

MINISTERIO DE EDUCACIÓN Y CULTURA
Consejo Superior de Deportes

TECNOLOGÍA DEPORTIVA

*Control del rendimiento de los
deportistas y de las instalaciones*

19

INVESTIGACIONES EN CIENCIAS DEL DEPORTE

icad

MINISTERIO DE EDUCACIÓN Y CULTURA
Consejo Superior de Deportes

TECNOLOGÍA DEPORTIVA

*Control del rendimiento de los
deportistas y de las instalaciones*

19

icd

SERIE ICd DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS DEL DEPORTE

La Serie ICd, de Investigación en Ciencias del Deporte, es una publicación del Consejo Superior de Deportes que pretende satisfacer la demanda de información científica especializada, difundiendo los trabajos que, por su calidad, actualidad y rigor científico, difundiendo los trabajos que, por su calidad, actualidad y rigor científico, pueden ser de interés para los especialistas.

Los trabajos que se publican en ICd son seleccionados por un Comité Científico, están sujetos a la «Normativa General para la presentación de trabajos» del Programa de publicaciones del Consejo Superior de Deportes y, en la mayoría de los casos, son producto de las becas y ayudas a la investigación que concede el C.S.D.

“Los artículos publicados en la serie ICD se encuentran referenciados en la base de datos bibliográfica sobre deportes ATLANTES, fruto de la colaboración entre distintos centros de documentación e información y bibliotecas deportivas españolas e iberoamericanas. Esta nueva base de datos se encuentra en el CD-ROM de Silver Platter junto a SPORTDISCUS y HERACLES y también puede consultarse a través de Internet: (<http://www.uida.es/basedatos/atlantis.html>)”.

Director Editorial:

José Luis Hernández Vázquez

Coordinación Editorial:

Miguel Angel Gutiérrez Medina

Consultores Científicos:

Fernando Andrés Pérez, Alicia Canda, Javier Durán, Amelia Ferro, Mónica de la Fuente, Manuel García Ferrando, Rafael Manso, Agustín Meléndez, Cecilia Rodríguez Bueno, Ramiro Merino Merchán, Cristóbal Moreno Palos, Enrique Navarro Cabello, Silvio Rubio, Luis M. Ruiz Pérez, Fernando Sánchez Bañuelos, Benilde Vázquez.

Edita:

Ministerio de Educación y Cultura
Consejo Superior de Deportes
© 1998

Edición no venal.

N.I.P.O.: 663-09-040-2

Depósito Legal: M-14322-2009

Distribución e información:

Centro Nacional de Investigación
y Ciencias del Deporte
C/ del Greco s/n Tl. 91/589 05 50
28040 Madrid Fax 91/544 81 22

Web: <http://www.mec.es/csd>

e-mail: secinfo.dep@csd.mec.es

Venta:

Librería del B.O.E.
C/ Trafalgar, 29 Tel. 91/538 22 95
28071 Madrid Fax 91/538 22 67

NOTA: Los trabajos presentados expresan el criterio y valoraciones de sus autores sin que el Consejo Superior de Deportes comparta necesariamente las tesis o conceptos expuestos en ellos. Permitida la reproducción parcial citando la fuente.

TECNOLOGÍA DEPORTIVA

Control del rendimiento de los deportistas y de las instalaciones

Aplicaciones del túnel aerodinámico en el entrenamiento y mejora de técnicas deportivas

González, M.A.; Pérez, G.; Martín, A.; Pérez, A.; Priego, R.; Robledo, J.; Rodríguez, A.; Rosa, S. de la; Sánchez, C.

BIOFOOT-IBV. Una técnica de registro y análisis de la distribución de presiones plantares aplicable a la mejora del rendimiento deportivo

Martínez, A.; Hoyos, J.V.; Brizuela, G.; Ferrús, E.; González, J.C.

Análisis de la adecuación biomecánica y deportiva de un conjunto de pavimentos deportivos

Durá, J.V.; Lozano, L.; Hoyos, J.V.

ICd NÚM. 19

MINISTERIO DE EDUCACIÓN Y CULTURA
Consejo Superior de Deportes

ÍNDICE

TECNOLÓGIA DEPORTIVA Control del rendimiento de los deportistas y de las instalaciones

	<u>Pág.</u>
I. APLICACIONES DEL TUNEL AERODINAMICO EN EL ENTRENAMIENTO Y MEJORA DE TECNICAS DEPORTIVAS	7
1. Introducción	11
2. Conocimientos básicos de aerodinámica	17
2.1 Ecuación de Bernoulli	19
2.2 La paradoja de D'Alembert	22
2.3 La capa límite	22
2.4 Desprendimiento de la capa límite y resistencia aerodinámica de forma	25
2.5 Resistencia aerodinámica de fricción	28
2.6 Fuerza de sustentación	29
2.7 Coeficientes de sustentación y de resistencia	31
2.8 Efecto Magnus	32
3. Túneles aeroninámicos	33
3.1 Concepto de túnel aerodinámico	33
3.2 Clasificación de los túneles	35
3.3 Descripción de un túnel de circuito cerrado	37
3.4 Descripción de un túnel de circuito abierto	39
3.5 Realización de ensayos en túnel	40
4. Aplicaciones en el deporte	45
4.1 Atletismo	45
4.1.1 Carreras	46
4.1.2 Lanzamiento de disco	47
4.1.3 Lanzamiento de jabalina	50
4.2 Deportes de Pelota	52
4.2.1 Béisbol	52
4.2.2 Cricket	55
4.2.3 Golf	56
4.2.4 Tenis	57
4.3 Esquí alpino	57
4.3.1 Descenso	58
4.3.2 Salto	60
4.4 Vela	61
4.5 Ciclismo	62
4.5.1 Pruebas en pista	62
4.5.2 Pruebas en ruta	63
4.5.3 Realización de ensayos	66
5. Conclusiones	68
6. Agradecimientos	69
7. Bibliografía	69

II. BIOFOOT-IBV. UNA TÉCNICA DE REGISTRO Y ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES PLANTARES APLICABLE A LA MEJORA DEL RENDIMIENTO DEPORTIVO	73
1. Introducción	77
2. Descripción del equipo BIOFOOT/IBV	79
3. Aplicaciones generales de biofoot/ibv	82
4. Aplicación de BIOFOOT/IBV al desarrollo de una nueva bota de fútbol .	83
5. Resultados	85
6. Conclusiones	86
7. Otras aplicaciones de Biofootaby al estudio del gesto deportivo	87
8. Bibliografía	88
III. ANÁLISIS DE LA ADECUACIÓN BIOMECÁNICA Y DEPORTIVA DE UN CONJUNTO DE PAVIMENTOS	89
1. Introducción y objetivos	93
2. Material y métodos	95
2.1 Búsqueda bibliográfica y documentación	95
2.2 Selección de las instalaciones a ensayar	96
2.3 Ensayos con máquinas	96
2.3.1 Caracterización de Dureza y Rugosidad	97
2.3.2 Ensayos de amortiguación	98
2.3.3 Ensayos de fricción	99
2.3.4 Ensayo de bote vertical de la pelota	100
2.4 Realización de encuestas	101
2.5 Tratamiento de datos y elaboración de informe	101
3. Resultados	102
3.1 Amortiguación	102
3.2 Bote de pelota, coeficiente de fricción, longitud de deslizamiento, dureza shore y rugosidad	103
3.3 Encuestas	105
3.4 Correlaciones entre variables de amortiguación	105
4. Análisis y conclusiones	106
5. Bibliografía	107
Anexo 1: Puntos de ensayo	109
Anexo 2: Resultados parciales	111
Anexo 3: Encuestas	113

APLICACIONES DEL TÚNEL AERODINÁMICO EN EL ENTRENAMIENTO Y MEJORA DE TÉCNICAS DEPORTIVAS

APPLICATIONS OF THE WIND
TUNNEL FOR TRAINING AND
IMPROVING SPORTS TECHNIQUES

*González, M. A.
Pérez, G.
Martín, A.
Pérez, A.
Priego, R.
Robledo, J.
Rodríguez, A.
Rosa, S. de la
Sánchez, C.*

Dirección para correspondencia:

Universidad Politécnica de Madrid
E.T.S.I. Aeronáuticos
Depto. de Vehículos Aeroespaciales
Plaza del Cardenal Cisneros, s/n
Ciudad Universitaria
28040 Madrid
SPAIN
Tel.: 91 336 63 00
Fax: 91 336 75 11
E-mail: magonza@dva.dva.upm.es



Miguel A. González Hernández es Dr. Ingeniero Aeronáutico y profesor Titular del Dpto. de Vehículos Aeroespaciales de la Universidad Politécnica de Madrid. Ha sido responsable de operación del túnel aerodinámico de la E.T.S.I. Aeronáuticos, Jefe de la Sección de Aerodinámica Experimental en Construcciones Aeronáuticas, S.A. y Director Técnico del proyecto de sistema de recuperación de los "boosters" del Ariane 5 en la empresa CIMSA Ingeniería de Sistemas, S.A. Desde su reincorporación a la universidad en 1994 ha trabajado en aerodinámica experimental, en el diseño de túneles aerodinámicos, dirección de proyectos de fin de carrera sobre el tema, etc. Desde 1996 dirige programas financiados por el Consejo Superior de Deportes dedicados a la aplicación de los túneles aerodinámicos en el entrenamiento de deportistas. Sobre ese tema ha dado sendas conferencias en el INEF de León y en el COE. En la actualidad dirige el Grupo de Aerodinámica Experimental (GRAEX).



Gonzalo Pérez Muñoz es Ingeniero Aeronáutico y becario del DVA en el GRAEX, habiendo participado en el diseño de varios túneles aerodinámicos, incluyendo el del Laboratorio de Aerodinámica de la ETSIA, así como en la verificación experimental de estos, diseño de instrumentación y la implementación de adquisición de datos para los mismos. Es experto en comunicaciones vía Internet, y ha realizado la instalación de la red informática del Dpto. de Vehículos Aeroespaciales de la ETSIA.



Alberto Martín Macías Ingeniero Aeronáutico, ha colaborado con el Ejército del Aire en la realización de planes de mantenimiento para células y plantas de potencia de aeronaves de rescate y reconocimiento. Como perteneciente al GRAEX y como becario del Departamento de Vehículos Aeroespaciales y posteriormente de la U.P.M., ha participado en programas de ensayos en el Túnel Aerodinámico de la E.T.S.I.A., y en el diseño de túneles aerodinámicos para distintos organismos (entre los que se encuentra el C.S.D.). Ha participado en las ponencias que el GRAEX ha realizado en congresos sobre entrenamiento deportivo. Actualmente trabaja para la División Espacio de C.A.S.A. participando en los programas Ariane 5, ENVISAT, HISPASAT y METOP.



Alicia Pérez Izquierdo es Licenciada en Ciencias Económicas por la Universidad Complutense de Madrid, en la que cursó estudios de Gestión de Cooperativas. Ha trabajado en distintos programas universitarios y en actividades de marketing de aplicaciones de internet y comunicación por satélite, así como en la traducción de libros de carácter científico. Es responsable de Administración y Control de Documentación en el GRAEX.



Rodrigo Priego López en la actualidad cursa 6.º curso de Ingeniero Aeronáutico, en E.T.S.I. Aeronáuticos a la vez que realiza una beca de formación en G.M.V. Desde Junio de 1997 colabora con el Departamento de Vehículos Aeroespaciales en el GRAEX. También en la actualidad se encuentra realizando como proyecto fin de carrera "Diseño de Túnel Aerodinámico de baja velocidad para entrenamiento de deportistas de élite".



Jesús Robledo Bueno es Ingeniero Aeronáutico en especialidad de propulsión. Colaboró durante el verano de 1997 con el Moscow Aviation Institute y durante el año 1998 con la Universidad Politécnica de Madrid en el desarrollo de un túnel aerodinámico para deportistas de élite, como becario del GRAEX.



Antonio S. Rodríguez Perales en la actualidad cursa 6.º curso de Ingeniero Aeronáutico, en E.T.S.I. Aeronáuticos a la vez que realiza una beca de formación en G.M.V. Desde Junio de 1997 colabora con el Departamento de Vehículos Aeroespaciales dentro del grupo GRAEX. También se encuentra realizando como proyecto fin de carrera el "Diseño de Túnel Aerodinámico de baja velocidad para entrenamiento de deportistas de élite".



Sonia de la Rosa Llano en la actualidad cursa 6.º curso de Ingeniero Aeronáutico, en E.T.S.I. Aeronáuticos a la vez que realiza una beca de formación en G.M.V. Desde Junio de 1997 colabora con el Departamento de Vehículos Aeroespaciales dentro del grupo GRAEX. También se encuentra realizando como proyecto fin de carrera el "Diseño de Túnel Aerodinámico de baja velocidad para entrenamiento de deportistas de élite".



César Sánchez Fernández, Ingeniero Aeronáutico, trabaja en Dirección de Materiales de C.A.S.A. Ha sido profesor de Mecánica de Fluidos en una academia y de Inglés en el Seminario Permanente de Filología del Inglés de la Universidad de Extremadura para Niños. Becario del Departamento de Vehículos Aeroespaciales y de C.A.S.A. durante los años 1997 y 1998, respectivamente y miembro del GRAEX durante 3 años.

Este artículo es el fruto de más de un año de trabajo del Grupo de Aerodinámica Experimental (GRAEX) del Departamento de Vehículos Aeroespaciales de la Universidad Politécnica de Madrid. En una primera versión se presentó en el IV Congreso Internacional sobre Entrenamiento Deportivo (León, Octubre 1997). El texto se amplió y revisó para una conferencia en el Comité Olímpico Español y, finalmente, se ha vuelto a revisar para su inclusión en este libro.

El primer documento fue fruto del trabajo conjunto de todos los autores mencionados, dirigidos por el Profesor González Hernández, pero esta última revisión ha requerido de un enorme esfuerzo por parte de Gonzalo Pérez Muñoz, que es justo reconocer aquí. De igual manera, hay que reconocer la aportación adicional en esta fase de Alicia Pérez, en la preparación de las figuras y revisión del texto, y de Jesús Robledo en la presentación de varias figuras.

This article is the fruit of more than a year's work by the Experimental Aerodynamic Group (GRAEX) from the Department of Aerospace Vehicles at the Madrid Polytechnic University. A first version was presented at the IV International Congress on Sports Training (León, October 1997). The text was extended and revised for a presentation to the Spanish Olympic Committee, and finally, it has again been revised for its inclusion in this book.

The first document was the result of the combined efforts of all the above-mentioned authors, directed by Professor González Hernández, but this last revision has been possible thanks to the enormous efforts of Gonzalo Pérez Muñoz, which deserves to be acknowledged here. At the same time we would like to thank Alicia Pérez for her valuable contribution at this stage in the preparation of the figures and the revision of the text and Jesús Robledo for the presentation of several figures.

1. INTRODUCCIÓN

En muchos deportes olímpicos las velocidades son suficientemente altas como para que una reducción en la resistencia aerodinámica pueda mejorar significativamente las marcas logradas; por eso entrenadores y atletas han de prestarle una atención considerable al uso de técnicas que maximicen sus beneficios o minimicen sus efectos negativos.

Existen algunos deportes en los que la resistencia aerodinámica tiene un papel fundamental: las carreras, tanto de cortas como de largas distancias, esquí, ciclismo, el kilómetro lanzado o la caída libre de paracaidismo son actividades en las que la resistencia al avance va a determinar en gran medida sus rendimientos; incluso en un maratón, en el que las velocidades típicas se encuentran en torno a los 5.5 m/s, las fuerzas aerodinámicas son apreciables; en todos ellos, la elección de prendas y posturas adecuadas que logren minimizar la resistencia puede significar una mejora substancial en las marcas logradas.

Hay otros deportes en los que las fuerzas aerodinámicas son incluso más importantes, en particular los que combinan motor y alta velocidad; sin embargo, aquí sólo trataremos de aquellos en los que el hombre es la única fuente de potencia, dejando para otro trabajo la aplicación a los deportes del motor.

La resistencia de un cuerpo, que pensemos puede ser un atleta o un maniquí, desplazándose respecto a un fluido, puede medirse, en principio, de dos diferentes maneras. En la primera, el cuerpo se mantiene en reposo y es sometido a una corriente fluida a la velocidad adecuada para simular las condiciones deseadas; para medir las fuerzas aerodinámicas que el fluido ejerce sobre el cuerpo se une éste a una balanza; estas instalaciones de experimentación son las que reciben el nombre de túneles aerodinámicos. La segunda manera consiste en mover el cuerpo en un medio ambiente en calma. En este caso, el cuerpo es el que se mueve en el seno del fluido, y la fuerza necesaria para arrastrarlo a través del fluido en reposo representa la resistencia del mismo. Si el cuerpo se encuentra unido a un vehículo de arrastre, entonces la resistencia se mide con una balanza situada en la barra de unión del cuerpo con el vehículo. Este último modo resulta más impreciso y mucho más engorroso.

Kyle y Caiozzo, (1986), presentan resultados de trabajos propios y de otros investigadores relacionados con la resistencia aerodinámica en el *sprint*, en carreras de larga distancia, en el esquí, el patinaje y el ciclismo. Las conclusiones de los diferentes estudios en la resistencia aerodinámica son contundentes: en el kilómetro lanzado se pueden conseguir mejoras en la resistencia aerodinámica de hasta un 10% empleando prendas de "spandex" absolutamente liso en lugar de las tradicionales de lana; en el ciclismo se pueden lograr reducciones del 6% en la resistencia usando ropa mejorada; también se muestra como el llevar el pelo largo, sin recoger, significa un incremento de la resistencia entre el 3% y 7%. En este mismo campo del ciclismo, haciendo ensayos más precisos, lograron demostrar que la resistencia aerodinámica es un 15.6% mayor si se usa ropa de algodón poco ceñida, en comparación con la ropa de lana muy fina, y la diferencia entre llevar un casco de "spandex" sobre pelo corto y un pelo largo suelto es del 127%, en términos referidos a la resistencia de la cabeza.

Asimismo, mediante ensayos realizados empleando maniqués vestidos con diferentes tejidos como modelos de ensayo en túnel aerodinámico, se ha demostrado que a una velocidad de 9.7 m/s un velocista vestido con ropas de *nylon* tiene una resistencia aero-

dinámica un 43% mayor que si no llevara ropas; sin embargo, con prendas de poliuretano bañado de goma fabricadas expresamente para ajustarse al cuerpo de cada corredor, esa resistencia es incluso menor que si no llevaran nada, reduciéndose un 0.6%.

En un ensayo realizado durante una carrera de *trial*, los deportistas corrieron significativamente más deprisa (1.2%) en 100 m con un traje a medida de *nylon* elástico que se ajusta perfectamente al cuerpo del corredor (*hooded speed suit*), que con los tradicionales pantalones y camisetas.

Para esbozar una idea de lo que significan estas cifras en mejoras de los tiempos en distintas pruebas, puede ponerse como ejemplo que una reducción del 2% en la resistencia se traduce en 0.01 segundos ganados en los 100 m lisos, o en 5.7 segundos en una maratón. Publicaciones específicas señalan que las mejoras en los tiempos conseguidas gracias a prendas más aerodinámicas son mayores que los márgenes de victoria en muchos acontecimientos deportivos actuales.

El coeficiente de resistencia no depende única y exclusivamente de la forma del cuerpo. Tiene también importancia la dirección desde la que llega la corriente; si la forma del cuerpo es elíptica, como un balón de rugby, por ejemplo, la resistencia aerodinámica será mucho mayor si la corriente incide en la dirección de un eje menor que si lo hace en la del eje mayor, esto es debido a que la corriente se es capaz de ajustarse mejor a la forma del balón cuando la dirección de la corriente coincide con su eje longitudinal (véase la Fig. 1.1).

Si la corriente incidente llega al cuerpo bajo un ángulo, llamado ángulo de ataque, las líneas de corriente se desprenden formando torbellinos y aumentando considerablemente el valor del coeficiente de resistencia.

El esquí, junto con el ciclismo, son dos claros ejemplos en los que la posición y el área frontal se pueden controlar en gran medida variando la posición. En ciclismo, por ejemplo, se ha podido comprobar que variaciones en el área frontal desde 0.5 m² (ciclista levantado), a 0.42 m² (posición de pedaleo normal) y a 0.32 m² (posición de carrera) suponen mejoras de 0.97 km/h y 1.13 km/h cuando la velocidad del ciclista es de 24 km/h, para una misma potencia desarrollada por éste.

No existe ninguna duda en cuanto a que las fuerzas aerodinámicas afectan a las mejoras de los récords. Un ejemplo más para ilustrar la importancia de la reducción de la resistencia lo constituye lo ocurrido en 1968, en los Juegos Olímpicos de México, a una altura de 2340 m. En estos Juegos se batieron los récords de 100 m, 200 m, 400 m y 800 m, triple salto, salto con pértiga y salto de longitud en categoría masculina; en este último, Bob Beamon dejó el récord en 8.90 metros, superando en más de medio metro al que le precedía. Estos notables resultados no se deben más que a los efectos de la altura, pues a 2000 m la densidad del aire es considerablemente menor que sobre el nivel del mar y esto se traduce en una reducción de la resistencia aerodinámica para el atleta de un 20%, lo que representa, a efectos prácticos, una mejora de 0.08 s en 100 m. y 0.16 s en 200 m, por ejemplo. Estas cifras fueron calculadas por Kyle y Caiozzo (1986) y corroboradas posteriormente por Dapena y Feltner (1987) y Nicholas P. Linthorne, del departamento de física de la Universidad de 'Western Australia'. También en el mundo del ciclismo Mosser, conocedor de esta ventaja, prefirió la altura para establecer su récord de la hora en 1984, escogiendo el velódromo de la ciudad de México a 2260 m.

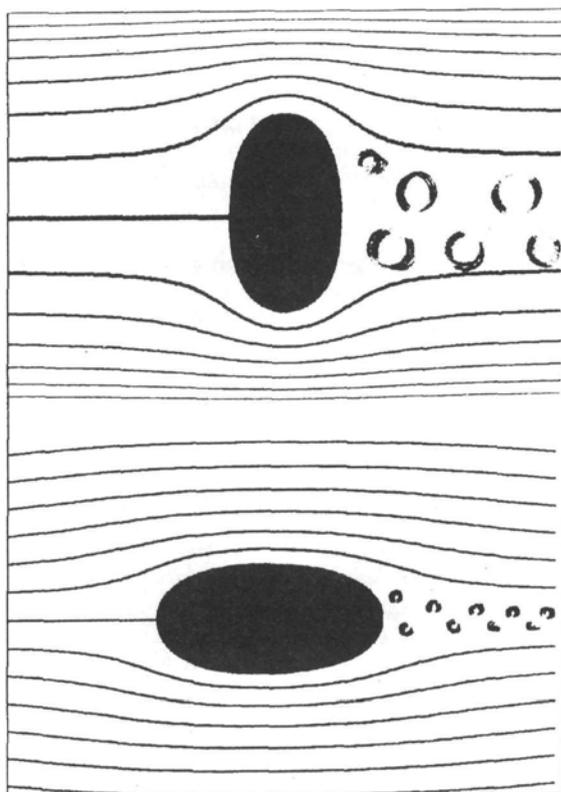


Figura 1.1. Esquema de flujos real alrededor de una elipse cuando la corriente incide en la dirección del eje menor (arriba) y del eje mayor (abajo).

Pero, además de la resistencia, la sustentación es también responsable de las trayectorias de las bolas y balones lanzados con efecto, del avance de los nadadores y las tablas de windsurf y de que los coches de Fórmula 1 salgan literalmente volando en caso de perder los alerones. Para las especialidades deportivas como el salto de esquí, lanzamiento de jabalina y de disco, donde debe existir una fuerte elevación y, al mismo tiempo, se debe recorrer la mayor distancia horizontal posible, el ángulo de ataque tiene, por estas razones, gran importancia. Sin embargo, el ángulo óptimo de posición para el movimiento no es idéntico a aquél con el que se logra la elevación máxima. En general es más reducido y puede calcularse analíticamente estudiando el vuelo o bien a través de la experimentación, es decir, lo interesante para lograr grandes mejoras sería conseguir simultáneamente *minimizar la resistencia y maximizar la sustentación*; de este modo el tiempo de vuelo se prolongaría lo más posible. Estos dos objetivos son básicamente incompatibles, pues el valor del ángulo de ataque que proporciona el mínimo en la resistencia da una sustentación menor que la máxima posible. Se debe por lo tanto encontrar la solución de compromiso que mejor se ajuste a cada caso, es decir, aquella que proporcione los mejores resultados de sustentación y resistencia para cada cuerpo en particular. A la relación entre la sustentación y la resistencia se le conoce como eficiencia aerodinámica, por tanto ésta es la variable que se deba maximizar. Los ensayos para determinar

la posición óptima se llevan siempre a cabo en túneles aerodinámicos preparados para realizar correctamente las medidas de ambas fuerzas.

Para poder aprovechar todo el potencial de estas fuerzas y no dejar sus efectos al azar es necesario realizar estudios aerodinámicos que pongan de manifiesto hechos que no resultan tan obvios; algunos ejemplos curiosos pueden ser que para un ciclista o cualquier corredor un viento en contra tiene un efecto más pernicioso que las ventajas que supone un viento de igual magnitud a favor.

Esto es debido a que tanto la resistencia como la potencia desarrollada por el ciclista dependen de la velocidad relativa (entre el aire y el ciclista) y no de la velocidad del ciclista, siendo la resistencia proporcional al cuadrado de la velocidad relativa y la potencia al cubo de ésta. Supongamos un corredor que realiza un circuito cerrado a una velocidad constante con respecto al suelo de 6 m/s, y que sopla un viento desde una determinada dirección fija y con una velocidad de 2 m/s. El corredor realiza un tramo con el viento a favor, llegándole desde la espalda, y el tramo opuesto será con el viento en contra, de cara. En el primer caso, con el viento a favor, la velocidad relativa del corredor con respecto al aire será de $6 - 2 = 4$ m/s, de manera que la resistencia aerodinámica será proporcional a 16 (m/s)², es decir, un 56% menor que en ausencia de viento. En el tramo con el viento en contra, la velocidad relativa del aire es proporcional a $6 + 2 = 8$ m/s, luego la resistencia aerodinámica es proporcional a 64 (m/s)², un 78 % mayor que de no haber viento. Es decir: en el tramo en que el viento actúa en contra, perjudica más de lo que beneficia en el tramo en que actúa a favor. Uno de los deportistas que ha sufrido las consecuencias de este efecto es Miguel Indurain, uno de los mejores deportistas españoles de toda la historia; éste, en su intento de batir por segunda vez el récord de la hora, eligió para la ocasión un velódromo no cubierto y no pudo evitar que el viento estuviera presente, restándole vuelta a vuelta los segundos que necesitaba para conseguir su objetivo.

Por otra parte, para un lanzador de disco o jabalina, a pesar de lo que pueda parecer intuitivamente, el viento a favor puede ser perjudicial, pues reduce la sustentación debido a la menor velocidad relativa del aire, y los cuerpos podrían caer antes a tierra recorriendo una distancia horizontal menor. Por el contrario, los vientos en contra son, dentro de unos determinados márgenes, ventajosos; ésta es la razón por la que los aviones procuran despegar con viento en contra, pues así la velocidad relativa es mayor y también la sustentación.

En algunos deportes como tenis, *ping-pong*, baloncesto, béisbol o *rugby*, que se basan en el lanzamiento de objeto esférico u ovalado, aparece sobre éste una fuerza transversal al estar sometido a una rotación en el seno de una corriente incidente. Este fenómeno es conocido con el nombre de efecto Magnus, y es un elemento técnico utilizado en los lanzamientos, los golpes y los pases de pelotas y similares, con la finalidad de imprimir una determinada trayectoria al objeto logrando que éste llegue al punto deseado. Este efecto se puede ver claramente en un túnel aerodinámico, visualizando la corriente mediante hilos de humo: si se expone un disco en reposo a la acción de una corriente de aire, las líneas de corriente son como se ve en la parte superior de la figura 2. 1. Si al disco se le impone un giro, entonces las capas de aire colindantes con el disco entran en un movimiento rotatorio (parte inferior de la figura). Esto genera una circulación neta que es la causa de que aparezca una fuerza de sustentación perpendicular al desplazamiento, como se verá más adelante.

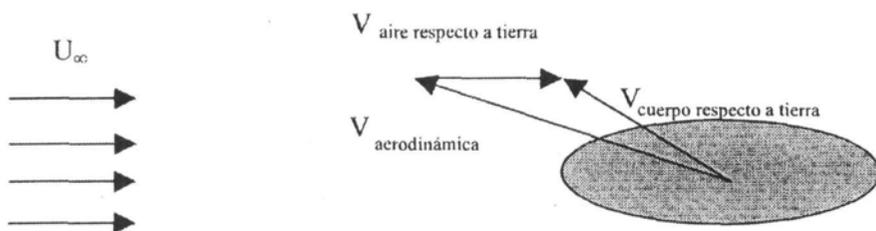


Figura 2.1. Diagrama de velocidades absolutas y relativas.

Así en el fútbol, al efectuarse un saque de esquina, resulta posible, gracias al efecto Magnus, la existencia de los goles olímpicos. El saque tirado desde la parte derecha tiene que efectuarse de tal manera que el pie golpee la parte derecha del balón. A consecuencia de la rotación propia impuesta a la pelota, surge, durante el vuelo, una fuerza transversal que desplaza al balón en el sentido horizontal. Durante un partido de clasificación, jugado en la fase final del año 1966 entre Brasil y Bulgaria, un atacante brasileño disparó un tiro libre desde una distancia de 25 metros, aprovechando el principio del efecto Magnus: el balón entró directamente en la portería por encima de la barrera búlgara. Otro ejemplo más reciente puede ser el gol marcado por Seedorf, centrocampista del Real Madrid, en la primera jornada de liga 1997-98 cuando logró un gol desde aproximadamente cuarenta metros gracias al efecto que logró imprimir al balón, que siguió una trayectoria que despistó al portero. Algunos jugadores son conocidos por su facilidad para marcar goles al efectuar los saques de esquina; así, por ejemplo, ocurrió en el año 1964 con el jugador Vogel durante el encuentro de clasificación para los Juegos Olímpicos, jugado contra la URSS en Varsovia; o, más recientemente, algunos de los goles marcados por Pantic. Este efecto es utilizado en situaciones muy diversas: además del fútbol puede citarse desde un tiro libre en baloncesto hasta un golpe *liftado* en tenis, o un saqué de *ping-pong*. Meter un gol sin ángulo inicial de tiro, aumentar la probabilidad de enceste, evitar que la bola salga fuera de la pista o lograr un bote extraño que despiste al contrario podrían ser algunos de los objetivos perseguidos en estos cuatro ejemplos.

Como ya se ha dicho el ciclismo es uno de los deportes donde la resistencia aerodinámica juega un papel importante en varias de sus modalidades. Cuando en este deporte se habla de avances tecnológicos, en especial los relacionados con la aerodinámica, la tendencia general es pensar que se trata de una nueva y revolucionaria máquina. Si de ello sólo se tratara, estaría justificado dar la razón a aquéllos que critican la rentabilidad de este tipo de estudios. Pero como se desarrollará a lo largo del presente informe, los estudios están plenamente justificados por los resultados que con ellos se han obtenido, se están obteniendo y se pueden llegar a obtener. Esto se debe a que el estudio involucra máquina, corredor, equipo, técnicas de entrenamiento, técnicas de carrera, etc.

A menudo se considera a la aerodinámica como la ciencia que más ha contribuido a mejorar las marcas de los deportistas y desde luego, en el caso del esquí, esta afirmación está sobradamente justificada. En consecuencia, la aplicación del túnel aerodinámico ha representado un importante papel en la consecución de estas mejoras. Fue ya en 1.959 cuando el Equipo Nacional de Esquí de Francia determinó, usando el túnel aerodinámico de la empre-

sa automovilística Renault, la llamada *postura del huevo* como la más indicada en caso de desplazarse a alta velocidad, como ocurre en las pruebas de descenso, y en tramos de otras pruebas. En 1.977 los italianos desarrollaron una ropa optimizada aerodinámicamente, que permitía ganar hasta 2 segundos en la prueba de descenso; a raíz de esto, la Federación Francesa volvió a emplear el túnel de la Renault, con el concurso de la industria textil. También fue la utilización del túnel aerodinámico lo que permitió a la esquiadora Perinne Pelen emplear un vestido gracias al cual consiguió el campeonato mundial de su especialidad en el período 1.979-1.980, y ello a pesar de que en los Juegos Olímpicos se cayó dos veces, lo que no fue obstáculo para que, aún así, consiguiera la medalla de bronce en estos Juegos. Los entrenamientos de Brian Taylor en el túnel de la Universidad de Washington le permitieron conseguir el campeonato de EE.UU. de velocidad en 1.981. Más recientemente, gracias a los ensayos realizados en túnel se desarrollaron unas prendas que tienen el nombre comercial de SPEEDWIRE, con cuyo empleo las esquiadoras estadounidenses obtuvieron óptimos resultados en el Campeonato del Mundo de 1.996 en Colorado. Son innumerables los esquiadores franceses, canadienses, estadounidenses, italianos y de otras naciones que han empleado el túnel aerodinámico para entrenarse, aprendiendo cuál es su postura óptima, de igual manera que los fabricantes de equipamiento lo emplean para desarrollar carenados, cascos, bastones, ropa, etc., aerodinámicamente óptimos.

Como resumen se pueden citar algunos criterios generales a adoptar a la hora de minimizar la resistencia y a los que se ha llegado mediante ensayos aerodinámicos, en su mayoría en túneles.

- En relación con la vestimenta: llevarla ajustada al cuerpo, evitar los pliegues, resquicios y acabados angulosos y afeitar o rasurar zonas descubiertas.
- En relación con la posición del cuerpo: adoptar la posición con menor sección frontal al flujo, pero que sea compatible con la técnica.
- En relación con la técnica colectiva: el desplazamiento tras la pantalla de otro oponente si el reglamento lo permite. En ciclismo existen dos tipos de colocación del pelotón, en función de la dirección del viento relativo. Si sopla ladeado, se adopta una posición en forma de abanico; y si sopla de frente, se realiza una formación en fila de uno. Si se quiere obtener ventaja de la pantalla de otro oponente, se deberá, en cualquier caso, mantener una posición lo más cercana posible a él. Los ciclistas hábiles son capaces de mantener una distancia entre cinco y diez centímetros con su predecesor.
- Utilizar perfiles con el menor coeficiente de resistencia posible.

Estos criterios sugeridos por Xavier Aguado Jódar (1993) son puramente orientativos y deben complementarse en cada caso con las conclusiones a las que se llegue tras ensayos específicos para cada deportista de alto nivel.

Estos ensayos son en la actualidad ineludibles, pues las formulaciones teóricas no tienen en cuenta todos los factores que intervienen en la resistencia, ya que resulta muy complejo calcularlos de forma precisa; esto hace que tampoco los programas de simulación de túneles ofrezcan la precisión necesaria. Aún hoy en día los túneles numéricos y los programas de simulación no son capaces de suplir los ensayos en túneles aerodinámicos (Carpentier, 1990).

Aunque existen otros tipos de ensayos, en ninguno de ellos es posible tener un control absoluto de todas las variables que intervienen; por eso, los túneles proporcionan grandes ventajas frente a los demás, como la reproducción de unas condiciones iniciales cualesquiera en cualquier momento y tantas veces como sea necesario hasta encontrar las posiciones óptimas y *no depender, por ejemplo, de las condiciones climatológicas*. Además, permite la recepción instantánea de datos, lo que da mayor fiabilidad y rapidez a los resultados, pues no es necesario esperar a que acabe una prueba para tener un valor de la resistencia que, por otra parte, será un valor medio, ya que resulta imposible mantener durante toda su duración la misma postura o velocidad. Así es posible dirigir en todo momento los movimientos del deportista hasta encontrar la posición óptima y que él pueda permanecer en dicha postura para memorizarla.

2. CONOCIMIENTOS BÁSICOS DE AERODINÁMICA

La aerodinámica se ha definido como la ciencia que estudia el movimiento del aire y el de los cuerpos en el seno del aire (Milne-Thomson, 1.958), si es que este tipo de definiciones tiene alguna importancia. El que un cuerpo se mueva en el interior del aire, o de cualquier otro fluido, hace que aparezca sobre él un sistema de fuerzas, y como tal es equivalente a que en un punto del cuerpo, supuesto sólido rígido, esté actuando una fuerza resultante y un momento; además, es indiferente considerar que es el cuerpo el que se mueve con respecto al aire en reposo, que el aire el que se mueve a la misma velocidad que antes con respecto al cuerpo en reposo: lo que importa es el movimiento relativo del aire con respecto al cuerpo. El estudio de estas fuerzas, llamadas aerodinámicas si, como suponemos, el fluido es el aire, es el objetivo, quizá principal, de la aerodinámica. (Señalemos que es esta equivalencia que acabamos de describir la que permite utilizar el túnel aerodinámico para estudiar el movimiento de los cuerpos a través del aire: si ambas situaciones no fueran equivalentes, no tendría sentido emplear el túnel).

Decir que un cuerpo es un fluido es afirmar que posee una determinada naturaleza. Esta naturaleza es puesta de manifiesto cuando las fuerzas actúan sobre el cuerpo, y este comportamiento la caracteriza y por tanto la define. En concreto, un fluido es un cuerpo que fluye bajo la acción de una fuerza, y aunque todos tenemos una idea intuitiva de lo que esto significa, aclaremos que se dice que un cuerpo fluye cuando se deforma continuamente y sin límite bajo la acción de una fuerza, aunque sea pequeña.

