeca al balón permite una trayectoria más bombeada que ayuda a entrar mejor. Además si el balón choca con la parte posterior del aro o tablero, gracias a su rotación tiende a entrar a continuación en la canasta.



(Hay, 1993).

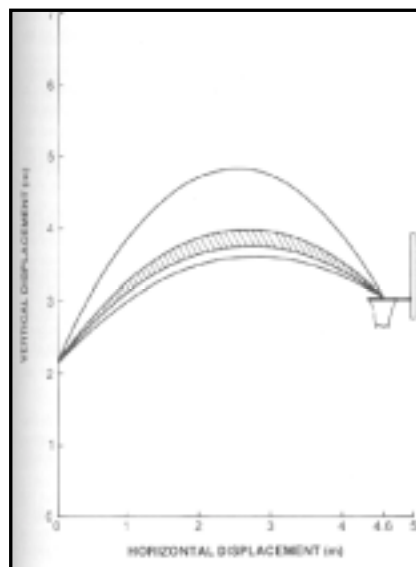


En baloncesto el ángulo mínimo de llegada del balón para que pueda entrar es de  $32,43^\circ$ . Con los siguientes ángulos habrán los siguientes márgenes de error:

$90^\circ$	$\pm 10,5$ cm
$80^\circ$	$\pm 10,2$ cm
$70^\circ$	$\pm 9,1$ cm
$60^\circ$	$\pm 7,4$ cm
$50^\circ$	$\pm 5,1$ cm
$40^\circ$	$\pm 2,3$ cm

Se considera que los ángulos óptimos no serían los más cercanos a  $90^\circ$  ya que el balón debería realizar un mayor recorrido y sería más difícil apuntar con precisión, por eso al aconsejar cuáles son los mejores ángulos para lanzar se recurre a un compromiso entre margen antero-posterior de error y trayectoria no muy larga. Así en función de la distancia de la que se lanza se considera un rango de ángulos como óptimos de salida, pe: en un tiro libre (a 4,6 m) lanzado a una altura del suelo de 2,13 m (el aro está a 3 m) se aconsejan ángulos óptimos de  $49$  a  $55^\circ$ ).

(Hay, 1993).



Los efectos provocarán más o menos **fuerza de sustentación** dependiendo de:

La superficie (del perímetro del balón)

La velocidad del flujo relativo

La densidad del fluido

Un coeficiente de sustentación (que dependerá de la velocidad de giro y de la rugosidad, lisura y posibles costuras).



El efecto será más o menos aparente dependiendo de:

La fuerza de sustentación que se obtenga

El peso del balón

La fuerza de resistencia

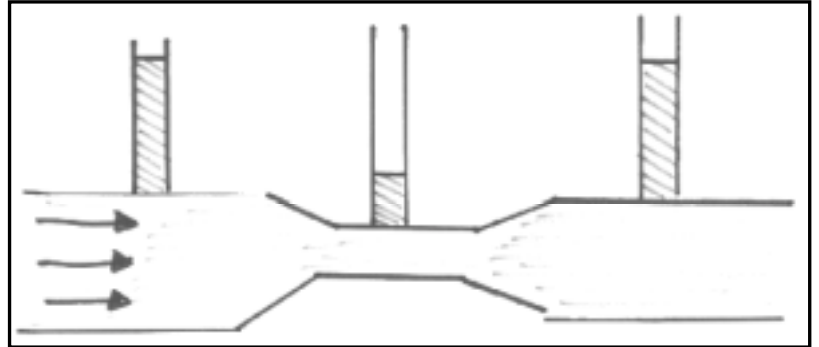
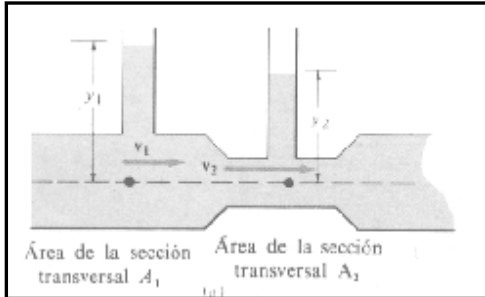
Ejemplos: pelotas de tenis con pelaje y desgastadas sin pelaje, las costuras de una bola de béisbol, tener viento a favor al golpear un liftado, cambios de altura en los mismos golpes, ..



