

Ciencias del deporte

Ciencia del Tenis de Mesa

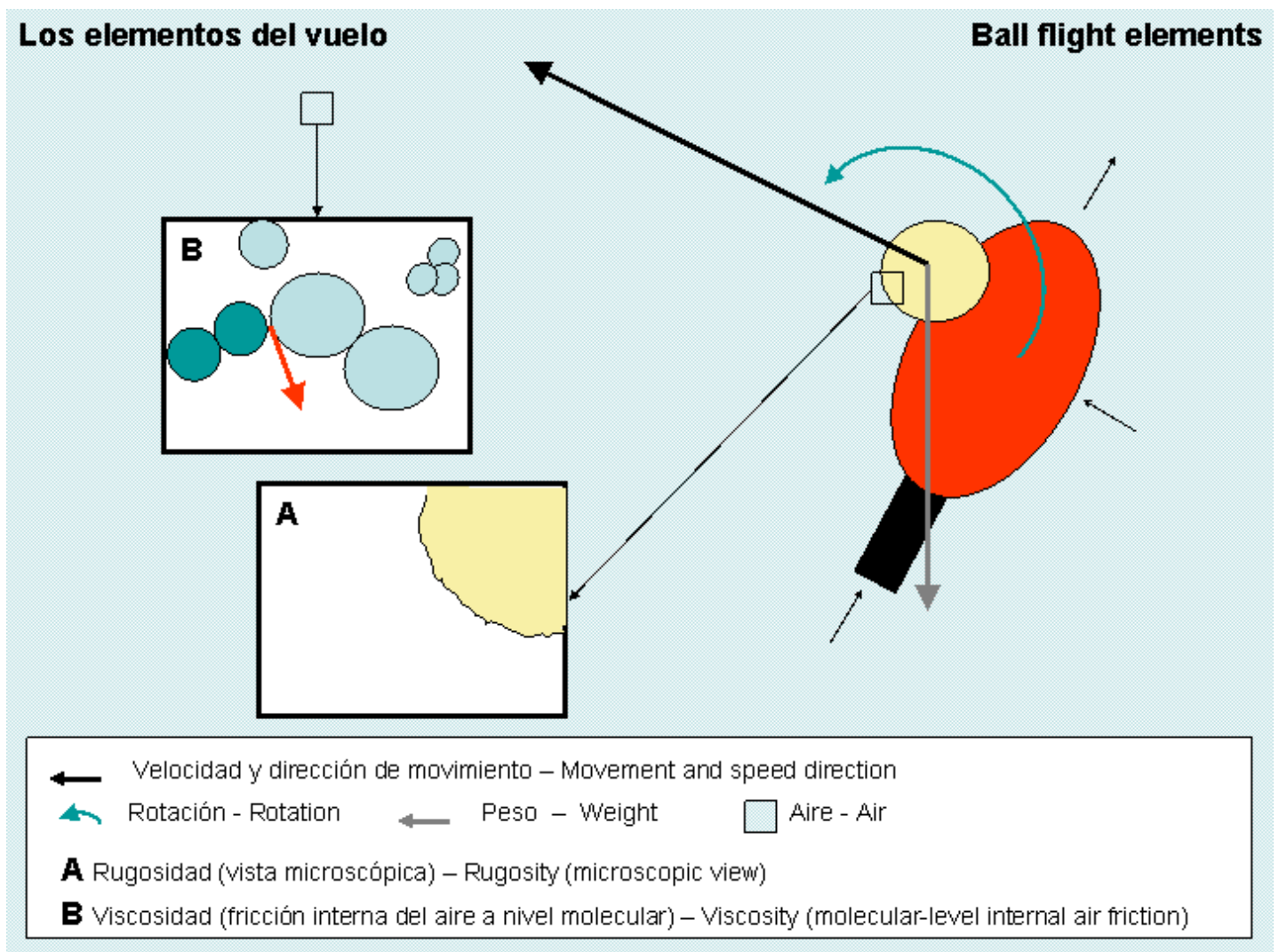
Aerodinámica de la pelota deportiva - Aerodinámica de la pelota de tenis de mesa

por Roberto Miglietti (J) - Junio 2006

La pelota en vuelo

La pelota en vuelo está sometida a numerosas fuerzas y efectos que ponen el adjetivo "deportivo" en una "pelota deportiva". Gran parte de la gracia de los deportes con útiles esféricos está en las variaciones inducidas por estos efectos.

Antes de entrar a su etapa aérea la pelota es golpeada, instancia en la cual el golpe le confiere una cierta velocidad y rotación. Una vez en vuelo su trayectoria dependerá de la intensidad y dirección de la velocidad inicial, la velocidad de rotación y la dirección del eje de rotación (ambos determinados por el golpe inicial), la viscosidad del medio (aire), el diámetro (para pelotas esféricas) y la rugosidad de la pelota, y la fuerza gravitatoria (peso).



La acción de la gravedad sobre un cuerpo en movimiento le inducirá una trayectoria parabólica en un plano vertical. Sobre esto la resistencia del aire frenando la pelota alterará esta simple trayectoria inicial pero manteniéndola en el mismo plano. Finalmente es el efecto Magnus (que afecta a los cuerpos rotando perpendicularmente a su desplazamiento a través de un fluido) que desvía la trayectoria del plano de parábola balística (el adjetivo balístico refiere a la trayectoria de una bala, proyectil, o en general cualquier cuerpo moviéndose libre en un campo gravitatorio).

De todos los efectos el más interesante es el Magnus. Es el que hace que el spin o rotación -tan importantes en tenis de mesa- justifiquen parte de tal protagonismo.

El efecto Magnus se expresa como una desviación de la trayectoria esperada para una pelota sin rotación en "el sentido" de la rotación. Es más claro entenderlo haciendo referencia al juego: cuando se golpea una bola con topspin se le confiere una rotación de eje horizontal y por ende perpendicular a la traslación (siendo esta hacia adelante), de

