

Física en el Deporte

Fernando Moreno

Profesor de Física

(Egresado del Instituto de Profesores Artigas de Uruguay en 1995)

*A mi esposa Rosario, a mis hijos Agus, Meli, Juanpi y Lu, y a mi "vieja", Teresita.
Gracias a todos por su paciencia.*

Agradecimientos

En primer lugar a Dios, por todo lo que me ha regalado y confiado en la vida. En particular por estos treinta y tres años ejerciendo la docencia.

A mi hijo Juan Pablo quien falleció a los quince años, mientras hacía deporte, enseñándome siempre a darlo todo tras los objetivos planteados. Hoy me sigue animando desde el cielo.

A mi padre, Prof. Wilfredo Moreno, quien durante toda su vida me transmitió el valor de la educación y la pasión por el deporte.

A Juan Antonio Medina S.I., amigo que desde mi juventud me enseñó a vivir mi profesión generosamente, como un apostolado.

Al profesor Alejandro Villamil, compañero entrañable, quien siempre me animó a superarme como docente y hoy lo sigue haciendo más allá de su fallecimiento.

A los excelentes profesores y compañeros Álvaro Suárez, Fernando Tornaría, Leonardo Machín y Marcelo Vachetta, por corregir atentamente lo escrito durante el proceso de producción. Deberían figurar como coautores por su incansable trabajo y su valiosa contribución. Gracias también a “Torna” y “Leo” por permitirme integrar su equipo para dar talleres a estudiantes y docentes sobre este tema.

A los profesores referentes Guzmán Trinidad (impulsor de este emprendimiento), Daniel Baccino, Victoria Batista, Pablo García, Arturo Martí e Ismael Nuñez por la corrección final del trabajo y por poder contar siempre con su generoso aporte.

Al profesor Xavier Aguado Jódar (eminencia a nivel mundial en el estudio de la biomecánica deportiva), quien años atrás respondió generosamente a mi solicitud de ayuda para aprender más sobre el tema, atendiendo siempre a mis interrogantes y enviándome material para aportar a mi formación.

A mi tío Ricardo Moreno, por traducirme los escritos en inglés para que pudiera aprovecharlos al máximo.

A Sofía Berasain y al Prof. Marcelo Szwarcfiter de Editorial Contexto, por colaborar con el diseño de la tapa.

Al Prof. Oscar Collado por reunir y tramitar todos los papeles que me permitieron dedicarme a esta producción.

Al equipo de Inspección de Física del CES y al Tribunal Académico, por respaldar esta iniciativa concediéndome el año sabático.

A Andrea Cabot, Inspectora de Física del CETP, por su apoyo para que generara este material.

A la Sala de Física de Formación Docente de Montevideo, que me confió el Seminario Espacio Interdisciplinario para plantear el tema “Física en el Deporte”.

A los alumnos que me “aguataron” y ayudaron a crecer como docente a partir de sus comentarios, interrogantes e investigaciones.

La lista sería muy larga, así que resumo en un GRACIAS enorme a todos los que confiaron en mí para este desafío. Espero no se vean defraudados.

Índice

Agradecimientos	3
Índice.....	4
Prefacio	8
Introducción.....	9
Capítulo 1 - “Habrá que tomar medidas”	9
Conceptos claves para entender la Metrología Deportiva	9
¿Y en el deporte qué?	11
Unifiquemos, ¡por favor unifiquemos!	12
Si buscas un récord, pregunta antes por los instrumentos de medición	13
En busca de la justicia	14
La tecnología al servicio del deporte	14
Un laboratorio en las pistas de atletismo	18
Respetando las medidas originales.....	20
“¡Y a mí qué me importan las cifras significativas!”	21
Resumiendo	21
Enlaces para ampliar la información.....	22
Preguntas y problemas	23
Actividades.....	25
Capítulo 2 Vayamos al “cine”	26
Un viejo y renovado interés.....	26
Magnitudes cinemáticas de traslación	28
Registrando y analizando el movimiento	31
El hombre, “un bicho” versátil.....	32
Esto sí que es “andar acelerado”	34
Etapas de los 100 m llanos.....	35
“Andan volando”	38
Longitud , frecuencia de zancada y su relación con la velocidad	39
Corriendo a ciegas.....	42
¿Acercándonos al límite?.....	44
Resumiendo:	47
Enlaces para ampliar la información:.....	48
Preguntas y Problemas	49
Actividades.....	50

Capítulo 3 ¿Y por qué...? Pregúntale a la Dinámica	51
Un tema de Principios	51
Todos atraídos y atractivos: fuerzas gravitatorias	53
Plataforma reaccionaria.....	53
Fuerza de “reacción” de la superficie de apoyo	54
Nuestra Tierra geoide, giratoria y la performance deportiva.....	55
La Normal en el salto	57
Fuerza de rozamiento con la superficie de apoyo	58
Fuerzas en la marcha	60
Fuerzas en la carrera.....	62
“Golpeando fuerte”	65
Fuerzas musculares.....	67
Resumiendo	70
Enlaces para ampliar la información:.....	71
Preguntas y Problemas	72
Actividades.....	73
Capítulo 4 Avanzando en la caída	74
La “picada del loco”	75
Entrando por el aro.....	76
Balas que pican lejos.....	80
“Patilargos” saltarines.....	84
¿Movimientos antigravitatorios?.....	87
Volando sobre la arena	90
Las prótesis y sus discutidas ventajas	94
Resumiendo	95
Enlaces para ampliar la información.....	96
Preguntas y Problemas	97
Actividades.....	98
Capítulo 5 Impulso y Cantidad de Movimiento lineal.....	99
Impulsores e impulsados	99
Volviendo a Newton.....	101
Mayor tiempo, menor daño	103
Impulsados a saltar	104
Dime tu impulso y te diré cuánto te elevas	105
Calzado sí, calzado no	107

Un ganador descalzo.....	109
Conservación de la Cantidad de Movimiento lineal	110
“Ojo con el culatazo”	112
Resumiendo	113
Enlaces para ampliar la información.....	114
Preguntas y Problemas	115
Actividades.....	116
Capítulo 6 Trabajo, Energía y Potencia	117
¿Trabaja o no trabaja?	117
Formalizando el Trabajo	118
Potenciando el Trabajo	121
Potencia Muscular	123
Dispuestas para hacer lo conveniente.....	125
Fuerzas conservativas y energías potenciales	126
Energía Mecánica.....	127
“¡Qué bien que se conserva!”	128
Un “Trabajo” que no es tal.....	129
Trabajando a las corridas.....	130
Canchas, Pistas y el Coeficiente de Restitución	131
El rebote de la pelota.....	134
La Potencia de “la pulga” y CR7	137
ATP, Potencia y VO ₂	138
Golpes potentes.....	141
Resumiendo	142
Enlaces para ampliar la información.....	143
Preguntas y Problemas	144
Actividades.....	145
Capítulo 7 Una historia de giros y palancas	146
Torque o Momento de Fuerza	146
Torque Neto y equilibrio rotacional.....	147
Diseñados para ser veloces.....	148
Ventaja mecánica y palancas en el cuerpo humano	149
Centro de gravedad y condición para el equilibrio.....	150
Centro de gravedad y natación.....	153
Conservación de la cantidad de movimiento angular	153

Cuando el torque cambia todo	156
Resumiendo	156
Enlaces	157
Preguntas y Problemas	158
Actividades.....	161
Capítulo 8 Interactuando con los fluidos	162
Como sapo de otro pozo.....	162
Hombre al agua.....	163
Acuapropulsión	165
Lo bueno de tener sustento.....	165
¡Qué contra la Resistencia!.....	166
¿Y en el aire qué?.....	168
Arrojados por el aire	171
El gol de la envidia	171
Dame vórtices para ir más lejos.....	174
Resumiendo	174
Enlaces para ampliar la información.....	175
Preguntas y Problemas	176
Actividades.....	177
Anexo 1: Análisis de video: TIPS para filmar	178
Bibliografía	179
Webgrafía.....	180

Prefacio

Con el “empujón” y la ayuda de muchos, asumí el desafío de escribir sobre un tema que desde hace años ha atrapado mi atención. Mi objetivo fue generar un material sencillo y accesible, que ayude a quien tenga interés, a zambullirse en el maravilloso mundo de la física desde el apasionante mundo del deporte.

Los contenidos de física tratados son “los de siempre”; la novedad para algunos lectores puede estar en su presentación, ya que conceptos, principios y leyes se ejemplifican y aplican para diversas disciplinas deportivas. Creo que este vínculo es una ayuda para no perder de vista el anclaje de realidad de esta ciencia experimental y mostrar la utilidad de su aplicación con una motivación particular.

Al desarrollar los temas traté de dejar en evidencia cómo una mayor comprensión de la Física contribuye a una mayor eficiencia de la técnica deportiva. También cómo su aplicación tecnológica ha modificado y sigue modificando tanto el registro de medidas, los implementos utilizados, la técnica de competición, así como la forma de entrenamiento.

En cuanto al nivel de los contenidos y la formulación matemática, intenté que fueran adecuados para los cursos de Bachillerato de nuestro país, en particular para el de “Deporte y Recreación” de la UTU. No obstante espero que el material producido pueda ser útil para cursos introductorios de nivel terciario (en especial del Instituto Superior de Educación Física, UdelaR) que aborden los temas aquí tratados.

Pueden los profesores usar este material como “columna vertebral” al desarrollar el curso que tengan a cargo, aprovecharlo para un tema en particular, tomar algún ejemplo que consideren útil, o como un aporte a la realización de proyectos (especialmente si este busca ser interdisciplinario). El deporte es desde esta perspectiva, un tema transversal que ofrece posibles puntos de contacto para una provechosa coordinación entre los profesores de Física, Biomecánica, Educación Física, Informática (manejo de software), Biología, Química, Matemáticas, etc.

Respecto al desarrollo teórico, para que no sea un material muy extenso, solo se presenta lo central sin muchas demostraciones. Si alguien quisiera profundizar (es lo recomendable), deberá emplear buenos libros de física que traten los mismos temas.

Al final de cada capítulo encontrarán algunas preguntas y situaciones problema. También actividades que los docentes pueden aprovechar (con las adaptaciones necesarias) para explicar, reafirmar o evaluar la comprensión de algunos conceptos. Son solo “disparadores” que procuran motivar a seguir buscando nuevas preguntas, problemas y actividades enfocados hacia la Física en el Deporte.

Cabe aclarar que este no es un material especializado en biomecánica deportiva (sería muy atrevido de mi parte) aunque se presentan algunos contenidos de dicha área de estudio.

Respecto a las imágenes de deportistas utilizadas, algunas son de uruguayos reconocidos internacionalmente, pero también se encuentran otras, de esforzados atletas nacionales cuyos logros muchas veces no se difunden ni valoran debidamente.

Con el objetivo de darlos a conocer, encontrarán también múltiples referencias a deportes paralímpicos y “de invierno”, de los cuales los uruguayos tenemos en general poca información.

En fin, es mi deseo que este material sirva como base para que, a partir del intercambio y la reflexión sobre la experiencia, se pueda corregir, ampliar y mejorar lo hecho.

Va aquí el puntapié inicial (que espero sea digno) y... “comienza el partido”.

Introducción

Sin entrar a discutir la definición de Física y de Deporte, no debería extrañarnos que, una ciencia experimental que estudia desde la base todos los procesos naturales, nos ayude a entender los mecanismos que regulan la actividad deportiva.

La física trabaja necesariamente en base a construcciones teóricas que buscan explicar de alguna manera la realidad y predecir los resultados experimentales. Sabemos también que estas teorías van evolucionando, pero son “buenas” en cuanto tienen coherencia y cumplen con dicha función predictiva.

Ya que los deportistas y sus implementos se mueven muy por debajo de la velocidad de la luz y pertenecen al mundo de lo “macro”, se encuentran contenidos útiles en la Mecánica Clásica que comienza a formalizar [Isaac Newton](#) en la segunda mitad del siglo XVII (la Mecánica Newtoniana).

Dentro de este campo de estudio, ya que la comprensión del movimiento del cuerpo humano y su interacción con el entorno durante la actividad deportiva (lanzamiento de objetos, movilidad dentro de fluidos, etc.) es muchas veces muy compleja, nos aproximaremos a las situaciones reales con simplificaciones más o menos “gruesas” de las mismas.

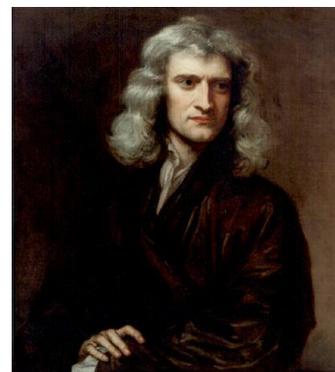


Fig. 0.01 [Isaac Newton](#) en 1689

Capítulo 1 - “Habrá que tomar medidas”

Para tratar el tema de la Física y el Deporte, no se me ocurrió mejor idea que comenzar por un tema transversal a ambos: *la toma de medidas*. No es un tema menor si se quiere una competencia justa y registros confiables, por lo cual actualmente hay muchas personas en el mundo dedicadas al estudio y desarrollo de la metrología deportiva.

Pero, ¿qué es medir?, ¿qué conceptos son importantes al medir?, ¿cómo evolucionan las medidas y los instrumentos de medición en el deporte? A estas y otras preguntas trataré a continuación de dar una primera respuesta, sirviéndome en algunos casos de sucesos deportivos.

Conceptos claves para entender la Metrología Deportiva

En física, medir es comparar una magnitud con otra de la misma especie tomada como patrón que establece la unidad. Una magnitud física es una propiedad necesariamente medible y para definirla se debe conocer claramente el proceso de medición de la misma.



Fig. 1.01 Kilogramo patrón
(Ofic. Internacional de Pesas y Medidas)

El primer problema se encuentra entonces en elegir bien el patrón y conservarlo para que no se modifique con el transcurso del tiempo. La historia de las medidas nos revela cómo el hombre se ha ingeniado para hacerlo cada vez mejor con las unidades que ha ido creando, y muchos libros describen esta evolución para las distintas magnitudes.

Debido al origen, los sistemas de unidades son variados, pero con el paso de los años y en un mundo cada vez más “globalizado”, muchos países han visto la necesidad de acordar (más por razones comerciales y tecnológicas que deportivas) un sistema de unidades común, el [Sistema Internacional \(mksA\)](#).

La exactitud de una medida depende del instrumento utilizado y de la calidad de su calibración respecto a los patrones internacionales. Es importante entonces, asegurar una buena [trazabilidad](#) del instrumento que llega a nuestras manos.

En nuestro país, por disposición de la [Ley Nº 15.298](#) le corresponde al Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU) “practicar la calibración primitiva y periódica de los patrones derivados y de los instrumentos de medición pertenecientes a personas públicas o privadas”, y la norma UNIT ISO/IEC 17025 establece los requisitos de competencia para laboratorios de calibración y de ensayo.



Fig. 1.02 Cinta métrica comercial con doble escala: centímetros y pulgadas



Fig. 1.03 Dinamómetro digital

Es bueno tener presente al medir, que existen magnitudes escalares y vectoriales. Las primeras quedan totalmente definidas al dar el valor medido y su unidad (como la masa o el tiempo), pero para las segundas se necesita conocer otras características (dirección, sentido, punto de aplicación) además de su valor o módulo; estas además presentan otras propiedades operacionales (es el caso de la fuerza, la velocidad, el impulso, etc.).

Al referirnos a los instrumentos, a su lectura y a la medida tomada, se hace necesario conocer la definición de algunos conceptos:

El **Alcance** de un instrumento es la mayor medida que este puede registrar.

La **Apreciación** de un instrumento es la menor variación de la medida que este registra. En los instrumentos de escala, la apreciación es la diferencia entre valores correspondientes a dos divisiones consecutivas.

La **Estimación** es la división “a ojo” que realiza el observador dentro de la apreciación, cuando esta y el proceso de medición lo permiten.

La **Incertidumbre absoluta** nos delimita el rango en que se encuentra la medida en torno a su valor más probable. Sabemos ya de la imposibilidad (no solo tecnológica) de encontrar “la medida exacta”, pero la evolución en la metodología y en los instrumentos de medición ha logrado disminuir dicha incertidumbre. De acuerdo a la incertidumbre absoluta de la medida, lo correcto es expresar el valor más probable solo con sus cifras significativas (las seguras más la primera cifra insegura), y existe acuerdo en la formalidad de su expresión:

Símbolo de la magnitud = (Valor \pm Incertidumbre) Unidad

La **Incertidumbre relativa** se define como el cociente entre la incertidumbre absoluta y el valor de la medida y la **Incertidumbre relativa porcentual** se determina como el producto de la anterior por cien.

La **Precisión** de una medida es la inversa de la incertidumbre relativa, y la de un instrumento se define como la relación entre el alcance del mismo y su apreciación (o estimación, si existiera).

¿Y en el deporte qué?

Todo deporte tiene necesariamente carácter competitivo. Por lo tanto supone tener claramente expresadas de antemano sus reglas y cómo se tomarán las medidas que ayudarán a determinar el ganador o los ganadores en el caso que los haya.

Pensemos en un deporte olímpico cualquiera, preguntémosnos qué medidas se debieron tomar previamente o durante la competencia y veremos que medir es una acción indispensable.

Solo por nombrar algunos ejemplos: es necesario medir *distancias* de los campos de juego, de los saltos o lanzamientos en atletismo, así como medir *tiempos* en las carreras de patinaje o “a pie”. Incluso en aquellos deportes donde se utilizan pelotas, debería medirse la *presión del aire* contenido en ellas antes del comienzo del partido. En algunos casos también se cumple que “hecha la ley, hecha la trampa” y hay que investigar casos como el [“DeflateGate”](#) en el fútbol norteamericano, para saber si los [New England Patriots](#) desinflaron los balones deliberadamente por debajo de la presión permitida.



Fig. 1.04 Indicadores de distancias en salto largo

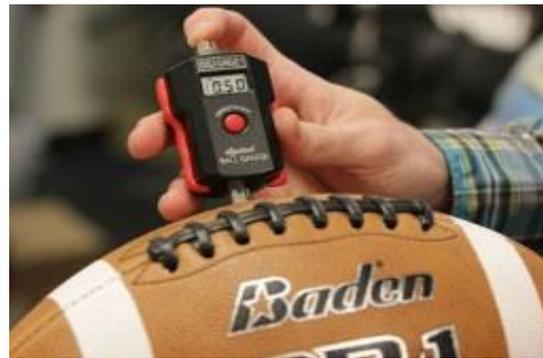


Fig. 1.05 Medida de presión del aire en una pelota

La mayor parte de las medidas se toman fuera de las canchas, en los laboratorios, donde se prueban materiales (coeficiente de restitución, elasticidad, etc.) y se analizan diferentes muestras (incluyendo las de doping).



Fig. 1.06 Estudio en laboratorio de propiedades de la pelota



Fig. 1.07 Muestra control antidoping

Quizá el caso más evidente de adquisición de medidas se da en las carreras de autos de Fórmula 1, donde además de longitudes, tiempos y masa (“kilaje”) del vehículo, existen múltiples medidas para cumplir con las [regulaciones técnicas](#) establecidas por la Federación Internacional de Automovilismo (FIA).

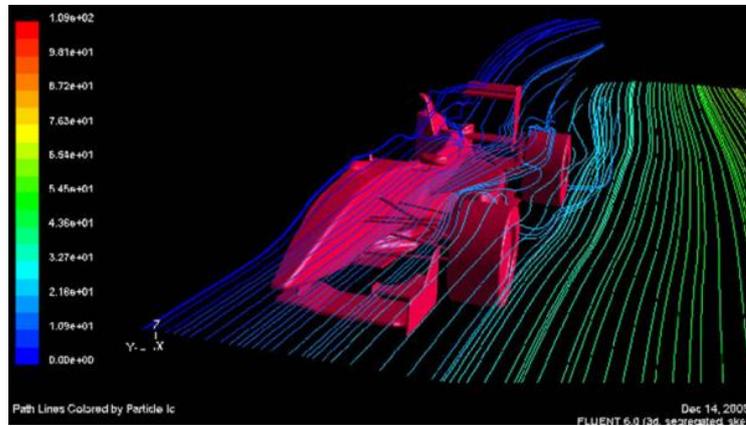


Fig. 1.08 Imagen de auto Fórmula 1 en túnel de viento

Si bien es cierto que en varios deportes se valora, por ejemplo, la belleza estética (en gimnasia artística, saltos ornamentales, etc.) y prima aquí un criterio subjetivo, cultural, que ningún instrumento es capaz de medir, también lo es que no existen deportes olímpicos donde no se apliquen instrumentos de medición para definir la competencia y/o el resultado de la misma. Hasta en el nado sincronizado se mide la temperatura y la profundidad del agua, así como el nivel de intensidad sonora de la música que acompaña.



Fig. 1.09 Nado sincronizado



Fig. 1.10 Termómetro



Fig. 1.11 Decibelímetro

Unifiquemos, ¡por favor unifiquemos!

Aunque se sigue avanzando en la unificación con el Sistema Internacional, también en el deporte sigue siendo un problema la coexistencia de distintos sistemas de unidades de medidas y se hace necesaria la conversión de un sistema a otro para poder comparar los registros.

Todavía en Estados Unidos y Gran Bretaña las distancias en atletismo se expresan generalmente en millas, aunque, desde 1976, para récords oficiales, solo se reconocen distancias métricas (excepto para la carrera de la milla¹). En el resto del mundo o en los Juegos Olímpicos (JJO) las longitudes se expresan siempre en metros.

¹ 1 milla ~ 1,609344 km

En la figura 1.12 se aprecia el récord expresado en millas por hora, del saque de tenis más veloz hasta el momento del circuito femenino (aproximadamente 211 km/h), realizado por la alemana [Sabine Lisicki](#) en Julio de 2014 en Stanford (EEUU).



Fig. 1.12 Velocidad de saque de [S.Lisicki](#), Stanford 2014



Fig. 1.13 Radar Doppler para saque de tenis

Para determinar el valor de la velocidad del saque se utiliza el [Efecto Doppler](#) que se genera en las ondas electromagnéticas emitidas por radares (Figura 1.13) colocados en el exterior de la cancha al reflejarse en la pelota en movimiento. La tecnología es similar a la utilizada por Policía Caminera para determinar la velocidad de los vehículos.

La dificultad al trabajar con diferentes sistemas de unidades y la necesidad de aplicar la correspondiente conversión, también la encontramos cuando un termómetro en una piscina nos indica la temperatura del agua en grados Celsius o en grados Fahrenheit, o cuando al expresar una energía o el trabajo realizado en una acción motora lo encontramos expresados en joules o en calorías.

Si buscas un récord, pregunta antes por los instrumentos de medición

Para poder homologar un récord ya sea nacional o internacional, es necesario que las medidas tomadas se hayan realizado con instrumentos que cuenten con la certificación de calidad otorgada por el laboratorio correspondiente.

Esto lo sabe bien [Sultana Frizell](#) (Figura 1.14), quien en el año 2003 lanzó la bala en una competencia estudiantil canadiense a una distancia de 14,84 m, 50 cm más lejos que el récord vigente de la categoría. Su alegría por el registro alcanzado duró hasta que le comunicaron que este no podría ser validado como récord nacional por no tener disponibles balanzas avaladas para certificar que la bala fuera de 4,000 kg.



Fig. 1.14 Sultana Frizell



Fig. 1.15 Balas de lanzamiento deportivo y balanza digital

En busca de la justicia

En un mundo donde la competencia en el deporte también se ha globalizado y es importante comparar justamente resultados de medidas tomadas en regiones muy distantes, se ha hecho imperioso universalizar además de las unidades, los instrumentos y procedimientos de medición. Esto no ha sido ni es algo sencillo; medir justamente tiene sus dificultades.

A modo de ejemplo, una cinta métrica no se encuentra en las mismas condiciones dada su dilatación térmica, en una pista abierta de Moscú en invierno, que “al rayo del sol” en el verano ecuatorial. Tampoco a distintas horas en una misma pista, si existen notorios cambios de temperatura. Por tal razón en las competencias de mayor nivel ya no se usa la cinta sino un [video](#) donde medir distancias.



Fig. 1.16 Midiendo en salto largo con cinta métrica

La tecnología al servicio del deporte

Al igual que toda la metrología, la deportiva ha ido evolucionando a medida que los conocimientos y la tecnología se lo fueron permitiendo. Basta comparar cómo se registró “a ojo y pulso” la llegada en la final olímpica de la carrera de los 100 m llanos de Estocolmo 1912 donde [Ralph Craig](#) gana con 10,8 s (Fig. 1.17a), con la Foto finish de la victoria de [Usain Bolt](#) en Londres 2012 con 9,63 s (Fig. 1.17b).

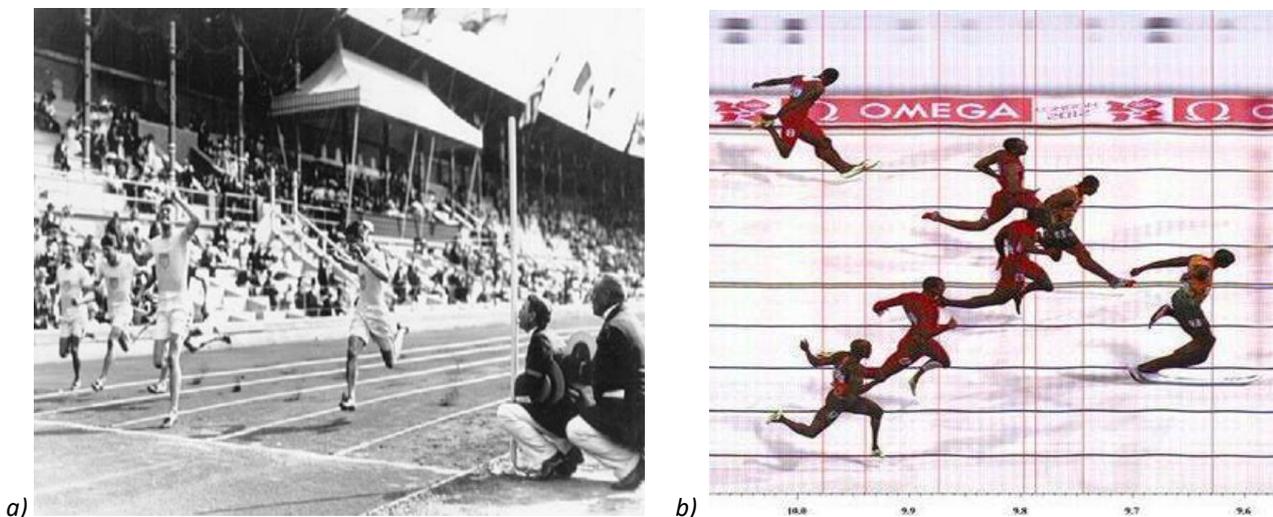


Fig. 1.17 Registro de la llegada para la carrera de 100 m en la final de los JJ.OO.: a) 1912 b) 2012

La Foto finish es especialmente útil para finales “cerrados” y consiste en una grabación de alta frecuencia (entre 1 KHz y 10 KHz)² sobre la meta. Esto permite determinar con mayor precisión el tiempo y el orden en que, por ejemplo, el torso de los corredores de pista, la rueda delantera del ciclista o el hocico de los caballos en sus carreras, alcanza la línea de llegada (Figura 1.18). Para ver un video donde se explica el funcionamiento del sistema Foto finish, hacer clic [aquí](#).

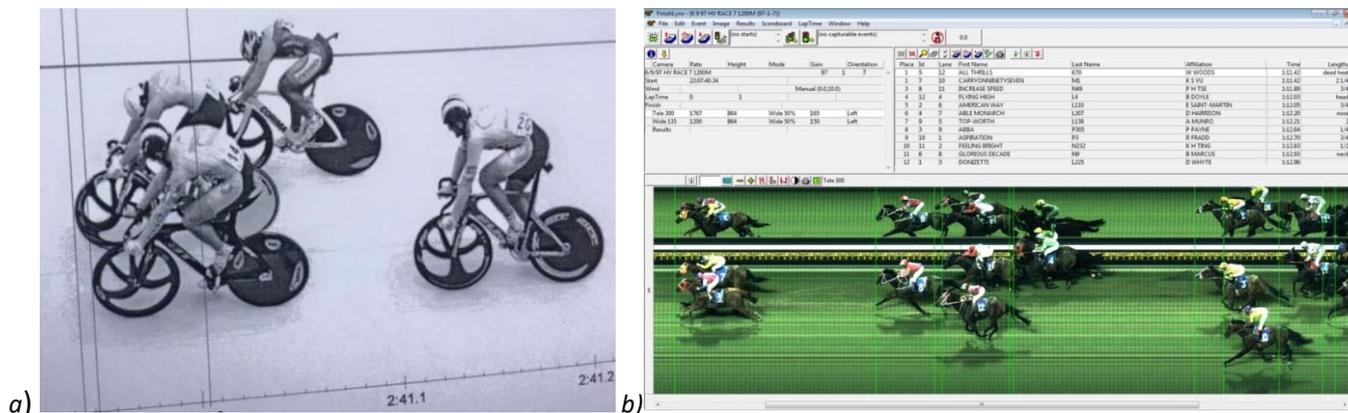


Fig. 1.18 Foto Finish al final de la carrera: a) ciclista b) de caballos

En la figura 1.19, detrás del tenista [Jean Borotra](#) (uno de los mejores en la década de 1920), vemos un línea determinando, de acuerdo a lo que su vista le permitía, si la pelota picaba o no dentro de la cancha³.

Los jueces poco imparciales, la mayor velocidad de las pelotas y el desarrollo tecnológico llevaron a que, si bien no se reemplazó el trabajo de los jueces de línea, se lo complementó con el sistema “Ojo de halcón”.



Fig. 1.19 Tenista Jean Borotra y juez de línea 1920

Este sistema (también usado en el cricket) está conformado por varias cámaras de alta frecuencia ubicadas en torno a la cancha con las cuales se filma el movimiento de la pelota. Las imágenes captadas son enviadas hacia una computadora central que las integra y las procesa para luego reproducir gráficamente la trayectoria de la pelota y la zona de contacto durante el pique (Figura 1.20). Para ver un video que explica su aplicación en el tenis, hacer clic [aquí](#).



Fig. 1.20 Sistema “Ojo de halcón” aplicado para el tenis

² Una grabación de 1 kHz significa que registra 1000 fotos por segundo

³ La línea se considera parte de la cancha de tenis

Los tenistas, si no están de acuerdo con la definición tomada por el juez, pueden recurrir (de forma limitada) a este nuevo sistema para que exista una resolución final sobre la jugada.

Un sistema similar se empleó por primera vez en el mundial de fútbol de Brasil 2014 y sirve para determinar si la pelota traspasó o no la línea del arco.

En este caso el sistema se apoya en las imágenes proporcionadas por 14 cámaras que registran 500 fotogramas por segundo y que enviadas a una computadora permiten saber si fue gol o no. En el caso que lo fuera, lo comunica al árbitro a través de una vibración en su reloj (Figura 1.21). Haciendo clic [aquí](#) encontrarán más información sobre esta tecnología utilizada en los estadios de fútbol.



Fig. 1.21 Sistema "Ojo de halcón" para el registro del gol en el fútbol

En las competencias de ciclismo y maratón, con el fin de seguir el desempeño de los deportistas se les coloca una etiqueta electrónica en la bicicleta o el calzado. En estos casos, se emplea un sistema de identificación de radio frecuencia que envía información a antenas colocadas alrededor de la pista, registrándose los tiempos en que alcanzaron las distintas posiciones (Figura 1.22).



Fig. 1.22 Uso de etiquetas electrónicas para medir tiempos en maratón y ciclismo

Volviendo al deporte preferido por la amplia mayoría de los uruguayos, en julio del año 2013 muchos se asombraron al observar que el futbolista sueco [Zlatan Ibrahimović](#), al terminar un partido e intercambiar su camiseta, tenía una especie de soutien (Fig. 1.23). Esto motivó algunos comentarios burlescos (que seguramente nunca se expresaron personalmente al jugador ya que es cinturón negro en taekwondo) de personas que desconocían la función de esta indumentaria. El chaleco "soutien", es parte de un sistema tecnológico "Global Positioning System" (G.P.S.) que permite registrar distancias recorridas, velocidad, aceleración, etc., de los futbolistas durante el entrenamiento o la competencia (Fig. 1.24).



Fig.1.23 Zlatan Ibrahimović



Fig. 1.24 Seguimiento de futbolistas por GPS

Actualmente, muchos equipos de distintos deportes (entre ellos el [Real de Madrid](#)), aprovechan esta tecnología para tomar medidas y decisiones.

[Diego Godín](#), “aguerrido” defensa del Atlético de Madrid y de la Selección Uruguaya de Fútbol, también ha usado “soutien” GPS por encima de la camiseta de entrenamiento de su equipo en España (Figura 1.25).



Fig. 1.25 Diego Godín

Pasando a la natación, el uso de la tecnología aplicada a la toma de medidas ha tenido del mismo modo una gran evolución.

Podemos observar (a partir de los JJOO de México 1968) el empleo de paneles con sensores de presión colocados en la pared de llegada de la piscina. Cuando los nadadores, al finalizar la competencia hacen contacto con dichos paneles, estos emiten señales eléctricas que detienen los cronómetros. De esta manera se disminuye la incertidumbre del tiempo medido (no siendo mayor que una centésima de segundo) y el resultado no depende de la visión, del tiempo de reacción, ni del favoritismo de los cronometristas, como sucedía previo al uso de esta tecnología (Figura 1.26).



Fig. 1.26 Natación en Juegos Olímpicos de Londres 1908

Sin este sistema, habría sido imposible determinar el ganador en los 100 m mariposa de los Juegos Olímpicos de Pekín 2008, donde [Michael Phelp](#) y [Milorad Cavic](#) llegaron casi simultáneamente (Figura 1.27).

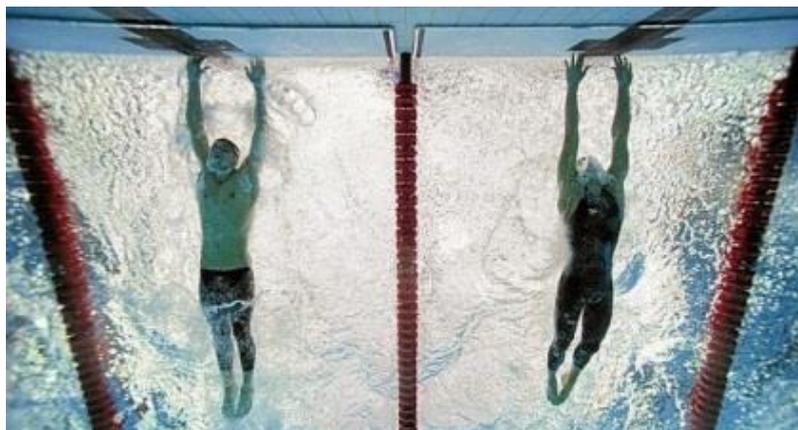


Fig. 1.27 Llegada de [Phelp](#) y [Cavic](#) en 100 m mariposa, JJOO Pekín 2008.

Para ver un video de esta competencia pueden hacer clic [aquí](#) .

Un laboratorio en las pistas de atletismo

En las carreras de atletismo, si bien se cuenta con cronómetros que distinguen milésimas de segundo (y más), el proceso de medición solo permite diferenciar tiempos de llegada separados una centésima de segundo.

Ya hablamos del adelanto que supuso el sistema *Foto finish*, pero se sigue trabajando para mejorar el registro de modo de detectar diferencias en la llegada, que al día de hoy no son identificables. Tal es el caso de la carrera realizada para definir el equipo femenino que competiría en 100 m llanos por EEUU durante los Juegos Olímpicos de Londres 2012.



Fig. 1.28 [Allyson Felix](#) y [Jeneba Tarmoh](#) 100m llanos

Era sabido que en esta competencia clasificarían las tres primeras atletas en llegar a la meta. [Allyson Felix](#) con [Jeneba Tarmoh](#)⁴ compartieron el tercer puesto tal como se aprecia en la Figura 1.28 y comenta el siguiente [video](#) .

⁴ Jeneba Tarmoh se negó a disputar una nueva carrera con Allyson Felix, por lo que esta última representó a EEUU en los JJOO.



Fig. 1.29 Salida de tacos de [Usain Bolt](#)

En los tacos de salida de las carreras de pista, encontramos también sensores (Figura 1.29) que miden la presión de apoyo de manera de identificar las salidas “en falso”, es decir si el atleta partió antes de escuchar la señal.

Si el aumento de la presión del calzado sobre los tacos se produce antes de los de 0,10 s de iniciada la competencia, se anula la salida ya que se considera que el deportista comenzó el proceso de partida antes de oír el sonido de largada y se lo descalifica.

Para conocer más sobre el reglamento de la salida de tacos puede hacer clic [aquí](#).

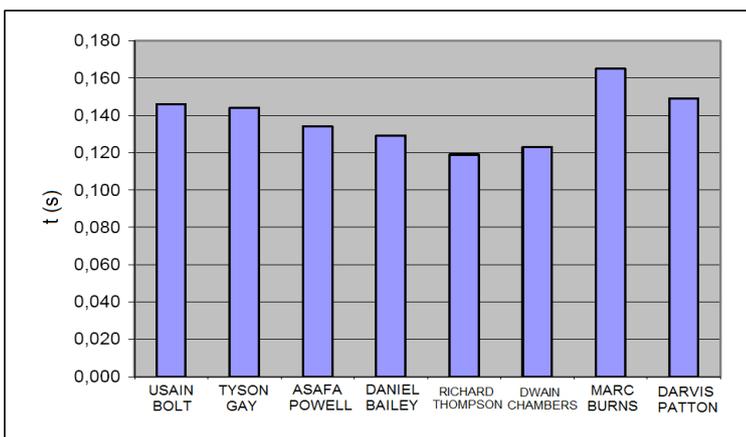


Fig. 1.30 Tiempos de reacción, Campeonato Mundial 2009, final 100 m masculino



Fig. 1.31 Anemómetro en Pista de Atletismo

Un instrumento utilizado en las pistas de atletismo, muchas veces inadvertido, pero que tiene un papel fundamental en el registro de los récords, es el anemómetro o medidor de vientos. A efecto de la homologación de un nuevo récord para 100 m, en la recta final de los 200 m o en el salto de longitud, es necesario que la componente de la velocidad del viento en el sentido de la velocidad de avance del deportista no sea mayor a 2,0 m/s. La medición se registra aproximando hasta las décimas, pero dado que en la mayor parte de los anemómetros la apreciación llega hasta centésimas, se redondea el número a la décima superior.

Para estas carreras el anemómetro se ubica del lado interior de la pista, a 50 m de la línea de llegada y la variabilidad del viento tanto en el tiempo como en el espacio hace que este criterio de homologación sea muy discutido.

Seguramente el velocista de EEUU [Tyson Gay](#) (Figura 1.32) no habrá quedado muy conforme cuando en el año 2007 no pudo obtener el récord mundial al correr los 100 m porque el anemómetro marcó 2,2 m/s. Menos conforme aun cuando los modelos físicos-matemáticos determinan que la ventaja recibida respecto a un viento de 2,0 m/s es despreciable y que la diferencia entre el viento donde se ubica el anemómetro y donde corren los atletas es normalmente de $\pm 0,5$ m/s.



Fig. 1.32 [Tyson Gay](#)



Fig. 1.33 Medida del viento “a favor” con Anemómetro

Poco se sabe que en 1942 un uruguayo logró el mejor tiempo del mundo en los 100 m llanos (Figura 1.34). Su nombre es [Juan Jacinto López Testa](#), le decían “El Gamo” y vivió en Tacuarembó donde entrenaba corriendo al lado de los vehículos que llegaban o partían de dicha ciudad. Defendió a nuestro país en los Juegos Olímpicos de Gran Bretaña en 1948 y se retiró de las competencias luego de triunfar en todas las especialidades en que participó en el torneo Sudamericano de Paraguay. Corriendo por el club Stockolmo registró una marca de 10,2 s (con cronómetro manual) y así igualó el mejor tiempo hasta el momento que poseía [Jesse Owens](#) (el “negro” que con sus éxitos en los Juegos Olímpicos de Berlín en 1936 le amargó la vida a Hitler y a los que creían en la superioridad de “la raza aria”).

Lamentablemente, la marca de López Testa no fue homologada porque al medirse la velocidad del viento a favor, el valor fue mayor al permitido. No tenemos datos del anemómetro usado ni del proceso de medición como para iniciar un reclamo y seguramente hace más de 60 años venció el plazo para hacerlo.



Fig. 1.34 [López Testa](#) ganando los 100 m llanos en 1942

Respetando las medidas originales

En el baloncesto, la altura de los aros para adultos se mantiene desde su origen en 1891, cuando el profesor de Educación Física [James Naismith](#) (Figura 1.35) de la Universidad de YMCA, Springfield (Massachusetts), quiso crear un deporte de equipo que se pudiera practicar durante el frío invernal y colocó dos canastas para juntar duraznos en la galería interior del gimnasio a una altura de 10 pies⁵ respecto al suelo.

⁵ 10 pies ~ 3,048 m

En Uruguay algunos jugadores se quejan de la poca atención que se presta a esta medida, ya que una variación de milímetros puede afectar el resultado del partido. En la [NBA](#) se mide antes de comenzar el encuentro y en el entretiempo para confirmar o ajustar dicha altura que pudo ser modificada por el contacto de los deportistas en las volcadas (también llamadas hundidas).

En el básquet paralímpico con sillas de ruedas, el aro debe encontrarse también a 3,048 m y hasta las medidas de las sillas están establecidas: las ruedas grandes no pueden sobrepasar los 66 cm de diámetro, la altura máxima del asiento no debe exceder los 53 cm y los apoya pies no deben estar a más de 11 cm del piso.



Fig. 1.35 [James Naismith](#)



Fig. 1.36 *Aro de baloncesto moderno*



Fig. 1.37 *Básquetbol paralímpico*

“¡Y a mí qué me importan las cifras significativas!”



Fig. 1.38 [Justin Gatlin](#)

si también devolvió las flores recibidas).

Seguramente esta frase puede pertenecer a algún estudiante que no ha entendido aún la importancia de expresar con las cifras correctas los datos experimentales. Pero nunca lo diría el corredor estadounidense [Justin Gatlin](#) (Figura 1.38), quien podría haber obtenido en solitario, el récord mundial de los 100 m masculino, si la Federación Internacional de Atletismo ([IAAF](#)) no hubiera revisado el tiempo que se le registró a Gatlin en mayo del 2006, al correr en Doha. El reloj había indicado 9,766 s, pero debido a que la incertidumbre (considerando el proceso de medición) afecta las centésimas, pasaron a expresar solo las cifras significativas. Se registró primero como 9,76 s (lo que hubiese sido un nuevo récord), pero luego de la corrección se aproximó a 9,77 s, por lo cual Gatlin no solo se quedó sin su récord, sino que tuvo que devolver el premio económico que ganó por el mismo (no sabemos

Resumiendo

Medir en el deporte es una necesidad y son deseables las medidas confiables, precisas y correctamente expresadas. Los procesos e instrumentos de medición han experimentado una evolución en el tiempo, permitiendo una menor incertidumbre en las medidas y, por lo tanto, mayor justicia en las decisiones arbitrales (no por ello los árbitros han dejado de recibir epítetos indeseables de parte de hinchas apasionados).

Enlaces para ampliar la información

- Sobre Metrología:
 - Página oficial de la [“Oficina Internacional de Pesas y Medidas”](#)
 - “Física con ordenador – [Unidades y Medidas](#)”, de Angel García Franco.
 - [“Conceptos básicos de metrología y teoría de errores”](#) . Física Experimental 1 IPA.
- Historia de la empresa [Omega como Cronometradora Oficial de los JJOO](#) desde 1932 hasta Río 2016
- En su libro [“Biomecánica deportiva y control del entrenamiento”](#), Gustavo Ramón Suárez describe en profundidad cómo se pueden realizar análisis de movimientos en el deporte.
- A propósito del Ojo de Halcón y su intervención en el deporte, E. Alperín publica [“De la pantalla a la vida real”](#) (en ESPN deportes.com).
- En este [artículo](#), Nick Linthorne analiza cómo un error tecnológico pudo afectar el registro del viento y con él el récord mundial femenino en los 100m llanos.
- [Video](#) que explica cómo funcionan las lecturas Dinámicas de Corredor en el Forerunner 620 (Garmin)

Preguntas y problemas

- 1) Arme un cuadro donde se nombren distintas disciplinas deportivas, las medidas que se deben tomar previamente y durante la competencia, así como los instrumentos que se utilizan para tomar dichas medidas.
- 2) El gráfico de la figura 1.39 nos muestra la evolución de las mejores marcas mundiales (menores tiempos) en la prueba de 100 m llanos para hombres. ¿Qué observaciones podemos realizar en cuanto a la evolución de las medidas? ¿A qué se deberá?

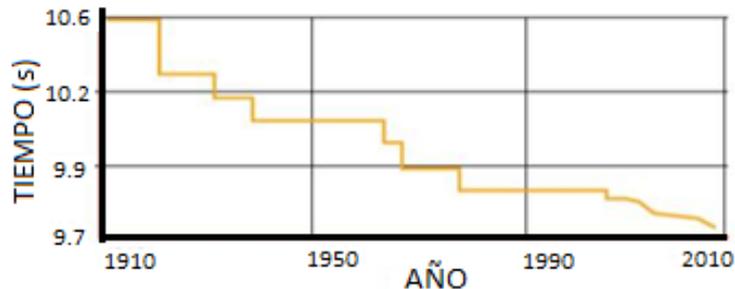


Fig. 1.39 Evolución de los tiempos récords mundiales en 100 m llanos

- 3) La foto de la figura 1.40 registra la llegada del estudiante de medicina británico [Roger Bannister](#), el 6 de Mayo de 1954 al correr la milla (1609,3 m). Le otorgaron un tiempo de 3 minutos con 59,2 segundos. Observando la imagen, analice qué seguridad puede tenerse de que haya realizado la competencia en un tiempo menor a los 4 minutos.



Fig. 1.40 [Roger Bannister](#) llegando a la meta luego de correr la milla en 1954

- 4) Para fabricar cintas métricas, se utiliza acero esmaltado o fibra de vidrio. ¿Cuál de estos materiales usarías en una pista donde los cambios de temperatura son muy considerables?
- 5) ¿En qué deportes será importante para el deportista tener un buen tiempo de reacción visual? ¿En cuáles será importante tener un buen tiempo de reacción auditivo?
- 6) Consulte los datos de una pista oficial de atletismo y de la velocidad del sonido y, teniendo presente que el sistema Foto finish puede discriminar hasta una centésima de segundo, realice los cálculos necesarios para determinar si la señal sonora proveniente de un disparo lateral podría afectar significativamente el resultado de la carrera (Figura 1.41).



a)



b)

Fig. 1.41 a) J. Gatlin llegando 0,01 s antes que F. Obikwelu en la final de los 100 m (Atenas 2004) b) Disparo de largada.

7) De acuerdo al cuadro de la figura 1.42, sabiendo que se expresaron correctamente las cifras significativas y que la incertidumbre en todos los tiempos tiene el valor 1 en el último dígito, determine:

- a) ¿En qué competencia(s) la medida del tiempo tiene mayor incertidumbre absoluta? ¿En cuál(es) es menor?
- b) ¿En qué competencia(s) la medida del tiempo tiene mayor incertidumbre relativa? ¿En cuál(es) es menor?

DISTANCIA (m)	TIEMPO RECORD MUNDIAL
100	9,69s
200	19,30s
400	43,18s
800	1m 41,11s
1500	3m 26,00s
8000	12m 37,35s
10000	26m 17,53s
42195	2h 04m 26s

Fig. 1.42 Distancias de carrera y tiempos récords mundiales

Actividades

- 1) Comparar las escalas de distintos instrumentos que midan longitudes (reglas, cintas métricas, etc.), considerando sus unidades, su apreciación, su alcance y su incertidumbre al tomar una medida.

- 2) a) Determinar experimentalmente el tiempo de reacción visual de una persona.
(Puede informarse cómo hacerlo utilizando una regla haciendo clic [aquí](#) o mediante aplicaciones como "[Reaction time](#)").
b) Determinar experimentalmente el tiempo de reacción auditivo.
(Pueden emplearse barreras ópticas conectadas a cronómetros digitales o mediante aplicaciones como "[Sprint Start Timer](#)")

- 3) Definir en equipos una carrera en línea recta donde tenga que discutirse y elegirse las unidades, instrumentos y métodos con que se tomarán las medidas de la manera más justa y universal posible.
Realizar dicha competencia con varios corredores y varios cronometristas simultáneamente.
Discutir resultados e incertidumbres de la distancia recorrida medida, de los tiempos y si es posible o no definir al ganador.