Los fluidos pueden ser de dos tipos diferentes:

- Fluidos compresibles o gases: se caracterizan porque, al ser encerrados en un volumen (p.e., el de un recipiente como una botella cerrada), tienden a llenar por completo dicho volumen. Además, podemos reducir el volumen con facilidad, por ejemplo si el recipiente es un cilindro cerrado por un émbolo, y se dice entonces que estamos comprimiendo el gas.
- Fluidos incompresibles o líquidos: se caracterizan porque al encerrarlos en un recipiente, tienden a ocupar un volumen fijo, en vez de a expandirse sin límite, debido a las fuerzas de cohesión que mantienen a unas moléculas adheridas con otras. En el mundo real, si metemos un líquido en un cilindro cerrado por un émbolo, también podemos comprimirlo, pero aplicando una fuerza sobre el émbolo mucho mayor que para

un gas; extrapolando este comportamiento, definimos un líquido ideal como aquél que no altera su densidad debido a la presión.

Si consideramos un cuerpo moviéndose en el aire, de la misma manera que el aire ejerce fuerzas sobre el cuerpo, el cuerpo está ejerciendo fuerzas sobre el aire, como resulta evidente si tenemos en cuenta que las partículas de aire no siguen una trayectoria rectilínea, sino una curva para bordear el cuerpo. El efecto de estas fuerzas tendrá que ser similar al del émbolo sobre las partículas del gas encerrado en el cilindro, porque la situación es análoga a que si hubiera un pequeño émbolo en cada pequeño elemento de la superficie del cuerpo: en el cilindro, una masa constante de gas era confinada en un volumen menor, o sea, aumentaba su densidad, así que ahora deberíamos observar variaciones de densidad en los distintos puntos del gas, desde que están muy alejados, hasta que se aproximan a las cercanías del cuerpo, y luego variando otra vez conforme se alejan aguas abajo. Sin embargo, se observa que cuando la velocidad del gas con respecto al cuerpo es mucho menor que la del sonido en ese gas, estos efectos de compresibilidad son del todo despreciables, y en consecuencia podemos considerar este gas, y sólo a la hora de estudiar las fuerzas aerodinámicas a esa velocidad relativamente baja, como si fuera un líquido, aplicando la misma formulación matemática que para estos. Se dice entonces que el gas se está moviendo en régimen incompresible. Al cociente de la velocidad del fluido con respecto al cuerpo entre la velocidad del sonido en el fluido se le llama número de Mach. Podemos considerar que un número de Mach lo suficientemente bajo como para poder despreciar los efectos de compresibilidad para estudiar las fuerzas aerodinámicas, es del orden de 0.4. La velocidad del sonido en un fluido es una propiedad termodinámica, que varía con la temperatura y, si el fluido es una mezcla, con la composición.

En el caso de los líquidos ideales, como cualquier velocidad es lo suficientemente baja como para considerarla inferior a la del sonido (puesto que sabemos que los líquidos son de por sí incompresibles, y no porque en determinadas circunstancias se comporten como tales), está claro que la velocidad del sonido es infinita en ellos, luego el número de Mach para un cuerpo que se mueve en un líquido ideal es siempre igual a cero, por muy alta que sea su velocidad. Esto es para los líquidos ideales, y ya vimos que un líquido ideal es un modelo idealizado obtenido por extrapolación del comportamiento de los líquidos reales. Por tanto, el sonido tiene una velocidad finita en un líquido real, pero, eso sí, mucho mayor que en los gases. (De la discusión anterior debe quedar también claro que el número de Mach no implica de por sí una determinada velocidad, confusión que es habitual por influencia del cine, etc.).

Aquí sólo nos vamos a ocupar del movimiento de los cuerpos en el aire a baja velocidad con respecto a la del sonido. Es decir: movimiento subsónico e incompresible. Poder tratar al gas como incompresible significa que podemos suponer su densidad constante (no varía con el tiempo) y uniforme (no varía de un punto a otro), y simplifica notablemente el desarrollo matemático (en el que no vamos a entrar) y las explicaciones. Además, si un cuerpo se mueve a velocidades próximas o superiores a la del sonido van a ocurrir una serie de fenómenos en el fluido, especialmente complejos si la velocidad es próxima a la del sonido, que dan lugar a tipos de fuerzas aerodinámicas que aquí no vamos a tratar, puesto que no se dan en nuestro caso a estudiar. (Si la velocidad es mucho mayor que la del sonido la situación vuelve a ser también bastante compleja, apareciendo fenómenos de disociación química en el fluido, etc.).

Justifiquemos nuestra suposición: las velocidades de los cuerpos serán, como mucho, del orden de 200 km/h, que son unos 56 m/s. La velocidad del sonido al nivel del mar, suponiendo atmósfera estándar a 25 °C, es de unos 340 m/s. Luego el número de Mach es de 0,16. A 10.000 metros de altitud sobre el nivel del mar y la misma temperatura, como la velocidad del sonido disminuiría hasta unos 300 m/s, el número de Mach se incrementa hasta 0,19. Así que en ambos casos, en que hemos supuesto una velocidad máxima para el cuerpo, está justificado el suponer el aire como incompresible para estudiar la aerodinámica.

Otro aspecto de importancia: como ya se dijo, las características del flujo del aire alrededor de un cuerpo y, en consecuencia, las fuerzas aerodinámicas que dicho movimiento produce, dependen de la velocidad del aire con respecto al cuerpo (ver figura 2.1). Supongamos un corredor a 10 km/h (con respecto al suelo), con un viento de, también, 10 km/h (velocidad dada también con respecto al suelo). Si el viento es a favor (le llega al corredor por la espalda, y se mueve en la misma dirección que él), la velocidad del aire con respecto al corredor será nula y no habrá fuerzas aerodinámicas. Pero si tiene el viento en contra, la velocidad del aire con respecto al corredor es de 20 km/h, y es esta velocidad de la que dependen las fuerzas aerodinámicas. Además, debe recordarse que la velocidad es un vector, así que importa su dirección y no tan sólo su módulo, tanto para la magnitud como para la dirección de las fuerzas aerodinámicas.

2.1 Ecuación de Bernoulli

Una propiedad de los fluidos es la viscosidad, que es una fuerza de rozamiento interna al fluido y, como tal, se pone de manifiesto cuando una partícula fluida tiene una velocidad diferente a alguna de sus vecinas, produciendo básicamente dos efectos:

- Se transmite cantidad de movimiento (producto de la masa por la velocidad) de unas partículas fluidas a otras, con lo que el campo de velocidades es diferente al que tendríamos de no haber viscosidad;
- La suma final de la cantidad de movimiento de todas las partículas no es igual a la inicial, sino menor, de manera que se ha perdido irreversiblemente una cierta cantidad de energía, que acabará de una u otra manera transformada en calor.

Pues bien: un fluido ideal es aquél que carece de viscosidad, y en el que, además, sus partículas no están recibiendo ni perdiendo calor. Aunque es una idealización, es aplicable bajo determinadas circunstancias a casos reales.

Veamos ahora el concepto de línea de corriente: supongamos que en un instante dado conocemos las velocidades de todas las partículas fluidas, y nos fijamos sólo en ese instante, como si se tratara de una fotografía del campo de velocidades del fluido. Podríamos trazar un conjunto de líneas con las siguientes propiedades:

- Por cada punto del campo fluido pasa alguna de ellas.
- Cada una de estas líneas, en cada uno de sus puntos, lleva la dirección de (es tangente a) la velocidad del fluido en ese punto.

Estas líneas se llaman líneas de corriente (ver figura 2.2). Por la mayoría de los puntos del campo fluido pasa una y sólo una línea de corriente, pero existen puntos, llamados por ello singularidades, por los que no pasa ninguna, o pasan infinitas. Además, por un punto en el que la velocidad del fluido es nula (llamado punto de remanso) también pueden pasar varias líneas de corriente.

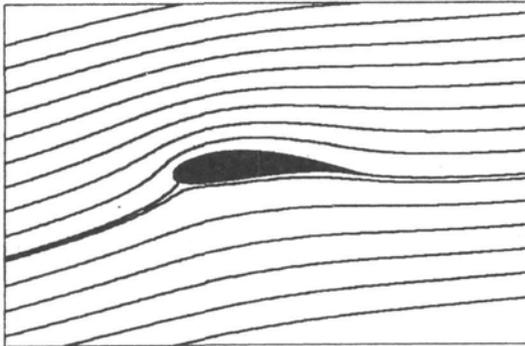


Figura 2.2. Perfil rodeado de líneas de corriente.

Cuando las condiciones en las que se encuentra el fluido no varían con el tiempo (por ejemplo, los cuerpos que se mueven en su seno lo hacen con movimiento rectilíneo uniforme, etc.), lo que se llama flujo estacionario, estas líneas de corriente coinciden con las trayectorias que siguen las partículas fluidas en su movimiento (pero esta coincidencia no se da si las condiciones varían con el tiempo, es decir, si el flujo es no estacionario).

Pues bien: para los fluidos ideales en régimen incompresible es válida la llamada ecuación de Bernoulli:

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 = C$$

que se aplica en cada punto del campo fluido, y en la que p es la presión del fluido en ese punto, ρ es su densidad, que suponemos constante y uniforme en todo el fluido, y v es la velocidad del fluido en el punto considerado, mientras que C es un valor constante para cada línea de corriente, pero que puede variar de una línea de corriente a otra. (Existe una versión de esta ecuación para régimen compresible; y también hay versiones para flujos no estacionarios, tanto en régimen compresible como en incompresible).

Esta ecuación dice que, bajo las hipótesis expuestas, se conserva la energía mecánica total, por unidad de volumen, de las partículas fluidas sobre cada línea de corriente. Por eso esta ecuación es especialmente útil en el caso de flujos estacionarios, al coincidir las líneas de corriente con las trayectorias, ya que entonces la ecuación será el teorema de conservación de la energía mecánica y dirá simplemente que se conserva la energía mecánica total de cada una de las partículas fluidas. Veámoslo: la energía mecánica de una partícula fluida tendrá dos componentes:

–La energía cinética, que es debida a que la partícula fluida se desplaza a una velocidad V . Este es el segundo sumando del primer término de la ecuación. A esta energía cinética por unidad de volumen se la suele llamar presión dinámica. Las unidades de presión son las mismas que las de densidad de energía.

–La presión, que es el primer sumando, y que es una energía por unidad de volumen que, como se sabe, representa la capacidad de un fluido de ejercer trabajo sobre una superficie sólida que se pueda mover, debido a los movimientos microscópicos aleatorios de las moléculas del fluido: La velocidad V de la partícula fluida – siendo ésta una abstracción matemática que considera como un punto un volumen de fluido muy pequeño frente a las longitudes típicas del campo fluido (p.e., la de los cuerpos que hay en su seno) pero muy grande frente al recorrido de las moléculas entre dos choques sucesivos de una con otras dos (llamada longitud de recorrido libre) – es la velocidad promediada de las moléculas que componen la partícula fluida, y es la que corresponde al movimiento ordenado de las moléculas como un todo, siendo ese todo la propia partícula fluida. La presión representa la capacidad de hacer trabajo de la partícula fluida a causa del movimiento a la velocidad en una dirección y con un módulo aleatorios de cada molécula, una vez descontado el movimiento ordenado como un todo a la velocidad V , siendo posible desarrollar ese trabajo cuando las moléculas chocan contra una superficie sólida que tenga libertad para desplazarse. Como a la energía cinética se la llama presión dinámica, a este sumando, que es la presión propiamente dicha, se le llama presión estática.

Resumiendo: la energía cinética representa la parte de la energía mecánica debida al movimiento de las moléculas que componen la partícula fluida como un todo, que es un movimiento ordenado; mientras que la presión representa la energía mecánica debida al movimiento aleatorio e individual de dichas moléculas, que es un movimiento desordenado.

Aunque no se ha dicho, la ecuación que se ha escrito es una simplificación en la que se ha despreciado la contribución de los campos de fuerza externos a la energía mecánica; en particular, se ha despreciado el efecto del campo gravitatorio. Esto tiene sentido porque las variaciones de altura del orden de unos pocos metros producen una variación en la energía potencial gravitatoria por completo despreciable frente a la energía cinética y la presión, por lo que puede considerarse que esta energía potencial es constante, y añadirse a la constante del segundo miembro. De todas maneras, si por alguna razón interesara no despreciar el efecto de las variaciones de altura, basta con añadir al primer miembro el sumando ρgZ , donde g es la aceleración de la gravedad y Z la altura con respecto al nivel de referencia.

Otra característica importante de esta ecuación, es que pone de manifiesto que los fluidos tienden a moverse desde las zonas de mayor presión hacia las de menor. En efecto: para flujo estacionario las partículas se mueven describiendo las líneas de corriente; si sobre una línea de corriente tenemos un punto A que está a mayor presión que el B, situado aguas abajo, como la suma de las presiones dinámica y estática en cada punto tiene que ser constante sobre una misma línea de corriente, al moverse una partícula fluida desde A a B, como disminuye su presión (estática), tendrá que aumentar su velocidad. Si, por el contrario, el punto A está a una presión menor que el B, una partícula fluida que se mueva desde A hasta B resultará frenada, disminuyendo su velocidad. Cuando las partículas fluidas se mueven desde zonas de mayor a menor presión, se dice que lo hacen en un gradiente favorable de presiones. Si se mueven desde zonas de menor hacia zonas de mayor presión, se dice que se mueven contra un gradiente adverso de presión.

2.2 La paradoja de D'Alembert

Es posible demostrar que, para el tipo de flujo que se acaba de describir en el epígrafe anterior, sobre un cuerpo inmerso en el fluido no actúa ningún tipo de fuerzas aerodinámicas. A esto se le llama la paradoja de D'Alembert. Para que se cumpla, se ha de dar alguna hipótesis adicional: el campo fluido ha de ser ilimitado. Por ejemplo, si el fluido es agua con una superficie libre, como la que separa al agua del aire en la superficie del mar, por ejemplo, entonces sí aparecen fuerzas.

Realmente, la paradoja de D'Alembert no es tal paradoja, ya que los fluidos reales sí tienen viscosidad, así que las hipótesis hechas como premisas del modelo no son aplicables a los flujos reales. En un tipo de fluido de poco interés práctico, el helio superfluido, que sí carece de viscosidad (en eso consiste la superfluidez), se ha comprobado experimentalmente que sí se verifica la paradoja de D'Alembert (pero entonces tampoco es una paradoja, puesto que la predicción teórica coincide con lo que ocurre realmente). En realidad, lo que llama la atención de esta paradoja es que se sabe que un flujo real a una velocidad suficientemente alta se puede describir en casi todas partes como si fuera el caso de un fluido ideal. La zona en que esto no es aplicable es en una región muy próxima al cuerpo, y en la estela que queda tras el cuerpo, así que, de una u otra manera, lo que ocurre en esta zona tan pequeña y que no afecta al resto del campo fluido, es responsable de la aparición de las fuerzas aerodinámicas sobre los cuerpos.

Lo que esta paradoja implica es que:

- Sin considerar las propiedades viscosas de los fluidos, no se puede explicar la aparición de fuerzas aerodinámicas.
- Luego el modelo de fluidos ideales no es suficiente para analizar las fuerzas aerodinámicas.

Todo esto no significa que el modelo de fluido ideal no sea útil, sino todo lo contrario, puesto que es aplicable en casi todo el campo fluido, y es mucho más fácil que un modelo que tenga en cuenta la viscosidad. Así pues, lo que se hace es aplicar el modelo de fluido ideal en casi todo el campo fluido a excepción de la región más próxima al cuerpo, en la que se aplica un modelo viscoso. La estela se puede tratar, a veces (cuando es de muy pequeño espesor), mediante un modelo potencial mediante el que se representa como una superficie de discontinuidad del campo de velocidades en el seno del campo fluido ideal.

2.3 La capa límite

Acabamos de ver que, en casi todo el campo fluido, podemos aplicar el modelo de fluidos ideales para representar el flujo. Esta región, en la que podemos hacer esta simplificación, se llama habitualmente la región exterior del flujo. Se trata ahora de ver lo que ocurre en esa zona próxima al cuerpo, qué modelo hay que aplicar en ella.

Para fijar ideas, supongamos el cuerpo en reposo y que es el fluido el que se mueve con respecto a él a una determinada velocidad V , sin importar si la situación real es ésta o la

contraria (ya se dijo que esto daba lo mismo, suponiendo que se dan unas ciertas condiciones). En la región exterior, la velocidad del fluido es del orden de V . No es exactamente V porque, como se vio anteriormente, el cuerpo origina fuerzas sobre las partículas fluidas que modifican la velocidad de éstas (por V debe entenderse la velocidad del fluido aguas arriba del cuerpo, lo suficientemente lejos como para poder despreciar el efecto perturbador de dicho cuerpo). Por el contrario, las partículas fluidas que están en contacto con la superficie del cuerpo tendrán la velocidad de éste, es decir, nula. Así pues, en una zona muy pequeña la velocidad pasa de ser nula a tener un valor del orden de V , por lo que cada partícula fluida tendrá una velocidad muy diferente a la de sus vecinas y, en consecuencia, las fuerzas de rozamiento viscoso son muy importantes en esta región, y es por eso que no es correcto despreciarlas (al contrario de lo que ocurre en la región exterior, en la que todas las partículas tienen una velocidad muy próxima a V_0 , en todo caso, las variaciones de la velocidad se producen sobre distancias lo suficientemente grandes como para que todas las partículas fluidas tengan una velocidad muy próxima a las de sus vecinas). A esta región próxima al cuerpo y en la que son muy importantes las fuerzas viscosas se la llama capa límite.

El espesor y la estructura de la capa límite van modificándose conforme avanzamos aguas abajo sobre el cuerpo. Aguas arriba, las partículas fluidas están viajando hacia el cuerpo, pero al llegar a éste unas pasarán por encima y otras por debajo. Por otra parte, como el espesor de la capa límite es muy pequeño frente a las dimensiones del cuerpo, podemos considerar que la capa de fluido que separa a la capa límite de la corriente exterior es tangente a la superficie del cuerpo.

Habrà un punto en la superficie del cuerpo en el que, hacia un lado de ese punto sobre dicha superficie, nos encontramos a las partículas que lo rodean por arriba, y hacia el otro lado, las que lo rodean hacia abajo. En el propio punto las partículas fluidas no pueden moverse, porque si lo hicieran deberían hacerlo a la vez hacia arriba y hacia abajo, y eso es obviamente imposible. Así pues, hay un punto sobre la superficie del cuerpo, y perteneciente a la corriente exterior, en el que la velocidad de la corriente es nula. Recuérdese que a tales puntos se les llama puntos de remanso, (ya se dijo que una de sus propiedades es que por ellos pueden pasar varias líneas de corriente. En este caso particular, sabemos que hay al menos dos: una es la de las partículas que inciden sobre el cuerpo hasta llegar a él con velocidad nula; y la otra es la que sale de ese punto rodeando al cuerpo por arriba y por debajo).

En este punto, como es de remanso, la velocidad de la corriente exterior es nula, igual que las partículas en contacto directo con la superficie del cuerpo. Además, las partículas en él acaban de entrar en contacto con el cuerpo, sin haber tenido contacto previo. Por eso, dicho punto de remanso es el origen de la capa límite, y en él dicha capa límite tendrá un espesor nulo. Otra propiedad interesante de ese punto es que, al ser en él la velocidad nula, y puesto que como es un punto de la corriente exterior podemos aplicar la ecuación de Bernoulli, es un punto de máxima presión para todas las líneas de corriente, de manera que los puntos que se aproximan al cuerpo avanzarán contra un gradiente adverso de presión, pero a partir de ese punto se desarrolla sobre el cuerpo un gradiente favorable. A partir de ese punto se desarrolla una capa límite por encima del cuerpo, y otra por debajo del cuerpo. Sigamos una de estas capas: como la velocidad de las partículas de la capa fluida que separa la corriente exterior de la capa límite estará creciendo aguas abajo del punto de remanso (por lo menos ocurrirá así en la zona más próxima a este punto), pero la de la capa en contacto inmediato con la superficie seguirá siendo nula, cada vez serán más importantes las fuerzas viscosas, y el rozamiento

que provocan hará que el efecto de frenado del cuerpo sobre las partículas fluidas se prolonga progresivamente hacia zonas cada vez más alejadas del cuerpo, o sea: crece el espesor de la capa límite. Este crecimiento de espesor implica, de hecho, que los efectos de las fuerzas viscosas se van suavizando aguas abajo del punto de remanso.

En esta zona inicial de la capa límite, las partículas están fluyendo de forma ordenada, en capas que se superponen unas a las otras. Pero en el mundo real siempre se producen perturbaciones que tienden a romper esta ordenación, originadas por pequeñas rugosidades en la superficie del cuerpo dando lugar a torbellinos microscópicos, etc. Vimos que la viscosidad producía un trasvase de cantidad de movimiento entre partículas fluidas de manera que tendían a igualarse sus velocidades a costa de una pérdida de energía. Pues bien, mientras la viscosidad sea lo suficientemente importante, estas perturbaciones van a ser eliminadas, y el flujo va a continuar ordenado. Pero acabamos de decir que, conforme avanzamos aguas abajo del cuerpo, dentro de la capa límite, la viscosidad va teniendo un efecto cada vez menos importante en comparación con lo que ocurría aguas arriba, de manera que puede ocurrir – y de hecho es lo que sucede en la mayoría de los casos – que la viscosidad ya no sea capaz de borrar las perturbaciones, de manera que éstas van a desarrollarse de forma inestable y van a romper la estructura ordenada de la capa límite. Se dice entonces que, en el punto en que sucede tal cosa, ha ocurrido la transición de capa límite laminar a capa límite turbulenta.

Una capa límite turbulenta tiene unas propiedades muy diferentes a las de una capa límite laminar. El flujo en una capa límite laminar era ordenado, lo que, entre otras cosas, significa que si medimos la velocidad del fluido en un mismo punto (fijo con respecto al cuerpo) a lo largo del tiempo, vamos a ver que las partículas fluidas que van pasando por ese punto tienen siempre la misma velocidad. Por el contrario, en una capa límite turbulenta, si realizamos esa misma medida, vamos a observar que se producen variaciones aleatorias de la velocidad. Esto es así porque por ese punto ya no pasan partículas fluidas fluyendo ordenadamente, sino formando los torbellinos que constituyen el flujo turbulento. Pese a que la velocidad en cada punto del espacio va a ser aleatoria, podemos medir una muestra de las velocidades en un punto a lo largo de un intervalo de tiempo lo suficientemente grande, y luego calcular la velocidad media y la desviación típica. Se observa entonces que, en cada punto, estos estadísticos son constantes con el tiempo (recuérdese que estamos suponiendo flujo estacionario; de otro modo, variarían con el tiempo, pero lo harían de una forma bien determinada). Es posible demostrar que, considerando el fluido como si fuera laminar pero suponiendo que:

–La velocidad en cada punto no es la velocidad instantánea, sino esa velocidad media con respecto al tiempo.

–Existe una fuerza de viscosidad adicional que depende de esa desviación típica de la velocidad instantánea con respecto a la velocidad media.

Obtenemos unas ecuaciones para el flujo promediado con respecto al tiempo en cada punto análogas a las del flujo laminar. La turbulencia se caracteriza mediante esas desviaciones típicas. Es en estas suposiciones en las que se basan las llamadas ecuaciones de Reynolds del flujo turbulento.

Vemos, pues, que una de las consecuencias de la turbulencia es provocar una especie de viscosidad adicional, y de hecho en la práctica es tan grande que muchas veces podemos despreciar la viscosidad real frente a esta pseudoviscosidad de origen turbulento. Esto tie-

ne consecuencias importantes: la viscosidad tiende a igualar la velocidad de las partículas fluidas transportando cantidad de movimiento de unas hacia otras, así que ahora este efecto va a estar muy acentuado. En la capa límite laminar, las velocidades van disminuyendo progresivamente desde la corriente exterior hasta anularse en la superficie del cuerpo. Pero en la capa límite turbulenta las partículas que están más próximas al cuerpo van a extraer cantidad de movimiento de la corriente exterior con una gran eficacia, de manera que la velocidad va disminuyendo muy despacio desde la corriente exterior conforme nos aproximamos al cuerpo, hasta que ya no queda más remedio que caiga a velocidad nula, y entonces lo hace bruscamente. En consecuencia:

- Como la capa límite turbulenta extrae cantidad de movimiento o, lo que viene a ser lo mismo, energía cinética, de la corriente exterior con una gran eficacia, el contenido en energía cinética de la capa límite turbulenta va a ser mucho mayor que el de la laminar. Como se verá más adelante, esto es de gran importancia para la parte de la fuerza de resistencia aerodinámica debida al desprendimiento de la capa límite (llamada resistencia de forma o de presión).
- Como ahora la velocidad va a variar muy bruscamente en la proximidad de la superficie del cuerpo, el cuerpo va a sufrir un efecto de rozamiento mucho más importante por parte del fluido. Esto significa que la parte de resistencia aerodinámica debida al rozamiento con el fluido es mayor en capas límite turbulentas que en laminares.

2.4 Desprendimiento de la capa límite y resistencia aerodinámica de forma

En principio, por la misma razón que en la parte delantera del cuerpo hay un punto de remanso, debe haber otro en la posterior (ver figura 2.3): si nos fijamos en las líneas de corriente que están más próximas al cuerpo, habrá una que lo rodea por arriba y otra por debajo, y en el punto en que se unen, la velocidad de las partículas fluidas que vienen por arriba tiene la misma dirección, pero sentido opuesto, a las que vie-

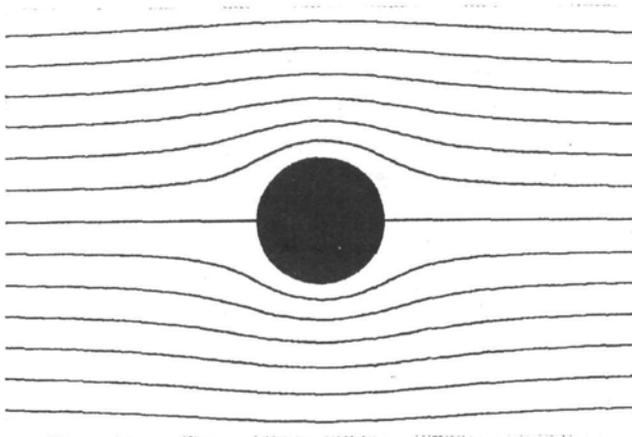


Figura 2.3. Líneas de corriente alrededor de un cilindro sin circulación.

nen por debajo, así que no queda más remedio que la velocidad en ese punto sea nula para que ambas velocidades sean las mismas.

Al haber un punto de remanso, luego un punto de presión máxima, aguas abajo, tanto para la capa límite de arriba como para la de abajo ocurrirá que, a partir de un cierto punto sobre la superficie del cuerpo (en el que la velocidad no será nula, luego la presión no es máxima, de acuerdo con la ecuación de Bernoulli), el fluido de la capa límite está avanzando contra un gradiente adverso de presión, de manera que resulta frenado, disminuyendo el contenido en energía cinética, luego en cantidad de movimiento (que se transforma en energía de presión), conforme avanzamos aproximándonos al punto de remanso posterior.

Cuando un fluido avanza contra un gradiente adverso de presión, lo hace mientras tenga energía cinética suficiente para vencer el gradiente, llegando un momento en que se parará. En una capa límite, las partículas de fluido más próximas al cuerpo, que son las que llevan una velocidad menor, resultarán frenadas con mayor eficacia por el gradiente adverso. Pues bien: si desde un principio la capa límite no llevaba suficiente energía cinética, puede suceder que estas partículas de la zona más cercana al cuerpo queden completamente frenadas. A partir del punto sobre la superficie del cuerpo en que tal cosa ocurre, se formará una zona de fluido bloqueado, y el resto del fluido tenderá a trepar sobre ella. Luego la capa límite deja de ser de pequeño espesor. La zona estancada se extiende aguas abajo, tendiéndose a propagar su límite paralelamente a la corriente incidente una vez que se ha separado lo suficiente del cuerpo. Como ocurre en la zona en que el fluido se está frenando, que se corresponde más o menos con la zona del cuerpo que va de un punto relativamente próximo a su punto de máximo espesor hasta el extremo posterior, lo que ocurre es que tras el cuerpo aparece una zona de fluido relativamente estancado (ver figura 2.4).

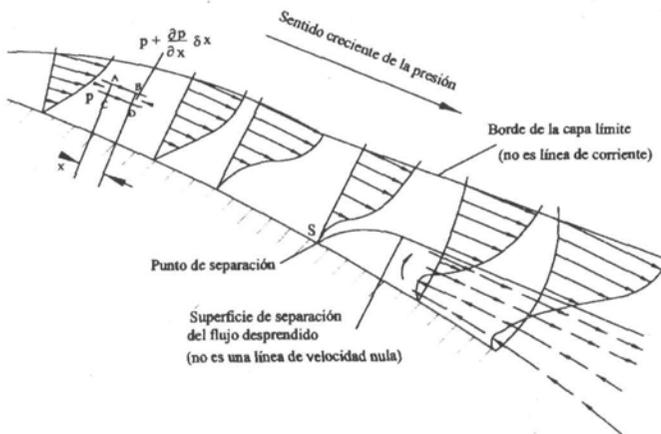


Figura 2.4. Capa límite creciendo frente a un gradiente adverso de presiones.

El fluido de la estela es arrastrado por la corriente exterior, por causa de la viscosidad, y lo que ocurre realmente es que se forman torbellinos: esta es la manera que tiene el fluido de relajar el gradiente de presiones que causó el desprendimiento, por lo que es

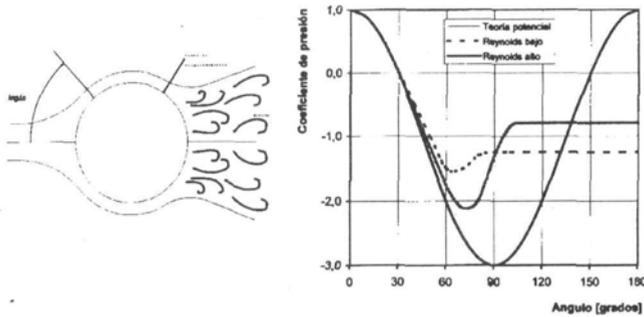


Figura 2.5. Cilindro con capa límite desprendida y diagrama de presiones en su superficie.

lógico que la presión aumente con respecto al caso sin desprendimiento (ver figura 2.5). La consecuencia es que la zona tras el cuerpo tiene una presión menor que si no hubiera estela a causa del desprendimiento. Esto es así porque la presión a lo largo del espesor de la capa límite no varía, por lo que es igual a la de la corriente exterior en el punto de la lámina que separa la corriente exterior de la capa límite. Si no ocurre desprendimiento, para el problema de la corriente exterior podemos despreciar el espesor de la capa límite, será aplicable el resultado de la paradoja de D'Alembert, de manera que sólo la fricción de la capa límite puede dar resultante de fuerzas. Pero si hay desprendimiento, entonces la geometría del problema de la corriente exterior no se corresponde con la del caso ideal, (ver figura 2.6) así que no es necesario que la presión resulte en un sistema de fuerzas nulo sobre el cuerpo. De hecho, al ser la presión tras el cuerpo menor que en el caso de no haber desprendimiento, la resultante de fuerzas de la mitad posterior del

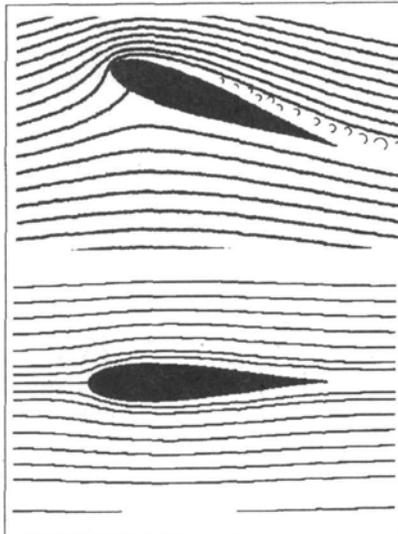


Figura 2.6. Perfil con y sin desprendimientos.

cuerpo, que lo empuja hacia delante, causada por la presión va a dejar de ser igual a la de la mitad delantera (que empuja al cuerpo hacia detrás), como ocurre sin desprendimiento (para que la resultante global sea nula), así que va a aparecer una fuerza neta hacia detrás. A esta fuerza neta se le llama resistencia aerodinámica de presión, o de forma.

La resistencia de forma suele ser bastante mayor que la debida al rozamiento del fluido con el cuerpo. Así que el problema de disminuir la resistencia aerodinámica es, en la mayoría de los casos, el problema de dar al cuerpo la geometría adecuada para prevenir el desprendimiento, o para minimizar sus efectos.

Como vimos, el que se produzca desprendimiento depende del contenido en energía cinética de la capa límite. También se vio en un apartado anterior que la capa límite turbulenta tenía un contenido en energía cinética apreciablemente superior que el de la capa límite laminar. Por tanto, una capa límite turbulenta resiste bastante mejor sin desprenderse en presencia de un gradiente adverso de presiones que una capa límite laminar. Supongamos que, sobre un cuerpo, existe una capa límite laminar que se desprende en un punto y apareciendo a causa de ello una estela que da lugar a una importante resistencia de forma. El desprendimiento laminar tiende a producirse en el punto de máximo espesor del cuerpo. Si de alguna manera lográsemos transformar la capa límite de laminar a turbulenta, al ser esta última más resistente al gradiente adverso, el punto de desprendimiento quedará retrasado, produciéndose en una zona en la que el cuerpo es de menor espesor, luego la estela va a ser menos gruesa, la zona afectada por la disminución de presión en la parte posterior va a ser más pequeña, y la resistencia aerodinámica de forma va a disminuir considerablemente. Como ésta suele ser bastante mayor que la de fricción, se estará reduciendo la resistencia aerodinámica total. Una forma de lograrlo es la siguiente: vimos que la causa de que se produjera la transformación de laminar a turbulenta es que existieran perturbaciones en la capa límite originadas, por ejemplo, por rugosidades sobre el cuerpo, y que, además se alcanzara la velocidad suficiente como para que esas perturbaciones se amplificaran hasta desestabilizar la ordenación de la capa límite. Pues bien: dando a la superficie del cuerpo la rugosidad adecuada, podemos lograr que la velocidad a la que se está moviendo el aire con respecto al cuerpo en el caso en que estamos interesados sea suficiente como para producir la transición laminar-turbulento. Esta es la razón por la que las pelotas de golf son rugosas en vez de lisas.

2.5 Resistencia aerodinámica de fricción

En realidad, ya se ha dicho lo que había que decir acerca de la resistencia de fricción, así que en este punto nos limitaremos a agruparlos. Vimos que a causa de la viscosidad, el cuerpo frenaba las capas de fluido que le estaban más próximas a él. Si la velocidad de una partícula fluida está cambiando, sólo puede ser porque una fuerza está actuando sobre la partícula, de acuerdo con el principio de inercia. De manera que hay una fuerza, del cuerpo sobre el fluido, de igual dirección pero sentido opuesto a la velocidad del fluido respecto al cuerpo, puesto que es una fuerza que se opone a dicha velocidad disminuyéndola. Esta es la fuerza de rozamiento. Teniendo en cuenta el principio de acción y reacción, si el cuerpo ejerce una fuerza sobre el fluido, enton-

ces el fluido ejerce una fuerza igual en intensidad y dirección, pero de sentido opuesto, sobre el cuerpo. La resultante de este sistema de fuerzas del fluido sobre el cuerpo, que es una fuerza que tiende a arrastrar el cuerpo hacia detrás, es la resistencia aerodinámica de fricción.

También vimos que el rozamiento, y por tanto la resistencia de fricción, era mayor en el caso de las capas límite turbulentas que en las laminares. Lo que ocurre es que la resistencia de fricción suele ser bastante más pequeña que la de forma. Por eso, en general, es beneficioso que los cuerpos sean rugosos, ya que así se favorece la transición de laminar a turbulento y se reduce la resistencia de forma, que es la parte mayoritaria de la resistencia.

La excepción ocurre cuando las velocidades son pequeñas, ya que entonces, y aunque la capa límite tienda a ser laminar, la resistencia de fricción tiende a ser proporcionalmente más importante. Por eso tiene sentido el que los corredores se afeiten y usen prendas ajustadas y lisas, etc. Es decir, a velocidades muy bajas, interesa preocuparse de reducir la rugosidad de los cuerpos a fin de reducir la fricción.

2.6 Fuerza de sustentación

En el caso ideal, no aparece ninguna fuerza, y en concreto, no aparece ninguna fuerza perpendicular a la dirección del movimiento. La consideración de la viscosidad nos llevó al concepto de capa límite, que explicaba la aparición de dos fuerzas, la resistencia aerodinámica de forma y la de fricción, ambas de dirección igual a la velocidad del cuerpo respecto al aire, y de sentido tal que tienden a empujar al cuerpo hacia detrás. Sin embargo, tampoco aparece ninguna fuerza perpendicular a la velocidad.

Supongamos ahora una situación de flujo ideal con las siguientes características:

- Por un lado, tenemos la velocidad del aire con respecto al cuerpo, donde tomamos como sistema de referencia el cuerpo que, por tanto, consideraremos fijo.
- Además, de alguna manera, hacemos que aparezca un torbellino, de manera que el flujo tienda a circular alrededor del cuerpo.

Para fijar ideas, supongamos que el aire llega al cuerpo, supuesto fijo, desde la izquierda, y que el torbellino centrado en el cuerpo gira en el sentido de las agujas del reloj. En la mitad superior del cuerpo, la velocidad inducida por el torbellino lleva el mismo sentido que la de la corriente incidente, es decir, es hacia detrás del cuerpo. Mientras que en la mitad inferior del cuerpo, la velocidad inducida del torbellino es de sentido opuesto al de la corriente incidente, o sea hacia la parte delantera del cuerpo (ver figura 2.7, y comparar con la 2.3).