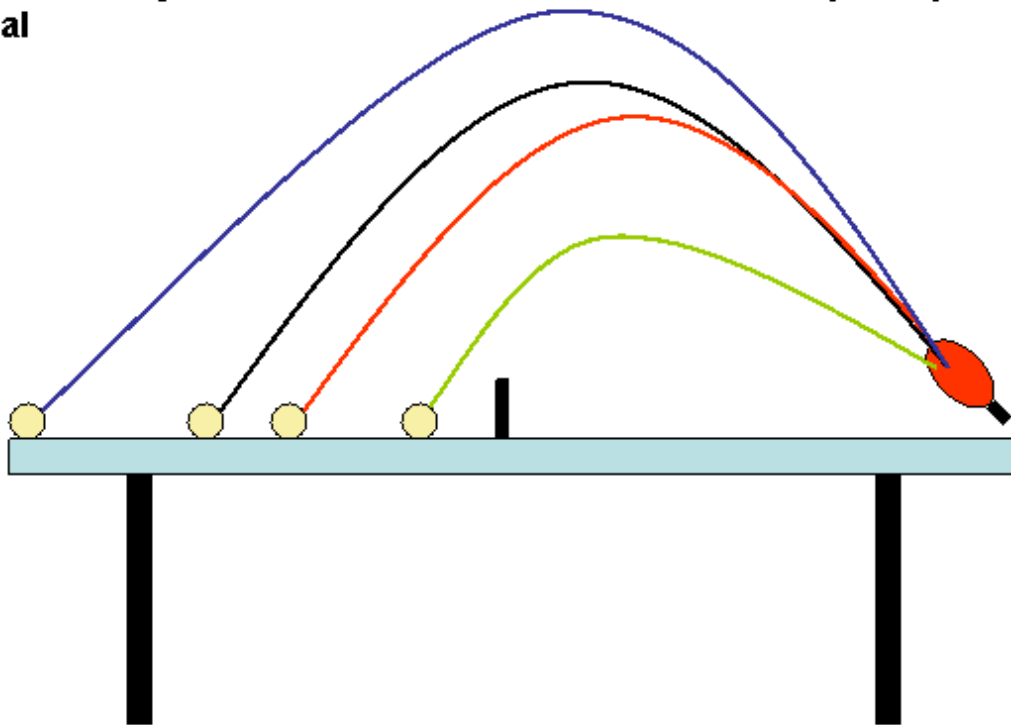
manera que entra en acción el efecto Magnus que se manifiesta como una fuerza que actúa en la vertical y hacia abajo ("agachando la pelota"), haciendo que la misma pase más rozante contra la red y que pique en campo contrario más cerca de la misma en comparación a lo que pasaría en ausencia de spin.

En el caso de backspin sucede lo contrario, el efecto Magnus le imprime un empuje hacia arriba que hace que la bola eluda la red (cosa que no sería posible para una pelota muy baja sin rotación) y pique más profundamente en campo rival.

Cuando se imprime un spin lateral de afuera hacia adentro (el más fácil de transferir tanto de drive como de revés) la pelota se desviará hacia afuera. Dicho de otra forma, si un jugador diestro golpea la bola con un drive de derecha a izquierda la bola se desviará a la derecha. Si lo hace con un revés de izquierda a derecha, lo hará hacia la izquierda.

Proyección de las trayectorias en el plano vertical

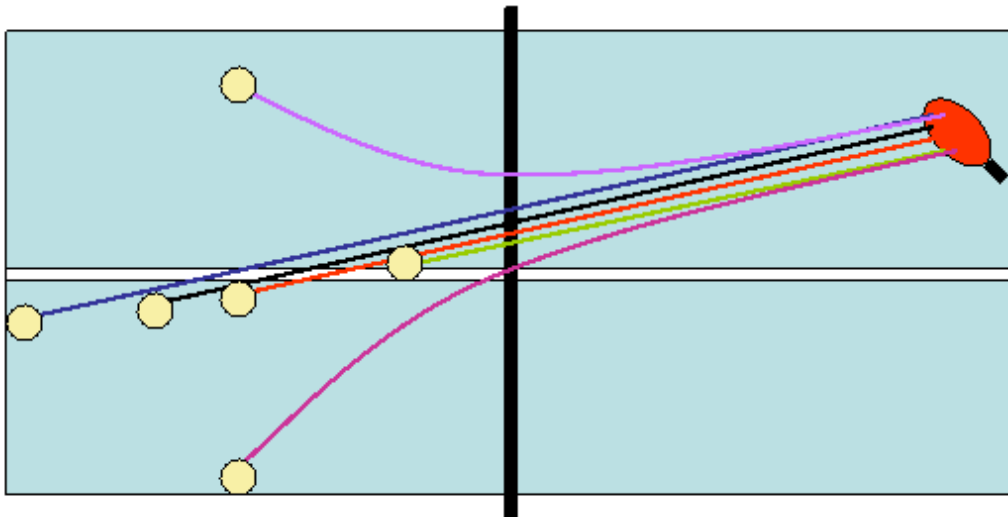
Vertical plane path projection



- Trayectoria ideal (parábola balística sin rozamiento) – Ideal path (ballistic parabola)
- Trayectoria real en el aire (rozamiento): sin top/back spin, con o sin spin lateral – Real path with friction, no top/back spin, with or without lateral spin
- Trayectoria con top spin – Path with top spin
- Trayectoria con back spin – Path with back spin

Proyección de las trayectorias en el plano horizontal

Horizontal plane path projection



- Trayectoria ideal (parábola balística sin rozamiento) – Ideal path (ballistic parabola, no friction)
- Trayectoria real en el aire (con rozamiento) sin spin – Real path with friction, no spin
- Trayectoria con top spin – Path with top spin
- Trayectoria con back spin – Path with back spin
- Trayectoria con spin lateral de derecha a izquierda, sin top/back spin – Path with lateral R to L spin, no top/back spin
- Trayectoria con spin lateral de izquierda a derecha, sin top/back spin – Path with lateral L to R spin, no top/back spin

Este efecto que es intuitivamente entendido y dominado con maestría por el jugador de tenis de mesa, y por el jugador de cada deporte que haga uso de un útil esférico, responde a un fenómeno más bien complicado que cae en varios campos de la física tales como la cinemática (estudio del movimiento), mecánica (estudio de las fuerzas) y mecánica de los fluidos (que estudia la compleja mecánica en el seno de los fluidos como el aire, en cuyo caso se llama aerodinámica).

Explicar el vuelo de una pelota prescindiendo del efecto Magnus es muy simple. Como ya mencionamos no es más que la parábola balística levemente deformada o "acortada" debido a la resistencia del aire.

Pero el efecto Magnus no es tan simple de explicar y es el reflejo de dos efectos aerodinámicos diferentes.