NOTA: conviene dejar espacio a la creatividad y no dar instrumentos de medición hasta que cada grupo lo solicite. Si se va a utilizar cronómetros, sería bueno que estos tuvieran apreciaciones diferentes y discutir cuánto afecta esto a la incertidumbre de la medida.

Si se realizara una filmación y se quisiera conocer algunos datos básicos para realizarla de la mejor manera, leer [Anexo 1](#).

Capítulo 2 Vayamos al “cine”

La palabra “cine” proviene del griego “kiné”, que significa “movimiento”. Se denomina Cinemática a la rama de la Física que describe los movimientos sin considerar sus causas. Es como una vecina que nos describe todo lo que sucede en el barrio, pero nunca explica (ni le interesa) por qué pasó tal o cual cosa.

A continuación encontrarán un breve resumen de la historia del estudio del movimiento y algunas definiciones de magnitudes cinemáticas que nos ayudarán a entendernos al referirnos a ellas. También se presentan datos y comparaciones de dichas magnitudes en distintos deportes, con particular atención a la carrera de pista de los 100 m llanos, para terminar considerando el límite de nuestras capacidades deportivas.

Un viejo y renovado interés

El interés del hombre en la Cinemática se remonta a tiempos prehistóricos. Interesado en el movimiento propio, de los animales y de sus instrumentos de caza, su motivación primordial seguramente no era deportiva sino de supervivencia, ya que de ello dependía el poder llevar unos “churrascos” para alimentar a su familia o tribu.

Los conocimientos sobre el movimiento obtenidos a través de la observación y la experiencia, se transmitían oralmente a las nuevas generaciones, y su importancia quedó reflejada en el arte gráfico hallado en las cavernas (Figura 2.01).

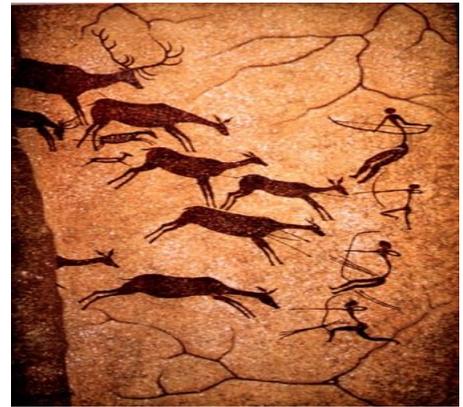


Fig. 2.01 Arte rupestre Post Paleolítico.

Dando un “salto largo” en el tiempo hasta los [primeros Juegos Olímpicos](#), se reconoce claramente en ellos la búsqueda de gestos y técnicas eficientes para cada disciplina. Los conocimientos eran transmitidos por el maestro o instructor, quien comunicaba lo aprendido en los gimnasios de la época.

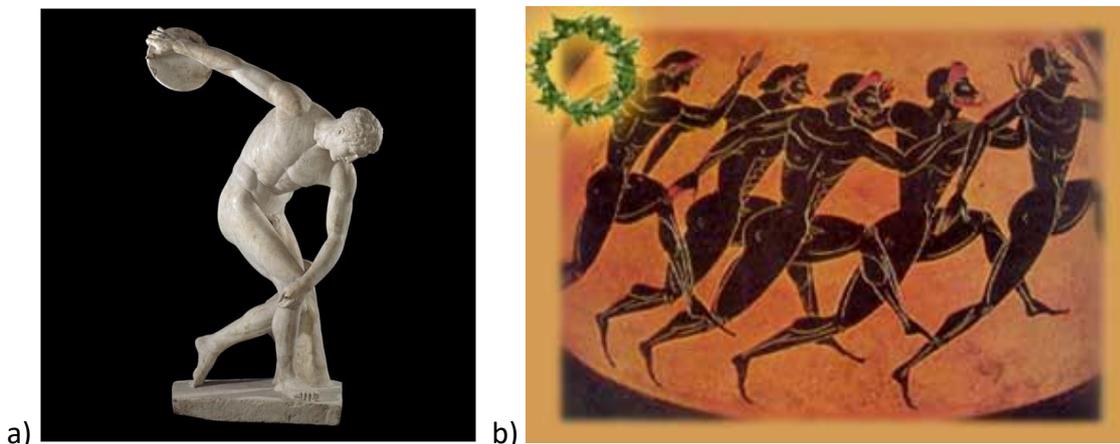


Fig. 2.02 a) “el discóbolo” de Mirón S.V. A.C. b) Representación de las carreras en los Juegos Olímpicos antiguos.

Algunos historiadores afirman que [Aristóteles](#) y [Platón](#) fueron los fundadores de la [biomecánica](#), ya que los primeros escritos que se conocen sobre este tema les pertenecen.

También se menciona al romano [Galeno](#) (médico del Colegio de Gladiadores y primer médico deportivo de la historia) como el gran impulsor del estudio sobre el movimiento humano y la [kinesiología](#) durante el Siglo II D.C.

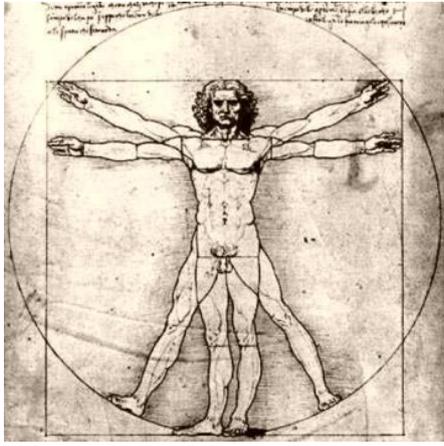


Fig. 2.03 Hombre de Vitrubio de Leonardo Da Vinci.

Sin embargo, habrá que esperar hasta el Siglo XV a que [Leonardo Da Vinci](#) escriba (con gran detalle y complejidad) sobre la mecánica del cuerpo humano. Y al siglo siguiente para que [Giovanni Alfonso Borelli](#) en su obra “*Sobre el movimiento de los animales*”, aplique la matemática a los problemas del movimiento muscular, comparando el mecanismo animal al de una máquina.

También [Galileo Galilei](#), [Lagrange J.L](#), [Bernoulli D.](#), [Euler. L](#) y [Young T.](#) (por nombrar a algunos científicos famosos) consideraron el problema del movimiento del cuerpo humano, especialmente buscando soluciones mecánicas a problemas biológicos.

En la segunda mitad del siglo XIX el sistema de fotografía múltiple desarrollado por el investigador británico [Eadweard Muybridge](#) (Figura 2.04) permitió un análisis más pormenorizado de los movimientos, y el enfoque al estudio de los del deporte en particular.

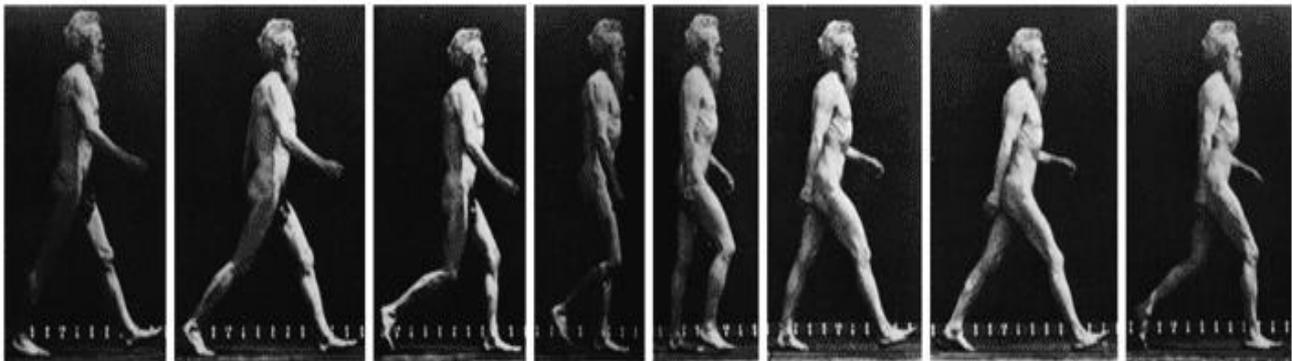


Fig. 2.04 Fotografías de Eadweard Muybridge para estudiar su propia marcha a partir del registro secuencial.

Y en este rápido viaje por la historia del estudio cinemático, llegamos al Siglo XXI. En él, debido a las grandes sumas de dinero que mueve el deporte, se ha acrecentado la inversión en la investigación para lograr el máximo rendimiento en todas las disciplinas (Uruguay no es el mejor ejemplo de ello).

El aporte de los avances tecnológicos no ha sido menor, en especial si consideramos las cámaras filmadoras, que cada vez con mayor definición y frecuencia de muestreo⁶, se han convertido en una herramienta fundamental de registro para el estudio de los movimientos. En ocasiones se estudia el accionar del deportista en su conjunto, en otras el movimiento de sus segmentos corporales, y para ello se señalizan sus extremos con puntos luminosos tal como muestra la Figura 2.05.

⁶ Número de fotos por unidad de tiempo tomadas en la filmación

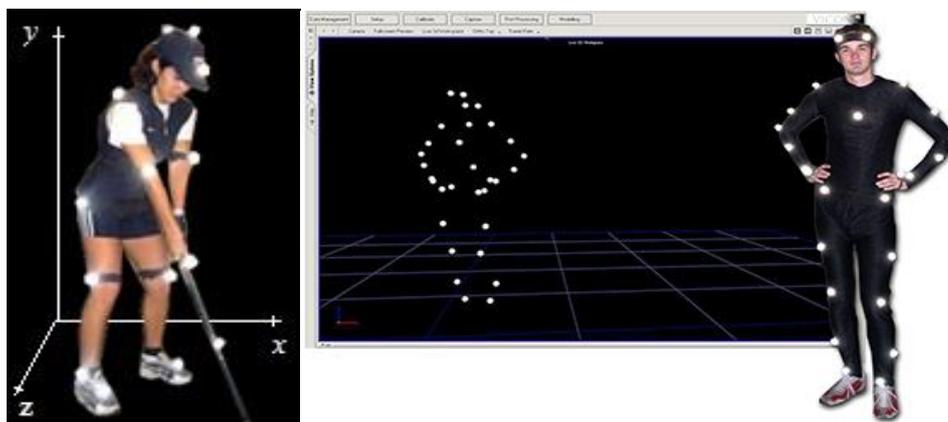


Fig. 2.05 Indicadores de posición para el registro de movimientos de segmentos corporales en 3D

Magnitudes cinemáticas de traslación

A continuación veremos algunas magnitudes necesarias para describir el movimiento de *cuerpos puntuales*. Es decir, cuerpos que tienen dimensiones despreciables respecto a las de su movimiento, por lo que solo se considera su traslación, no teniéndose en cuenta rotaciones, deformaciones, etc. Al estudiar un movimiento es necesario establecer previamente cuál es nuestro sistema de estudio (el objeto a seguir) y un sistema base de referencia.



Fig. 2.06 Santiago Urrutia

Tomaremos como ejemplo el movimiento del joven piloto coloniense [Santiago Urrutia](#)⁷ (Figura 2.06), frenando con su auto al tomar una curva en el plano horizontal. Lo representaremos desde una vista aérea para un sistema de referencia en reposo respecto a la pista.

Veamos la definición de algunas magnitudes cinemáticas al ir de P a P₁ por la trayectoria⁸ representada:

- **Distancia recorrida (d)**

Es la longitud del recorrido medida sobre la trayectoria (Figura 2.07). En nuestro ejemplo, la distancia recorrida es la longitud del arco que une los puntos P y P₁. Es una magnitud escalar y su unidad en el [S.I.](#) es el metro (m).

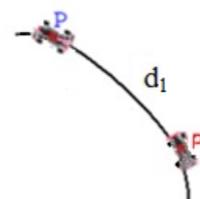


Fig. 2.07 Distancia recorrida

- **Rapidez media (μ_m)**

Es el cociente entre la distancia recorrida (d) y el intervalo de tiempo en realizarla (Δt).

$$\mu_m = \frac{d}{\Delta t}$$

⁷ Campeón de la [Pro Mazda Championship](#) en el año 2015. Su actuación ese año le valió un reconocimiento por parte de la [FIA Americas Awards](#). En el año 2016 compitió exitosamente en la categoría [Indy Lights](#) con el equipo [Schmidt Peterson](#).

⁸ Lugar geométrico conformado por el conjunto de puntos por los que pasa el móvil al transcurrir el tiempo.

Es una magnitud escalar al definirse como el cociente entre dos magnitudes escalares, y su unidad en el S.I. es el metro por segundo (m/s)

- Rapidez instantánea (μ)

Si determinamos la rapidez media teniendo como instante inicial el del pasaje por P pero tomando cada vez intervalos de tiempo más pequeños, la distancia recorrida será d_2 al considerar P_2 y disminuirá junto con el tiempo al estar los puntos cada vez más próximos a P (figura 2.08).

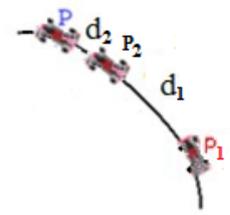


Fig. 2.08

El valor de la rapidez media se irá aproximando al valor de la rapidez del piloto al pasar por P. En el límite, cuando el intervalo de tiempo tiende a cero, estaremos determinando el valor de la rapidez instantánea en P, la cual se define como:

$$\mu = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{d}{\Delta t}$$

- Posición (\vec{r})

Luego de elegir unos ejes x e y ortogonales (perpendiculares entre sí) en el plano del movimiento, \vec{r} es un vector que se dispone desde el origen del sistema de referencia hasta la ubicación del cuerpo en cierto instante. La posición queda definida en el plano a partir de sus coordenadas x e y (Figura 2.09).

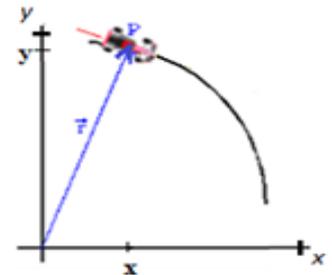


Fig.2.09 Vector posición

- Desplazamiento ($\Delta\vec{r}$) o variación de posición

Un cuerpo se mueve si su posición cambia (el movimiento es entonces siempre relativo al sistema de referencia elegido).

Si en el instante t se encuentra en P, su vector posición es \vec{r} . Si en un instante posterior t_1 se encuentra en P_1 , su posición ahora es \vec{r}_1 . Se ha desplazado $\Delta\vec{r} = \vec{r}_1 - \vec{r}$ en el intervalo de tiempo $\Delta t = t_1 - t$. El desplazamiento tiene su origen en P y su extremo en P_1 (Figura 2.10). Es una magnitud vectorial, independiente de la trayectoria y su unidad en el S.I. es el metro (m)

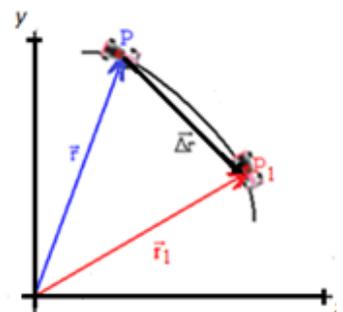


Fig. 2.10 Desplazamiento

- Velocidad media (\vec{v}_m)

La velocidad media se define como el cociente entre el desplazamiento ($\Delta\vec{r}$) y el intervalo de tiempo en realizarlo (Δt).

$$\vec{v}_m = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}$$

Es una magnitud vectorial al definirse como el cociente entre una magnitud vectorial y una escalar, su unidad en el S.I es el metro por segundo (m/s). De acuerdo a su definición, la velocidad media tiene la misma dirección y sentido que el desplazamiento (Figura 2.11).

La velocidad media al desplazarse de un punto a otro sería entonces la velocidad que, manteniéndose constante, realizaría dicho desplazamiento en el intervalo de tiempo transcurrido.

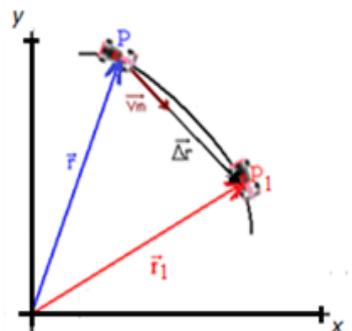


Fig.2.11 Velocidad media

- Velocidad instantánea (\vec{v})

Como podemos ver en la figura 2.12, a medida que hacemos tender el intervalo de tiempo a cero a partir del pasaje por P, la dirección de la velocidad media (recta que une sucesivamente el punto P, con los puntos P_1, P_2, \dots) tiende hacia la tangente de la trayectoria en P.

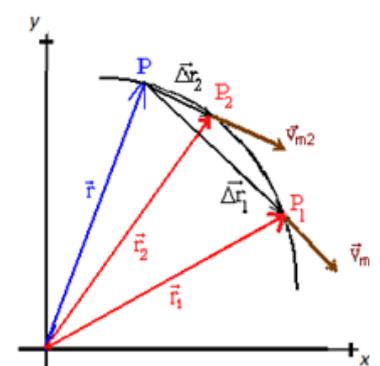


Fig.2.12

Si vamos determinando la velocidad media teniendo como instante inicial el del pasaje por P e intervalos de tiempo cada vez más pequeños, la misma irá tendiendo a la velocidad al

pasar por dicho punto (Figura 2.13). En el límite, cuando el intervalo de tiempo tiende a cero, estaremos determinando la velocidad en ese instante

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$$

La velocidad instantánea nos indica “lo rápido” que varía la posición y en qué sentido lo hace. En el instante t , el auto se encuentra en P y tiene una velocidad \vec{v} cuya dirección es tangente a la trayectoria en dicho punto. Cuando el intervalo de tiempo $\Delta t \rightarrow 0$, el módulo del desplazamiento $|\Delta \vec{r}|$ es igual a la distancia recorrida d (el segmento de recta y el arco de curva se superponen), por lo que el módulo de la velocidad instantánea es igual al valor de la rapidez

$$|\vec{v}| = \mu$$

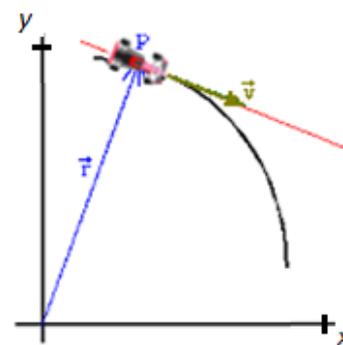


Fig.2.13 Velocidad instantánea

Aceleración media (\vec{a}_m)

En el instante t el móvil está en P y tiene una velocidad \vec{v} cuya dirección es tangente a la trayectoria en dicho punto. En el instante t_1 el móvil se encuentra en el punto P_1 y tiene una velocidad \vec{v}_1 (Figura 2.14).

El piloto ha cambiado su velocidad porque cambió su sentido y quizás (como en este ejemplo) también su módulo. La variación de la velocidad estará dada por el vector $\Delta \vec{v} = \vec{v}_f - \vec{v}_i$

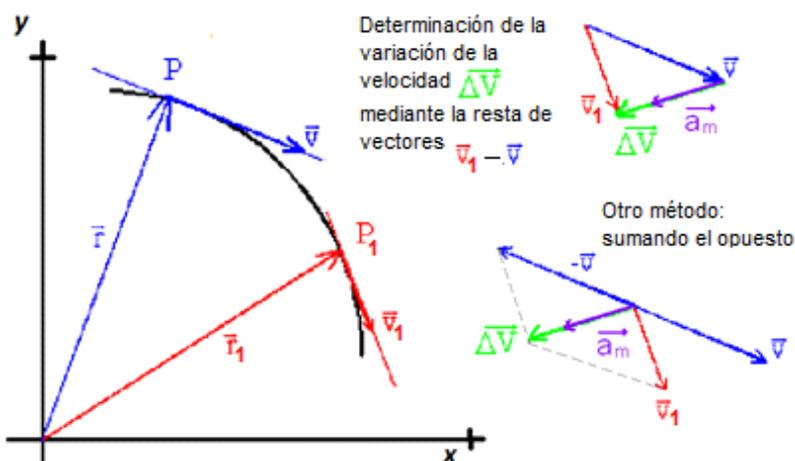


Fig.2.14 Variación de velocidad y aceleración media

Se define la aceleración media como el cociente entre la variación de velocidad $\Delta \vec{v}$ y el intervalo de tiempo $\Delta t = t_1 - t$ en el que tiene lugar dicho cambio.

$$\vec{a}_m = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$$

Es una magnitud vectorial al definirse como el cociente entre una magnitud vectorial y una escalar, su unidad en el S.I es el metro por segundo al cuadrado (m/s^2). De acuerdo a su definición, la dirección y el sentido de la aceleración media \vec{a}_m serán las mismas que las de la variación de velocidad ($\Delta \vec{v}$)

- Aceleración instantánea (\vec{a})

La aceleración en un instante \vec{a} será el límite de la \vec{a}_m para Δt tendiendo a cero

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt}$$

La aceleración instantánea nos indica “lo rápido” que varía la velocidad y en qué sentido lo hace.

Registrando y analizando el movimiento

Como ya se mencionó, el desarrollo tecnológico permitió mejorar el estudio cinemático. Actualmente, mediante la filmación con varias cámaras que envían los datos a una computadora, se puede establecer la posición del objeto de estudio respecto a un sistema de coordenadas de referencia. Este procedimiento se utiliza también para realizar animaciones de los dibujos a partir del movimiento real de personas o animales ([ver](#) cómo se hace en Uruguay).

En el mundial de fútbol Brasil 2014, la aplicación de esta tecnología (Figura 2.15) permitió determinar la distancia recorrida, la velocidad máxima, etc., de los jugadores durante todos los partidos.

En la figura 2.16 vemos el registro de la trayectoria sobre el campo de juego y el gráfico del módulo de la velocidad en función del tiempo de

[Marcelo Vieira](#) (lateral de la Selección de Brasil) en un partido “amistoso”. Estos datos son valorados por el entrenador y el preparador físico ya que les permiten tener elementos objetivos y cuantificables a la hora



Fig. 2.15 Cámaras filmadoras para seguimiento de futbolistas

en la figura 2.16 vemos el registro de la trayectoria sobre el campo de juego y el gráfico del módulo de la velocidad en función del tiempo de

[Marcelo Vieira](#) (lateral de la Selección de Brasil) en un partido “amistoso”. Estos datos son valorados por el entrenador y el preparador físico ya que les permiten tener elementos objetivos y cuantificables a la hora

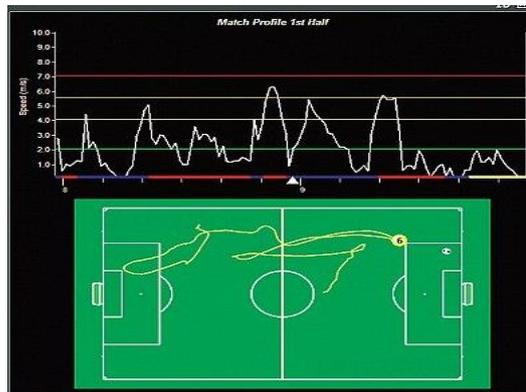


Fig. 2.16 Registro de la velocidad en función del tiempo y de la trayectoria del jugador [Marcelo Vieira](#) mediante cámaras filmadoras conectadas a una computadora



Fig. 2.17 Imagen del Smartphone de un corredor al regresar al punto de partida.

de tomar decisiones sobre el jugador (cambio de posición, de entrenamiento, “tirón de orejas”, sustitución, etc.).

También se utiliza el seguimiento satelital, especialmente cuando se quiere estudiar el movimiento del deportista en recorridos amplios.

En la figura 2.17 vemos una imagen de la pantalla del teléfono “inteligente” (smartphone en inglés) de un corredor que, al regresar al punto de partida, utiliza esta tecnología para obtener una representación de su trayectoria y el tiempo insumido.

A través de estas aplicaciones se puede contar además con la información de la distancia recorrida, la rapidez media al completar el circuito, así como de la posición y la velocidad en cada instante.

El hombre, “un bicho” versátil

Si comparamos el desempeño de los atletas de primer nivel al saltar, correr o en otras actividades, con el de algunos animales al ejecutar las mismas, veremos que los primeros quedan en clara desventaja.

Craig Sharp, ex atleta, veterinario investigador, especialista en medicina deportiva y rendimiento humano, dedicó muchos años a este tema y resumió su trabajo en el artículo *"Comparative Physiology: Animal athletes: a performance review"*, publicado en la revista *Veterinary Record*. En él hace referencia al récord mundial de 49,82 s obtenido por el nadador [Michael Phelps](#) (apodado el "Tiburón de Baltimore") en la especialidad de 100 m mariposa (que significa una rapidez media algo superior a 7,0 km/h), y la compara con los 32 km/h que alcanza un tiburón de verdad (el Mako de aleta corta). Más pobre aún es el desempeño del nadador en relación a un pez Vela que puede nadar a más de 100 km/h (Figura 2.18).



Fig. 2.18 a) [Michael Phelps](#)

b) Mako de aleta corta

c) Pez Vela

“El rayo” [Usain Bolt](#) (figura 2.19), atleta jamaicano considerado el más rápido del mundo en la actualidad, alcanza la impresionante velocidad de 44 km/h. Sin embargo, sería prontamente atrapado por perros galgos, ya que estos pueden correr a 70 km/h y más aún por los guepardos que superan la velocidad de 100 km/h.



Fig. 2.19 [Usain Bolt](#) y guepardo corriendo

Respecto al salto de longitud, un canguro rojo (Figura 2.20a) puede saltar distancias de 13 m, registro mayor al récord mundial de 8,95 m establecido por [Mike Powell](#) (Figura 2.20b). El salto de altura de este marsupial puede llegar a los 3,1 m, siendo superior al récord de salto alto del “príncipe de las alturas” [Javier Sotomayor](#) de 2,54 m (Figura 2.20c).



a)

a) [Canguro rojo](#)

b)

b) [Mike Powell](#)

c)

c) [Javier Sotomayor](#)

Pero si consideramos el salto en relación a las longitudes corporales, el animal que nos supera más ampliamente es la pulga, que avanza en un salto 220 veces el largo de su cuerpo y alcanza una altura 150 veces mayor a la suya.

En la maratón, [Dennis Kimetto](#) ostenta el récord mundial al establecer un tiempo de 2 horas, 2 minutos y 57 segundos (Berlín 2014). Pero un caballo de resistencia puede recorrer esos 42,195 km en la mitad de tiempo (figura 2.21).

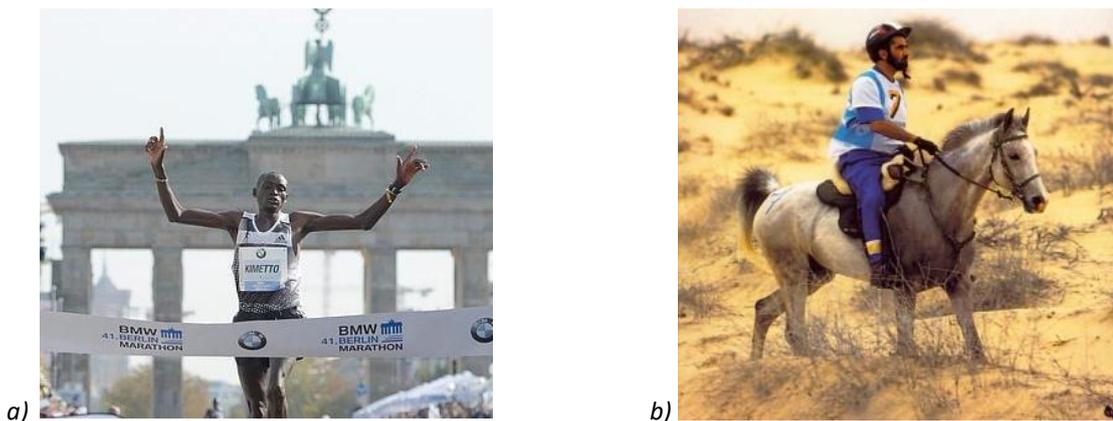


Fig. 2.21 a) [Dennis Kimetto](#), récord mundial de maratón (Berlín 2014) b) Carrera de caballos de resistencia

Podríamos seguir con las comparaciones y la “devaluación” de la especie humana en cuanto a sus cualidades deportivas. Sin embargo el investigador Craig Sharp afirma al culminar su publicación que, nuestra especie es a su juicio *“la más versátil físicamente, que es lo que, a fin de cuentas, muestran los Juegos Olímpicos”*.



Fig. 2.22 Noruego [Anders Fannemel](#) récord en salto largo de esquí (251,5m).
Febrero 2015.

Además, gracias a su inteligencia y al desarrollo tecnológico que ella le permite, el hombre logra superar sus límites naturales. Una muestra de ello se da en el salto de esquí (deporte olímpico de invierno). En él, al colocar los atletas tablas bajo sus botas, disminuyen la presión que ejercen sobre la rampa de nieve para poder deslizarse sobre la misma. Encerando la cara inferior de la tabla disminuyen también su rozamiento con la superficie de apoyo. De esta manera algunos deportistas logran velocidades mayores a los 100 km/h antes de iniciar el vuelo para aterrizar lo más lejos posible.

El récord en cuanto al descenso más veloz, sin vehículo alguno, lo tiene el vicepresidente de Google [Alan Eustace](#) (Figura 2.23). En octubre del 2014, subió en un globo a 41 km de altura provisto de un traje de astronauta, se dejó caer y alcanzó una velocidad de 1322 km/h (ver la filmación [aquí](#)).

Por último, si no practicamos ninguno de estos deportes “extremos” y queremos mejorar nuestra autoestima, podemos compararnos con el caracol que avanza a 0,05 km/h, una velocidad aproximadamente 100 veces menor a la de nuestro caminar cansino.



Esto sí que es “andar acelerado”

Consideraremos ahora la aceleración de traslación en los distintos deportes y la capacidad humana de soportarla. Los mejores velocistas de pista logran aceleraciones en el entorno a los $7,0 \text{ m/s}^2$ en los primeros 10 m de la recta, y si quisiéramos volver a comparar con algún animal, los leones alcanzan aceleraciones de $9,5 \text{ m/s}^2$.⁹ Algunas aceleraciones del cuerpo en su conjunto o de alguno de sus miembros, tienen relación directa con el esfuerzo muscular, y en estos casos, las grandes aceleraciones están vinculadas a una mayor probabilidad de lesiones (contracturas, elongaciones, desgarros). Por esta razón se constata que algunas lesiones en los miembros inferiores se producen “al arrancar” la carrera, al frenar bruscamente o al cambiar rápidamente el sentido de su velocidad. Sabedores de esto, los corredores en las pruebas de pista no se detienen “de golpe” al llegar a la meta, sino paulatinamente, disminuyendo así su aceleración de frenado. Si los valores de aceleración son muy grandes, no suelen expresarse en la unidad del Sistema Internacional (m/s^2), sino en su relación con la aceleración gravitatoria g (cuyo valor aproximado es $9,8 \text{ m/s}^2$).

Los autos de Fórmula 1 (F1), al aumentar la velocidad en la primera recta de competencia, alcanzan aceleraciones de $1,5g$. Y al tomar una curva, estos automóviles adquieren aceleraciones próximas a los $4g$ cambiando la dirección de su velocidad (Figura 2.24).

Si un conductor imprudente (por no atribuirle otro calificativo) viaja en un F1 por la ruta a 340 km/h y al ver a la Policía Caminera frena rápidamente pasando a una velocidad de 90 km/h , tardará aproximadamente $2,0 \text{ s}$ en hacerlo, siendo el valor medio del módulo de su aceleración de frenado $3,5g$. Una aceleración de frenado de semejante magnitud accionaría los airbag de los autos de serie. Estos autos, sobre el pavimento seco, pueden frenar con aceleraciones próximas a la gravitatoria g .

El piloto polaco [Robert Kubica](#), en el gran Gran Premio de Canadá de F1 en 2007, experimentó un terrible accidente (puede verse su filmación haciendo clic [aquí](#)). En él sufrió una aceleración máxima de $75g$ durante un milisegundo, lo que le ocasionó graves lesiones.

Un “caza” (avión de combate) puede tener en un giro una aceleración de $7g$ y a los pilotos (así como a los astronautas) se los entrena para soportar esta situación haciéndolos circular en una centrifugadora ([aquí](#) una filmación de este “mambo” de pruebas). También se les brinda trajes “anti- g ” que aumentan la presión en la parte más baja del abdomen y en las piernas inflando compartimientos de aire a medida que aumenta la aceleración vertical ascendente. Así se evita la falta de irrigación al cerebro y la pérdida de la conciencia.



Fig. 2.24 F1 siendo acelerado para transitar la curva

⁹ Datos de Elliot et al, 1977, En: Alexander, R. M. Principles of Animal Locomotion, Princeton University Press

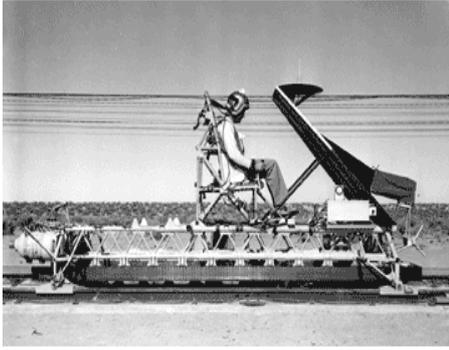


Fig. 2.25 John Paul Stapp, sobre el "Gee Whiz"

En el mes de diciembre de 1954, [John Paul Stapp](#), oficial de la Fuerza Aérea de EEUU, subió al trineo cohete que había creado apodado el "Gee Whiz" para estudiar los efectos de la aceleración en el cuerpo humano (Figura 2.25). Sobre una vía en Nuevo México, fue propulsado hacia adelante llegando a una velocidad próxima a la del sonido, para luego detenerse en 1,4 s con la brutal aceleración de 45g (para ver este experimento- nada aconsejable para repetir en casa- hacer clic [aquí](#)). Sin embargo, quien figura en el libro de "Records Guinness" como el ser humano en alcanzar la mayor aceleración, es su compañero de experimentos, [Eli Beeding](#), quien alcanzó en el

trineo una aceleración de frenado de 82,6g. La aceleración fue superior, pero durante un intervalo de tiempo mucho menor al de Stapp (para leer más sobre este experimento clicar [aquí](#)).

Así que "lo que mata" o lesiona no es la velocidad, de hecho estamos moviéndonos en el entorno de 100 000 Km/h alrededor del sol y ninguno se hace daño por esto. Las lesiones graves se deben a los elevados valores de las fuerzas que actúan sobre el cuerpo humano al provocar grandes aceleraciones.

Consideremos como ejemplo el Bungee Jumping, donde la persona realiza un salto "al vacío" desde cierta altura, sujeta generalmente por los tobillos a una cuerda elástica, fija en el otro extremo (Figura 2.26). Dicen los entendidos en este "derroche de adrenalina", que algunas cuerdas vienen con una funda y si no se retira, limita la elongación de la goma disminuyendo el tiempo de frenado durante la caída. Por esta razón o por no usar la cuerda correspondiente al peso del saltador, si la aceleración de frenado es mayor que la deseable, puede ocasionar en los deportistas: desprendimientos de retina, rotura de capilares oculares, lesiones en los tobillos, etc.



Fig. 2.26 Bungee Jumping

Así que, como en tantos otros aspectos de la existencia, los cambios bruscos (en este caso de velocidad) tienen sus riesgos. Pero en ocasiones, valen la pena.

Etapas de los 100 m llanos

El módulo de la velocidad media¹⁰ de los mejores corredores en esta disciplina es aproximadamente de 10 m/s (36 km/h), pero durante el avance suceden etapas con distintas características.

¹⁰ El cociente entre el desplazamiento y el tiempo

Para entender estas etapas, nos puede ayudar observar los gráficos de distancia recorrida y velocidad en función del tiempo para [Usain Bolt](#) y [Richard Thompson](#), primero y segundo respectivamente en la final de los 100 m llanos de los Juegos Olímpicos de Pekín 2008 (Figura 2.27):

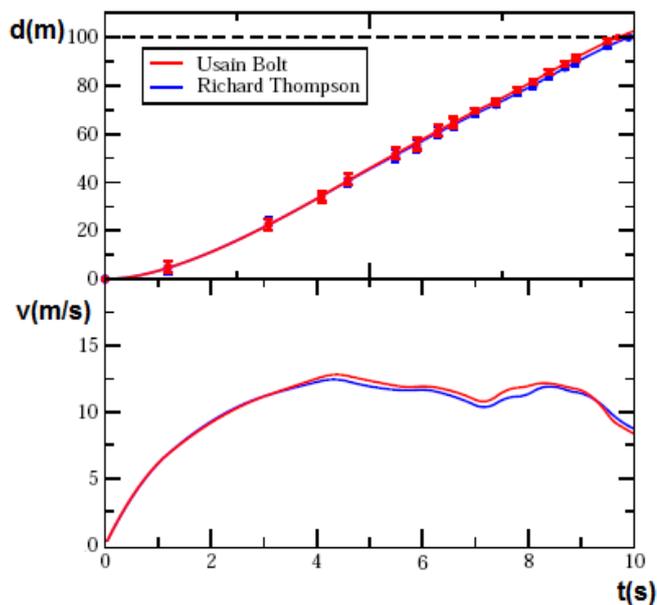


Fig. 2.27 Gráficos $d=f(t)$ y $v=f(t)$ final 100 m llanos JJ.OO. Pekín 2008
Bolt con trazo rojo y Thompson con azul.
(Modificado de <http://arxiv.org/pdf/0809.0209v2.pdf>)

Allí se observa que los primeros pasos son fundamentalmente de aceleración en el sentido de la velocidad. Pasados los 4,0 s alcanzan una velocidad máxima superior a los 12 m/s (43 km/h), siendo la de Bolt levemente mayor que la de Thompson. En este tramo la amplitud del paso de los corredores de elite supera los 2,0 m y dan aproximadamente cinco pasos por segundo.

En una segunda etapa, el valor de la velocidad es aproximadamente constante acercándose a la meta.

En los últimos metros de la carrera, no logran mantener la frecuencia de pasos y disminuye el valor de la velocidad (la de Bolt cae más abruptamente porque “el fiestero” comienza a festejar antes de la llegada).

Según García Manso y cols. (1998), existe una función decreciente entre la velocidad máxima de carrera que es capaz de alcanzar un velocista y el tiempo que logra en los 100 metros tal como se aprecia en el gráfico de la Figura 2.28.

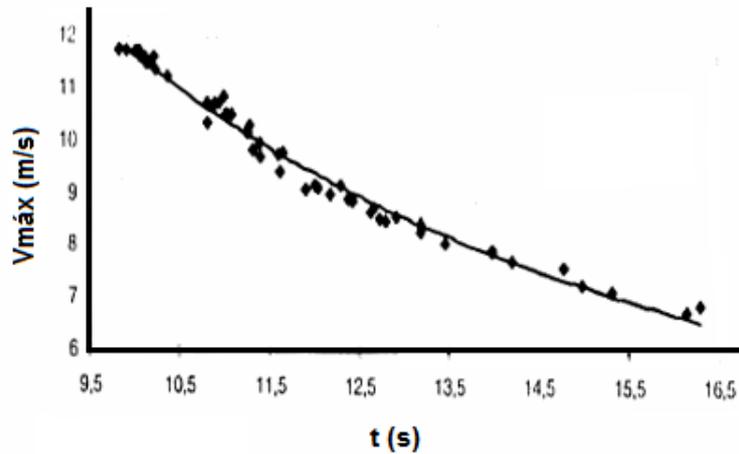


Fig. 2.28 Gráfico de la velocidad máxima alcanzada por distintos corredores en función del tiempo obtenido en los 100 m llanos (Modificado de [Modelo rítmico 100 m Berlín](#))

Es interesante también comparar el desempeño de varones y mujeres en esta disciplina. Con tal objetivo, el Prof. Emilio Ángel Mazzeo en su artículo [“Entrenamiento y evaluación de la Velocidad”](#) realiza un análisis con datos de deportistas de elite y “principiantes” (aquellos que realizan la carrera en un tiempo entre 12 s y 13 s). Para ello recurre al gráfico de la velocidad en función de la distancia de carrera (Figura 2.29).

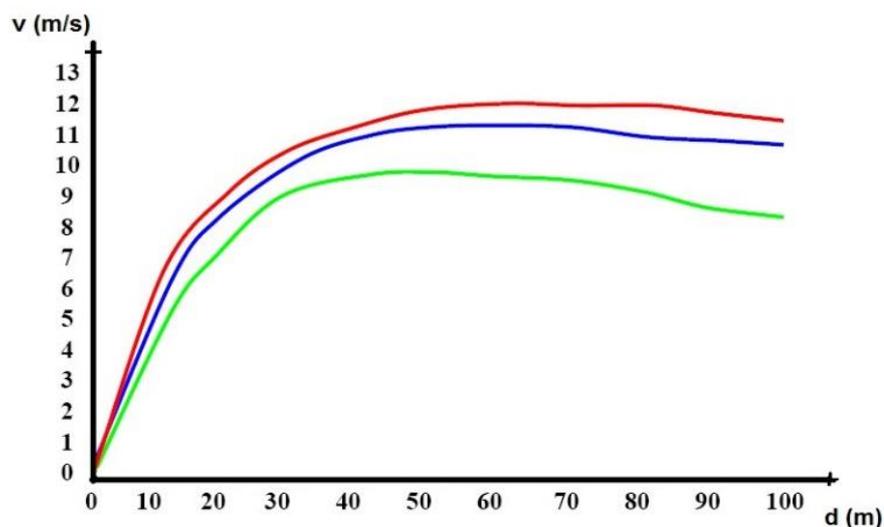


Fig. 2.29 Gráfico del módulo de la velocidad en función de la distancia recorrida para deportistas varones de elite (rojo), mujeres de elite (azul) y principiantes (verde)

En él pueden distinguirse (como vimos anteriormente) tres etapas para todos los corredores. Los corredores varones de elite logran alcanzar velocidades mayores en las distintas posiciones y por lo tanto obtienen mejores tiempos. La diferencia de velocidad entre varones y mujeres no se debe tanto a la frecuencia de los pasos sino a la longitud de los mismos. Sin embargo el decaimiento final de la velocidad de los varones es más pronunciado que en las mujeres. Los deportistas “principiantes” no solo alcanzan menores velocidades que los mejores corredores, sino que su decaimiento final es mucho más acentuado.

La investigación [“Análisis de la capacidad de aceleración en mujeres atletas de modalidades de velocidad”](#) realizada en España, muestra una relación aproximadamente exponencial entre la velocidad y el tiempo de carrera (Figura 2.30) según la ecuación propuesta por Volkov y Lapin (1979).

$$v = v_{máx} \cdot (1 - e^{-t/\tau}) \tag{Ec. 2.1}$$

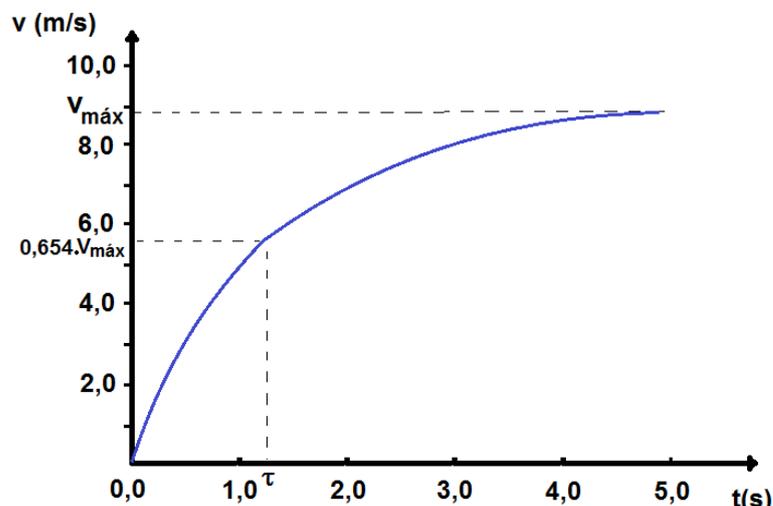


Fig. 2.30 Gráfico de la velocidad en función del tiempo en los primeros 5,0 s luego de la salida de tacos de mujeres velocistas

Denominándose a τ “constante de tiempo”, instante en que la velocidad es aproximadamente un 65% en relación a la velocidad máxima y se determina experimentalmente para cada carrera. $V_{máx}$ es el módulo de la velocidad máxima alcanzada (poco menor a 9,0 m/s de acuerdo a este gráfico).

La ecuación de la aceleración instantánea en función del tiempo se puede obtener mediante la derivada de la ecuación 2.1. El módulo de la aceleración puede determinarse a partir del gráfico $v = f(t)$ como la pendiente de la tangente en cada instante, siendo su valor máximo $v_{máx} \cdot \tau^{-1}$, con valores experimentales próximos a $6,6 \text{ m/s}^2$ al comienzo de la carrera.

“Andan volando”

La acción de correr puede considerarse como un movimiento cíclico compuesto por dos pasos (uno con cada pierna) que constituyen una zancada.

Ya en 1970 Dillman C.J., demostraba que el valor medio de la velocidad de avance del [centro de masa](#) puede determinarse con el producto entre la frecuencia y la longitud de los pasos. La amplitud de los pasos está condicionada por el largo de las piernas del corredor y es esta una de las razones del por qué no existen “petisos” dentro del grupo de los mejores a nivel mundial. La frecuencia depende mucho del tipo de fibras musculares que constituyen al deportista, siendo los velocistas de elite los que poseen un mayor porcentaje de [fibras rápidas](#) (o explosivas) respecto “al común de los mortales”. Dicho porcentaje está definido por la genética y esto explica en gran parte que los mejores velocistas tengan su origen en la misma región del planeta (Jamaica, Sur de los EE.UU, Trinidad y Tobago, etc.), transmitiéndose de generación en generación.

En cada paso encontramos una fase de apoyo unipodal con el suelo y una fase de vuelo. El tiempo que insume cada una de estas fases depende de la velocidad de carrera y de las características del corredor.

La fase de apoyo se puede subdividir en una subfase de “*amortiguación o frenado*” cuando el atleta apoya el pie por delante de su [centro de masa](#), otra de “*sostén*” cuando el centro de masa pasa por sobre el apoyo y una de “*impulso o propulsión*” cuando el centro de masa está por delante del apoyo (Figura 2.31).

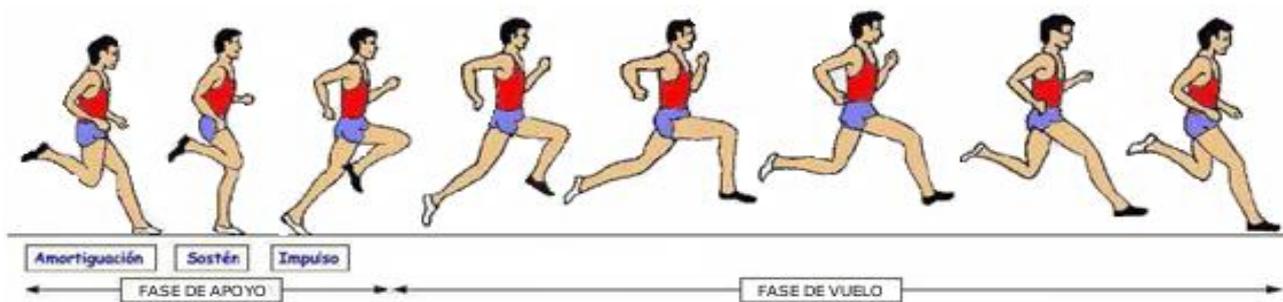


Fig. 2.31 Fases y subfases en un paso de la carrera

Cuando se afirma que un velocista “anduvo volando” durante la competencia, podemos tomar esta afirmación literalmente a partir del estudio científico de su desempeño. De hecho todos los velocistas de elite pasan más tiempo en el aire que en contacto con el piso durante gran parte de la carrera.

El biomecánico Xavier Aguado Jodar, en uno de sus [artículos](#) para el diario “El País” de Madrid, afirma que en los primeros pasos de la carrera los velocistas están un 67% del tiempo en contacto con el piso, mientras que el porcentaje restante corresponde a la fase de vuelo. En esta subfase, el atleta busca recibir una gran fuerza del piso que lo acelere hacia adelante para alcanzar prontamente la velocidad máxima.