### 3- PRINCIPIO DE VENTURI

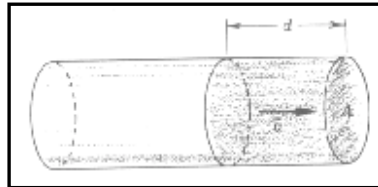
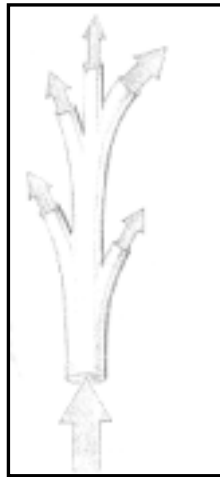
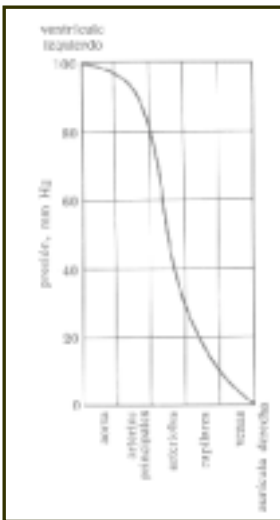
Es la aplicación del principio de Bernoulli a fluidos canalizados (por tuberías, arterias, accidentes y relieves geográficos, ..

(Kane y Sternheim, 1989)



La suma de las secciones transversales de las arteriolas supera a la de la aorta, así la velocidad media de circulación de la sangre por ellas es menor que por la aorta.

(Cromer, 1985).



$$Q = \frac{V}{t} = \frac{S \cdot d}{d/v} = S \cdot \bar{v} = \pi \cdot r^2 \cdot \bar{v}$$

Q = Flujo de fluido que pasa por el tubo en un segundo

V = Volumen

S = Área de sección transversal del tubo

$\bar{v}$  = Velocidad media del flujo

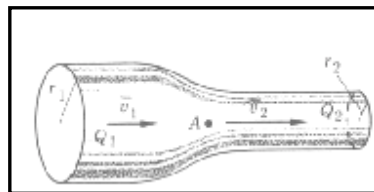
d = longitud de la sección de fluido que circula por una tubería de radio r

$$Q_1 = \pi \cdot r_1^2 \cdot \bar{v}_1$$

$$Q_2 = \pi \cdot r_2^2 \cdot \bar{v}_2$$

$$Q_1 = Q_2$$

$$r_1^2 \cdot \bar{v}_1 = r_2^2 \cdot \bar{v}_2$$



(Cromer, 1985).

En un adulto sano en reposo la velocidad media de circulación de la sangre a través de la aorta vale 0,33 m/s. El flujo (Q) en una aorta de radio 0,009 m será:

1- El área de sección transversal será:  $S = \pi \cdot r^2 = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$

2- El flujo será:  $Q = S \cdot \bar{v} = 0,83 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$

El área de sección transversal de todos los capilares puede estar en torno a 0,25 m<sup>2</sup> y la velocidad de circulación media a través de ellos habrá disminuido.

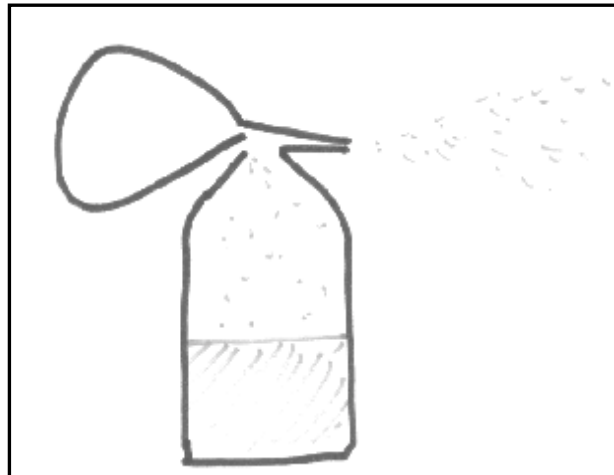
aorta: 0,00025 m<sup>2</sup>.

conjunto de todos los capilares: 0,25 m<sup>2</sup>. La  $\bar{v}$  de circulación y en las arterias es de 0,041 m/s y en los capilares es de 0,00033 m/s.





Los pulverizadores, pe de pintura o de colonia utilizan el principio de Venturi:



Los *slats* (dispositivos hipersustentadores colocados en la zona del borde de ataque del ala) de los aviones también usan este principio. En vela, entre el foque y la mayor se produce una canalización del aire y una baja presión estática, al aumentar la velocidad de circulación de la corriente, que ayuda al avance.



En una manguera, a la que colocamos una añadido estrecho en su salida o presionamos con los dedos, estrechando la salida también es un ejemplo del principio de Venturi. Igual en accidentes geográficos en los que el viento aumenta debido a un estrechamiento por el que circula aire, o en los espacios entre edificios altos o rascacielos.

**Ley de Poiseuilli:** La cantidad de fluido que circula por una tubería es proporcional a la disminución de presión a lo largo de la misma y la cuarta potencia del radio de la tubería.

$$Q = \frac{\pi \cdot r^4 (p_1 - p_2)}{8\eta L}$$

L= longitud de la tubería;  $\eta$ = viscosidad (letra griega "eta").  
 r= es el radio de la tubería