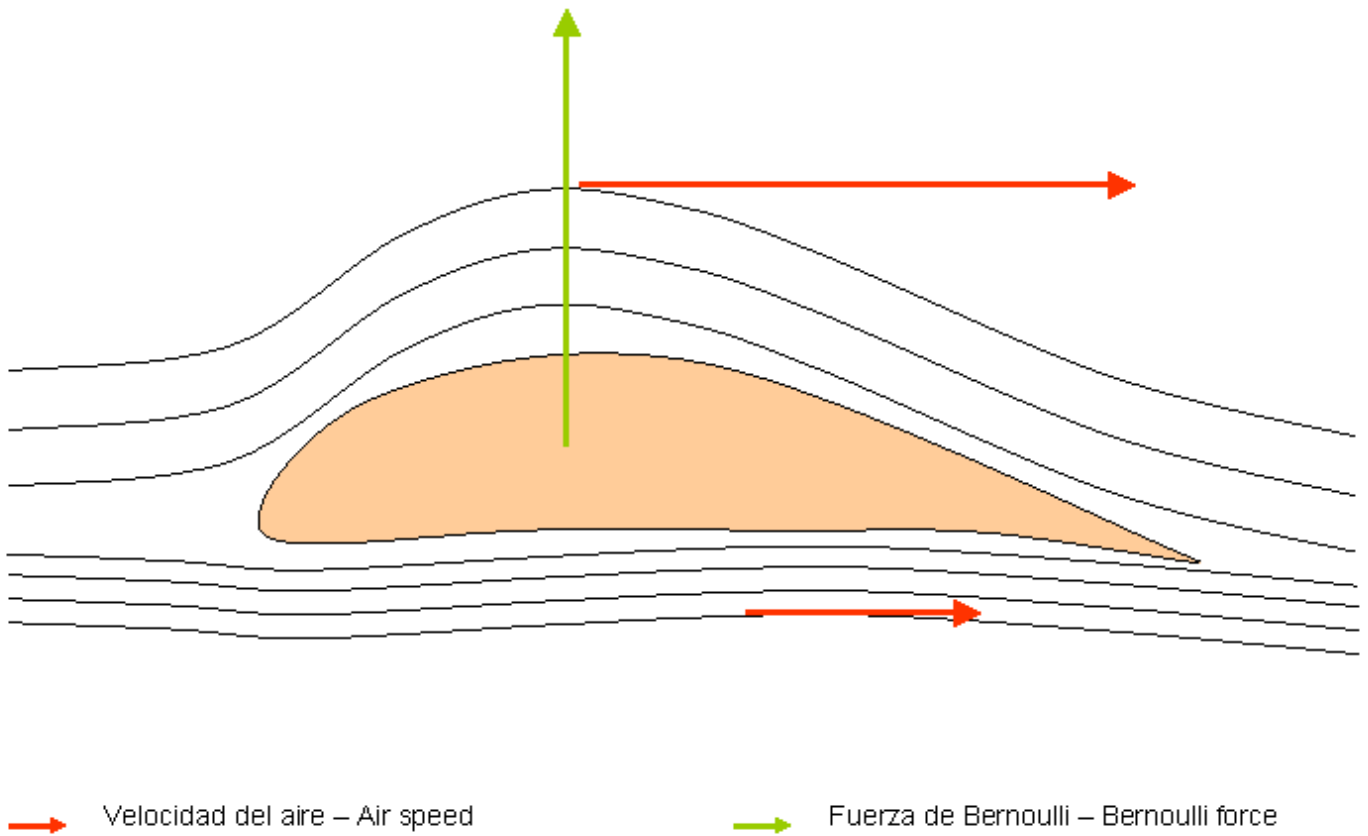
Uno de ellos es el efecto de Bernoulli que es el que se usa para proporcionar parte de la sustentación que permite a un avión volar. Si se observan las alas de un avión de perfil se nota que tienen una forma particular, como una gota horizontal con la parte inferior básicamente plana y la superior convexa o abultada hacia arriba. Esta forma permite usar el efecto Bernoulli para generar una fuerza o empuje vertical cuando el avión comienza a moverse. Cuando el aire comienza a fluir y encuentra el borde anterior del ala (o borde de ataque), el flujo se divide en dos. Una parte continúa sin cambio por debajo del ala, pero otra parte debe pasar por encima del ala. Debido a la forma del ala el aire que debe pasar por arriba debe recorrer en el mismo tiempo una mayor distancia que el que pasa por debajo (esto es una exigencia del principio de conservación de la energía aplicado a las moléculas de aire en movimiento), por lo cual el aire que pasa por arriba debe hacerlo a mayor velocidad que el que pasa por abajo. El aire ejerce menor presión cuanto más rápido se mueve, por lo que la presión en la parte superior del ala será menor a la presión en la parte inferior, con lo que se producirá una fuerza neta de arriba hacia abajo que tenderá a elevar el avión. Valga aclarar como nota al margen que la sustentación de los modernos aviones comerciales proviene solo en minoría del empuje de Bernoulli, la mayor parte es originada por el llamado empuje de resistencia que tiene que ver con el ángulo con que el ala "ataca" el aire (el mismo que es responsable de mantener las cometas en el aire).