Fig. 2.32 Primeros pasos en carrera de pista

A medida que aumenta su velocidad, la fase de apoyo se hace más breve hasta insumir solo un 33% del tiempo total del paso al llegar a los 60 m de carrera. A esta altura de la competencia, cada apoyo dura solo 9 céntesimas de segundo.

Longitud, frecuencia de zancada y su relación con la velocidad

En el libro “*La carrera de velocidad: metodología de análisis biomecánico*”, Amelia Ferro- Sánchez explica que la Amplitud de cada paso está dada por la suma de tres distancias horizontales (Figura 2.33):

- a) de impulso o propulsiva: Es la distancia entre el último punto de contacto con el suelo hasta la proyección vertical del centro de masa.
- b) de vuelo: Es la distancia horizontal recorrida por el centro de masa en la fase donde no hay contacto con el piso.
- c) de amortiguación o frenado, que es la distancia entre la proyección vertical del centro de masa y el punto donde el pie hace apoyo.

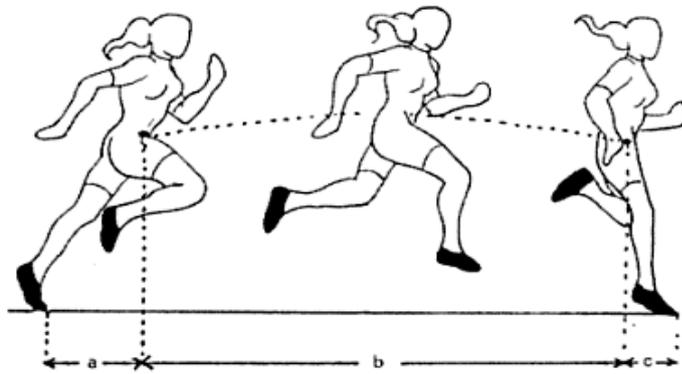


Fig. 2.33 Posición del centro de masa al correr

La relación existente entre frecuencia y longitud de pasos ha sido estudiada por diferentes autores, encontrándose una relación lineal de la longitud con la velocidad cuando esta se encuentra en valores de bajos a medios (3,5 m/s a 6,5 m/s). Los cambios de longitud son mínimos a partir de una velocidad de 6,5 m/s o más (Figura 2.34).

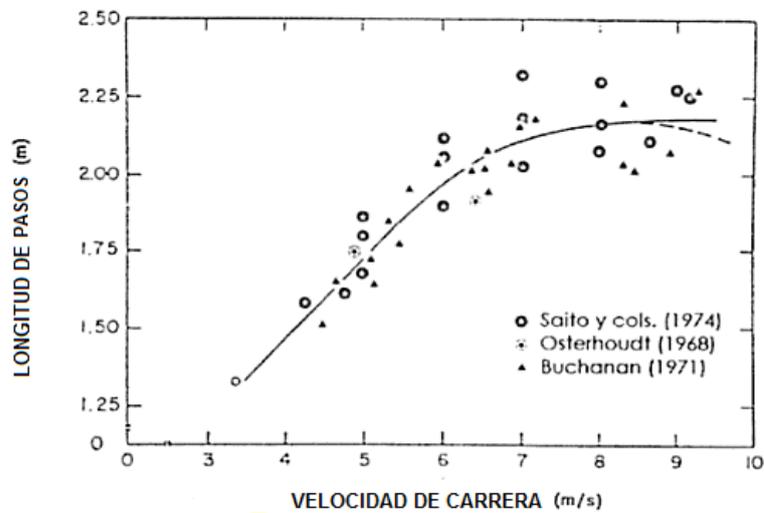


Fig. 2.34 Longitud de paso y velocidad de carrera

(Modificado de Dillman, 1975)

La frecuencia de pasos también se relaciona con la velocidad. A bajas velocidades, al aumentar de 3,0 m/s a 6,0 m/s, se producen pequeños incrementos en la frecuencia. Sin embargo, cuando la velocidad aumenta entre valores de moderados a altos (6,0 m/s a 9,0 m/s), se observan mayores incrementos de frecuencia para iguales incrementos de velocidad (Figura 2.35).

En el gráfico de la figura 2.36 se observa conjuntamente la relación de la frecuencia y la longitud de los pasos en relación con la velocidad de la carrera.

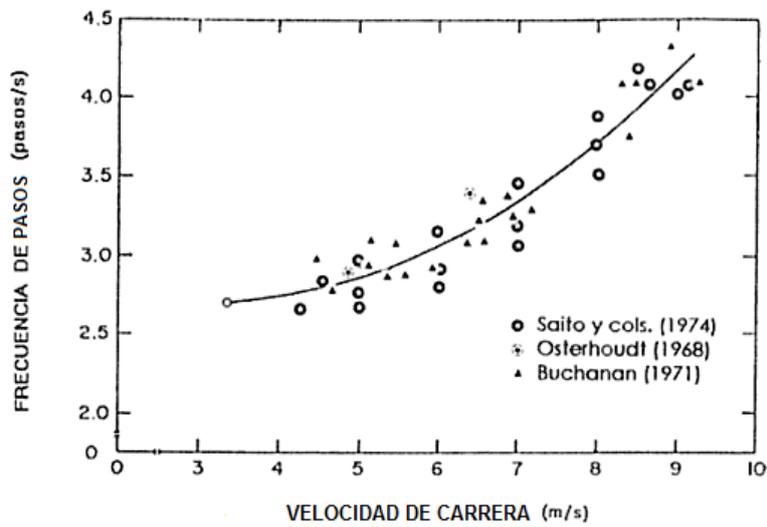


Fig. 2.35 Relación entre la frecuencia de pasos y la velocidad de carrera (Modificado de Dillman, 1975)

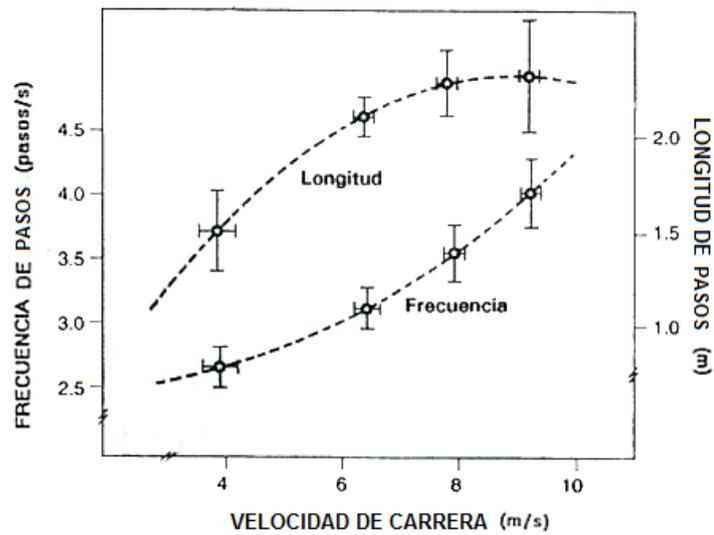


Fig. 2.36 Relación de la frecuencia y longitud de pasos con la velocidad de carrera (Modificado de Luthanen y Komi, 1978)

Se concluye entonces, que los corredores logran aumentar su velocidad a partir de valores bajos aumentando fundamentalmente la longitud de los pasos, mientras que para altas velocidades lo logran aumentando la frecuencia de los mismos.

En la figura 2.37 apreciamos la frecuencia de pasos, la amplitud y la velocidad de avance de Usain Bolt corriendo los 100 m llanos en distintas competencias.



Berlín 2009
9,58s

Londres 2012
9,63s

Pekín 2008
9,69s

► TIEMPOS PARCIALES

En segundos

	TIEMPO DE REACCIÓN	TIEMPO POR INTERVALOS					TOTAL
		0 - 20 m	20 - 40 m	40 - 60 m	60 - 80 m	80 - 100 m	
Berlín 2009	0,146	2,74	1,75	1,67	1,61	1,66	9,58
Londres 2012	0,165	2,76	1,76	1,66	1,61	1,67	9,63
Pekín 2008	0,165	2,70	1,77	1,69	1,65	1,71	9,69

Cogiendo el mejor tiempo en cada intervalo Bolt lograría una marca de **9,526s**

► FRECUENCIA DE PASOS

Pasos por segundo

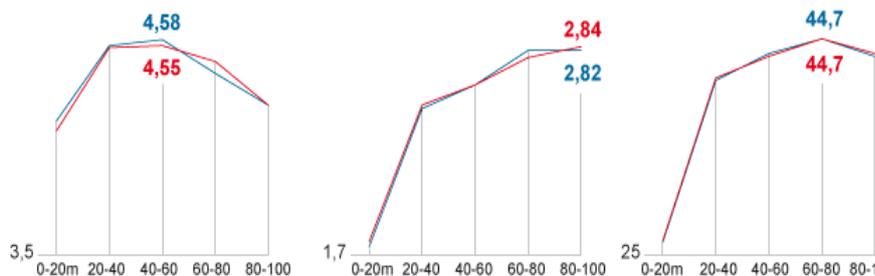
► AMPLITUD DE PASO

Metros

► VELOCIDAD MÁXIMA

Kilómetros por hora

— Berlín 2009 — Londres 2012



	Berlín 2009	Londres 2012	Pekín 2008
Número de pasos	41,1	41,3	41,4
Frecuencia (pasos / s)	4,36	4,37	4,35
Amplitud (m)	2,43	2,42	2,42
Velocidad (km / h)	38,16	38,05	37,82

Fig. 2.37 Registro de frecuencia y amplitud de pasos, así como velocidad máxima en distintas competencias
Extraído de “www.deportes.elpais.com”

Corriendo a ciegas



Fig. 2.38 Tereza Guilhermina, corre teniendo como guía a Usain Bolt para promover los Juegos Paralímpicos Río de Janeiro 2016

En su tesis “Análisis biomecánico de la técnica de la carrera en deportistas ciegos paralímpicos”, Amelia Ferro- Sánchez y Pedro Vera Luna describen el patrón característico de la carrera de los velocistas ciegos y lo comparan con el de los videntes. La muestra de sujetos estuvo formada por un grupo de “Ciegos” de la selección Española de deportes paralímpicos y un grupo “Control” integrado por velocistas pertenecientes a la Selección de la Real Federación Española de Atletismo.

Entre otras variables, relacionaron la frecuencia de pasos y la longitud de los mismos para distintas velocidades. Con los datos tomados para velocidades medias y altas obtuvieron el gráfico de la figura 2.39.

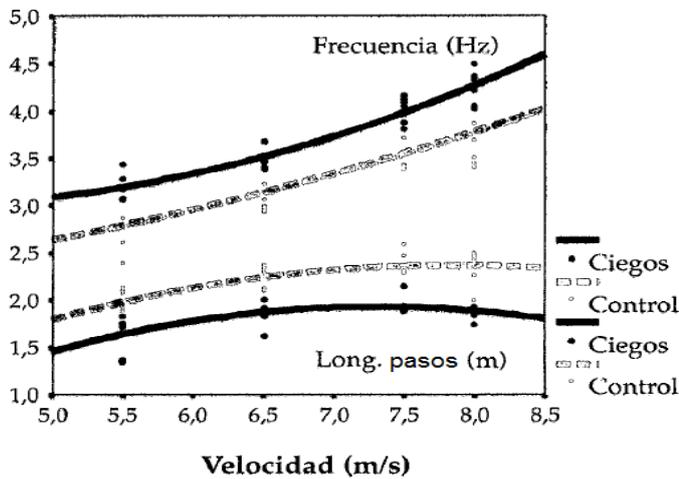


Fig. 2.39 Frecuencia y longitud de los pasos en función de la velocidad de atletas ciegos

A partir de él se pueden deducir las siguientes conclusiones:

- La longitud de los pasos de los atletas ciegos fue menor para todas las velocidades.
- La frecuencia de pasos de los atletas ciegos fue mayor para todas las velocidades.
- En ambos grupos el incremento de la velocidad (dentro de este rango) se produce aumentando fundamentalmente la frecuencia de pasos y más levemente, la longitud.

También pudieron concluir a partir de sus registros que, dentro de un ciclo de zancada, los atletas ciegos insumen un tiempo mayor en la fase de apoyo y menor en la fase de vuelo respecto a los atletas del grupo "Control".

La duración de la fase de frenado (amortiguamiento), resultó ser significativamente mayor en atletas ciegos que en los videntes, decreciendo levemente con la velocidad.

La oscilación vertical del centro de gravedad decreció con el incremento de la velocidad en ambos grupos siendo significativamente menor en atletas ciegos por tener un ángulo de despegue¹¹ más pequeño.



Fig. 2.40 Álvaro Pérez (maratonista paralímpico uruguayo) corriendo con su guía

¹¹ Ángulo comprendido entre la velocidad del centro de masa y la horizontal al abandonar el contacto con el piso

¿Acercándonos al límite?

Como en tantos otros temas, los científicos que realizan proyecciones, no se ponen de acuerdo al responder a la pregunta de cuándo se llegará al límite de las capacidades fisiológicas del cuerpo humano en el deporte y cuánto pueden afectar los cambios ambientales.

Muchos coinciden en que antes del 2035 se habrá llegado al límite de rendimiento en la mitad de las disciplinas deportivas y en el 2060 se alcanzará en todas. Todo esto sin considerar nuevas ventajas por doping o ayudas tecnológicas. En cuanto a las ayudas tecnológicas, podemos recordar el uso en la natación de los trajes [Speedo](#) (llamados “piel de tiburón”) y cómo esto contribuyó a disminuir notoriamente los tiempos de competencia (Figura 2.41).



Fig. 2.41 Trajes speedo para natación

También la discusión sobre las ventajas que brindan las piernas ortopédicas de fibra de carbono a los deportistas lisiados y la posibilidad de competir con ellas ante deportistas con piernas normales (Figura 2.42) . (sobre esta discusión, para el caso del atleta [Oscar Pistorius](#), clic [aquí](#)).



Fig. 2.42 [Oscar Pistorius](#) con piernas ortopédicas

En la prestigiosa revista [“Plos One”](#) encontramos un estudio muy completo y exhaustivo acerca de los límites en el deporte. Los científicos que realizaron dicho estudio, a partir de los datos recopilados desde 1896 (inicio de los Juegos Olímpicos modernos), recogen todos los récords mundiales logrados hasta el 2007 (3263 récords) en disciplinas muy distintas entre sí. A partir de ellos buscaron identificar patrones de progresión y proyectar cuándo se llegará al límite en cada una de estas disciplinas.

De acuerdo al gráfico de la figura 2.43, donde se registra el número de récords mundiales obtenidos en función de los años, se observó:

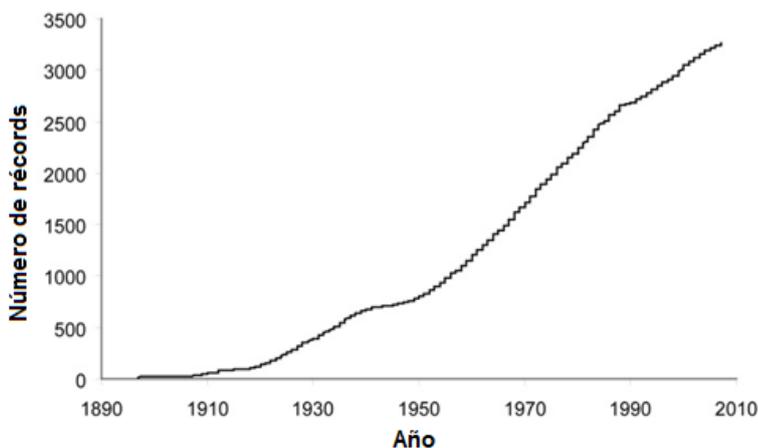


Fig. 2.43 Número de récords mundiales en función de los años (1890-2010)

a) dos estancamientos importantes en la evolución de los récords (se identifican como dos mesetas en el gráfico) que atribuyen a los cambios originados por las guerras mundiales del siglo XX.

b) que el crecimiento del número de récords, luego de pasar por una relación lineal con los años, está desde 1988 hasta la fecha disminuyendo su rapidez.

Para las disciplinas donde se busca realizar la prueba en el menor tiempo posible, se concluyó que la función que mejor representa la evolución de los tiempos récords mundiales con los años, es el decaimiento exponencial por tramos (Ver Figuras 2.44 y 2.45). No importa si son disciplinas [aeróbicas](#) (10000 m de patinaje sobre hielo) o [anaeróbicas](#) (100 m llanos), si involucran principalmente los músculos de las piernas (ciclismo) o todos los músculos (decatlón), si compiten hombres o mujeres, etc. Las curvas de progresión siguen el mismo patrón, disminuyendo su pendiente, aproximándose a un valor límite (asintótico), y siendo alteradas por acontecimientos históricos (Guerras mundiales).

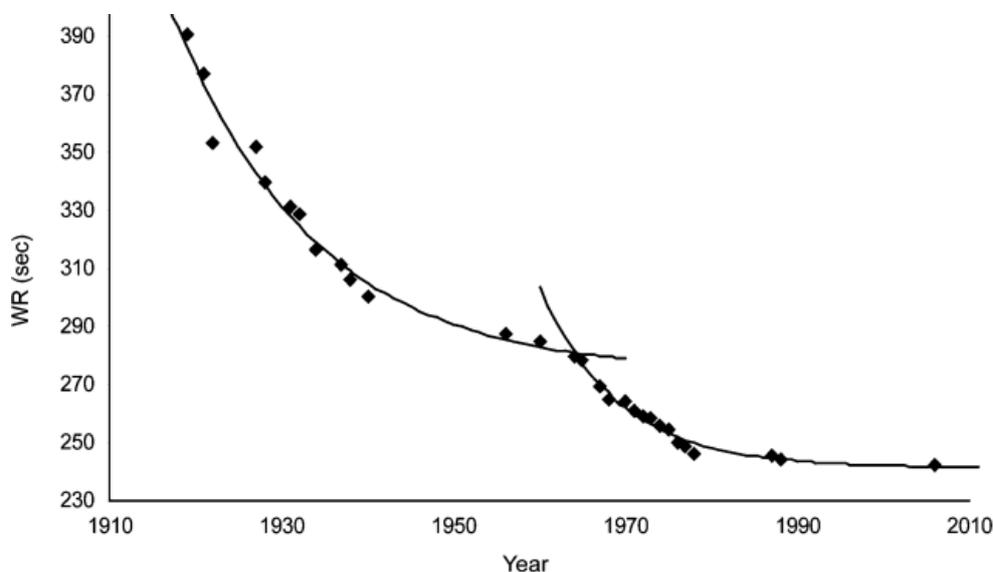


Fig. 2.44 Evolución del tiempo récord mundial en función de los años. Mujeres 400 m estilo libre (natación)

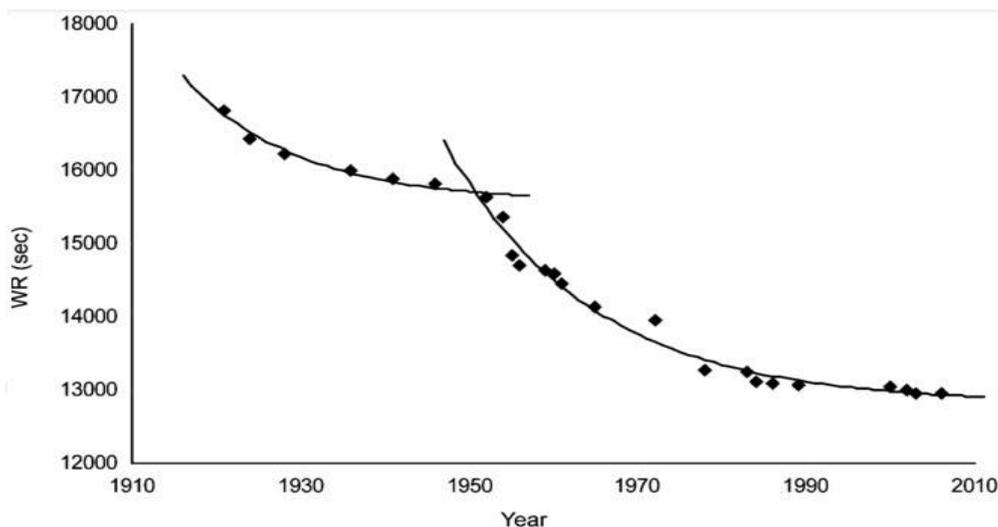


Fig. 2.45 Evolución del tiempo récord mundial en función de los años. Hombres 50 km (marcha)

Es claro que el avance tecnológico seguirá posibilitando mejorar la precisión y disminuir las incertidumbres de las medidas, pero esto no cambiará el decaimiento exponencial ni el valor límite de estas funciones. En el estudio se concluye finalmente que, de acuerdo a las líneas de tendencia y considerando sus asíntotas, ya se han conseguido el 99% del total de récords mundiales, y si se mantienen las condiciones actuales, la mitad de ellos no mejorarán mucho más de un 0,05% hasta el 2027.

El biólogo Mark Denny es especialista en determinar los límites del rendimiento de los seres vivos de acuerdo a la estructura de su cuerpo y su potencialidad. Considerando los registros hasta el momento para la competencia de 100 m llanos y su evolución (figura 2.46), estima que el tiempo límite para el ser humano en correr esta distancia será de 9,48 s.

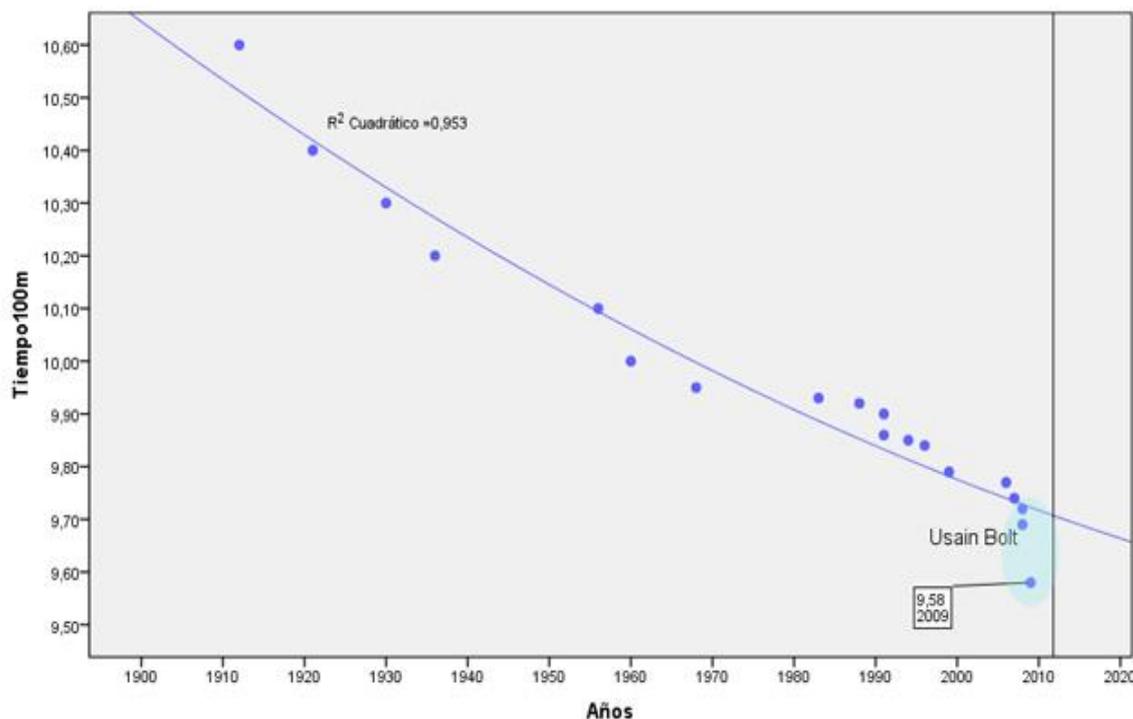


Fig. 2.46 Evolución del tiempo récord mundial de 100 m llanos en función de los años

(Recuperado en <http://www.zentolos.com>)

Considerando ahora las carreras de resistencia, más específicamente la maratón, podríamos preguntarnos también: ¿Cuál es el límite? O por lo menos: ¿Cuándo podrá bajarse el tiempo de las 2 horas?

Tratando de responder a esta última pregunta (atendiendo también otras), un grupo de científicos publicó en setiembre de 2012 un artículo [“Countdown to the First Sub-2:00:00”](#) en la revista “Marathon and Beyond”.

Si observamos el gráfico de los mejores tiempos, en función de los años en que se realizaron (Figura 2.47), podemos ver nuevamente una curva cuya pendiente disminuye a medida que avanza el tiempo.

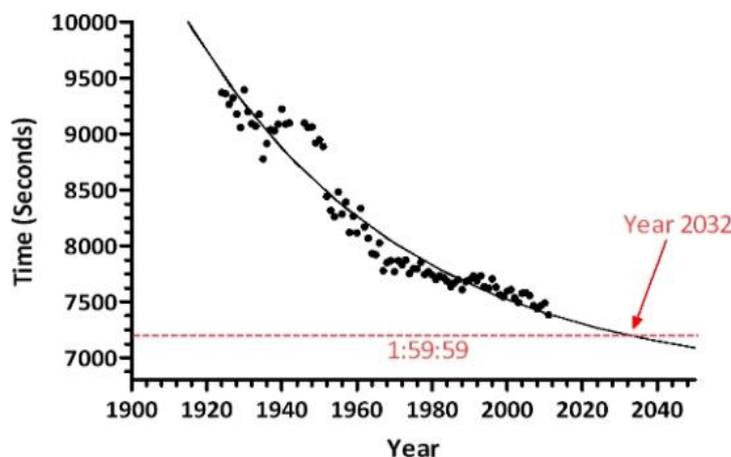


Fig. 2.47 Mejores tiempos de maratón en función de los años

(En “Sports Science”)

Realizando una extrapolación sobre la curva de tendencia, el tiempo 1 h 59 mm y 59 s se alcanzaría en el año 2032.

Llegados los años para los cuales se realizan estas proyecciones (2027, 2032, y 2060), se verá si las mismas se hicieron realidad y habrá nuevos estudios que reflejarán los logros y los límites de nuestra condición humana en el deporte.

Resumiendo:

El ser humano desde siempre ha estado interesado en describir el movimiento de su cuerpo y hacerlo cada vez más eficiente.

Si bien algunos animales nos superan en determinadas destrezas deportivas, tenemos cualidades para adaptarnos a una gran variedad de acciones y superar nuestros límites aprovechando la inteligencia.

Existen notorias diferencias en el rendimiento de los distintos atletas al correr los 100 m llanos de acuerdo a su sexo, estructura, visión y entrenamiento, pero en todos se reconoce el mismo patrón de evolución de la velocidad en función del tiempo.

En cuanto a la posibilidad de superación en las competencias deportivas, la misma se encuentra condicionada por nuestra fisiología y por los reglamentos actuales. Los investigadores discrepan respecto al tiempo en que se alcanzarán los máximos rendimientos deportivos, pero las proyecciones revelan que no falta mucho para que eso acontezca en todas las disciplinas.

Enlaces para ampliar la información:

- [Entrevista publicada en “Cromo”](#) (Diario “El Observador”) a uruguayos que trabajan en captura de movimientos con sensores para realizar animaciones o ayudar a tratamientos de personas con patologías en su marcha.
- [“Variables contextuales y distancia recorrida en la Copa Mundial Sudáfrica 2010”](#), artículo en el cual los autores comparan los valores medios de velocidad de los equipos participantes y lo relacionan con su éxito deportivo.
- [“Análisis de la Amplitud y Frecuencia de paso de carrera a diferentes velocidades en deportistas amateurs”](#) realizado por científicos de la Universidades de Valencia y Milán.
- [“Bolt vs Gay: velocidad, zancada y potencia en la carrera de los 100 metros”](#), artículo del Prof. Carlos Alfonso Guzmán, que considera cómo se relacionan estas magnitudes con el rendimiento deportivo.
- [“El modelo rítmico de la carrera de 100 metros en los campeonatos del mundo de Berlín 2009”](#) de Jesús María Vicente Pacho (2010), realizado como parte de su Licenciatura en Ciencias de la Actividad Física y el Deporte (INEFC Barcelona).
- [“Con el rabillo del ojo a 45 por hora”](#). Análisis de Carlos Arribas sobre el desempeño de Usain Bolt en tres finales de 100m (“El País” de Madrid).
- [The Citius End: World Records Progression Announces the Completion of a Brief Ultra-Physiological Quest](#), artículo muy interesante y completo publicado en la revista “PLOS ONE”, en el que se analiza la evolución de récords mundiales de diversas disciplinas.
- En este [artículo](#) de Popular Science, se plantea el límite de la velocidad del ser humano al correr.

Preguntas y Problemas

1) En la figura 2.17 se observan datos para el circuito realizado por un corredor. De acuerdo a ellos, determine al regresar al punto de partida: a) su rapidez media en m/s b) su velocidad media en m/s.

2) En China existe una pista de atletismo rectangular (puede verse haciendo clic [aquí](#)). Suponiendo que su largo mide 150 m y su ancho 50 m, si un atleta pasa por uno de los vértices en el instante inicial y corre con rapidez constante de 14,4 km/h, dando una vuelta a la pista, determine: a) el tiempo que tarda en dar la vuelta b) el valor de la velocidad media durante la mitad de su recorrido.

3) En el cuadro siguiente se observa los tiempos insumidos y las distancias recorridas correspondientes para el keniano Dennis Kimetto en la maratón de Chicago (Tiempos oficiales tomados de Track and Field News).

t Kimetto (min:s)	d(km)
14:45	5
29:21	10
44:00	15
58:39	20
73:16	25
88:04	30
102:38	35
116:48	40

el keniano Dennis Kimetto en la maratón de Chicago (Tiempos oficiales tomados de Track and Field News).

a) Grafique la distancia recorrida en función del tiempo.

b) Determine la rapidez media en km/h.

c) ¿Diferirá mucho la rapidez media del valor de la velocidad en cualquier instante de la competencia? Justifique.

4) Responda las preguntas siguientes a partir del gráfico de la figura 2.27 que muestra la performance de Usain Bolt en la final de 100 m de Pekin 2008 (puede ver la carrera haciendo clic [aquí](#) y un análisis de la misma [aquí](#)):

a) ¿En qué instante(s) tuvo su mayor velocidad? Determine aproximadamente su valor.

b) ¿En qué instantes(s) tuvo su menor velocidad? Determine aproximadamente su valor.

c) ¿En qué instante(s) tuvo su mayor aceleración? Determine aproximadamente su valor.

d) ¿En qué instantes(s) tuvo su menor aceleración? Determine aproximadamente su valor.

5) En el video que tiene su enlace [aquí](#), se puede observar el velocímetro digital del Ferrari de F1 pilotado por Fernando Alonso al largarse la competencia.

a) Realice el gráfico del módulo de su velocidad en función del tiempo para los primeros 10s de carrera.

b) Determine aproximadamente la distancia recorrida en ese lapso.

6) En abril de 1985 Randy Dickison se deja caer desde una altura de 53 m sobre una piscina logrando un nuevo récord mundial (para ver el video hacer clic [aquí](#)). Si consideramos su movimiento como una caída libre en la vertical:

a) calcule el tiempo de caída y compárelo con el que se aprecia en el video a tiempo real (no en "cámara lenta"). Si aprecia alguna diferencia exprese la justificación de la misma

b) realice los gráficos de distancia recorrida y velocidad en función del tiempo, hasta el instante en que llega al agua.

Actividades

MAGNITUDES CINEMÁTICAS EN EL PLANO (luego de explicados los conceptos)

Consigna ejemplo: “saliendo todos próximos a una de las esquinas del recinto (gimnasio, salón, etc.) y sin salir del mismo, transcurrido el tiempo fijado (120 s), obtener:

- a) la menor velocidad media en ese lapso y la mayor velocidad en el instante final.
- b) la mayor velocidad media en ese lapso y la menor velocidad en el instante final.

(Pueden agregarse consignas con los conceptos de rapidez y de aceleración media e instantánea.)

Luego de expresadas las consignas, antes de “largar” el cronómetro, puede dejarse un tiempo para la discusión entre pares y luego de culminar cada actividad, aclarar quiénes lograron el objetivo, quiénes no y por qué.

Pueden también sumarse nuevas preguntas:

¿Cómo obtendrían la mayor velocidad media si pudieran volar?, ¿y si pudieran caminar por la pared?

MOVIMIENTO RECTILÍNEO 1 (Conviene contar con un pasillo largo)

Para el movimiento de una persona que se mueve siempre en el mismo sentido aumentando el módulo de su velocidad hasta cruzar la meta.

- a) Realizar el gráfico de su posición en función del tiempo.

(Si dispone de un sensor de posición puede ser útil utilizarlo en esta actividad con los cuidados correspondientes.)

- b) Buscar un método, mediante el cual se determine el módulo de la velocidad instantánea a la mitad de la distancia de la carrera y al cruzar la meta con la menor incertidumbre posible.
Encontrar dicho valor.

MOVIMIENTO RECTILÍNEO 2

Consigna: Tres personas caminan o corren en línea recta simultáneamente, desde una línea a otra paralela, de manera que tengan igual velocidad media pero: uno con velocidad constante, otro aumentándola a partir del reposo y otro disminuyéndola hasta detenerse.

Un cuarto integrante puede filmar para observar si se logró la consigna o no.

(Se necesita espacio antes de la primera línea para que el primer y el tercer corredor puedan llegar a ella ya con cierta velocidad en el instante que se acciona el cronómetro).

- a) Determinar y expresar su velocidad media con su correspondiente incertidumbre.

(Puede ser útil filmar a los participantes)

- b) En una misma gráfica, realizar un bosquejo de la posición en función del tiempo para cada uno de ellos.
- c) En una misma gráfica, realizar un bosquejo de la velocidad instantánea y media en función del tiempo para cada uno de ellos.

Si se necesita conocer algunos datos básicos para realizar una buena filmación leer [Anexo 1](#).

Si se realiza el análisis de video con el software libre “[Tracker](#)” y se quiere tener una guía básica de su manejo, clic [aquí](#). Ver [video tutorial](#) realizado por el profesor Marcelo Vachetta.

Capítulo 3 ¿Y por qué...? Pregúntale a la Dinámica

Los niños en edades entre 2 y 4 años, sorprendidos y maravillados por la realidad que los rodea, suelen expresar de forma insistente (y en ocasiones agotadora), una pregunta propia del espíritu científico: “¿Y por qué?”¹²

En la Mecánica Newtoniana, la Dinámica (complementando a la descripción de la Cinemática) es quien da respuesta a esta pregunta en cuanto al movimiento se refiere.

A continuación consideraremos las causas de por qué un deportista, su vehículo u otro objeto utilizado en las competencias, se traslada de determinada manera.

Un tema de Principios

La Dinámica desarrollada por Newton se basa en tres Principios que incluyen el concepto de fuerza. En este modelo, la *Fuerza* se define como la medida de una interacción entre los cuerpos. Por lo tanto, las fuerzas no se “tienen”, ni se “llevan”, se aplican entre los cuerpos mientras dura la acción mutua. Su unidad en el Sistema Internacional de Unidades es el Newton (N) que al ser una magnitud vectorial, además de módulo, tiene dirección, sentido y punto de aplicación.

Se denomina *Fuerza Neta* a aquella que sustituida por todas las fuerzas aplicadas a un cuerpo produce en su traslación el mismo efecto. Esta resultante se determina mediante la suma (vectorial) de todas las fuerzas aplicadas al cuerpo.

En cuanto a los *Principios*, comencemos considerando el denominado por Newton como de “*Acción y Reacción*”, hoy llamado de *Interacción*. El mismo expresa que: Cuando dos cuerpos se aplican fuerzas entre sí, estas tienen en todo instante, igual módulo, igual dirección y sentido contrario. Esto es independiente de la velocidad, tamaño o demás propiedades de los cuerpos que interactúan.

Así que cuando un boxeador da un “puñetazo” en el ojo de su contrincante \vec{F}_{PO} , recibe de este un “ojazo” en su puño \vec{F}_{OP} de igual módulo, igual dirección y sentido contrario ($\vec{F}_{OP} = -\vec{F}_{PO}$). Las fuerzas se presentan entonces siempre de a pares y con estas características (Figura 3.01).



Fig. 3.01 Manny Pacquiao interactuando con el puño de Juan Manuel Márquez (Estadio de Las Vegas)

Los remeros, saben que cuanto mayor sea la fuerza con que empujan sus remos el agua, mayor será la fuerza que esta realiza sobre los remos y por lo tanto sobre su embarcación (Figura 3.02).

¹² La pregunta correctamente formulada en términos científicos, debiera ser “¿cómo se realiza ese suceso?”



Fig 3.02 Remero uruguayo [Jhonatan Esquivel](#) en los JJOO Río 2016

El Principio “de Inercia” expresa que, si la Fuerza Neta sobre un cuerpo es nula, el mismo tendrá velocidad constante. Podemos ver aquí una manera de definir los sistemas de referencia inerciales: Si la Fuerza Neta es nula y el cuerpo tiene velocidad constante, el sistema de referencia se denomina Inercial. De lo contrario es “no inercial” y para aplicar los Principios de Newton hay que recurrir a “fuerzas complementarias” que no son producto de interacción alguna.

Si una patinadora empuja a otra sobre una superficie horizontal como representa la figura 3.03, siendo las fuerzas de rozamiento despreciables, la Fuerza Neta sobre cada patinadora es la que le aplica la otra. De acuerdo al Principio de Interacción, dichas fuerzas tendrán igual módulo $|\vec{F}_{L-A}| = |\vec{F}_{A-L}|$

Sin embargo, si las patinadoras tienen tamaños muy disímiles, siendo sus densidades similares, los módulos de sus aceleraciones serán notoriamente diferentes en todo instante durante el empujón (en este caso $a_L > a_A$)

Ante el mismo módulo de Fuerza Neta externa, ambos cuerpos presentan distinta resistencia a cambiar su velocidad. Esto se debe a otra propiedad del cuerpo que define el *Principio Fundamental: la masa inercial*. Según Newton, la masa es una magnitud escalar independiente de las condiciones en que el cuerpo se encuentre. Se define como la relación entre los módulos de dos magnitudes directamente proporcionales, la Fuerza Neta y la aceleración:

$$m = \frac{|\vec{F}_n|}{|\vec{a}|} \quad \text{su unidad en el S.I. es el kg}$$

En realidad, esta expresión del “Segundo Principio”, es una simplificación (válida solamente para sistemas de masa constante) del expresado por Newton en su “*Principios Matemáticos de la Filosofía Natural*”. Cuando definamos la magnitud “Cantidad de Movimiento” en el Capítulo 5 veremos una [expresión](#) más general.

La aceleración del [centro de masa](#) de un sistema será siempre igual al cociente entre la Fuerza Neta y la masa del mismo. Es importante distinguir las fuerzas que realiza el ambiente sobre el sistema de estudio elegido, de aquellas que son internas al mismo. Las primeras son las únicas que podrán acelerar el centro de

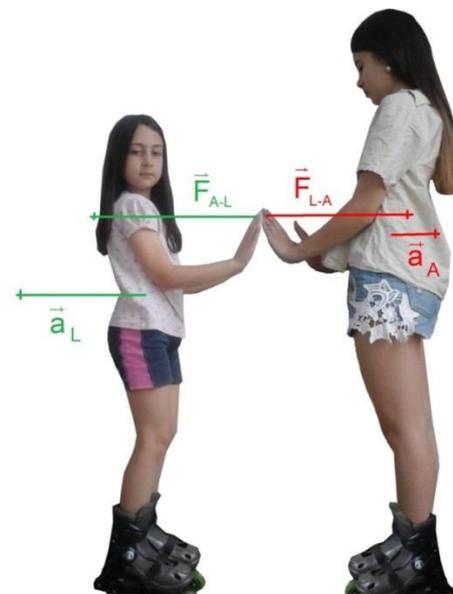


Fig 3.03 Patinadoras de distinta masa interactuando

masa, ya que las fuerzas internas al sistema se cancelan entre sí. Sería inútil que un ciclista empujara su espalda para ir más rápido. Pero si el empujón es dado por otra persona que viaja en una moto a su lado, le ayudará a aumentar su velocidad (que sea útil no significa que sea reglamentario).

A continuación mencionaremos algunas fuerzas que juegan un rol decisivo para entender el movimiento de los cuerpos en general y en el deporte en particular.

Todos atraídos y atractivos: fuerzas gravitatorias

Estas fuerzas surgen entre los cuerpos por el hecho de tener masa gravitatoria¹³ y son siempre de atracción. Su módulo depende directamente de la masa de ambos cuerpos e inversamente de la distancia que los separa. Así que somos más atraídos y atractivos (más allá de lo que diga la propaganda), cuanto más masa tenemos y cuanto más cerca estamos del otro cuerpo.

Nuestro planeta Tierra genera un campo gravitatorio \vec{g} que afecta a los otros cuerpos ejerciendo una fuerza denominada *Peso* (\vec{P}). El Peso se determina como $\vec{P} = m \cdot \vec{g}$.



Fig. 3.04 Isaac Newton pensó sobre la gravitación al ver caer una manzana y a la luna.

Dado que $\vec{F}_n = m \cdot \vec{a}$, \vec{g} es la aceleración gravitatoria ($g \approx 9,8 \text{ m/s}^2$), es decir, la aceleración con la que caen todos los cuerpos próximos a la superficie terrestre cuando la Fuerza Neta sobre ellos es el Peso.

En algunos deportes, sobre todo de lucha, las fuerzas suelen expresarse en “kilos”. En realidad se hace referencia a la unidad de fuerza llamada *kilogramo fuerza* (kgf) o *kilopondio* (kp). Representa la fuerza equivalente al Peso que tendría un objeto de esa masa (en kg) próximo a la superficie terrestre, a nivel del mar, a 45º de latitud. Es decir que 1,0 kgf equivale aproximadamente a 9,8 N.

Plataforma reaccionaria

Una plataforma de fuerzas o dinamométrica es una placa generalmente rectangular, que mediante el efecto piezoeléctrico o por calibradores de tensión, permite medir las componentes de la fuerza “reacción” en tres ejes perpendiculares. Normalmente uno de ellos se dispone perpendicular a la plataforma mientras que los otros lo hacen paralelos al largo y al ancho de la misma.

¹³ De acuerdo al Principio de equivalencia débil, la masa gravitatoria tiene el mismo valor que la masa inercial.

Se emplean, por ejemplo, para apreciar la evolución de alteraciones en la marcha y realizar correcciones, para evitar lesiones u obtener el accionar que permita el mayor rendimiento deportivo.



Fig. 3.05 Plataformas de fuerzas

Fuerza de “reacción” de la superficie de apoyo

Cuando una persona salta como indica la figura 3.06, su calzado realiza una fuerza \vec{F}_{cp} sobre el piso . De acuerdo al Principio de Interacción, recibe del piso una fuerza en su calzado \vec{F}_{pc} de igual módulo en sentido contrario. \vec{F}_{pc} puede considerarse como la resultante de una componente denominada Normal \vec{N} en la dirección perpendicular a la superficie y otra tangencial a la misma llamada \vec{F}_{roz} .

La primera le permite al saltador elevarse sobre la superficie y la segunda, avanzar sobre la misma.

La fuerza de apoyo que realiza el cuerpo sobre la superficie en dirección perpendicular a esta, se denomina “Carga” (\vec{C}) y conforma un par de fuerzas de interacción con la Normal.

Por lo tanto, en la lectura de una balanza como la de la figura 3.07 tendremos el módulo (en kgf) de ambas fuerzas en cada instante.



Fig. 3.06 Interacción entre superficie de apoyo y saltadora



Fig. 3.07 Balanza y fuerzas actuantes

Si sobre la balanza horizontal, se varía la Normal (varía también la Carga) haciéndola mayor o menor que el Peso, existirá una Fuerza Neta sobre la persona en la vertical y su centro de masa experimentará una aceleración en dicha dirección.

Cuando nos “pesamos”, normalmente se nos pide que nos quedemos quietos sobre la balanza. Es que solo si el Peso (que no varía por nuestro movimiento) se equilibra con la Normal, ambas fuerzas tendrán igual valor.

Nuestra Tierra geoide, giratoria y la performance deportiva

La afirmación anterior en realidad es válida solo en una primera aproximación. Aunque nos quedemos inmóviles sobre la balanza, la fuerza Peso y la Normal no están equilibradas ya que giramos juntos con la Tierra en torno a su eje. La resultante entre dichas fuerzas en la dirección radial se dispone hacia el centro de nuestra trayectoria (por lo que se denomina centrípeta), provocando que cambie la dirección de nuestra velocidad. La componente del Peso en la dirección radial \vec{P}_r tiene entonces un módulo mayor que la de la Normal \vec{N}_r (Figura 3.08).

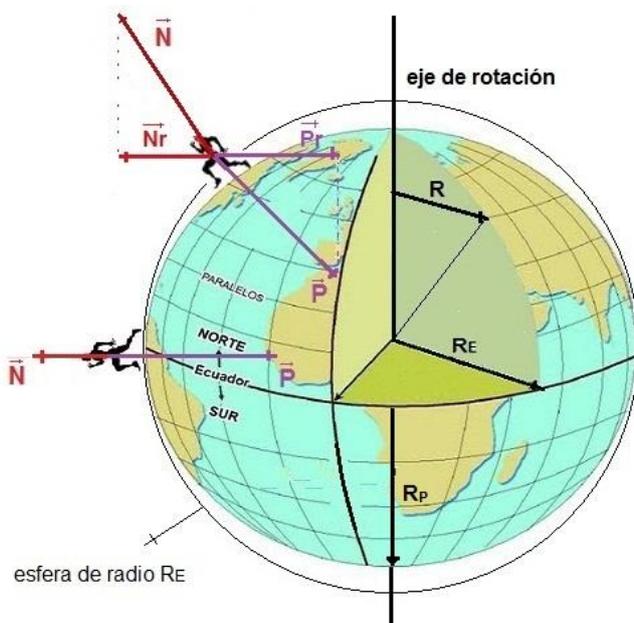


Fig. 3.08 Normal y Peso en distintas latitudes

La diferencia entre el módulo del Peso y la Normal será mayor cuanto mayor sea nuestro radio R de giro. Por lo tanto, parados en la línea ecuatorial la Normal tendrá su menor valor y en los Polos sus valores máximos (allí valdrá igual que el Peso si nuestro centro de masa se encuentra en equilibrio).

A la fuerza Carga (que constituye un par con la Normal) se le denomina también “Peso aparente” y a su valor dividido el de la masa se lo menciona como aceleración gravitatoria “efectiva” g_e . Esta cambia con la latitud como representa la figura 3.09.

Aunque la Tierra no girara, ya que no es esférica (el radio ecuatorial $R_E = 6378$ km y el polar $R_P = 6357$ km), existen notorias diferencias en el valor de la aceleración gravitatoria g y por lo tanto de nuestro Peso si nos encontramos a distintas latitudes.

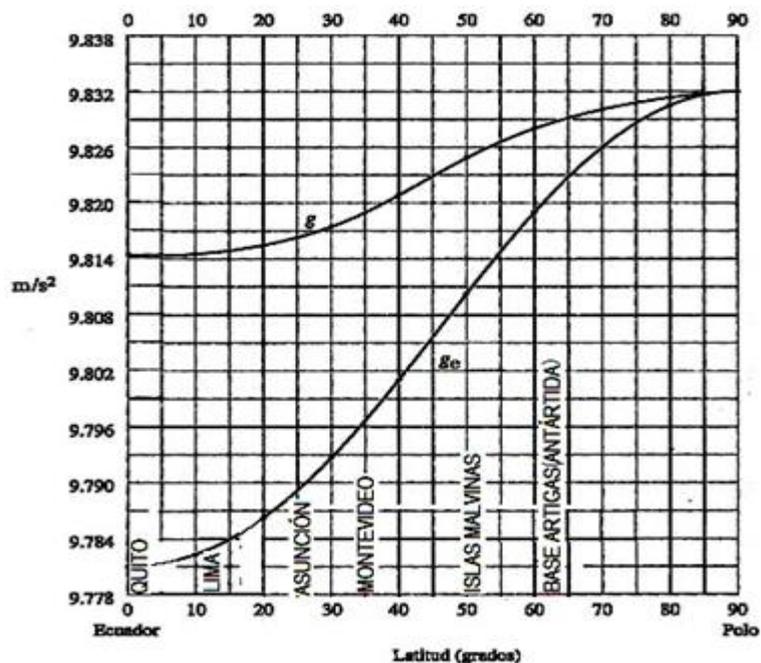


Fig. 3.09 Aceleración gravitatoria real y “efectiva” a distintas latitudes. (Modificado de “Física: Álgebra y Trigonometría” Vol.1 E. Hecht)

En su artículo “How Olympic records depend on location”, publicado en “American Journal of Physics”, Ernie McFarland analiza la influencia de la aceleración gravitatoria en los récords durante los Juegos Olímpicos (Fig. 3.10)

Table I. Gold medal performances in various Olympic track and field events.