Si las velocidades inducidas por el torbellino son, en magnitud, mucho menores que las de la corriente incidente, el efecto va a ser que, en la mitad superior del cuerpo, las partículas fluidas en contacto con él van a tener una velocidad un poco mayor que cuando no hay torbellino, mientras que en la mitad inferior van a ser un poco menores.

Si nos fijamos en una zona muy alejada del fluido aguas arriba, tan alejada que el fluido no se entera de que haya un cuerpo ni un torbellino, veremos que las constantes que nos aparecen en la ecuación de Bernoulli van a ser las mismas con y sin torbellino. Fijémonos en la mitad superior del cuerpo. Si con torbellino la velocidad es mayor que sin él, y por ser la constante de Bernoulli igual, entonces la presión es menor con torbellino que sin él. De la misma manera, demostramos que la presión en la mitad inferior es mayor con torbellino que sin él.

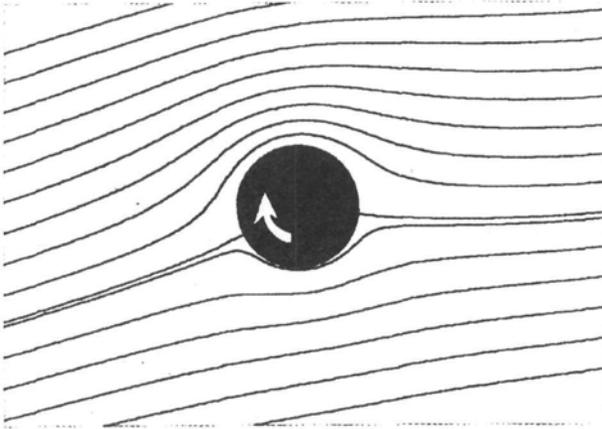


Figura 2.7. Líneas de corriente alrededor de un cilindro con cierta velocidad angular.

Como estamos en un fluido ideal, sabemos, por la paradoja de D'Alembert, que en el caso sin torbellino no hay ninguna fuerza. Por tanto, la resultante de la presión sobre la mitad inferior del cuerpo, que empuja al cuerpo hacia arriba, es exactamente igual a la resultante de la presión sobre la mitad superior, que empuja el cuerpo hacia abajo, equilibrándose exactamente ambas resultantes para dar una fuerza total nula. Pero con torbellino, la resultante sobre la mitad inferior será un poco mayor, y sobre la mitad superior un poco mayor, de manera que aparece una resultante neta hacia arriba. Esta fuerza, que es perpendicular a la velocidad del aire en puntos muy alejados del cuerpo aguas arriba de éste, se llama sustentación. Nótese que si el torbellino girara en sentido antihorario en vez de horario, la fuerza de sustentación empujaría el cuerpo hacia abajo; lo mismo ocurriría si el torbellino girara en sentido horario, pero la corriente incidente viniera desde la derecha en vez de desde la izquierda.

Esto de que en un fluido ideal pueda aparecer una fuerza parece que contradice la paradoja de D'Alembert, pero no es así, ya que sin viscosidad, no puede generarse un torbellino. Una forma de generarlo es haciendo girar el cuerpo, de manera que arrastrara las capas de fluido en contacto con él en este movimiento de giro (como en la figura 2.7). Sin embargo, sin viscosidad, no se producirá este arrastre.

Otra forma es la que ocurre en los perfiles de los aviones (ver figura 2.2). Pero aquí también es debido a la viscosidad, en combinación con la geometría del ala, a partir de ciertos fenómenos que ocurren cuando el avión inicia su movimiento y determinados principios de conservación que obligan a que se mantenga el torbellino una vez que se ha generado.

Así pues, debe quedar claro que la sustentación es una fuerza perpendicular tanto a la velocidad como al eje de giro del torbellino, y que, supuesto el torbellino, se explica mediante la teoría de los fluidos ideales. Lo que no puede explicarse sin tener en cuenta la viscosidad es cómo aparece este torbellino.

2.7 Coeficientes de sustentación y de resistencia

La sustentación (*lift*, en inglés), se suele representar mediante la letra L , mientras que la resistencia se suele denotar con la letra D , porque en inglés se dice *drag*. Se observa que, en determinados casos de gran importancia, y en el resto de forma muy aproximada, ambas fuerzas varían proporcionalmente a la presión dinámica de la corriente incidente en puntos muy alejados aguas arriba (de nuevo estamos suponiendo que es el aire el que se mueve con respecto al cuerpo fijo), que vale:

$$\frac{1}{2}\rho V^2$$

Esta es una presión, de manera que las propias fuerzas son también proporcionales a la superficie característica del cuerpo. En principio, vale con tomar cualquier superficie del cuerpo como característica, ya que, por ejemplo, al multiplicar por x todas las dimensiones lineales, todas las superficies se incrementan por x^2 , o sea, que sea cual sea la superficie característica, al aumentar o disminuir el cuerpo va a aumentar o disminuir siempre por el mismo factor: las diferencias debidas a tomar una u otra superficie como característica quedarán englobadas dentro de la constante de proporcionalidad. No obstante, es tradicional tomar una u otra superficie según las características generales de la geometría del cuerpo:

–Para cuerpos sustentadores, como las alas de los aviones, se toma la superficie en planta.

–Para cuerpos romos, se toma el área de la sección frontal, es decir, el que se proyecta sobre un plano perpendicular a la velocidad.

Los coeficientes de proporcionalidad se llaman, respectivamente, coeficiente de sustentación C_L y coeficiente de resistencia, C_D , de manera que:

$$L = \frac{1}{2}\rho V^2 S C_L$$

$$D = \frac{1}{2}\rho V^2 S C_D$$

Los coeficientes de proporcionalidad varían con la orientación del cuerpo con respecto a la velocidad incidente (ver figura 2.8), pero también con el número de Reynolds, que es un número adimensional en el que aparece el factor $V \cdot L$, siendo L una dimensión lineal característica del cuerpo, por lo que la dependencia de las fuerzas con la velocidad es un poco más compleja que la proporcionalidad a V^2 , y la dependencia con las dimensiones es también más compleja que la proporcionalidad a la superficie característica S , que a su vez es proporcional a L^2 .

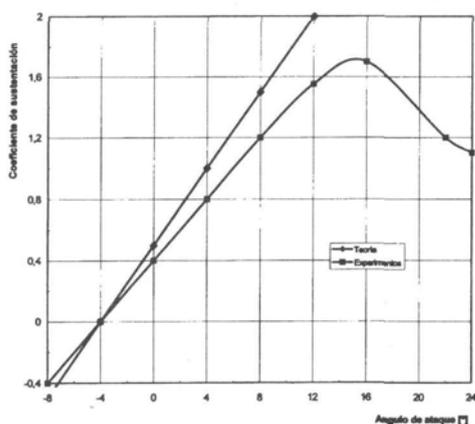


Figura 2.8. Evolución del coeficiente de sustentación en función del ángulo de ataque.

2.8 Efecto Magnus

Como se acaba de ver, es posible generar sustentación haciendo que un cuerpo gire sobre un eje que no sea paralelo a la corriente incidente. Por sustentación debe entenderse una fuerza perpendicular tanto a la velocidad como al eje de giro del cuerpo, que será el mismo que el del torbellino, y no necesariamente una fuerza hacia arriba. El caso es que aparece una fuerza perpendicular a la velocidad, de manera que el cuerpo que gira va a sufrir una desviación en esa dirección.

Al fenómeno consistente en que, cuando un cuerpo gira sobre un eje no paralelo a la velocidad incidente, sufra una desviación en la dirección perpendicular tanto a la velocidad como al eje de giro, se le llama efecto Magnus.

En algunos casos, como el de cuerpos esféricos, no toda la fuerza perpendicular a la velocidad debe sus causas a la sustentación, como se descubrió al constatar que las previsiones teóricas no coincidían con las experimentales. Como vimos, tras un cuerpo romo, en el que es imposible evitar el desprendimiento de la capa límite, se forma una estela, que da lugar a una zona de altas presiones, pero no tan altas como si no hubiera desprendimiento.

También sabemos que, como ha de cumplirse el principio de acción y reacción, si sobre el cuerpo el aire ejerce una fuerza perpendicular a la velocidad, el cuerpo va a ejercer una fuerza de iguales dirección e intensidad, pero sentido opuesto, sobre el aire, de manera que las partículas fluidas van a tender a desviarse, al pasar sobre el cuerpo, en sentido opuesto a la fuerza de sustentación. Por tanto, la estela se va a deflejar en sentido opuesto a la sustentación. Esto es en las proximidades del cuerpo, ya que en puntos muy alejados tenderá a ser arrastrada por la corriente incidente, que tiene cantidad de movimiento sobrada para anular este efecto. Localmente, lo que ocurre es que al moverse esa zona posterior de altas presiones hacia la zona de la superficie del cuerpo opuesta a la que apunta la sustentación, va a aparecer una componente de la resultante de presiones del cuerpo que se va a añadir a la sustentación, de manera que la fuerza perpendicular va a ser mayor que la debida a la sustentación.

3. TÚNELES AERODINÁMICOS

3.1 Concepto de túnel aerodinámico

La importancia de los efectos del aire sobre los cuerpos que se mueven en su seno hace que en numerosos campos de la industria y en otras parcelas de la actividad humana sea preciso estudiar y conocer las características de estos efectos con suficiente precisión.

Para estudiar estos efectos, habrá que recurrir a la experimentación, midiendo las variables en que estemos interesados (por ejemplo, las fuerzas aerodinámicas y la velocidad del aire) en las condiciones en que necesitemos conocer estos valores (por ejemplo: efecto de la velocidad sobre las fuerzas aerodinámicas cuando el aire tiene un nivel de turbulencia de un X % y los valores de la temperatura y presión atmosféricos son de Z °C y P mbar).

Una exigencia del trabajo experimental, para que los resultados que se obtengan puedan ser aceptados, es que se ha de reproducir con exactitud, para aquellas variables que sean relevantes, el fenómeno que se quiere estudiar. Por ejemplo: Si queremos ver el efecto de la velocidad sobre la sustentación en un cuerpo, hemos de poder modificar la velocidad, pero permaneciendo constantes las demás características del fluido, ya que si además se modificaran otras variables, no podríamos estar seguros de si el efecto se debe al cambio en la velocidad o al cambio en esas otras variables. Esto se traduce en dos requisitos:

–Ha de ser posible modificar a voluntad, dentro de un intervalo adecuado, los valores de las variables cuyo efecto pretendamos estudiar.

–Ha de ser posible garantizar que el resto de variables cuyo efecto pudiera afectar al resultado del experimento no van a variar durante la realización del mismo.

La experimentación en corriente libre no proporciona un entorno adecuado para garantizar estas exigencias. Por ejemplo, si queremos medir la resistencia aerodinámica sobre el ciclista a una determinada velocidad, podríamos medir el espacio que necesita en pararse a partir de una determinada velocidad. Este método, aunque útil para hacerse una idea de órdenes de magnitud, etc., tiene numerosos inconvenientes:

–Hay que hacer una hipótesis acerca de la fricción de las ruedas con el suelo, la fricción mecánica de unos elementos de la bicicleta con otros, etc. Dependiendo de lo realista que sea la hipótesis, el error que introduce será mayor o menor, pero siempre inevitable.

–Al irse reduciendo la velocidad, el régimen fluido sobre el ciclista va a cambiar. Por ejemplo: si en una zona se producía desprendimiento turbulento de la capa límite, al disminuir la velocidad por debajo de un cierto valor va a producirse desprendimiento laminar. Por tanto, no se está reproduciendo el fenómeno a estudiar, sino varios fenómenos similares y calculando la media de sus efectos. Como mínimo, esto supone que los resultados obtenidos estarán afectados de un importante error, siendo poco significativos para el fenómeno particular en que estamos interesados (la producción de la resistencia aerodinámica a una velocidad concreta).

–Se sabe que el régimen de pedaleo del ciclista es muy importante sobre la resistencia aerodinámica, tanto por el efecto del movimiento de las piernas como por el de la velocidad de giro de las ruedas. Pues bien: en nuestro ejemplo, el ciclista no está pedaleando. De nuevo, la situación experimental no reproduce el fenómeno a estudiar.

–No existe control sobre la velocidad del aire respecto al suelo: será inevitable la presencia de ráfagas y turbulencias, etc. También estará variando la densidad, temperatura y presión del aire, tanto de los valores medios entre dos realizaciones sucesivas del ensayo como que para el aire en contacto con el ciclista estas variables estarán variando a lo largo del tiempo, con mayor o menor intensidad dependiendo del entorno, el clima, etc. Tampoco es posible controlar con exactitud la postura del ciclista sobre la bicicleta a lo largo de todo el recorrido. Y así con otras variables. Es decir, existen variables que influyen sobre el resultado del experimento, y que no están bajo control, con lo que el experimento es menos repetible y los resultados obtenidos en cada realización divergirán unos con respecto a otros, estando cada uno de ellos afectado de un apreciable error.

En resumen: a) tenemos un entorno de experimentación no lo suficientemente controlado, b) no se está reproduciendo con fidelidad el fenómeno que se trata de estudiar. Lo que da lugar a un importante error estadístico en los resultados (suponiendo que se hizo un análisis correcto y se tuvieron en cuenta todas las posibles causas de error), de manera que, por ejemplo, estos resultados serán poco significativos y no resultarán útiles para contrastar hipótesis. El error experimental puede reducirse realizando muchas veces el experimento (aunque esto pudiera no ser viable en la práctica), pero no así el sistemático (no se reproduce el fenómeno a estudiar).

Pues bien: el dispositivo utilizado para obtener un entorno de experimentación controlado, en el que se pueden modificar las variables necesarias de la corriente fluida y del cuerpo a ensayar, y asegurar que el resto permanecen fijas, es el túnel aerodinámico. Esto es porque el túnel aerodinámico proporciona:

–Una corriente de aire cuyas características pueden ser controladas, y los elementos para su control.

–Un entorno de trabajo, en el que se coloca el cuerpo a ensayar, con los elementos requeridos para controlar su posición, su movimiento, etc.

–Además, dicho entorno de trabajo permite medir fácilmente y con precisión aquellas variables, tanto de la corriente fluida como del cuerpo, en que estemos interesados.

Pudiera pensarse que, hoy en día, con el desarrollo de la informática, no es necesario recurrir a la experimentación, y basta con resolver las ecuaciones del movimiento de los fluidos por medios computacionales. Aunque esta afirmación tiene algo de verdad, lo cierto es que las ecuaciones que describen el movimiento de los fluidos encierran una gran complejidad, como ponen de manifiesto varios hechos conocidos de todos (por ejemplo, el que los meteorólogos no sean capaces de hacer predicciones mínimamente fiables con una antelación más allá de un par de días). Hasta hace muy poco,

con el desarrollo de los modernos ordenadores, ha comenzado a seguirse este método con éxito. Aún así, hay flujos tan extremadamente complejos, que los ordenadores actuales todavía son incapaces de hacerles frente, no sólo por las limitaciones de los propios ordenadores, sino porque en algunos campos de la mecánica de fluidos y de los métodos de cálculo numérico, el conocimiento dista aún de ser completo. Por otra parte, aun cuando en un determinado caso pueda aplicarse el método computacional, para que los resultados que se obtienen al aplicar dicho método puedan utilizarse en la práctica, hay que estar seguros de que son lo suficientemente parecidos a los datos reales, es decir: hay que validar el método frente a datos reales. Dadas las exigencias en potencia de cálculo y personal altamente cualificado, el método computacional puede resultar muy costoso (debe recordarse que los ordenadores más potentes son los empleados en resolver problemas de mecánica de fluidos). La alternativa, frecuentemente más barata y que apenas tiene limitaciones en cuanto al tipo con la que es posible afrontar casi cualquier caso que deba ser estudiado, es la experimentación en túnel aerodinámico.

3.2 Clasificación de los túneles

Existen varias clasificaciones, basada cada una de ellas en un criterio diferente:

a) Según el número de Mach de la corriente en la cámara de ensayos; es decir, según la importancia, y en su caso las características, de la compresibilidad de la corriente durante los ensayos:

1.- Túneles de baja velocidad: el flujo en la cámara de ensayos es subsónico incompresible.

2.- Túneles de alta velocidad, en los que es importante el efecto de compresibilidad. Entre estos, distinguimos:

-Transónicos, en los que la velocidad en la cámara de ensayos es próxima a la del sonido.

-Supersónicos, en los que la velocidad es superior a la del sonido, hasta Mach del orden de 5.

-Hipersónicos, con números de Mach en la cámara de ensayos por encima de 5.

Muy frecuentemente, los túneles transónicos son también supersónicos. Los túneles de alta velocidad tienen unas mayores exigencias de diseño, al necesitar una potencia considerablemente mayor y necesitar resistir mayores esfuerzos estructurales. Las cámaras de ensayos son a menudo de paredes deformables, y con dispositivos especiales para evitar que se reflejen las ondas de choque.

b) Según el recorrido del aire. El aire siempre describe un ciclo en el túnel. Es decir, si seguimos su recorrido, veremos que realiza un circuito, y que al pasar dos veces sucesivas por el mismo punto del circuito, se encuentra en el mismo estado dinámico y termodinámico. Existen tres posibilidades:

1.- Túnel de circuito cerrado: el circuito que describe el aire que atraviesa la cámara de ensayos está perfectamente definido geoméricamente, de manera que el propio túnel es un conducto cerrado, anular, de manera que ni entra ni sale aire de ese conducto, sino que sólo circula el aire que está contenido en él. Lo de anular se refiere a la forma en planta, no a la sección transversal del conducto.

2.- Túnel de circuito abierto: el túnel propiamente dicho sólo define una parte del circuito que describe el aire. El resto, es la atmósfera libre. Por supuesto, no podemos asegurar que una partícula determinada de las que pasan por la cámara de ensayos va a volver a pasar sucesivas veces, pero si no lo hace ella, lo hace otra que, en la atmósfera, se encuentra en las mismas condiciones que las que alcanza nuestra partícula al salir del túnel, y eso es lo que cuenta para poder definir un circuito. El túnel estará constituido por un conducto recto, aunque de sección variable, y abierto tanto por el extremo de entrada como por el de salida.

3.- Túnel abierto de retorno cerrado: en apariencia, es como el caso anterior. La diferencia es que ahora está instalado dentro de un edificio de dimensiones muy parecidas a las del propio túnel, mientras que en el caso anterior esas dimensiones debían de ser mucho mayores que las del túnel. Ahora, el flujo va a retornar desde la salida del túnel a la entrada a través del conducto que definen la superficie exterior del túnel y la interior de las paredes del local, un conducto cuya área de la sección transversal es comparable a la del túnel, de manera que la velocidad en el retorno va a ser relativamente alta, lo que va a originar todo tipo de perturbaciones e importantes pérdidas de energía en la corriente (que, en términos de potencia, varían con el cubo de la velocidad de la corriente en una sección dada). Las pérdidas de energía serán especialmente elevadas si el local no se acondiciona para que el flujo sea mínimamente ordenado, eliminando aristas, rincones, etc. Así pues, en este caso vamos a necesitar una potencia mayor, y debido a las perturbaciones originadas en el retorno, la corriente en la cámara de ensayos va a ser de una calidad muy pobre.

Por las mismas razones que comentábamos en este último caso de túnel, la configuración en túnel de circuito abierto, para evitar que, en realidad, sea uno abierto de retorno cerrado, sólo es recomendable en el caso de que se requiera un túnel de pequeñas dimensiones. Existen otras razones: un túnel de circuito cerrado da mayor calidad de la corriente, consume menos potencia y es menos ruidoso. Además, permite utilizar el espacio que no ocupa el propio túnel para otras actividades, mientras que con un túnel abierto hay que despejar el local a fin de no causar perturbaciones.

c) En función de la aplicación.

1.- Túneles de aplicación general. Son aquéllos que se pueden emplear para realizar ensayos que no presentan requisitos especiales de cara a la configuración del túnel. Cabe distinguir, dentro de esta clase:

Túneles aeronáuticos: con una alta calidad de la corriente en la cámara de ensayos (muy bajo nivel de turbulencia, flujo muy uniforme y perfectamente paralelo al eje del túnel en todos los puntos), lo que hace que su construcción y mantenimiento sean muy costosos, lo que se refleja en un mayor coste de los ensayos.

Túneles no aeronáuticos: sin requisitos especiales en cuanto a la calidad de la corriente en la cámara de ensayos.

2.— Túneles de aplicaciones especiales, que son aquéllos cuyo diseño está optimizado para un tipo particular de ensayos, lo que impone ciertas características a la configuración del túnel, y por tanto su utilización en otro tipo de ensayos será más difícil y costosa. Por ejemplo, túneles verticales para estudio de entrada en barrena, túneles de muy baja turbulencia para visualización de flujos con humo, túneles de capa límite, con dispositivos especiales para lograr un perfil de velocidades y una estructura de la turbulencia como las que hay en una capa límite, etc.

3.3 Descripción de un túnel de circuito cerrado

Como se dijo, un túnel de circuito cerrado es, básicamente, un conducto cerrado por el que circula una y otra vez siempre el mismo aire (ver figura 3.1). Ese conducto suele describir, en planta, un rectángulo; es decir, está formado por cuatro conductos rectos, aunque de sección transversal variable, unidos mediante esquinas. Realicemos un recorrido por el interior del túnel, comenzando por el inicio del tramo recto en el que se encuentra la cámara de ensayos (que es donde se coloca el modelo y los dispositivos de medida). Los elementos con los que nos vamos encontrando son:

—*Cámara de remanso*: es un tramo de sección transversal constante, de no demasiada longitud. Sirve para ayudar a uniformizar la corriente que sale de la cuarta esquina antes de que llegue a la cámara de ensayos. También se suelen instalar en esta cámara dispositivos como filtros de turbulencia, que sirven para reducir la turbulencia, y secciones en panal de abeja, que ayudan a uniformizar la corriente.

—*Contracción*: es una componente en el que la sección transversal se reduce progresivamente hasta alcanzar las dimensiones que tiene en la cámara de ensayos. Ayuda a uniformizar la corriente y a reducir la turbulencia. Su función principal es permitir que en el resto del túnel la velocidad del aire sea menor que en la cámara de ensayos. Esto es porque ha de cumplirse la ecuación de continuidad en el tubo de corriente descrito por dos secciones transversales cualesquiera y las paredes del túnel. Las pérdidas de carga son, en términos de potencia, proporcionales al cubo de la velo-

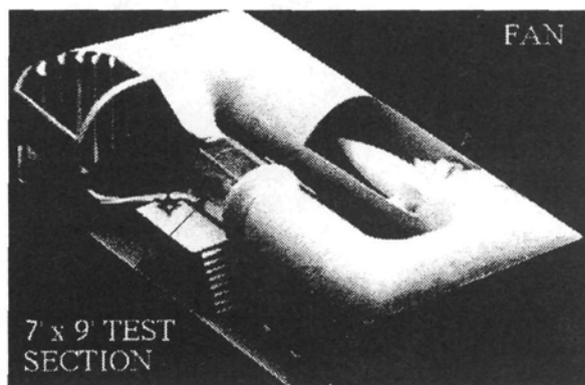


Figura 3.1. Túnel de circuito cerrado de baja velocidad (cortesía de la Escuela de Ingeniería Aeroespacial, Instituto Tecnológico de Georgia, USA).

cidad en la sección en que se estén calculando dichas pérdidas, por lo que es contraproducente mantener una alta velocidad allí donde no hace falta.

–*Cámara de ensayos*: es la zona dedicada a colocar el modelo y los instrumentos de medida. Suele ser una zona fácilmente accesible desde el exterior, acristalada al menos en parte, y bien iluminada, para poder fotografiar y filmar los ensayos. El modelo se suele fijar en el soporte de la balanza aerodinámica, que es un dispositivo para la medición del sistema de fuerzas aerodinámicas.

–*Primer difusor*. Ya vimos la razón por la que, en el resto del túnel, la sección transversal es mayor que en la cámara de ensayos. Por tanto, no sólo ha de reducirse la sección transversal antes de entrar a la cámara de ensayos, sino que, al salir de ésta, ha de incrementarse. El espacio disponible entre la salida de la cámara de ensayos y la entrada a la primera esquina no es muy grande. Sin embargo, existe una buena razón para que la sección transversal se incremente cuanto sea posible antes de alcanzarla: esto reducirá la velocidad del fluido antes de alcanzarla, y las pérdidas de carga, cuando se fuerza al fluido a realizar un giro, son muy intensas, por lo que interesa reducir la velocidad a la que el fluido realiza el giro (como se dijo, las pérdidas de carga son, en términos de potencia, proporcionales al cubo de la velocidad). Esto es lo que realiza el difusor. Pero ha de tenerse cuidado, ya que, si se recuerda la ecuación de Bernoulli, conforme disminuye la velocidad se incrementa la presión del fluido, así que en un difusor, la corriente avanza contra un gradiente adverso de presiones, lo que incrementa notablemente la pérdida de carga. El gradiente de presiones (que es el incremento de la presión en la salida respecto a la entrada, dividido entre la longitud del difusor), será tanto mayor cuanto menor sea la longitud del difusor, o bien, para una longitud dada, cuanto mayor sea la diferencia de presiones entre la salida y la entrada del difusor (por tanto, de acuerdo con la ecuación de Bernoulli, cuanto más incrementemos las dimensiones de la sección transversal de salida del difusor con respecto a las de la entrada). Es decir, si aumentamos demasiado el incremento de área que se produce en el difusor, pudiera ser que perdiésemos más en el difusor de lo que ganamos en la esquina. Lo que es más, para gradientes adversos muy fuertes, se producirán intensos desprendimientos de la capa límite en las paredes del difusor, de manera que, por un lado, la corriente que llega a la primera esquina está muy perturbada y dará lugar, pese a todo, a importantes pérdidas de carga en la esquina, y por otro, dada la proximidad de la cámara de ensayos, las perturbaciones producidas en el difusor van a afectar negativamente a la calidad de la corriente en la cámara de ensayos.

Se usan dispositivos para mejorar la uniformidad de la corriente y tratar de disminuir los efectos de los gradientes adversos en el difusor, como el uso de placas divisoras del flujo, y también, a veces, se instalan filtros de turbulencia y secciones en panal de abeja en la entrada del primer difusor para reducir el efecto de los torbellinos que se desprenden del modelo en la cámara de ensayos, ya que estos torbellinos afectan negativamente al rendimiento del difusor.

–*Primera esquina*: es un conducto en forma de codo, que fuerza al fluido a realizar un giro de 90°. Es una de las esquinas del rectángulo que describe en planta el circuito del túnel. En su interior, suele haber vanos verticales que ayudan al flujo a realizar el giro, reduciéndose así las pérdidas de carga. También suele haber placas divisoras del flujo en planos horizontales, ya que ayudan a uniformizar el flujo, y con ello también disminuyen las pérdidas de carga.

- Hay un *tramo recto* de sección constante uniendo la primera y la segunda esquinas. Al ser de sección constante, ayuda a uniformizar la corriente que sale de la primera esquina antes de entrar en la segunda, aunque a veces este tramo no es de sección constante, sino que es un pequeño difusor que realiza una disminución adicional de la velocidad antes de entrar en la segunda esquina.
- Segunda esquina*, que es de las mismas características que la primera. Realiza un giro de 90° de manera que el tramo recto que viene a continuación va a ser el lado del rectángulo opuesto a aquél en que se encuentra la cámara de ensayos.
- Segundo difusor*. Este es el difusor que realiza la mayor parte de la reducción de la velocidad de la corriente, dado que se dispone de una gran longitud para poder aumentar el área de la sección transversal sin originar fuertes gradientes adversos. Como se acaba de decir, ocupa el lado del rectángulo opuesto a la cámara de ensayos. Pero en un lugar intermedio de este segundo difusor no se realiza ninguna expansión del área transversal, sino que hay un pequeño tramo de sección constante en el que se instalan los ventiladores.
- Ventiladores*: Se acaba de ver que van instalados en un pequeño tramo de sección constante en una zona intermedia del segundo difusor. Un ventilador sirve para aumentar la presión de la corriente en el lado de salida con respecto a la de entrada, mientras que la velocidad de la corriente permanece constante. Como vimos, las pérdidas de carga en la corriente se traducían en una disminución de presión estática. Pues bien, la función del ventilador es dar a la corriente un incremento de presión exactamente igual a la pérdida de carga total que se produce en el túnel. Imaginemos que, con el túnel funcionando a una determinada velocidad, apagamos de repente el ventilador: si tomamos una sección de la cámara de ensayos como referencia, tenemos que, una vez una partícula fluida ha dado una vuelta por el túnel y ha regresado a esta sección, debido a la pérdida de carga su presión va a ser menor que la que tenía de partida, que va a ser con la que se va a encontrar, y para ponerse en equilibrio con el entorno debe aumentar su presión, lo que, de acuerdo con la ecuación de Bernoulli sólo puede hacer disminuyendo su velocidad. Luego el aire se irá frenando poco a poco hasta detenerse por completo. De esto deducimos que sin ventilador sería imposible mantener la corriente de aire en movimiento.
- Tercera y cuarta esquinas*: en ellas, muchas veces, ya no hay vanos de guiado de flujo, ya que la velocidad de la corriente que las atraviesa es bastante pequeña, por lo que la pérdida de carga que producen es mucho menor que la debida a las dos primeras esquinas. Van unidas por un tramo recto de sección constante. A la salida de la cuarta esquina se encuentra la cámara de remanso, con lo que se cierra el circuito.

3.4 Descripción de un túnel de circuito abierto

Si tomamos el tramo recto de un circuito cerrado que va desde la salida de la cuarta esquina hasta la entrada de la primera (es decir, el tramo en el que está la cámara de ensayos), y ponemos un tramo de sección constante con el ventilador a continuación de la salida del primer difusor (que ahora es el único), tendremos un túnel de circuito abierto.

El aire sigue realizando el circuito, pero en vez de retornar a la toma por un conducto determinado, lo hace a través de la atmósfera libre. Existen algunas pequeñas diferencias. Por ejemplo, ahora la velocidad y la presión en el brazo de retorno del túnel están fijadas, porque este brazo es la atmósfera en reposo, luego la presión en dicho brazo es la atmosférica y la velocidad es nula. Así que ahora interesa que el difusor realice una expansión tan grande como sea posible, para disminuir al máximo la velocidad, y transformar la energía cinética en presión para así tratar de alcanzar la presión atmosférica en la salida. El conseguir totalmente este objetivo obligaría a usar una sección de salida del difusor de área infinita, lo que no hace falta decir que es imposible, así que, a la salida del difusor, la velocidad será una determinada, pero no nula, y la presión será inferior a la atmosférica, debido por una parte a que la velocidad no es nula (ecuación de Bernoulli) y por otra debido a las pérdidas de carga producidas en la toma y en el túnel. El ventilador está para proporcionar un incremento de presión igual a la pérdida de carga total, tanto en el túnel, como en la toma y en el chorro de descarga.

Para disminuir la pérdida de carga en la toma, así como el desprendimiento de la capa límite en esa zona que afectaría a la calidad de la corriente en la cámara, se suelen instalar unos labios, de manera que la corriente que entra en el túnel lo pueda hacer suavemente.

Los túneles de circuito abierto suelen rendir una peor calidad de la corriente en la cámara de ensayos, ser más ruidosos, debido a que el ruido aerodinámico no queda confinado en el interior del túnel, y consumir más potencia para una cámara de ensayos de igual tamaño y con la misma velocidad de la corriente en ella, que los túneles de circuito cerrado. Sin embargo su construcción suele ser más barata, aunque depende de si se dispone o no del local en el que instalarlo y el acondicionamiento del mismo, etc., y por eso aún se construyen.

3.5 Realización de ensayos en túnel

Para que un flujo simulado en el túnel se corresponda exactamente con el flujo a escala real que trata de representar, han de cumplirse una serie de requisitos:

- a) *Semejanza geométrica*: esto quiere decir simplemente que el modelo que colocamos en la cámara de ensayos ha de estar a escala del cuerpo real al que representa. Es decir, el modelo ha de tener exactamente la misma forma que el cuerpo real que trata de representar, a la escala a la que esté dicho modelo. O sea, si dos elementos forman en el cuerpo real un ángulo δ , en el modelo formarán el mismo ángulo, y si dos dimensiones lineales en el cuerpo real tienen una relación E (que será la escala), las dimensiones lineales correspondientes en el modelo han de estar en la misma relación.
- b) *Semejanza dinámica*: si seleccionamos una unidad de longitud (por ejemplo, una longitud característica del cuerpo), una de tiempo (que puede ser la longitud característica dividida entre una velocidad característica, como la del fluido en puntos muy alejados aguas arriba del cuerpo), etc., podemos dividir y multiplicar (lo que equivale a multiplicar por 1 y dejar las cosas como estaban) las variables que aparecen en las ecuaciones de la mecánica de fluidos: las componentes de la velocidad en cada punto y en cada instante, la presión que hay en cada punto y en cada instante, etc. Redefinimos las variables como la variable real dividida por la unidad correspondiente, y obtenemos las variables adimensionales que, precisamente por ser adimensionales, no van a depender de la magnitud de la unidad de medida que estemos empleando. Pero para no cambiar las ecuaciones,

habíamos multiplicado y dividido las variables por las unidades escogidas, y aún nos queda por ver qué pasa con esas unidades cuando aparecen multiplicando: pues bien, van a quedar multiplicando a los sumandos de las ecuaciones para formar un conjunto de parámetros. Si tomamos uno de esos parámetros y dividimos todos los términos de la ecuación por él, la propia ecuación será adimensional, porque el sumando al que multiplicaba el parámetro escogido no está multiplicado ahora más que por la unidad, así que, como las variables son dimensionales, es adimensional, y todos los términos de una ecuación con sentido físico tienen las mismas dimensiones. Así que los parámetros que, al dividir por el escogido, no se han convertido en la unidad, serán dimensionales. Veamos esto con un ejemplo. No nos importa la ecuación en cuestión, sólo se trata de un ejemplo para ver el proceso de adimensionalización. La segunda ley de Newton dice que, si estamos en un sistema de referencia inercial, se cumple la ecuación:

$$F = ma$$

donde F es la fuerza que actúa sobre el cuerpo, m su masa, y a su aceleración. Supongamos que estamos aplicando esta ecuación en la dirección vertical, y que el cuerpo es un cohete tal que la masa de su estructura es muchísimo mayor que la del combustible, por lo que es correcto suponer que es de masa constante (de otro modo, habría que tener en cuenta la variación de la masa en la ley de Newton y la expresión anterior no sería correcta). Entonces, las fuerzas que actúan sobre el cuerpo, son la atracción gravitatoria, mg , y el empuje del cohete, actuando la primera hacia abajo y la segunda hacia arriba. Como unidades, vamos a tomar constantes conocidas:

-De masa, m

-De aceleración, g

-De velocidad, la velocidad que tenía el cohete en el momento de ser lanzado, llamémosla V_0 .

La unidad de tiempo, la deducimos del hecho de que la aceleración es igual a la derivada de la velocidad con respecto al tiempo, de manera que:

$$\text{Unidad de Aceleración} = \frac{\text{Unidad de Velocidad}}{\text{Unidad de Tiempo}}$$

Luego:

$$\text{Unidad de Tiempo} = \frac{V_0}{g}$$

Análogamente, la unidad de fuerza será la de masa por la de aceleración, es decir, igual a mg .

Si nos interesa calcular la velocidad del cuerpo, escribiremos también en la ecuación la aceleración como derivada de la velocidad con respecto al tiempo, es decir:

$$E - mg = m \frac{dV}{dt}$$

Ahora, multiplicamos y dividimos las variables por sus correspondientes unidades:

$$mg \frac{E}{mg} - mg \frac{mg}{mg} = m \frac{m \frac{d\left(V_0 \frac{V}{V_0}\right)}{d\left(\frac{V_0}{g} \frac{gt}{V_0}\right)}}{m}$$

Las variables adimensionales serán, denotándolas con las mismas letras pero con una tilde encima:

$$- \text{Empuje} \dots \tilde{E} = \frac{E}{mg}$$

$$- \text{Velocidad} \dots \tilde{V} = \frac{V}{V_0}$$

$$- \text{Tiempo} \dots \tilde{T} = \frac{gt}{V_0}$$

Con lo que reescribimos la ecuación en la forma:

$$mg \tilde{E} - mg l = m l \frac{d\left(V_0 \tilde{V}\right)}{d\left(\frac{V_0}{g} \tilde{T}\right)} = \frac{m V_0}{g} \frac{d\tilde{V}}{d\tilde{T}} = mg \frac{d\tilde{V}}{d\tilde{T}}$$

Si ahora dividimos todo por mg :

$$\tilde{E} - l = \frac{d\tilde{V}}{d\tilde{T}}$$

Aquí ha dado la casualidad (en realidad, la casualidad no es tal) de que todos los parámetros con dimensiones eran el mismo, mg , por lo que al dividir por uno de ellos se transformaban en la unidad. En un caso general de ecuación no es así; por ejemplo, si la ecuación anterior fuera una de estas, al dividir por mg nos podría haber quedado una expresión de la forma:

$$A\tilde{E} - l = B \frac{d\tilde{V}}{d\tilde{T}}$$

donde A y B son combinaciones adimensionales de las unidades empleadas para adimensionalizar.

Pues bien: la exigencia de semejanza dinámica significa que, tanto el problema real como el del modelo a escala, han de cumplir las mismas ecuaciones adimensionales, y, en consecuencia, estos parámetros adimensionales, A y B en el ejemplo, han de tener el mismo valor. (También han de cumplir las mismas condiciones de contorno adimensionales).