Efecto Bernoulli

Y el perfil del ala de un avión

Bernoulli effect

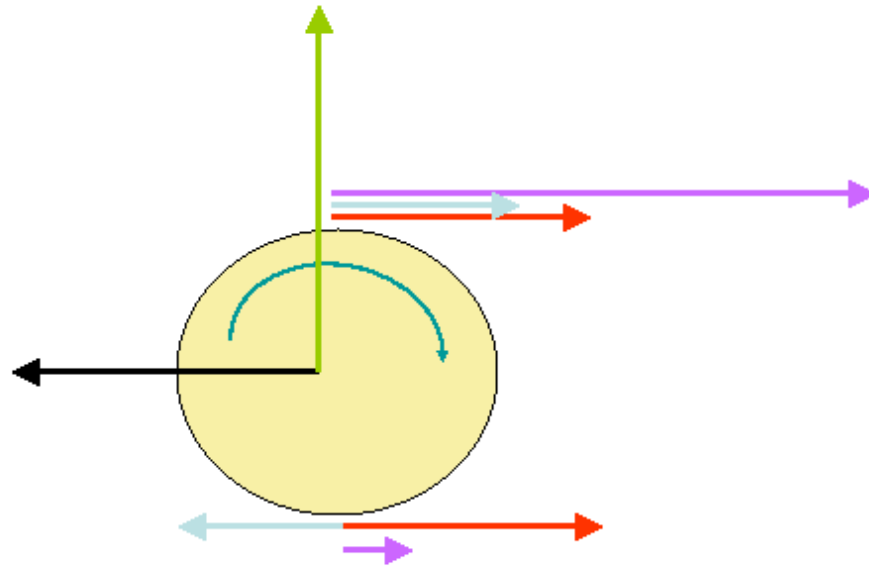
And the airplane wing profile



Entender como el efecto Bernoulli trabaja en una bola en vuelo es un poco más complicado y requiere un poco de imaginación. Primero consideremos una pelota fija rotando alrededor de un eje horizontal en el sentido de las agujas del reloj. El punto superior de la pelota se estará moviendo en cada instante con una velocidad dada hacia la derecha, y el inferior con igual velocidad pero hacia la izquierda. Hasta aquí nada significativo. Ahora soplemos aire desde la izquierda de la pelota. Un observador en la parte superior de la pelota ahora "verá" al aire moviéndose con la velocidad original del viento más la propia velocidad de la superficie de la bola debida a la rotación en el mismo sentido, en tanto uno en el punto inferior "verá" el aire moviéndose a menor velocidad en la misma proporción. El efecto total es que desde el punto de vista de la pelota, la velocidad de la parte inferior respecto al aire es menor que la velocidad en la parte superior, con ello estamos en las condiciones del efecto de Bernoulli, y la pelota recibe un empuje de arriba hacia abajo por el simple hecho de rotar en el aire en movimiento. Si ahora en lugar de soplar aire hacemos que la pelota genere su propio viento relativo moviéndola o lanzándola en vuelo a través del aire estático estamos reproduciendo una situación análoga, y el mismo efecto es observado en una pelota rotando en movimiento a través del aire.

Efecto Bernoulli sobre la pelota con spin

Bernoulli effect over a spinning ball



- ← Velocidad y dirección de movimiento – Movement and speed direction
- Dirección y velocidad del viento relativo a la pelota (igual y opuesto a la velocidad de la pelota) – Ball relative wind movement and speed direction (equal and opposite to the ball speed)
- Velocidad de la superficie de la pelota debido al giro – Spin induced speed of the ball surface
- Velocidad neta de la superficie – Net speed of the ball surface
- Fuerza de Bernoulli – Bernoulli force

El otro componente principal del efecto Magnus es aún más sutil. Se debe a la deformación de las capas de aire en la proximidad de la superficie de la pelota en movimiento. Consideremos el aire en reposo como una serie de capas horizontales del mismo espesor. Cuando la pelota irrumpe en el aire estático desplaza aire, esto es deforma las capas originales "apretándolas" por encima y por debajo de la esfera. La capa de aire inmediata a la superficie del cuerpo que es afectada por este se conoce como capa límite o boundary layer. Como decíamos, está compuesta por múltiples sub-capas o láminas continuas que no se interrumpen, ni se mezclan o cruzan, y se desplazan sin interferir una con la otra, pero si pueden "arrugarse" o "estirarse".

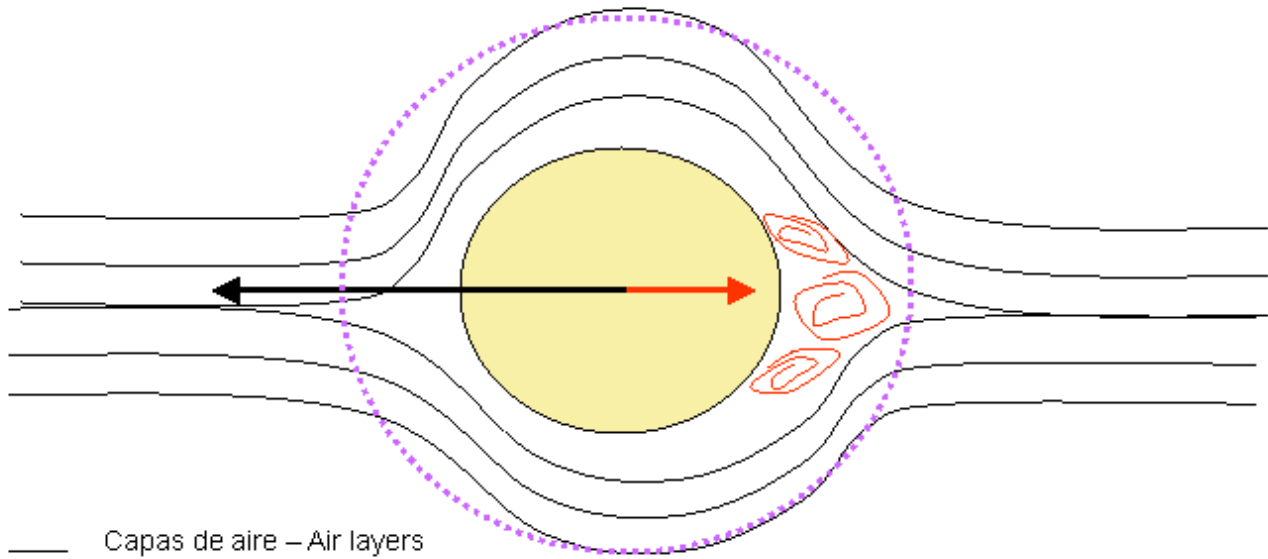
Cuando no hay rotación la deformación de la capa límite es simétrica y no influye mayormente en la trayectoria (salvo la formación de un torbellino caótico en la cola que contribuye a la resistencia en dirección contraria al movimiento de la pelota). Si ahora aplicamos topspin por ejemplo, y ponemos en rotación la bola, la simetría de la deformación de las capas de aire superior e inferior se pierde. Las capas superiores tenderán a "arrugarse" en forma de "cresta", en tanto las inferiores tienden a estirarse o plancharse. Esto produce una variación en el momento cinético del aire en la capa límite, que para cumplir con la ley de conservación del momento debe ser compensada con una variación de igual magnitud pero sentido contrario en el momento de la pelota, lo que se observa como una velocidad adicional en el mismo sentido que el efecto de Bernoulli, reforzando así el efecto Magnus total.