Location	Year	Men's 100-m dash (s)	Men's 200-m dash (s)	Men's 400-m dash (s)	Men's 5000-m run (min:s)	Men's marathon run (h:min:s)	Men's long jump (m)	Men's triple jump (m)	Men's high jump (m)
Helsinki	1952	10.4	20.7	45.9	14:06.6	2:23:03	7.57	16.22	2.04
Melbourne	1956	10.5	20.6	46.7	13:39.6	2:25:00	7.83	16.35	2.12
Rome	1960	10.2	20.5	44.9	13:43.4	2:15:16	8.12	16.81	2.16
Tokyo	1964	10.0	20.3	45.1	13:48.8	2:12:11	8.07	16.85	2.18
Mexico City	1968	9.95 ^a	19.83	43.86 ^b	14:05.0	2:20:26	8.90 ^b	17.39 ^a	2.24
Munich	1972	10.1	20.0	44.7	13:26.4	2:12:20	8.24	17.35	2.23
Montreal	1976	10.06	20.23	44.26	13:24.76	2:09:55	8.35	17.29	2.25
Moscow	1980	10.25	20.19	44.60	13:21.0	2:11:03	8.54	17.35	2.36 ^a
Los Angeles	1984	9.99	19.80 ^a	44.27	13:05.59 ^a	2:09:21 ^a	8.54	17.26	2.35

^aOlympic record, as of 13 August 1984.

^bOlympic and world record as of 13 August 1984.

Fig 3.10 Mejores tiempos de distintas disciplinas deportivas en los JJ.OO. desde 1952 a 1984

(Extraído de “How Olympic records depend on location” Ernie McFarland AJP).

Al observar estos datos, es llamativa la mejora obtenida en los récords durante los Juegos Olímpicos de México en 1968, tanto en los saltos como en las carreras cortas. En estos Juegos, también son llamativas las marcas en las carreras de maratón y 5000 m, pero por el bajo rendimiento obtenido. Recordemos que la ciudad de México se encuentra próxima a la línea ecuatorial y a más de 2000 m sobre el nivel del mar. Esto implica una baja aceleración gravitatoria y una menor densidad del aire. La mayor diferencia en el valor de g_e lo tiene respecto a la ciudad de Moscú (un 0,37% mayor) lo que genera una gran diferencia en la densidad del aire (un 22,2% menor). En los deportes anaeróbicos, explosivos, como las carreras cortas, saltos y lanzamientos, al tener los atletas un “Peso aparente” menor en la ciudad de México, les resulta una ayuda

notoria para mejorar su desempeño, lo que se refleja en los resultados. También ayuda el tener una menor fuerza de resistencia con el aire. En las carreras de 100 m, si realizamos una aproximación “gruesa”, cada 1000 m de aumento de altitud supone aproximadamente una ganancia de 0,03 s.



Fig. 3.11 Corriendo en la altura de la montaña

En cambio, en las carreras de larga distancia (deportes aeróbicos), es importante contar con una atmósfera bien oxigenada que posibilite un mayor rendimiento. Por lo tanto el beneficio que otorga una aceleración gravitatoria menor no llega a cubrir los perjuicios que provoca la baja concentración de oxígeno.

Por supuesto que la localización de la competencia no explica todo y el accionar del deportista tiene una importancia fundamental. Tal es el caso del asombroso [salto largo de 8,90 m realizado por Bob Beamon](#) en México (1968), que recién fue superado en los Juegos Olímpicos de Tokio (1991).

Los atletas de elite, de acuerdo a su ubicación geográfica, saben dónde tienen mayores posibilidades de conseguir nuevos récords o superar sus marcas. Es que la influencia de un planeta geoide giratorio en su performance, no es en general nada despreciable.

La Normal en el salto

Si realizamos un salto con contramovimiento (CMJ) como muestra la figura 3.12, podemos obtener un gráfico de la Normal en función del tiempo durante las fases de impulso, vuelo y caída. También podemos relacionar la Normal con el cambio de la velocidad del centro de masa en cada instante.

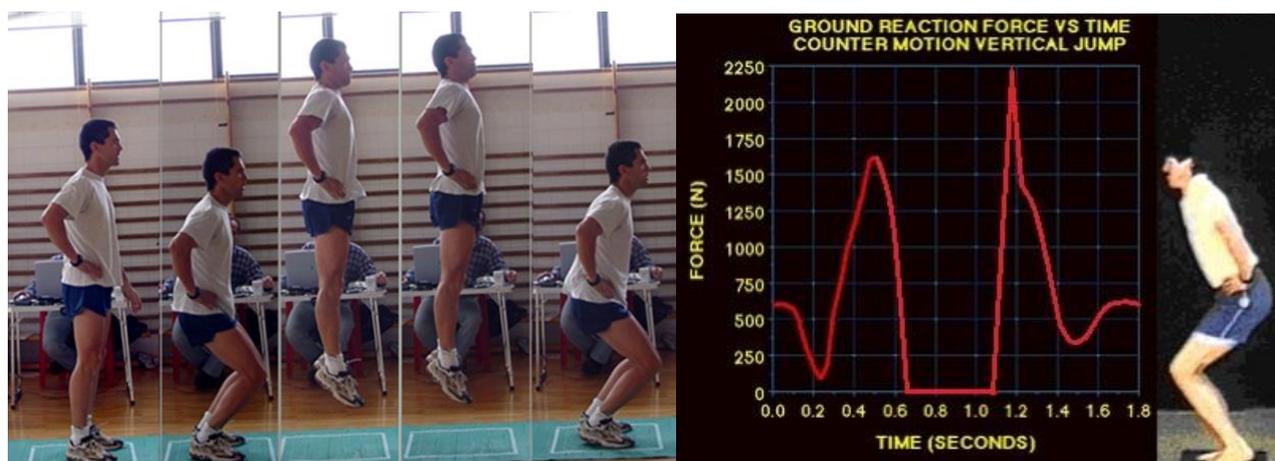


Fig. 3.12 Registro de fuerza Normal en salto con contramovimiento

En el gráfico de la figura 3.13 se representan conjuntamente el valor de la velocidad y la Normal en función del tiempo durante la fase de impulsión en este tipo de salto. Se puede apreciar en el instante t_1 que el valor de la Normal es mínimo cuando la pendiente del gráfico de velocidad (la aceleración) es máxima y negativa (si atribuimos signo negativo a los vectores cuyo sentido es hacia abajo). En el instante t_2 la velocidad vertical del centro de masa alcanza su mínimo, allí la Fuerza Neta sobre el sujeto es nula y el valor de la Normal es igual al del Peso. Durante el ascenso, en el instante t_3 , la pendiente de la velocidad es máxima y la Normal alcanza su mayor valor, siendo en este caso superior al doble del valor del Peso. En el tiempo t_4 , poco después de alcanzar su velocidad máxima, el pie deja de estar en contacto con el piso y desde este instante la Normal es nula durante toda la fase de vuelo.

Fuerza de rozamiento con la superficie de apoyo

Son fuerzas tangenciales a las superficies en contacto, que se generan al deslizar, o intentar deslizar, una sobre otra. En el primer caso se denomina fuerza de rozamiento cinético y en el segundo, estático. El sentido de estas fuerzas es contrario al desplazamiento relativo entre las superficies de apoyo.

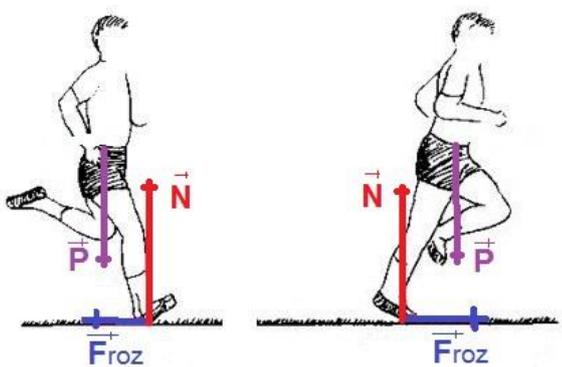


Fig. 3.14 Fuerza de rozamiento estática \vec{F}_{roz} en fase de: (a) frenado (b) impulsión

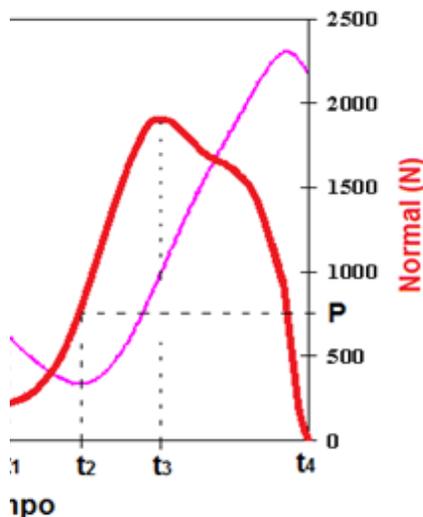


Fig. 3.13 Velocidad y Normal en función del tiempo para salto con contramovimiento

(Extraído de www.rendimientodeportivo.com)

Normalmente, tanto al caminar como al correr, nuestro calzado no desliza sobre el piso, por lo que actúa una fuerza de rozamiento estático. Esta es capaz de crecer hasta alcanzar un valor máximo ($F_{roz\ máx}$) a partir del cual comienza el deslizamiento. Su valor se determina como el producto entre el coeficiente de rozamiento estático (dependiente de los materiales en contacto) y la Normal en el apoyo.

$$F_{roz\ máx} = \mu_E \cdot N$$



Fig. 3.15 *Rafael Nadal* deslizando sobre polvo de ladrillo

En ocasiones el calzado sí desliza, haciéndose presente allí una fuerza de rozamiento cinético. Esto se da por ejemplo en el tenis, más frecuentemente sobre polvo de ladrillo (acá un [video](#) de [Rafael Nadal](#) entrenando el deslizamiento).

Normalmente el valor de la fuerza de rozamiento cinético es menor que el de la fuerza de rozamiento estático máxima, ya que el coeficiente también lo es

$$F_{roz} = \mu_D \cdot N.$$

Las piedras de granito usadas en el [Curling](#), al avanzar aproximadamente 40 m sobre el hielo, disminuyen muy lentamente su velocidad debido al bajo coeficiente de rozamiento que tienen con la pista. Hay zapatos para este deporte que cuentan con suelas especiales: Una de apoyo, altamente deslizante, compuesta por teflón y otra antideslizante, compuesta por caucho (la que se apoya para acelerar al comienzo del lanzamiento). El “barrido” de las escobillas no solo alisa la superficie del hielo sino que, al aumentar la presión, provoca su fusión, disminuyendo así la fuerza de rozamiento sobre la piedra (Figura 3.16).



Fig. 3.16 Deslizamiento de la piedra de curling sobre el hielo y barrido de la pista

También en el patinaje se busca disminuir el rozamiento, provocándose el cambio de estado del hielo por el aumento de presión al apoyarse en las reducidas superficies de las delgadas cuchillas (Figura 3.17).

En otras ocasiones se busca evitar que las fuerzas de rozamiento disminuyan su valor al realizar el deporte. Para ello, quienes hacen barras paralelas, levantan pesas, o realizan lanzamientos (de bala, jabalina, martillo o disco), se colocan carbonato de magnesio (comúnmente llamado “tiza”) en las manos. Esa sustancia actúa como un agente de secado de las manos mediante la absorción de sudor, evitando así un deslizamiento indeseable.



Fig. 3.17 Carrera en patines sobre hielo



Fig. 3.18 Gimnasta colocándose tiza de magnesio en las manos antes de subir a las barras paralelas

Fuerzas en la marcha

Se denomina marcha al caminar donde, en todo instante, por lo menos un pie se encuentra en contacto con el piso (Figura 3.19). Durante un ciclo de marcha completo, cada miembro inferior pasa por dos fases: una de apoyo, en la cual el pie de referencia está en contacto con el suelo y otra de oscilación, en la que dicho pie está suspendido en el aire (Figura 3.20).



Fig. 3.19 Marcha

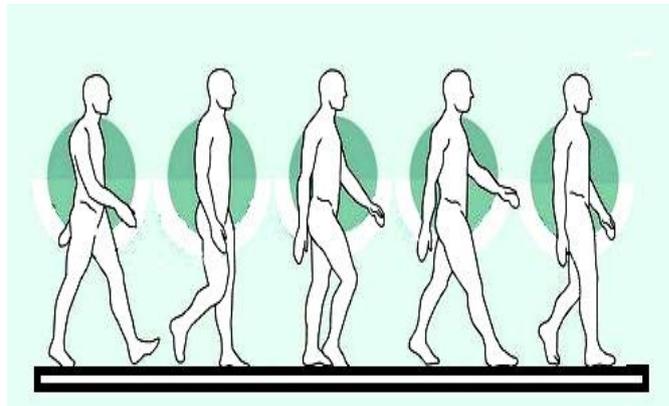


Fig. 3.20 Fases al caminar

En una marcha habitual, la fase de apoyo insume alrededor del 60% del ciclo y la fase de oscilación el 40% restante.

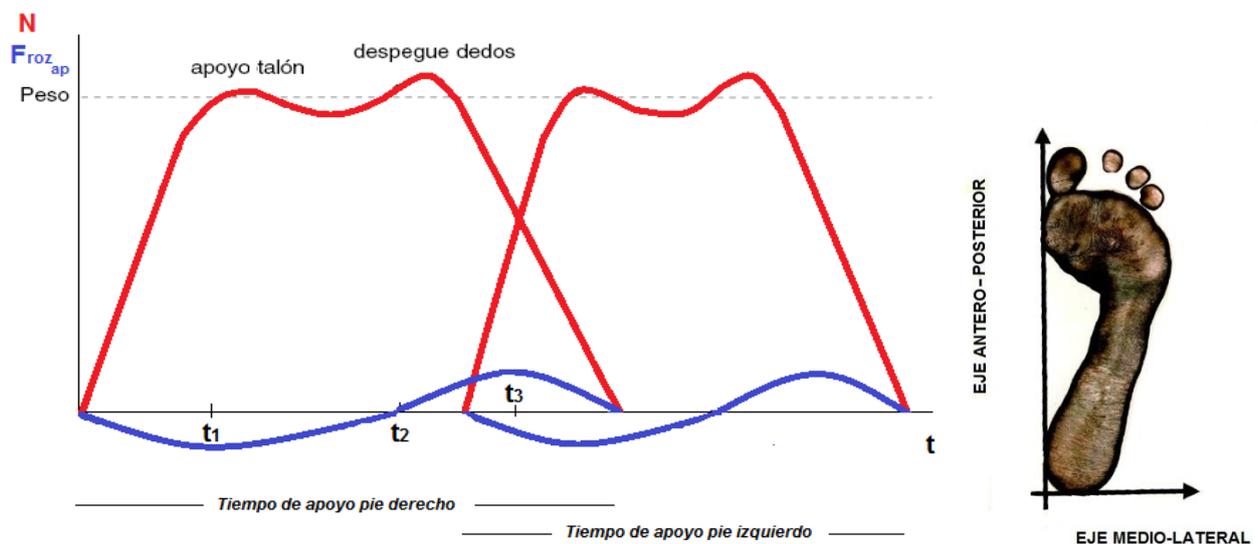


Fig. 3.21 Fuerza Normal y de rozamiento anteroposterior realizada por la superficie de apoyo durante la marcha

De acuerdo al gráfico de la figura 3.21, la componente Normal en la marcha tiene dos máximos durante la fase de apoyo de cada pie. El primero de ellos se da al hacer contacto con el talón en el piso por delante del cuerpo y el segundo al dejar el apoyo impulsándose con los dedos del pie que quedó atrás. Los valores de esos máximos son levemente superiores al Peso del cuerpo y dependen de la velocidad de avance. Entre ambos picos existe un valle que corresponde a la fase de contacto de un solo pie, el cual realiza toda la fuerza del cuerpo sobre el piso hasta que el otro pie hace apoyo.

Se aprecia también en el gráfico de la figura 3.21, que el módulo de las fuerza de rozamiento anteroposterior¹⁴ es en general bastante menor que el de la Normal. La componente anteroposterior ($F_{roz_{ap}}$) está representada por una curva que en el tiempo t_1 tiene su máximo valor negativo (su sentido es contrario al del avance del caminante) por el frenado que se produce al chocar el talón con el piso por delante del cuerpo.

¹⁴ La Fuerza de rozamiento puede analizarse a partir de sus componentes sobre el eje anteroposterior del pie y sobre el eje mediolateral del mismo.

Posteriormente disminuye su módulo hasta hacerse cero en el tiempo t_2 , cuando el centro de masa se encuentra sobre el pie de apoyo. Luego de iniciada la fase de apoyo bipodal, impulsándose con la parte anterior del pie, alcanza un máximo positivo en el tiempo t_3 .

Fuerzas en la carrera

En algunas ocasiones, el valor de las fuerzas se expresa en relación al Peso corporal (PC o BW) del atleta como se aprecia en el gráfico de la figura 3.22, en el cual se representan conjuntamente los valores de fuerza Normal (N) y de la fuerza de rozamiento anteroposterior (F_{rozap}) en función del porcentaje de duración del apoyo en la carrera. El mismo fue tomado de un [artículo](#) realizado por investigadores de la Facultad de Ciencias del Deporte de Toledo.

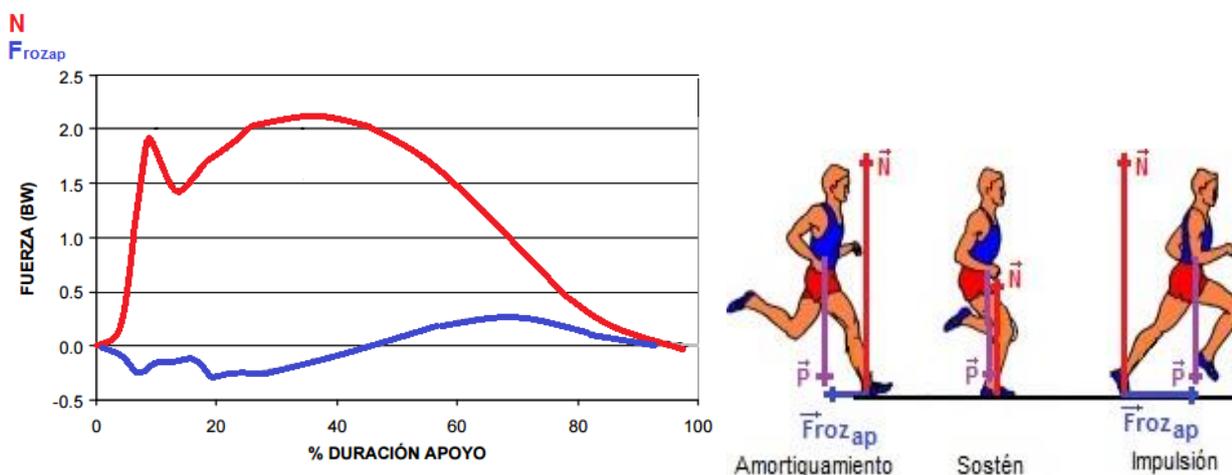


Fig. 3.22 Fuerza Normal y de rozamiento anteroposterior en función del porcentaje de duración del apoyo al correr

En el registro de la Normal en función del tiempo al correr a bajas velocidades (Figura 3.23), puede observarse un doble pico durante la fase de apoyo de cada pie.

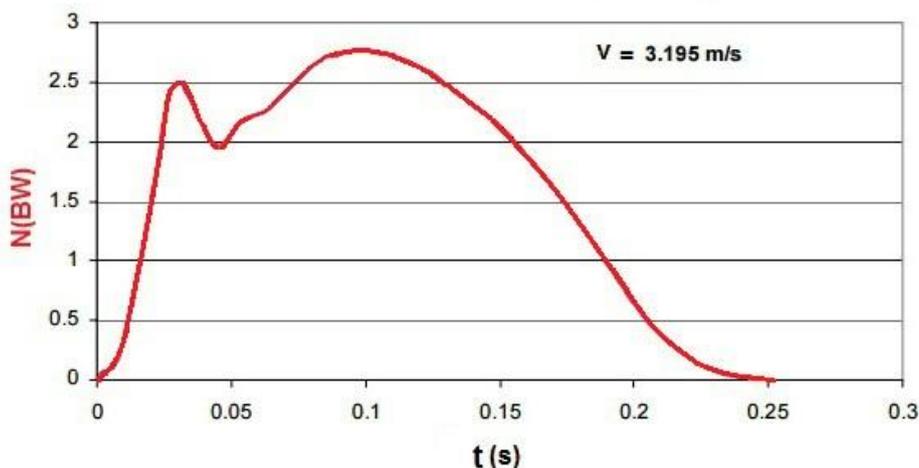


Fig. 3.23 Gráfico de fuerza Normal (en unidades de Peso Corporal BW) en función del tiempo durante el apoyo al correr

En general, al correr a bajas velocidades, los atletas toman contacto con el piso al apoyar el talón, produciéndose el primer pico del gráfico con un valor aproximado de la Normal de 2,50 BW a los 0,025 s de iniciado el apoyo. El segundo pico lo presenta aproximadamente a los 0,100 s al impulsarse con los dedos del pie, valiendo la Normal en este instante 2,80 BW.

El gráfico de la figura 3.24 muestra cómo varía el módulo de la Normal con el tiempo a medida que se modifica la velocidad.

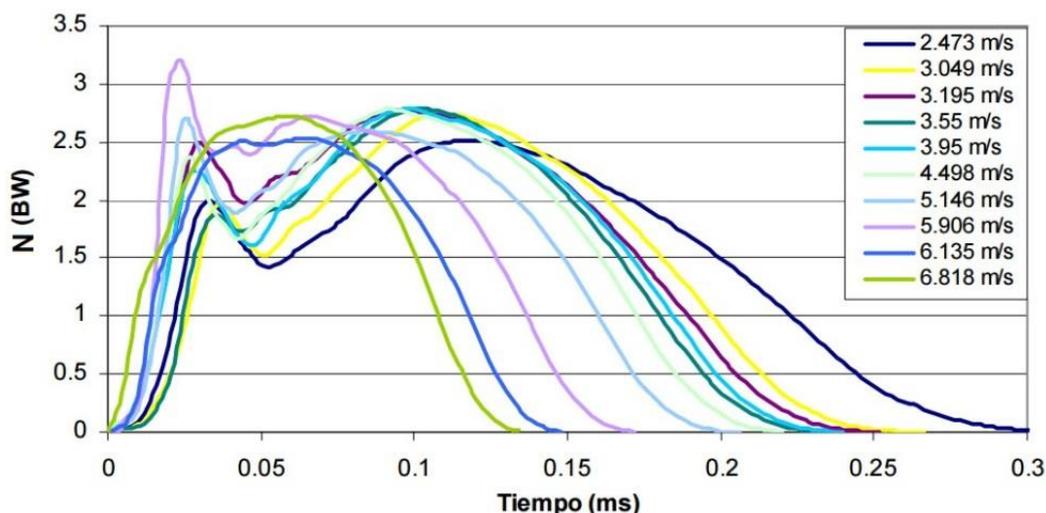


Fig. 3.24 Gráfico de la Normal (en unidades de Peso Corporal BW) en función del tiempo al correr a distintas velocidades

A altas velocidades se aprecia una disminución del tiempo de apoyo por debajo de la mitad del valor que insume a bajas velocidades. Puede observarse también, cómo los máximos se van aproximando hasta que la curva toma la forma de una única campana. Su mayor valor (a grandes velocidades) se presenta entre los 0,05 s y los 0,07 s de comenzado el apoyo.

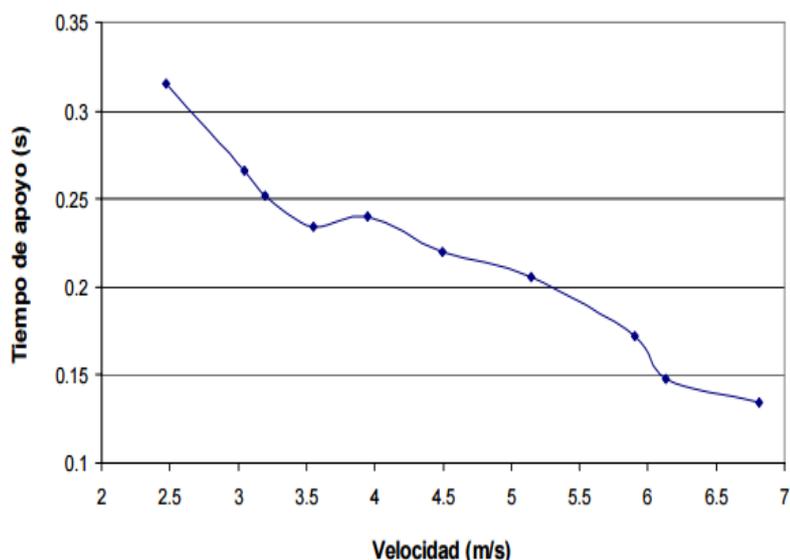


Fig. 3.25 Tiempo de apoyo en función de la velocidad de carrera

En el gráfico de la figura 3.25, podemos ver cómo al aumentar la velocidad disminuye el tiempo de la fase de apoyo.

El tiempo también depende de los materiales y estructura del calzado y de la pista. Las pistas más rígidas permiten un tiempo de contacto menor, pero son más perjudiciales para las lesiones que aquellas que ofrecen un mayor amortiguamiento y con ello menores fuerzas de impacto.

Durante el apoyo, en las carreras a bajas velocidades, normalmente el centro de presiones plantares comienza en el talón y se va desplazando hacia la región anterior, hasta que los dedos provocan el impulso final de despegue. En las carreras de velocidad en cambio, el apoyo comienza en el medio pie y se desplaza rápidamente hacia los dedos (Figura 3.26).

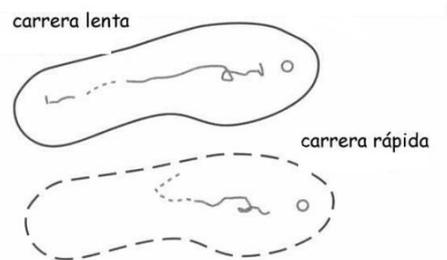


Fig. 3.26 Trayectoria del centro de presiones plantares al correr

Si observamos la evolución de la fuerza de rozamiento anteroposterior en función del tiempo al variar la velocidad de carrera, vemos nuevamente la disminución del lapso de interacción (Figura 3.27).

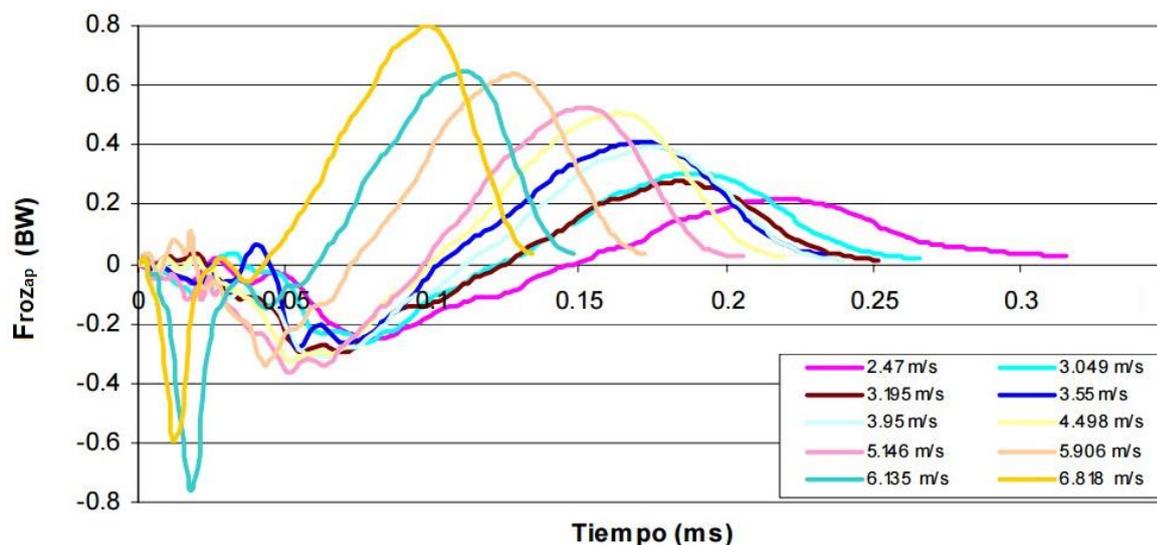


Fig. 3.27 Gráfico de fuerza de rozamiento anteroposterior en función del tiempo al correr a distintas velocidades

También se aprecia la conformación de un valle y luego un pico. El valle representa la fuerza máxima en sentido contrario al avance del corredor al apoyar el pie por delante del cuerpo. El pico es la fuerza máxima de impulsión paralela al piso en el sentido de la carrera que le permite acelerar hacia la meta.



Fig. 3.28 Uno de los zapatos con que Usain Bolt obtuvo el récord mundial en 100 m en Berlín 2009

Para tener un mejor agarre con la pista, el calzado de los corredores puede tener (de acuerdo al reglamento de la IAAF) clavos de hasta 9 mm de longitud.

La componente medio lateral de la fuerza de rozamiento $\vec{F}_{roz\ ml}$ en las carreras en línea recta es despreciable respecto a la anteroposterior. Su amplitud crece considerablemente al realizarse movimientos laterales cambiando el sentido de la velocidad (Figura 3.29).



Fig. 3.29 Fuerzas de rozamiento mediolateral al cambiar el sentido de la velocidad de avance

“Golpeando fuerte”

Para medir las fuerzas de los golpes de los luchadores, se utilizan sensores de fuerza en la zona del cuerpo que golpea o en la que hace impacto.

Como decíamos anteriormente, las fuerzas aplicadas en los deportes de lucha suelen darse en unidades de kilogramos fuerza (kgf) o en relación al peso corporal (BW).

Los golpes de puño más potentes los dan los boxeadores. [Mike Tyson](#) (Figura 3.30) llegó a aplicar fuerzas superiores a 7,0 BW con sus guantes en el ring. [Alfredo “el lince” Evangelista](#) (Figura 3.31), boxeador uruguayo en la década de 1970, campeón de Europa en siete ocasiones, también fue reconocido por la fuerza de sus impactos.

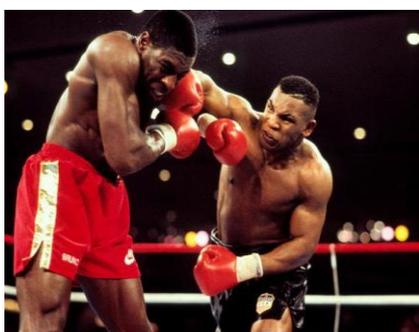


Fig. 3.30 Mike Tyson



Fig 3.31 Alfredo Evangelista

En un estudio realizado en el año 2006, Smith, M. registra la fuerza máxima de impacto de distintos golpes de un boxeador a diferentes zonas del cuerpo del adversario. Determina un promedio para cada tipo de golpe y la desviación máxima¹⁵ como se aprecia en el cuadro de la figura 3.32.

¹⁵ La mayor diferencia entre la fuerza de uno de los golpes y el promedio

BRAZO	RECTOS (N)	Desviación (N)	GANCHOS (N)	Desviación (N)
Delantero a la cabeza	1722	700	2412	813
Atrasado a la cabeza	2643	1273	2588	1040
Delantero al cuerpo	1682	636	2414	718
Atrasado al cuerpo	2646	1083	2555	926

Fig. 3.32 Fuerzas aplicadas en diferentes golpes de boxeo

Puede apreciarse que los golpes realizados cuando el puño comenzó a moverse hacia el contrincante desde atrás del cuerpo del golpeador (atrasados), tienen valores notoriamente superiores a los realizados cuando comenzó por delante. También se observa en la tabla que todos los golpes “de gancho” tienen un elevado valor de fuerza y no existen grandes diferencias entre ellos. El relleno del guante contribuye a amortiguar el impacto del “piñazo” y limita su fuerza máxima.

En el [Reglamento de Boxeo Profesional](#) de nuestro país se establece que: “En todos los encuentros entre profesionales se emplearán guantes de 6 onzas¹⁶ para los pesos moscas a liviano inclusive y de 8 onzas para los demás pesos”.

Los guantes de Artes Marciales Mixtas (MMA) tienen entre 4 onzas y 6 onzas y están diseñados para proteger al individuo que los viste, pero dejan los dedos libres para maniobras de “agarre” que permiten derribos o sumisiones.



Fig. 3.33 Gastón “Tonga” Reyno. Uruguayo Campeón mundial de Taekwondo en el 2010. Luchador de MMA.

En el artículo “La física del karate” publicado en la revista “Investigación y Ciencia”, los autores analizan sus propios golpes de pies y puños así como su capacidad de partir tablas o bloques. En el golpe de cuchillada (el “corte de karate”), registraron velocidades de la mano próximas a los 50 km/h y fuerzas máximas de 300 kgf.

Un [estudio realizado por la National Geographic](#) sobre las “patadas” en diversas disciplinas nos muestra valores de velocidad y fuerza máxima en el impacto (Figura 3.34).

	Taekwondo	Capoeira	M.M.A.	Karate
Rapidez del pie en el instante del impacto (km/h)	219	159	209	114
Fuerza máxima de impacto (kgf)	1043	816	635	195

Fig. 3.34 Rapidez y fuerza máxima de impacto para “patadas” de diversas artes marciales

¹⁶ 1 onza ~ 28,3495231 gramos

El daño que provoca un golpe no depende solo de la fuerza aplicada sino de la presión que ejerce la misma.

Un boxeador de peso pluma aplica normalmente golpes de menor fuerza que un peso pesado. Pero sus guantes, de menor superficie, le permiten equiparar la presión máxima de pegada con los boxeadores de mayor peso (normalmente 10 kgf/cm^2). Myke Tyson aplicaba golpes en torno a los 25 kgf/cm^2 de presión a sus adversarios, seguramente de los mayores valores en la historia del boxeo moderno.

En el karate, para las roturas con el puño de tablas o bloques puede utilizarse el golpe [Gyaku Tsuki](#), el cual, al aplicarse con los nudillos, reduce el área de impacto aumentando la presión y por lo tanto la probabilidad de rotura (Figura 3.35b).

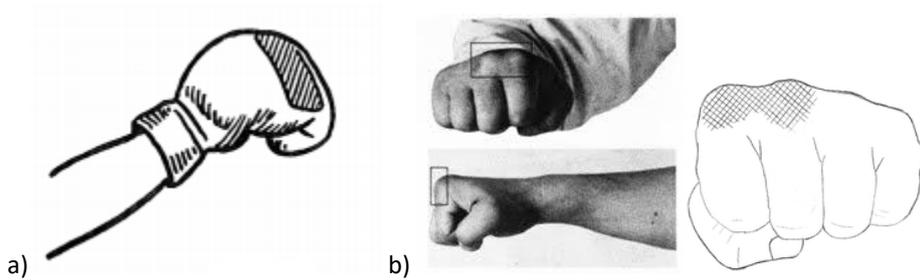


Fig. 3.35 Zonas normales de impacto para el golpe de puño en: a) boxeo y b) karate

Fuerzas musculares

En esta sección consideraremos los músculos esqueléticos, es decir aquellos músculos que se insertan a los huesos mediante tendones. Son normalmente de contracción voluntaria y gracias a ellos los deportistas pueden mantener determinadas posturas y realizar variados movimientos. Constituyen el 90% de los músculos del cuerpo humano y aproximadamente un 40% de la masa corporal.

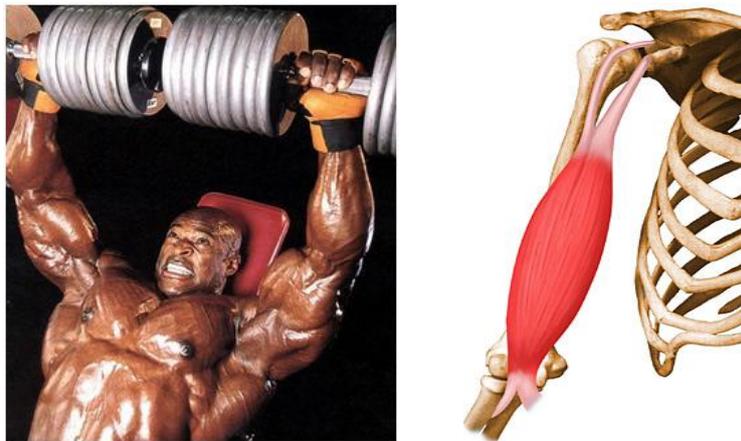


Fig. 3.36 Músculos del cuerpo humano

Las fuerzas musculares (llamadas también tensiones o tracciones musculares) son consecuencia de una contracción provocada por procesos eléctricos del sistema nervioso.

Puede modelarse el funcionamiento de la unidad músculo-tendinosa a partir de elementos (componentes) contráctiles (“activos”) y elásticos (“pasivos”). El modelo aportado por Hill, A. V. en 1950, si bien no explica todas las propiedades, es el más utilizado por su simpleza y porque sus resultados se aproximan mucho a los experimentales. Se constituye por un elemento contráctil en serie con uno elástico y otro elemento elástico en paralelo como muestra la figura 3.37.

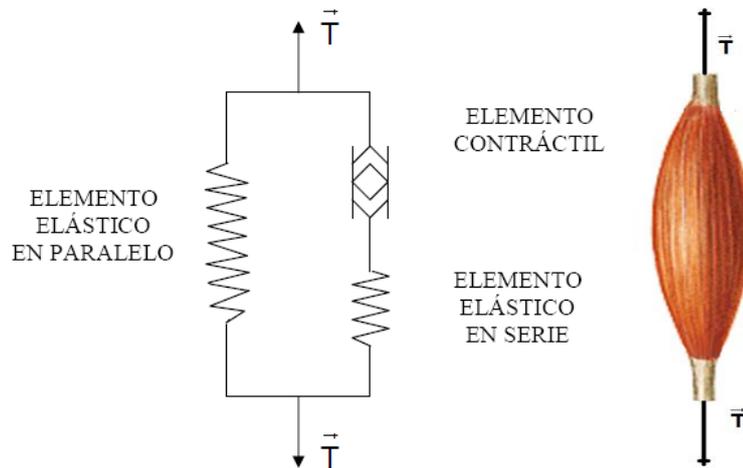


Fig. 3.37 Modelo aportado por Hill, A. V. para la contracción muscular

El elemento contráctil representa a las proteínas de las miofibrillas que conforman cada fibra muscular. Cada miofibrilla está formada por una sucesión de filamentos finos (actina) y gruesos (miosina). La longitud de ambos es de pocas micras y a la mitad de cada banda de filamentos finos, se encuentran los discos Z. A la entidad situada entre dos discos Z consecutivos se le denomina Sarcómero y puede considerarse como la unidad de acción contráctil (Figura 3.38).

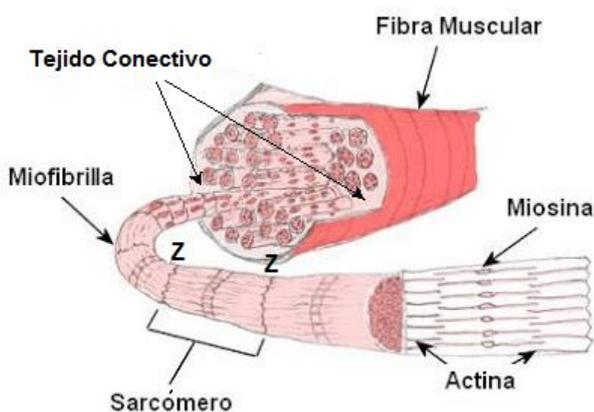


Fig. 3.38 Composición de la Fibra Muscular

Los filamentos finos se desplazan entre los gruesos variando así la cantidad de “puentes cruzados” existentes entre ellos. Cuanto mayor sea la zona de solapamiento entre las fibras, mayor será el número de puentes, el cual tiene una relación directa con la tensión muscular.

El elemento elástico en serie representa principalmente a los tendones y el elemento elástico paralelo al tejido conectivo que rodea las fibras musculares. Estos elementos, por sus propiedades mecánicas, son análogos a resortes, es decir, para distenderlos hay que aplicar una fuerza \vec{T} como se representa en la figura 3.37.

Puede graficarse la contribución a la tensión de los elementos contráctiles y elásticos así como la respuesta conjunta en función de la longitud del Sarcómero como indica la figura 3.39.

La tensión total que el músculo aplica, equivale a la suma de las tensiones ejercidas por sus componentes.

La tensión de la componente contráctil comienza a crecer a partir de 1,3 μm de longitud del Sarcómero y lo hace por el aumento del área de solapamiento entre las fibras. Puede apreciarse la existencia de un máximo de tensión cuando la longitud del Sarcómero es aproximadamente 2,0 μm . En esta posición, el número de puentes entre la actina y la miosina es máximo. Luego decae el valor de la tensión, haciéndose despreciable su valor antes de los 4,0 μm de longitud, porque ya no hay superposición entre los filamentos.

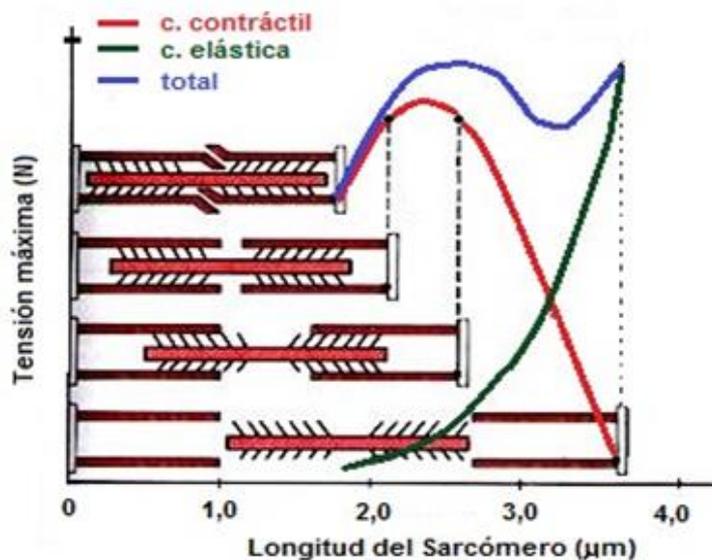


Fig. 3.39 Tensión muscular en función de la longitud del Sarcómero

La tensión de la componente elástica es mayor, cuanto mayor es el estiramiento del Sarcómero. Si el músculo se dispusiera en su longitud natural, las fuerzas elásticas serían nulas. En los seres vivos, aun cuando el músculo está relajado, su longitud es mayor que la natural y por eso siempre tiene cierta tensión. A partir de una longitud de 3,3 μm en adelante, la tensión de la componente elástica predomina (cada vez más) sobre la contráctil.

Por tener las fibras de contracción rápida mayor cantidad de puentes cruzados respecto a las de contracción lenta, son capaces de generar una mayor tensión en menor tiempo, aunque las primeras llegan más fácilmente a la fatiga. Algunos estudios concluyen que el porcentaje de estas fibras en el cuerpo humano no está determinado en el nacimiento, sino que es posible modificarlo levemente (con ciertos estímulos) hasta llegada la pubertad.

En una investigación realizada con distintos velocistas, se apreció que el jamaicano [Asafa Powell](#) tenía una salida de tacos extraordinariamente explosiva para su tamaño y peso. Al estudiar su constitución muscular se encontró que poseía el músculo psoas mayor muy desarrollado (Figura 3.40), cuatro veces mayor al de una persona normal.

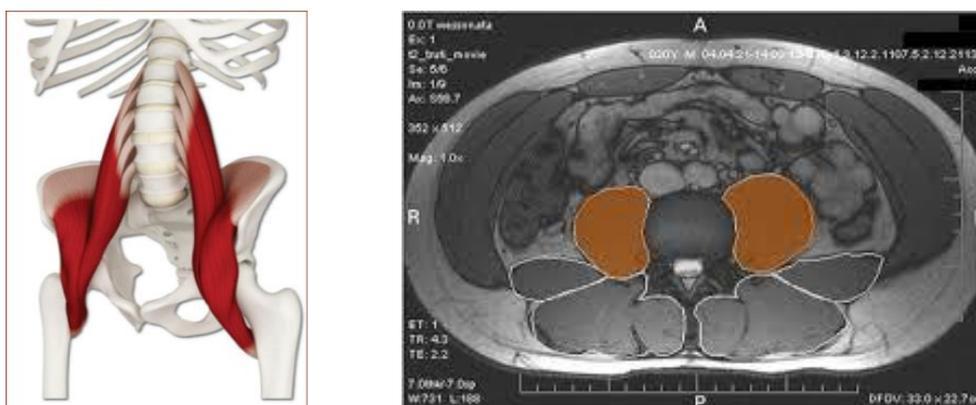


Fig. 3.40 Músculos Psoas de [Asafa Powell](#)

La gran tensión que experimenta este músculo se trasmite a sus piernas durante el apoyo, lo que le permite una salida vertiginosa y una veloz carrera.



Fig 3.41 Cuádriceps del muslo

Otro músculo de vital importancia a la hora de saltar, pedalear o patear un balón es el cuádriceps (Figura 3.41).

Gracias a la capacidad de sus cuádriceps de aplicar grandes tensiones en poco tiempo, [Roberto Carlos](#) (Figura 3.42) era capaz de proyectar la pelota a velocidades superiores a 150 km/h y correr los 100 metros llanos en 10,6 s.



Fig. 3.42 Roberto Carlos

Los ciclistas desarrollan mucho estos músculos por el gran esfuerzo que realizan durante tiempos prolongados (Figura 3.43).



Fig. 3.43 Cuádriceps de ciclistas

Resumiendo

El modelo de la Mecánica Newtoniana explica el porqué de tal o cual movimiento de traslación basándose en tres Principios de la Dinámica: Inercia, Masa e Interacción. Estos son aplicables a todos los deportes.

La fuerza Peso de un cuerpo, varía de acuerdo a la ubicación geográfica y esto puede influir en el rendimiento de los deportistas.

En los deportes donde se hace apoyo sobre una superficie, la fuerza de esta sobre el atleta es un factor determinante para su desempeño. Sus componentes Normal y de rozamiento son registradas con plataformas de fuerza para lograr la mejor performance o seguir la evolución de un tratamiento de salud.

Conocer la composición, la disposición y el funcionamiento de los músculos, nos permite entender y mejorar el rendimiento de los atletas en los diversos deportes.

Enlaces para ampliar la información:

- [“Análisis cinético y cinemático de la carrera de velocidad 100 m lisos en sus diferentes fases”](#) D. César Carrillo Cordón Departamento de Deportes de la Facultad de Ciencias de la Actividad Física y del Deporte (INEF) Universidad Politécnica de Madrid .
- [“Fuerzas de reacción en la carrera, trotando y esprintando”](#).
X. Aguado, Luis Alegre. Facultad de Ciencias del Deporte Toledo. Universidad de Castilla la Mancha.
- [“Contracción muscular, control génico y homeostasis del medio interno”](#). Presentación de Hernán Jiménez (kinesiólogo).
- [Video](#) que explica la constitución del músculo y el mecanismo de la contracción muscular.
Dr. Luca Merlini.
- Interesante [artículo](#) donde profundizar en los distintos músculos del cuerpo humano, su composición y funcionamiento.
Prof. Pablo Pozo Rosado.
- [“La ciencia del hombre más rápido del mundo”](#)
Breve análisis de la Sección Cromo del diario digital “El Observador”.
- Desarrollo teórico y simulador de [“Tiros a canasta”](#) de la web [“física con ordenador”](#)
Angel Franco García.
- [“Tiros de básquetbol desde la silla de ruedas”](#)

Análisis detallado de estos lanzamientos.

Preguntas y Problemas

1) En el Rally Dakar se produjo un choque entre una moto y un camión. Un periodista afirmó que: “*el motociclista tuvo lesiones de mayor entidad que el camionero, debido a que el camión es (obviamente) más pesado que la moto y por eso le aplicó una fuerza mayor*”.

¿Qué podría usted decir acerca de esta afirmación?