En los problemas que se suelen ensayar en túneles, los parámetros que aparecen son:

–El número de Reynolds, definido como:

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu}$$

donde ρ es la densidad del aire, V la velocidad característica (pe., la del aire en puntos muy alejados aguas arriba), L es una longitud característica del cuerpo, y μ es la viscosidad dinámica del aire, que es una propiedad termodinámica. El número de Reynolds caracteriza la proporción entre la fuerza de inercia (en definitiva, una manifestación de que tenemos una masa que se está moviendo) entre las fuerzas viscosas. Así pues, un número de Reynolds muy grande significa que la viscosidad va a ser muy poco importante y apenas va a afectar al movimiento.

–El número de Mach, que es el cociente entre la velocidad característica del fluido respecto al cuerpo, V , entre la velocidad del sonido en el aire en puntos muy alejados aguas arriba, a . Es decir:

$$M = \frac{V}{a}$$

Como ya se ha dicho, si el número de Mach es muy pequeño, puede suponerse que el aire se comporta como un fluido incompresible.

Así pues, para que haya semejanza dinámica entre el flujo real y el simulado en el túnel, los números de Mach y de Reynolds han de ser iguales en el modelo metido en el túnel que en el cuerpo en el flujo real. Se puede hacer una simplificación, puesto que estamos en flujo incompresible, es decir, que el número de Mach es tan pequeño que los efectos de compresibilidad causados por el movimiento del aire con respecto al cuerpo son despreciables. Como esos efectos son nulos si el número de Mach es nulo (recuérdese lo dicho en el capítulo sobre Aerodinámica para los líquidos ideales), podemos suponer que el número de Mach es aproximadamente nulo tanto en el flujo real como en el simulado en el túnel, y por tanto igual en ambos casos. Entonces, para que se cumpla la semejanza dinámica, basta con que se cumpla la igualdad en el número de Reynolds (y la igualdad en las condiciones de contorno adimensionalizadas, de lo que hablaremos más adelante).

En problemas de mecánica de fluidos más complejos pueden aparecer otros números adimensionales de importancia. Por ejemplo, en los movimientos de las masas de aire atmosféricas, afectadas por la aceleración de Coriolis debida a la rotación de la Tierra, el número adimensional que caracteriza la importancia de dicha aceleración se llama número de Rosby. Si hay una superficie libre, como la superficie del mar, son importantes las ondas debidas a la atracción gravitatoria sobre esa superficie, lo que se caracteriza mediante el llamado número de Froude, etc.

Así pues, tenemos que para realizar ensayos en túnel que resulten válidos para flujos incompresibles, hay que exigir:

- Que el modelo esté a escala del cuerpo real que representa (y esta escala también puede ser 1:1).
- Que el número de Reynolds sea igual en el flujo real que en el simulado en el túnel.
- Que las condiciones de contorno en variables adimensionales sean iguales.

Ocupémonos ahora del último punto. En general, las condiciones de contorno son que el aire incidente tiene un perfil de velocidades uniforme y la turbulencia es nula. Por eso, el grado de uniformidad y de turbulencia que se consiguen en la cámara de ensayos miden la calidad del túnel, puesto que al ser más uniforme y menos turbulento, se simularán mejor los flujos reales y podrán realizarse ensayos más sensibles a los efectos de estas variables. Para muchos ensayos, son admisibles niveles de turbulencia relativamente altos sin que los resultados sean sensiblemente erróneos.

Otra condición de contorno es que cuando las partículas encuentran el cuerpo y curvan sus trayectorias para rodearlo, no encuentran ninguna limitación para hacerlo tanto como necesiten en el flujo real, mientras que en el túnel, se encuentran con las paredes del túnel. Podemos comprender intuitivamente que la presión sobre el cuerpo va a ser diferente, tanto en valor como en distribución sobre la superficie del cuerpo, cuando obligamos al aire a pasar por un conducto que cuando puede extenderse lateralmente todo lo que necesite. Este efecto es muy importante cuando el modelo colocado en la cámara de ensayos es de tipo sustentador. Esto requiere el tratar matemáticamente los resultados de manera que se elimine el error en las medidas debido a esta causa: son las correcciones por interferencia de pared. Existe mucha experiencia y métodos desarrollados para hacer esto, y sigue siendo un campo activo de investigación.

Si pensamos en otras fuentes de error durante las medidas, no podemos dejar de citar el efecto de la flotación horizontal. Ya hemos hablado de las capas límite. Estas crecen en espesor conforme avanzan sobre un cuerpo, aunque sea en un campo de presión constante. Si consideramos, en primera aproximación, a la capa límite como una región en la que el fluido permanece estancado, o de manera más realista, en el que su velocidad es mucho menor que en el interior del conducto, esto equivaldrá a suponer que, de manera aproximada, el flujo sólo circula en la región interior del conducto que delimitan las capas límite, es decir: es como si el conducto estuviera delimitado no por sus paredes, sino por los contornos de la capa límite. Al ir creciendo en espesor las capas límite aguas abajo en la cámara de ensayos, ese conducto por el que realmente circula el flujo se va haciendo cada vez más estrecho, con lo que, de acuerdo con la ecuación de continuidad, al irse reduciendo el área de la sección, aumentará la velocidad del fluido, y de acuerdo con la ecuación de Bernoulli, al ir aumentando la velocidad aguas abajo, disminuirá la presión. Por eso, si situamos un cuerpo en la cámara de ensayos, la presión en su parte posterior tiende a ser menor de lo que debiera si no hubiera paredes de la cámara ni capas límite. Al ser la presión posterior menor, la fuerza neta hacia detrás va a ser mayor de lo que debiera, es decir, hay un aumento en la resistencia aerodinámica en los datos medidos en túnel con respecto al flujo real que tratamos de simular: es a este fenómeno a lo que se llama flotación horizontal.

Para medir las fuerzas que actúan sobre el modelo pueden emplearse varios métodos, cada uno con ventajas e inconvenientes con respecto a los otros:

- a) *Balanzas aerodinámicas*: Una balanza es un sistema mecánico que descompone el sistema de fuerzas (es decir, fuerzas y momentos) que actúan sobre el modelo y aplicado en un punto llamado centro de fuerzas de la balanza. Hay balanzas de seis grados de libertad, pero también las hay de menos, por ejemplo, de dos y de tres. Esto significa que sólo van a medir algunos de los componentes del sistema de fuerzas.
- b) *Medida de presiones sobre la superficie del cuerpo*. Se sitúan pequeñas tomas de presión perpendicularmente a la superficie del cuerpo, en el interior, con lo que obtenemos la presión estática en varios puntos de la superficie, a partir de los cuales podemos interpolar el campo de presiones completo sobre el cuerpo y, con ello, deducir fuerzas y momentos aerodinámicos. Además, podemos saber en qué zonas está habiendo problemas.
- c) *Cantidad de movimiento*: medimos el campo de velocidades en una sección transversal de la cámara de ensayos anterior al cuerpo, y lo mismo en una sección posterior a este cuerpo. Así, podemos calcular la diferencia de cantidad de movimiento debida a las fuerzas del cuerpo sobre el aire, que serán iguales y opuestas a las del aire sobre el cuerpo, así que podemos deducir estas. Para realizar estas medidas, se suelen usar tubos pitot.

La adquisición de datos suele realizarse de manera automática, mediante ordenadores, convirtiendo las señales físicas en señales eléctricas mediante transductores, y convirtiendo la señal eléctrica analógica en digital mediante convertidores A/D. Esto permite un rápido análisis de los datos por software, incluso en tiempo real, lo que puede ser esencial en ciertas aplicaciones, por ejemplo, en sesiones de entrenamiento de deportistas.

4. APLICACIONES EN EL DEPORTE

Una vez establecidos los conocimientos básicos de aerodinámica y de los túneles aerodinámicos, en las secciones siguientes se hace una presentación exhaustiva del modo de operación en distintas especialidades deportivas. Se han revisado en particular algunas especialidades del atletismo, carreras y lanzamientos; varios deportes de pelota, beisbol, cricket, golf y tenis; dos modalidades de esquí alpino, como son el descenso y los saltos; la vela y el ciclismo, tanto en ruta como en pista.

4.1 Atletismo

Dentro del atletismo se distinguen dos especialidades: las carreras y los lanzamientos. En el primer caso se estudian no sólo las carreras rápidas, sino también las de medio fondo y fondo; porque, como ya se ha dicho, la influencia de los factores relacionados con la aerodinámica en la potencia desarrollada por el atleta pueden ser notables. En el caso de los lanzamientos, tanto el disco como la jabalina son cuerpos sustentadores, que además tienen una resistencia aerodinámica, por lo que hay que estudiar de forma conjunta ambas fuerzas.

4.1.1 Carreras

Todos los estudios dedicados a minimizar la resistencia, prendas y posturas en atletismo se han llevado a cabo en túneles aerodinámicos por investigadores, ya sea a instancias de autoridades deportivas o bien de fabricantes de ropa deportiva. Valgan como ejemplo los ensayos mencionados en la introducción, realizados por Chester R. Kyle y Vincent J. Caiozzo (1986), con el fin de demostrar lo que hasta entonces sólo habían sido especulaciones, y determinar la resistencia del viento sobre las ropas y, así, poder evaluar su efecto en las carreras.

Para ello realizaron ensayos exclusivamente en túneles aerodinámicos, los cuáles demostraron que era posible disminuir la resistencia un 6% optimizando la aerodinámica. El túnel en que se realizaron los ensayos fue el de la 'California State University', en Long Beach, cuya cámara de ensayos de reducidas dimensiones, 61cm x 81cm, obligó a realizar los estudios con modelos de las distintas partes del cuerpo por separado, ante la imposibilidad de ensayar con los verdaderos deportistas. Aún así se obtuvieron resultados interesantes para la elección de prendas adecuadas. Por ejemplo, en el ensayo realizado sobre el material de los pantalones se aprecian diferencias de hasta un 15.6% de la resistencia total de las piernas (véase Fig. 4.1 y Tablas 1 y 2). También se midió la resistencia de zapatos, camisetas y de la cabeza, de lo cual se pueden sacar conclusiones sobre la importancia del modo de llevar el pelo.

A pesar de la contundencia de estos resultados, hasta ahora no han tenido la suficiente repercusión a nivel práctico, salvo en algunas categorías como la de velocistas, o algunos países como E.E.U.U., en el que las federaciones poseen sus propios túneles para ensayar con sus deportistas de alto nivel las posturas y prendas más adecuadas. Y ello pese a que la mejora de los tiempos es superior a los márgenes de algunas victorias o a los segundos por los que se bate un récord. Esto hace que en el deporte actual de alta competición deba tenerse en cuenta el entrenamiento de deportistas de alto nivel y el ensayo de prendas deportivas en túneles aerodinámicos.

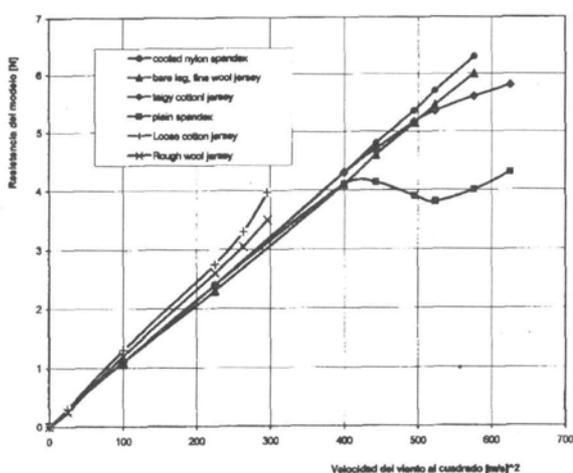


Figura 4.1. Variaciones de la resistencia con diferentes tipos de prenda referida a la total de la pierna.

Tabla 1. Valores relativos de la resistencia aerodinámica de un atleta con distintas vestimentas de Kyle y Caiozzo (1986). A 32 km/h de velocidad aerodinámica. Fuerzas en gramos.

Material	Resistencia total (g)	Incremento de resistencia(g)	Incremento de resistencia (%)
Totalmente desnuda	83.8	0 (referencia)	0
Con pelo	86.0	+2.2	+2.6
Lana muy lisa	83.3	-0.5	-0.6
Lana rugosa	88.7	+4.9	+5.9
Nylon	86.2	+2.4	+2.9
Nylon bruñido al calor	85.0	+1.2	+1.4
Nylon revestido de goma	84.1	+0.3	+0.4
Cualquier material arrugado	84.8	+1.0	+1.2
Algodón	84.0	+0.2	+0.2
Prenda de algodón no ceñida	96.4	+12.6	+15.0
Medias de algodón	94.0	+10.4	+12.4

Tabla 2. Valores relativos de la resistencia aerodinámica de un atleta con distintos elementos en su cabezade Kyle y Caiozzo (1986). A 32 km/h de velocidad aerodinámica. Fuerzas en gramos.

	Resistencia total (g)	Incremento de resistencia (g)	Incremento de resistencia(%)
Totalmente desnuda	116.9	0 (referencia)	0
Casco de goma sobre la cabeza desnuda	116.4	-0.5	-0.4
Pelo largo	288	+171	+146
Casco de goma sobre pelo largo	152.4	+36	+30
Pelo corto	229.3	+112	+96
Casco de goma sobre pelo corto	142.2	+25	+21
Capucha de "Spandex"	139.6	+23	+19

4.1.2 Lanzamiento de disco

Las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre un disco son función de la velocidad relativa del viento y del ángulo de ataque del disco con respecto a la dirección del viento. (Véanse figura 4.2). La influencia del aire se expresa por los coeficientes aerodinámicos del objeto.

La influencia del aire se expresa mediante los coeficientes aerodinámicos del objeto; el disco es más aerodinámico que el martillo, aunque menos que la jabalina. Sin embargo, gracias a su forma es posible compensar las disminuciones de distancia recorrida provocadas por la resistencia con los incrementos debidos a las fuerzas de sustentación mediante posiciones adecuadas de vuelo.

Las fuerzas aerodinámicas pueden, en muchos casos, aumentar la distancia de un lanzamiento, pero su desconocimiento o desprecio puede también provocar el efecto contrario. Por ejemplo, según un estudio referenciado por James y Bing (1994) las fuerzas aerodinámicas sirvieron para incrementar la distancia de lanzamiento de tres de los seis finalistas en la categoría de disco masculino; por el contrario, sirvió para reducirla en los mejores lanzamientos de los otros tres; los valores resultan tan elevados como 7.01 m a favor o 6.71 m en contra. Bartlett (1992) y James y Bing (1994) concluyeron, tras tener en cuenta las fuerzas aerodinámicas, que, salvo los errores experimentales en las medidas de algunos parámetros, estas cifras eran correctas. Estos hallazgos confirman que la manera de lanzar y volar del disco influye a través de las fuerzas aerodinámicas en la distancia que alcance el lanzamiento.

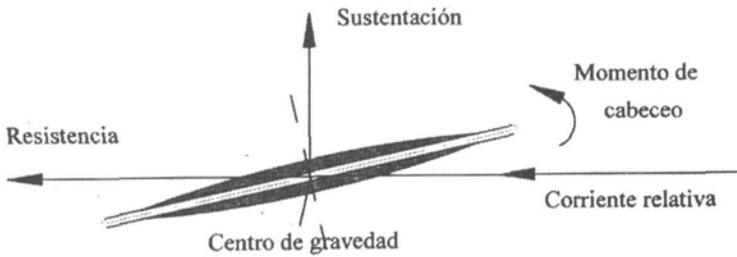


Figura 4.2. Fuerza aerodinámicas que actúan sobre un disco en vuelo.

La medida de estas fuerzas aerodinámicas requiere la utilización de un túnel aerodinámico, determinando la sustentación y resistencia a diferentes ángulos de ataque, los valores obtenidos se expresan como relación sustentación-resistencia (eficiencia aerodinámica); el ángulo de ataque que proporciona la mayor eficiencia aerodinámica, es decir, mayor sustentación por unidad de resistencia, es tomado como el ángulo de ataque óptimo. Ade-

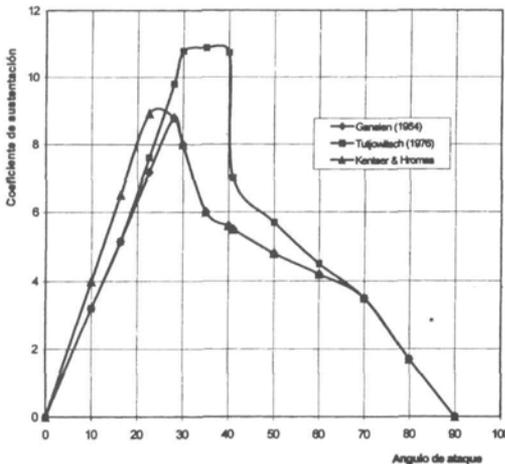


Figura 4.3. Variación del coeficiente de sustentación del disco con el ángulo de ataque.

más, para un análisis correcto, hay que tener en cuenta que la posición del disco varía durante el vuelo, lo que hasta ahora sólo se ha ensayado en túneles (véase Fig. 4.3.).

Muchas son las instituciones deportivas e investigadores que han utilizado este instrumento para prueba y mejora de lanzamientos. Los primeros ensayos en túneles aerodinámicos se remontan a 1932 cuando el '*Executive Committee of the Intercollegiate Association of Amateur Athletics of America*' lo utilizó para averiguar qué influencia había tenido un viento de 9.6 km/h soplando en contra del disco. Este ensayo se llevó a cabo en el túnel aerodinámico del '*David Guggenheim School of Aeronautics*' en Nueva York.

De todos los ensayos realizados desde entonces hasta ahora algunos destacables son, por su interés general, el de Ganslen (1964) que pone de manifiesto la enorme variación del coeficiente de sustentación respecto al ángulo de ataque con un máximo muy apuntado entre 25° y 40° ; para ello realizó, entre otras cosas, ensayos de visualización de las líneas de corriente mediante humo.

Otros estudios destacados son el de Tutjowitsch (Barlet, 1992), que presenta los resultados obtenidos para sustentación y resistencia en hombres y mujeres a partir de los ensayos en el túnel aerodinámico del *Instituto Aeronáutico de la Universidad de Moscú*; o los de Bartlett y Bremble en el túnel del *Liverpool Polytechnic*, corroborando los resultados obtenidos por Ganslen.

También se han realizado ensayos sobre discos giratorios por Kentzer y Hromas en el túnel de baja turbulencia de la *Universidad de Purdue*, que hicieron posible cuantificar la mejora que éstos suponían en lo referente a la sustentación respecto a los no giratorios.

Bartlett (1992) trata de la enorme importancia de las fuerzas aerodinámicas junto con las de la gravedad en la fase de vuelo del disco y cómo para calcular las condiciones óptimas para maximizar la distancia de lanzamiento, muchos investigadores han llevado a cabo estudios en túneles aerodinámicos: Kentzer y Hromas, Cooper *et al.*, Ganslen, Voight, Bremble y Frohlich, Samozwetow, algunos de ellos ya citados antes.

La forma del disco está ya determinada; sin embargo, sobre el coeficiente de resistencia tiene mucha influencia la dirección de la corriente incidente respecto al disco, como puede comprobarse haciendo visibles las líneas de corriente mediante inyectores de humo aplicados en puntos convenientes de la corriente incidente en un túnel aerodinámico. Dada la forma del disco, la formación de torbellinos como resultado del desprendimiento de la capa límite resulta máxima cuando el disco está en posición perpendicular a la dirección de la corriente y, por lo tanto, su resistencia será máxima.

Los vientos de cola, a pesar de que pueda parecer lo contrario, hacen que se reduzca el efecto de la elevación y el disco llega pronto a tierra, independientemente del hecho de que haya adquirido mayor velocidad. Esto es porque, aunque aumente la velocidad con respecto a tierra, la velocidad relativa al aire es menor y la sustentación, proporcional al cuadrado de esta última, es, en consecuencia, menor.

También a través de la experimentación en túneles se llega a la conclusión de que para vientos de frente superiores a 23 km/h conviene lanzar el disco con una

inclinación muy reducida, mientras que, si hay viento de cola, el ángulo de ataque debe ser muy amplio, con el disco cercano a la posición vertical.

Se han realizado ensayos en túneles con discos girando, en los que se ha podido comprobar la importancia del efecto giroscópico. Este efecto hace que un cuerpo que está girando tienda a mantener su posición frente a cambios externos. Este efecto tiene importancia en otros campos; por ejemplo: esto es lo que permite a los ciclistas no caerse hacia los lados, gracias al giro de las ruedas.

4.1.3 Lanzamiento de jabalina

La importancia de las fuerzas aerodinámicas en el lanzamiento de la jabalina es crucial (véase Figs. 4.4.), pues es el cuerpo más aerodinámico de todos los objetos de lanzamiento. Esta importancia queda demostrada en los estudios de Ganslen, Dyson, Terauds, y Hubbard, (Barlett y Best, 1988). Este último afirma que, gracias a la interacción de todas estas fuerzas aerodinámicas, el tiempo de vuelo es, para este cuerpo, dos veces y media superior al que tendría si no existieran.

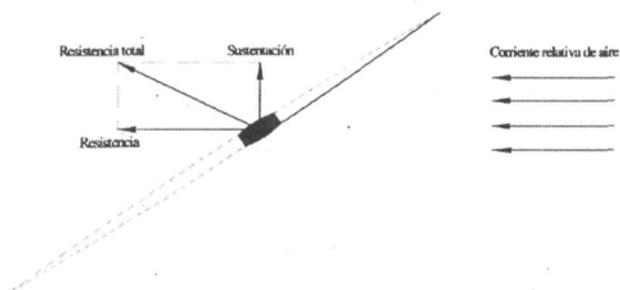


Figura 4.4. Fuerza aerodinámicas sobre una jabalina.

Los continuos cambios en el diseño de la jabalina, como la posición del centro de gravedad o el mínimo diámetro permitido en la cola, obligan a realizar ensayos para determinar cómo, variando la forma de lanzamiento, conseguir optimizar la distancia aprovechando las fuerzas aerodinámicas de acuerdo con las nuevas características.

El viento de frente aumenta la velocidad de la jabalina respecto al aire, dando una mayor sustentación y gracias a ello aumentando la distancia de lanzamiento; por el contrario, el viento de cola tiene un efecto adverso haciendo que, a pesar de alcanzar una velocidad mayor respecto al suelo, la velocidad aerodinámica disminuya y, con ella, la sustentación para un mismo ángulo de ataque, por lo que la jabalina cae antes. De todos los estudios experimentales realizados, únicamente Miller y Munro han tenido en cuenta las condiciones del viento y sus importantes consecuencias.

Sólo tras un estudio aerodinámico como el de Hubbard (Barlet y Best, 1988) se puede concluir que el ángulo de ataque óptimo decrece cuando la velocidad del viento de frente aumenta (se entiende por *óptimo* el que proporciona mayor sustentación por unidad de resistencia). O dar explicación al efecto Magnus, que crea una fuerza perpendicular

a la dirección de giro de la jabalina y de la dirección del aire; de este modo, para un lanzador diestro será positivo un viento lateral de izquierda a derecha, porque creará una sustentación positiva ayudando a la jabalina a mantenerse más tiempo en el aire, mientras que un viento de derecha a izquierda creará una sustentación negativa.

Para llegar a resultados verdaderamente útiles no es suficiente la observación detallada de lanzamientos, sino que el procedimiento adecuado es llevar a cabo ensayos en túnel aerodinámico, determinando la sustentación y la resistencia a diferentes ángulos de ataque; los valores obtenidos se expresan como la relación sustentación-resistencia (eficiencia aerodinámica) frente al ángulo de ataque, y el ángulo de ataque óptimo, que es aquél que proporciona la mayor eficiencia, es decir, mayor sustentación por unidad de resistencia: Además, hay que tener en cuenta que la posición de la jabalina varía durante el vuelo, lo que hasta ahora sólo se ha experimentado en túneles aerodinámicos. Cada vez que se efectúe una modificación en el diseño de la jabalina, si no se dispone de datos experimentales sobre ese nuevo diseño se habrá de recurrir a aproximaciones teóricas inexactas o inapropiadas para el caso. Esto fue lo ocurrido con los resultados obtenidos por Terauds (Barlet y Best, 1988) sobre el momento de cabeceo y sustentación de la jabalina: estos resultados no se obtuvieron a partir de ensayos en túnel, sino de observaciones sobre lanzamientos, y mostraban enormes desacuerdos con los obtenidos por Best y Bartlett (1988) en un túnel aerodinámico (véase Fig. 4.5.), hasta el punto de ser el coeficiente de sustentación un 30% menor del que había predicho Terauds.

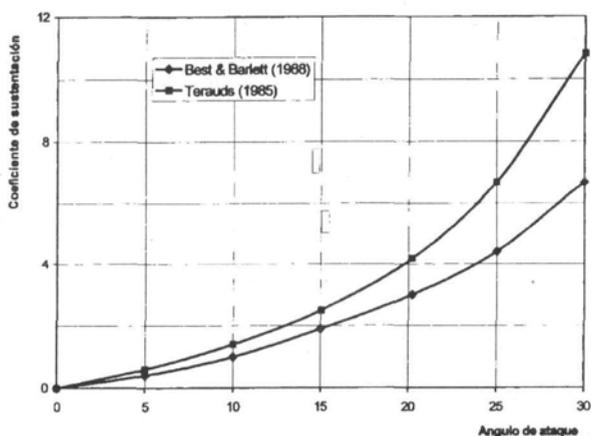


Figura 4.5. Variación del coeficiente de sustentación de la jabalina con el ángulo de ataque.

Es posible estudiar el vuelo de una jabalina mediante programas de ordenador de simulación dinámica. En estos programas hay que introducir como datos las propiedades aerodinámicas de la jabalina, que han de ser obtenidas en túnel. Es posible obtener estas propiedades aerodinámicas mediante programas de ordenador de mecánica de fluidos, pero este procedimiento tiene, en realidad bastantes inconvenientes: se requieren ordenadores especialmente potentes, y personal experimentado para contrastar la fiabilidad de los resultados; los resultados han de ser validados frente a datos reales, por lo que el uso del túnel sigue siendo imprescindible, aunque ahora sea bastante menor el número de casos a ensayar.

Aunque los ensayos que se realizan en túneles no están diseñados de forma absolutamente perfecta, pues no suele tenerse en cuenta el giro de la jabalina —aunque es posible— y las vibraciones son menores que las sufridas en la realidad (a pesar de que los primeros en detectar su existencia fueron Ganslen y Terauds en sus ensayos en túneles) constituyen el modo de ensayo y desarrollo más adecuado y científico, y el que proporciona resultados más ajustados a la realidad.

4.2 Deportes de Pelota

Como ya se ha comentado en la introducción, en los deportes de pelota es posible dar a ésta un efecto muy beneficioso que le haga describir una trayectoria curva fuera de la parabólica que cabría esperar.

En el apartado de Conocimientos Básicos de Aerodinámica (apartado 2) se da una explicación rigurosa y, a la vez, comprensible a este fenómeno. A continuación repasaremos algunas de las ventajas que éste ofrece a los diferentes deportistas.

La idea básica es que haciendo girar una pelota sobre sí misma podemos conseguir que se desvíe a la derecha, a la izquierda, por debajo o por encima de su trayectoria parabólica normal.

Aunque muchos no se hayan parado a pensarlo, este fenómeno está constantemente presente en una gran cantidad de deportes, provocando acciones espectaculares de las que se aprovechan continuamente los deportistas. Sería posible establecer dos distinciones: por un lado tenemos los deportes en los que el eje de giro de la pelota es básicamente vertical como el béisbol o el cricket, en los que la pelota se desvía lateralmente (izquierda o derecha); y por otro lado, se encuentran los deportes en los que el eje de giro es horizontal y la pelota sufre una desviación vertical (arriba o abajo) como ocurre en el tenis, el ping-pong, el baloncesto o el golf. En algunas ocasiones se puede conseguir que este eje de giro tenga una dirección intermedia, tal es el caso que ocurre en el fútbol si se golpea el balón de la forma adecuada. A continuación repasamos las acciones más curiosas de algunos de estos deportes, así como los resultados proporcionados por el empleo de diferentes túneles aerodinámicos.

4.2.1 Béisbol

El béisbol es uno de los deportes más populares de Norteamérica. En él hay dos personajes claves que son el lanzador y el bateador. El primero tratará de lanzar la pelota de la forma que resulte más compleja de responder para el segundo, escogiendo muchas veces trayectorias curvas. Como hemos visto, lo que tiene que hacer es deformar la estela, para lo que dispone de varios procedimientos, algunos de los cuales no son reglamentarios. Además de la posibilidad de imprimirle una velocidad de rotación se encuentra la *pelota de efecto*, la *pelota de fango* y la *pelota de esmeril*, en las cuales, el lanzamiento se ve también sometido a una fuerza lateral.

La *pelota de efecto* está basada en el descubrimiento realizado por C. Weyselberger a principios de siglo. En él se ponía de manifiesto que la presencia de un hilo arrollado sobre una esfera corriente arriba, creaba una turbulencia en la capa límite que la hacía inte-

raccionar con partes del fluido más alejada de la superficie. Estas, arrastraban la capa más lejos alrededor de la esfera, retrasando la aparición del desprendimiento hacia la parte posterior. Para conseguir esto hay que lanzar la pelota sin backspin (rotación hacia atrás) con el fin de que las dos costuras de su superficie produzcan una asimetría aerodinámica. El desprendimiento queda retrasado o avanzado según que las costuras estén en uno u otro lado de la pelota. La orientación de la estela varía en función de la posición de las costuras con respecto a la dirección de la corriente, la pelota resulta desviada sucesivamente en distintas direcciones.

La *pelota de esmeril* es ilegal, y se trata de una pelota que ha sido frotada en uno de sus lados para conseguir en él mayor rugosidad y retrasar, con ello, el desprendimiento de la capa límite en dicha zona. Esto, perturba la estela y desvía la pelota en la dirección de la rugosidad.

Lyman Briggs (1959) introdujo una pelota de béisbol en un túnel aerodinámico instalado en posición horizontal con el objeto de medir la desviación que producía la rotación de la misma en función de la velocidad de la corriente de aire. Para ello, mediante un sistema de aspiración, fijó la pelota a un extremo de un eje situado en la parte alta del túnel. Al principio, la pelota está protegida de la corriente de aire por una pequeña jaula cilíndrica. Basta hacer girar el eje por medio de un pequeño motor eléctrico para que la pelota se ponga a dar vueltas a su alrededor. Una vez determinada la velocidad de rotación, se interrumpe la aspiración, la pelota se libera por gravedad de su recinto protector y recorre en caída libre, una distancia de 2 metros. La corriente de aire hace que la pelota se desvíe entonces en el sentido de la misma, hacia un lado u otro del plano de caída libre según sea el sentido de rotación. Con estos métodos Briggs logró determinar la fuerza a que está sometida la pelota afirmando que era proporcional al producto de la velocidad de rotación por el cuadrado de la velocidad de la corriente de aire (wV^2).

Por otro lado, el especialista en aerodinámica Igor Sikorsky, también midió la fuerza ejercida sobre una pelota de béisbol en rotación empleando un túnel aerodinámico. Fijó una pelota al extremo de una punta fina unida al eje de un pequeño motor montado sobre una balanza, con objeto de hacer girar la pelota y medir las fuerzas que actúan sobre ella. Parece ser que llegó al mismo resultado que Briggs, pero mantenía que la trayectoria de una pelota en rotación dependía notablemente de la orientación de las costuras.

Como la afirmación de que la fuerza lateral es proporcional a wV^2 no concordaba con la teoría, se han llevado a cabo varios experimentos para resolver esta cuestión.

El dispositivo experimental comprende un túnel aerodinámico y una serie de aparatos que permiten medir la fuerza lateral ejercida sobre una pelota en rotación, así como las velocidades de rotación y de corriente. Para ello se insertaron tres pelotas de béisbol en unas varillas de 6'3 mm de diámetro orientando las costuras como se desee. Luego, las varillas se sujetan con unos bastidores. Un impulsor montado en el extremo de la varilla comunica a la pelota un movimiento de rotación. Por último, se coloca todo el dispositivo en la cámara de ensayos del túnel aerodinámico. En el túnel se hace girar la pelota manteniendo la corriente de aire a velocidad constante. Haciendo variar la velocidad del chorro de aire, se controla la velocidad de rotación.

Como el aparato encargado de medir la fuerza proporcionaba a la vez los efectos de la resistencia y la fuerza lateral, se hacía preciso eliminar la resistencia. Basta para ello efectuar dos veces el experimento, una con rotación en el sentido de las agujas del reloj, y la otra en sentido contrario. Luego se calcula la diferencia entre las deformaciones medidas en ambos casos, siendo la resultante de las fuerzas laterales la mitad de esta diferencia.

Contra lo que solían pensar los lanzadores de béisbol, se llegó a la conclusión de que la fuerza lateral es independiente de la orientación de la pelota, por lo tanto, la orientación de las costuras no es tan determinante. Por último, el empuje es proporcional al producto de wV y no a wV^2 .

Como último experimento importante, Richard González (1968) midió en un túnel aerodinámico las fuerzas que actuaban sobre pelotas que no giraban sobre sí mismas. Dos años después se hicieron unos experimentos análogos, pero más detallados, que fueron publicados por Robert Watts y Erix Sawyer. Se trataba de fijar una pelota de béisbol a un dispositivo que medía las fuerzas en juego, y colocarla luego en un túnel aerodinámico en posición simétrica con respecto a la corriente de aire. Se observó entonces la aparición de una resistencia dirigida en el sentido de la corriente de aire y la ausencia de fuerza en la dirección perpendicular. Haciendo girar la pelota un ángulo θ alrededor del eje vertical. Como era de esperar, la orientación asimétrica de las costuras desvió la estela y apareció una fuerza lateral. A corriente constante, la intensidad de esta fuerza es una función periódica de θ ; así, para $\theta = 30^\circ$, una pelota lanzada a 20'7 m/s es desviada hacia la izquierda del lanzador por una fuerza de unos 0'45 N. Para $\theta = 60^\circ$ e igual velocidad, es desviada hacia la derecha por una fuerza de igual intensidad. Una pelota lanzada sin rotación se desvía pues, hacia la derecha o hacia la izquierda, igual que haría una pelota curva. Pero si, por desgracia, un lanzador orienta su pelota simétricamente sin imprimirle ningún giro, entonces no se desvía en absoluto.

Como es lógico es recomendable que la pelota gire, para que la fuerza lateral cambie de dirección en vuelo. En la figura 4.6. hemos representado el caso de dos tipos de *pelotas de efecto*, una que da un cuarto de vuelta durante el vuelo, y otra que da media vuelta. La trayectoria de la primera empieza desviándose hacia la izquierda y luego lo hace hacia la derecha; la de la segunda cambia tres veces de dirección. Se trata, pues, de un efecto basado en desviaciones aleatorias conseguidas cuando la pelota gira muy lentamente. La razón consiste en que un móvil sometido a una fuerza no se pone enseguida

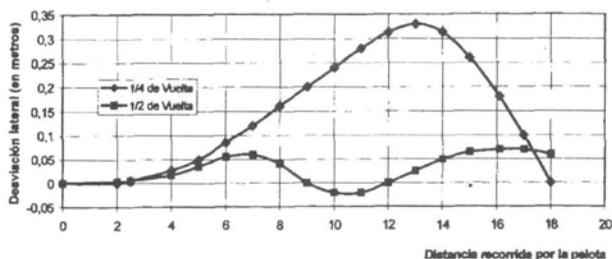


Figura 4.6. Variación de la desviación de la pelota a lo largo del trayecto (18,44 m.) que va del lanzador al bateador.

en movimiento: la velocidad es nula al principio y tiene que aumentar. Si la dirección de la fuerza aplicada varía con demasiada rapidez, puede que el móvil prácticamente no se mueva. Como es lógico es recomendable que la pelota gire, para que la fuerza lateral cambie de dirección en vuelo.

Por último, el propio Watts midió también en un túnel aerodinámico las fuerzas que actuaban sobre una *pelota de esmeril*. Para ello lijó una zona reducida de una pelota con un casco de botella, orientó lateralmente la rugosidad y la colocó en el túnel sin hacerla girar. La intensidad de la fuerza lateral que aparecía en dirección de la rugosidad era proporcional al cuadrado de la velocidad de la corriente de aire.

Ha quedado demostrado que las fuerzas que actúan sobre pelotas en rotación lenta o rápida y sobre pelotas de esmeril son suficientes para desviar su trayectoria. La desviación máxima de las pelotas de efecto no depende de la velocidad de lanzamiento, sino del número de vueltas efectuada por la pelota en vuelo.

Un lanzador profesional es capaz de imprimir a una pelota de béisbol una velocidad de rotación de 2.000 a 2.500 vueltas por minuto. Téngase en cuenta que la distancia que debe recorrer la pelota en un lanzamiento es de 18.44 metros, su velocidad puede llegar a ser de 44 m/s, llegando al bateador en solo 0.42 segundos. Un lanzamiento a 38 m/s se desviará lateralmente entre 0.06 y 0.75 metros cuando llega al bateador, según sea la velocidad de rotación. Además, el bateador no sabe si la pelota se desviará en un plano vertical, horizontal u oblicuo; ni siquiera sabe si la pelota se desviará o no. Teniendo en cuenta estos datos y el escaso tiempo para tomar impulso y golpearla (menos de medio segundo), muchos se preguntan como es posible que en tales condiciones llegue a golpearla correctamente.

4.2.2 Cricket

En el caso de este deporte de difusión mayoritaria en las Islas Británicas, los ensayos realizados en túnel aerodinámico permitieron descubrir lo que se conoce con el nombre de *efecto inverso* ('reverse swing'), que es un caso concreto en la aplicación del efecto Magnus que ya hemos comentado.

Hasta entonces, los lanzadores realizaban el lanzamiento con *efecto convencional* ('conventional swing'). En este caso la acción del lanzador permite a la costura de la pelota viajar con un pequeño ángulo respecto a la dirección de vuelo con velocidad de giro suficiente para mantener la orientación de la costura durante el tiempo en que la pelota está en el aire. Un buen lanzador le suele dar a la pelota unas 840 revoluciones por minuto.