Aerodinámica de la pelota en movimiento sin spin

A baja velocidad: flujo laminar

Spin less moving ball aerodynamics

Low speed: laminar flow



— Capas de aire – Air layers

— Torbellinos - Whirlpools

..... Borde exterior de la capa límite – Boundary layer outer limit

← Velocidad y dirección de movimiento – Movement and speed direction

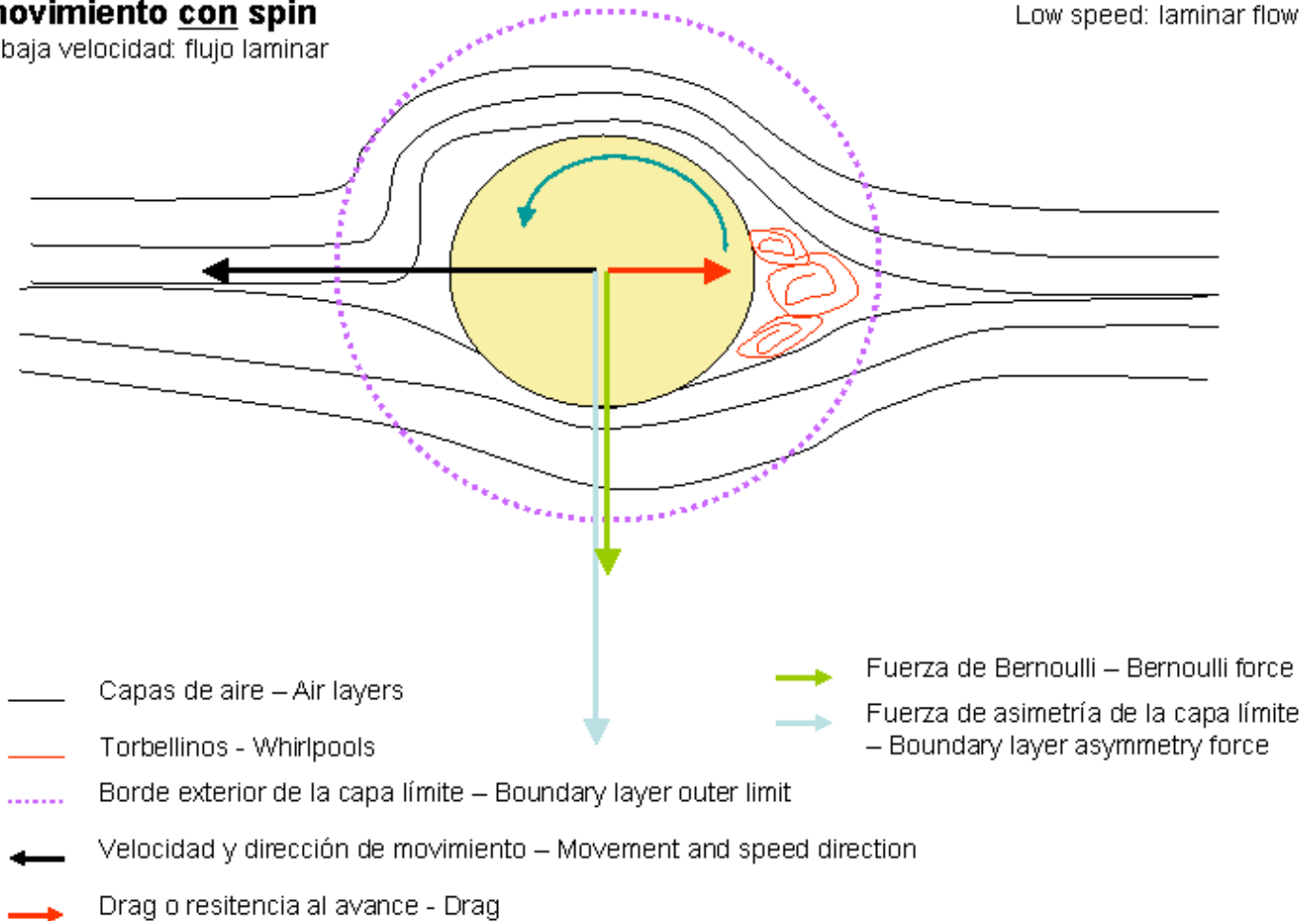
→ Drag o resistencia al avance - Drag

Aerodinámica de la pelota en movimiento con spin

A baja velocidad: flujo laminar

Spin moving ball aerodynamics

Low speed: laminar flow



Hasta aquí queda explicado desde el punto de vista del modelo físico aceptado hasta el momento los principales componentes que determinan el movimiento de una pelota en vuelo, siendo el efecto Magnus el más interesante pero también más complicado de interpretar teóricamente. Pero aún hay más variaciones en el comportamiento de una bola en vuelo debido al estado del aire en las inmediaciones de la superficie de la pelota. Para explicar la segunda componente del efecto Magnus, introducimos el concepto de las capas de aire y su deformación en la inmediación de la superficie de la bola. Pero ese no es el único estado que puede presentar la capa límite. El estado que describimos se llama "laminar" o de "flujo laminar" y es típico de las bajas velocidades. Sin embargo, si el cuerpo aumenta su velocidad, en algún punto la ordenada estructura laminar no puede conservarse y la capa límite pasa al estado "turbulento" o "flujo turbulento", en el cual las ordenadas láminas son sustituidas por torbellinos caóticos sobre la superficie del cuerpo. La física del flujo turbulento es bastante diferente de la del flujo laminar. Por una parte la formación de torbellinos en la cola del cuerpo en movimiento observada en el flujo laminar y responsable por gran parte de la resistencia a la traslación o drag, no es tan intensa, y el drag cae dramáticamente en el estado turbulento, permitiendo que el cuerpo mantenga velocidades más altas en vuelo. Por otro lado al desaparecer las láminas de aire que eran responsable por parte del efecto Magnus (la asimetría de la capa límite), dicho efecto se ve notoriamente disminuido. Dicho de otra forma una bola moviéndose en estado turbulento "siente" menos la interferencia del fluido alrededor y tiende a moverse más próximo a la parábola balística, haciendo su trayectoria más natural y predecible.