2) ¿De qué depende el Peso de un deportista? ¿Cambia de una ciudad a otra? Justifique.

3) ¿El módulo de qué fuerza mide la balanza cuando un deportista se ubica sobre ella?

4) Si el atleta uruguayo Mauro Acosta¹⁷, realiza levantamiento de pesas (halterofilia) en una competencia:

a) Representa las fuerzas sobre las pesas y sobre el deportista si se encuentran en reposo como indica la figura 3.44.

b) ¿Qué cambiará en la representación respecto a la anterior, si sube las pesas con velocidad constante?

c) ¿Qué cambiará en la representación respecto a la anterior, si baja las pesas con velocidad constante?



Fig. 3.44 Mauro Acosta levantando pesas

Masa del atleta $m_A = 60 \text{ kg}$

Masa de las pesas $m_P = 120 \text{ kg}$

5) Un gimnasta de masa $m = 80 \text{ kg}$ se mantiene en reposo en los anillos con la postura de Cristo como indica la figura 3.45.



Fig. 3.45

a) Determine la fuerza Tensión en las cuerdas si estas se encuentran dispuestas paralelas en la vertical.

b) ¿Qué sucede con el módulo de las tensiones en las cuerdas si se van acercando sus extremos superiores y crece el ángulo que forman entre sí?

6) Un esquiador baja por una pendiente con velocidad constante. Tomando las medidas necesarias en la figura 3.46, determine aproximadamente el coeficiente de rozamiento cinético entre las tablas y la superficie.



Fig. 3.46

7) Sin tener en cuenta la rotación terrestre, ¿puede en una superficie horizontal la fuerza Normal sobre el deportista tener mayor valor que su Peso? ¿Y ser menor su valor al Peso? Explique con ejemplos deportivos.

8) Mencione situaciones donde se busque aumentar o disminuir la fuerza de rozamiento en el deporte.

9) Dos pelotas de fútbol tienen igual tamaño, pero una es más pesada que la otra. ¿Cuál llegará primero al suelo si se las deja caer desde la misma altura? a) en el aire b) en condiciones de caída libre.

10) En una competencia de trepar y bajar una cuerda vertical en el menor tiempo posible, es más probable que se rompa la cuerda cuando el competidor: a) acelera hacia arriba b) acelera hacia abajo c) sube con velocidad constante d) se sostiene en la misma posición.

Elija justificadamente la opción correcta y explique si es relevante o no el sentido de la velocidad en los casos a) y b).

¹⁷ Levantador de pesas uruguayo que en los Juegos Panamericanos de México 2011 logró el récord nacional en la categoría de hasta 62 kg levantando 124 kg en envión.

Actividades

- 1) Realizar diferentes choques en una dirección entre dos carritos (variando la masa, la velocidad, etc.) registrando las fuerzas en función del tiempo con sensores (Figura 3.47) en cada uno de ellos (puede motivar nombrar a los carritos como atletas de rugby, sumo, etc.).
Concluir a partir de los datos obtenidos la relación entre las fuerzas de interacción.



Fig. 3.47 Sensor de fuerzas

- 2) Mediante la filmación de la lectura de una balanza durante el tiempo de apoyo de los pies al realizar un salto, determinar los valores máximos y mínimos de la Normal. Si se cuenta con plataforma de fuerzas obtener y analizar el gráfico de la Normal en función del tiempo.
- 3) Con la ayuda del artículo [“Coeficiente de rozamiento del calzado”](#) (X. Aguado, Luis Alegre, Facultad de Ciencias del Deporte Toledo, Universidad de Castilla, La Mancha), determinar dicho coeficiente para diferentes calzados y superficies de apoyo.
- 4) A partir del análisis de video de un golpe a la bolsa grande de boxeo (de masa conocida), determinar la aceleración máxima y la fuerza máxima de impacto.
- 5) Con la ayuda del artículo [“Fuerzas de reacción en la marcha. Calzado y descalzo”](#) (X. Aguado, Luis Alegre, Facultad de Ciencias del Deporte Toledo, Universidad de Castilla, La Mancha), realizar un análisis de las fuerzas aplicadas en los diferentes instantes.
(Para realizarlo se necesita una plataforma de fuerzas).

Si se necesita conocer algunos datos básicos para realizar una buena filmación leer [Anexo 1](#).

Si se quiere realizar el análisis de video con el software libre [“Tracker”](#) se puede consultar la guía básica de su manejo [aquí](#). Y aquí un [video tutorial](#) realizado por el profesor Marcelo Vachetta.

Capítulo 4 Avanzando en la caída

Si lanzamos un cuerpo próximo a la superficie terrestre con una velocidad que tiene componente horizontal, normalmente avanzará en esa dirección al mismo tiempo que experimenta una aceleración hacia abajo en la vertical.

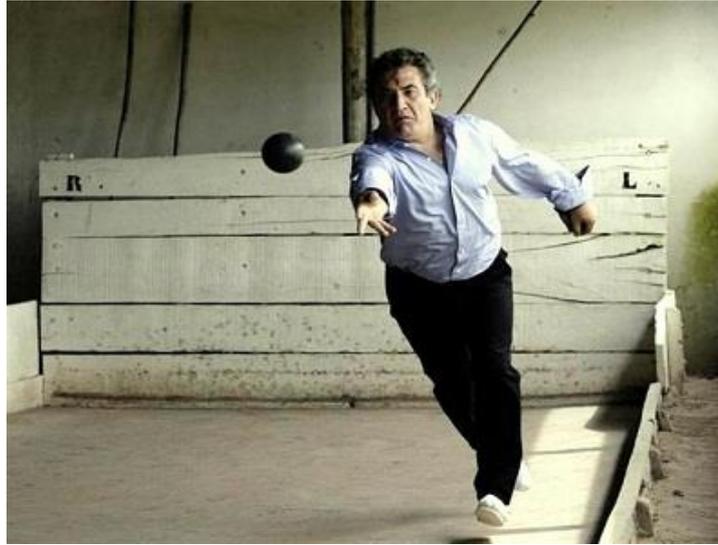


Fig. 4.01 Lanzamiento de bocha

El estudio de esta situación se denomina generalmente “de proyectiles” y se considera dentro de los movimientos “compuestos” ya que se analiza como la composición de movimientos simultáneos e independientes en la horizontal y en la vertical. En el deporte, los objetos se proyectan en el aire o en el agua por lo que reciben fuerzas de dichos fluidos que afectan su movimiento. Estas interacciones son en ocasiones complejas de analizar ya que dependen de muchas variables.

Sin embargo, podremos aproximarnos al estudio del movimiento de algunos proyectiles cuando sea despreciable la interacción con el fluido. Esto será posible en general cuanto mayor sea la masa del proyectil, menor su velocidad, menor su volumen y baja la densidad del medio en el que viajan (como el aire a [PTN](#)).

Para tales situaciones podremos considerar la condición ideal de que la única fuerza actuante es el

Peso. De esta manera la componente horizontal de la velocidad inicial \vec{v}_{0x} se mantendrá constante hasta hacer impacto ya que en dicho eje la Fuerza Neta será nula. En la vertical la caída será “libre”, teniendo como aceleración la gravitatoria, hacia abajo y de módulo $g \cong 9,8\text{m/s}^2$. No existirán fuerzas laterales, por lo que la trayectoria estará contenida en un plano.

La condición de caída libre puede ser una buena aproximación a la realidad por ejemplo: en el lanzamiento de baloncesto, de bala, en el salto largo, alto o triple, un pase corto en fútbol, balonmano, vóleybol, o rugby.

El modelo no es tan bueno aplicado para analizar el movimiento de una pelota de tenis de mesa (“ping pong”) o bádminton, tampoco el vuelo del disco o de la jabalina, ni la entrada al agua de un nadador por la alta relevancia de la interacción con el fluido.

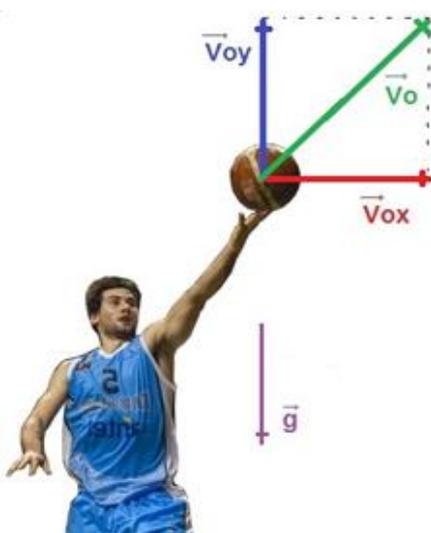


Fig. 4.02 Bruno Fitipaldo (base de la Selección Uruguaya de Básquet)



Fig. 4.03 Bádminton

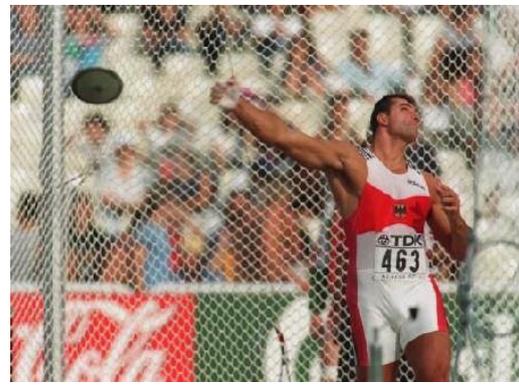
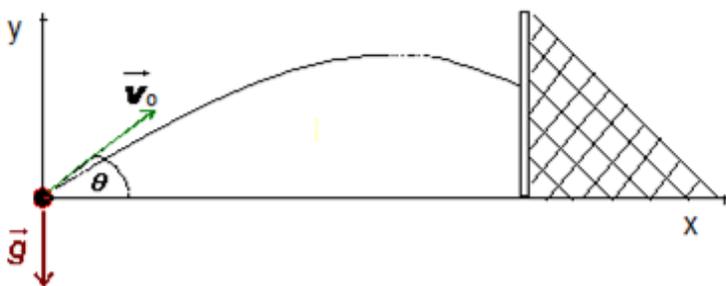


Fig. 4.04 Lanzamiento de disco

La “picada del loco”

Cuando en el fútbol se realiza un saque de banda corto o se “patea” la pelota a baja velocidad, también podemos realizar un análisis aproximado de su movimiento con condiciones de “caída libre” (Figura 4.05).

Fijando el origen de coordenadas en la posición inicial de la pelota, puede llegarse a la ecuación de su posición vertical en función de la horizontal (Ecuación 4.1).



$$y(x) = \operatorname{tg} \theta x - \frac{g}{2 \cdot v_0^2 \cdot \cos^2 \theta} \cdot x^2 \quad (\text{Ec. 4.1})$$

Fig. 4.05 Velocidad inicial de vuelo y aceleración gravitatoria

La misma indica que la curva de la trayectoria de la pelota es, tal como expresan algunos periodistas deportivos: “una parábola perfecta” (no es así si la interacción con el aire es significativa).

Seguramente no pensó nada de esto “el loco” [Sebastián Abreu](#) al ejecutar el penal “de picada”¹⁸, “a lo Panenka”, que dejó a Uruguay entre los cuatro mejores en el mundial de Sudáfrica 2010 y poco nos importó la Física en ese momento de festejo (Figura 4.06). Pero podemos hoy, tomar una [filmación](#) de esa “locura” y mediante algún software de análisis de video, considerar sus características cinemáticas.

La pelota, luego de ser impactada por su pie, salió a una velocidad de módulo $v_0 = 48 \text{ km/h}$ aproximadamente, formando un ángulo $\theta = 27^\circ$ con la horizontal.



Fig. 4.06 Penal lanzado por [Abreu](#) contra Ghana. Mundial Sudáfrica 2010

¹⁸ Se denomina así cuando la pelota sale con una velocidad de bajo módulo y un ángulo importante respecto a la horizontal.

Si realizamos la descomposición de la velocidad inicial (\vec{V}_0) en la vertical (\vec{V}_{0y}) y en la horizontal (\vec{V}_x), podemos aplicar las ecuaciones correspondientes en cada eje y determinar algunos datos relevantes.

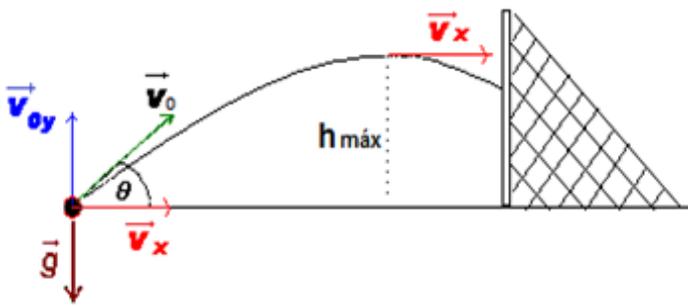


Fig. 4.07 Componentes de la velocidad, al inicio del vuelo
v en la altura máxima

El tiempo que tardó la pelota lanzada por Abreu en llegar a su altura máxima ($\Delta t_{h_{\text{máx}}} = V_{0y} / g$) fue aproximadamente 0,61 s.

Y la altura máxima que ascendió en ese tiempo ($\Delta y = v_{0y} \cdot \Delta t - \frac{g \cdot \Delta t^2}{2}$) fue de 1,8 m sobre el césped. Siendo imposible entonces que el lanzamiento pasara por sobre el horizontal ubicado a 2,44 m de altura.

Empleando la ecuación ($\Delta t = \Delta x / V_x$) en el eje

horizontal, podemos afirmar que la pelota tardó 0,92 s en avanzar los 11 m hasta la línea de gol y 0,83 s a la posición en que se encontraba el golero (que se adelantó 1,0 m).

Tomando en cuenta que el tiempo de reacción de un golero ronda los 0,20 s y que tarda mucho más que eso en levantarse, era imposible que habiéndose arrojado hacia un palo, pudiera incorporarse y atajar ese lanzamiento.

Considerando además de la Física de los proyectiles, los análisis estadísticos¹⁹ que muestran cómo los goleros (especialmente en momentos de alta tensión) se vuelcan normalmente hacia uno de los laterales, el disparo del “loco” quizás no fue tan “loco” y aportó un “condimento” especial a la victoria.

Entrando por el aro

Si filmamos lateralmente un tiro libre de básquet u otro tiro de corta distancia y realizamos el análisis de video (Figura 4.08), podemos obtener un gráfico de su posición horizontal en función del tiempo como muestra la figura 4.09.



Fig. 4.08 Ejes de coordenadas y registro de posiciones en lanzamiento de básquetbol

¹⁹ [Entrevista](#) a los investigadores Blanco, E. y Jones, W. sobre los estudios estadísticos de lanzamientos de penales

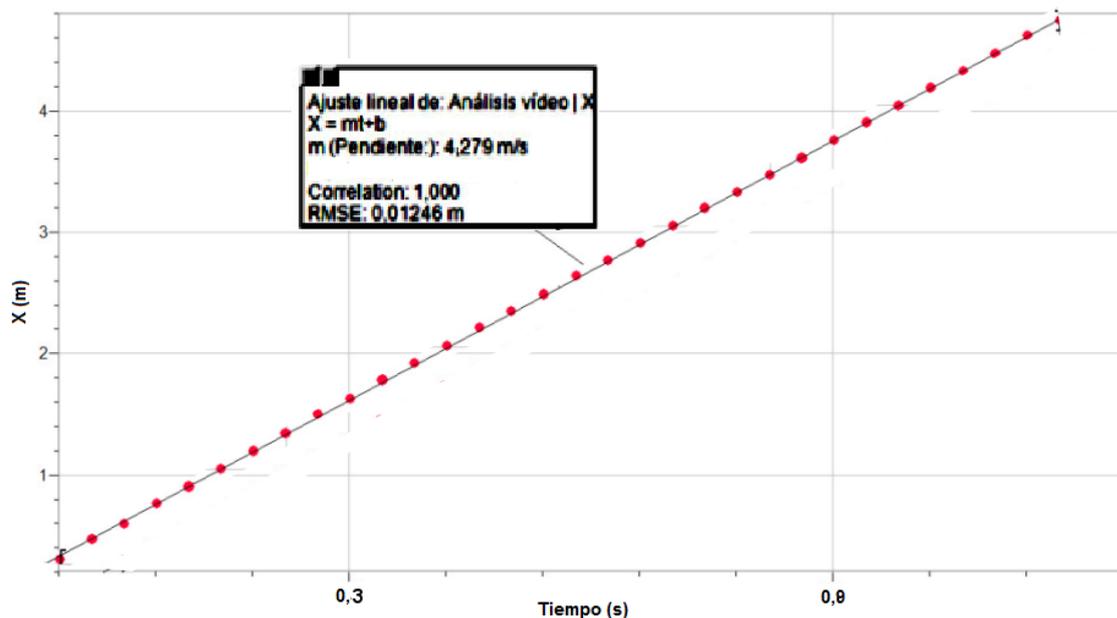


Fig. 4.09 Gráfico de posición horizontal en función del tiempo para lanzamiento de básquetbol

Estando prácticamente alineados los puntos en dicho gráfico, es posible afirmar que los desplazamientos horizontales son directamente proporcionales a los intervalos de tiempo y por lo tanto la velocidad en ese eje v_{ox} es constante. La pendiente del gráfico nos dará su valor. El no frenarse considerablemente en su avance horizontal, revela que la interacción con el aire en esa dirección es poco significativa.

Si graficamos la posición vertical de la pelota en función del tiempo, obtendremos una curva como la de la figura 4.10 y la pendiente de la tangente en el instante en que se lanza la pelota nos dará la velocidad vertical inicial v_{oy} de vuelo.

Si el programa de análisis de video nos permite encontrar la función que más se aproxima a los valores experimentales, apreciaremos que la desviación es mínima de acuerdo a la ecuación:

$$y = y_0 + v_{0y} \cdot \Delta t - \frac{g}{2} \cdot \Delta t^2.$$

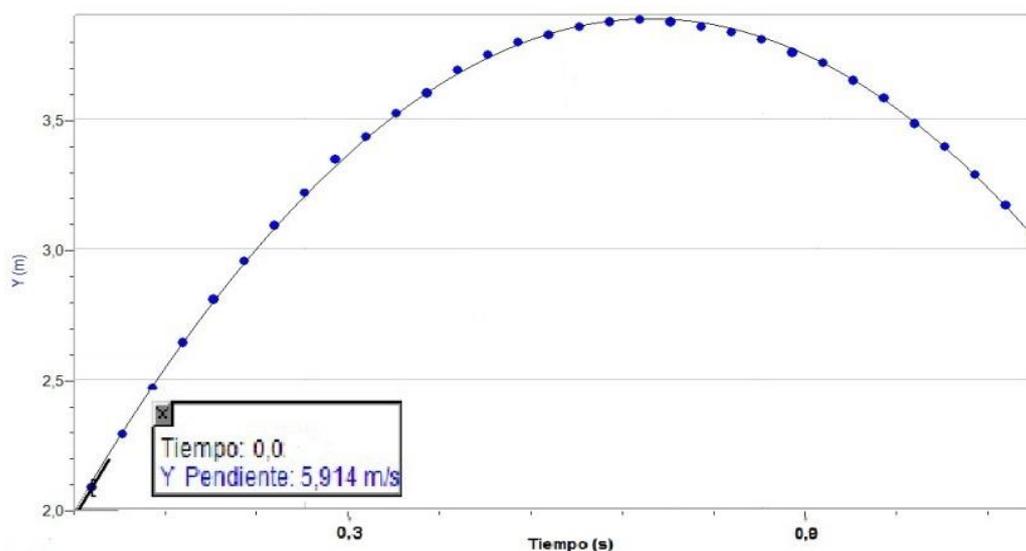


Fig. 4.10 Gráfico de posición vertical en función del tiempo para lanzamiento de básquetbol

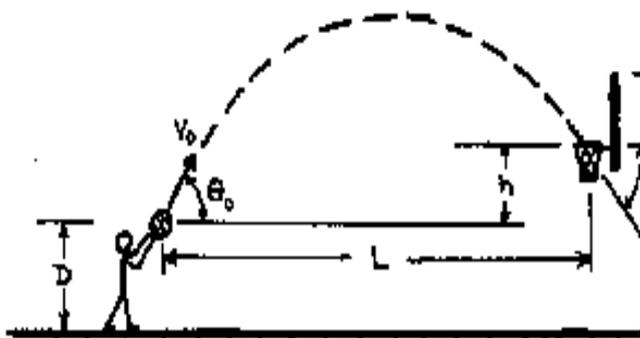
A partir de la velocidad inicial vertical y horizontal es posible determinar el módulo de la velocidad inicial de lanzamiento y el ángulo que forma con la horizontal (Ecuaciones 4.2 y 4.3).

$$v_0 = \sqrt{v_{0x}^2 + v_{0y}^2} \quad (\text{Ec. 4.2})$$

$$\theta_0 = \tan^{-1} \left(\frac{v_{0y}}{v_{0x}} \right) \quad (\text{Ec. 4.3})$$

Sabemos por observación y práctica, que es posible acertar al aro realizando tiros con mucho vuelo y también con otros cuyas trayectorias sean más cortas (más “planos”).

Puede demostrarse que si se quiere que la pelota pase por el centro del aro, se da la relación funcional que expresa la ecuación 4.4 entre el módulo de la velocidad de tiro (v_0) y el ángulo respecto a la horizontal (θ_0) (Figura 4.11):



$$v_0^2 = \frac{gL}{2 \cos^2 \theta_0 (\tan \theta_0 - h/L)}$$

(Ec. 4.4) Función de centro de aro

Fig. 4.11 Representación de la trayectoria de la pelota, de h y L hasta llegar al aro.

Siendo h el desplazamiento vertical entre la posición en que la pelota se desprende de la mano del jugador hasta el centro del aro, L el desplazamiento horizontal entre dichas posiciones y g la aceleración gravitatoria.²⁰

Para acertar al aro no es necesario que sea por su centro ya que el diámetro del mismo D_a es de 45,7 cm y el de la pelota D_p entre 23 cm y 24 cm (Figura 4.12).

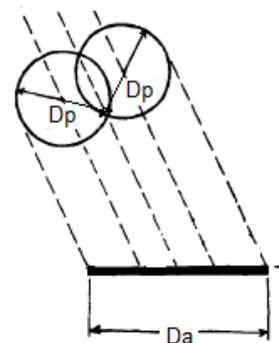


Fig. 4.12 Trayectorias de centro de aro y desviaciones máximas para el acierto sin rebote

En el gráfico de la figura 4.13 se representa la función de centro de aro junto a la de los valores límites, es decir entrando justamente sin tocar el aro por la parte anterior y por la parte posterior.

²⁰ Un desarrollo más extenso de este estudio y la fundamentación de las ecuaciones puede encontrarse en el artículo “Physics of basketball” Peter. J. Brancazio Brooklyn 1980 AJP.

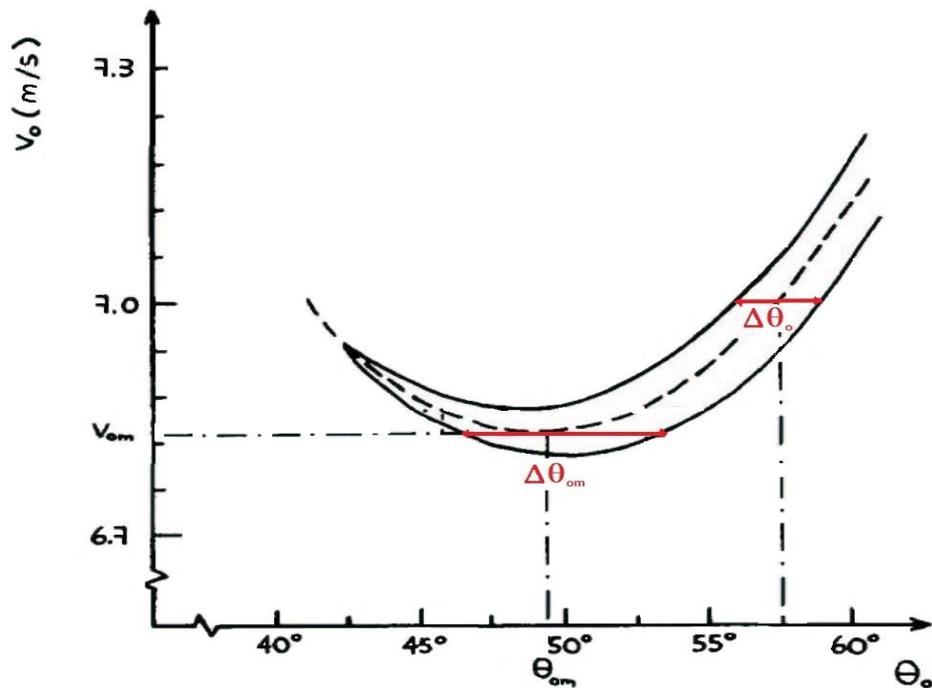


Fig.4.13 Gráfica de $v_0 = f(\theta_0)$ para $h = 0,60 \text{ m}$, $L = 4,10 \text{ m}$ (al centro del aro), $L_{\text{mín}} = 3,87 \text{ m}$, $L_{\text{máx}} = 4,33 \text{ m}$.
 Las líneas sólidas delimitan la zona de puntos que corresponden a un tiro certero y la punteada corresponde a una trayectoria que pasa por el centro del aro.

Como se aprecia en el gráfico, la función de centro de aro tiene un mínimo que puede determinarse junto a su correspondiente ángulo con las ecuaciones siguientes:

$$v_{0m} = \sqrt{g(\sqrt{L^2 + h^2} + h)} \quad (\text{Ec. 4.5})$$

$$\theta_{0m} = 45^\circ + \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{h}{L}\right) \quad (\text{Ec. 4.6})$$

Dicha velocidad mínima es también la velocidad ideal y su conveniencia se fundamenta por varios motivos.

El más relevante surge del gráfico de la figura 4.13, donde se observa que la velocidad mínima (v_{0m}) es la que permite una mayor desviación (ya sea por exceso o defecto) en el ángulo de lanzamiento, obteniéndose igualmente el acierto (aunque no sea por el centro del aro). Es decir, si se lanza con dicha velocidad es posible alejarse ampliamente a ambos lados del ángulo ideal (θ_{0m}) e igualmente la pelota, dentro del intervalo $\Delta\theta_{0m}$, entrará sin rebotar en el aro. Para otras velocidades el intervalo $\Delta\theta_0$ será menor a $\Delta\theta_{0m}$.

Se puede observar también que es más importante ajustar la velocidad que el ángulo, ya que permite una mayor desviación porcentual sin salirse del acierto.

Está demostrado que muchos jugadores profesionales, sin haber visto nunca estas ecuaciones, logran por ensayo y error, terminar lanzando con una velocidad próxima a la mínima (sobre todo en los libres). La práctica con la teoría se complementan y es necesario considerar a ambas cuando se quiere progresar en todo deporte.

Balas que pican lejos

El lanzamiento de bala (o peso) consiste en arrojar con una mano dicho implemento, partiendo desde el contacto con el cuello, de forma que pique por primera vez lo más lejos posible del círculo de lanzamiento.



Fig. 4.14 [Gisela Mauermayer](#) medalla de oro JJ.OO. Berlín 1936

Por ser la bala un cuerpo muy masivo (7,26 kg para varones y 4,0 kg para damas), pequeño y al tener una velocidad que en general no supera los 15 m/s, su trayectoria en el aire se aproxima a una parábola.

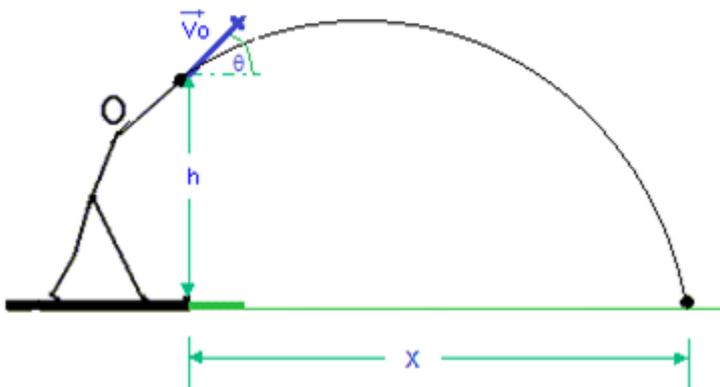


Fig. 4.15 Representación lanzamiento de bala.

Si el proyectil lanzado a una velocidad v_0 hiciera impacto al mismo nivel de salida, el alcance máximo se lograría de acuerdo a la ecuación $X_{m\acute{a}x} = \frac{v_0^2 \text{sen}(2\theta)}{g}$ con un ángulo de 45° .

Pero en este deporte el atleta deja de tener contacto con la bala que impulsa aproximadamente a 2,0 m por sobre el nivel del suelo, por lo que esta termina cayendo por debajo del nivel de salida.

Llamaremos θ_{opt} al ángulo óptimo para obtener el alcance máximo que simbolizaremos $X_{m\acute{a}x}$. Su valor puede determinarse con la ecuación 4.7:

$$\theta_{opt} = \tan^{-1}\left(\frac{v_0}{\sqrt{v_0^2 + 2gh}}\right) \quad (\text{Ec. 4.7})$$

Lanzando con este ángulo óptimo $\theta = \theta_{opt}$ el alcance se determinará con la ecuación 4.8:

$$X_{m\acute{a}x} = \frac{v_0}{g} \sqrt{v_0^2 + 2gh} \quad (\text{Ec. 4.8})$$

Siendo h la altura de lanzamiento y v_0 el módulo de la velocidad inicial.

En la figura 4.16 puede apreciarse cómo desde una altura de lanzamiento dada, al modificar la velocidad, varía el ángulo óptimo (que determina el máximo de la curva con su correspondiente alcance).

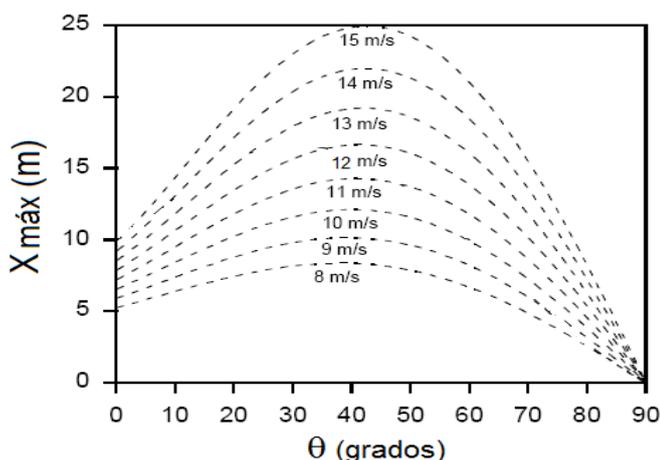


Fig. 4.16 Gráficos del Alcance horizontal en función del ángulo para distintas velocidades de lanzamiento desde una altura $h=2,1$ m.

Si determinamos con la ecuación 4.7 el ángulo óptimo para un lanzador que arroja la bala con una velocidad $v_0= 14$ m/s desde una altura $h= 2,0$ m, nos da un valor aproximado de $42,4^\circ$. Este valor no está muy alejado de los 45° que permitirían el máximo alcance si el proyectil llegaba al mismo nivel de salida y no tendrá grandes variaciones al sustituir por otras alturas iniciales usualmente utilizadas por los lanzadores.

Sin embargo, experimentalmente se aprecia que los ángulos de lanzamientos para los atletas de elite, con los cuales obtienen los mejores resultados, están algo por debajo del valor calculado (entre 35° y 39°).

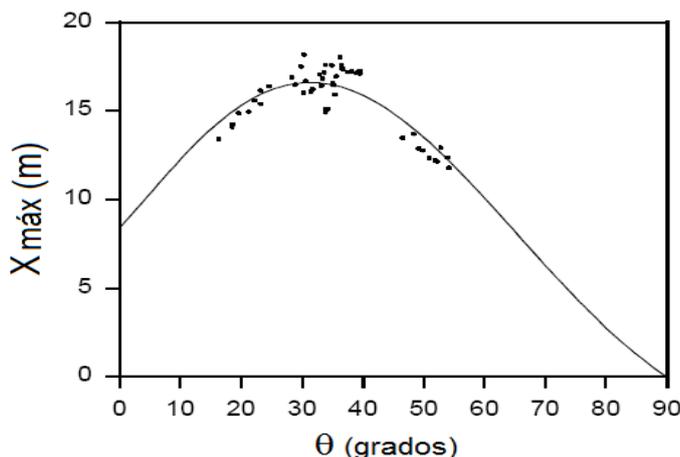


Fig. 4.17 Datos experimentales de Alcance horizontal en función del ángulo de lanzamiento para un lanzador de bala

Esto se debe a que la capacidad del deportista de acelerar la bala, de acuerdo a su estructura musculo-esquelética, es mayor en el plano horizontal que en el vertical. En la figura 4.18 se aprecia cómo la velocidad de salida del lanzamiento de un atleta disminuye con una tendencia lineal a medida que este acrecienta el ángulo de lanzamiento.

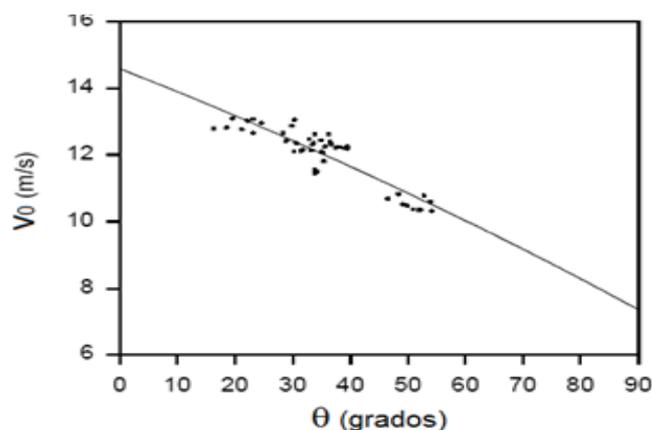


Fig. 4.18 Datos experimentales de la disminución de la velocidad de lanzamiento al incrementar el ángulo para un lanzador de bala

Si bien actualmente existen dos técnicas en el lanzamiento de bala (la lineal y la rotatoria), en ambas la velocidad de lanzamiento para los deportistas de elite tiene valores similares. Los lanzadores de EEUU son más proclives a usar la técnica rotatoria respecto a los de Europa que optan generalmente por la lineal.

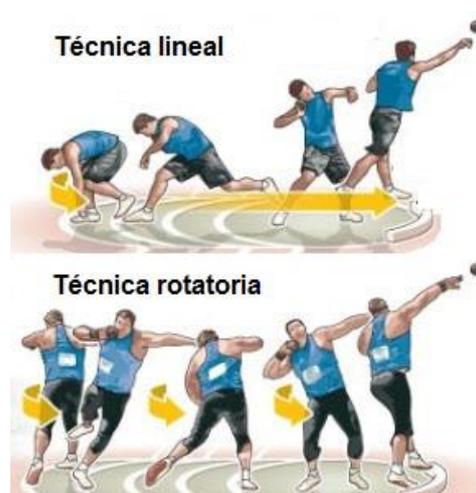


Fig. 4.19 Técnicas de lanzamiento de bala

En el cuadro de la figura 4.20 pueden apreciarse algunas características de los mejores lanzamientos realizados por los finalistas del Campeonato Mundial de Atletismo en Japón.

NOMBRE	MARCA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÁNGULO (°)	ALTURA DE SALIDA (m)
Hoffa	22,04	14,07	32,35	2,34
Nelson	21,61	14,06	30,77	2,38
Mikchnevich	21,27	13,44	37,48	2,56
Smith	21,13	13,34	37,66	2,35
Majewski	20,87	12,99	37,55	2,58

Fig. 4.20 Mejores lanzamientos de bala (Resultados oficiales). Mundial de Atletismo Japón

En el mismo se aprecia como Hoffa y Nelson lanzan la bala aproximadamente con el mismo valor de velocidad. Nelson lo hace desde una altura inicial 4,0 cm superior a la de Hoffa, lo que le otorga a su proyectil la posibilidad de mayor tiempo de vuelo y así de un mayor alcance. Pero su ángulo de lanzamiento está por debajo del medallista de oro, lo cual lo relega a un segundo lugar.

Mikchnevich, Smith y Majewski, lanzan con un ángulo más próximo al "ideal" (entre 42° y 43°) pero para ello "sacrifican" velocidad de salida de la bala y esto hace que sus marcas no sean tan buenas como las de Hoffa o Nelson.

El gráfico de la figura 4.21 muestra la evolución histórica del récord mundial de lanzamiento de bala:

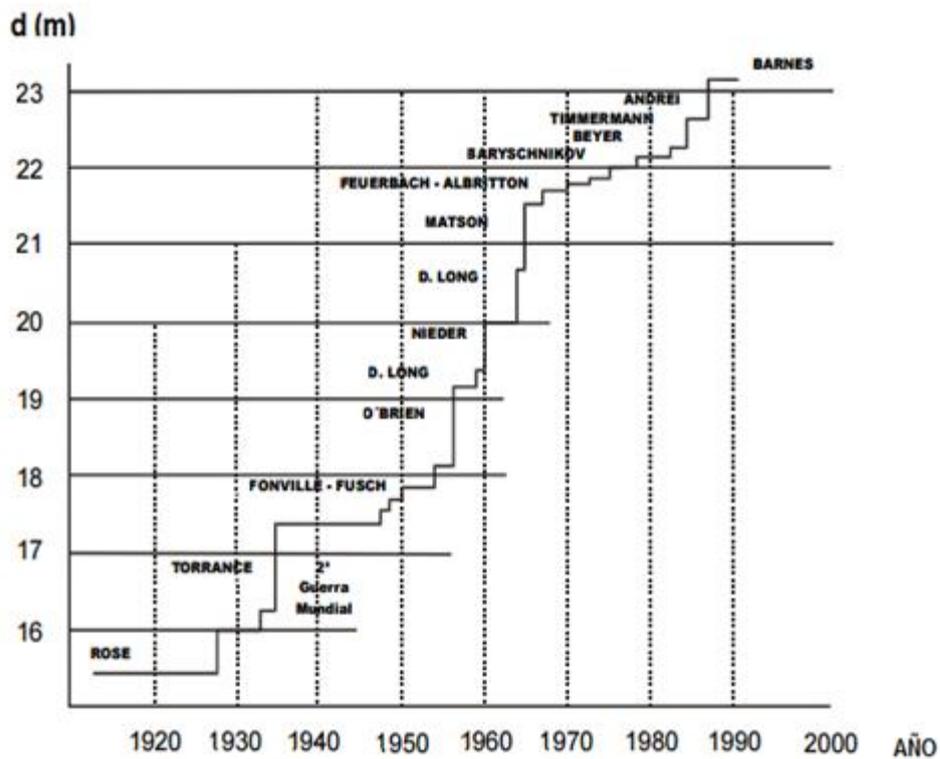


Fig. 4.21 Evolución histórica récord mundial de lanzamiento de bala (adaptado de Egger, 1994)

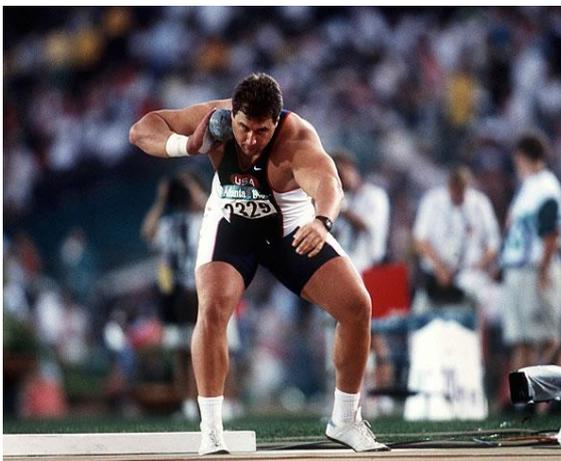


Fig. 4.22 Eric Randolph Barnes

La actual plusmarca mundial masculina está en poder de [Eric Randolph "Randy" Barnes](#) de EEUU (Figura 4.22), quien en 1990 con técnica rotatoria lanzó a 23,12 m. La femenina corresponde desde 1987 a [Natalya Lisovskaya](#) de Rusia, con 22,63 m.



Fig. 4.23 Cecilia Rodríguez y Berenice Da Silva

“Patilargos” saltarines

Aunque parezca contradictorio, en el salto alto no importa lo alto que saltes, sino si pasas o no sobre el listón sin derribarlo. Por ello, los deportistas de gran altura, delgados y “patilargos” aprovechan sus características corporales para destacarse en esta disciplina.

Una excepción se encuentra en el saltador sueco [Stefan Holm](#) (Figura 4.24), quien con una altura de 1,81 m supo ganar varios años el Campeonato Mundial y quedarse con la medalla de oro olímpico en Atenas 2004. Si bien su altura es mayor a la media humana, la de los demás saltadores oscila entre 1,96 m y 2,04 m.



Fig. 4.24 [Stefan Holm](#), medalla de oro JJOO Atenas 2004

hasta 30 km/h y una fuerza máxima en el último apoyo antes del salto (llamado usualmente batida) de 650 kgf (aproximadamente 10 BW)²¹, Stefan Holm logró superar el listón a 2,37 m de altura al exterior y a 2,40 m bajo techo.

Su gran elasticidad le permite curvarse ampliamente sobre el listón aprovechando al máximo la técnica “Fosbury” (Figura 4.25).

El creador de esta técnica [Dick Fosbury](#) sorprendió al mundo del deporte en los Juegos Olímpicos de México 1968. Siendo un joven estudiante de Ingeniería Civil, innovó cambiando la técnica de salto habitual de la época por la que hoy lleva su nombre. En vez de utilizar la técnica “rodillo ventral” donde se sobrepasaba frontalmente el listón, saltó como si quisiera acostarse sobre él.

El estilo que en los primeros saltos provocó la burla, terminó quedándose con el oro (2,24 m) y la admiración de los espectadores. No superó el récord del mundo, que estaba en poder del soviético [Valery Brúmel](#) (2,28 m-Figura 4.26), pero cambió la forma de franquear el listón y su técnica es la utilizada en el presente por los mejores saltadores (Figura 4.27).

Es uno de los atletas que tiene el récord de saltar más sobre su propia estatura (0,59 m) conjuntamente con [Franklin Jacobs](#) que en 1978 saltó 2,32 m con una talla de 1,73 m. Ramón Torralbo, entrenador de los mejores saltadores de España, afirmó sobre Holm “tiene una velocidad de entrada mucho mayor que el resto de los competidores y una fuerza explosiva impresionante. Luego, en el listón, es muy bueno técnicamente. Sus gestos son perfectos y se dobla más que el resto. Si tuviera 10 cm más de altura sería invencible”.

Con una velocidad en la carrera de aproximación de



Fig. 4.25 [Stefan Holm](#) en salto estilo Fosbury

²¹ Recordemos que 10 BW significa una fuerza cuyo valor es igual a 10 veces su peso corporal



Fig. 4.26 Valeri Brumel con técnica rodillo ventral



Fig. 4.27 Dick Fosbury con su original técnica

Una de las ventajas que ofrece esta técnica es el permitir que, aunque el centro de masa no pase sobre el listón (pudiendo quedar hasta 3,0 cm por debajo de él), el cuerpo sí lo haga.

Todo saltador busca luego de la fase de carrera o aproximación, al culminar su batida, abandonar el contacto con el suelo, teniendo su centro de masa lo más alto posible. Para obtener esto, antes de comenzar la fase de vuelo, se elevan bruscamente los brazos y la pierna que no apoya, llevando la posición del centro de masa hasta una altura correspondiente al 70 % de la talla del saltador (Figura 4.28).

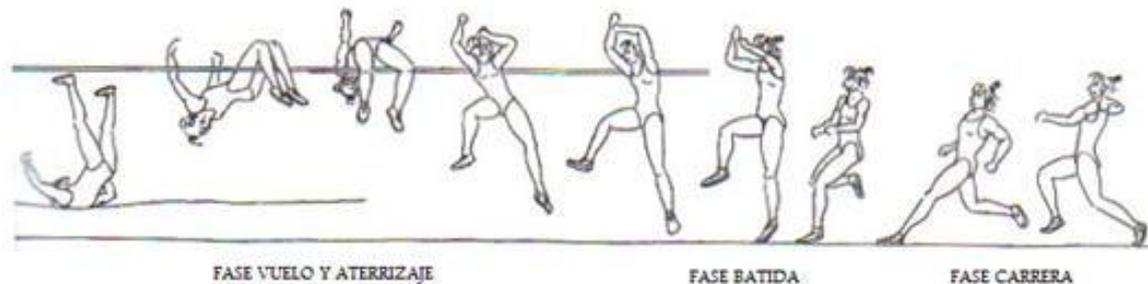


Fig. 4.28 Fases en el salto de altura

Si la fuerza con el aire es despreciable, la velocidad y altura inicial de despegue definirán las características de la trayectoria parabólica de su centro de masa durante el vuelo. Fosbury se ingenió para coordinar el movimiento de las distintas partes de su cuerpo de modo de superar alturas mayores que las alcanzadas por su centro de masa (Figura 4.29).

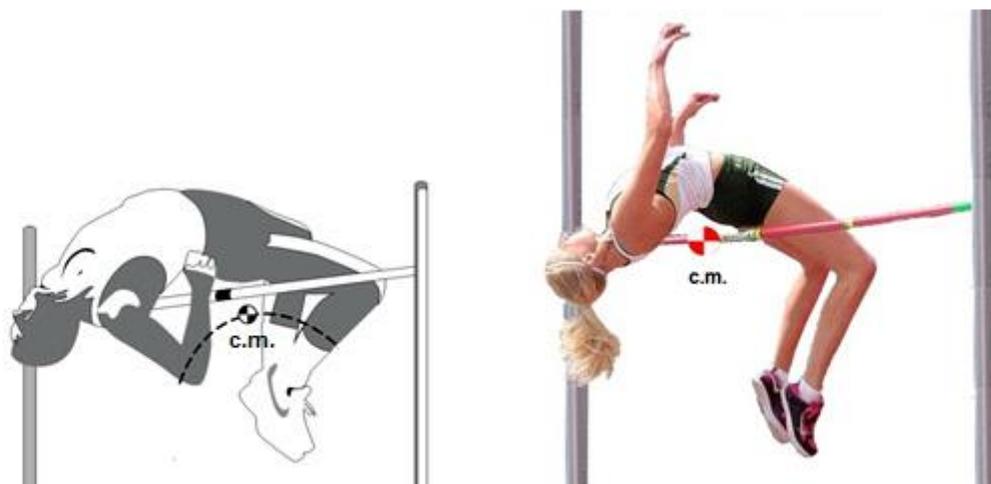


Fig. 4.29 Posición del centro de masa al pasar sobre el listón

Volviendo al salto de Stefan Holm y sus cualidades para el salto de altura, llamó la atención a los investigadores su tendón de Aquiles, el cual es mucho más grueso que lo normal²².

Seguramente, reforzado con agotadores entrenamientos, su tendón se hizo extremadamente resistente y le permitió al momento de la batida soportar grandes esfuerzos. Este es un factor clave para lograr disminuir rápidamente la velocidad horizontal y aumentar la velocidad vertical antes de iniciar la fase de vuelo (Figura 4.30).

Debe haber sido muy frustrante para Holm, verse superado por un novato en esta disciplina: [Donald Thomas](#) (Figura 4.31), en el Mundial de Atletismo de Japón. Aquí un [video](#) sobre esa competencia.



Fig. 4.30 Representación del Tendón de Aquiles de St



Fig. 4.31 Donald Thomas

Este jugador de básquet bahameño, destacaba por la altura de sus saltos: Lograba elevarse sin carrera 93 cm, superando ampliamente la media de 67 cm en la NBA. Llevado por una apuesta comenzó a realizar salto alto y al año siguiente estaba ganando la medalla de oro en el Mundial.

El estudio de sus tendones de Aquiles reveló que poseen naturalmente una longitud muy superior a la normal (26 cm), lo que le permitió sin grandes velocidades de aproximación ni exactitud en la técnica, gracias al largo y elástico “resorte” de su talón, alcanzar una marca de 2,35 m (aquí un [video](#) que analiza el salto de Holm y Tomas).

El actual récord mundial de 2,45 m, se mantiene desde 1993. [El salto](#) fue realizado en Salamanca (España) por el atleta cubano de 1,95 m de altura y 82 kg, [Javier Sotomayor](#) (Figura 4.32).



Fig. 4.32 Javier Sotomayor obteniendo el récord mundial en salto alto

Este deportista tenía una fuerza natural en los tendones que le permitía levantar 270 kg en sentadilla (más de 3,0 BW), y entrenar en reiteradas ocasiones saltando con pesas de 40 kg en sus hombros.