El *efecto convencional* es el mismo que tenía la *pelota de efecto* en el caso del béisbol. La presencia de la costura es capaz de provocar la transición de la capa límite de laminar a turbulenta generando una distribución asimétrica de presiones alrededor de la pelota que se traduce en una fuerza neta lateral.

En la investigación conducida por Rabi Mehta (1983-1985) donde se usó una pelota de cricket suspendida en un **túnel aerodinámico** se puso de manifiesto la presencia de fuerzas laterales negativas cuando la velocidad del viento era superior a las del lanzamiento con *efecto convencional*. Una pelota de cuatro piezas nueva cuya costura forma un ángulo de 20° experimenta fuerzas transversales positivas ('conventional swing') en un rango de veloci-

dades que va desde 40 a 120 km/h aproximadamente, apareciendo un pico sobre los 110 km/h. Las velocidades del aire inferiores a 40 km/h no fueron suficientes para hacer que la capa límite que viajaba sobre la costura de la pelota se convirtiera en turbulenta y, por lo tanto, no se consiguió ningún efecto. Sin embargo, cuando la velocidad del aire se incrementaba por encima de 120 km/h se medía una fuerza lateral en sentido contrario a aquellas producidas por el *efecto convencional*; se las denomina **fuerzas laterales negativas** y son responsables del *efecto inverso*. De este modo, para cualquier pelota de cricket, habrá una velocidad que marca la transición del efecto en un sentido u otro. Para la pelota en cuestión, esto ocurrirá a 120 km/h aproximadamente. Si se tiene en cuenta que los lanzadores rápidos pueden alcanzar velocidades de hasta 145 km/h aproximadamente, el *efecto inverso* aparece posiblemente con una pelota nueva, pero sólo para lanzadores que fueran verdaderamente rápidos. Lo más alentador de esta investigación fue descubrir que la velocidad a la que se producía el *efecto inverso* se veía considerablemente reducida para pelotas más viejas y de mayor rugosidad en uno de los lados. Las fuerzas transversales en una pelota de cuatro piezas colocada con el lado rugoso hacia adelante se hacían negativas a 110 km/h aproximadamente. Esto le da a cualquier lanzador, no sólo rápido, sino también de tipo medio, la oportunidad de utilizar el *efecto inverso*.

Cuando esto ocurre, al superarse la velocidad crítica, la capa límite se convierte en turbulenta antes de llegar a la zona de la costura. El efecto de ésta sobre la capa límite turbulenta se traduce en un aumento de su espesor y en la disminución de la efectividad del mezclado con el aire de alrededor, adelantándose así el punto de desprendimiento con respecto al lado que no se encuentra con la costura. Aparece así una nueva asimetría en la distribución de presiones, pero de signo contrario a la que tiene lugar en el *efecto convencional*.

4.2.3 Golf

Las pelotas de golf también han sido ensayadas en túneles aerodinámicos con el objetivo de medir las fuerzas de resistencia y sustentación que aparecen sobre las mismas en el transcurso de su vuelo. En 1949 Davies empleó el túnel aerodinámico B.F. Goodrich donde la velocidad de la corriente era de unos 35 m/s suspendiendo en la cámara de ensayos pelotas que giraban a velocidades de hasta 8000 rpm.

En este ensayo se observó que el giro hacia atrás que experimenta una pelota de golf en su vuelo habitual se traduce en una fuerza de sustentación adicional. Recientemente los experimentos llevados a cabo por P.W. Bearman y J. K. Harvey han puesto de manifiesto que dicha fuerza de sustentación varía linealmente con la velocidad, como ocurría también con la fuerza lateral medida en las pelotas de béisbol (ver apartado 4.2.1.). Este hecho hace necesario modificar el ángulo de lanzamiento inicial que hay que darle a la pelota para conseguir el mayor alcance posible. Los investigadores Cuchran y Stobbs concluyeron que este ángulo era de unos 12° o 13°.

Por otro lado muchos se habrán preguntado alguna vez por qué las pelotas de golf presentan una rugosidad en su superficie. La respuesta es muy simple: los diferentes estudios teóricos apoyados por numerosos ensayos en túneles aerodinámicos ponen de manifiesto que el aumento de la rugosidad en la superficie de una pelota de golf provoca la transición de la capa límite de laminar a turbulenta, retrasa el punto de desprendimiento y disminuye las dimensiones de la estela, lo que se traduce en una disminución de la resistencia aerodinámica, que es, en este caso, una resistencia de presión.

4.2.4 Tenis

Es muy interesante la aplicación que realizó Antonin Stepánek en 1986 de las técnicas de análisis teórico a los resultados proporcionados por un túnel aerodinámico acerca de los coeficientes de resistencia y sustentación de una pelota con cierta velocidad angular o de giro, en vista de que los primeros por sí solos se limitan a proporcionar una serie de resultados cualitativos. El conjunto de ecuaciones obtenidas es un sistema de ecuaciones no lineales que debe resolverse por métodos numéricos.

Al colocar la pelota en el túnel aerodinámico se practicaron agujeros para poder instalar el sistema de giro. La velocidad de giro de la pelota se medía por medio de un sensor situado en su parte superior que recogía las señales de un pequeño imán que estaba pegado en el interior de un agujero practicado en la periferia de la pelota. Simultáneamente, la velocidad de giro era medida por medio de un estroboscopio.

Las medidas se realizaron en el túnel de flujo abierto del Instituto de Investigación Aero-náutica de Praga, que tiene un diámetro de 1.8 m. Las velocidades del aire oscilaron entre los 13.6 y los 28 m/s y las angulares de la pelota entre 800 y 3250 rpm. La conclusión más importante que pudo extraerse de los resultados fue que los coeficientes de resistencia y sustentación eran independientes del número de Reynolds, que simplificaba enormemente la formulación que se desarrolló posteriormente.

En tenis, la fuerza de Magnus, da origen a dos golpes muy característicos: el golpe *liftado* y el golpe *cortado*.

En el golpe *liftado* la fuerza que aparece sobre la pelota a consecuencia del giro tiene dos componentes: una hacia el suelo (en contra de la sustentación) y otra hacia adelante (en el sentido en el que viaja la pelota). Este hecho nos permite golpear la pelota más fuerte sin miedo a que ésta pueda salirse de la pista, y dificultar la respuesta de la misma por parte de nuestro oponente que la recibe con una fuerza adicional en su contra.

En el golpe *cortado*, las dos componentes de la fuerza son hacia atrás (fuerza de resistencia) y hacia arriba (fuerza sustentadora). La consecuencia es que, al golpear la pelota, ésta adquiere mayor profundidad debido a la sustentación adicional y tras botar en el suelo se queda frenada, dificultando de igual manera el golpe de nuestro oponente.

Por último se aplicaron los resultados teóricos para el cálculo de las trayectorias parabólicas de cualquier juego de pelota a uno de los golpes más complicados del tenis: el *globo liftado*.

4.3 Esquí alpino

En este apartado se estudian dos modalidades típicas del esquí alpino: el descenso y el salto. En el primero de ellos es la resistencia aerodinámica el aspecto más importante desde nuestro punto de vista, mientras en el segundo hay que atender tanto a la resistencia como a la sustentación y momento de cabeceo.

4.3.1 Descenso

La prueba de descenso consta de dos tipos de tramos: los de descenso propiamente dicho, y los técnicos. En los primeros, el esquiador mantiene una postura fija, alcanzando velocidades del orden de los 120 km/h, mientras que, en los segundos, ha de efectuar un conjunto de giros y saltos, disminuyendo su velocidad. Para obtener una buena marca, el esquiador ha de ejecutar con destreza y buena técnica ambos tipos de tramos, pero donde la influencia de la aerodinámica es más evidente es en los tramos de descenso. La longitud de éstos viene a representar entre un 30 % y un 50 % del recorrido total, según estimaciones realizadas por diversos autores (Gorlin et al., 1972; Luethi & Denoth, 1987), con lo que pequeñas mejoras durante su realización pueden suponer que el tiempo global de la prueba se mejore en unas cuantas décimas de segundo, o incluso en algunos segundos.

Desde el punto de vista mecánico, el esquiador, en un tramo de descenso, es un móvil, cayendo por un plano inclinado por efecto de su propio peso, y desplazándose en el seno de un medio resistente, el aire, que se opone al movimiento del esquiador con una fuerza proporcional al cuadrado de la velocidad del móvil con respecto al aire. En definitiva, es el problema de un cuerpo en caída libre en el seno de un tal medio resistente, y, como es sabido, esto implica que la velocidad del móvil crece aproximándose asintóticamente a una velocidad límite. Por tanto, el esquiador va a conseguir mejores resultados cuanto mayor sea esta velocidad límite.

A partir de la expresión matemática de dicha velocidad límite, es posible darse cuenta que es proporcional a un parámetro que relaciona la masa del esquiador con sus características aerodinámicas:

$$V_L \propto \sqrt{\frac{m}{\rho C_D A_F}}$$

donde m es la masa del esquiador; C_D su coeficiente de resistencia; A_F su área frontal y ρ la densidad del aire. Los diferentes autores han definido parámetros equivalentes a éste (Watanabe & Ohtsuki, 1977; Luethi & Denoth, 1987). A la vista de este parámetro, al cual es proporcional la velocidad límite, está claro que, para aumentar dicha velocidad, el esquiador ha de estar equipado de forma tal, y adoptar una postura tal, que le permita reducir el producto $C_D A_F$. Los ensayos en túnel aerodinámico (véase Fig. 4.7) han permitido definir los factores de los que depende este producto, y cómo minimizarlo:

–Postura: ya en 1959 el Equipo Nacional de Francia realizó una serie de ensayos para determinar cuál era la postura óptima, y fue entonces cuando se descubrió la postura del huevo. Una buena postura incide de dos maneras: reduciendo el área frontal, y reduciendo el coeficiente de resistencia, por dar una menor resistencia de forma. Y aunque la postura óptima es conocida, para cada esquiador hay que encontrar los detalles de esta postura que dan el mejor resultado (Gorlin et al., 1972), detalles que pueden suponer diferencias $\neq n$ la resistencia aerodinámica de un 10 a un 20 %. Para este fin el túnel aerodinámico se ha revelado como una herramienta insustituible.

–Ropa: Influye de dos maneras. En primer lugar, la talla: una ropa holgada dará lugar a la llamada resistencia de flameo. En segundo lugar, ha de ser lo más lisa posible, para disminuir la resistencia por fricción con el aire.

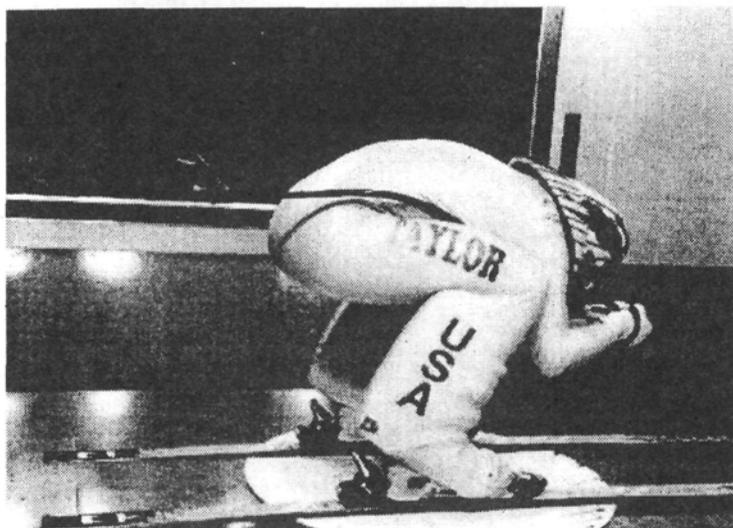


Figura 4.7. Situación del esquiador sobre la balanza de un túnel aerodinámico (Cortesía del Laboratorio de Aerodinámica de la Universidad de Washintong, Seatle, WA, USA).

—Carenados: es decir un casco aerodinámico, con una correcta posición de la cabeza, así como los carenados de las botas. Estos carenados son esenciales para reducir la resistencia de forma.

Además de en la investigación y desarrollo de equipamiento, estudios de biomecánica, etc., el túnel aerodinámico es usado con profusión como medio de entrenamiento en varios países: EE.UU., Canadá, Francia, Rusia, Austria, Suiza, etc. El esquiador no sólo ha de encontrar su postura óptima personal, sino que ha de, digámoslo así, memorizarla mus-

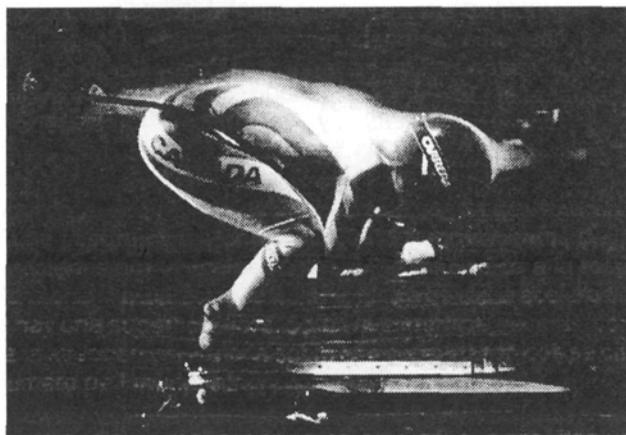


Figura 4.8. Ensayo de visualización con humo de un esquiador olímpico. (Cortesía del Consejo Nacional de Investigación de Canadá).

cularmente. La técnica utilizada es situar al esquiador en una balanza de un grado de libertad, que proporciona la medida de la resistencia aerodinámica en tiempo real, e ir modificando ligeramente la postura hasta que se alcanza un mínimo. Después, es cuestión de repetir esta postura una y otra vez. Como elementos auxiliares, se emplea la visualización de la capa límite mediante hilos de humo (véase Fig. 4.8.) para determinar, por ejemplo, si la posición de la cabeza es la correcta.

4.3.2 Salto

Los problemas con el salto de esquí no se refieren únicamente a obtener la postura óptima, mejorar la aerodinámica y desarrollar el equipamiento más adecuado. Además, hay que lograr que los estilos de salto sean seguros, y demostrarlo sin ningún género de dudas ante la Federación Internacional de Esquí (Müller et al., 1995).

El salto de esquí tiene tres fases: descenso, vuelo y recorrido en tierra tras el aterrizaje. Lo que hay que decir acerca del descenso, es lo mismo que lo visto para la prueba homónima. Interesa, desde luego, que en el momento de iniciar el salto, el esquiador haya alcanzado la máxima velocidad posible, con el fin de maximizar el alcance del salto, por lo que es un aspecto que no ha de descuidarse en el entrenamiento en túnel. Nos ocuparemos aquí de la fase de vuelo: se divide a su vez en tres etapas: despegue, vuelo propiamente dicho, y aterrizaje.

En la fase de despegue, el esquiador efectúa un cambio rápido de postura. Pese a que es una etapa que dura muy poco, pensamos que sus efectos son cruciales, ya que pueden repercutir muy apreciablemente en la pérdida inicial de velocidad que, inevitablemente, va a producirse, y unas malas actuaciones durante esta etapa pueden suponer una merma para lo que se haga a continuación. Que nosotros sepamos, es un problema aún por estudiar.

La etapa de vuelo propiamente dicha se caracteriza porque el esquiador mantiene una postura fija, y sólo realiza pequeñas correcciones. Puesto que se trata de maximizar el alcance, en principio interesa la postura que proporcione la mayor eficiencia aerodinámica (cociente entre la sustentación y la resistencia). Sin embargo, no es un problema tan sencillo, porque durante la duración del vuelo va aumentando progresivamente el ángulo de ataque y, en las etapas finales, representa una ayuda tener una alta resistencia. Conocidas las propiedades aerodinámicas en función del ángulo de ataque, es posible calcular la velocidad en función del tiempo, y el alcance de un salto. Es así como se ha determinado que la mejor postura, de las hasta ahora empleadas, es la de la V plana, supuesto que no hay transición de estilos durante el salto.

Otro aspecto esencial durante la etapa de vuelo es la seguridad. Las fuerzas aerodinámicas dan un momento, llamado de cabeceo, respecto al centro de masas. Este momento tiende a hacer girar al esquiador dentro del plano vertical; por eso, ha de ser pequeño en todo instante y, además, el esquiador ha de ser capaz de modificarlo mediante pequeñas variaciones en su postura, para así corregir las tendencias peligrosas que note durante el vuelo. No solo esto, sino que estas pequeñas acciones correctoras no han de dar lugar a variaciones bruscas ni muy acusadas en el momento, de manera que se imprima repentinamente un brusco giro al esquiador haciendo que éste pierda el control. Este es otro terreno en el que aún hay mucho por hacer.

Muy frecuentemente, los ensayos se han realizado en maquetas a escala. Esto significa que toda una serie de características, como rugosidad y talla de la ropa, no van a quedar bien representados. Además, difícilmente las medidas se realizarán colocando el centro de medida de fuerzas coincidiendo con el centro de masas, con lo que habrá que ser especialmente cuidadosos para no introducir un gran error en la medida de momentos. No cabe duda de que es mucho mejor realizar los ensayos con esquiadores reales.

El túnel es ampliamente usado en el entrenamiento de los esquiadores, para adquirir una buena postura en la fase de vuelo. No obstante, el esquiador se monta sobre una balanza convencional, sujetándolo por los esquís, pero sería mucho mejor idear algún medio de sujeción por el punto más próximo al centro de masas, a fin de que el esquiador tuviera unas sensaciones mucho más próximas a las reales.

4.4 Vela

Aunque el uso de la vela, como elemento propulsivo para la navegación, es algo conocido desde la más remota antigüedad, resulta curioso que su análisis teórico, desde el punto de vista aerodinámico, solamente se ha intentado en tiempos muy recientes.

Los barcos de vela son los únicos vehículos cuya actuación depende del flujo de un fluido en dos medios distintos: agua y aire. Durante siglos, el diseño de las velas se basó en la experiencia, la observación cuidadosa y la intuición. No obstante, la fabricación de veleros rápidos jugó un papel muy importante en el destino de las naciones y el descubrimiento de nuevas tierras.

En la actualidad las embarcaciones de vela se usan únicamente para recreo y competición, sin embargo, no deja de ser importante y, a su vez, complejo el problema de lograr la máxima eficiencia en un barco que es impulsado por el aire y que ha de deslizarse sobre el propio aire y sobre el agua a la vez. Un velero debe diseñarse para desenvolverse a la máxima velocidad y soportar el rango más amplio posible de estados del mar y del viento, que puede soplar en direcciones distintas y con fuerza variable. Los países que cuentan con los medios tecnológicos más avanzados se han dado cuenta que mejorar sus veleros es una tarea que requiere gran sutileza.

Puesto que tenemos dos fluidos en juego, lo más coherente es conseguir optimizar el rendimiento de la embarcación en cada uno de ellos. Con este propósito se ensayan por separado el casco y la vela.

Por un lado, se ensayan modelos a escala de los cascos sin vela en un canal hidrodinámico por donde se remolca mecánicamente el casco de la embarcación para contrastar los resultados con un ensayo a escala real en el mar. Sin embargo, esta comparación no es completamente satisfactoria debido a la gran cantidad de variables que entran en juego en una competición, como son las condiciones del viento y del mar, las maniobras de la tripulación y la calidad del diseño de las velas.

Paralelamente a las investigaciones sobre los cascos, se realizan análisis y experimentos centrados sólo en las velas. El empleo del túnel aerodinámico en este tipo de ensayos ofrece la ventaja de que las fuerzas medidas sobre las velas son más sencillas

llas de rescatar que las correspondientes fuerzas hidrodinámicas que se miden sobre el casco. Además, no es necesario tener en cuenta los efectos de las olas y se puede conservar el número de Reynolds para efectuar las escalas. En el caso de las velas, hay que tener en cuenta que la forma de la vela no se mantiene constante, sino que varía con las condiciones del viento debido a que la vela está fabricada de material elástico y a la distorsión del aparejo que las sujeta. Aún así, el número de variables que hay que tener en cuenta para elegir una vela no es reducido. En el Túnel Aerodinámico M.I.T. Wright Brothers y en la Estación Naval Experimental de Estados Unidos en Filadelfia se realizaron diversos ensayos con diferentes combinaciones de foques, velas mayores y cascos. Las velas estaban hechas de aluminio o de plástico reforzado con fibra de vidrio con el fin de poder controlar su forma. También se utilizó humo para poder visualizar el flujo de aire y se apreció como éste se empezaba a deflecar bastante antes de alcanzar el borde delantero (borde de ataque) de las dos velas. Aunque separar el estudio del casco del de las velas es muy útil para el diseño y la investigación, ambos están estrechamente relacionados. La vela que es óptima para un barco no es buena para barcos de diferente clase o tipificación.

Sin duda, un estímulo importante para perfeccionar las actuaciones de los veleros son los continuos desafíos a la posesión estadounidense de la Copa América por parte de Gran Bretaña, Australia y otros países. Desde 1851, Estados Unidos ha salido airoso de todos los enfrentamientos, pero las distancias son cada vez más estrechas ante la acometida de nuevas embarcaciones en cada una de las competiciones que se desarrollan. Tampoco podemos olvidarnos de los éxitos españoles en esta disciplina, que se han multiplicado de forma muy esperanzadora, siendo éste un deporte que contribuyó de manera muy notoria al medallero español de las últimas Olimpiadas celebradas en Atlanta.

4.5 Ciclismo

Se recogen aquí algunos de los resultados más significativos, en especial aquellos que más impacto han causado al gran público y en los que han tenido parte principal las mejoras aerodinámicas. Se detallan también algunas tendencias y estudios actuales, así como campos en los que hasta ahora no se le ha dado toda la importancia que tiene a los estudios aerodinámicos.

4.5.1 Pruebas en pista

Tradicionalmente en el ciclismo, los estudios aerodinámicos se han considerado algo limitado a las pruebas en pista. Esto se debe a que en dichas pruebas la realidad y la teoría se ajustan más, especialmente en velódromos cerrados, al eliminarse en gran medida las interferencias medioambientales. La bicicleta recibe una corriente relativa de aire sin apenas componente transversal, y de igual valor al de avance al poder considerar que el aire se encuentra en calma. Son pruebas en general de menor duración que las pruebas en ruta, y no existen modificaciones de la superficie de rodadura de modo que al ciclista le resulta más fácil mantener las posiciones aerodinámicamente eficaces que ha aprendido en los ensayos en túnel durante toda la prueba. Las velocidades suelen ser más elevadas, lo que implica que la resistencia aerodinámica sea más importante y resulte crítico actuar sobre ella.

Récord de la hora. Sin duda todos los que en el ciclismo son partidarios de realizar mejoras aerodinámicas deben mucho a esta emblemática prueba. El año 1984 significó según refleja Genzling, C. (1984) la introducción y el reconocimiento definitivo de la importancia de la aerodinámica en el ciclismo, hasta el punto de ser denominado por el CNAM (Conservatoire National des Arts et Métiers) como el año de la bicicleta aerodinámica. De acuerdo con los estudios de Dal Monte, A. (1987) la obtención de dos récords de la hora en menos de cuatro meses por F. Moser se debió a las mejoras aerodinámicas tanto en el material como en la postura llevadas a cabo mediante ensayos en los túneles aerodinámicos de Pinin-Farina en Turín, incluso obligó a la UCI a revisar su legislación en temas aerodinámicos como detallan Jacobs R., Mathy T. y Van Der Brent H. (1984). Pero los inicios en estudios sobre bicicletas de competición en túneles aerodinámicos se remontan a 1977, en los túneles del Instituto Tecnológico de Saint-Cyr. Un complejo con más de diez túneles para el estudio de vehículos que se desplazan a gran velocidad (desde algunos m/s hasta 5000 km/h).

En 1985 L. Fignon comienza los entrenamientos en túnel. De los resultados del entrenamiento y ensayo surgió la Delta (como en 1979 había surgido la Profil de B. Hinault), una nueva bicicleta aerodinámica, con la que en un principio se preparaba para dejar el récord de la hora en los 53 km. La bicicleta fue utilizada en pista, pues los estudios no sólo consiguieron una nueva máquina sino que el campeón consiguiese una técnica sobre ella que le sirviese para cualquier prueba.

Hoy se considera impensable atacar pruebas de este tipo sin realizar un entrenamiento previo en túneles aerodinámicos (salvo deportistas excepcionales) así ha sucedido con los portadores del récord desde Boarmand, Obree, T. Rominger. Incluso se han permitido revasar los poco claros límites legislativos de la UCI, con posiciones y bicicletas.

Pruebas de persecución, por equipos y de arrastre. En estas pruebas se busca permanecer el mayor tiempo posible en la estela del corredor o moto que le precede. Un gran especialista en esta disciplina fue el español Guillermo Timoner, seis veces campeón del mundo (1955, 1959, 1960, 1962, 1964, 1965). En los ensayos en túnel se consigue no sólo ensayar de forma teórica al corredor la posición que ha de mantener y la distancia adecuada, sino que el propio corredor puede notar sin la presión de la competición y cuantas veces sea necesario como afecta su posición a la resistencia que ha de vencer. En cuanto a la posición óptima en pequeños grupos fuese estudiada en los Túneles de Renault y los resultados se dan en el punto siguiente.

4.5.2 Pruebas en ruta

En las pruebas en ruta la presencia de otros corredores y las condiciones variables en dirección, pendiente y estado de la carretera, obligan a modificar continuamente la posición del ciclista, reduciendo los posibles beneficios que tendría mantener una postura aerodinámica. Un ejemplo claro lo constituyen los cascos, cuya eficacia depende de que éstos se mantengan en una posición óptima. Kyle (1989, 1990 y 1991, b) demostró que si esta no se mantiene, la utilización de este elemento puede incluso resultar perjudicial. Quizás la única prueba en ruta que más se asemeja al comportamiento en pista sea la prueba contrarreloj individual y por equipos.

En ruta el desarrollo de la carrera en muchos casos no consiste en conseguir la máxima velocidad, sino que el triunfo final depende de tácticas de carrera. En muchas etapas se superan las 5 horas encima de la bicicleta, de modo que ha de ser prioritaria la

comodidad frente a cualquier otra consideración. Pero que no sea una prioridad, no implica que la eficacia aerodinámica no reporte beneficios en pruebas en ruta. Se detallan a continuación algunos ejemplos de cómo estudios y ensayos en túneles aerodinámicos también pueden dar buenos frutos en este tipo de pruebas.

Pruebas en línea. Quizás el primero en introducir los túneles aerodinámicos como un elemento más de entrenamiento fue el equipo Renault en 1979 (disponían de las instalaciones necesarias, utilizadas para ensayos con los vehículos de la marca), y en particular su jefe de filas, B. Hinault. Como asesor técnico tenían a M. Mémarll, que venía de realizar ensayos en túneles con el equipo olímpico de esquí, introduciendo como gran innovación la *postura de huevo*. Pero el gran triunfo del proyecto no estuvo sólo en la bicicleta Profil, sino en la optimización en la posición sobre la bicicleta desde el punto de vista ergonómico y aerodinámico al conseguir la postura "Renault", que según detalla Genzling, C. (1984) consiste en una mayor inclinación sobre la bicicleta, colocación más retrasada sobre el sillín y la tija del manillar más baja. B. Hinault mantuvo siempre esta postura (excepto cuando los problemas de su rodilla se lo impedían), pues los resultados de pruebas realizadas le daban una mejora de 2 segundos por kilómetro. Pero se vuelve al criterio integrador, lo que realmente mejoraba los tiempos era la bicicleta más la posición sobre la misma. El gran problema eran los posibles vientos laterales, pero M. Mémarll demostró mediante ensayos que incluso bajo velocidades del aire con ángulos laterales de 70° se mantenía una mejora similar a la obtenida con viento en calma.

Descensos. Es el mismo caso que el anterior, pero aquí se debe a la elevada velocidad a la que se realizan (superando los 100 km/h). En entrenamientos en túnel que reproduzcan esas velocidades se puede enseñar al corredor en qué postura puede disminuir la resistencia y de este modo aprovechar al máximo la acción de la gravedad en sentido del avance provocada por la pendiente de la carretera. Teniendo en cuenta que en muchos casos en los descensos se rueda en solitario o en pequeños grupos por ser posterior a la coronación de un puerto, y en estas condiciones el aprovechamiento de la técnica aerodinámica resulta decisivo. En la mente de todos se halla la Vuelta ciclista del año 1989 que P. Delgado estuvo a punto de perder de manos de F. Parra en la sierra de Madrid. La mejor técnica de P. Delgado le permitió recuperar el tiempo que el colombiano le había sacado en la subida. Más cercana la vuelta que T. Rominguer sentenció frente a A. Zülle en un descenso.

Ahorro energético en grandes vueltas. Cuando se circula a velocidades medias de 45 km/h durante 22 días, conseguir pequeños ahorros energéticos día a día pueden significar una victoria de etapa o una buena clasificación final. Iluso sería pensar que con las incidencias que se producen durante toda la prueba este pequeño ahorro puede significar el triunfo final.

Ensayos en los túneles de Renault por parte de M. Mermarll sobre pequeños grupos (los grandes grupos no resultan tan interesantes pues es sabido que en el seno de los mismos el corredor apenas ha de realizar trabajo) establecieron como mejor configuración dos, uno, dos, uno..., terminando en uno. De este modo se consigue un ahorro del 20% de la energía colectiva del grupo. Cuando se rueda en fila la peor posición es la primera, le sigue la última, empezando a empeorar a partir de la séptima. Estos resultados se pueden aprovechar para pruebas contrareloj por equipos para posicionar a los corredores en función de las características de cada uno así como en las escapadas en grupo para intentar mantener posiciones óptimas el mayor tiempo posible (quizás contra la ética deportiva pero que puede llevar al triunfo, que es en lo que se basan las carreras profesionales).

Abanicos. Si hay una especialidad de las pruebas en ruta en las cuales la aerodinámica tiene un papel destacado es en la formación de abanicos cuando el aire incide sobre los corredores con una componente lateral. Cuando un equipo domina este tipo de situaciones, como lo ha estado haciendo en los últimos años el equipo ciclista ONCE, la justificación no viene de la mano de la casualidad, sino de un conocimiento riguroso de la aerodinámica del fenómeno, y del entrenamiento necesario para que los corredores se adapten a posturas y posiciones de forma instintiva. Cuando una etapa en las que se producen abanicos puede definir una gran vuelta, quedan plenamente justificados los estudios y ensayos aerodinámicos.

Pruebas contrarreloj. Pero si hay una prueba en ruta en la cual nunca se ha puesto en duda la rentabilidad de los estudios y ensayos aerodinámicos, es la contrarreloj. En gran parte se debe, como ya se ha comentado, por ser la que más similitudes presenta con las de pista. De hecho todos los corredores que se han pasado de las pistas a la carretera lo han hecho sobresaliendo en esta especialidad (C. Boardman, A. Olano, F. Moser), del mismo modo que los corredores de carretera que han intentado pruebas en pista son aquellos que han dominado en las contrarrelojes (M. Indurain, T. Rominguer, B. Hinault, L. Fignon, J. Anquetil, E. Merckx).

Las innovaciones aerodinámicas en ruta, ruedas de 16 radios y de bastones, radios ovalados, llantas aerodinámicas, tubos ovalados... desarrolladas por Greenwell, D.I., Wood, N. J., Bridge, E. K. L. y Addy, R. S. (1995) y Kyle, C. (1975, 1979, 1990, 1991, a, b) han venido siempre precedidas de su utilización en las pruebas contrarreloj y poco a poco se han introducido en todas las pruebas. Prácticamente ningún equipo que aspire a una gran prueba deja de realizar ensayos en túneles aerodinámicos en aras a arañar esos segundos que pueden dar sino la victoria final si la de la etapa (¿compensará el triunfo en la contrarreloj del Tour de 1997 en París de A. Olano el coste en tiempo y dinero de los estudios realizados?). Sólo una mirada a los modelos de contrarreloj utilizadas en los últimos Tours ponen de manifiesto el esfuerzo tecnológico dedicado a mejorar la aerodinámica del conjunto. Pero esta utilización no es algo nuevo, toda bicicleta desarrollada para pruebas de pista como el récord de la hora pasan inmediatamente a las contrarrelojes en línea. En el año 1984 se dio en carretera un gran duelo entre dos grandes corredores con bicicletas diseñadas para el récord de la hora, L. Fignon con su Delta (sucesora de la Veló de Hinault) y F. Moser con su bicicleta de ruedas lenticulares. Pero los primeros kilómetros de las pruebas que los enfrentaban ya se habían corrido antes de empezar a contar el cronómetro, en los túneles aerodinámicos de Régie Renault y Pinin Farina respectivamente.

Los más innovadores en cuestiones tecnológicas siempre se están moviendo en el filo de la navaja de la legalidad establecida por la UCI al respecto. M. Sainz (director deportivo del equipo ONCE) ya ha sufrido por dos años consecutivos la no aceptación de reformas aerodinámicas por considerarlas carenados aerodinámicos adicionales.

Llevar a la práctica la idea de la integración y tener en cuenta todos los factores parece que se salga de las posibilidades de los responsables de equipos. Una forma de hacerlo viable sería la utilización de túneles aerodinámicos. Aunque parece que esto sólo está a la altura de las grandes figuras, con las instalaciones precisas se podría conseguir un elemento para el entrenamiento de equipos completos, de modo que los corredores pudiesen ir asimilando la idea de que adoptar posturas óptimas les puede ayudar no sólo a ganar carreras, sino a terminar etapas más enteras, a realizar descensos más rápidos y seguros, pero no con posturas de libro o de intuición, sino como resultado de estudios científicos debidamente contrastados con ensayos en túneles.

4.5.3 Realización de ensayos

La búsqueda de máquinas, equipos y técnicas que reduzcan la resistencia aerodinámica no es factible utilizando sólo conocimientos teóricos en las materias involucradas y una mesa de diseño, se precisa la realización de ensayos que corroboren los estudios teóricos. A continuación se detallan las técnicas de ensayo empleadas. Aunque se realicen ensayos de elementos por separado para conseguir una mejora aerodinámica, siempre se ha de tener presente que ha de estar integrado en el conjunto y es así como debe de ser eficiente.

Medida del consumo de O_2 . Un método para evaluar la energía que emplea un deportista en una prueba es mediante la medida del volumen de O_2 que consume. El equipo básico para realizar el ensayo consiste en un tubo que se adapta al corredor mediante una mascarilla y que se conecta a una máquina para medida de gasto volumétrico. Durante el ensayo se recogen los datos en un ordenador que posteriormente son tratados y permiten realizar una estimación de la energía consumida por el ciclista.

En ensayos al aire libre, como los realizados por Hagberg, J. M. y McCole, S. D. (1988), el equipo se monta sobre un vehículo que sigue al ciclista para interferir lo menos posible sobre el resultado. Igual cuidado se ha de tener con el tubo que se coloca al ciclista. En este tipo de ensayos se simula prácticamente las mismas condiciones que una prueba real, pero resulta muy costoso al tener que transportar todo el equipo. La viabilidad de cada ensayo está condicionada a las condiciones medioambientales, además se precisan de carreteras sin tráfico, y no se disponen de datos en tiempo real. Las condiciones del ensayo no se pueden modificar, así la velocidad dependerá de la que pueda desarrollar el deportista. El problema de estos ensayos es que la posibilidad de repetición es prácticamente imposible.

Estas pruebas se pueden desarrollar en instalaciones con túneles aerodinámicos, la ventaja fundamental de esta técnica es que los ensayos se pueden realizar independientemente de las condiciones meteorológicas, de modo que la planificación no se trastoca. Para el ensayo se utiliza una cinta continua en el suelo de la cámara de ensayos del túnel. Midiendo la velocidad de la cinta, se ajusta la del aire en la cámara actuando sobre los ventiladores. Se pueden simular vientos de cara o de cola y variando la dirección del ciclista el efecto de vientos cruzados. El equipo no ha de ser desplazado, de modo que resulta mucho más económico que el anterior. La instalación permite que en ensayos biomecánicos las condiciones de transpiración y evaporación que afectan sobre la temperatura corporal y sobre el rendimiento sean prácticamente las de competición.

Medida de la resistencia del aire en túneles aerodinámicos. La aplicación de túneles aerodinámicos en la industria aeronáutica necesita de la utilización de modelos a escala, pero en el caso de ensayos deportivos debido, al tamaño y a las bajas velocidades que se alcanzan no es necesario recurrir al uso de modelos, salvo por motivos de comodidad y seguridad, pero siempre a escala real. Se consigue así un menor error en los resultados y una menor complejidad en el proceso de obtención de los mismos, sin necesidad de realizar una posterior manipulación para ajustar escalas y condiciones de semejanza.

Dado el estado del arte es posible, según Flanagan M.J. (1996), obtener los resultados con una precisión superior a 0.025 kg. incluyendo en este valor los errores de todos los elementos, tanto mecánicos como electrónicos que intervienen en el ensayo, así como las interferencias de los elementos de medida las propias paredes del túnel.

Otra ventaja que presenta este tipo de ensayos es la repetibilidad que se puede alcanzar, imposible de conseguir con ensayos exteriores, y que permite realizar estudios comparativos en los que realmente los resultados sólo reflejen los cambios debidos a las variaciones en los elementos en los que se esté interesado.

Para la obtención de la resistencia aerodinámica se utilizan fundamentalmente tres métodos de medida, mediante una balanza aerodinámica, determinando el campo de presiones en torno al elemento a ensayar y obtención de la resistencia mediante integración del mismo o determinando la variación de cantidad de movimiento de la corriente que circula por el túnel antes y después de superar el cuerpo a ensayar.