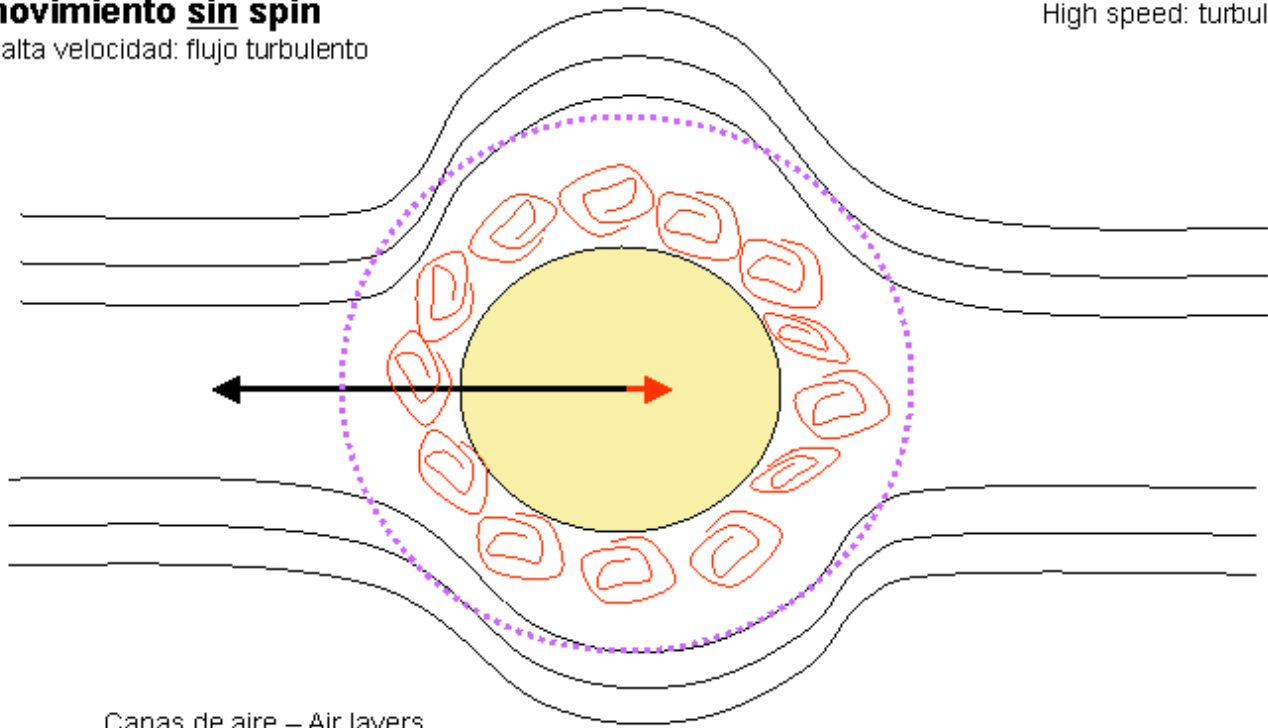
Todo esto hace que en principio sea relativamente simple darse cuenta si una bola se mueve en estado turbulento: si parece mantener su velocidad sin mayor "frenaje" aparente, y si pese a llevar spin no experimenta las desviaciones propias de efecto Magnus.