Con su salto, Sotomayor “dejó el listón muy alto” y como declaró el propio deportista, quizás la altura de 2,50 m sea demasiado para verse alcanzada en un futuro cercano.

¿Movimientos antigravitatorios?

Es común observar saltos en algunos deportes, en los que los atletas dan la impresión de quedar suspendidos en el aire por unos instantes, o por lo menos retardar su caída.

Llaman la atención jugadores de baloncesto en sus vuelos hacia el aro (ver [video](#)), o saltos en la gimnasia olímpica²³, también comunes en el ballet, donde los saltadores parecen planear en el aire (ver [video](#)).



Fig. 4.33 Salto de “planeo” en baloncesto (“Air” Jordan)



Fig. 4.34 Salto de “planeo” en gimnasia artística (Débora Reis)

Surge entonces la pregunta: ¿Podemos ejecutar movimientos que modifiquen la aceleración de caída?

Siendo la interacción con el aire despreciable, podemos considerar al Peso del deportista como la Fuerza Neta externa sobre él en la fase de vuelo. Si fuera un cuerpo puntual, de acuerdo a la segunda ley de Newton, podríamos afirmar que la aceleración del mismo es la gravitatoria \vec{g} (vertical hacia abajo). Pero al considerar al cuerpo del deportista en toda su extensión y teniendo presente que no es rígido sino que puede variar la disposición entre sus partes, es posible que estas tengan distintas aceleraciones en un mismo instante respecto a un observador.

En la fase de vuelo existe solo una posición que tendrá necesariamente en la vertical la aceleración gravitatoria, y es su centro de masa. Dada su velocidad y altura inicial, quedará definida su trayectoria, independientemente de la postura corporal que el deportista tome en el aire.

Pero las distintas partes del cuerpo tendrán en general una aceleración vertical diferente a \vec{g} que puede incluso ser hacia arriba en algún instante.

²³ En la figura 4.34 se aprecia a [Débora Reis](#) representante de Uruguay en el Panamericano de gimnasia artística Toronto 2015

El logo utilizado por Nike para identificar la indumentaria relacionada con [Michael Jordan](#), muestra la silueta del deportista con las piernas abiertas como si fuera a hacer una hundida (volcada o mate). Sin embargo durante sus años de competencia en la [NBA](#), no fue esa la postura habitual que sostenía para llegar al aro e introducir la pelota en el mismo (Figura 4.35).



Fig. 4.35 Logo de Nike y foto de M. Jordan en fase de vuelo durante el salto

Según declaraciones del mismo basquetbolista, la foto que inspiró al

logo fue sacada cuando él se elevó sobre el piso de la cancha imitando un paso de ballet, el “grand jeté” (Figura 4.36).

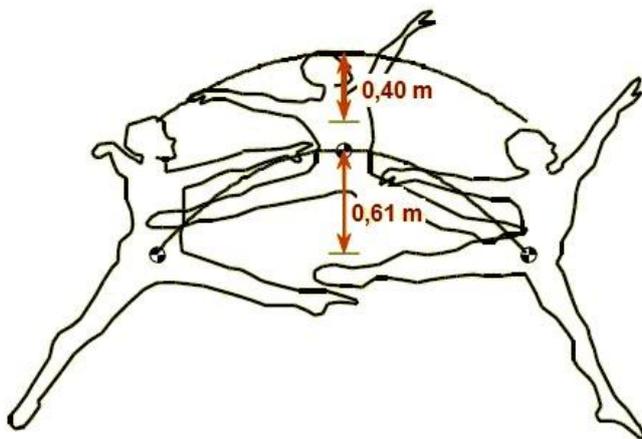


Fig. 4.36 Trayectoria de la cabeza y centro de masa en “grand jeté” de ballet

rápidamente (en ocasiones también los brazos), con una aceleración mayor a la gravitatoria por lo que la aceleración de caída de la cabeza en la vertical es menor que la del centro de masa.

El centro de masa describe una parábola determinada, pero la cabeza seguirá una trayectoria curva de menor concavidad generando el efecto visual de que el saltador cae más lentamente.

Este paso provoca la sensación de que el saltador está planeando por el aire durante el vuelo.

Para eso, durante el ascenso se abren las piernas y suben los brazos elevando así el centro de gravedad respecto al tronco del cuerpo. Si apreciamos solo la cabeza, esta asciende pero en menor medida que el centro de masa debido al movimiento de brazos y piernas.

Durante el descenso, las piernas (de gran masa muscular) descienden



Fig. 4.37 a) *Simon Biles* en salto “gran jeté” b) *Daiana Casella* gimnasta paralímpica uruguaya ²⁴

El mismo efecto se logra flexionando las piernas durante el ascenso hacia el aro para luego extenderlas rápidamente al descender mientras se realiza la hundida en el básquetbol. El estiramiento vertiginoso de las piernas al llegar a la posición de altura máxima permite a la cabeza y hombros “mantenerse suspendidos” dando un tiempo mayor para la hundida o para lanzar sobre la defensa del marcador.



Fig. 4.38 “Air” Jordan y seguimiento de trayectoria de su esternón y de su centro de masa

En conclusión: Los movimientos realizados por el deportista en el aire no enlentecen la caída del cuerpo en su conjunto. Siendo despreciable la interacción con el aire, el centro de masa del deportista tiene indefectiblemente la aceleración gravitatoria en la vertical durante la fase de vuelo. Pero sí existen saltos capaces de generar una percepción estética de planeo ya que permiten que la parte superior del tronco caiga con una aceleración inferior a la gravitatoria durante unos instantes. Esto llevó a que a Michael Jordan se ganara el apodo de “air”.

²⁴ [Daiana Casella](#) es una joven deportista floridense que obtuvo múltiples medallas en los mundiales de las Olimpiadas Especiales de Gimnasia Artística y Rítmica. Fue elegida Deportista del Año 2015 recibiendo el premio Nasazzi/Varela otorgado por la Cámara de Representantes.

Volando sobre la arena

Los atletas de salto largo al llegar a la tabla, luego de la carrera, buscan en la batida (apoyo para el salto) una velocidad de despegue que les permita obtener la mayor distancia horizontal durante su vuelo. Esta distancia se mide desde el borde de la tabla más próximo al arenero hasta la posición de contacto con la arena más cercana a dicho borde.

Es necesario considerar que en el instante de despegue, el centro de masa del atleta se encuentra delante de la tabla de batida a cierta “distancia de despegue” ($x_{o\text{ cm}}$) y al tocar la arena está por detrás del apoyo una “distancia de aterrizaje” ($x_{\text{máx}} - x_{f\text{ cm}}$). Esto hace que la distancia registrada ($x_{\text{máx}}$) por los saltadores de primer nivel sea aproximadamente un 10% mayor al avance horizontal del centro de masa durante el vuelo ($x_{f\text{ cm}} - x_{o\text{ cm}}$) (Figura 4.39).

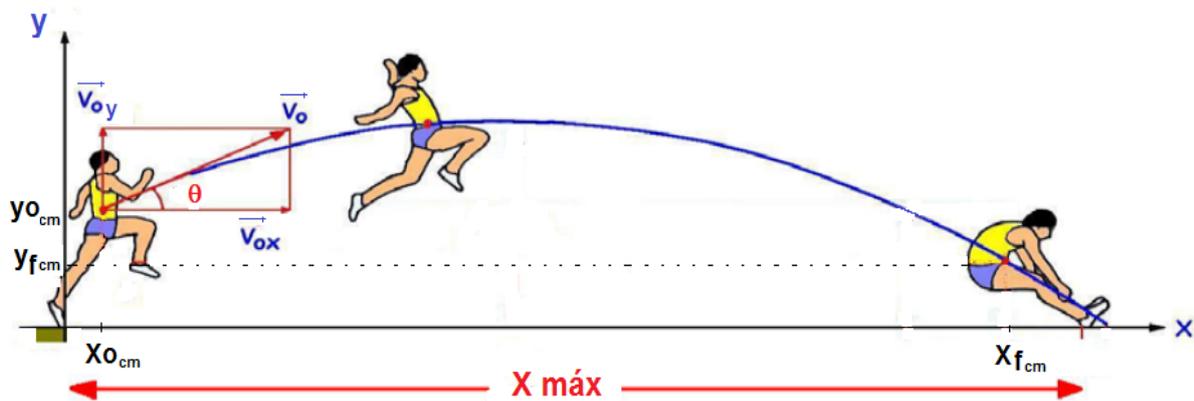


Fig. 4.39 Velocidad inicial y trayectoria del centro de masa para salto largo

Además, si bien el atleta se impulsa a nivel del piso y vuelve a él, la diferente postura al iniciar y terminar la fase de vuelo establece una diferencia en la altura de su centro de masa. Al encontrarse más bajo en la posición final ($y_{f\text{ cm}}$) que en la inicial ($y_{o\text{ cm}}$), le permite ganar tiempo de vuelo y por lo tanto distancia horizontal recorrida.



Fig. 4.40 Secuencia de fotos de salto largo

Si tomamos en el instante de despegue valores normales de la posición vertical del centro de masa ($y_{o\text{ cm}}$), su velocidad ($v_{o\text{ cm}}$) y calculamos con la ecuación 4.7 el ángulo óptimo para obtener el alcance máximo, obtendremos valores levemente inferiores a los 45° .

Sin embargo el ángulo de despegue del centro de masa θ con que saltan los profesionales es mucho menor (entre 18° y 24°) que el calculado anteriormente. Esto se debe a la capacidad de adquirir gran velocidad horizontal en la fase de carrera (entre 9,0 m/s y 11 m/s) y una velocidad vertical significativamente menor (3,0 m/s a 3,5 m/s) durante la batida. Para ganar velocidad en la horizontal el deportista cuenta con una pista de 40 m de longitud, mientras que la velocidad vertical la obtiene en el breve lapso de contacto (entre 0,135 s y 0,175 s) al pisar la tabla.

Al ser la velocidad horizontal aproximadamente el triple que la vertical en el momento de despegue, se entiende por qué la velocidad del centro de masa de los saltadores de elite se dispone a menos de 25° sobre la horizontal.

Los saltadores de menor ángulo son llamados “velocistas” por alcanzar grandes valores de velocidad horizontal durante la carrera. Si dicha componente es grande, les permite buenos resultados a pesar de tener un salto bastante “plano” y menor tiempo de vuelo respecto a otros saltadores. A este grupo perteneció [“Carl” Lewis](#), quien en el Campeonato Mundial de Atletismo en 1987 ganó el oro en salto de longitud, en relevos 4x100 m, y fue medalla de plata en los 100 m llanos (luego se le dio la de oro al descalificarse por dopaje a Ben Johnson). Apodado “el hijo del viento”, normalmente saltaba con un ángulo de despegue menor a 20° y una velocidad horizontal próxima a 11 m/s (Figura 4.41).



Fig. 4.41 Secuencia de fotos de “Carl” Lewis en salto largo

También están los saltadores “de batida”, que no logran tanta velocidad en la horizontal pero, al apoyar su pie en la tabla, logran recibir tal impulso vertical que les otorga una gran velocidad en esta dirección, con un importante ángulo de despegue. Esto determina un mayor tiempo de vuelo que les permite obtener buenos registros de distancia horizontal. El saltador español [Yago Lamela](#), medalla de plata con una marca de 8,56 m en el mundial Maebashi (Japón) en 1999, se caracterizaba por tener grandes ángulos de batida de hasta 24° (Figura 4.42). Falleció de un infarto en el 2014 a los 36 años.



Fig. 4.42 Yago Lamela



Fig. 4.43 *Emiliano Lasa* , poseedor del récord nacional uruguayo y del diploma olímpico en los JJOO Río 2016

[Emiliano Lasa](#) (Figura 4.43) es un saltador uruguayo que ha superado varias veces su propio récord nacional. En los JJOO de Río de Janeiro 2016 con un salto de 8,15 m clasificó a la final y obtuvo al culminar la competencia el sexto puesto con un salto de 8,10 m, recibiendo así un diploma olímpico.

En los Juegos Panamericanos de Toronto ganó la medalla de bronce con una marca de 8,17 m, pero el viento a favor (3,1 m/s) fue mayor al permitido para que se homologara como nuevo récord nacional .

El 5 de junio del 2018 en la ciudad de Cochabamba logró un nuevo récord nacional y de los juegos Odesur con un salto de 8,26 m.



Fig. 4.44 *Secuencia de fotos de Emiliano Lasa representando a nuestro país en salto largo*

Se han realizado estudios donde se le pide a un saltador que realice sus saltos siempre con el máximo esfuerzo, pero variando el ángulo de la velocidad de su centro de masa en el instante de despegue. Al medir el módulo de dicha velocidad V_0 y relacionarlo con el ángulo θ (Figura 4.45), se aprecia cómo obtener ángulos mayores supone una disminución de la velocidad inicial.

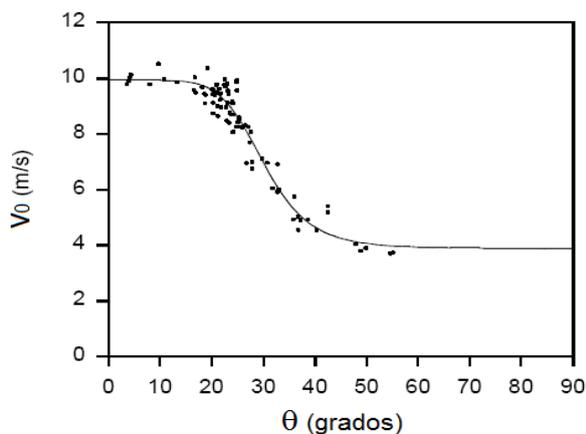


Fig. 4.45 *Módulo de velocidad inicial v_0 en función del ángulo de despegue del centro de masa θ*

A medida que superamos los 25° de ángulo de despegue, la velocidad inicial disminuye con gran rapidez, lo que implica un descenso notorio en el rendimiento.

En el cuadro de la figura 4.46 se comparan algunos datos de los tres mejores saltos en el Campeonato del Mundo de Atletismo en Japón, y el salto récord mundial de [Mike Powell](#) comparado con el mejor de [Carl Lewis](#).

	Saladino	Howe	Philipps	Powell	Lewis
Marca (m)	8,57	8,47	8,30	8,95	8,91
Distancia despegue (m)	0,39	0,41	0,42		
Distancia de vuelo (m)	7,80	7,70	7,62		
Distancia de aterrizaje (m)	0,39	0,60	0,26		
Distancia de plasticina (m)	0,01	0,03	0,01		
Velocidad horizontal (m/s)	10,52	10,87	10,38	11,00	11,06
Velocidad vertical (m/s)	3,75	3,46	3,67	3,70	3,22
Ángulo de despegue (°)	22,9	20,5	22,3	22,1	18,3

Fig. 4.46 Valores de distancias, velocidades y ángulos de despegue del centro de masa para distintos atletas en salto

Del cuadro puede concluirse que [Irving Saladino](#) (Figura 4.47), a pesar de tener una velocidad horizontal menor que Howe, realizó una batida que le otorgó mayor velocidad vertical, mayor ángulo de despegue y con ello una mejor marca ([aquí](#) el enlace para ver la filmación de su salto ganador).

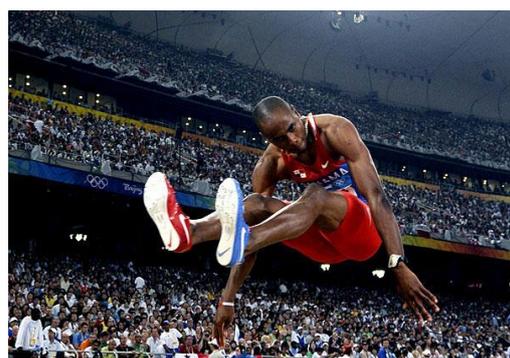


Fig. 4.47 *Irving Saladino*, medallista de oro en el Campeonato Mundial de Atletismo de 2007

También Lewis (figura 4.48) alcanza una velocidad horizontal mayor que Powell (figura 4.49) pero su menor ángulo de despegue tiene como consecuencia una menor marca. De acuerdo a las características de las velocidades de despegue de Powell y Lewis, la diferencia entre sus marcas parece muy reducida (0,04m). Es que en este cuadro no se contempla dónde se realizó la batida (Lewis lo hace al límite reglamentario sobre la tabla), ni la postura al hacer contacto con el arenoso, para lo cual es fundamental una buena técnica.

De acuerdo a los datos del cuadro, Philipps consiguió un ángulo muy próximo al de Saladino, pero su menor velocidad (tanto vertical como horizontal) aumentó la diferencia entre sus marcas.

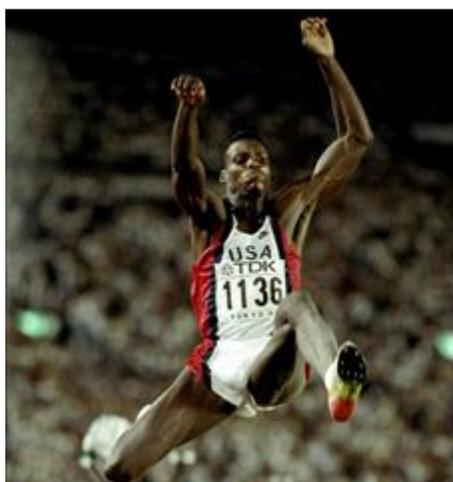


Fig. 4.48 *Carl Lewis* en salto largo



Fig. 4.49 *Mike Powell* obteniendo el récord Mundial

Algunas personas esperan que se llegue al salto de los 9,0 metros, pero es bueno recordar que desde 1991 ningún saltador ha llegado siquiera a obtener un salto superior a los 8,80 m. Para lograrlo el deportista deberá tener cualidades excepcionales que le permitan por ejemplo, una velocidad horizontal no menor a los 11,2 m/s y un ángulo de despegue superior a 23°, por lo que el desafío no es nada sencillo.

Las prótesis y sus discutidas ventajas

En los Juegos Paralímpicos de Londres 2012 el atleta alemán de salto largo [Markus Rehm](#) (Figura 4.50) fue medalla de oro logrando el récord mundial de la categoría con un salto de 7,95 m. Más allá de la noticia y los festejos, dicho logro no presentó discusión alguna.



Fig. 4.50 [Markus Rehm](#) saltando con su prótesis sobre el arenero

El problema se originó al presentarse al Campeonato Nacional de Alemania en julio del 2014 junto a competidores no discapacitados, donde logró el primer lugar con un [salto de 8,24 m](#).

Con esta marca Rehm superó la distancia mínima para participar en el Campeonato Europeo que se disputaba en agosto de ese año. Sin embargo la Federación Alemana de Atletismo (DLV) lo excluyó de dicho campeonato. Su presidente Clemens Prokop fundamentó la decisión diciendo: *"es posible que la prótesis pueda darle una ventaja injusta al ayudar a impulsarlo como una catapulta"*.

Muchos expertos creen que fue una decisión apresurada y se debió dejar a la ciencia que estudiara y se pronunciara sobre esta cuestión. Rehm ha sido filmado con cámaras de alta frecuencia para analizar el funcionamiento de la prótesis de carbono en su pierna.

El atleta comparó su situación con la del atleta sudafricano Oscar Pistorius: *"Él puso el tema del deporte de discapacitados en el tapete. Ahora lo hago yo en Alemania"*. Y añadió: *"Si se llega a demostrar que mi prótesis me da ventaja, entonces devolveré mi título"*.

Especialistas en el tema de la biomecánica no se ponen de acuerdo, por lo que Rehm tendrá que demostrar ante la IAAF que no salta "con ventajas" frente a los otros competidores si quiere participar de los JJOO de Río 2016.²⁵



Fig 4.51 Piernas naturales y ortopédicas.

²⁵ En este [artículo](#) de la sección deportiva Referí (diario "El Observador") se presenta este debate.

Resumiendo

En el deporte, si bien los cuerpos lanzados por el aire interaccionan con dicho fluido, es posible muchas veces despreciar su intervención y realizar el análisis de su movimiento con condiciones de caída libre.

En este caso el centro de masa del objeto (atleta o implemento) tendrá solo aceleración vertical, la aceleración gravitatoria, sin importar la disposición que este tome en los diferentes instantes del vuelo.

Ya que el cuerpo humano no es un cuerpo rígido, es muy importante el gesto (sucesión de posturas corporales) elegido para obtener el mayor rendimiento deportivo. De esta forma es posible, gracias a la técnica creada por Dick Fosbury, superar la altura del listón sin que el centro de masa lo haga.

No puede determinarse el ángulo óptimo de salida para un lanzamiento sin tener en cuenta la estructura musculo-esquelética del deportista y las condiciones de la competencia.

El avance vertiginoso de la tecnología ha aparejado la discusión sobre las posibles ventajas que algunas prótesis otorgan a atletas lisiados, frente a competidores con todas sus facultades que no hacen uso de ellas.

Enlaces para ampliar la información

- Simulación del tiro al aro de la [página web de Angel Franco García](#) donde podemos variar el punto de lanzamiento, h y L , ($h = h_{\text{aro}} - D$) y obtener la función particular.
- [Video](#) de “Sport Science” donde se estudia un salto hacia el aro de básquetbol como el de Jordan.
- Videos que analizan el salto alto:
 - [La ciencia del salto de altura](#)
 - [La Locura de Dick Fosbury](#)
 - [Fosbury flop](#)
- Video que muestra la competencia [Mike Powell vs. Carl Lewis –Salto largo Tokio 1991](#)
- Video que recopila diferentes [hundidas](#) de Michael Jordan.

Preguntas y Problemas

- 1) a) ¿Qué significa que un proyectil se mueve aproximadamente en condiciones de caída libre?
b) ¿En qué situaciones deportivas podrá hacerse esta aproximación?
- 2) Para el lanzamiento de baloncesto, desde la física puede hablarse de un tiro ideal o de condiciones iniciales óptimas. ¿Cuándo la velocidad es la ideal? ¿Por qué?

En los problemas siguientes considere condiciones de caída libre.

- 3) Un lanzador de béisbol lanza la pelota con una velocidad horizontal de módulo $v = 150 \text{ km/h}$ a una distancia horizontal $x = 18,3 \text{ m}$ del plato (posición donde se hace impacto con el bate). Despreciando la interacción con el aire, determine para la pelota hasta el momento que es impactada:
 - a) el tiempo de vuelo.
 - b) el desplazamiento vertical.
- 4) Cristiano Ronaldo patea la pelota en un tiro libre con una velocidad de módulo $v = 20 \text{ m/s}$ formando un ángulo $\alpha = 25^\circ$ con la horizontal (Fig. 4.52).
 - a) ¿Pasará por sobre la barrera que se encuentra a $9,15 \text{ m}$ y tiene $1,80 \text{ m}$ de altura?
 - b) Determine la altura máxima que alcanzará el balón y la velocidad en ese instante.
- 5) Un lanzador de bala logra lanzarla al borde del círculo de lanzamiento desde una altura $h = 2,40 \text{ m}$ con una velocidad de módulo $v = 13,0 \text{ m/s}$ formando un ángulo $\Theta = 35^\circ$ con la horizontal. Determine cuál será la marca (el desplazamiento horizontal hasta el impacto en el suelo) para ese lanzamiento.



Fig. 4.52 Ronaldo pateando un tiro libre

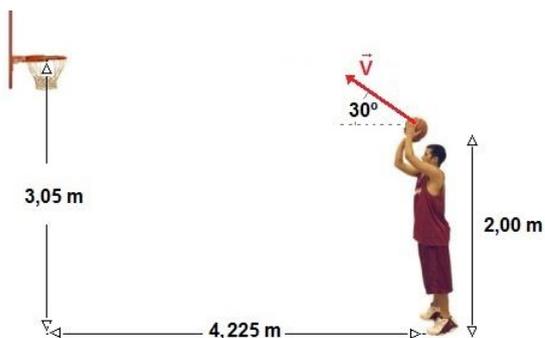


Fig. 4.53

- 6) ¿Cuál deber ser el módulo de la velocidad inicial de lanzamiento de un tiro libre en el baloncesto, si está se dispone a 30° sobre la horizontal desde una altura de $2,00 \text{ m}$ como indica la figura 4.53?

- 7) Un esquiador llega al borde de una rampa inclinada 45° , con una velocidad horizontal de módulo $v = 20 \text{ m/s}$ como indica la figura 4.54. Determine:
 - a) el tiempo de vuelo.
 - b) el desplazamiento horizontal y el vertical durante la fase de vuelo.

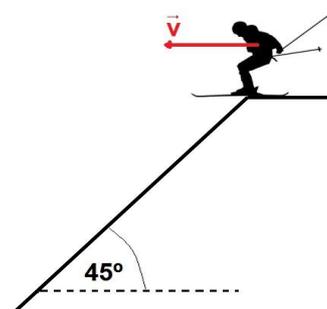


Fig. 4.54

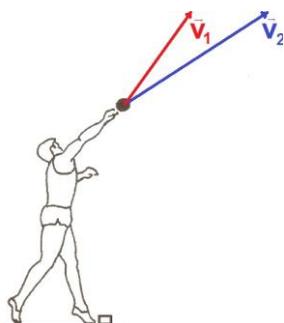


Fig. 4.55

- 8) Un lanzador de bala lanza el proyectil en dos ocasiones desde la misma posición, pero con diferente velocidad. Si dichas velocidades se encuentran representadas a escala en la figura 4.55. Determine y justifique en qué tirada la bala alcanzó su mayor:
 - a) altura.
 - b) "marca" (desplazamiento horizontal hasta el aterrizaje).

Actividades

- 1) a) Filmar el lanzamiento al aro desde larga distancia con una pelota de baloncesto y otra de mayor volumen y menor masa (puede ser una pelota de playa).
b) Con un programa de análisis de video, analizar cuánto se aparta su movimiento del que realizarían en condiciones de caída libre (puede alcanzar el análisis de sus velocidades horizontales en función del tiempo).
c) Determinar la velocidad inicial (módulo y ángulo respecto a la horizontal) de la pelota de baloncesto y comparar con los valores óptimos para la altura en que se efectuó el lanzamiento.
- 2) Diseñar un experimento donde un objeto (pelota, auto de juguete, etc.) llegue en varias ocasiones a iniciar su vuelo con velocidad horizontal de igual módulo (aproximadamente).
 - a) Utilizando barreras ópticas u otros dispositivos, medir el módulo de dicha velocidad (sin dejar que el proyectil llegue al piso).
 - b) Determinar teóricamente en qué posición hará impacto y colocar una marca en la posición calculada.
 - c) Repetir nuevamente el lanzamiento para observar si la posición de impacto en la práctica coincide o no con la marcada.
 - d) Discutir los resultados con el grupo.
- 3) a) Colocar sobre la cadera de la persona que realizará un salto largo, una marca visible cuyo color contraste con el de su vestimenta.
b) Filmar lateralmente el salto largo siguiendo los criterios expresados en la actividad 1.
c) Seguir en un programa de análisis de video las distintas posiciones de la marca durante la fase de vuelo.
c) Analizar el movimiento que realizó la marca tanto en la horizontal como en la vertical y compararlo con el que se realizaría en condiciones de caída libre.
- 4) Filmar varios lanzamientos de bala realizados por la misma persona con el mayor esfuerzo, de forma de ir variando el ángulo de la velocidad de lanzamiento respecto a la horizontal.

En cada tirada, medir las marcas obtenidas (distancias horizontales hasta donde hace impacto) y buscar un vínculo con los ángulos de lanzamiento. Para obtener dichos ángulos pueden utilizarse las componentes (horizontal y vertical) de la velocidad inicial o por medio de la tangente a la trayectoria en la posición inicial. Para ello se aconseja el uso de algún programa que realice análisis de video.

Puede buscarse también la relación entre el módulo de la velocidad de lanzamiento y el ángulo que dicha velocidad forma con la horizontal.

Si se necesitan algunos datos básicos para realizar una buena filmación, leer [Anexo 1](#).

Si se realiza el análisis de video con el software libre ["Tracker"](#) y se quiere tener una guía básica de su manejo, clic [aquí](#). Y aquí un [video tutorial](#) realizado por el profesor Marcelo Vachetta.

Capítulo 5 Impulso y Cantidad de Movimiento lineal

En este capítulo definiremos las magnitudes Impulso y Cantidad de Movimiento lineal así como el vínculo entre estas magnitudes a partir de las Leyes de Newton. Veremos la importancia del tiempo de contacto durante un lanzamiento o un impacto en el deporte y cómo influye en la fuerza máxima recibida al saltar o al correr. Por último consideraremos situaciones deportivas donde puede considerarse (dadas ciertas condiciones) la conservación de la Cantidad de Movimiento lineal de un sistema.

Impulsores e impulsados

Para cambiar el movimiento de una pelota, lanzar la jabalina o el martillo, saltar alto o lejos, es necesaria la acción de una Fuerza Neta. Su efecto en la traslación del objeto no solo dependerá del valor de la misma en cada instante, sino del tiempo durante el cual se aplica. Deportistas de distintas disciplinas, buscando lanzar el proyectil a máxima velocidad, llevan su brazo hacia atrás para ampliar así el tiempo en que impulsan al objeto.



Fig. 5.01 *Camila Barreiro*

26



Fig. 5.02 *María "Mimi" Mello*

Cuando se aplica una fuerza \vec{F} constante sobre un objeto, se define su *Impulso lineal* \vec{I} como el producto de la misma por el intervalo de tiempo de aplicación

$$\vec{I} = \vec{F}_{cte} \cdot \Delta t. \quad (\text{Ec. 5.1})$$

El Impulso es entonces una magnitud vectorial con igual dirección y sentido que la fuerza (Figura 5.3).
Su unidad en el Sistema



Fig. 5.04 *Impacto de la raqueta de Roger Federer sobre la pelota*

²⁶ Elegida mejor jugadora del Campeonato Federal uruguayo de hándbol 2014, integró la selección nacional (junto a su hermana Martina) de destacada actuación en el Panamericano Toronto 2015.

²⁷ La mejor lanzadora de jabalina de nuestro país. Superó varias veces su propio récord nacional, representando dignamente (a pesar de su juventud) a Uruguay en el Panamericano Toronto 2015

Internacional es el N.s (se expresa “newton segundo”).

Si la fuerza se establece sobre una recta de acción, podemos asignarle de acuerdo a su módulo y sentido, valor y signo (a partir de una convención previa).

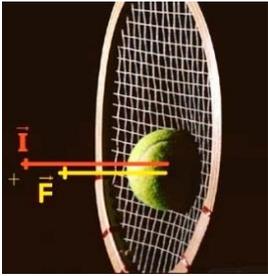


Fig. 5.03 Fuerza e Impulso de la raqueta a la pelota

Y si el valor de la fuerza es variable y realizamos el gráfico del mismo en función del tiempo, puede demostrarse que el valor del Impulso quedará representado en el área comprendida bajo la curva durante ese lapso.

Cuando se registra experimentalmente la curva $F=f(t)$ durante un impacto del bate con una pelota de béisbol, se observa que la curva tiene forma de campana (Figura 5.05).

Dicha función puede ser descrita aproximadamente por la ecuación durante medio período

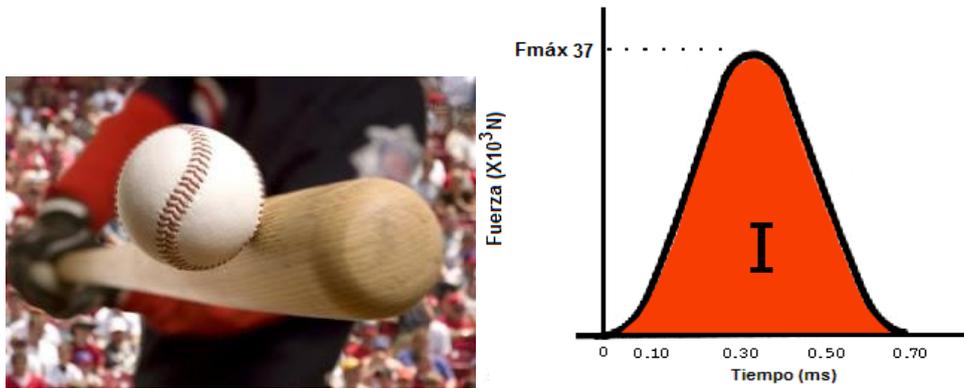


Fig. 5.05 Gráfico Fuerza en función del tiempo para la interacción bate-pelota

$$F(t) = F_{máx} \text{sen}^2(A \cdot t) \quad (\text{el valor de fuerza máxima } F_{máx} \text{ y de la constante } A \text{ dependerá del golpe realizado}) \quad (\text{Ec 5.2})$$

Muchas veces es útil trabajar con la fuerza media \vec{F}_m durante el impacto por la sencilla relación que tiene con el impulso:

$$\vec{F}_m = \vec{I} / \Delta t.$$

La fuerza media es aquella fuerza constante que provocaría el mismo impulso que la fuerza variable en el tiempo considerado. Es decir que el área encerrada bajo el gráfico de la fuerza media tiene el mismo valor que el área encerrada bajo la curva con forma de campana (Figura 5.06).

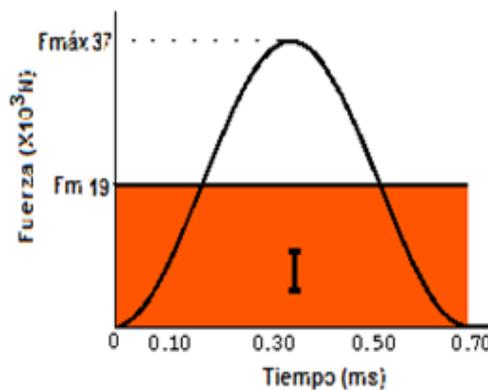


Fig. 5.06 Fuerza media y Fuerza en función del tiempo durante la interacción

En la figura 5.07 se aprecia el gráfico del valor de la fuerza Normal en función del tiempo durante el contacto con una superficie horizontal dura para distintas pelotas dejadas caer desde una altura de 10 cm.

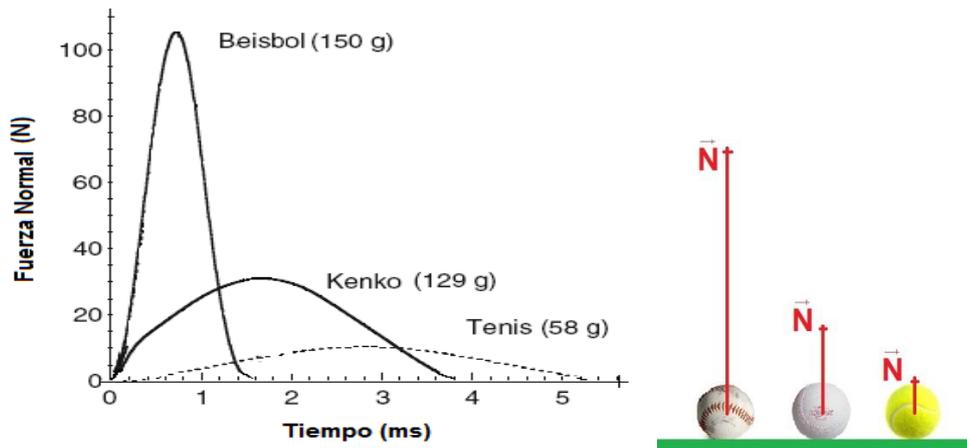


Fig. 5.07 Fuerza Normal en función del tiempo durante el contacto para varias pelotas dejadas caer desde una altura de 10 cm

La pelota Kenko, se basa en la de béisbol y fue inventada en Japón para la práctica infantil de ese deporte. Su utilidad radica en disminuir los valores de fuerzas máximas de impacto logrando impulsos similares a los originales. Esto es posible gracias a su constitución, la cual provoca el aumento del tiempo de contacto con el bate y ocasionalmente con el cuerpo del deportista.

De las tres, la pelota de tenis es la que recibe un impulso menor a pesar de estar mayor tiempo en contacto debido a que recibe fuerzas de menor módulo durante la interacción con la superficie.

Volviendo a Newton

Sabemos que no tiene la misma dificultad detener una pelota de playa que una de básquetbol si viajan a la misma velocidad, debido a que esta última es mucho más masiva. Tampoco será lo mismo frenar una pelota de fútbol si es pateada por un niño o por [Cristiano Ronaldo](#) (Figura 5.08), quien es capaz de lanzarla a una velocidad de 130 km/h.²⁸



Fig. 5.08 Tiro libre ejecutado por [Cristiano Ronaldo](#)

Es útil entonces definir una nueva magnitud vectorial a partir del producto de la masa de un cuerpo y su velocidad: *la Cantidad de Movimiento lineal* \vec{P} :

$$\vec{P} = m \cdot \vec{v} \quad (\text{Ec. 5.3})$$

Esta magnitud tendrá entonces la dirección y el sentido de la velocidad. Su unidad en el SI de Unidades es el $\text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

²⁸ Dato extraído del documental "[Cristiano Ronaldo al límite](#)"

En el capítulo 3 expresamos la segunda Ley de Newton como $\vec{F}_n = m \cdot \vec{a}$.

Cuando la aceleración es constante podemos expresarla como $\vec{a}_{cte} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$ por lo que $\vec{F}_n = m \cdot \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$.

Podemos expresar así $\vec{F}_n = \frac{\Delta \vec{P}}{\Delta t}$, la Fuerza Neta es igual a la rapidez de cambio de la Cantidad de Movimiento lineal.

A esta expresión hizo referencia Newton en sus escritos y su validez es más general que la anterior.

Si “despejamos” $\Delta \vec{P}$, recordando que para una \vec{F}_n constante $\vec{I}_n = \vec{F}_n \cdot \Delta t$, llegamos a que

el Impulso Neto o resultante es igual a la variación de la Cantidad de Movimiento lineal: $\vec{I}_n = \Delta \vec{P}$

Expresándolo como la resta vectorial entre la Cantidad de Movimiento final y la inicial:

$$\vec{I}_n = \vec{P}_f - \vec{P}_i \quad (\text{Ec. 5.4})$$

En la figura 5.09 podemos ver una aplicación concreta de estos conceptos en el béisbol, buscando determinar el Impulso al batear una pelota donde la velocidad inicial y final se encuentran en la misma dirección con sentido contrario.

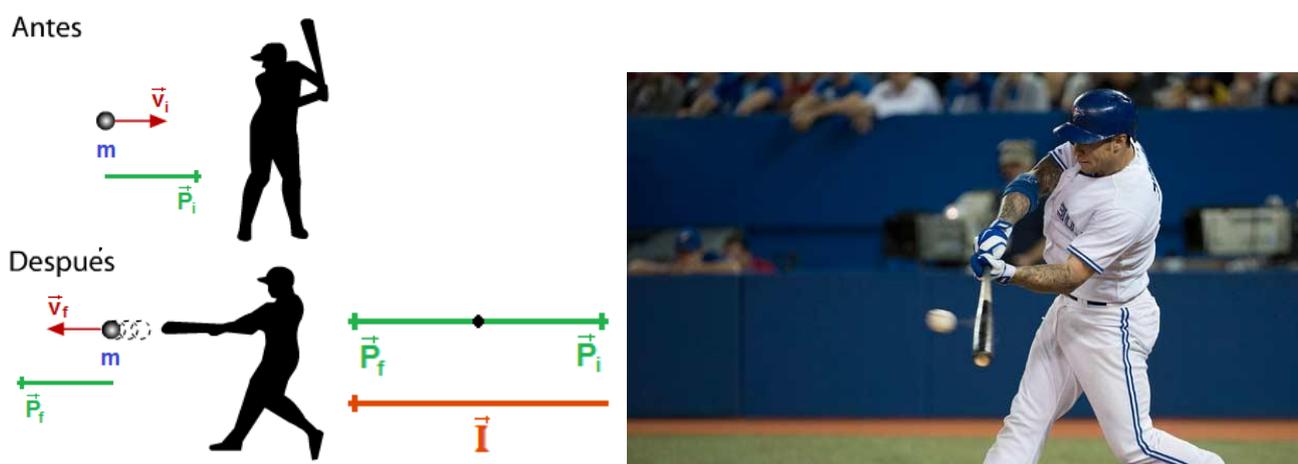


Fig. 5.09 Impulso y Variación de la Cantidad de Movimiento al batear en el béisbol

Si la pelota (de masa $m= 0,145$ kg) llega con una velocidad de 40 m/s y luego del golpe sale en sentido contrario a 49 m/s, podemos obtener el impulso neto realizado por el bate (aunque no midamos fuerzas) a partir su variación de la Cantidad de movimiento ($I= 13$ N.s).²⁹

El proceso en el que se realiza toda variación de Cantidad de Movimiento puede ser rápido, en un tiempo breve, o de forma paulatina durante un tiempo más extenso (Figura 5.10). Por ejemplo en las raquetas de tenis esto dependerá (además de la velocidad relativa entre la pelota y la raqueta) del material del cordado y de la tensión del mismo³⁰.

²⁹ En este caso (como en muchos otros) se considera despreciable el impulso de la fuerza Peso de la pelota dado que su módulo es mucho menor que el de la fuerza impulsiva del bate durante el breve lapso que duró el impacto.

³⁰ [Aquí una entrevista](#) al encordador Xavi Segura explicando las distintas variables que afectan al impulso de la raqueta.

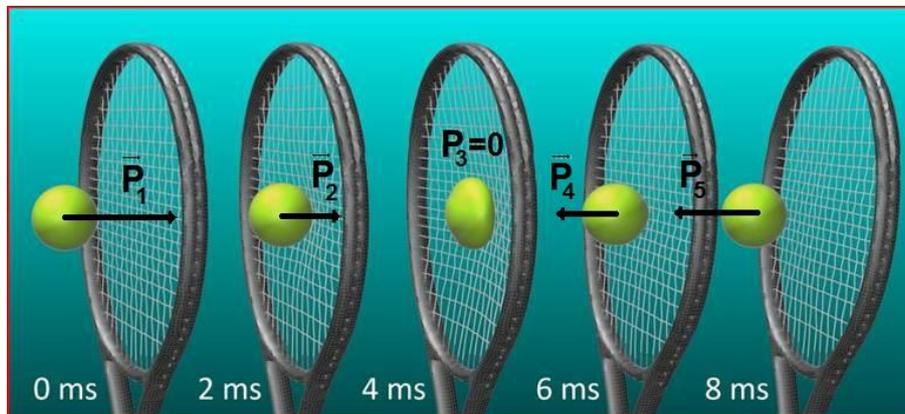


Fig. 5.10 Cantidad de Movimiento de la pelota en distintos instantes al interactuar con la raqueta.

Un lapso breve implicará mayores fuerzas para producir el mismo Impulso que si el tiempo de ejecución es más extenso. En el accionar de los deportistas esto tiene una importancia fundamental tanto para su rendimiento como para su salud.

Mayor tiempo, menor daño

Especialmente aquellas personas que practican deportes donde habitualmente se cae sobre superficies duras (básquetbol, vóleibol, etc.), necesitan disminuir las fuerzas de impacto y con ello la posibilidad de lesiones.



Fig. 5.11 Impacto de calzado de básquetbol con el piso

Al caer, luego de una fase de vuelo en la vertical y hacer contacto nuestros pies sobre una superficie horizontal, podemos frenar nuestro cuerpo flexionando ampliamente las rodillas (fig 5.12a) o con nuestras piernas más rígidas (fig 5.12b). En ambas situaciones la variación de la Cantidad de Movimiento será la misma y por lo tanto el Impulso también. Sin embargo, si logramos aumentar el tiempo de frenado de nuestro centro de masa mediante la flexión, estaremos

disminuyendo las fuerzas aplicadas a nuestro cuerpo como se aprecia en los gráficos de la figura 5.12. Si el tiempo de amortiguación es muy reducido, especialmente nuestros tobillos, la columna y las rodillas se verán resentidos por las grandes fuerzas de frenado.

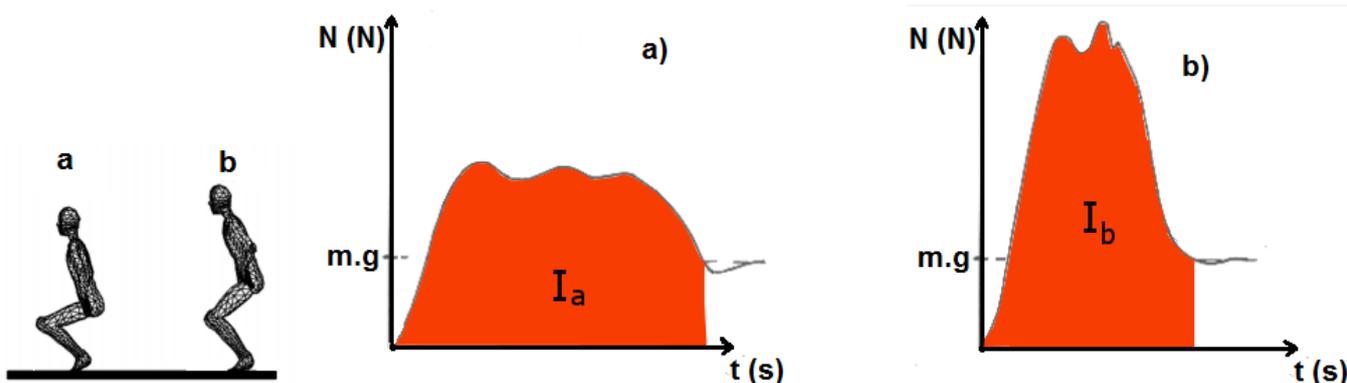


Fig. 5.12 Fuerza Normal en función del tiempo para la caída sobre un suelo horizontal:

a) con flexión amplia de rodillas

b) con flexión reducida de rodillas

Al saltar un atleta en la cama elástica (deporte olímpico desde Sidney 2000), la lona flexible le aplica un importante Impulso que cambia el sentido de su velocidad. Pero lo hace durante un tiempo lo suficientemente extenso para que las fuerzas no ocasionen perjuicios sobre su cuerpo (siempre y cuando no caiga fuera de la cama).

También el uso de los “airbag” en los autos, la colchoneta para la caída en el salto alto, el arenoso para el salto largo, los guantes en el boxeo³¹, etc., busca aumentar el tiempo de interacción y por lo tanto disminuir el valor de las fuerzas durante el impacto.

Impulsados a saltar

Normalmente cuando queremos saltar alto flexionamos previamente las rodillas. Una de las ventajas de esta acción es que aumenta el tiempo de aplicación de la fuerza impulsora que recibimos de la superficie de apoyo. En la figura 5.13 se grafica conjuntamente el valor de la fuerza Normal y del Peso en función del tiempo para un atleta que realiza un salto vertical con contramovimiento (CMJ) y se indica el área que representa el Impulso de cada fuerza hasta el instante de despegue.

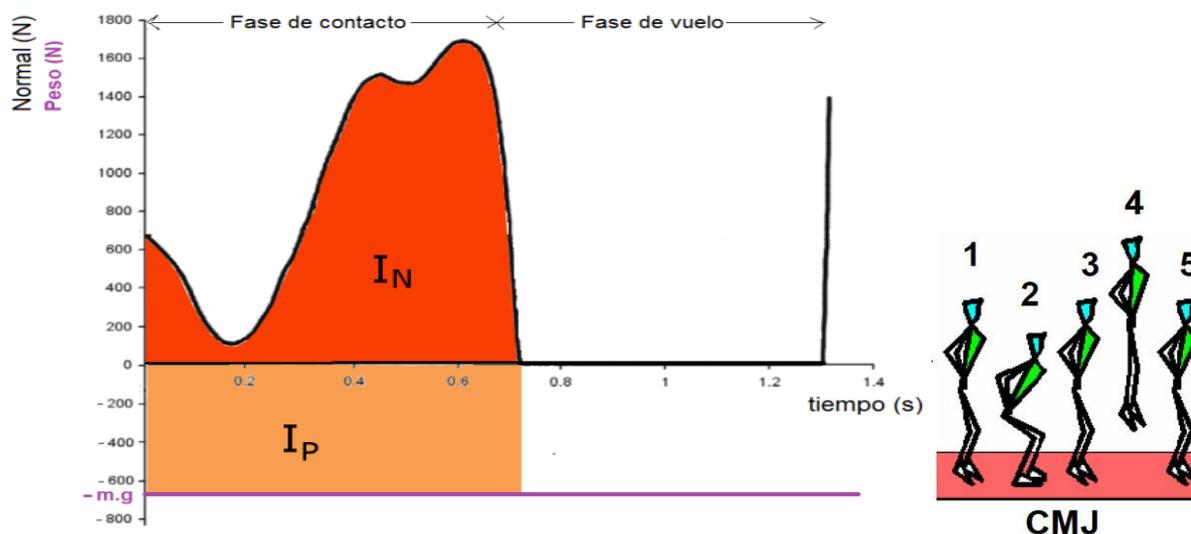


Fig. 5.13 Gráfico de Normal y Peso en función del tiempo para salto con contra movimiento (CMJ)

La suma del Impulso de la Normal \vec{I}_N más el impulso del Peso \vec{I}_P , nos dará el Impulso Neto \vec{I}_{Neto} en la vertical durante este lapso. De su valor y de la masa del atleta dependerá la velocidad vertical de despegue.