De forma continua y mediante alguno de los procedimientos enumerados se está obteniendo el valor de resistencia aerodinámica, de modo que se puede modificar constantemente la actitud del o de los ciclistas para maximizar su rendimiento aerodinámico, *al tener los resultados en tiempo real. El problema de este tipo de instalaciones es que raramente están diseñadas para ensayos deportivos, de modo que estos resultan muy costosos y se han de limitar a ultimar detalles y realizar pruebas finales. Pero un túnel para este tipo de ensayos con unas prestaciones muy inferiores a los aeronáuticos o automovilísticos resultaría mucho más económico, según González et al. (1997), permitiendo que los costes por hora de utilización y mantenimiento fuesen mucho más reducidos. Se podrían realizar todo tipo de ensayos, habituando a los deportistas a entrenar en ellos para que memorizaran las posturas adecuadas realizar reglajes en máquinas y equipos particulares así como para cada deportista. La grabación de las pruebas permitiría enseñar a los propios deportistas como deberían. Actualmente, sólo, pueden permitirse este tipo de usos, y de forma limitada, los deportistas de récord y los líderes de los equipos más importantes.*

La utilización de túneles de baja velocidad específicos para deportistas permite dotarlos de dimensiones con capacidad para realizar ensayos con varios deportistas a la vez, de modo que se puede estudiar las interferencias entre ellos, el efecto de estela en los corredores inmersos en un grupo. Se pueden estudiar técnicas de carrera y habitar a los ciclistas a adoptarlas en competición.

Aunque la mejor estrategia consiste en evaluar la eficiencia de los elementos integrados en el conjunto, en muchos casos y sobre todo durante la fase de desarrollo resulta más cómodo ensayar componentes aislados o conjuntos parciales, pues si el resultado es negativo, difícilmente cambiara de signo al integrarlos en el conjunto completo. El ensayo de componentes precisa de túneles mucho más pequeños que abaratan considerablemente el coste de los ensayos.

Visualización del campo fluido en túneles de aerodinámicos. La utilización de elementos que permitan visualizar el campo fluido normalmente sirve de complemento o apoyo de otras técnicas de ensayos. Con otras técnicas se puede determinar consumo energético o resistencia aerodinámica, con las de visualización se puede comprobar el porque de los resultados que se obtienen. Al tener un conocimiento claro del campo fluido entorno al ciclista o a los elementos del equipo se puede actuar en puntos concretos para eliminar los efectos negativos y potenciar los positivos.

Los resultados de los ensayos realizados por los especialistas en túneles y los resultados recogidos del desarrollo de las pruebas ciclistas de todas las modalidades revelan que en mayor o menor medida la aerodinámica resulta importante, en algunas de ellas incluso decisiva. La inversión en estudios aerodinámicos está plenamente justificado, y todo equipo que aspire a metas altas ha de introducirlos como una herramienta más de entrenamiento y evaluación. La economía y disponibilidad de las instalaciones disponibles conseguirá que la aceptación de esta realidad se generalice o quede sólo al alcance de unos pocos. España, una potencia ciclista de primer orden en pruebas en ruta, ha sido siempre muy reacia a la utilización de estos métodos. Quizá esta sea la causa de la poca relevancia de nuestros ciclistas en pista, donde la aerodinámica resulta decisiva. Pero la razón puede estar un tanto alejada del mundo del ciclismo. En España apenas se dispone de túneles aerodinámicos donde se puedan realizar ensayos, y los que hay resultan muy caros y poco accesibles porque en primer lugar han de cubrir las necesidades de las industrias que los han desarrollado.

Actualmente, como muestra el informe presentado por este grupo de trabajo bajo la dirección del profesor González, la construcción de un túnel limitado a ensayos deportivos no resultaría caro, pues las prestaciones de velocidad, que condicionan el coste del mismo, para estos temas son muy bajas y permite tan diversas aplicaciones dentro del deporte que sería amortizado en poco tiempo. Lo que no admite discusión es que el país o equipo deportivo que deje a un lado la tecnología difícilmente podrá obtener buenos resultados, y no por ello dejó de cumplir la máxima de la ética deportiva, pero añadiendo el término de optimización: "emplear el máximo esfuerzo de forma óptima para ir más alto, más lejos o más deprisa".

5. CONCLUSIONES

A lo largo del presente documento ha quedado patente la importancia de la aerodinámica en las más diversas disciplinas del deporte, desde el fútbol, deporte rey en nuestro país, hasta el ciclismo, pasando por varias especialidades de atletismo, el esquí o el cricket.

En los últimos años, la necesidad de superar marcas, cada vez por márgenes más estrechos, ha llevado a los distintos organismos deportivos a explotar técnicas cada vez más sofisticadas, entre las que encontramos los diversos estudios aerodinámicos mencionados y que han demostrado la necesidad de mantenerse a la altura del resto de los países, en cuanto a innovación tecnológica en dicho campo, para poder competir en el deporte de elite.

Aunque últimamente los avances en la informática son enormes, el estudio del movimiento del aire alrededor de un cuerpo mas o menos romo sigue siendo una disciplina tan compleja que hace que los estudios teóricos y numéricos sigan siendo inexactos e incompletos frente a la experimentación.

Por tanto, de una forma esquemática, las conclusiones a que se llega son las siguientes:

- La disminución y/o control de las fuerzas aerodinámicas contribuye de forma eficaz a la mejora de marcas en carreras y algunos saltos y lanzamientos; de igual manera influyen en la técnica de los deportes de pelota.

—Para conseguir un mejor conocimiento y aprovechamiento de esos efectos el túnel aerodinámico es la herramienta más eficaz, ya que permite simulaciones en todos los rangos de actuación y en condiciones de control total.

—Además, el túnel aerodinámico permita la simulación de la práctica totalidad de las variables que influyen en carreras de forma simultánea y real, siendo por tanto un instrumento muy eficaz para el entrenamiento y la mejora de la técnica.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores queremos expresar nuestro agradecimiento, en primer lugar, al Consejo Superior de Deportes, en particular al Centro Nacional de Investigación y Ciencias del Deporte y a su Director, por el soporte prestado al desarrollo de las actividades que han hecho posible la realización de este trabajo y, además, por la confianza que mantienen en el desarrollo futuro del proyecto. También agradecemos a las bibliotecas del Consejo Superior de Deportes y la ETSI Aeronáuticos la paciencia que han tenido con nosotros, y las facilidades que nos han dado para el acceso a sus fondos. Por último, nuestro más sincero agradecimiento a Rafael Palacios, David Lázaro y Juan Carlos Cabrejas por su ayuda y los ánimos que nos han dado.

7. BIBLIOGRAFÍA

- BARTLETT, R. M. y BEST, R. J., "Aerodynamic characteristics of new-rule javelins". *Biomechanics in Sport*, 33-40. Londres, Institution of mechanical engineers. 1988.
- BARTLETT, R. M. y BEST, R. J., "The biomechanics of javelin throw: A review". *Journal of Sports Science*, 6, 1-38. 1988.
- BARTLETT, R. M., "The biomechanics of the discus throw: A review". *Journal of Sports Science*, 10,467- . 1992
- BRIGGS L., "Effect of spin and speed on the lateral deflection of a baseball; and the Magnus effect for smooth spheres". *American Journal of Physics*, 27, 589-596, 1959.
- BURKE, E. R., " Science of cycling". 1986.
- BURKE, E. R., "High Tech Cycling". 1996.
- DAL MONTE, A. Et. Al., "New bicycle design based on biomechanics and advanced Technology". *International Journal of sports biomechanics*, 3, 287-292. 1987.
- DAPENA, J. y FELTNER, M. E. "Effects of wind and altitude on the times of 100-meter sprint races". *International Journal of Sports Biomechanics*, 3, 6-39. 1987.
- FLANAGAN, M. J., "Considerations for data quality and uncertainty in testing of bicycle aerodynamics". *Cycling Science*. Fall 1996.
- GANSLÉN, R. V. "Aerodynamic and mechanical forces in discus flight". *Athletic Journal*, 44, 50, 52, 68, 88, 90. 1964.
- GANSLÉN, R. V., "Javelin Aerodynamics". *Track Technique*, 30, 940-946. 1967.
- GENZLING, C., " Bernard Hinault: la bonne position". *Miroir du cyclisme*. Diciembre 1984.
- GENZLING, C., "La légende continue". *Miroir du cyclisme*. 1982.
- GONZÁLEZ, M. A. et. al., "Túnel aerodinámico para el entrenamiento de deportistas de élite. Selección de la configuración", Informe para el CSD, Madrid Junio 1997.
- GORLIN, S.M., MASEIEV, V.A., ZIRYANOV, V.A., REMIZOV, L.P., "Head Resistance Of Alpine Skiers". *Theory And Practice Of Physical Culture*, 2, Pp. 65-66. 1972.

- GREENWELL, D. I. et al., "Aerodynamic characteristics of low-drag bicycle wheels". *Aeronautical Journal*, marzo, 109-120. 1995.
- HAGBERG, T. M. y MCCOLE, S. D., "The effect of drafting and aerodynamic equipment on energy expenditure during cycling". *Cycling Science*, 2(3), 20. 1988.
- HALSEY, C.H. And NEWMAN, J.N., "The study of sailing yachts". *The physics of sports*, 1966.
- HOCHMUTH., "Biomecánica de los movimientos deportivos". Doncel, Madrid. 1973
- HUBBARD, M. y BERGMAN, C. D., "Effect of vibration on javelin lift and drag". *International Journal of Sports Biomechanics*, 5, 40-59. 1989.
- HUBBARD, M. y RUST, H. J., "Simulation of javelin flight using experimental aerodynamic data". *Journal of Biomechanics*, 17, 769-776. 1984
- JACOBS, R., MATHY, T. y VAN DEN BREMT, H., "Análisis del record de la hora de Moser". *Dossier Records*. Noviembre 1984.
- JIN, H., SHIZIMU, S., WATANUKI, T., KUBOTA, H., KOBAYASHI, K., "Desirable Gliding Styles And Techniques In Ski Jumping". *Journal Of Applied Biomechanics*, 11, Pp. 460 - 474. 1995
- JÓDAR, X. A., "Eficiencia y técnica deportiva. Análisis del movimiento humano". Barcelona, Inde. 1993.
- KYLE, C. R. y Caiozzo, V. J., "The effect of athletic clothing aerodynamics upon running speed". *Medicine and Science in Sports*. Abril 1986
- KYLE, C. R., "Las Ruedas Aerodinámicas". *Bicycling*, 121-124. Diciembre 1985.
- KYLE, C. R., "How accessories affect bicycle speed". *Engineering Report 75-1*, California State University, Long Beach 1975.
- KYLE, C. R., "Mechanical factors affecting the speed of a cycle". *Science of cycling*. 1986.
- KYLE, C. R., "New aero wheel tests". *Cycling Science*, 3, 27-30. 1991(a).
- KYLE, C. R.; "Reduction of wind resistance and power output of racing cyclist and runners travelling in groups". *Ergonomics*, 22, 387-397. 1979.
- KYLE, C. R., "The aerodynamics of handlebars and helmets". *Cycling Science*, 1, 22-25. 1989.
- KYLE, C. R., "Wind tunnel test of bicycle wheels and helmets". *Cycling Science*, 2, 27-30. 1990.
- KYLE, C. R., "Wind tunnel tests of aero bicycles". *Cycling Science*, 3, 57-60. 1991(b).
- LINTHORNE, N. P., "The effect of wind on 100-m. sprint times". *Journal of Applied Biomechanics*. Human Kinetics Publishers, Inc. 1994.
- LOMBARDI, G. And TONELLI, A., "Experimental pressure evaluation near a sail leading edge under real conditions". *Aeronautical Journal*, 1994.
- LUETHI, S.M., DENOTH, J., "The Influence Of Aerodynamic And Antropometric Factors On Speed In Skiing". *International Journal Of Sport Biomechanics*, 3, Pp. 345 - 352. 1987
- MCCOLE, S. D. et al., "Energy expenditure during bicycling". *Journal of applied Physiology*, 68, 748-753. 1990.
- MCDUGALL, S. y WILSON, T. T., "La bicicleta clásica es todavía la mejor". *Pronews*, 14-15. Noviembre 1982.
- MEHTA, R.D. & WOOD, D.H., "Aerodynamics of the cricket ball". *New Scientist*, 87, 442-447, 1980.
- MEHTA, R.D., "Aerodynamics of sport balls". *Annual review of fluid mechanics*, 17, 151-189, 1985.
- MÜLLER, W., PLATZER, D., SCHRÖTZER., "Scientific Approach to Ski Safety". *Nature*, 375, p. 455. 1995.

- STEPANEK, A., "The aerodynamics of tennis balls. The topspin lob". *The physics of sports*, Vol 1, Villanova University, American Institute of Physics, 1987.
- SYSSOEV, M. V., "Coeficientes, resistencia y aerodinámica en rueda normal y de disco". Instituto de Mecánica de la Universidad Estatal de Moscú.
- WARANABE, K., OHTSUKI, T., "Postural Changes And Aerodynamic Forces In Alpine Skiing". *Ergonomics*, 20, 2, Pp. 121-131. 1977.
- WARD-SMITH, A.J., CLEMENTS, D., "Experimental Determination Of The Aerodynamic Characteristics Of Ski-Jumpers", *Aeronautical Journal*, Pp. 384-391. Dec. 1982
- WATANABE, K., "Aerodynamic Investigation Of Arm Position During The Flight Phase In Ski Jumping". International Series on Biomechanics, vol 4B. Biomechanics. VIII B. Proceedings of the Eight International Congress of Biomechanics. Nagoya, Japón. Human Kinetics Publishers, Champaign, Illinois, pp. 856-860.
- WATTS, R.G. Et SAWYER, E., "Aerodynamics of a knuckleball". *American Journal of Physics*, 1975.

BIOFOOT-IBV. UNA TÉCNICA DE REGISTRO Y ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES PLANTARES APLICABLE A LA MEJORA DEL RENDIMIENTO DEPORTIVO

BIOFOOT-IBV. A TECHNIQUE FOR RECORDING
AND ANALYSING THE DISTRIBUTION OF PLANTAR
PRESSURES AS APPLICABLE TO IMPROVING
SPORTS PERFORMANCE

*Martínez, A.
Hoyos, J.V.
Brizuela, G.
Ferrús, E.
González, J.C*

Dirección para correspondencia:
Instituto de Biomecánica de Valencia
Parque Tecnológico de Valencia, s/n
Apartado de Correos, 199
46980 Paterna (Valencia)
SPAIN
Tel. 96 136 60 32
Fax: 96 136 60 33
E-mail: ibv@ibv.upv.es



Antonio Martínez Marhuenda: Licenciado en Educación Física –Universidad de Valencia–. Grupo de Biomecánica Deportiva del IBV.



Juan Víctor Hoyos: Director de laboratorios del Instituto de Biomecánica de Valencia (IBV). Profesor titular de la Universidad Politécnica de Valencia.



Gabriel Brizuela: Doctor en Ciencias de la Actividad Física y el Deporte. Profesor de Biomecánica en la Facultad de Ciencias de la Actividad Física y el Deporte de la Universidad de Valencia.



Elena Ferrús: Ingeniero técnico electrónico por la Universidad Politécnica de Valencia. Grupo de Biomecánica Deportiva del IBV.



Juan Carlos González: Ingeniero eléctrico por la Universidad Politécnica de Valencia. Grupo de Biomecánica Deportiva del IBV.

Resumen: El registro y posterior análisis de las presiones que soporta la planta del pie en el interior del calzado durante el desarrollo de actividades humanas ha constituido una constante preocupación para numerosos profesionales del ámbito médico y deportivo.

El IBV ha desarrollado un equipo para el registro y análisis de las presiones plantares conocido como Biofoot/IBV, especialmente indicado para el diagnóstico de las patologías del pie y cuya aplicación al ámbito deportivo abre un gran número de posibilidades desde perspectivas tales como la prevención de lesiones y la mejora del rendimiento deportivo.

En lo que sigue se describen las características de este sistema de plantillas instrumentadas, así como un ejemplo de su aplicación deportiva. En este caso, se trata de un estudio de las presiones plantares durante la carrera de distintos sujetos sobre hierba natural calzando diferentes modelos de botas de fútbol con variaciones en la configuración de los tacos.

Palabras Clave: Plantillas instrumentadas, presiones plantares, biomecánica, deporte, fútbol.

Abstract: The recording and later analysis of the pressures borne by the sole of the foot inside footwear during the performance of human activities has been a constant research topic for many professionals in the sports and medical fields.

The IBV has developed a device for recording and analysing plantar pressures known as the Biofoot-IBV, which is specially intended for the diagnosis of foot pathologies, and which can be applied to the field of sports practice, thus providing numerous possibilities for diverse applications such as the prevention of injuries or the improvement of sports performance.

This paper describes the characteristics of this instrumented insole system as well as an example of its application in sports. In this case, it is a study of plantar pressures during running with different subjects on a natural turf field and wearing different models of football boots with variations in the stud configuration.

Key words: Instrumented insoles, plantar pressures, biomechanics, sports, football.

1. INTRODUCCIÓN

La práctica deportiva en todas sus manifestaciones y en especial las orientadas a la consecución del máximo rendimiento, viene mostrando una vertiginosa evolución de los medios para su desarrollo; nuevas técnicas de entrenamiento, evolución de las tecnologías de apoyo a éste, mejora de los materiales y equipos necesarios para su práctica, etc..

La popularidad alcanzada por algunos deportes como la carrera urbana, el baloncesto, el tenis o el fútbol sala y la incesante incorporación de deportistas de todas las edades y condiciones a la práctica de estos deportes, ha provocado que el número de lesiones asociadas se haya incrementado de forma considerable. Durante la realización de los movimientos deportivos el pie es el encargado de transmitir al cuerpo del deportista, las cargas que se generan en la interacción con el suelo. La velocidad con la que se realizan los desplazamientos de la masa corporal provoca que las cargas mecánicas transmitidas al cuerpo sean muy elevadas y, dependiendo de su magnitud, frecuencia y punto de aplicación, estas cargas pueden provocar lesiones de muy diversa consideración sobre los huesos, las articulaciones, los ligamentos y músculos, elementos que integran la cadena esquelética del pie y de la pierna.

El IBV viene realizando un seguimiento epidemiológico para determinar la frecuencia relativa de lesiones en distintos deportes como la carrera urbana (Ferrandis et al, 1991; Ferrandis et al, 1992), el baloncesto, el balonmano y el voleibol (IBV, 1994). , estudios que han demostrado que la localización del tipo de lesiones depende fuertemente del tipo de práctica deportiva.

Otros estudios epidemiológicos indican que el fútbol ocupa el primer lugar en cuanto a lesiones deportivas (Ydes, 1990; Hoff et al 1986; Masson 1989). Respecto a la localización de las lesiones, en el fútbol de igual forma a como sucede en otros deportes, como el baloncesto, el voleibol y la carrera de fondo, predominan las lesiones del miembro inferior con una proporción del 83% frente a un 7'8% de lesiones del miembro superior (Chan 1993). En cuanto a las lesiones del pie más habituales en el fútbol según Daum (1990) son: la bursitis retroaquilea y preaquilea, el dolor del talón, la miositis plantar, las lesiones cutaneas en la parte dorsal del pie y las degeneraciones articulares mediotarsianas. Otros autores (Saggini, 1993) citan el dolor de talón como una patología frecuente que aparece en su borde medial. Otras lesiones sufridas son las flictenas, las uñas incarnadas, los hematomas subungueales, las fracturas de dedos y la artrosis metatarsofalángicas del primer dedo. Estas circunstancias provocan la necesidad de un nuevo cambio en la estrategia a seguir por entrenadores y deportistas, en el sentido de elegir calzado que, además de optimizar el rendimiento deportivo prevenga, en la medida de lo posible, las lesiones.

Los principales requisitos que debe satisfacer todo calzado son básicamente dos, proteger al pie y complementarlo en sus funciones. Es en el ámbito del calzado deportivo donde estas funciones adquieren una especial relevancia. Tanto es así, que sin su contribución el deporte sería diferente a como hoy en día se concibe. La rapidez con la que se desarrolla el juego sobre las modernas superficies para la práctica del tenis, la consecución de los records en el atletismo y la incesante aparición de nuevas modalidades deportivas deben gran parte de sus avances a la constante tecnificación del calzado deportivo.

Para un correcto diseño del calzado deportivo se hace necesario el estudio biomecánico previo y aislado de gestos básicos. Dichos estudios deben orientarse a establecer los rangos del movimiento, el estado de sollicitaciones o cargas mecánicas que asocian dichos movimientos y su relación con las lesiones y con el rendimiento deportivo. En base a esta información y a la frecuencia relativa con la que los gestos se repiten durante la práctica de los diferentes deportes pueden establecerse los requisitos básicos que deben satisfacer los diferentes calzados deportivos.

El pie es esencial para la locomoción humana y se adapta constantemente para facilitar un acoplamiento compatible entre el cuerpo y el medio, contribuyendo a un movimiento efectivo. Los avances en los métodos biomecánicos para el análisis dinámico han propiciado una descripción más precisa de la función del pie durante el movimiento y, especialmente, durante la deambulación (Rodgers, 1993).

El registro y el análisis de las presiones en la planta del pie puede aportar información importante para determinar si la aplicación de las fuerzas en una determinada técnica deportiva, se está realizando correctamente, además puede ayudarnos a diagnosticar o prevenir patologías que pudieran condicionar el normal desarrollo de la actividad deportiva.

Son diversas las técnicas de estudio de las presiones plantares durante la marcha o en posición estática:

- Técnicas cualitativas, que se basan en un estudio visual de la interacción del pie con el suelo, y dependen del criterio subjetivo del examinador.
- Técnicas basadas en el análisis de imágenes y que suponen, por tanto, un avance en tanto en cuanto objetivan las impresiones visuales.
- Técnicas cuantitativas, que transforman mediante transductores electro-magnéticos la presión en una magnitud eléctrica cuantificable.

Los podómetros y las plantillas instrumentadas pertenecen, junto con las plataformas dinamométricas tipo Dinascan/IBV, a las técnicas cuantitativas de más versatilidad en el análisis cinético. Están basados en el empleo de transductores electrónicos que convierten fuerza o presión en las interfases pie-suelo (podómetro) y pie-calzado (plantillas) en una señal eléctrica mediante una cadena de acondicionamiento y registro de la señal (figura 1), obteniendo de este modo la distribución cuantitativa de las presiones plantares.

Biofoot/IBV es un avanzado sistema de plantillas instrumentadas diseñadas para medir y analizar las presiones en la planta del pie, en las condiciones en las que éste se desenvuelve habitualmente, es decir, calzado y en movimiento.

Esta técnica responde a la demanda de tecnificación solicitada por entrenadores, fisioterapeutas y médicos del deporte en el sentido de mejorar o adaptar las prestaciones del calzado utilizado por los deportistas, así como la posibilidad de disponer de un equipo para facilitar el análisis de la técnica deportiva de sus atletas.

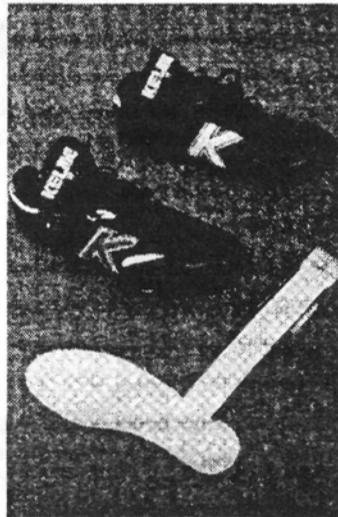
El presente trabajo muestra las características de este equipo de registro y análisis de presiones en la planta del pie. Se presenta además un ejemplo de aplicación en el deporte y se hace referencia a las posibles líneas de mejora del rendimiento deportivo a las que esta técnica puede contribuir.

2. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO BIOFOOT/IBV

Este equipo consta de los siguientes componentes:

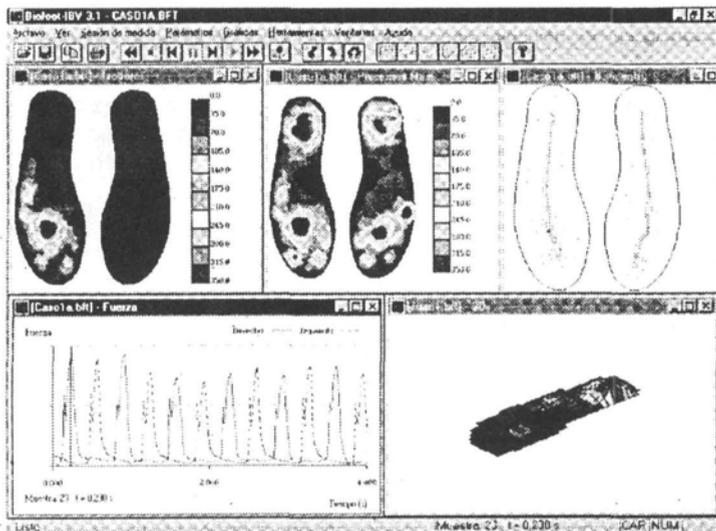
- Un juego de 4 plantillas (a seleccionar entre los números y formas disponibles). Cada plantilla aloja hasta un total de 64 cerámicas piezoeléctricas de reducido tamaño, distribuidas selectivamente de manera que se concentren en zonas de interés. La salida de las señales se realiza por una extensión en el lado externo que acaba en una matriz de conexión en la que se abrocha un conector de pequeño tamaño y reducido peso que se sujeta a la pierna mediante un cierre tipo velcro.
- Un equipo electrónico de acondicionamiento de señales (amplificadores de carga) y multiplexado integrado en el conector.
- Una tarjeta de adquisición, que se inserta en un ordenador personal, donde la señal es amplificada y convertida al dominio digital.
- Una aplicación informática que instalada en el ordenador permite el registro y tratamiento de los datos.

Para utilizar Biofoot/IBV se introduce una plantilla de la talla adecuada en el zapato, se conecta al equipo de medida y, de forma interactiva, utilizando un ordenador con la aplicación instalada, se realizan las mediciones, se visualizan datos en forma de mapas de presiones con diferentes formatos, gráficas o parámetros y se analizan resultados.



Biofoot/IBV se distingue por las siguientes características:

- Mínima perturbación durante el uso debido a la flexibilidad y pequeño espesor de las plantillas (0,7 mm).
- Plantillas con soporte de poliéster de gran tenacidad que permiten su uso continuado en cientos de mediciones sin degradarse.

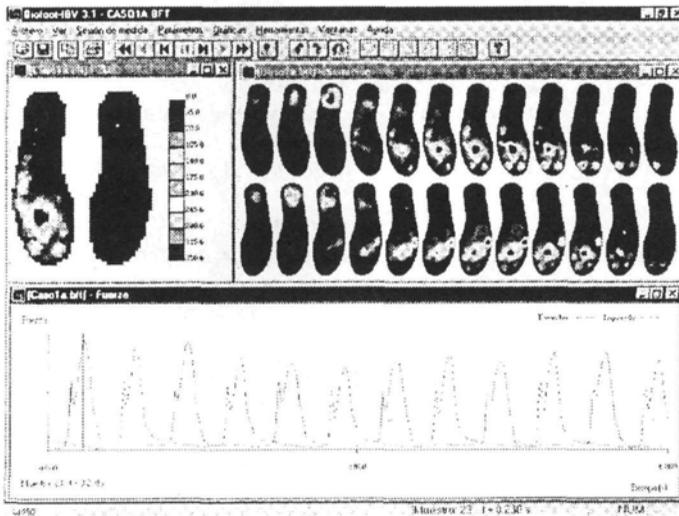


- Sensores robustos de comportamiento inalterable lo que permite incluso su reciclado cuando la plantilla debe sustituirse por rotura o desgaste del soporte. Hasta 64 cerámicas piezoeléctricas (según talla) de 0,5 mm de espesor y 5 mm de diámetro.
- La alta linealidad y repetibilidad de la medida, debidas a la utilización de sensores basados en efecto piezoeléctrico, hace viable la comparación de resultados entre sujetos, en diferentes condiciones o seguir su evolución en el tiempo, con garantías de que los datos obtenidos son fiables, reproducibles y comparables.
- La excelente respuesta dinámica y la posibilidad de utilizar elevadas frecuencias de muestreo (hasta 500 Hz) permite el análisis de fenómenos transitorios y locales de gran rapidez (incluso en carrera u otros gestos deportivos)
- Resolución del convertidor: 12 bits (1 kPa).
- Respuesta dinámica del sensor (ancho de banda): 0,5 Hz a 1 kHz.
- Posibilidad de sincronización con otros equipos de medida.

- Medición mono o bipodal.
- Inicio de medición mediante teclado o disparo por señal externa.
- Seguridad eléctrica: Aislamiento en alineación mediante convertidor DC/DC y señales optoacopladas. Cumplimiento de normas europeas de seguridad.
- La utilización de una aplicación informática para la adquisición, tratamiento y presentación de datos, en entorno Windows™ con las ventajas asociadas. Por ejemplo: interfaz gráfica de usuario estándar; utilidad de captura de gráficas e inclusión en otros documentos o bases de datos; gestión estándar de impresoras color o láser.

Biofoot/IBV proporciona un análisis detallado y exhaustivo de las presiones durante toda la secuencia de medida registrada permitiendo el avance manual o automático (animación) y la representación de la información en varios formatos:

- Mapa bidimensional con escala de colores.
- Mapa tridimensional.
- Gráfica Área de apoyo/Tiempo.
- Mapa de isobaras.
- Mapa numérico de presiones.
- Mapa numérico de presiones máximas.
- Gráfica de Fuerza total/Tiempo.



- Gráfica de Presiones/Tiempo.
- Posición y trayectoria del baricentro.
- Mapa bidimensional con escala de colores de presiones máximas (envolvente).
- Seriación con representación simultánea de mapas de presiones durante todo el apoyo.
- Monitorización en tiempo real del mapa de presiones.
- Tabla de parámetros calculados por zonas (definibles por el usuario).

Es posible además la visualización simultánea de gráficas correspondientes a diferentes mediciones permitiendo su comparación directa en pantalla (así como su impresión).

3. APLICACIONES GENERALES DE BIOFOOT/IBV

Biofoot/IBV es la alternativa a los tradicionales sistemas ópticos de exploración del apoyo plantar. La posibilidad de que el captador se inserte en el interior del zapato permitiendo la medida del pie calzado y la obtención de datos numéricos precisos y fiables suponen un significativo avance y permiten múltiples aplicaciones siendo las más importantes las siguientes:

- Diagnóstico de patologías del pie.** Permite la detección de zonas de hiperpresión como, por ejemplo, las cabezas de los metatarsianos muy relacionadas con la aparición de metatarsalgias. Permite, así mismo, analizar las desviaciones respecto a la secuencia normal, de la trayectoria del centro de presiones.
- Diagnóstico de disfunciones.** En alteraciones como el pie cavo o plano permite el estudio dinámico del apoyo plantar, mediante la visualización y cuantificación de las zonas y presiones de apoyo real, con calzado y durante el movimiento.
- Evaluación de actuaciones terapéuticas.** Mediante el análisis comparativo del patrón de presiones previo y posterior a una intervención quirúrgica, no sólo del pie sino de cualquier alteración músculo-esquelética relacionada con la marcha, puede realizarse una evaluación de los resultados obtenidos. Así mismo es de utilidad para el seguimiento de los procesos de rehabilitación que afecten a la marcha.
- Herramienta auxiliar de diseño para la fabricación de ortesis plantares.** La comparación de la redistribución dinámica de presiones conseguida al incorporar una ortesis plantar permite evaluar y optimizar el diseño de la misma.
- Análisis y optimación del gesto deportivo.** Con Biofoot/IBV es posible, gracias a sus elevadas frecuencias de muestreo, el análisis del apoyo plantar en gestos deportivos rápidos permitiendo obtener conclusiones directamente aplicables al entrenamiento, a la evaluación de la técnica deportiva y al comportamiento del calzado deportivo y accesorios.

-**Diseño y evaluación de calzado.** La distribución plantar de presiones es un factor determinante de la comodidad del calzado. Biofoot/IBV es un instrumento de gran utilidad en la evaluación del diseño de todo tipo de calzado, que permite verificar la adecuación en uso, de los materiales seleccionados (de la suela y de la plantilla) y del diseño realizado (horma). Tiene especial interés la utilización de plantillas instrumentadas para evaluar el calzado con especificaciones más técnicas y concretas como por ejemplo el calzado deportivo, el calzado ortopédico o el calzado a medida.

-**Investigación del movimiento humano.** Biofoot/IBV es una de las herramientas básicas en cualquier laboratorio de biomecánica y análisis del movimiento humano, necesaria para la obtención de información de presiones plantares que se puede complementar con la que proporcionan otros equipos como las plataformas dinámicas o los equipos de análisis de movimiento.

4. APLICACIÓN DE BIOFOOT/IBV AL DESARROLLO DE UNA NUEVA BOTA DE FÚTBOL

En el desarrollo de la práctica deportiva el pie contacta con el suelo de formas variadas, contacto que puede producirse siguiendo un patrón concreto y repetido como es el caso de la carrera o alternando constantemente contactos de carrera con saltos, deslizamientos, giros y cambios de dirección, como sucede en el fútbol, donde las combinaciones entre estos gestos pueden llegar a ser infinitas.

Deportes como el fútbol, el rugby, el béisbol, el hockey o el golf, practicados generalmente en el exterior y sobre superficies naturales que suelen ser de tierra o de césped exigen del calzado unas características especiales en relación a su "agarre". El calzado normalmente utilizado en estos deportes incluye en su suela prominencias, generalmente tacos o clavos, unas veces fijos y otras veces recambiables, que favorecen el agarre al introducirse en el terreno y aumentar la fijación del calzado al suelo (Brizuela y cols., 1996; Masson y Hess, 1989; Rodano y cols., 1988; Valiant, 1990). Este aumento de la fijación al terreno supone una mejora del rendimiento debido a que el deportista puede aplicar mejor su fuerza sobre el terreno y conseguir movimientos y desplazamientos más eficientes, en términos de precisión o rapidez.

Desde una perspectiva biomecánica y considerando simultáneamente aspectos de rendimiento y aspectos de protección frente a lesiones, debido a las irregularidades de los campos naturales, a las diferencias entre distintos campos de juego y a los numerosos gestos que se realizan durante su práctica, el diseño de las suelas de las botas con tacos presenta carencias y deficiencias. Una de estas carencias está determinada por los puntos de colocación y las características de los tacos, lo que puede provocar la aparición de puntos de sobrepresión en la planta del pie coincidiendo con estructuras que en muchos casos sufren lesiones por sobrecarga durante la realización de gestos habituales y repetitivos como la carrera.

Con el objetivo de mejorar las prestaciones y la protección de los jugadores, manteniendo un alto nivel de confort, el IBV realizó un estudio para el cual diseñó un nuevo piso de poliuretano (PU) para botas de fútbol. Este nuevo diseño presentaba una específica distribución de los tacos sobre su suela basándose en la aplicación del análisis podométrico y biomecánico del miembro inferior y en los gestos más frecuentemente realizados durante la práctica del fútbol.

Diseño del prototipo

En colaboración con la empresa alicantina Kelme se confeccionó un prototipo con una suela de trece tacos (prototipo K) con el objetivo de optimizar tanto el rendimiento como la protección frente a lesiones. Para ello se siguieron los siguientes criterios:

- Aplicar las cargas sobre los puntos anatómicos preparados para soportarlos.
- Reducir las cargas sobre los puntos anatómicos más sensibles y menos preparados para soportarlas.
- Aumentar el rendimiento mediante un mejor agarre al terreno durante gestos como la carrera, el sprint de velocidad, las arrancadas y los cambios de dirección.
- Distribuir las presiones plantares evitando puntos de hiperpresión en puntos especialmente vulnerables a lesiones de fracturas por sobrecarga.
- Favorecer la flexión del calzado por zonas que coincidan con las zonas y ejes de flexión natural del pie.

Seguidamente se escogió un modelo de la gama alta del mercado de botas de fútbol con buena aceptación por parte de los usuarios, idénticos materiales de fabricación (piel de canguro y suela de PU) e igual número y medidas de sus tacos ("modelo A"). De manera que las diferencias entre ambos modelos se concretaban básicamente en la distribución de los tacos en la suela.

Estudio de la distribución de presiones

Para llevar a cabo el estudio de presiones plantares se seleccionó, en primer lugar, un gesto repetitivo y muy frecuente en el fútbol como es la carrera y se registraron las presiones plantares en el interior del calzado durante la realización del gesto. Se esperaba obtener unos registros de presiones con el prototipo K en los que las mayores presiones se localizasen sobre los puntos anatómicos mejor preparados para soportarlas, lo que sin duda reduciría el riesgo de lesiones producidas por exceso de presión en lugares anatómicamente débiles y posibilitaría un incremento de las fuerzas realizadas sobre el terreno.

El ensayo se llevó a cabo sobre la superficie de un campo de fútbol de césped natural, delimitando la zona de carrera y fijando una velocidad que permitiese una carrera de talón-planta repetitiva.

Un total de 5 sujetos participaron en el estudio, cada uno de ellos realizó un total de 3 carreras, adquiriendo de cada carrera la información de tres apoyos, con cada uno de los dos modelos de botas en forma aleatoria. De este modo se almacenaron y trataron un total de 225 registros de presiones plantares.

Cada sujeto llevaba colocada una plantilla instrumentada (Biofoot-IBV) en el interior del calzado, conectada a un ordenador para el almacenamiento de los datos en el mismo terreno de juego (figura 1). La frecuencia de muestreo de la señal se fijó en 100 Hz y los datos fueron almacenados para su posterior tratamiento.