Aerodinámica de la pelota en movimiento sin spin

A alta velocidad: flujo turbulento

Spin less moving ball aerodynamics

High speed: turbulent flow



— Capas de aire – Air layers

— Torbellinos - Whirlpools

..... Borde exterior de la capa límite – Boundary layer outer limit

← Velocidad y dirección de movimiento – Movement and speed direction

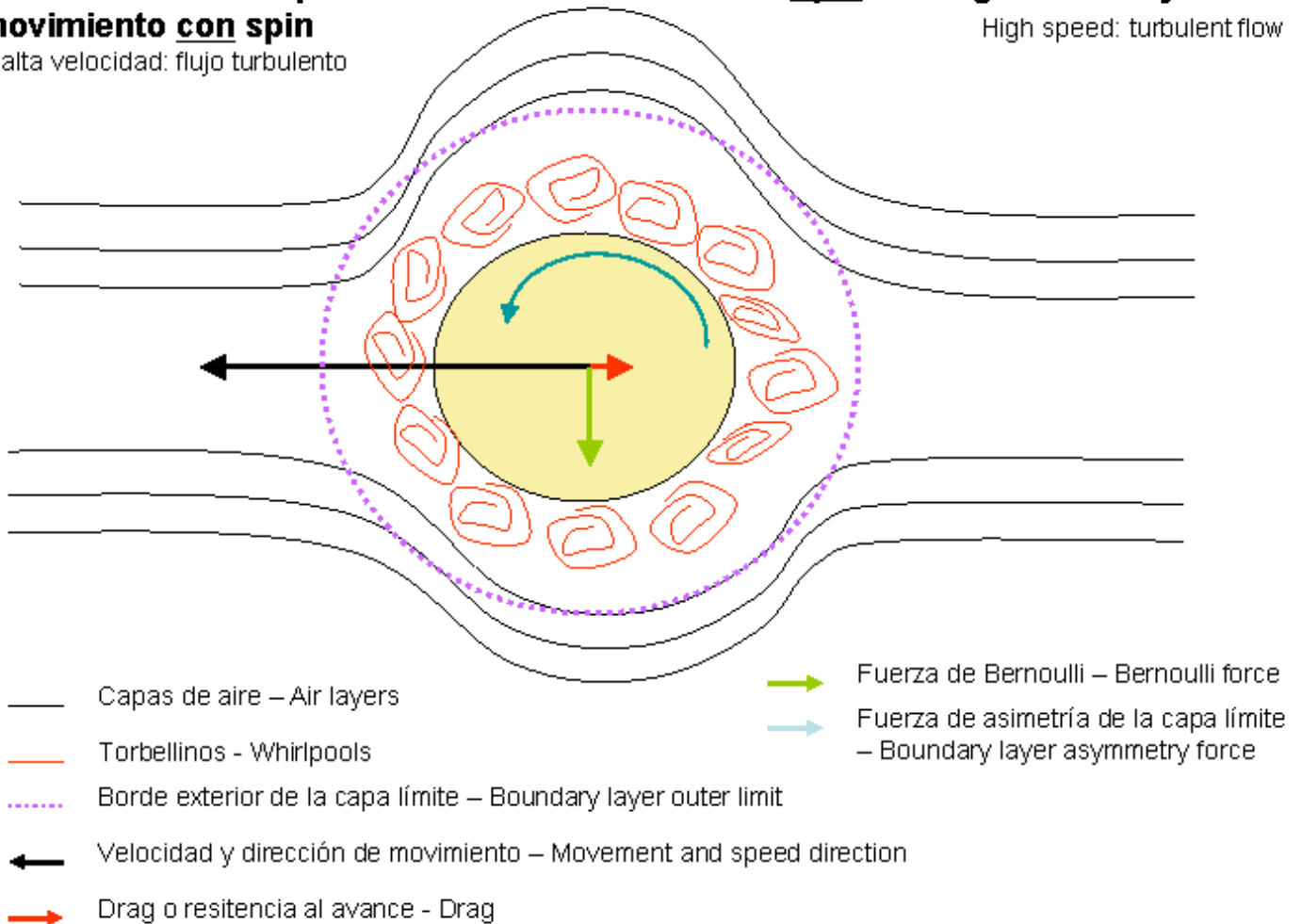
→ Drag o resistencia al avance - Drag

Aerodinámica de la pelota en movimiento con spin

A alta velocidad: flujo turbulento

Spin moving ball aerodynamics

High speed: turbulent flow



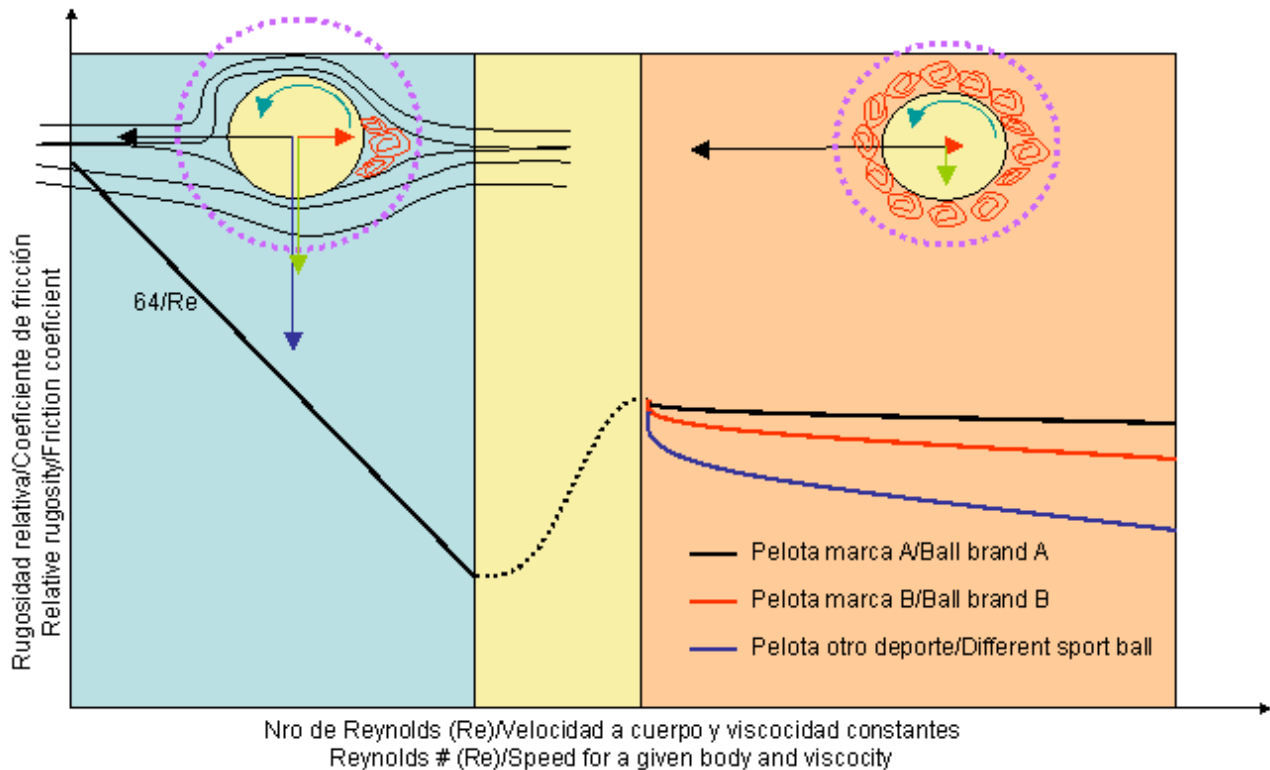
Pero las cosas se ponen aún más interesantes porque una bola en vuelo puede experimentar flujo turbulento tras ser impactada y moverse a máxima velocidad, pero luego, a causa de la resistencia -que por supuesto subsiste aún en flujo turbulento- disminuir su velocidad para pasar a flujo laminar. Esto quiere decir que el cuerpo puede empezar su vuelo en condiciones propias de la turbulencia (trayectoria veloz sin mayores desviaciones), pero terminar en condiciones laminares (trayectoria con velocidad en franca disminución y sometida a las desviaciones del efecto Magnus). Un golpe que haga a una pelota viajar pasando de un estado a otro es mucho más interesante y desconcertante para el rival. Imagínense ver salir una bola rápida aparentemente plana viajando básicamente en una recta, prepararse para contrarrestarla, y que a mitad de camino se transforme en una bola en franca desaceleración y que comience a desviarse notoriamente de la trayectoria inicial a consecuencia del efecto Magnus. Toda una sorpresa.

Pero la sorpresa no termina ahí debido a las particularidades de la "zona de transición", es decir, el punto en que se cambia del estado turbulento al laminar, definido por la velocidad o estrecho entorno de velocidades al cual se produce dicha transición. El hecho es que el cambio no es suave y continuo. En la transición de turbulento a laminar la resistencia o drag experimenta un decrecimiento brusco para luego retomar un crecimiento bastante pronunciado. Cuando la bola llega entonces a la zona de transición de repente deja de estar sometida a tanta resistencia, y la sensación subjetiva del que observa la bola es que la misma se acelera repentinamente sin sentido aparente (en realidad la bola sigue desacelerando, pero pasa a hacerlo a mucho menor ritmo, y el efecto al ojo y psiquis del observador se materializa como una repentina aceleración). Pero tan pronto como esto pasa la bola entra en la segunda fase de la transición y tan rápido como el drag cayó en la primer fase, ahora vuelve a aumentar, mateniendo esta tendencia por el resto del vuelo de la bola hasta que sea interceptada o se detenga. La sensación subjetiva del observador será ahora, tras una aparente aceleración súbita en medio del vuelo, una desaceleración igualmente súbita que mantendrá su ritmo a partir de ese punto.

El fenómeno es ilustrado usando el **diagrama de Moody**:

Diagrama de Moody

Moody diagram



Zona laminar: el drag cae uniformemente al aumentar la velocidad con independencia del cuerpo
Laminar zone: drag falls uniformly regardless of the particular body

Zona de transición: el drag asciende sin seguir una ley específica
Transition zone: drag increases without following any specific rule

Zona turbulenta: el drag depende del cuerpo específico, decrece lentamente con la velocidad
Turbulent zone: drag depends on the body, slowly decreases with speed

Repasemos entonces todos los cambios y percepción del vuelo de la pelota desde el punto de vista del rival en un viaje que transicione de turbulento a laminar. El jugador impacta la bola con suficiente energía como para despedir la pelota con velocidad suficiente para entrar en estado turbulento. La pelota viaja en una trayectoria notablemente fija, experimentando un drag constante con lo que la velocidad varía poco y lo hace a un ritmo básicamente fijo. En esta etapa la trayectoria de la pelota a los ojos del rival es predecible, la mayor dificultad para él controlar la velocidad. Pero ahora la velocidad baja lo suficiente y la bola entra en la zona de transición. A los ojos del rival la bola mágicamente parecerá acelerarse en el medio del aire, pero antes de tener tiempo para procesar esta sorpresa la pelota parecerá frenarse tan bruscamente como pareció hacer lo contrario instantes antes, simultáneamente, al salir de la transición y entrar al flujo laminar, el efecto Magnus se manifestará al máximo de inmediato, con lo que a la vista del sorprendido receptor ahora la pelota además parecerá empezarse a torcer abruptamente en el aire.