³¹ Aquí un comentario de “Cuando “Money” Mayweather no aceptó los guantes del “Chino” Maidana”

También podríamos determinar el Impulso Neto durante esta acción a partir del gráfico de la Fuerza Neta en función del tiempo como muestra la figura 5.14.

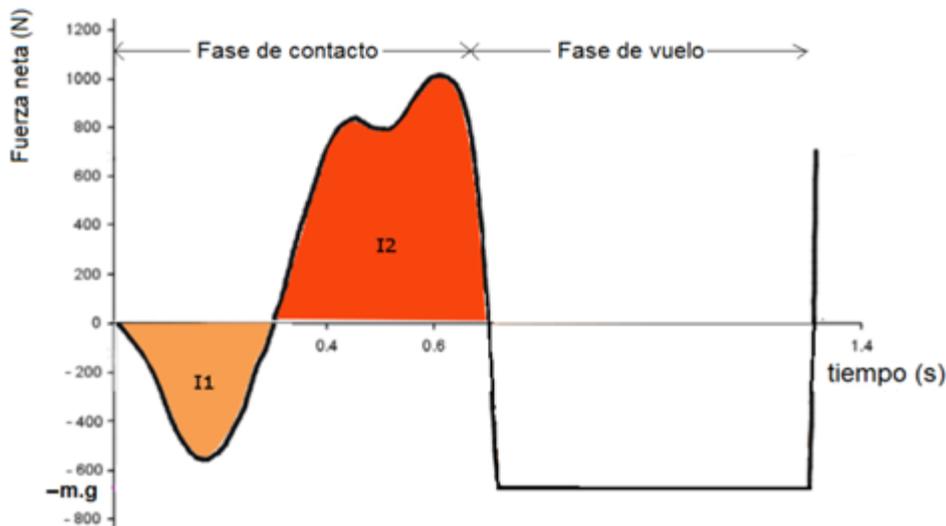


Fig. 5.14 Gráfico de Fuerza Neta en función del tiempo durante el salto con contra movimiento (CMJ)

En este gráfico identificamos una primer etapa donde, al tener la Normal menor módulo que el Peso, de acuerdo a la convención de signos tomada, la Fuerza Neta tiene valores negativos y por lo tanto el Impulso I1 también.

En la segunda etapa, estando aún en la fase de contacto con el piso, La Normal tiene mayor módulo que el Peso por lo que la Fuerza Neta es positiva así como su Impulso I2. El Impulso total en la fase de contacto es la suma de I1 e I2.

Si consideráramos la fase de vuelo (solo en contacto con el aire), allí la única fuerza considerable es el Peso, realizando (de acuerdo a la convención de signos aquí tomada) un Impulso negativo.

Dime tu impulso y te diré cuánto te elevas

Como decíamos anteriormente, la velocidad de despegue en un salto dependerá del Impulso Neto (\vec{I}_{Neto}) durante el contacto con la superficie de apoyo. A continuación se aprecian los gráficos del módulo de la fuerza Normal en función del tiempo y el Impulso Neto para un salto CMJ de un deportista antes de una lesión (figura 5.15 a) y posteriormente a ella (figura 5.15 b).

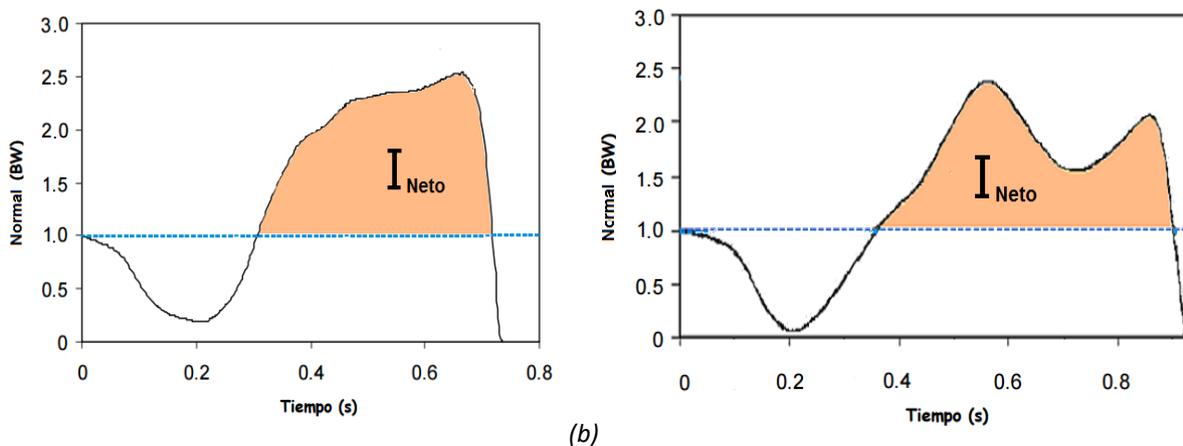


Fig. 5.15 Fuerza N en función del tiempo e Impulso Neto para el salto de un deportista antes (a) y después (b) de una lesión

Puede observarse cómo el Impulso Neto en el segundo caso es menor dado el pronunciado valle que experimenta la fuerza Normal luego de alcanzar un máximo. Esto determina una velocidad de despegue inferior y la altura máxima del ascenso vertical del centro de masa también se verá disminuida.

En la figura 5.16 pueden apreciarse las diferencias en los gráficos de la fuerza Normal en función del tiempo, para dos atletas con distinta composición de fibras musculares en el músculo vasto lateral de cuádriceps, al realizar un salto “Squat Jump” (SJ)³².

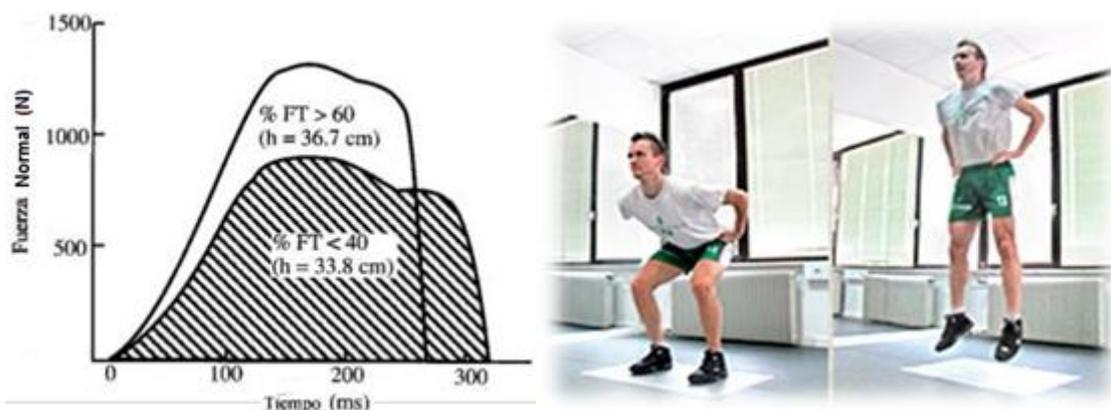


Fig. 5.16 Gráfico de Bosco y Komí (1979) donde se representa la fuerza Normal en función del tiempo y su Impulso para dos atletas. Uno posee un porcentaje de fibras rápidas mayor al 60% y el otro por debajo de un 40% en el músculo vasto lateral.

El deportista con mayor porcentaje de fibras rápidas logra despegar del piso en un tiempo menor habiendo recibido del mismo un Impulso mayor. Esto le permite elevar 36,7 cm sus pies sobre el piso, mientras que el otro deportista solo lo hace 33,8 cm.

Ya que el Impulso se relaciona con la variación de la Cantidad de Movimiento, dada la masa y la velocidad inicial podemos relacionar la Fuerza Neta sobre el deportista en cada instante, con la velocidad de su centro de masa (figura 5.17).

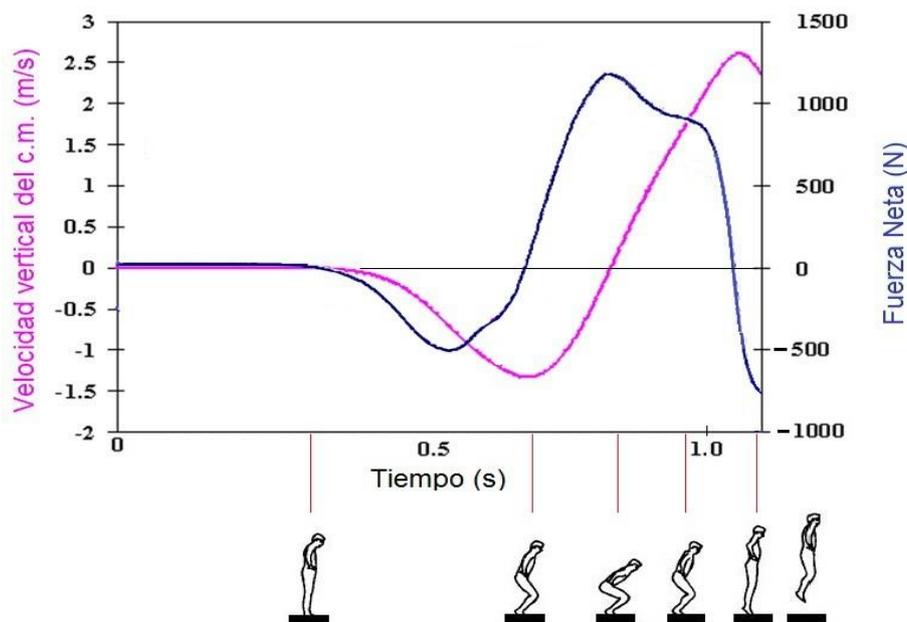


Fig. 5.17 Fuerza y velocidad del centro de masa en función del tiempo para un salto con contramovimiento (CMJ)

Si observamos tanto el salto alto como el largo, apreciaremos que en el último paso el atleta desciende su centro de masa de forma que en la batida pueda (además de maximizar la tensión muscular) tener mayor tiempo para ser impulsado verticalmente por el suelo (Figura 5.18).

³² El “Squat Jump” (SJ) es un salto vertical partiendo desde el reposo con las rodillas flexionadas, al extenderlas se busca llegar lo más alto posible (las manos se ubican siempre en la cintura).

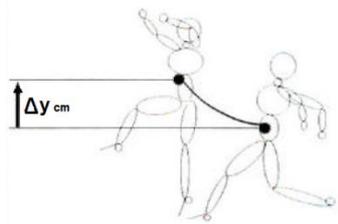


Fig. 5.18 Desplazamiento vertical del centro de masa durante la batida para salto alto ($\Delta \vec{y}_{cm}$)

Calzado sí, calzado no

Tengamos en cuenta que en una maratón el corredor puede dar más de 40000 pasos y el impacto total recibido durante la carrera será la suma de los recibidos en cada paso, con las consecuencias que ello conlleva para el organismo. En las últimas décadas se ha establecido la discusión sobre la conveniencia para la salud del deportista de correr calzado o simplemente descalzo.



Fig. 5.19 Corredores de maratón con y sin calzado

Se han realizado estudios para ambas situaciones mediante filmación y registro de fuerzas durante el apoyo. De esta forma se conoce más sobre la técnica y la repercusión en el cuerpo del corredor por su interacción con el piso.

En la figura 5.20 se aprecian las distintas curvas de la fuerza Normal (en BW³³) en función del tiempo durante la fase de apoyo para un mismo deportista corriendo a una velocidad de 3,5 m/s con y sin calzado.

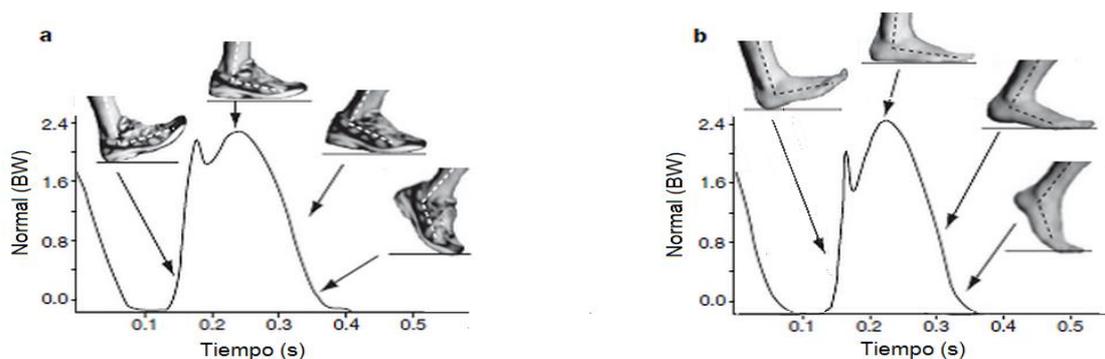


Fig. 5.20 Fuerza Normal en función del tiempo para apoyo del talón, corriendo a baja velocidad a) calzado b) descalzo

Se observa en la mayoría de los deportistas que, cuando corren calzados a baja o media velocidad, la zancada es amplia y generalmente el primer apoyo del pie (luego de la fase de vuelo) se establece con el

³³ Recordemos que 1BW equivale al Peso Corporal del deportista

talón por delante del cuerpo. La curva de la fuerza Normal (figura 5.20a) tiene forma de campana con un pequeño pico en los primeros instantes durante el apoyo del talón.

Si esos atletas se descalzan y siguen realizando el primer apoyo con el talón, se aprecia un pequeño acortamiento del tiempo de contacto con el piso, aumentando la frecuencia (o cadencia) de los pasos y disminuyendo la amplitud de los mismos (figura 5.20b). El impulso también será menor debido a que disminuye la amplitud de oscilación vertical del centro de masa (el correr se hace más plano) pero se mantiene el valor máximo de la fuerza Normal del piso ya que se reduce el tiempo de contacto.

El gráfico del valor de la Normal en función del tiempo se distingue respecto al anterior, por presentar el primer pico de fuerza más definido en los primeros instantes de contacto. Esto podría llevar a afirmar que es claramente conveniente correr calzado para evitar cambios bruscos de fuerza sobre nuestros pies que pueden dañar músculos y articulaciones.

Sin embargo puede observarse que aquellos corredores acostumbrados a correr descalzos tienen una curva de la fuerza Normal en función del tiempo diferente, mejor amortiguada, sin los picos apreciados anteriormente.

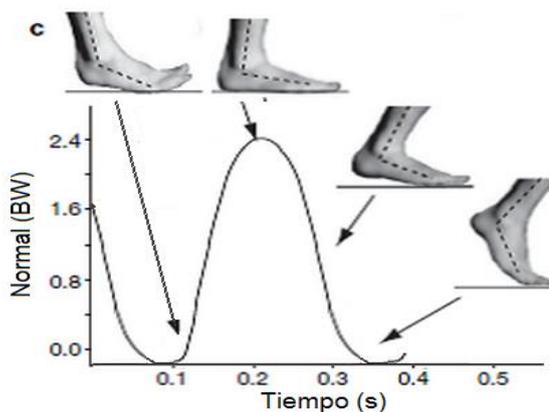


Fig. 5.21 Fuerza Normal en función del tiempo para apoyo del medio pie corriendo descalzo a baja velocidad

Al observar el apoyo de estos corredores se aprecia junto al aumento de la frecuencia de los pasos y la reducción de la amplitud de la zancada, que el primer apoyo se realiza con el medio pie o el ante pie (“almohadilla” del metatarso) realizando una mejor amortiguación (Figura 5.22).

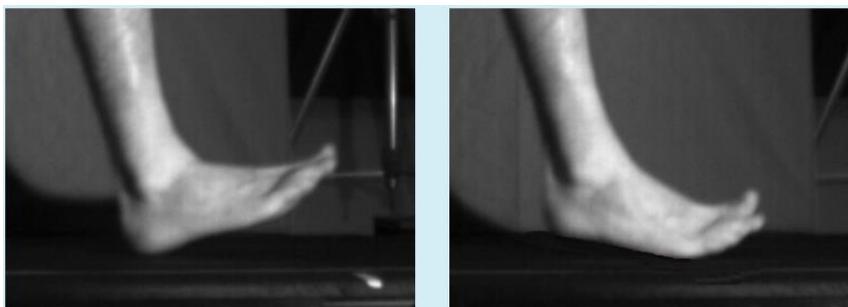


Fig. 5.22 Primer apoyo en el medio pie al correr descalzo

En la revista “Medicine & Science in Sports & Exercise” el Dr. Lieberman de la Universidad de Harvard publicó los resultados realizados con 56 atletas de Cross. Observó que casi un 60% de ellos comenzaban el apoyo de su calzado en la posición del talón coincidiendo con lo observado por Hasegawa y col, 2007. Dichos corredores sufrían un mayor número de lesiones deportivas durante su carrera respecto a quienes apoyaban su pie en la zona media o anterior. Esta conclusión no es definitiva y el propio autor aclara que la diferencia es mínima, por lo que es necesario seguir investigando al respecto.

Lo que sí parece comprobado es que quienes corren apoyando el talón son más propensos a lesionarse en las rodillas, mientras que quienes apoyan con el metatarso sufren más lesiones en los tobillos.

Actualmente existen en el mercado calzados que emplean distintos materiales y sistemas capaces de recibir impulso del piso, disminuyendo los valores máximos en las fuerzas de impacto sobre el atleta: "cámara de aire", "resortes de aire", "sistema gel", etc. También se utilizan plantillas de goma EVA, "Mogo" u otras similares con igual finalidad (Figura 5.23).



Fig. 5.23 Distintos calzados y suelas deportivas

Sin embargo, los biomecánicos aseguran que lo más importante de todo es enseñar a correr bien para prevenir lesiones.

En fin, sobre la conveniencia o no de usar calzado para nuestra salud, estamos en presencia de un problema a resolver, donde no está dicha la última palabra y la investigación científica tiene mucho para aportar.

Un ganador descalzo

Más allá de la sorprendente presentación del joven atleta yemení [Abdullah Al-Qwabani](#) en el Mundial de Atletismo de Pekín 2015, actualmente no se observa a los mejores deportistas mundiales correr descalzos. Pero no siempre fue así. En los Juegos Olímpicos de Roma en 1960 el etíope [Abebe Bikila](#) (Figura 5.24) ganó la maratón y fue el primer africano en conseguir una medalla de oro en dichos Juegos.



Fig. 5.24 Abebe Bikila, maratón de los JJ.OO. Roma 1960

Algunos afirman que en realidad disponía de unos zapatos Adidas que no quiso

colocarse además porque le incomodaba una ampolla del pie.

Pero lo llamativo es que lo hizo descalzo, convirtiéndose en uno de los héroes de África, un símbolo de las precarias condiciones del continente y del deseo de superación. Cuando le preguntaron a este pastor de ovejas por qué corrió así, contestó: "Quería que el mundo supiera que mi país, Etiopía, ha ganado siempre con determinación y heroísmo".

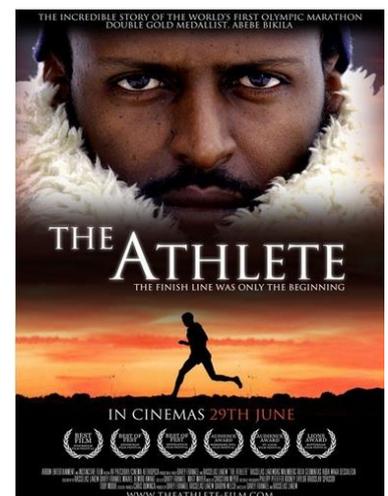


Fig. 5.25 Afiche de una película sobre la vida de Abebe Bikila

Cuatro años más tarde (esta vez calzado), volvió a ganar el oro en la maratón de las Olimpiadas de Tokio, seis semanas después de haber sido operado de apendicitis y batiendo nuevamente la plusmarca mundial con 2 horas 12 minutos 11 segundos.

En 1973 tuvo un accidente en su auto que le dejó parapléjico, teniendo que trasladarse en una silla de ruedas hasta su muerte. Participó en varios campeonatos de tiro con arco para discapacitados, donde obtuvo muy buenos resultados. Su historia de vida se recuerda como una leyenda en el deporte y su importancia e interés hizo que se tradujera en una producción cinematográfica (Figura 5.25).

Conservación de la Cantidad de Movimiento lineal

Si la Fuerza Neta exterior sobre un sistema es nula, de acuerdo a la ecuación 5.4, también será nula la variación de su Cantidad de Movimiento lineal.

Si solo existen Impulsos realizados por fuerzas internas, es decir entre partes del mismo sistema, pueden modificar la Cantidad de Movimiento de alguna de ellas, pero no la del sistema en conjunto. La Cantidad de Movimiento de su centro de masa se mantendrá constante.

De acuerdo al Principio de Interacción, cuando dos cuerpos se ejercen fuerzas entre sí, las mismas tendrán en todo instante igual valor, la misma dirección y sentido contrario. Sus Impulsos tendrán en todo lapso, igual módulo y sentido contrario. Tal consideración es aplicable al choque de dos bolas de pool, dos piedras de curling o a cualquier otra interacción (Figura 5.26). Si la Fuerza Neta externa sobre ellos fuera despreciable, los impulsos internos al sistema se cancelan, conservándose la Cantidad de Movimiento lineal del mismo.

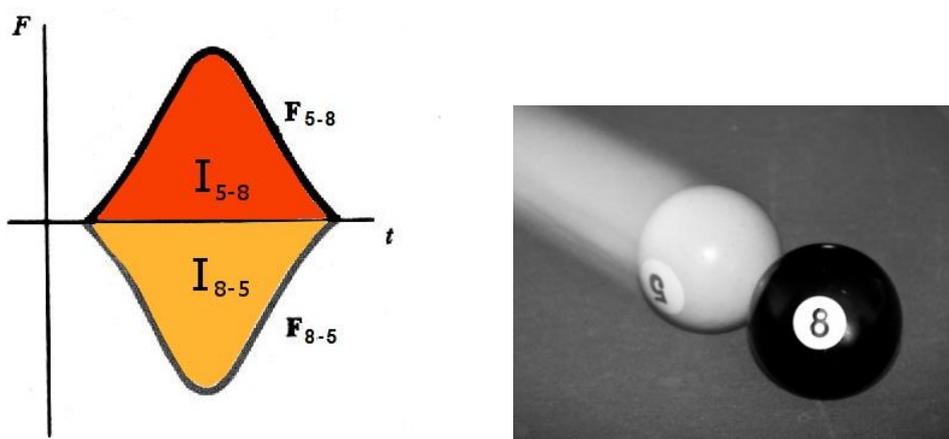


Fig. 5.26 Gráfico del valor de las fuerzas en función del tiempo durante un choque entre bolas de pool

El *Sumo*, es un deporte nacido en Japón antes del nacimiento de Cristo, que actualmente consiste en la lucha entre dos contrincantes que deben buscar mediante agarres y empujones llevar a su adversario fuera del ring circular.

Como se aprecia en la figura 5.27, los mejores luchadores tienen una gran masa corporal, la cual buscan acrecentar mediante su alimentación para un mejor rendimiento durante la contienda.



Fig. 5.27 Luchas de Sumo (Japón)

Al producirse el choque entre los cuerpos de los luchadores, estos se aplicarán impulsos entre sí, y si pudiera no considerarse la interacción con el piso, tendrán variaciones en su Cantidad de Movimiento de igual módulo y sentido contrario. Pero aquel que tenga menor masa tendrá una variación de velocidad más importante y por lo tanto mayor probabilidad de perder la competencia (ver [video](#) del gran luchador Konishki).

Por consiguiente, la masa y la velocidad de los deportistas serán importantes al chocar en el rugby o para ganar la posición en busca del rebote en el básquet (Figura 5.28).



Fig. 5.28 Choques” entre deportistas: a) Rugby (“Los teros” Uruguay) b) básquetbol (Shaquille O’Neal)



Fig. 5.29 Choque entre piedras de curling

En el curling, debido a que el Peso de la piedra se equilibra con la Normal y la fuerza de rozamiento piedra-hielo es ínfima, en ocasiones puede despreciarse el impulso del piso sobre las piedras. Si chocan dos piedras y consideramos a ambas como partes de un mismo sistema, para recorridos cortos puede considerarse la conservación de su Cantidad de Movimiento, tanto su módulo como su sentido.

Si una piedra del equipo amarillo choca a una que estaba en reposo del equipo celeste, la suma de las Cantidades de Movimiento finales coincidirá con la Cantidad de Movimiento inicial, en este caso, con la inicial de la piedra amarilla.

$$\text{Si } \vec{I}_{ext} = \vec{0} \rightarrow \sum \vec{P}_i = \sum \vec{P}_f$$

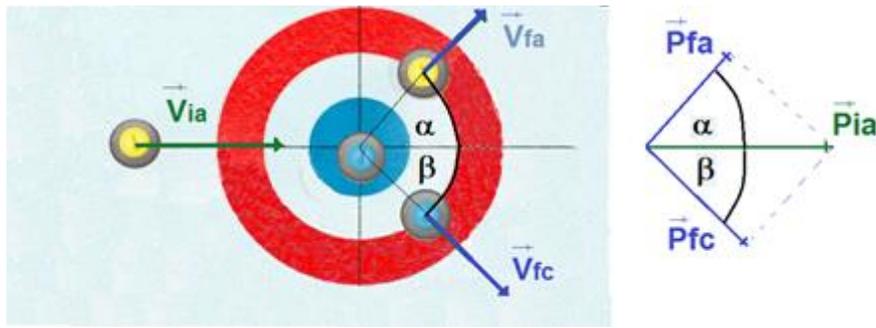


Fig. 5.30 Cantidades de movimiento inicial y final para el choque entre piedras de curling.

Desconozco cuánto saben teóricamente sobre la conservación de la cantidad de movimiento los jugadores de curling, pero en la práctica lo aplican asombrosamente.



Fig. 5.31 Jennifer Jones y un lanzamiento sorprendente (ver video) de curling.

“Ojo con el culatazo”

Cuando una pistola dispara una bala y no está bien sujeta, acelera en sentido contrario a la velocidad del proyectil por el impulso que este le realiza. Por tal razón es importante para quien dispara aprisionar fuertemente la empuñadura y estar bien parado para no perder el equilibrio.



Fig. 5.32 Tiro al blanco con pistola

Considerando a la pistola y la bala como partes de un mismo sistema, si solo fueran considerables las fuerzas que se ejercen entre sí (despreciando el accionar del aire u otros elementos), la Cantidad de Movimiento durante el disparo se conserva. Si ambas estaban en reposo antes del disparo, luego del mismo sus Cantidades de Movimiento tendrán iguales módulos y sentidos opuestos. De acuerdo a esto, la relación entre sus velocidades será inversa a la relación entre sus masas.

$$\frac{m}{M} = -\frac{V}{v}$$



Fig. 5.33 Velocidades luego del disparo

Resumiendo

El Impulso que recibirá un deportista o alguno de sus implementos dependerá de la fuerza aplicada sobre él y del tiempo que dure la interacción.

En el deporte, muchas veces es útil aumentar el tiempo de contacto para hacer más saludable o menos dañina cierta acción deportiva. En otras ocasiones, aumentar el tiempo de contacto y/o la fuerza aplicada, permite un mayor impulso y con él un mejor rendimiento para saltos, lanzamientos, etc.

Un Impulso Neto sobre un sistema provoca y es igual a la variación de la Cantidad de Movimiento del mismo. Cuando es depreciable la fuerza exterior sobre un sistema, este tendrá una Cantidad de Movimiento lineal constante. Dada esta condición, ya sea en los impactos de las bolas de pool o de las piedras de curling, conociendo la Cantidad de Movimiento de una parte del sistema de estudio, podremos saber qué sucede con el resto del mismo.

Enlaces para ampliar la información

- [Página web](#) educativa española que explica el tema del Impulso y la Cantidad de Movimiento relacionándolo con algunas situaciones y problemas cotidianos.
- Muy claros son los [artículos](#) del Prof. Xavier Aguado Jódar que analizan el Impulso en el salto.
- Video de [NatGeo : La ciencia del Choque - Coches](#) sobre las variables importantes para la situación de impacto entre los vehículos
- Para [leer más](#) sobre Abebe Bikila, el corredor descalzo.
- Videos que muestran los distintos apoyos con talón:
BF: <https://www.youtube.com/watch?v=SPP7jFiTocQ> TR: <https://www.youtube.com/watch?v=F0UIMam8-lw>
y con el antepie:
BF: <https://www.youtube.com/watch?v=TjrEyfQC5NQ>, R: <https://www.youtube.com/watch?v=XO4MruQov4Q>).

Preguntas y Problemas

1) Justifique a partir de los conceptos de Impulso y Cantidad de Movimiento la afirmación de algunos karatecas: "Al golpear de la misma manera una tabla o bloque, se recibe mayor fuerza cuando la mano o el pie rebota en el objeto sin lograr partirlo, que cuando sí lo hace".



Fig 5.34

2) Si un astronauta que se encuentra en reposo respecto a una pelota "en medio" del espacio, "patea" la misma, y luego de la interacción son despreciables todas las fuerzas sobre ellos. Indique si son verdaderas o falsas las siguientes afirmaciones.

- a) El Impulso del pie sobre la pelota tuvo mayor módulo que el Impulso de la pelota sobre el pie.
- b) La velocidad de la pelota luego del contacto \vec{v}_p tendrá mayor módulo que la velocidad del centro de masa del astronauta \vec{v}_a como representa la figura 5.35.

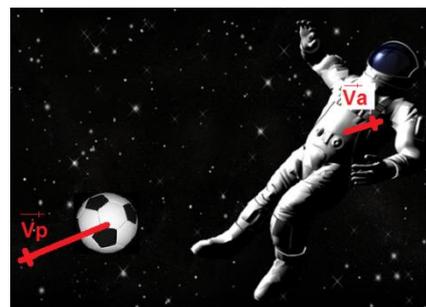


Fig.5.35



Fig. 5.36

3) Juan Pablo golpea con su raqueta una pelota de tenis de masa $m=52\text{ g}$ que venía con una velocidad de módulo $v=36\text{ km/h}$, haciendo que esta salga luego del impacto con una velocidad de igual módulo en sentido contrario (Figura 5.36).

Determina: a) el Impulso que recibió la raqueta b) La fuerza máxima que recibió el cordado sabiendo que es un 190 % de la Fuerza media en un tiempo de contacto de 8,0 ms.

4) Un disco de hockey de masa $m=170\text{ g}$, que viajaba a una velocidad de $6,0\text{ m/s}$ recibe un fuerza media de 100 N en dirección horizontal, perpendicular a su velocidad inicial como representa la figura 5.37, durante $0,01\text{ s}$. Determine la velocidad final del disco luego del impacto



Fig. 5.37

5) Si una piedra de curling de color amarillo choca a otra celeste que se encontraba en reposo como representa la figura 5.30 y los módulos de las velocidades finales son: $v_{fa}=3,0\text{ m/s}$ ($\alpha=50^\circ$) y $v_{fc}=4,0\text{ m/s}$ ($\beta=40^\circ$) respectivamente. Determine la velocidad de la piedra amarilla antes del choque \vec{v}_{ia} .³⁴

³⁴ Las piedras de curling tienen todas igual valor de masa (aproximadamente 20 kg).

Actividades

- 1) Dejar caer una pelota desde cierta altura y detenerla con las manos:
 - a) en el aire (“acompañando el movimiento de la pelota”).
 - b) teniendo las manos apoyadas en una mesa (las manos siempre a la misma altura).¿Qué diferencias se sienten en las manos durante la interacción en ambas situaciones?
Explicar dichas diferencias haciendo mención a magnitudes físicas consideradas en este capítulo.

- 2) Dejarse caer desde cierta altura, flexionando más o menos las rodillas al hacer contacto con el piso.
¿Qué diferencias se sienten en el cuerpo durante la interacción en ambas situaciones?
Explicar dichas diferencias haciendo mención a magnitudes físicas consideradas en este capítulo.
(Si se cuenta con una plataforma de fuerzas, determinar el Impulso recibido y la fuerza máxima vertical realizada por la plataforma en cada caída).

- 3) Colocar sensores de fuerza en dos carritos para registrar las fuerzas en función del tiempo al chocar estos en una dirección.
A partir de los gráficos de $F = f(t)$, determinar el impulso recibido por los carritos para distintas situaciones (modificando la masa, la velocidad, etc.). Comparar el impulso recibido por ellos.

- 4) Golpear con el puño una plataforma de fuerza de modo que:
 - a) la mano quedé finalmente en reposo en contacto con la plataforma. Medir el Impulso realizado.
 - b) la mano rebote luego del contacto con la plataforma. Medir el Impulso realizado.Extraer conclusiones a partir de los resultados obtenidos

- 5)
 - a) Filmar un choque de discos en el tejo (el “colchón” de aire disminuye la fuerza de rozamiento).
 - b) Obtener la Cantidad de Movimiento de cada disco antes y después del choque.
 - c) Determinar si se conservó o no la Cantidad de Movimiento.Aquí un [video tutorial](#) (realizado por el Prof. Alfonso Forte) sobre cómo trazar y operar con vectores en el programa [“Tracker”](#).

Si con una filmación (de alta frecuencia de muestreo) u otro método puede medirse la velocidad con que llegó el puño a hacer contacto, determinar la “masa efectiva” del golpe.

Para conocer algunos conceptos básicos a tener en cuenta al realizar una filmación, ver [Anexo 1](#).

Si se realiza el análisis de video con el software libre [“Tracker”](#) y se quiere tener una guía básica de su manejo, clic [aquí](#). Y aquí un [video tutorial](#) realizado por el profesor Marcelo Vachetta.

Capítulo 6 Trabajo, Energía y Potencia

En este capítulo definiremos el trabajo mecánico, valoraremos la potencia al correr, al saltar o golpear, así como las energías involucradas en la actividad deportiva. También trataremos sobre las fibras musculares y cómo se genera en ellas la energía que permite los distintos movimientos de nuestro cuerpo. Empecemos por lo primero.

¿Trabaja o no trabaja?

El concepto de trabajo mecánico en física tiene una definición precisa que en ocasiones no coincide con el concepto de trabajo que se tiene y expresa en otras áreas, incluyendo algunas del deporte. No siempre que un deportista realiza un esfuerzo, que emplea energía muscular, realiza trabajo.

El trabajo mecánico es una forma de transferir energía a (o desde) un sistema mediante la aplicación de una fuerza. La condición de la existencia de dicha fuerza para realizar trabajo es necesaria pero no suficiente.

Si un deportista de halterofilia sostiene en reposo la barra con pesas sobre su cabeza (fig. 6.01), aplica fuerzas sobre la barra, pero no realiza trabajo sobre ella dado que no se desplaza el punto de aplicación³⁵.



Fig. 6.01 Mauro Acosta, sosteniendo las pesas sobre su cabeza, representando a Uruguay

Pero tampoco el desplazamiento del punto de aplicación de la fuerza es condición suficiente. Al deslizarse un esquiador sobre una rampa (figura 6.02), la fuerza Normal sobre él, se dispone perpendicular a su desplazamiento en todo instante y por ello no realiza trabajo.

Para que una fuerza realice trabajo, debe tener componente en la dirección del desplazamiento.

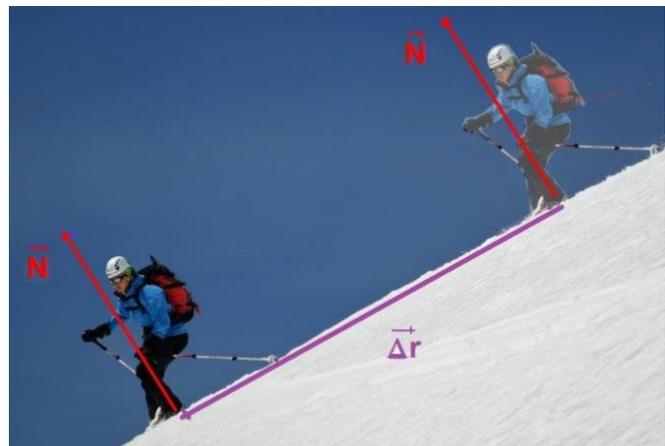


Fig. 6.02 Fuerza Normal y desplazamiento para el descenso en esquí

³⁵ A nivel microscópico, las fibras musculares sí realizan trabajo en el interior del cuerpo al relajarse y contraerse, provocando pérdida de energía del músculo y en cierto tiempo la sensación de agotamiento del deportista.

Formalizando el Trabajo

Si en el [bobsleigh](#) un atleta de Jamaica ³⁶ empuja su trineo sobre el hielo en una trayectoria rectilínea con una fuerza \vec{F} constante (Figura 6.03), esta realiza trabajo por tener componente paralela \vec{F}_{\parallel} a la dirección del desplazamiento $\Delta\vec{r}$. La componente \vec{F}_{\perp} no realiza trabajo por ser perpendicular al mismo.

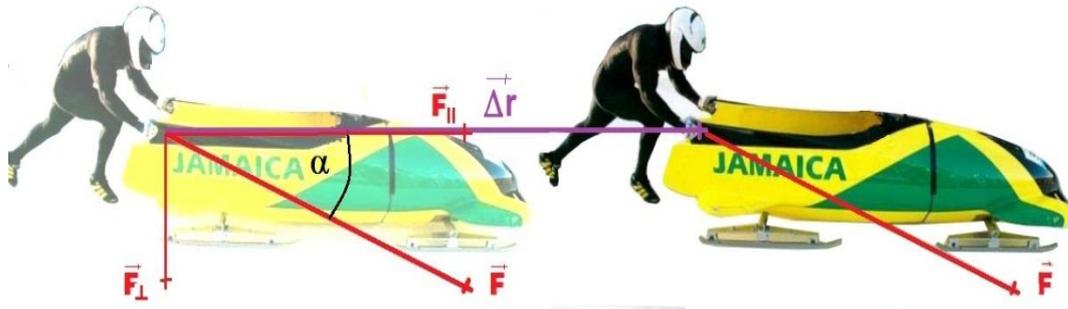


Fig. 6.03 Empuje de trineo de deportista de Jamaica en bobsleigh

El trabajo mecánico de la fuerza \vec{F} se define formalmente como el producto escalar entre ella y el desplazamiento:

$$T_{\vec{F}} = \vec{F} \cdot \Delta\vec{r}$$

Por trigonometría, $|\vec{F}_{\parallel}| = F \cdot \cos\alpha$ por lo tanto el valor del trabajo de \vec{F} se determina como:

$$T_{\vec{F}} = |\vec{F}| \cdot |\Delta\vec{r}| \cdot \cos\alpha \quad \text{Siendo constante } \vec{F} \text{ y } \alpha \text{ (ángulo entre } \vec{F} \text{ y } \Delta\vec{r}) \quad (\text{Ec. 6.1})$$

La unidad de esta magnitud escalar en el Sistema Internacional, es el joule (J), que equivale a Nm.

Si el módulo de la fuerza \vec{F} varía con la posición (como sucede realmente al empujar un trineo), siendo α constante, para determinar el trabajo en cierto recorrido, puede dividirse este en muchos pequeños desplazamientos $d\vec{r}$ y demostrarse que el área encerrada bajo el gráfico $F=f(r)$ representa la suma de los productos $F \cdot dr$ (si $dr \rightarrow 0$). Por lo tanto, en este caso, puede determinarse el trabajo como:

$$T_{\vec{F}} = \text{Área}_{F(r)} \cdot \cos\alpha \quad \text{Siendo constante } \alpha \quad (\text{Ec. 6.2})$$

Para ver un ejemplo del trabajo de una fuerza que varía con la posición, consideremos una atleta de nado sincronizado, de altura h , que se sumerge en el agua con su cuerpo dispuesto verticalmente. Al irse sumergiendo, el agua le aplicará una fuerza llamada empuje \vec{E} , vertical y hacia arriba, cuyo módulo será función de la posición \vec{r} (vector que tiene como origen elegido el punto de la superficie donde comenzó a sumergirse y extremo la ubicación de los pies de la nadadora en cada instante).

Si modelamos a la nadadora como un prisma (Figura 6.04), el empuje tendrá una relación de proporcionalidad directa con la posición hasta sumergirse totalmente ($r > h$) y a partir de allí permanecerá constante (Figura 6.05). El trabajo realizado por la fuerza empuje al sumergirse una distancia r se determina como:

$$T_{\vec{E}} = \text{Área}_{E(r)} \cdot \cos 180 \quad \alpha = 180^\circ \text{ dado que al hundirse el Empuje tiene sentido opuesto al desplazamiento}$$

³⁶ El equipo de bobsleigh de Jamaica, sorprendente dado el clima cálido del país, ha participado en los Juegos Olímpicos de Invierno desde 1988 e inspiró a Disney a filmar la película "Cool Runnings" ("Jamaica Bajo Cero" en Latinoamérica).

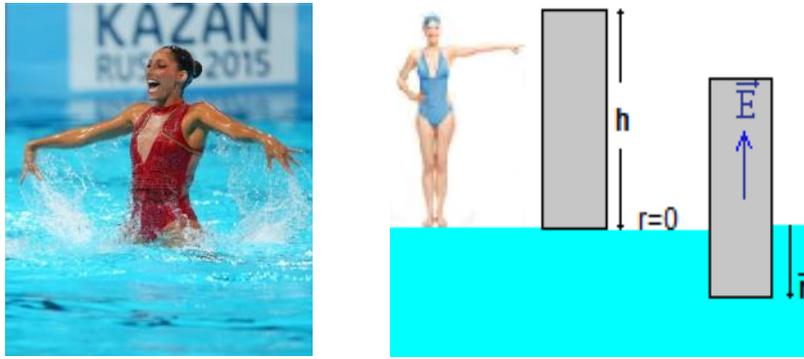


Fig. 6.04 Modelado de la nadadora como un prisma de altura h entrando al agua

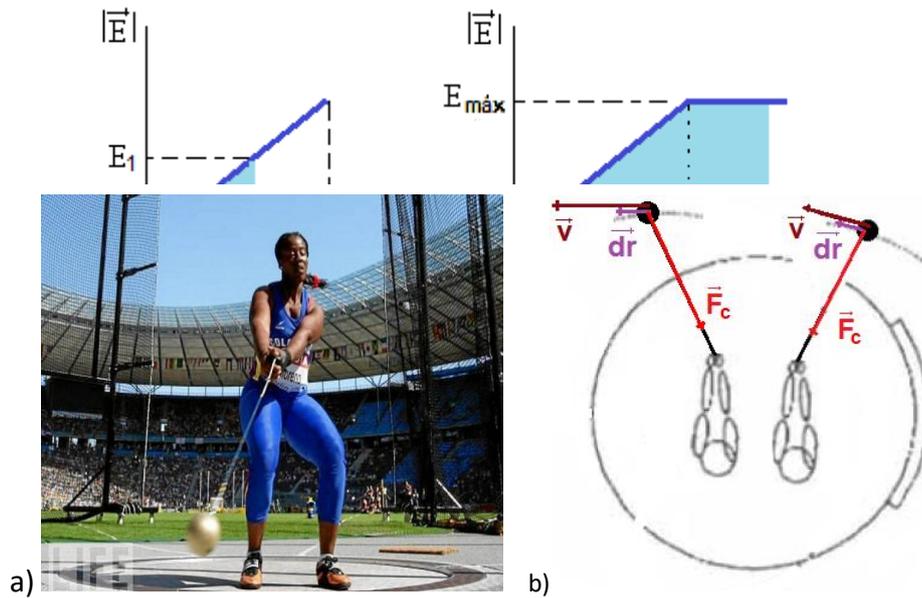


Fig. 6.06 Lanzamiento de martillo: a) Foto lateral b) Representación de la Fuerza de la cadena y de la velocidad en dos instantes (vista superior)

Si analizamos el trabajo realizado sobre la bola en el lanzamiento de martillo (Figura 6.06), apreciamos que la componente horizontal de la fuerza que le realiza el cable \vec{F}_c , cambia su disposición durante los giros respecto al sentido de la velocidad (que es el mismo que el desplazamiento infinitesimal $d\vec{r}$).

En ciertos lapsos, cuando el atleta apoya ambos pies, la componente horizontal en la dirección de la velocidad $\vec{F}_{c\parallel}$ tiene generalmente el mismo sentido que ella (al ser α menor que 90°), lo que determinará un trabajo positivo³⁷ (Figura 6.07a). En los lapsos de apoyo unipodal, el sentido de $\vec{F}_{c\parallel}$ es opuesto al de la velocidad (α mayor que 90°) lo que implicará un trabajo negativo de la fuerza \vec{F}_c (Figura 6.07b).

³⁷ En una primera aproximación puede despreciarse el trabajo de la componente vertical de la fuerza \vec{F}_c durante los primeros giros.

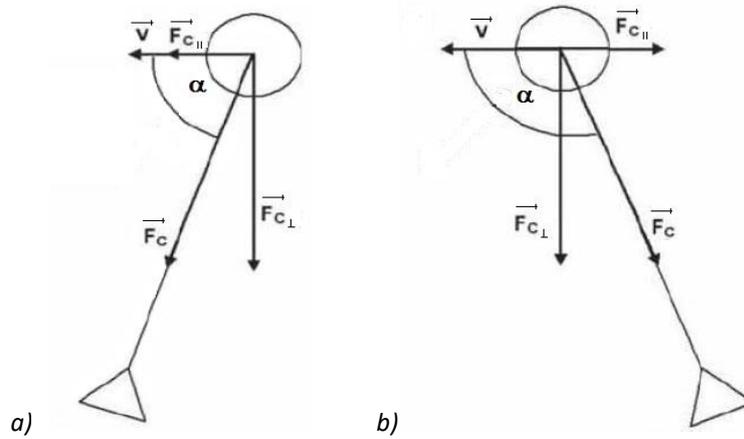


Fig. 6.07 Fuerza horizontal del cable (\vec{F}_c) sobre la bola del martillo y sus componentes radial ($\vec{F}_{c\perp}$) y tangencial ($\vec{F}_{c\parallel}$) cuando el cable está: a) por delante de la dirección del radio de rotación y b) detrás de la dirección del radio de rotación

Todo camino puede dividirse en una sucesión de pequeños desplazamientos infinitesimales llamados \vec{dr} . Si queremos determinar el trabajo de la fuerza \vec{F}_c en todo el camino, es necesario hallar el trabajo dT_{FC} en cada \vec{dr} ($dT_{FC} = \vec{F}_c \cdot d\vec{r}$) para hallar el trabajo total realizando la suma de todos estos productos.

$$T_{FC} = \vec{F}_1 \cdot d\vec{r}_1 + \vec{F}_2 \cdot d\vec{r}_2 + \dots \quad (\text{Ec. 6.3})$$

Si varias fuerzas realizan trabajo sobre un cuerpo puntual, el trabajo neto (o total) será la suma de los trabajos realizados por dichas fuerzas. Dicho trabajo es el mismo que el realizado por la fuerza neta \vec{F}_N en ese trayecto:

$$T_{NETO} = \vec{F}_{N1} \cdot d\vec{r}_1 + \vec{F}_{N2} \cdot d\vec{r}_2 + \dots \quad (\text{Ec. 6.4})$$

En el gráfico de la figura 6.08, puede apreciarse que en los giros, el módulo de la velocidad de la bola del martillo crece cuando el trabajo neto sobre ella es positivo y decrece cuando el trabajo neto es negativo.