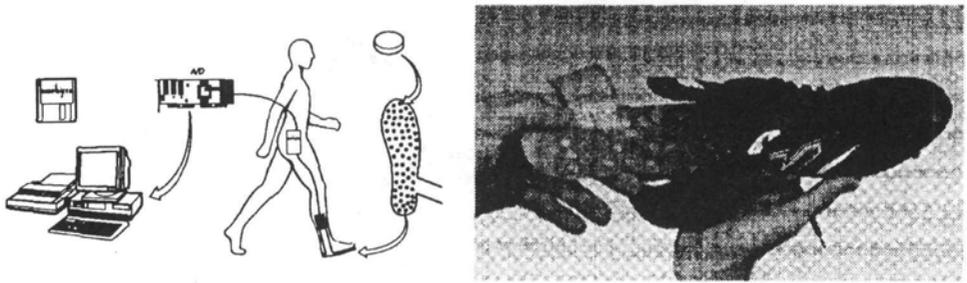


Figura 1: Esquema del funcionamiento del equipo de registro de las presiones plantares Biofoot-IBV.

Como se ha descrito con anterioridad, la plantilla Biofoot-IBV tiene 64 sensores piezoeléctricos distribuidos sobre su superficie. Todos los sensores obtienen su registro de presiones en forma simultánea y, para el tratamiento posterior, pueden formarse grupos de sensores que correspondan a zonas determinadas de la planta del pie. Como ejemplo, la presión media que sufre la cabeza del primer metatarsiano en un instante dado, se obtiene como la media de las presiones registradas en ese instante en un grupo de cuatro sensores localizados en esa zona.

Los datos almacenados fueron tratados de acuerdo al siguiente método:

- Se asignaron sensores de la plantilla a zonas de la planta del pie y se estudiaron las presiones máximas obtenidas para cada prototipo en cada zona plantar. El objetivo fue determinar como afectan las dos diferentes configuraciones de tacos a las presiones plantares en cada zona de la planta del pie.

El tratamiento estadístico de los registros incluyó un "Análisis de Varianza", para la variable "Presión máxima", según los factores de clasificación "zona", "bota" y "sujeto", en donde la variable zona corresponde a las zonas de la planta del pie. Se fijó un nivel de significación $\alpha=0.05$ y se realizó, además, un test de rango múltiple LSD.

5. RESULTADOS

Los resultados obtenidos permiten destacar lo siguiente (Figuras 2 y 3):

- Prototipo K:** Es el de mayor presión (Figura 2) en las zonas plantares 1, 9, 10 y 11. Su patrón de distribución (Figura 3) presenta las mayores presiones en la zona plantar 11, presiones medias-altas en la zona 2, 3, 8 y 9 y presiones medias en la zona 1.
- Modelo A:** Es el de mayor presión (Figura 2) en la zona plantar 4. Su patrón de distribución (Figura 3) presenta las mayores presiones en la zona plantar 8, presiones medias-altas en la zona 11 y presiones medias en las zonas 2, 3 y 9.

Representación de las zonas de la planta del pie en las que se incluyen indicadores del prototipo que obtuvo los valores máximos o mínimos de presión.



Figura 2: Comparación del nivel de presión por zonas plantares, entre los dos modelos.

Representación del patrón de distribución de las presiones plantares para cada modelo de bota. Las zonas marcadas representan zonas plantares. Además, en cada zona se incluye un indicador de color de acuerdo al nivel de presión registrado.

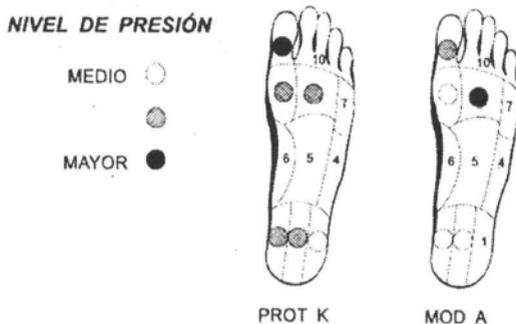


Figura 3: Esquema del patrón individual de distribución de las presiones para cada modelo.

6. CONCLUSIONES

En primer lugar debe destacarse que diferentes distribuciones de los tacos en la suela de la bota afectan en forma diferente a la distribución de las presiones en la planta del pie.

Los resultados más relevantes en cuanto al registro de presiones plantares obtenidas con el diseño de la nueva suela son los siguientes:

- El "modelo K" presenta mayores presiones en las zonas del primer dedo, del resto de dedos (mejora de la propulsión) y en la zona externa de la trasera, y las menores presiones en la zona central de las cabezas de los metatarsianos.

—Su patrón de distribución de las presiones muestra un equilibrio en las partes trasera y delantera, acentuando las presiones en la zona del primer dedo, aprovechando la mejor distribución de sus tacos y como se comprobó en los test de rendimiento, mejorando la tracción. Del mismo modo, observando el esquema de la distribución de presiones por zonas plantares, se detecta que este prototipo K responde en mejor grado que el modelo A a la dirección ideal que sigue el centro de presiones durante el apoyo del pie en carrera con zapatillas sin tacos, yendo de la parte posterior externa hacia la parte delantera interna.

Paralelamente, el rendimiento obtenido por el prototipo K fue óptimo en "Carrera con obstáculos", "Confort" y "Distribución de presiones" y alto en "Estabilidad". El patrón de distribución de presiones de este prototipo, al contrario que el modelo A, no acentúa las presiones sobre la zona central de la cabeza de los metatarsianos, zona especialmente problemática si se la somete a sobrepresiones, lo que beneficia al rendimiento deportivo al disminuir el riesgo de lesión en esta zona.

7. OTRAS APLICACIONES DE BIOFOOT-IBV AL ESTUDIO DEL GESTO DEPORTIVO

- En los lanzamientos de Atletismo las plantillas descubren como el atleta realiza los apoyos plantares, por ejemplo durante los giros del lanzamiento de disco, lo que aportará información importante para determinar como se aplican las fuerzas sobre el suelo y en que medida éstas pudieran modificarse para conseguir mejores resultados.
- En Gimnasia Artística permite realizar estudios de equilibrio a través de la observación de las presiones que los/as gimnastas realizan sobre el suelo o los aparatos.
- En deportes de fuerza como la Halterofilia las plantillas hacen posible la observación y análisis de presiones en el pie del deportista durante el ejercicio, lo cual permite el establecimiento de relaciones entre esa distribución de presiones y la actuación de la musculatura implicada concretándose como una posible ayuda en el diseño de calzado adecuado para esta especialidad.
- En Ciclismo, Fitness, y otras especialidades también las plantillas pueden contribuir a la mejora tanto de la técnica como del calzado y aparatos utilizados para su práctica.

En definitiva el equipo de plantillas instrumentadas Biofoot/IBV constituye un valioso método de análisis de presiones plantares en determinados gestos deportivos, lo que permite incidir tanto sobre la técnica deportiva definiendo las zonas de presión más eficaces para un mejor rendimiento, así como sobre los equipos y en especial sobre el diseño del calzado necesario para su práctica

Queremos agradecer a la empresa Kelme y a el IMPIVA (Instituto de la Mediana y Pequeña Industria Valenciana) por la financiación de este estudio, así como a la Facultad de Ciencias de la Actividad Física y el Deporte de la Universidad de Valencia por permitir la utilización de sus instalaciones deportivas de Chestre.

8. BIBLIOGRAFIA

- BRIZUELA, G.; FOS, V.; POLO, I.; LLANA, S. (1996) Estudio del agarre al terreno de diferentes tipos de botas de fútbol. *Selección*, 5 (4): 207-211.
- CHAN, K; YUAN, Y; LI, C.K; CHIEN, P; TSANG, G: Sport causing most injuries in Hong kong. *J. Sports Med.* 1993; 27(4): 207-211.
- DAUM, F (1990) La chaussure du footballeur; principes, physiologie, inconvénients. En F. Bonne; J. H. Jaeger & C.Mansat (Eds.) *Traumatologie et Biomécanique du Sport. Le Football*, Paris: Springer-Verlag France, 265-272.
- DUCKWORTH, T, BETTS, R.P; FRANKS, C.I y BURKE, J (1982) The measurement of pressures under the foot. *Foot Ankle* 3, 130-141.
- DUCKWORTH, T; BETTS, R.P; FRANKS, C.I Y BURKE, J. (1982). The measurement of pressures under the foot. *Foot ankle* 3, 130-141.
- HOFF, G.L; MARTIN, T.A. (1986) Outdoor and Indoor soccer: Injuries among youth players. *Am. J.Sports Med.* 8, 231-233.
- HOYOS, J.V; MONTERO, J; GARCÍA-BERENGUER, A.C; SOLER-GRACIA, C. (1996). Plantillas instrumentadas Biofoot-IBV. BIOMECÁNICA, cuadernos de información. Instituto de Biomecánica de Valencia. Julio 1996.
- LAMBSON, R.B.; BARNHILL, B.S.; HIGGINS, R.W. (1996) Football cleat design and its effect on anterior cruciate ligament injuries. *Am. J. Sports Med.* 24, 2: 155-159.
- MASSON, M.; HESS, H. (1989). Typical soccer injuries. Their effects on the design of the athletic shoe. In B. Segesser & W. Pförringer (Eds.) *The shoe in sport* (pp. 89-95). London: Wolfe Publishing, Ltd.
- RANU, H.S. (1986) Miniature load cell for the measurement of foot-ground reaction forces and centre of foot pressure during gait. *J.Biomed.Eng.* 8, 175-177.
- RITTLER, C (1988) Sensor application to the peripheral neurohathy of the foot. En *Tactile Sensors for Robotic and Medicine*, (Editado por Webster, J.G), John Wiley and Sons, Inc, New York, 281-298.
- RODANO, R; COVA, P. VIGANO, R: Designing of a football boot: A theoretical and experimental approach. In T. Reilly, A. Lees, K. Davids & W.J. Murphy (Eds.) *Science and Football I* (pp. 416-425). London: E & F.N. Spon 1988.
- RODGERS, M.M. (1993) Biomechanics of the foot during locomotion. En *Current Issues in Biomechanics*, (Editado por Grabiner, M.D.), Human Kinetics Publishers, Champaign, 33-52.
- SAGGINI, R; CALLIGARIS, A; MONTANARI, G; TJOUROUDIS & VECCHIET, L (1993) Injuries to the foot in soccer player. En T. Reilly; J. Clarys & A. Stibbe (Eds) *Science and Football II*. London: E & FN Spon, 416-420.
- TORG, J.S.; STILWELL, G.; ROGERS, K. (1996) The effect of ambient temperature on the shoe-surface interface release coefficient. *Am. J. Sports Med.*, 24, 1: 79-82.
- VALIANT, G. A. (1990) *Traction characteristics of outsoles for use on artificial playing fields: Characteristics and safety features*. ASTM STP 1073, R. P. Smith, E. F. Hoerner, E. M. Milned, and C. A. Morhouse (Eds.). American Society for testing and Materials, pp. 61-68, Philadelphia, 1990.
- YDE, J. (1990) Sport injuries in adolescents' ball games: soccer, handball and basketball. *Br. J. Sports Med*, Vol 24 (1).

ANÁLISIS DE LA ADECUACIÓN BIOMECÁNICA Y DEPORTIVA DE UN CONJUNTO DE PAVIMENTOS

ANALYSIS OF THE BIOMECHANICAL AND SPORTS
SUITABILITY OF A VARIETY OF FLOOR SURFACES

*Durá, J.V.
Lozano, L.
Hoyos, J.V.*

Dirección para correspondencia:

Instituto de Biomecánica de Valencia
Parque Tecnológico de Valencia, s/n
Apartado de Correos, 199
46980 Paterna (Valencia)
SPAIN
Tel. 96 136 60 32
Fax: 96 136 60 33
E-mail: ibv@ibv.upv.es



Juan Vicente Durá Gil, Ingeniero Industrial y responsable de la Sección de Material y Equipamiento Deportivo del Instituto de Biomecánica de Valencia. Es coautor del libro *Los Pavimentos Deportivos en España (1996)* y secretario del comité de normalización español de pavimentos deportivos.



Luis Lozano Ferré, Ingeniero Técnico Industrial y técnico del Laboratorio de Material y Equipamiento Deportivo del Instituto de Biomecánica de Valencia. Ha participado en la creación de un Servicio de Asesoramiento de Pavimentos Deportivos.



Juan Victor Hoyos Fuentes, profesor del Departamento de Ingeniería Mecánica y Materiales de la Universidad Politécnica de Valencia y Director de Laboratorios del Instituto de Biomecánica de Valencia.

Resumen: La realización de este proyecto ha servido para realizar por primera vez en España una comprobación sistemática de las características de diferentes pavimentos deportivos mediante la realización de ensayos normativos. Los ensayos realizados se seleccionaron entre los diferentes existentes en la normativa europea buscando aquellos que más se adecuaban a la caracterización de la función deportiva y biomecánica de los pavimentos deportivos.

También se realizaron otra serie de medidas complementarias para determinar otras características que sirvieran para clasificar los materiales empleados en la construcción de los pavimentos deportivos, como la dureza y la rugosidad.

La selección de las instalaciones donde se han realizado los ensayos fue realizada por técnicos de la Dirección General de Infraestructuras del Consejo Superior de Deportes (CSD). Para ello se ha seguido el criterio de cubrir la diversidad de materiales y tipos de materiales que el CSD está instalando en la actualidad.

Gracias al trabajo realizado y a partir de la información obtenida por este proyecto los técnicos del CSD han generado un pliego prescripciones técnicas para pavimentos

Gracias al trabajo realizado y a partir de la información obtenida por este proyecto los técnicos del CSD han generado un pliego prescripciones técnicas para pavimentos deportivos que puede considerarse como el primer resultado práctico obtenido. Este documento ha sido distribuido entre los miembros del comité de normalización CTN41/SC1/GT3 de AENOR y está sirviendo como documento de referencia entre las empresas y profesionales del sector de los pavimentos deportivos.

Palabras clave: Biomecánica, pavimentos deportivos, normativa.

Abstract: This project has meant that for the first time in Spain a means has been devised for systematically checking the characteristics of different sports surfaces by means of normative tests. The normative tests were selected from among the different existing ones included in the European regulations, and chosen from those which were most adapted to the characterization of the sports and the biomechanical function of the sports surfaces.

Another series of complementary measures was also made to determine other characteristics which served to classify the material used in the construction of the sports surfaces, like hardness and ruggedness.

The selection of the facilities where the tests were carried out, was made by technicians from the General Infrastructure Office at the Higher Sports Council (CSD). For this reason the criterion followed was that of covering the diverse materials and types of material that the CSD is currently installing.

Thanks to the work completed and the information obtained in this project, the technical personnel of the CSD have generated a technical prescription sheet for sports surfaces that can be considered the first practical result obtained. This document has been distributed among the members of the AENOR standardising committee CNT41/SC1/GT3 and is being used as a reference document among companies and professionals in the sports surfaces sector.

Keywords: Biomechanics, sports surfaces, standards.



1. Introducción y objetivos

El proyecto ha pretendido alcanzar dos objetivos:

- Medir el nivel de adecuación de los pavimentos deportivos que se están instalando actualmente a la normativa que trata sobre aspectos relacionados con la biomecánica: absorción de impactos y fricción entre el calzado y el suelo.
- Relacionar las magnitudes extraídas mediante ensayos normativos con las exigencias de profesionales y usuarios para determinar la adecuación de dichos ensayos.

Para comprender con mayor claridad la metodología empleada, es interesante revisar algunos de los antecedentes más importantes de la evolución técnica de los pavimentos deportivos y de la investigación realizada.

La aplicación de materiales sintéticos y el uso de sistemas que mejoran la respuesta mecánica de los pavimentos deportivos son contribuciones técnicas que aparecen a finales de los años 50 y principios de los 60. Hasta el principio de los años 60, además del césped natural, existían básicamente dos tipos de pavimentos deportivos: de madera para interiores y de ceniza para exteriores. La necesidad de mejorar los pavimentos en cuanto a su mantenimiento y resistencia frente a las condiciones ambientales provocó el desarrollo de las primeras superficies sintéticas y algunas empresas empezaron a experimentar con materiales bituminosos, añadiéndoles caucho para aumentar su elasticidad.

Un avance importante fue la aparición a mediados de los años 60 de resinas sintéticas que tenían buenas cualidades resistentes y soportaban bien las condiciones ambientales. En 1966 se instala el primer césped artificial de la liga de fútbol americano en el Astrodome de Houston (Texas) y en 1968 se utilizan por primera vez los pavimentos sintéticos en una competición atlética de primera línea: las Olimpiadas de Méjico.

Los primeros estudios epidemiológicos sobre la influencia de los pavimentos sintéticos en las lesiones deportivas se iniciaron a mediados de los años 70. Estas investigaciones pusieron de manifiesto que los modernos pavimentos constituyen un factor etiológico de primer orden en las lesiones deportivas, surgiendo la necesidad de establecer las características biomecánicas que deberían reunir con objeto de prevenir las lesiones sin alterar el rendimiento deportivo.

Con este propósito, aparecen los primeros intentos de normalización en los que los alemanes son pioneros con las normas DIN 18032 y 18035. Desarrolladas al amparo de la potente industria alemana y con motivo de las olimpiadas de Munich (1972), las normas DIN constituyen en la actualidad una referencia para el resto de países europeos y su cumplimiento se exige desde diversas federaciones y ligas profesionales como la ACB (Asociación de Clubes de Baloncesto) de España.

Sin embargo y desde la perspectiva de la Biomecánica, la norma alemana, aún siendo un primer intento de normalización loable, presenta algunas deficiencias importantes ya que no simula adecuadamente la magnitud y el tiempo de aplicación de las cargas reales que se generan durante la práctica deportiva (Nigg 1990) y no considera el factor asociado a la inercia de las masas lanzadas en los tests de impactos de labora-

torio que pretenden simular las sollicitaciones mecánicas a las que se verá sometido el pavimento durante su uso. El comportamiento de los materiales es no lineal y, en consecuencia, no puede extrapolarse lo que sucede cuando se aplica una fuerza determinada a lo que ocurre cuando actúa otra de magnitud y tiempo de aplicación diferentes. Las diferentes normativas sobre pavimentos deportivos indican unos rangos para ciertas características como la amortiguación de impactos que se basan más en un criterio subjetivo que en los conocimientos científicos existentes (Nigg 1987).

Normalmente a un buen pavimento se le exige el cumplimiento de una serie de requisitos como son:

- Absorber impactos sin provocar vibraciones.
- Absorber ruidos.
- Tener una buena tracción (fricción).
- No ser abrasivo: protección frente a caídas.
- Uniformidad de comportamiento.
- De fácil mantenimiento.
- Buenas características de luminosidad y color, sin provocar destellos.

Entre estos requisitos, los dos que son susceptibles de ser analizados desde la perspectiva de la Biomecánica son los relacionados con las características de absorción de impactos y de fricción, dado que, como se verá, ambos afectan a la patología y a la técnica deportiva.

Las características mecánicas de los pavimentos deportivos, en lo referente a absorción de impactos y fricción, tienen influencia tanto sobre las lesiones como sobre el rendimiento deportivo. Estos dos requisitos exigibles a los pavimentos pueden ser contrapuestos, de forma que al primar los aspectos de protección del pavimento se reducen las marcas alcanzadas por los deportistas y viceversa. Por ejemplo, en una pista de atletismo se puede seleccionar un pavimento muy rígido para provocar una mayor restitución de energía derivada del contacto del pie con el suelo y conseguir mejores marcas; pero estaremos reduciendo la capacidad del pavimento para amortiguar los impactos y aumentando el riesgo de lesiones.

Así pues, las características mecánicas que en la actualidad se exigen a los pavimentos dependen del tipo de deporte a practicar:

En atletismo las llamadas pistas rápidas son poco absorbentes frente a impactos y presentan una fricción elevada para asegurar una buena tracción del calzado.

En baloncesto y otros deportes con balón se exige una determinada dureza para asegurar un 90% de rebote (tomando como 100% el bote sobre hormigón) y una estabilidad dimensional en toda la cancha.

Estas circunstancias hacen que, para establecer criterios con los que evaluar la adecuación de los pavimentos a la práctica deportiva desde la perspectiva de la Biomecánica, resulte indispensable conocer cómo afecta el pavimento al gesto deportivo en función de las características de los materiales y las estructuras empleadas en su construcción.

La realización de este proyecto ha servido para realizar por primera vez en España una comprobación sistemática de las características de diferentes pavimentos deportivos mediante la realización de ensayos normativos.

2. Material y Métodos

Para cubrir los objetivos planteados en el presente proyecto:

- Medir el nivel de adecuación de los pavimentos deportivos que se están instalando actualmente a la normativa que trata sobre aspectos relacionados con la biomecánica: absorción de impactos y fricción entre el calzado y el suelo.
- Y relacionar las magnitudes extraídas mediante ensayos normativos con las exigencias de profesionales y usuarios para determinar la adecuación de dichos ensayos

Se estructuró un plan de actuaciones basado en:

- Realizar ensayos sobre pavimentos ya instalados utilizando normativa DIN por ser la más adecuada según la bibliografía consultada .
- Y realizar encuestas a usuarios y responsables de las instalaciones deportivas sobre las ventajas e inconvenientes de los pavimentos deportivos ensayados.

En base a la información obtenida, cruzando los resultados de encuestas y ensayos normativos, se ha pretendido obtener criterios sobre el nivel de exigencias que debería pedirse a un pavimento deportivo. También se ha pretendido obtener una aproximación del nivel de calidad de los pavimentos que se instalan en el estado español.

El plan de trabajo ha consistido en las siguientes actividades:

- I. Búsqueda bibliográfica y documentación
- II. Selección de las instalaciones a ensayar
- III. Ensayos con máquinas
 - A. Caracterización de Dureza y Rugosidad.
 - B. Ensayos de amortiguación
 - C. Ensayos de fricción.
 - D. Ensayos de bote vertical.
- IV. Realización de encuestas.
 - A. Diseño de encuestas.
 - B. Distribución de encuestas.
- V. Tratamiento de datos y elaboración de informe.

2.1 Búsqueda bibliográfica y documentación

El IBV dispone de un fondo documental suficiente para la elaboración de la presente informe del proyecto proveniente de los proyectos ya realizados sobre el tema de los pavimentos deportivos.

Durante el desarrollo del proyecto se actualizó dicho fondo documental con la realización de búsquedas en bases de datos especializadas y se realizó una revisión específica de la normativa vigente en aquellos países de mayor influencia.

2.2 Selección de las instalaciones a ensayar

Se realizó una selección previa de las instalaciones a ensayar. Dicha selección debía cubrir lo mejor posible los diferentes tipos de pavimentos que se instalan actualmente. Para ello se contó con la colaboración de la Dirección General de Infraestructuras del CSD, con la que ya existe una colaboración estrecha dentro del marco del comité AENOR CTN41/SC1/GT3 de Pavimentos Deportivos.

El número de instalaciones seleccionadas fueron 11, situadas en las Comunidades Autónomas de Castilla-León, Castilla-La Mancha y Madrid.

La siguiente tabla muestra las características del pavimento por instalación deportiva.

PAVIMENTO	INSTALACIÓN
JUNCKERS Madera	Universidad Complutense de Somosaguas (MADRID)
PVC 2 mm-espuma de PVC 4 mm	C.P. Pablo Sarasate Móstoles (MADRID)
PVC MONDO SPORT	I.B. Los Pajarillos (VALLADOLID)
MONDOFLEX Caucho 6 mm	C.P. Alfonso VI (TOLEDO)
PVC (GAMEFLOOR) 2 mm + 3.5 mm Espuma PVC	Serrada (VALLADOLID)
MONDO Caucho 4mm + Everlay 4 mm	Cabezón de Pisuegra (VALLADOLID)
POLIURETANO (FLEXÁN) PU 3 mm + Caucho negro 6 mm	Polid. Antela Parada Alcobendas (MADRID)
POLIURETANO PU 3 mm + 6 mm Caucho negro	I.B. Fuenlabrada II Fuenlabrada (MADRID)
POLIURETANO (PULASTIC "ZS") PU 2 mm + 5 mm Caucho negro	C.P. Victoria Kent Torrejón de Ardoz (MADRID)
MONDO Caucho 4 mm + Everlay 4 mm	Torquemada (PALENCIA)
SINTÉTICO	C.P. Reyes Católicos Alcalá de Henares (MADRID)

2.3 Ensayos con máquinas

Para realizar los ensayos con máquinas dos investigadores del IBV se desplazaron con las máquinas de ensayos a las diferentes instalaciones. Para ello se contó con el permiso de los responsables de las diferentes instalaciones gracias a la colaboración de la Dirección General de Infraestructura del CSD.

La adquisición de datos se realizó mediante un ordenador portátil al que se le incorporó una electrónica adicional con una tarjeta de adquisición de datos.

2.3.1 Caracterización de Dureza y Rugosidad

Además de los ensayos de norma DIN se midieron características mecánicas y de acabado como la dureza y la rugosidad con el fin de contar con una descripción más detallada de los pavimentos ensayados.

Para ello el IBV utilizó el siguiente equipamiento:

- Medidor de dureza Shore según ISO 868 y su equivalente española UNE 53130-91.
Aparato de ensayo: durómetro Shore.

Se basa en la medición de la penetración de un indentador específico presionado contra el material bajo condiciones específicas.

La dureza está inversamente relacionada con la penetración de una cuña, y depende fundamentalmente de las características de la capa más superficial del pavimento.

Existen dos escalas de dureza Shore, "A" para materiales blandos y "D" para materiales más duros. Los durómetros incluyen los siguientes componentes:

- Soporte presionador**, con un agujero entre 2.5 y 3.5 mm. de diámetro, centrado al menos 6 mm. de los extremos del soporte.
- Indentador**, compuesto de una varilla de acero endurecido de 1.10 y 1.40 mm. de diámetro respectivamente.
- Dispositivo indicador**, que indica lo que sobresale la punta del indentador hacia la cara del soporte, esto se puede leer directamente de 0, que es cuando más sobresale (2.50 +/- 0.04 mm), a 100 que es cuando menos sobresale y que se obtiene colocando un trozo de vidrio liso en firme en contacto con el soporte y el indentador.
- Medidor de rugosidad según ISO 4287/1 y su equivalente española UNE 82031-86.
Aparato de ensayo: rugosímetro Pertometer M4Pi (RK).

La rugosidad superficial es el conjunto de las irregularidades superficiales de paso relativamente pequeño, correspondiente a las huellas dejadas en la superficie real por el procedimiento de elaboración y/o por otras influencias.

La medición se efectúa por el principio de palpación de secciones. El palpador explora linealmente a una velocidad constante la superficie a verificar a lo largo de un recorrido de palpación. Recoge una sección de perfil bidimensional registrando las estructuras superficiales como desviaciones mecánicas de la punta del palpador, transformándolas en valores digitales y memorizándolas como perfil en la memoria de perfil del M4Pi (RK).

El parámetro de rugosidad que se emplea en este informe para dar una especificación de la rugosidad superficial de un pavimento es:

- Ra**, desviación media aritmética del perfil

2.3.2 Ensayos de amortiguación

El ensayo consiste en medir con el atleta artificial de Berlín la reducción relativa de la fuerza máxima obtenida realizando un impacto en el pavimento deportivo con respecto a un suelo rígido, como el hormigón o el terrazo.

El ensayo se realiza en 5 puntos del pavimento, dos repeticiones por punto, y se calcula una media de todos los puntos.

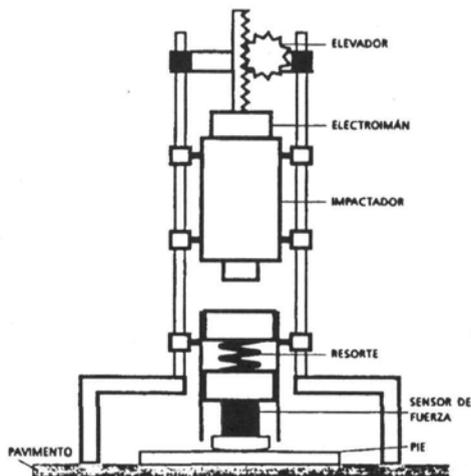


Fig.1: Esquema atleta de Berlín

La normativa DIN solo especifica requerimientos de absorción de impactos cuando la altura de caída del impactador es de 55 mm., aunque puede realizarse el ensayo a 22 y 88 mm. si así se desea. De esta forma se puede observar la evolución de la absorción de impactos a medida que se aumenta la altura de caída.

La normativa DIN solamente mide la absorción comparando fuerzas máximas obtenidas, sin tener en cuenta si la curva de fuerzas aumenta rápida o lentamente.

La norma DIN especifica los siguientes requerimientos:

- | | |
|--|------------|
| -Pavimentos para campos de juegos, tenis e instalaciones de atletismo al aire libre que tengan pavimentos sintéticos elásticos | mínimo 45% |
| -Pavimento de interior areaelástico | mínimo 53% |
| -Pavimento de interior puntoelástico | mínimo 51% |
| -Pavimento de interior de elasticidad combinada | mínimo 58% |
| -Pavimento de hierba artificial (de 23°C a 40°C) | 50% a 65% |

Este ensayo simula el impacto de balón que un deportista de 80-90Kg sufriría en un salto vertical a pies juntos. La amortiguación que el deportista consigue mediante la flexión de las articulaciones y la fuerza muscular se consigue mediante el muelle calibrado que se coloca entre la masa de caída y el sensor de fuerzas.

Dado que el tiempo es un factor importante a considerar, se han extraído otros parámetros además de la absorción DIN. Hay que tener en cuenta que la posibilidad de adaptación del deportista disminuye cuando las fuerzas cambian rápidamente, pudiendo influir en lesiones y rendimientos.

Los parámetros definidos que aparecen en las tablas de resultados son:

- DIN: Absorción de impactos según norma DIN en %. Como ya se ha dicho se obtiene al calcular la reducción de fuerza máxima obtenida tomando como referencia o patrón el suelo rígido (H). No considera si la fuerza máxima sobre el suelo de referencia y el pavimento deportivo se obtiene en tiempos distintos.
- ABS.MAX: Absorción de impactos máxima en %. Se obtiene tomando el suelo rígido (H) como referencia y calculando la reducción de fuerza en cada instante desde que comienza el impacto hasta que finaliza. De esta forma se calcula una curva que nos da la evolución de la reducción de fuerza en el tiempo. ABS.MAX es el máximo de dicha curva.
- F.MAX: Fuerza máxima de impacto obtenida. Se da en Newtons (N). La fuerza máxima y la absorción según norma DIN son inversamente proporcionales: mayor F.MAX representa menor ABS.DIN.
- PENDIENTE: FMAX dividido por el tiempo que transcurre desde el primer momento en que se aplica la carga. Se han utilizado unidades de KiloNewtons por segundo (KN/s). Cuando la pendiente es mayor significa que la fuerza máxima se obtiene más rápidamente.

2.3.3 Ensayos de fricción

En la normativa DIN aparecen dos métodos diferentes relacionados con la medida de la fricción dinámica.

El más simple consiste en lanzar un disco con suelas de cuero mediante un dispositivo de impulsión calibrado de forma que permita una velocidad inicial de lanzamiento 2.8 m/s sobre patrón de vidrio y medir la longitud de deslizamiento hasta que se frena.

El segundo método utiliza el "aparato de deslizamiento de Stuttgart" que consiste en un eje guiado verticalmente que se hace girar por medio de una pesa en suspensión que aplica un par de giro constante. Un sensor de fuerza mide el par de fricción que aparece cuando el pie de ensayo roza sobre el pavimento. El "pie" de ensayo es diferente para pavimentos de exterior e interior. Se ha utilizado este método porque es el que más se sigue en otros laboratorios y simula mejor las cargas realizadas por un deportista.

El coeficiente de fricción se calcula con la fórmula:

$$\text{Coef} = \frac{3T}{wD}$$

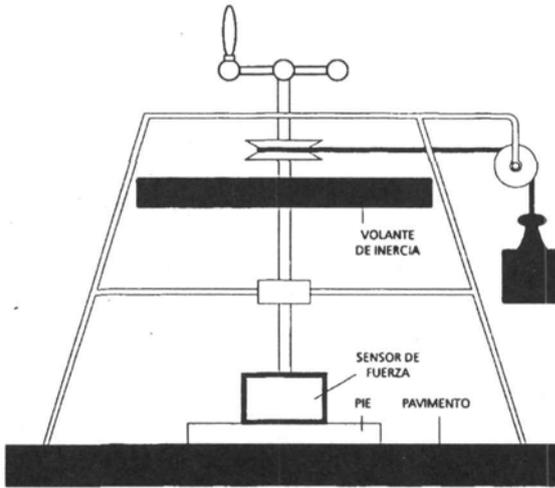


Figura: Aparato de deslizamiento de Stuttgart.

Donde D es el par de fricción en Ncm y w es la fuerza vertical aplicada en N . Las características principales del Aparato de deslizamiento de Stuttgart son:

- Pie de ensayo de diámetro 100 mm.
- Peso total del eje, pesa y pie de ensayo, 20 ± 1 kg.
- Momento de inercia total de $2900 \text{ kg} \times \text{cm}^2$.
- Pesa suspendida libre de 5 kg.
- Diámetro de la bobina de arrollamiento del alambre: 54 mm.
- Material de la suela de ensayo: cuero rugoso lijado con papel de lija grano 100.

Las especificaciones que da la norma DIN son las siguientes:

Pavimento deportivo multiuso de interior	Coef. entre 0.5 y 0.7 Longitud de deslizamiento entre 0.6 y 0.9m
Pavimentos sintéticos de exterior para pistas de atletismo	Coef. seco ≤ 1.1 Coef. mojado ≥ 0.5
Pavimentos sintéticos de exterior para tenis, campos de juego e instalaciones combinadas	Coef. seco ≤ 0.8 Coef. mojado ≥ 0.5

2.3.4 Ensayo de bote vertical de la pelota

La normativa DIN especifica que en pavimentos deportivos multiuso se utiliza una pelota de baloncesto que dejada caer desde una altura de 1,80 m sobre suelo rígido (hor-

migón) debe alcanzar una altura de bote entre 1,2 y 1,4 m. La altura desde la que cae (1,80 m) se mide desde la parte inferior de la pelota, la altura de bote se mide desde la parte superior. La medida del bote se realiza mediante un cronómetro acústico que mide el tiempo que transcurre entre dos botes consecutivos, detectando el ruido que se produce cuando la pelota choca contra el suelo.

Todas las especificaciones se dan en % respecto a la altura alcanzada sobre suelo rígido; por ejemplo, el hormigón.

Pavimentos multiuso de interior	Baloncesto > 90%
Hierba artificial	Fútbol ≤ 90%
	Hockey 12 cm a 40 cm
	Tenis ≥ 80%

Las alturas desde las que se deja caer el balón se dan en la siguiente tabla (medidas desde la parte inferior de la pelota):

Baloncesto (válvula hacia arriba)	1,80 m
Fútbol (válvula hacia arriba)	1,80 m
Tenis	1,80 m
Hockey	1,50 m

2.4 Realización de encuestas

En cada instalación visitada se hizo entrega de una encuesta con el fin de conocer el grado de satisfacción de los responsables de la instalación, tanto a nivel de usuario como de problemática de mantenimiento. Por tanto en la encuesta se preguntaba sobre grado de satisfacción en aspectos como comportamiento del balón, agarre y deslizamiento, absorción de impactos y dureza, problemas de mantenimiento, limpieza, etc..

La distribución de las encuestas se realizó en paralelo con la realización de los ensayos. Se entregó a los responsables de mantenimiento, entrenadores y profesores de educación física de las instalaciones una encuesta con un sobre franqueado.

2.5 Tratamiento de datos y elaboración de informe

Todos los resultados han sido tratados posteriormente mediante el software de tratamiento matemático y estadístico del que dispone el IBV (Matlab y Statgraphics respectivamente).

La metodología seguida durante el tratamiento de los datos ha sido:

1. Extracción de parámetros de los ensayos realizados.
2. Análisis de correlaciones entre los diferentes parámetros.

La información obtenida con este proyecto complementa los resultados de la investigación que actualmente realiza el IBV en sus laboratorios.