Sin duda un tiro que transite de turbulento a laminar, con intenso spin y alta velocidad inicial sea posiblemente el golpe perfecto, más cercano a la magia -si no se conoce la física del fenómeno- que al deporte.

Posiblemente en tenis de mesa el golpe "mágico" no sea simple de lograr sobre todo por la corta trayectoria del vuelo que quizá no sea suficiente para permitir la transición de turbulento a laminar. Sin embargo en fútbol, en los tiros de larga distancia, hay mejores chances, aunque tampoco es algo que se vea cotidianamente. Son pocos los jugadores que conciente y sistemáticamente sacan partido del vuelo mixto del balón. Uno de ellos es Roberto Carlos de Brasil, el mejor ejecutante de tiros de afuera del área contemporáneo y probablemente de la historia. Se dice que intuitivamente hace uso de los vuelos de transición e incluso forman parte de sus prácticas. En particular hay un gol capturado por las cámaras de televisión que fascinó de tal manera a jugadores y espectadores que ameritó su estudio puntual, y fue explicado usando los mismo argumentos expuestos aquí (ver [artículo](#)).

Conceptos claves para explicar la aerodinámica de la pelota en movimiento

- **Viscosidad (viscosity) del fluido:** medida de la "espesura" de un fluido, es decir de cuanta resistencia opone al movimiento de sus moléculas y de los objetos que se muevan dentro del mismo (la miel es mucho más viscosa que el agua, y el agua es más viscosa que el aire; el vacío no tiene viscosidad alguna)
- **Rugosidad:** propiedad de la superficie de un cuerpo. La rugosidad es un reflejo de cuanto mayor es la superficie real del cuerpo respecto a la superficie ideal correspondiente a su forma. Entre las pelotas esféricas, una bola de billar es extremadamente lisa, es decir, poco rugosa, porque la medida de su superficie se aproxima notablemente la de una esfera ideal o perfecta con el mismo diámetro. Sin embargo una pelota de golf con los

numerosos hoyuelos impresos en su superficie intencionalmente aumenta su rugosidad incrementando la superficie notoriamente respecto a la de una esfera ideal del su mismo diámetro

- **Fricción o rozamiento (friction):** la fuerza en la dirección opuesta al movimiento del cuerpo dentro del fluido debido exclusivamente a la viscosidad del fluido y la rugosidad del cuerpo
- **Resistencia viscosa (drag):** es la fuerza total opuesta al movimiento de un cuerpo moviéndose dentro del fluido. Incluye a la fricción, pero también a la resistencia debida a la forma del cuerpo
- **Número de Reynolds (Re):** adimensionado igual al producto de velocidad por diámetro de un cuerpo esférico dividido por la viscosidad del medio en que se mueve. Incluye los tres factores que rigen la resistencia o drag. Si el cuerpo es una pelota deportiva moviéndose en el aire en un lugar geográfico y meteorológico fijo (la densidad y con ello la viscosidad del aire varían notablemente con la altura, temperatura, humedad y presión atmosférica) se pueden considerar diámetro y viscosidad constantes con lo que el número de Reynolds depende solo de la velocidad del cuerpo
- **Capa límite:** es la capa de fluido inmediatamente adyacente a la superficie del cuerpo en movimiento dentro del fluido
 - **Estado laminar** de la capa límite: un estado en que la capa límite está compuesto por un conjunto de sub-capas paralelas que fluyen en forma ordenada
 - **Capa de Prandtl:** la sub-capa de la capa límite en estado laminar inmediatamente lindera a la superficie
 - **Estado turbulento** de la capa límite: un estado en que las partículas de fluido en dicha capa se mueven en forma caótica, formando torbellinos
 - **Zona de transición** de la capa límite: es la velocidad (o entorno de velocidades) a la que la capa pasa del estado laminar al turbulento
- **Diagrama de Moody:** muestra la relación entre el coeficiente de fricción y Re. Se caracteriza por ser lineal, independiente de la rugosidad del cuerpo, y decreciente a los Re bajos (velocidad baja) correspondientes al flujo laminar, un salto creciente abrupto en la estrecha zona de transición al flujo turbulento, y un suave decrecimiento a partir de allí que también depende de la rugosidad relativa del cuerpo (a mayor rugosidad la fricción permanece prácticamente constante a pesar que aumente la velocidad, haciéndose más notorio un decrecimiento de la fricción con la velocidad para superficies más rugosas)
- **Efecto Magnus:** fenómeno observado cuando un cuerpo esférico que avanza rotando perpendicularmente a su traslación dentro de un fluido. Consiste en la desviación de la trayectoria que sería observable en el vacío en ausencia de fluido. Este efecto responde en parte al efecto Bernoulli y a la asimetría inducida por la rotación en la capa límite laminar
- **Efecto Bernoulli:** fuerza o empuje sobre un cuerpo asimétrico en movimiento dentro de un fluido. Cuando un cuerpo asimétrico, particularmente uno con una cara plana y otra cóncava como el perfil del ala de un avión, se mueve dentro de un fluido, el fluido que pasa sobre la superficie cóncava debe hacerlo a una mayor velocidad que el que lo hace sobre la plana. Cuanto más rápido fluye un fluido menos presión ejerce. A consecuencia de esto la presión relativa en la superficie plana es superior a aquella en la superficie cóncava y el cuerpo experimenta una fuerza neta en dirección de la concavidad del cuerpo.

Historia

Isaac Newton fue el primero en describir y teorizar sobre el movimiento de una pelota de tenis después de observar un partido en el Cambridge Colleg de acuerdo a James Gleick en su obra sobre el extraordinario genio inglés editada en el 2004.

Pero formalmente se le adjudica al químico y físico alemán Heinrich Magnus la primera descripción formal en 1853. Aunque su nombre sea famoso por el efecto aerodinámico, su principal dedicación estuvo orientada al estudio de compuestos químicos de platino-amonio (como las sales verdes de Magnus) y ácidos, la reducción de densidad en granates y vesuvianita cuando se funden, absorción de gases en la sangre, la expansión de los gases por el calor, las presiones de vapores de agua y otras sustancias, termoelectricidad, electrólisis, inducción de corriente, conducción de calor por gases, polarización del calor, propiedades diatérmicas de gases y vapores, y efectos térmicos de la condensación de vapores en superficies sólidas.

Su estudio de la desviación de los proyectiles de arma de fuego lo llevaron a estudiar el efecto aerodinámico que lleva su nombre.

También se destacó con un excelente docente, y alto catedrático llegando al rectorado de la Universidad de Berlín.