3. Resultados

3.1 Amortiguación

INSTALACIÓN	PAVIMENTO	H(mm)	DIN (%)	ABS.MAX (%)	F.MAX (N)	PENDIENTE(KN/s)
Universidad Complutense de Somosaguas (MADRID)	JUNCKERS Madera	55	38.14	56.59	3735	498
C.P. Pablo Sarasate Móstoles (MADRID)	PVC 2 mm-espuma de PVC 4 mm	55	27.10	40.29	4572	762
I.B. Los Pajarillos (VALLADOLID)	PVC MONDO SPORT	55	23.92	35.48	4767	821
C.P. Alfonso VI (TOLEDO)	MONDOFLEX Caucho 6 mm	55	22.59	30.38	4847	897
Serrada (VALLADOLID)	PVC (GAMEFLOOR) 2 mm + 3.5 mm Espuma PVC	55	20.99	30.04	4952	900
Cabezón de Pisuegra (VALLADOLID)	MONDO Caucho 4mm + Everlay 4 mm	55	18.11	25.33	5140	969
Polid. Antela Parada Alcobendas (MADRID)	POLIURETANO (FLEXÁN) PU 3 mm + Caucho negro 6 mm	55	17.73	43.13	5153	844
I.B. Fuenlabrada II Fuenlabrada (MADRID)	POLIURETANO PU 3 mm + 6 mm Caucho negro	55	15.92	36.23	5272	908
C.P. Victoria Kent Torrejón de Ardoz (MADRID)	POLIURETANO (PULASTIC "ZS") PU 2 mm + 5 mm Caucho negro	55	15.53	40.19	5309	899
Torquemada (PALENCIA)	MONDO Caucho 4 mm + Everlay 4 mm	55	14.50	24.67	5373	1011
C.P. Reyes Católicos Alcalá de Henares (MADRID)	SINTÉTICO (No coincide con la descripción del CSD)	55	11.89	19.11	5538	1085

3.2 Bote de pelota, coeficiente de fricción, longitud de deslizamiento, dureza shore y rugosidad

	BOTE DE PELOTA BR (%)	COF. DE FRICCIÓN GV (μ)	LONGITUD DE DESlizAMIENTO BAM (m)	DUREZA SHORE	RUGOSIDAD Ra (μ m)	
VALOR RECOMENDADO SEGÚN DIN 18032 parte 2ª	mín. 90 %	mín 0.5-máx 0.7	mín 0.6-máx 0.9 (m)	-	-	
INSTALACIÓN	MATERIAL					
Universidad Complutense de Somosaguas (MADRID)	Madera JUNCKERS	92.71%	0.58	0.71 m	D/62.80	2.08 μ m
C.P. Pablo Sarasate Móstoles (MADRID)	PVC 2 mm-espuma de PVC 4 mm	99.62 %	0.90	0.53 m	A/79.40	2.52 μ m
I.B. Los Pajarillos (VALLADOLID)	PVC Mondo sport	99.02 %	0.83	0.70 m	A/72.87	9.96 μ m
C.P. Alfonso VI (TOLEDO)	Caucho 6 mm MONDOFLEX	98.83 %	0.83	0.54 m	A/78	SOBRERANGO
Serrada (VALLADOLID)	PVC (GAMEFLOOR) 2mm + 3.5 mm espuma PVC	98.92 %	0.76	0.67 m	D/47.87	1.77 μ m
Cabezón de Pisuerga (VALLADOLID)	Caucho 4 mm +Everlay 4 mm MONDO	99.45 %	0.86	0.67 m	A/75.27	1.47 μ m

	BOTE DE PELOTA BR (%)	COF. DE FRICCIÓN GV (μ)	LONGITUD DE DESPLAZAMIENTO BAM (m)	DUREZA SHORE	RUGOSIDAD Ra (μ m)
VALOR RECOMENDADO SEGÚN DIN 18032 parte 2 ^a	mín. 90 %	mín 0.5-máx 0.7	mín 0.6-máx 0.9 (m)	-	-

INSTALACIÓN	MATERIAL					
Polid. ANTELA PARADA Alcobendas (MADRID)	POLIURETANO PU 3 mm + Caucho negro 6 mm	99.99 %	0.71	0.75 m	A/69.33	1.53 μ m
I.B. Fuenlabrada II Fuenlabrada (MADRID)	POLIURETANO PU 3 mm + 6 mm Caucho negro	98.71 %	0.73	0.66 m	A/78	1.36 μ m
C.P. Victoria Kent Torrejón de Ardoz (MADRID)	POLIURETANO(PULASTIC "ZS") PU 2 mm + 5 mm Caucho negro	98.80 %	0.83	0.63 m	A/71.60	3.59 μ m
Torquemada (PALENCIA)	Caucho (MONDO) 4 mm + Everlay 4 mm	100.94 %	0.84	0.64 m	A/72.27	1.58 μ m
C.P. Reyes Católicos Alcalá de Henares (MADRID)	No coincide con la descripción del CSD	97.57 %	0.85	0.54 m	A/78.40	2.59 μ m

3.3 Encuestas

No se ha obtenido ningún resultado de las encuestas repartidas debido a la baja respuesta obtenida.

Solamente se ha obtenido respuesta de 6 de los encuestados. En todas ellas los responsables de mantenimiento y profesores de educación física consideran que el pavimento es adecuado.

3.4 Correlaciones entre variables de amortiguación

		ABS.MAX	BR	DIN	F.MAX	PENDIENTE
Correlación de Pearson	ABS.MAX	1.000	-.576	.749**	-.757**	-.926**
	BR	-.576	1.000	-.688*	.716*	.690*
	DIN	.749**	-.688*	1.000	-.999**	-.941**
	F.MAX	-.757**	.716*	-.999**	1.000	.946
	PENDIENTE	-.926**	.690*	-.941**	.946**	1.000
Sig. (bilateral)	ABS.MAX	.	.064	.008	.007	.000
	BR	.064	.	.019	.013	.019
	DIN	.008	.019	.	.000	.000
	F.MAX	.007	.013	.000	.	.000
	PENDIENTE	.000	.019	.000	.000	.

** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

* La correlación es significante al nivel 0,05 (bilateral).

No se ha encontrado ninguna correlación significativa entre el Coeficiente de Rozamiento (COF) y la rugosidad (RA).

No se ha encontrado ninguna correlación significativa entre la dureza y ninguno de los parámetros de amortiguación.

No se ha encontrado ninguna correlación significativa entre el Coeficiente de Rozamiento (COF) y la rugosidad (RA).

No se ha encontrado ninguna correlación significativa entre la dureza y el bote de pelota.

4. Análisis y conclusiones

Del estudio realizado se desprende que los pavimentos deportivos que se están instalando en la mayoría de los pabellones deportivos no cumplen los requisitos mínimos que se exigen en la normativa DIN. Según los criterios establecidos en dicha norma no garantizan la protección del deportista.

Con respecto a la absorción de impactos, ninguna de las instalaciones que se han ensayado podría considerarse aceptable desde el punto de vista de la normativa DIN, ya que todas ellas están por debajo del valor recomendado. Ninguna sobrepasa el 40% y solo una está por encima del 30%.

Solo una de las instalaciones está dentro del rango admisible del coeficiente de fricción y el resto presenta un coeficiente de fricción excesivo constituyendo un factor de riesgo para la práctica de deportes donde se realicen giros y cambios bruscos de sentido en la carrera (futbito, baloncesto, etc.).

En cuanto a las características de dureza y la rugosidad, relativas al material empleado en la construcción del pavimento, no se correlacionan con los aspectos de amortiguación y fricción del pavimento.

La dureza es una medida en la que únicamente influye la capa más superficial del pavimento, y en la absorción de impactos influyen mucha más otros aspectos, como el sistema de construcción y las características de viscoelasticidad de los materiales. Y en cuanto a la relación de la fricción con la rugosidad, los resultados muestran que tendrán más influencia otros aspectos, como el mantenimiento y los productos de limpieza empleados.

El bote de la pelota presenta una correlación significativa con la absorción de impactos medida según norma DIN. Pero esta correlación no es muy alta, tiene un valor de -0.576, lo cual indica que no siempre un pavimento más amortiguador provocará un menor bote de pelota. Si se observan los datos de los diferentes pavimentos puede verse claramente que suelos con menor amortiguación presentan menos altura de bote de pelota que pavimentos más amortiguadores.

En cuanto a los diferentes parámetros de amortiguación calculados se observa que el parámetro medido en la norma DIN, porcentaje de reducción de fuerza máxima, tiene una correlación muy elevada con la **PENDIENTE** (-0.926). Esto implica que los pavimentos que más reducen la fuerza de impacto también son los que más retrasan la aparición del máximo de la fuerza, proporcionando más tiempo de reacción a los sistemas propios de amortiguación de que disponen los deportistas, como la movilidad articular.

El parámetro de ABS.MAX, que tiene en cuenta el instante en el que se producen las fuerzas, también está correlacionado con la absorción DIN, con un coeficiente de correlación del 0.749. Pero si ordenamos los pavimentos de más a menos amortiguadores, el orden en que quedan los pavimentos es diferente en función del parámetro utilizado. Esto indica la necesidad de profundizar más sobre la utilización exclusiva del parámetro DIN para comparar la amortiguación de los diferentes pavimentos. Serán necesarios más estudios, y comparar los resultados obtenidos con máquinas de ensayos con la realización de ensayos con sujetos, para decidir cual de los dos parámetros es más válido.

5. Bibliografía

- ANDREASSON, G.; LINDENBERGER, U.. "Torque developed at simulated sliding between sport shoes and an artificial turf". *Am. J. Sports Med.* XIV. 1986. 225-230..
- ANDRES, R. A.; CHAFFIN, D. B.. "Ergonomic analysis of slip-resistance measurement devices". *Ergonomics* XXVIII 1985.: 1065-1079.
- BATES, B.T.; DEVITA, P.. "The effects of time on selected ground reaction force parameters". En: JONSSON, B. ed *10th International Congress of Biomechanics* Solna, Sweden, Arbete och Hälsa. 1985. 54-55
- BEJENKE, V.. "Flooring and Covering for Sports Arenas". *Adhäsion* XXXIV) 1990. 26-31.
- BONSTINGL, R.W.; CHAUNCEY, A.. "Torques developed by different types of shoes on various playing surfaces". *Med. Sci. Sports* VII. 1975. 127-131.
- BOSCO, C.; MATTEUCCI, E.; LOCATELLI, E.. "Pista dura, pista morbida, come cambia l'elasticità". *SDS* II. 1985. 54-59.
- BOURASSA, P.; GAGNON, Y.. "Assesment of the ground reaction profile on various running surfaces. Experiments and simulation.". En: *Scientific Olympic Cong.* (1984. Eugene, Oregon). 1984.
- CUIN, D.E.. "Design and Construction of a Tuned Track". En: FREDERICK, E.C. ed. *Sport shoes and playing surfaces: Biomechanical properties.* Champaign, Illinois. Human Kinetics. 1984. 163-165.
- DENOTH, J.. "Indoor Athletic Playing Surfaces - Floor vs. Shoe". En: SEGESSER, B.; PFORRINGER, W. eds. *The shoe in sport.* Chicago; Boca Ratón, Year Book Medical. 1989. 65-69.
- DENOTH, J.; NIGG, B.M.. "The influence of various sport floors on the load on the lower extremities". En: MORECKI, A.; FIDELUS, K.; eds. *Biomechanics VII-B* Baltimore, University Park Press. 1981. 100-105.
- DURA, J.V.; LOZANO, L.; FORNER, A.; RAMIRO, J.; VERA, P.; "Impact forces in sport surfaces measured by accelerometric method" En: BARABAS, A.; FABIAN, G.; eds. *Proceedings of the 12th International Symposium on Biomechanics in Sports.* 1994. 178-181.
- FEEHERY, R.V.. "The biomechanics of running on different surfaces.". *Clin. Podiatr. Med. Surg.* III 1986. 649-659.
- FRANCIS, P.R.; LEIGH, M. Y BERZINS, A.. "Shock Absorbing Characteristics of Floors Used for Dance Exercise". *Int. J. Sport Biomech.* IV. 1988. 282-305.
- FRANCIS, P.R.; ZOZULA, C.A.. "Experimental determination of limiting and sliding friction forces for purposes of modeling slips.". En: ASTM STP n°1103. *Slips, stumbles and falls: pedestrian footwear and surfaces* 1989. 55-72
- FREDERICK, E.C.. "Measuring the effects of shoes and surfaces on the economy of locomotion". En: NIGG, B.M. ed. *Biomechanical aspects of sport shoes and playing surfaces.* Calgary CANADA. 1983. 93-106
- GARCIA, A.C.; RAMIRO, J.. "Aspectos Biomecánicos de los Pavimentos Deportivos". *Ocio/Sport* 46. 1992. 73-81.
- HARRISON, R.; MALKINN, F.. "On-site testing of shoe and floor combinations". *Ergonomics* XXVI. 1983. 101-108.
- IRVINE, C.H.. "Evaluation of the effect of contact-time when measuring floor slip resistance". *J. Testing Eval.* XIV. 1986. 19-22.
- JAMES, D.I.. "Rubbers and plastics in shoes and flooring: the importance of kinetic friction". *Ergonomics* XXVI. 1983. 83-99.
- JAMES, D.I.. "Standar slider for slip measurements". *Polymer Testing* VIII. 1989. 9-17.

- MACMAHON, T.A.; GREENE, P.R.. "The influence of track compliance on running". *J. Biomech.* XII. 1979. 893-904.
- MENCK, H.; JORGENSEN, V.. "Frictional forces and ankle fractures in sport". *Br. J. Sports Med.* I. 1983. 135-136.
- NIGG, B.M.. "The validity and relevance of tests used for the assessment of sports surfaces". *Med. Sci. Sports Exerc.* XXII. 1990. 131-139.
- NIGG, B.M.; DENOTH, J.. "Load Sport Shoes and Playing Surfaces". FREDERICK, E.C. *ed Sport shoes and playing surfaces: Biomechanical properties* 1984. Champaign, Illinois. Human Kinetics. 1-23
- NIGG, B.M.; SEGESSER, B.. "The influence of playing surfaces on the load on the locomotor system and on football and tennis injuries.". *Sports Med.* V. 1988. 375-385.
- NIGG, B.M.; YEADON, M.R.. "Biomechanical aspects of playing surfaces". *J. Sports Sci.* V. 1987. 117-145.
- NIGG, B.M.; YEADON, M.R.. "The influence of construction strategies of sprung surfaces on deformation during vertical jumps". *Med. Sci. Sports Exerc.* XX. 1988. 396-402.
- PERKINS, P.J.. "Measurement of slip between the shoe and ground during walking". En: *Symposium on walkway surfaces measurement of slip resistance*: Denver: 1978. Philadelphia, PA, ASTM. 71-87.
- POWELL, J.W.; SCHOOTMAN, M.. "A multivariate risk analysis of selected playing surfaces in the National Football League: 1980 to 1989". *The American Journal of Sports Medicine* XX. 1992. 686-694.
- REDFERN, M.S.; MARCOTTE, A.; CHAFFIN, D.B.. "A dynamic coefficient of friction measurement device for shoe/floor interface testing". *J. Safety Res.* XXI. 1990. 61-65.
- RODEO, S.A.; O'BRIEN, S.. "Turf-toe: An analysis of metatarsophalangeal joint sprains in professional football players". *Am. J. Sports Med.* XVIII. 1990. 280-285.
- SANDERS, R.H.; ALLEN, J.B.. "Timing changes during accommodation to a compliant surface in jumping". En: *XIII International Congress on Biomechanics. Book of Abstracts*: 1991. 122-124.
- SEGESSER, B.. "Typical Injuries and Overload Problems in Indoor Athletic Events - Implications for the Court Shoe". En: SEGESSER, B.; PFORRINGER, W; eds. *The shoe in sport*. 1989. Chicago; Boca Ratón, Year Book Medical. 70-76.
- SIMON, S.R.; RADIN, E.L.; "The response of joints to impact loading-II. In vivo behavior of subchondral bone". *J. Biomech.* V. 1972. 267-272.
- STACOFF, A.; KAELIN, X.. "Technological and Biomechanical Criteria of the Court Shoe". En: SEGESSER, B.; PFORRINGER, W; eds. *The shoe in sport*. 1989. Chicago; Boca Ratón, Year Book Medical. 77-86.
- STRANDBERG, L.; LANSHAMMAR, H.. "The dynamics of slipping accidents". *J. Occup. Acc.* III. 1981. 153-162.
- STUCKE, H.; BAUDZUS, W.. "On Friction Characteristics of Playing Surfaces". En: FREDERICK, E.C.; ed. *Sport shoes and playing surfaces: Biomechanical properties* 1984. Champaign, Illinois. Human Kinetics.. 87-97.
- TISSERAND, M.. "Progress in the prevention of falls caused by slipping". *Ergonomics* XXVIII. 1985. 1027-1042.
- VALIANT, G.A.. "The relationship between normal pressure and the friction developed by shoe outsole material on a court surface". *J. Biomech.* XX. 1987. 892-898
- VALIANT, G.A.. "Traction characteristics of outsoles for use on artificial playing surfaces". En: SCHMIDT, R.C; de. *Natural and artificial playing fields: characteristics and safety* 1990 Philadelphia, ASTM.. 61-68.
- YEADON, M.R.; NIGG, B.M.. "A method for the assessment of area-elastic surfaces". *Med. Sci. Sports Exerc.* XX. 1988. 403-407.

ANEXO 1: PUNTOS DE ENSAYO

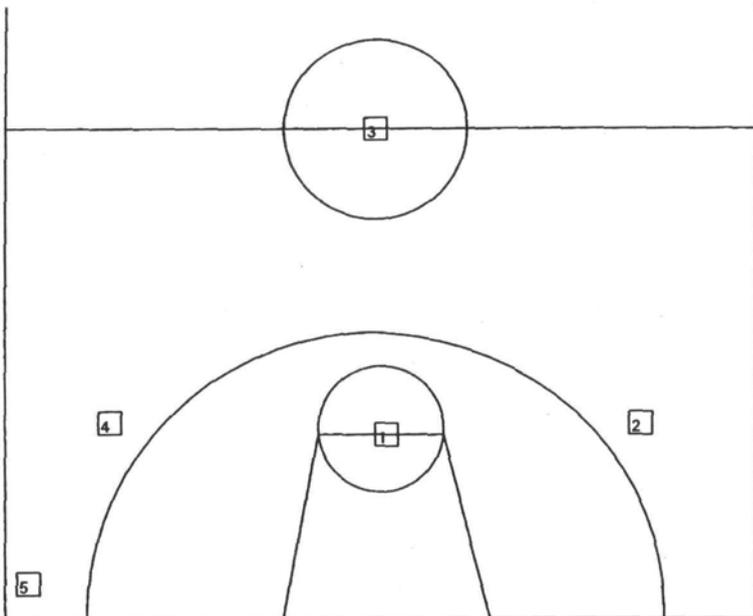
Los puntos de ensayo en los cuales se han realizado las mediciones, a excepción del C.P. Reyes Católicos de Alcalá de Henares (Madrid) han sido los siguientes:

- 1- Punto tiro libre
- 2- Lateral derecho
- 3- Centro de la pista
- 4- Lateral izquierdo
- 5- Esquina izquierda

En el C.P. Reyes Católicos los puntos fueron:

Punto 1 y 2: Juntas pavimento

Punto 3, 4 y 5: Zona intermedia entre juntas de pavimento



ANEXO 2: RESULTADOS PARCIALES

RESULTADOS EN CADA PUNTO DE ENSAYO Y VALOR MEDIO POR INSTALACIONES

INSTALACIÓN	ENSAYO	P1	P2	P3	P4	P5	MEDIA
Universidad Complutense de Somosaguas (MADRID)	ABSORCIÓN DE FUERZAS Ka55 (%)	34.08	39.14	58.72	36.93	21.82	38.14
	T: 19 °C						
	FRICCIÓN GW (μ)	0.51	0.87	0.54	0.52	0.48	0.58
	BOTE DE PELOTA BR (%)	93.17	93.81	86.44	91.22	98.93	92.71
	DESlizAMIENTO BAM (m)	0.76	0.73	0.75	0.58		0.71
	RUGOSIDAD Ra (μ m)	0.87	5.04	0.43	3.12	0.92	2.08
DUREZA SHORE D	62.67	62.00	59.00	65.33	65.00	62.80	
C.P. Pablo Sarasate Móstoles (MADRID)	ABSORCIÓN DE FUERZAS Ka55 (%)	27.01	27.60	26.95	27.42	26.51	27.10
	T: 20 °C						
	FRICCIÓN GW (μ)	0.89	0.99	1.00	0.80	0.82	0.90
	BOTE DE PELOTA BR (%)	98.72	99.19	100.24	100.10	99.87	99.62
	DESlizAMIENTO BAM (m)	0.49	0.57	0.51	0.53		0.53
	RUGOSIDAD Ra (μ m)	2.64	2.47	1.54	2.67	3.28	2.52
DUREZA SHORE A	78.00	79.67	79.00	80.00	80.33	79.40	
I.B. Los Pajarillos (VALLADOLID)	ABSORCIÓN DE FUERZAS Ka55 (%)	25.15	23.34	24.65	24.41	22.04	23.92
	T: 17 °C						
	FRICCIÓN GW (μ)	0.89	0.80	0.89	0.70	0.84	0.83
	BOTE DE PELOTA BR (%)	99.56	99.16	98.27	98.83	99.30	99.02
	DESlizAMIENTO BAM (m)	0.61	0.74	0.69	0.76		0.70
	RUGOSIDAD Ra (μ m)	12.50	9.08	3.83	14.00	10.40	9.96
DUREZA SHORE A	74.67	72.67	74.67	72.00	70.33	72.87	
C.P. Alfonso VI (TOLEDO)	ABSORCIÓN DE FUERZAS Ka55 (%)	23.04	21.90	24.01	21.75	22.23	22.59
	T: 12 °C						
	FRICCIÓN GW (μ)	0.91	0.82	0.78	0.81	0.83	0.83
	BOTE DE PELOTA BR (%)	97.41	99.21	97.75	98.63	101.13	98.83
	DESlizAMIENTO BAM (m)	0.52	0.53	0.54	0.56		0.54
	RUGOSIDAD Ra (μ m)			SOBRERANGO			
DUREZA SHORE A	81.33	76.33	82.00	75.00	75.33	78.00	
Serrada (VALLADOLID)	ABSORCIÓN DE FUERZAS Ka55 (%)	22.71	22.84	24.44	18.35	16.61	20.99
	T: 9 °C						
	FRICCIÓN GW (μ)	0.78	0.70	0.77	0.79	0.78	0.76
	BOTE DE PELOTA BR (%)	97.94	98.79	99.45	98.72	99.72	98.92
	DESlizAMIENTO BAM (m)	0.67	0.63	0.66	0.71		0.67
	RUGOSIDAD Ra (μ m)	3.70	2.41	0.87	1.00	0.87	1.77
DUREZA SHORE D	46.67	49.67	48.33	47.00	47.67	47.87	

INSTALACIÓN	ENSAYO	P1	P2	P3	P4	P5	MEDIA
Cabezón de Pisuerga (VALLADOLID)	ABSORCIÓN DE FUERZAS Ka55 (%)	16.88	17.60	18.64	16.72	20.70	18.11
T: 10 °C	FRICCIÓN GW (μ)	0.91	0.85	0.88	0.80	0.87	0.86
HR: 68 %	BOTE DE PELOTA BR (%)	99.48	99.65	100.61	99.07	98.46	99.45
	DESPLIZAMIENTO BAM (m)	0.62	0.67	0.65	0.72		0.67
	RUGOSIDAD Ra (μm)	1.37	1.89	1.13	1.72	1.26	1.47
	DUREZA SHORE A	75.00	75.00	76.67	75.00	74.67	75.27
Polid. ANTELA PARADA Alcobendas (MADRID)	ABSORCIÓN DE FUERZAS Ka55 (%)	14.91	19.92	15.24	21.02	17.57	17.73
T: 17 °C	FRICCIÓN GW (μ)	0.71	0.71	0.74	0.72	0.69	0.71
HR: 58 %	BOTE DE PELOTA BR (%)	99.16	101.18	100.04	100.27	99.30	99.99
	DESPLIZAMIENTO BAM (m)	0.70	0.76	0.78	0.76		0.75
	RUGOSIDAD Ra (μm)	1.26	0.80	2.28	2.08	1.25	1.53
	DUREZA SHORE A	63.33	69.00	73.67	66.33	74.33	69.33
I.B. Fuenlabrada II Fuenlabrada (MADRID)	ABSORCIÓN DE FUERZAS Ka55 (%)	13.89	10.45	20.57	16.16	18.55	15.92
T: 16 °C	FRICCIÓN GW (μ)	0.76	0.75	0.68	0.71	0.74	0.73
HR: 52 %	BOTE DE PELOTA BR (%)	98.16	97.73	98.49	99.32	99.86	98.71
	DESPLIZAMIENTO BAM (m)	0.64	0.63	0.70	0.66		0.66
	RUGOSIDAD Ra (μm)	1.48	1.05	1.14	1.28	1.86	1.36
	DUREZA SHORE A	79.00	79.00	79.33	77.67	75.00	78.00
C.P Victoria Kent Torrejón de Ardoz (MADRID)	ABSORCIÓN DE FUERZAS Ka55 (%)	14.34	16.24	14.99	16.03	16.03	15.53
T: 22 °C	FRICCIÓN GW (μ)	0.82	0.89	0.81	0.73	0.88	0.83
HR: 57 %	BOTE DE PELOTA BR (%)	98.20	99.13	99.13	98.00	99.56	98.80
	DESPLIZAMIENTO BAM (m)	0.59	0.66	0.63	0.65		0.63
	RUGOSIDAD Ra (μm)	2.34	3.74	3.69	5.14	3.05	3.59
	DUREZA SHORE A	67.67	72.33	75.00	74.33	68.67	71.60
Torquemada (PALENCIA)	ABSORCIÓN DE FUERZAS Ka55 (%)	15.02	8.87	18.66	13.74	16.20	14.50
T: 16 °C	FRICCIÓN GW (μ)	0.83	0.83	0.77	0.89	0.88	0.84
HR: 59 %	BOTE DE PELOTA BR (%)	100.37	101.02	101.74	100.13	101.46	100.94
	DESPLIZAMIENTO BAM (m)	0.62	0.65	0.59	0.68		0.64
	RUGOSIDAD Ra (μm)	1.00	3.59	1.10	1.09	1.10	1.58
	DUREZA SHORE A	71.67	72.00	71.33	73.67	72.67	72.27
C.P. Reyes Católicos Alcalá de Henares (MADRID)	ABSORCIÓN DE FUERZAS Ka55 (%)	14.11	14.63	9.50	10.55	10.65	11.89
T: 16 °C	FRICCIÓN GW (μ)	0.84	0.82	0.88	0.83	0.88	0.85
HR: 65 %	BOTE DE PELOTA BR (%)	96.45	96.88	98.58	98.05	97.88	97.57
	DESPLIZAMIENTO BAM (m)	0.49	0.56	0.57	0.55		0.54
	RUGOSIDAD Ra (μm)	2.32	1.51	3.23	2.07	3.82	2.59
	DUREZA SHORE A	68.00	65.67	88.33	84.33	85.67	78.40

ANEXO 3: ENCUESTAS


 INSTITUTO DE BIOMECAICA
 DE VALENCIA

-GESTORES/MANTENEDORES-

GRUPO DE BIOMECAICA DEPORTIVA

Encuesta sobre la opinión de los **responsables de la gestión y/o mantenimiento** del pavimento.

La presente encuesta ha de ser respondida por alguna persona experta en pavimentos deportivos y que sea responsable de la gestión y/o mantenimiento del pabellón examinado. Ante cualquier problema no dude en ponerse en contacto con Juan Vicente Durá Gil, responsable de la sección de Material y Equipamiento Deportivo (MyED) del Instituto de Biomecánica de Valencia (IBV): Tel. (96) 131.83.55 Fax. (96) 131.80.156

DATOS DE LA INSTALACIÓN.

Nombre instalación: _____
 Titularidad pública () privada ()
 Localidad: _____
 Teléfono(s): _____ Fax: _____
 Persona/s de contacto y cargo que ostenta: _____
 ¿Cuánto tiempo lleva en el cargo? _____

IDENTIFICACIÓN DE LA PISTA

Dimensiones (lado por lado): _____
 Tipo de actividades físico-deportivas practicadas:

Fútbol sala	Si () No ()	Baloncesto	Si () No ()	Voleibol	Si () No ()
Badminton	Si () No ()	Deportes de lucha	Si () No ()	Ballet	Si () No ()
Balónmano	Si () No ()	Expresión corporal	Si () No ()	Danza	Si () No ()
Mantenimiento	Si () No ()	Bailes de salón	Si () No ()	Gimnasia	Si () No ()
Esguima	Si () No ()	Aerobic	Si () No ()		
Clases EF	Si () No ()	Otros (decir cuales)	_____		

Tiene uso extradeportivo:

Conciertos de música	Si () No ()	Fiestas	Si () No ()
Cursos de formación de monitores o similares	Si () No ()	Otros (decir cuales):	_____

En caso afirmativo ¿se cubre el pavimento con algún tipo de capa protectora? Si () No () ¿de qué tipo? _____

Pag nº 1



INSTITUTO DE BIOMECAHICA
DE VALENCIA

-GESTORES/MANTENEDORES-

Tipo de pavimento: Madera Sintético Hormigón poroso Cemento

Terrazo Asfalto/Loseta asfalto Loseta/Cerámica Skimmers

Linóleo (hormigón o asfalto revestido con una fina (2-3 mm) moqueta)

Marca y modelo _____

¿Es montable/desmontable? Si () No ()

Fecha instalación: Mes _____ Año _____ Años en funcionamiento _____

Fecha última remodelación: Mes _____ Año _____ Tipo de remodelación _____

Horas diarias de uso

Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo

Tipos de usuarios, nivel deportivo (esta temporada): Alumno () Aficionado () Federado: Nivel Autonómico ()

Nivel Nacional ()

Nivel Internacional ()

Elementos móviles existentes:

Gradas Si () No () Porteras Si () No () Canchales Si () No ()

Bancos suecos Si () No () Sillas Si () No () Mesas Si () No ()

Aparatos de gimnasia Si () No () Maquinas entrenamiento de fuerza Si () No ()

Otras (decr cuales) _____

SATISFACCIÓN GENERAL CON EL PAVIMENTO

¿Qué opinión general te merece el pavimento?

Muy mala () Mala () Adecuada () Buena () Muy buena ()

DATOS DE LA EMPRESA INSTALADORA Y/O MANTENEDORA

¿Qué opinión general le merece el servicio prestado por la empresa mantenedora?

Muy mala () Mala () Adecuada () Buena () Muy buena ()

¿Qué opinión general le merece el servicio prestado por la empresa instaladora?

Muy mala () Mala () Adecuada () Buena () Muy buena ()


 INSTITUTO DE BIOMECAICA
DE VALENCIA

-GESTORES/MANTENEDORES-

¿Existe contrata de mantenimiento? Si () No() Nombre empresa: _____

¿Es la misma que la empresa instaladora? Si () No()

Nombre empresa instaladora: _____

¿Proporcionó manual de mantenimiento? Si () No ()

¿Le parece correcto? Si () No ()

¿El contacto con la empresa es rápida y fluido? Si () No ()

Los servicios/soluciones que proporciona se ajustan a la demanda Si () No ()

Otras opiniones de interés: _____

PROBLEMÁTICA DESDE LA INSTALACIÓN DEL PAVIMENTO

TIPO DE PROBLEMA		CAUSAS DEL PROBLEMA
Limpieza	Si () No()	Mal uso () Otras causas (especificar)
Grietas	Si () No()	Mal uso () Otras causas (especificar)
Pérdida/cambio de color	Si () No()	Mal uso () Otras causas (especificar)
Humedad	Si () No()	Mal uso () Otras causas (especificar)
Irregularidades en el suelo	Si () No()	Mal uso () Otras causas (especificar)
Desgaste en zonas concretas	Si () No()	Mal uso () Otras causas (especificar)
Otros (especificar)		

EN EL CASO DE PAVIMENTOS DESMONTABLES

TIPO DE PROBLEMA		CAUSAS DEL PROBLEMA
Roturas en los ensamblajes	Si () No()	Mal uso () Otras causas (especificar)
Facilidad Almacenamiento		Muy difícil () Difícil () Adecuada () Fácil () Muy fácil ()
Facilidad instalar/desmontar		Muy difícil () Difícil () Adecuada () Fácil () Muy fácil ()



CARACTERÍSTICAS DEPORTIVAS

Aspecto	Opinión	Homogeneidad (igual en todos los sitios)
Amortiguación	Muy poca () Poca () Adecuada () Mucha () Demasiada ()	Si () No ()
Fricción (agarre suelo-zapatilla)	Muy poca () Poca () Adecuada () Mucha () Demasiada ()	Si () No ()
Bote	Muy poco () Poco () Adecuado () Mucho () Demasiado ()	Si () No ()

Comentarios de interés

NORMAS DE PRESENTACIÓN PARA LA ADMISIÓN DE TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN¹

1. Los trabajos breves o sumarios de investigación que se presenten deberán tener una extensión de 30 a 40 páginas (DIN-A-4, espaciado interlineal 1,5). Se recomienda seguir el esquema general de trabajos de investigación:
 - a) *Introducción que exponga los fundamentos del trabajo y especifique claramente sus objetivos.*
 - b) *Descripción de las fuentes, métodos, materiales y equipos empleados en su realización.*
 - c) *Exposición de los resultados y discusión de los mismos.*
 - d) *Conclusiones finales. Deberá figurar con toda claridad:*
 - *Título completo del trabajo en castellano y su versión inglesa; y si se desea, también en francés.*
 - *Iniciales del nombre y apellidos de los autores.*
 - *Resúmenes del contenido, en castellano y en inglés, y si se desea, también en francés, de un mínimo de 100 y un máximo de 250 palabras, acompañados de las palabras clave que definan el contenido del trabajo (6 a 10, preferentemente extraídos del texto del trabajo).*
 - *Notas al pie de página o final del texto: Se acompañarán en anexo al final del texto, debidamente numeradas, indicándose en el texto el lugar al que hace referencia cada nota.*
 - *Referencias bibliográficas de obras citadas en el texto.*
 - *Ilustraciones: Según el tipo de ilustraciones que acompañen el trabajo (tablas, gráficas, fotografías, etc.), deben entregarse en la forma y en el soporte más apropiado para garantizar una óptima reproducción, así como en forma de copia o fotocopia impresa, en anexo al texto, debidamente numeradas y acompañados del título o leyenda correspondiente. En el texto se indicará el lugar en el que, en principio, debería insertarse cada ilustración.*
2. *Indicación de ayudas percibidas por el C.S.D.: se indicarán el tipo y los años de ayuda percibida.*
3. **Datos de los autores.** Los textos que se presenten para su publicación deben ir firmados por sus autores y acompañados de los datos completos de la institución o centro, dirección completa y teléfono de contacto de los mismos. Deberán enviar sus trabajos a la sede del CNICD, acompañados de una fotografía del autor y un breve currículum relacionado con la obra (máximo 10 líneas).
4. **Soportes de presentación.** El trabajo deberá entregarse en papel DIN-A4, por duplicado, con espacio interlineal de 1,5, en lengua castellana, y en disquete, grabado en un fichero con procesador de textos para MS-DOS: Word Perfect (v. 5.1) o ASCII, **sin códigos de formato del procesador de texto.**

¹ Extracto de la "Normativa General para la presentación de Trabajos" del Centro Nacional de Investigación y Ciencias del Deporte (CNICD).

5. Los preceptores de ayudas del C.S.D. que presenten sumarios de investigación de acuerdo con los requisitos y condiciones establecidas para su publicación por el Consejo Superior de Deportes (a través del Centro Nacional de Investigación y Ciencias del Deporte) cederán **por escrito** todos los derechos de autor y de reproducción del trabajo en cualquier tipo de soporte (incluidas microformas o bases de datos informatizadas) al C.S.D. y harán constar la aceptación de las presentes normas, haciendo uso del modelo establecido para el efecto.
6. Asimismo los autores asumirán expresamente el compromiso de realizar las modificaciones y correcciones necesarias en el caso de aprobarse la publicación, lo que se comunicará por escrito a los mismos.
7. El C.S.D. se reserva el derecho de publicación de los sumarios presentados, así como de su resumen, en el medio y momento que considere oportunos, en el marco de su programa editorial.
8. El C.S.D. remitirá a los autores cinco ejemplares de la publicación para su libre disposición.
9. En el caso de no publicarse el trabajo o sumario presentado en el plazo de dos años, el autor podrá solicitar del C.S.D. la devolución de los textos y materiales originales, quedando una copia en el CNID.
10. **Tratamiento automatizado de los datos.** A los efectos previstos en el artículo 5 de la Ley Orgánica 5/1992, de Regulación del Tratamiento Automatizado de los datos de carácter personal, los datos que se soliciten a los autores de trabajos a publicar por el C.S.D. podrán ser objeto de tratamiento automatizado. La responsabilidad del fichero automatizado corresponde al Centro Nacional de Investigación y Ciencias del Deporte del Consejo Superior de Deportes.

La admisión-aceptación de estos trabajos no implica obligatoriamente su publicación que, en cualquier caso, se decidirá por la Comisión de Investigación creada al efecto.

El C.S.D. no asumirá necesariamente las opiniones expresadas por los autores en los trabajos y sumarios de investigación que publique.

El Centro Nacional de Investigación y Ciencias del Deporte no se compromete a publicar trabajos que no reúnan los requisitos y normas marcados, ni su publicación supone que comparta las opiniones en ellos expresadas.

Nota: Estas normas se basan en normas ISO y normas UNE. Puede solicitarse su versión interna ampliada, así como el modelo oficial de cesión de derechos y aceptación de las bases, al:

CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN
EN CIENCIAS DEL DEPORTE
C/ del Greco s/n
28040 Madrid

Tel.: 91 589 05 27/28
Fax: 91 544 81 22

Colección:

INVESTIGACION EN CIENCIAS DEL DEPORTE

- 1.- Análisis biomecánico de los lanzamientos en atletismo
- 2.- Adaptación hormonal e inmunológica al entrenamiento
- 3.- Indicadores para la detección de talentos deportivos
- 4.- Estructura ocupacional y mercado de trabajo en el deporte
- 5.- Patrocinio, comunicación y deporte I:
La comercialización del deporte en una sociedad mediática
- 6.- Patrocinio, comunicación y deporte II:
Publicidad y patrocinio en eventos deportivos
- 7.- Los deportistas olímpicos españoles: un perfil sociológico
- 8.- Métodos de estudio de composición corporal en deportistas
- 9.- Valores sociales y deporte
- 10.- Educación Física y práctica docente
- 11.- El deporte en las universidades españolas
- 12.- Análisis biomecánico de las técnicas deportivas
- 13.- Rendimiento deportivo: parámetros electromiográficos (EMG),
cinemáticos y fisiológicos
- 14.- Nuevas perspectivas didácticas y educativas de la educación
física
- 15.- Experiencias de formación de docentes y entrenadores en el
ámbito de la actividad física y el deporte
- 16.- Investigación epistemológica: el campo disciplinar en
Educación Física
- 17.- Control del dopaje. Aspectos analíticos de los esteroides
anabolizantes
- 18.- Ejercicio y estrés. Aspectos celulares y moleculares
- 19.- Tecnología deportiva. Control del rendimiento de los
deportistas y de las instalaciones



Consejo
Superior de
Deportes