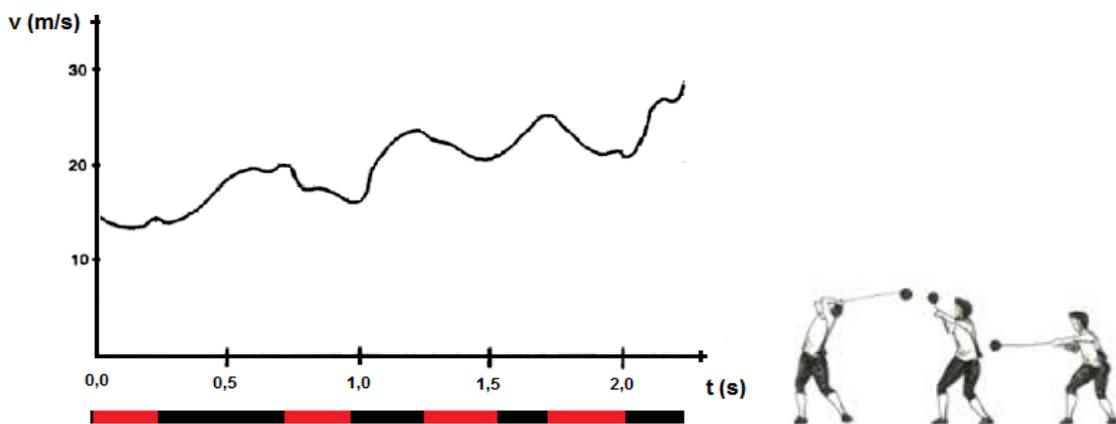


Fig. 6.08 Curva experimental de la velocidad en función del tiempo durante la realización de las fases de apoyo unipodal y bipodal en los giros del lanzamiento de martillo (Dapena, 1989). Lapsos de trabajo neto positivo marcados en negro, lapsos de trabajo neto negativo marcados en rojo

Esto se debe a que el trabajo Neto sobre el martillo se relaciona con su variación de energía de movimiento, la energía cinética. La unidad de la energía cinética en el Sistema Internacional es el joule (J), al igual que todas las otras expresiones de energía.

Puede demostrarse a partir de la 2ª ley de la Dinámica, el teorema que vincula el trabajo neto exterior sobre un *cuerpo puntual* y su variación de energía cinética (que es solo de traslación):

$$T_{NETO_{ext.}} = \Delta E_C \quad \text{para un cuerpo puntual} \quad (\text{Ec. 6.5})$$

Desarrollando la expresión de la energía cinética de traslación:

$$T_{NETO_{ext.}} = \frac{m \cdot v_f^2}{2} - \frac{m \cdot v_i^2}{2}$$

Así que dependerá del trabajo neto, la velocidad que adquiera un cuerpo de masa constante (en el deporte se puede realizar en general esta consideración), puntual, con cierto valor de velocidad inicial. A partir de esta afirmación se entiende la conveniencia de aumentar el recorrido dando varios giros antes de lanzar el martillo. Se quiere así realizar el mayor trabajo posible en contacto con el proyectil para acrecentar la velocidad final de la fase de impulsión³⁸ y así obtener un mayor alcance.



Fig. 6.09 Velocidad final de fase de impulsión en lanzamiento de martillo

Si para el análisis energético cambiamos de un sistema de referencia inercial a otro, es posible que cambie el valor del trabajo y también de las energías cinéticas, pero la igualdad expresada en la ecuación 6.5 será invariante.

Potenciando el Trabajo

Muchas veces en los deportes (especialmente en aquellos de ejecución breve, “explosivos”, tales como los saltos o levantamiento de pesas), se valora la capacidad de desarrollar una gran potencia.



Fig. 6.10 Deportes “explosivos”

Se define la Potencia como la rapidez con que se realiza una transferencia de energía. Si dicha rapidez es constante, su valor se determina entonces como el cociente entre la transferencia de energía y el intervalo de tiempo empleado:

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} \quad (\text{Ec. 6.6})$$

Si la Potencia es variable en el tiempo, dicho cociente nos dará la Potencia media (P_m) durante el lapso considerado. La unidad de la Potencia en el Sistema Internacional es el J/s (joule por segundo), y se denomina watt (W).

³⁸ Tiempo desde que el deportista comienza a girar el martillo hasta que deja el contacto con el mismo.

En las carreras donde están implicados motores (de autos, motos, etc.), generalmente se expresa su Potencia en caballos de potencia (HP), también llamada caballos de fuerza.³⁹

Es común expresar la Potencia de un deportista por unidad de masa del mismo y en estos casos la unidad será W/kg.

La Potencia Mecánica de una fuerza \vec{F} es la rapidez con que realiza trabajo Mecánico sobre un cuerpo. Si es constante se determina como:

$$P_{\vec{F}} = \frac{T_{\vec{F}}}{\Delta t}$$

Puede demostrarse que la Potencia mecánica en cada instante efectuada por una fuerza \vec{F} sobre un cuerpo puntual, es el producto escalar entre dicha fuerza y la velocidad \vec{v} del objeto:

$$P_{\vec{F}} = \vec{F} \cdot \vec{v} \rightarrow P_{\vec{F}} = F \cdot v \cdot \cos\alpha$$

(Siendo α al ángulo entre la Fuerza y la velocidad) (Ec. 6.7)

Para valorar la Potencia si el cuerpo no es puntual, se trabaja generalmente con la velocidad de su centro de masa.



Fig. 6.11 La potencia de las motos se expresa en HP

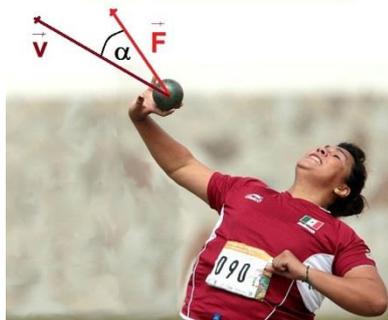


Fig. 6.12 Fuerza y velocidad instantánea en lanzamiento de bala

En la figura 6.13a se aprecian conjuntamente los gráficos de fuerza Normal, desplazamiento y velocidad vertical del centro de masa en función del tiempo para un deportista realizando un salto "squat". Debajo de dicho gráfico se ubica el de la Potencia de la Normal P_N^{*40} por unidad de masa del deportista, en función del tiempo para dicho salto (figura 6.13b)

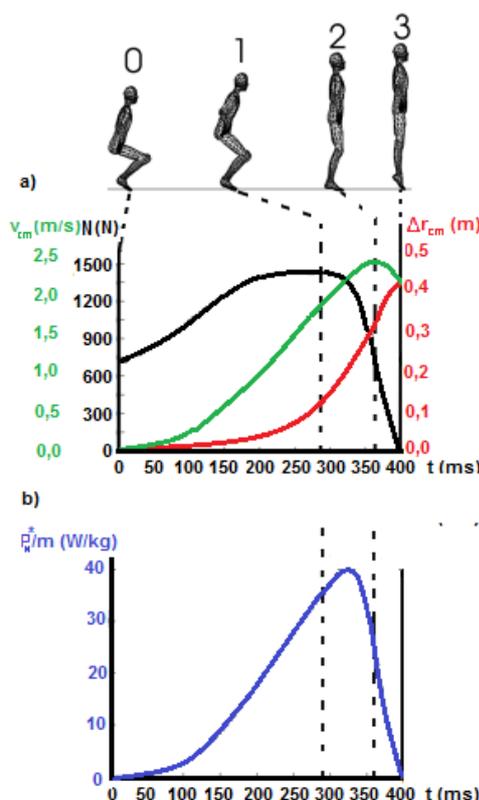


Fig. 6.13 "Squat Jump" a) Gráfico de la Normal, velocidad y desplazamiento del centro de masa en función del tiempo
b) Gráfico de la Potencia por unidad de masa del deportista en función del tiempo (Modificados de X. Aguado)

³⁹ 1 HP ~ 746W.

⁴⁰ Estrictamente la Normal no realiza trabajo en esta situación porque no se desplaza su punto de aplicación. Luego lo consideraremos un "seudotrabajo", como si \vec{N} se aplicara en el centro de masa y la "seudopotencia" se simbolizará con un P_N^* .

En ocasiones es útil visualizar el gráfico de la fuerza en función de la velocidad en cierta dirección, e identificar el pico de Potencia (donde el producto $F \cdot v_{cm}$ es máximo).

En la figura 6.14 se aprecia este gráfico durante la batida de un salto con contramovimiento en el que se ha marcado el máximo de Potencia de la Normal $P_N^*_{m\acute{a}x}$ (2734 W) en la vertical. La convención de signos utilizada en la vertical le otorga signo positivo a los vectores que se orientan hacia arriba y negativo a los que se orientan hacia abajo.

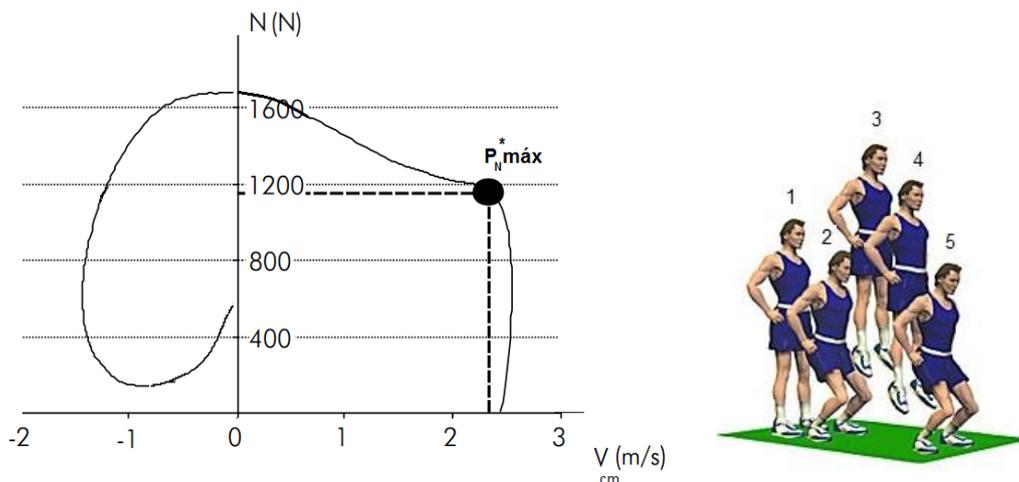


Fig. 6.14 Gráfico de la Normal en función de la velocidad para un salto con contramovimiento

Potencia Muscular

En 1938, el fisiólogo y matemático británico [Archiball Hill](#), postuló una relación entre la fuerza realizada por los músculos (llamada Tensión muscular) y su velocidad de contracción durante la actividad concéntrica⁴¹.

$$(v + b)(F + a) = b(F_0 + a) \quad (\text{Ec. 6.8})$$

F es la variable fuerza en el músculo

v es la variable velocidad de contracción

F_0 es la máxima tensión isométrica⁴² generada en determinado músculo

a y b son dos constantes que dependen de las características del músculo

Esta ecuación arroja resultados muy próximos a los observados experimentalmente en los músculos esqueléticos.

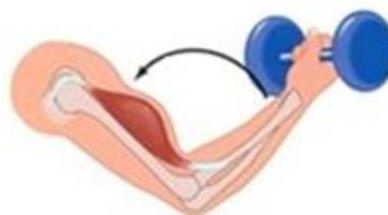


Fig. 6.15 Movimiento concéntrico por contracción del bíceps braquial

En la figura 6.16 se aprecia el gráfico del valor de la Fuerza en función de la velocidad según la ecuación de Hill, así como la potencia desarrollada por un músculo en valores normalizados (cociente entre los distintos valores y el valor máximo).

⁴¹ Contracción del músculo que aproxima las posiciones donde se inserta.

⁴² Sin que haya cambio de longitud, es una tensión estática del músculo.

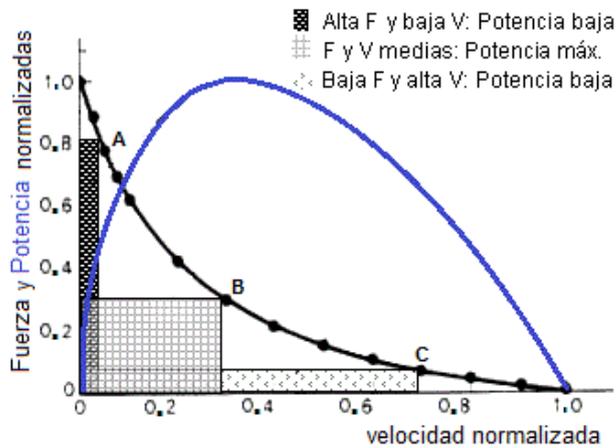


Fig. 6.16 Fuerza y Potencia en función de la velocidad (valores normalizados)

en B, donde la Fuerza y la velocidad tienen un valor aproximado del 33% respecto a sus valores máximos.

Si quisiéramos entregar la mayor energía posible en determinado tiempo realizando un “Press de banca” (figura 6.17), convendría elegir las pesas adecuadas para trabajar con la fuerza y la velocidad correspondiente a la máxima potencia el mayor tiempo posible.



Fig 6.17 Press de banca

En algunos deportes como el pádel, es más importante el entrenamiento de la velocidad que el de la fuerza (especialmente para los músculos de las piernas). Esto permite mayor eficiencia en los saltos y corridas, logrando llegar a golpear la pelota con la mejor ubicación posible. Se denomina “entrenamiento de la fuerza orientada a la velocidad” (Figura 6.18).



Fig. 6.19 Entrenamiento de jugador de Fútbol Americano, corriendo atado a “trineo” sobre césped



Fig. 6.18 Agustín Caorsi y André Trindade (Jugadores de pádel Uruguay)

Si lo que se busca es ganar una pulseada u otra competencia que se define básicamente por la fuerza empleada, para llevar al máximo el valor de la misma, se entrena principalmente con bajas velocidades o aplicaciones estáticas (Figura 6.20).



Fig. 6.20 Alexey Voyevoda (de amarillo) compitiendo en pulseada

Dispuestas para hacer lo conveniente

De acuerdo a la función que cumple cada músculo en el cuerpo, está la disposición de las fibras que lo componen. La fuerza y la velocidad de contracción dependerán, además de su composición, de la disposición de dichas fibras respecto a la recta de acción de la fuerza muscular. Los músculos que presentan una mayor cantidad de fibras en su sección transversal tienen la capacidad de realizar mayor fuerza. Si comparamos músculos de igual volumen, aquellos cuyas fibras se disponen en dirección oblicua a su eje, al contraerse ejercerán mayor fuerza y menor velocidad respecto a aquellos cuyas fibras se disponen paralelas a su eje. Se distingue la sección anatómica (sección perpendicular a la recta de acción del músculo) de la sección fisiológica (sección perpendicular a las fibras musculares). En el músculo recto ambas secciones coinciden (Figura 6.21a). En los músculos con fibras oblicuas (Figura 6.21b), la sección fisiológica es mayor a la anatómica posibilitando una fuerza máxima mayor.

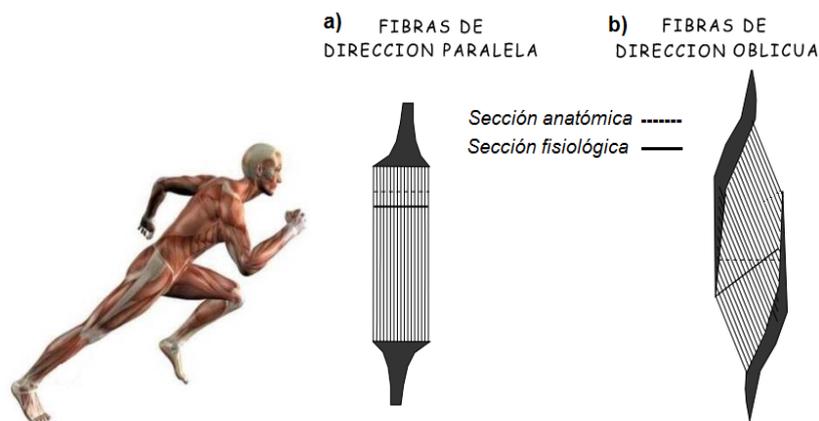


Fig. 6.21 Fibras musculares de dirección: a) paralela b) oblicua

Con el entrenamiento no solo se logra acrecentar la sección de las fibras musculares sino que también puede lograrse cierto cambio en su orientación. En la figura 6.22 se aprecian distintos músculos del cuerpo humano que de acuerdo a su función “priorizan” la fuerza o la velocidad.

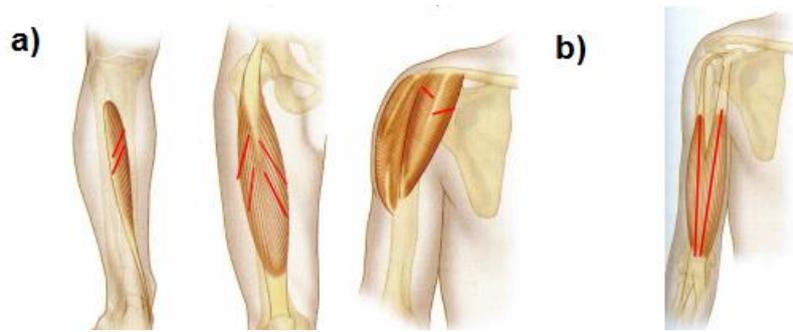


Fig. 6.22 Fibras dispuestas: a) oblicuas respecto a la recta de acción (Fuerza)
b) paralelas respecto a la recta de acción (velocidad)

Fuerzas conservativas y energías potenciales

Para sistemas conformados por lo menos por dos cuerpos, es posible (y útil) definir energías potenciales, siempre y cuando estos interactúen entre sí mediante fuerzas conservativas. Si las fuerzas conservativas realizan trabajo en un sistema, cambia la configuración posicional entre sus partes. Se denominan fuerzas conservativas a aquellas que, para cualquier trayectoria cerrada en el movimiento de un cuerpo, realizan sobre él un trabajo nulo. También se definen como aquellas cuyo trabajo sobre un cuerpo, al ir este de una posición a otra, es independiente del camino recorrido. En la rama de la mecánica encontramos al Peso y a la Fuerza Elástica como fuerzas conservativas.

El trabajo del Peso define una variación de Energía Potencial Gravitatoria del sistema⁴³:

$$T_P = -\Delta E_{pg} \quad (\text{Ec. 6.9})$$

Puede demostrarse (suponiendo al Peso constante) que la variación de Energía Potencia Gravitatoria E_{pg} del sistema se determina como producto del Peso del cuerpo por la variación en su altura.

En referencia a una altura de potencial nulo tendremos:

$$E_{pg} = m \cdot g \cdot h \quad (\text{Ec. 6.10})$$

El trabajo de la fuerza elástica define una variación de Energía Potencial elástica del sistema⁴⁴:

$$T_{Fe} = -\Delta E_{pe} \quad (\text{Ec. 6.11})$$



Fig. 6.23 Felix Baumgartner próximo a dejar que el trabajo de su Peso varíe la energía potencial gravitatoria que tiene con la Tierra

Cuando el módulo de la fuerza \vec{F}_e realizada por un cuerpo elástico sobre un cuerpo es directamente proporcional a su deformación $\overrightarrow{\Delta l}$ (tienen sentido contrario), al cociente $\frac{|\vec{F}_e|}{|\Delta l|} = k$ se le denomina constante elástica del cuerpo (Ley de Hooke). En este caso puede demostrarse que, fijado el potencial cero para deformación nula, la energía potencial elástica del sistema se determina como:

$$E_{pe} = \frac{k \cdot \Delta l^2}{2} \quad (\text{Ec. 6.12})$$

⁴³ Se considera sistema en esta expresión al conjunto Tierra – objeto.

⁴⁴ Se considera sistema en esta expresión al conjunto cuerpo elástico – objeto.



Fig. 6.24 Variación de la energía potencial elástica del sistema cuerpo- base elástica en el Salto de Trampolín

Al correr, músculos y tendones también se comportan como cuerpos elásticos capaces de almacenar y entregar energía. El tendón de Aquiles al estirarse es capaz de adquirir una energía elástica de aproximadamente 35 J cuando su deformación es máxima (Ker y cols, 1987). Durante la fase de apoyo de la carrera, la energía media almacenada en los músculos extensores de la rodilla puede alcanzar un valor de 66 J (Shorten, 1985) y el arco plantar en su máxima extensión 17 J (Ker y cols).

En ciertos deportes (como la cama elástica) hay posiciones del atleta con mayor energía potencial gravitatoria que le permitirán, al llegar a otra ubicación, adquirir una energía potencial elástica máxima y viceversa (Figura 6.25).



Fig. 6.25 Energías potenciales en Gimnasia con Cama elástica

Energía Mecánica

Se denomina energía mecánica E_m a la capacidad de realizar trabajo mecánico, siendo esta la suma de energías potenciales y cinéticas:

$$E_m = E_c + E_p$$

Expresando la energía potencial como la suma de la potencial gravitatoria y la potencial elástica:

$$E_m = E_c + E_{pg} + E_{pe} \quad (\text{Ec. 6.13})$$

En el salto con garrocha (o pértiga) y en el [puentismo](#) tenemos ejemplos donde estarán presentes transformaciones entre estas tres expresiones de energía mecánica (Figura 6.26).



Fig. 6.26 *Sergei Budka*



Fig. 6.27 *Puentismo con cuerda elástica*

Cuando la configuración de un sistema cambia, habiendo realizado trabajo únicamente fuerzas internas conservativas, se transforma determinado tipo de energía mecánica en otro tipo de la misma, pero la energía mecánica del sistema no cambia, se conserva.

Si un clavadista experimentara una caída libre desde cierta altura, el trabajo de la fuerza gravitatoria



Fig.6.28 "Clavadista" *Orlando Duque*

al atraerse con la Tierra, transformaría energía potencial gravitatoria en energía cinética⁴⁵, pero la energía mecánica del sistema permanecería constante.

Si la caída es en el aire y midiéramos con precisión la energía mecánica del clavadista a medida que desciende, podríamos apreciar que la misma va disminuyendo. Es que al desplazarse por el aire, este realiza trabajo sobre el atleta mediante fuerzas no conservativas. El trabajo total de las fuerzas no conservativas T_{FNC} provocará la variación de su energía mecánica:

$$T_{FNC} = \Delta Em = Em_f - Em_i \quad (\text{Ec. 6.14})$$

“¡Qué bien que se conserva!”

La energía E , se define en general como la capacidad de realizar trabajo. Para un sistema aislado⁴⁶ siempre se conserva, ya que la energía no se crea ni se destruye sino que solo se modifica de una forma a

⁴⁵ En este caso el desplazamiento y la velocidad de la Tierra por esta interacción es despreciable respecto a la del clavadista.

⁴⁶ Un sistema aislado es aquel que no permite la transferencia de energía en sus fronteras con el ambiente.

otra. Veremos ahora una expresión más general que la ecuación 6.14, cuando el sistema es capaz de variar su Energía Interna.

Si el sistema es cerrado⁴⁷ pero no está aislado, puede variar su energía por la transferencia de energía a través de su frontera con el ambiente mediante procesos de calor Q y/o trabajo $T_{NETO\ ext}$:

$$T_{NETO\ ext.} + Q = \Delta E \quad (\text{Ec. 6.15})$$

En el deporte, considerando como sistema al cuerpo de los atletas o los implementos utilizados, puede existir transferencia de calor Q , en general hacia el ambiente por estar este a menor temperatura. El valor de Q se torna importante en aquellos deportes aeróbicos de larga duración (maratón, esquí de fondo, etc.). Pero para deportes explosivos, de ejecución en tiempos breves (lanzamientos, saltos, etc.), esta magnitud puede tener un valor despreciable frente a las otras de la ecuación 6.15, por lo que la variación de energía será prácticamente igual al trabajo exterior:

$$T_{NETO\ ext.} = \Delta E \quad \text{en un sistema adiabático } (Q=0)$$

La variación de energía de un sistema de masa constante, puede estar dada por una variación de energía cinética ΔE_c (si varía el módulo de su velocidad), por una variación de energía potencial ΔE_p (si cambia la configuración posicional entre sus partes), o por una variación de energía interna ΔE_i (si varía su temperatura, composición química, etc.).

$$\Delta E = \Delta E_c + \Delta E_p + \Delta E_i \quad (\text{Ec. 6.15})$$

Por lo tanto:

$$T_{NETO\ ext.} = \Delta E_m + \Delta E_i \quad \text{en un sistema adiabático } ^{48}$$

Variaciones de energía interna solo pueden experimentar cuerpos no puntuales (como se consideran generalmente los cuerpos de los deportistas).

En ocasiones es conveniente para determinar la energía cinética y potencial de estos cuerpos extensos, referirse a su centro de masa. Se denomina energía potencial gravitatoria del centro de masa $E_{pg_{cm}}$, a aquella energía potencial que tendría el sistema si los cuerpos que lo integran ocuparan las posiciones de sus respectivos centros de masas. Y se expresa como energía cinética del centro de masa $E_{c_{cm}}$, a la energía cinética que el sistema con su masa total tendría si se moviese como un cuerpo puntual a la velocidad del centro de masa.

Un "Trabajo" que no es tal

Apliquemos lo visto anteriormente a una situación concreta: Una nadadora que interactúa con la pared de una piscina y recibe su impulso mediante fuerzas Normales en los pies (Figura 6.29). Durante esta acción, su centro de masa acelera horizontalmente hacia la pared opuesta. En este proceso: a) el trabajo total externo será nulo ya que las fuerzas Normales de la pared no realizan trabajo (no se desplazan sus puntos de aplicación); b) no existirá tampoco una variación de energía potencial si mantiene su altura.



Fig. 6.29 Fuerzas Normales de la pared de la piscina aplicadas en los pies de la nadadora

Si no hay transferencias de energía con el ambiente ($T_{NETO\ ext.}=0$ y $Q=0$), al no darse

⁴⁷ No hay intercambio de materia con el ambiente.

⁴⁸ Sistema que no intercambia calor con el ambiente

modificaciones de la energía potencial ($\Delta E_p = 0$), la ecuación 6.15 se reduce a:

$$\Delta E_{c_{cm}} = -\Delta E_i$$

Es decir que, el aumento de energía cinética de su centro de masa, se debe a una disminución de energía interna en su cuerpo. Puede demostrarse que si consideramos a la fuerza normal como si estuviese aplicada a su centro de masa mientras este tiene desplazamientos infinitesimales $d\vec{r}_{cm}$ y realizamos la suma:

$N_1 \cdot dr_{cm1} + N_2 \cdot dr_{cm2} + \dots$, nos da igual a la variación de la energía cinética de esta posición:

$$N_1 \cdot dr_{cm1} + N_2 \cdot dr_{cm2} + \dots = \Delta E_{c_{cm}} = -\Delta E_i$$

Generalizando para otras situaciones donde una Fuerza Neta exterior \vec{F}_N acelere el centro de masa sin realizar trabajo, como puede ser de rozamiento estático al correr o la Normal del piso al correr o saltar, tenemos que:

$$F_{N1} \cdot dr_{cm1} + F_{N2} \cdot dr_{cm2} + \dots = \Delta E_{c_{cm}} = -\Delta E_i$$

(Ec. 6.16)

A efectos prácticos, para medir el consumo de energía interna, muchas veces se determina esta suma mediante el área bajo el gráfico F_N en función de la posición del centro de masa r_{cm} . Esto se debe a que es más sencillo registrar las fuerzas exteriores (con sensores de fuerza), que medir directamente la variación de Energía Interna o las variaciones de la Energía cinética del centro de masa.

Trabajando a las corridas

Al correr, el centro de masa experimenta una oscilación en la vertical. Esto significa que, para adquirir energía potencial gravitatoria al subir el centro de masa en cada paso, debemos emplear necesariamente energía interna (energía química) de nuestros músculos⁴⁹. Los corredores de largas distancias saben que deben economizar energía si desean tener un buen desempeño y para ello la oscilación vertical de su centro de masa debe ser la mínima imprescindible (Figura 6.30).

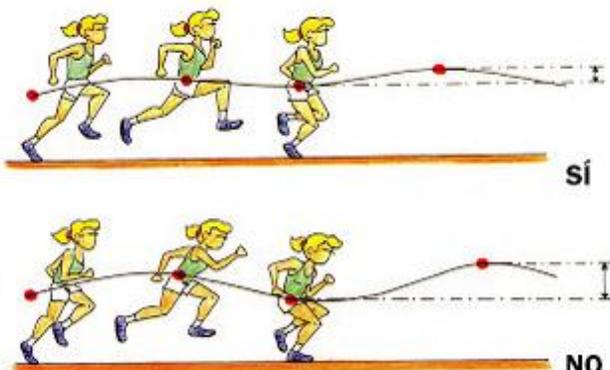


Fig. 6.30 Estilos más o menos eficientes al correr

En los mejores maratonistas la distancia vertical entre los extremos de esta oscilación no supera los 5,0 cm. La energía empleada para elevar un cuerpo de 60 kg esa distancia es en cada paso aproximadamente de 30 J. Si Usain Bolt (de masa $m=94$ kg) realizara un paso con esta oscilación vertical, le insumiría aproximadamente un 57% más de energía. Es esta una de las razones de por qué los mejores maratonistas son corredores livianos.

Si en una maratón olímpica se realizan aproximadamente 40000 pasos, podemos calcular la energía aportada por los músculos para dicha oscilación vertical, la cual es $1,2 \times 10^6$ J.

Una oscilación del centro de masa 1,0 cm mayor a la ideal implica un gasto de Energía Interna extra de $2,4 \times 10^5$ J en la maratón. Energía equivalente a la empleada por una lámpara de 100 W encendida 40 minutos.

⁴⁹ Energía química que se repone con la alimentación

Un corredor profesional de elite, de masa 60 kg, emplea en total para completar una maratón olímpica, aproximadamente $11 \times 10^6 \text{ J}$ (2623 kilocalorías) de energía⁵⁰. Entre un 60% y un 70% de la misma se transfiere al ambiente en forma de calor.

Es fundamental entonces para las carreras largas economizar el gasto energético, pero cierta oscilación es necesaria para la debida adquisición de energía elástica en los tejidos musculares y conectivos que posibilitan el correr.

En la figura 6.31 se observa un exoesqueleto con componentes elásticos, que ayuda a caminar a personas con dificultades en la marcha, ya sean permanentes o que buscan su rehabilitación ([Ver info](#)).



Fig. 6.31 Exoesqueleto elástico para caminar

También es importante considerar la estructura de la superficie de apoyo que condicionará el nivel de energía elástica adquirida por músculos y tendones.

Canchas, Pistas y el Coeficiente de Restitución

Como ya vimos en el Capítulo 5, si se pasa de una superficie dura a una más plástica (arena, césped) aumenta el tiempo de frenado durante el contacto disminuyendo los valores máximos de tensión en músculos y tendones. Sobre una pista muy rígida (cemento), pueden obtenerse mayores energías elásticas pero también el riesgo de lesiones es mayor dada las grandes tensiones musculares presentes durante los apoyos.



Fig. 6.32 Impacto sobre la superficie de distintas canchas de tenis

Los atletas experimentados logran interpretar a partir de su sensación al correr, si “la pista es rápida o lenta”⁵¹. Especialmente los corredores de largas distancias deben tener en cuenta si la superficie posee la

⁵⁰ $1 \text{ J} \sim 0,239 \text{ cal}$

⁵¹ Usain Bolt expresó luego de sus tres récords mundiales en la pista de Beijing 2008: "¡Esta pista es maravillosa, es rápida!"

capacidad de deformación necesaria para prevenir lesiones comunes como pueden ser la periostitis o sobrecargas lumbares. Sin embargo correr sobre una superficie muy deformable como la arena por mucho tiempo, también puede provocar una excesiva fatiga muscular.

Las carpetas que conforman actualmente las pistas de atletismo tienen una base poco flexible, conformada por asfalto u hormigón. Sobre ella una o varias capas sintéticas que ofrecen una buena restitución de energía cinética al cuerpo que hace impacto y tienen además la capacidad de deformación necesaria para no causar de lesiones. Restitución y deformación son condiciones a atender para que una superficie ofrezca buenas prestaciones a quienes hacen uso de ella.



Fig. 6.33 Apoyo y restitución de energía al correr sobre distintas superficies

El Coeficiente de Restitución e (también se simboliza como COR o C_R) se define como el cociente entre los módulos de las velocidades relativas entre los cuerpos antes y después de hacer impacto. Para un choque en una dimensión

$$e = \frac{V_{2f} - V_{1f}}{V_{2i} - V_{1i}} \quad (\text{Ec. 6.17})$$

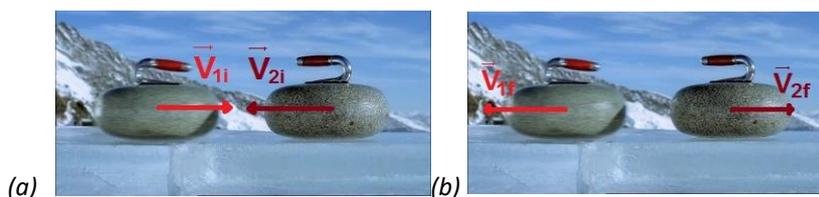


Fig 6.34 Velocidad de piedras de curling respecto al hielo, antes(a) y después (b) de hacer impacto.

Dicho coeficiente puede tomar valores entre 0 (choque totalmente plástico, donde la velocidad final es común) y 1 (choque totalmente elástico, donde se conserva la Energía cinética del sistema). Si uno de los cuerpos prácticamente no se mueve, como puede ser el piso o una pared (por ejemplo de frontón), el coeficiente de restitución será simplemente el cociente entre los módulos de la velocidad de salida y de llegada del cuerpo al hacer impacto

$$e = \frac{V_f}{V_i}$$

El valor de este coeficiente depende de la velocidad del cuerpo al chocar con la superficie. A mayor velocidad de impacto con una superficie dura, existe mayor deformación del objeto y mayor pérdida de energía cinética, aumentando la Energía interna (aumenta la temperatura) de los cuerpos que impactan. Es decir que mayores velocidades al momento de chocar contra la pared o el piso, implican un e menor.

Si el rango de velocidades no es muy amplio, puede realizarse una primera aproximación al valor del coeficiente de restitución, considerándolo característico de los materiales intervinientes e independiente de las velocidades. Cuando se da un único valor del coeficiente e , generalmente es un valor medio para las condiciones normales de competencia (Figura 6.35).

	Pelota de Golf	Pelota de Tenis	Pelota de Beisbol
Cemento	0,91969	0,81138	0,53230
Pasto	0,38730	0,50827	0,42328
Madera	0,32914	0,68007	0,50415

Fig. 6.35 Coeficiente de restitución entre distintas pelotas y superficies

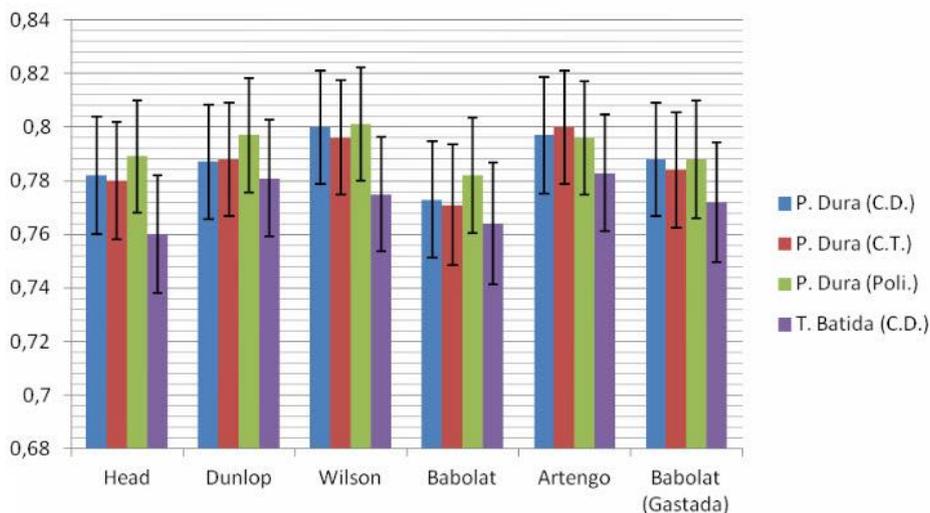


Fig. 6.36 Coeficiente de restitución de pelotas de tenis de distintas marcas en diversas superficies

La pista del Estadio Olímpico de Pekin, el “Nido de pájaros” (Figura 6.37), fue desarrollada por la empresa española Mondo y su diseño (Mondotrack FTX) mejoró el Coeficiente de restitución, pasando de 0,414 a 0,425, contribuyendo así a la mejora de los récords que allí se produjeron. Pudo hacerse este cambio sin aumentar la dureza de la pista, sustituyendo la base de diseño cuadrangular por un diseño hexagonal de la misma (en forma de diamante).



En la página web oficial de Mondo se lee: “De este modo, las paredes celulares flexionan fácilmente en cualquier dirección y no solamente hacia adelante, proporcionando el apoyo y la amortiguación ideal para el entrenamiento, y garantizando conjuntamente un tiempo increíble de reacción para la competición. La mayor seguridad queda garantizada por una mejor absorción de los impactos, mientras que la mayor compresión vertical y la menor presión sobre el pie aseguran un nivel de confort nunca conseguido con anterioridad. Desde el punto de vista del rendimiento deportivo, la mayor área de contacto y el mejor apoyo lateral del pie, garantizan un retorno de energía mucho más elevado”.

Fig. 6.37 Imagen de la superficie de la pista de Atletismo (Mondo)

El rebote de la pelota

Cuando una pelota rebota verticalmente en el suelo, es práctico determinar el coeficiente de restitución midiendo alturas. Para ello se considera la conservación de la Energía Mecánica durante la caída y durante el ascenso, no durante el choque. Es decir que la Energía Potencial gravitatoria inicial ($E_{pgi} = m \cdot g \cdot h_i$) se transformó totalmente en Energía Cinética al llegar la pelota al piso y la Energía Cinética luego del impacto se transformó en Energía Potencial gravitatoria al ascender hasta la nueva altura máxima ($E_{pgf} = m \cdot g \cdot h_f$).

Sustituyendo el valor de las velocidades en la definición del coeficiente de restitución llegamos a una expresión que nos posibilita determinar su valor a partir de las alturas h_i y h_f :

$$e = \left(\frac{h_f}{h_i} \right)^{1/2} \quad (\text{Ec. 6.18})$$

Balón/Pelota	Altura de caída (medida desde la parte inferior) HP	Altura de bote en suelo rígido (HR)
Baloncesto	1,80 m	1,050 ± 0,025m medida desde la parte inferior
Fútbol	2,00 m	1,350 ± 0,05m medida desde la parte inferior
Tenis	2,54 m	1,400 ± 0,025 m medida desde la parte inferior
Hockey	2,00 m	0,575 ± 0,025 m medida desde la parte inferior

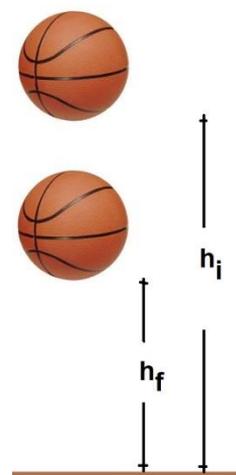


Fig. 6.38 Valores de referencia del informe “UNE-41958-IN” para pavimentos deportivos multiusos en España

Además de tener diferentes pesos y diámetros, las pelotas de béisbol y softbol difieren en sus propiedades elásticas. Mientras que las primeras tienen un coeficiente bastante regular de $e=0,55$ al chocar con una superficie dura, las segundas poseen mayor variedad entre distintas pelotas, yendo desde $e=0,40$ hasta $e=0,47$.



Fig. 6.39 Béisbol



Fig. 6.40 Softbol

Para la Pelota Valenciana no existe una norma que regule el coeficiente de restitución que deben tener las paredes y el piso de los trinquetes en “buen estado” con la pelota, pero algunos estudios realizados en España obtienen valores entre $e=0,59$ y $e=0,63$. Este es el deporte donde Uruguay registra la mayor cantidad de Campeonatos Mundiales obtenidos (aunque sea uno de los que tiene menos prensa). Tuvo su tiempo de gloria con la dupla Bernald-Iroldi (figura 6.41) en la década de 1970 y en el 2015 en Guadalajara lo logró a través de la dupla Pintos-Dufau (figura 6.42) en Pelota de Cuero.



Fig. 6.41 Bernald- Iroldi

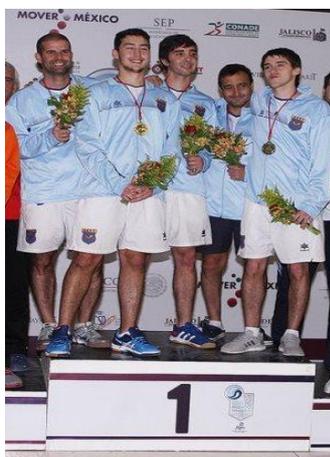


Fig. 6.42 Equipo uruguayo
Campeón Mundial 2015 en pelota de cuero

En el tenis se habla de canchas duras (cemento) con valores de coeficientes de restitución con la pelota próximos a $e=0,80$ y canchas blandas (césped por ejemplo) donde este coeficiente tiene un valor próximo a $e=0,75$.

En cuanto al coeficiente de restitución para la pelota con la raqueta de tenis, depende de los materiales del cordado, del diseño, de la tensión y de la posición donde hace impacto.

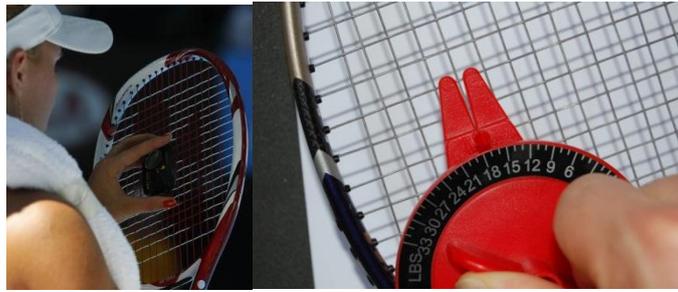


Fig. 6.42 Medidor de Tensión del cordaje

Las cuerdas de una raqueta pueden ser de tripa natural⁵² o sintéticas. Por más que los fabricantes siguen mejorando año tras año las prestaciones de las sintéticas, la tripa natural tiene un coeficiente de restitución muy superior a las fabricadas, por lo que sigue siendo utilizada para las raquetas de los tenistas profesionales.



*Fig. 6.43 Interacción raqueta
pelota de tenis*

A medida que se aumenta la tensión mejora “el control” que se tiene sobre los golpes, pero disminuye la elasticidad del cordado (siempre y cuando no esté sumamente laxo) bajando su coeficiente de restitución. Respecto al marco, dicho coeficiente disminuye al aumentar la elasticidad de la raqueta, por lo que los jugadores profesionales buscan marcos livianos pero rígidos (actualmente de grafito). Durante el golpe a la pelota, al flexionarse la raqueta, su extremo libre es el punto del marco que más se separa de su posición equilibrio. Esto implica que los puntos del cordado próximos a este extremo tendrán menor restitución respecto a los que se ubican próximos al corazón de la raqueta.

⁵² En un principio fueron tripas de oveja pero por no resistir altas tensiones se pasó a la serosa del intestino de la vaca. Se necesita aproximadamente la serosa de tres vacas para hacer un cordado.



Fig. 6.44 Pablo Cuevas (tenista uruguayo)

En la figura 6.45 también se aprecia que, por esta misma razón, el porcentaje de restitución de la velocidad ($\frac{v_f}{v_i} \cdot 100$) es mayor en la zona central del cordado que en las zonas laterales.



Fig. 6.45 Porcentaje de restitución de la velocidad en diversos puntos de la raqueta
(Recuperado en: http://femede.es/documentos/Original_potencia_111_106.pdf)

(Puede verse [aquí](#) las características de distintas raquetas.)

La Potencia de “la pulga” y CR7



Fig. 6.46 Lionel Messi

Tanto para los espectadores de un partido de fútbol, como para los investigadores biomecánicos, es impresionante apreciar la Potencia de “la pulga” Messi cuando comienza a correr. Al tener una masa de 67 kg y pasar desde el reposo hasta los 5,5 m/s (20 km/h) en 5,0 m, su variación de Energía cinética es aproximadamente 1000 J. Teniendo en cuenta que para dicho movimiento tarda 0,9 s, su Potencia media es aproximadamente 1100 w.

Cristiano Ronaldo no tiene tan sorprendente potencia en su arrancada ya que tarda 1,0 s en llegar a una velocidad de 5,0 m/s (18 Km/h) en 5,0 m de distancia. Si bien su masa (80 kg) es mayor que la de Messi, no logra cubrir la diferencia que establecen sus velocidades finales, siendo su Potencia media de 1000 W.



Fig 6.47 Cristiano Ronaldo

Sin embargo para una distancia de 15 m la Potencia media de Ronaldo es mayor a la de Messi. Mientras que el portugués tarda 1,8 s en correr esa distancia llegando a una velocidad de 8,3 m/s (30 km/h), el argentino lo hace en 1,93 s con una velocidad final de 7,8 m/s (28 km/h). Realizando cálculos en esa distancia, obtenemos una Potencia media de 1530 W para Ronaldo y 1060 W para Messi.

Si determinamos la Potencia por unidad de masa para ambos jugadores en 15 m, sigue existiendo una diferencia entre ambos jugadores pero no tan significativa. Mientras que para Ronaldo es de 19 W/kg, para Messi es 16 W/kg.

En el cuadro de la figura 6.48 se registra, para atletas de distintos deportes, su Potencia y su Potencia por unidad de masa en el sprint de 10 m, partiendo del reposo, realizando su mayor esfuerzo para alcanzar la máxima velocidad.

	Deporte	Masa corporal (Kg)	Velocidad final (m/s)	Tiempo (s)	Potencia (W)	Potencia por unidad de masa (W/Kg)
Lionel Messi	Fútbol	67	5,0	2,0	335	5,0
Cristiano Ronaldo	Fútbol	80	5,5	1,8	417	5,2
Joe Rokocoko	Rugby	98	6,3	1,8	613	6,2
Fabián Washington	Fútbol Americano	82	6,3	1,6	513	6,2
Shahid Afridi	Criquet	72	5,6	1,8	402	5,6

Fig. 6.48 Potencia por unidad de masa corporal para distintos jugadores.
(Modificado de <http://radunga-dejandohuella.blogspot.com>)



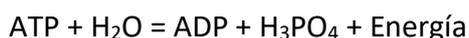
Fig. 6.49 a) Joe Rokocoko

b) Fabián Washington

c) Shahid Afridi

ATP, Potencia y VO₂

La energía utilizada por el deportista para sus movimientos proviene de los alimentos que aportan proteínas, carbohidratos, o grasas. Las diferentes vías metabólicas del organismo los transformarán en Trifosfato de Adenosina (ATP). A partir de la hidrólisis del ATP se forma ADP y Ácido fosfórico, liberando una importante cantidad de energía (aprox. 7 kcal/mol):



El ATP es el único Fosfato de “alta energía” que se forma primariamente de la ganancia energética de la célula a través de los procesos oxidativos (aeróbicos) o de la glucólisis (aeróbica o anaeróbica). Debe ser sintetizado continuamente porque el depósito de esta sustancia en el músculo es mínimo.

Al comenzar a aumentar la Potencia del ejercicio, el deportista aumenta también el volumen de Oxígeno VO_2 utilizado que le permite la síntesis y la obtención de energía. Hasta cierto valor de potencia la relación es aproximadamente lineal.

En la figura 6.50 vemos cómo se da este crecimiento para distintos ciclistas en función de su masa corporal.

El valor de VO_2 se expresa comúnmente en unidades de litros de O_2 por minuto (l/min) o mililitros por minutos (ml/min) y en ocasiones se valora por unidad de masa del deportista (ml/kg.min).

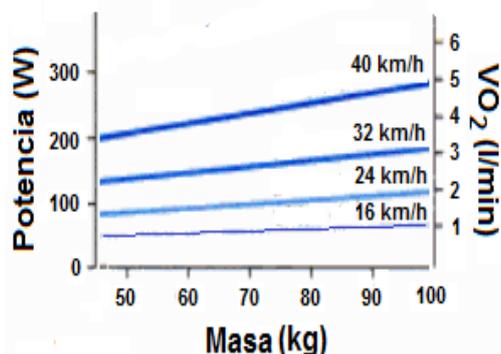


Fig. 6.50 Potencia, VO_2 y velocidad en función de la masa corporal (Modificado de Kyle, 1996)

Puede observarse experimentalmente que el crecimiento en el consumo de O_2 se da hasta cierto valor denominado $VO_{2máx}$, a partir del cual se estabiliza observándose en el gráfico en forma de meseta (figura 6.51).

En el deporte se denomina “Potencia Aeróbica” o $VO_{2máx}$, a la capacidad de consumo máximo de oxígeno por parte del deportista.

Aquellos sujetos que poseen un $VO_{2máx}$ más elevado tienen en principio la capacidad de realizar un mayor despliegue de energía por tiempos prolongados (cada litro de O_2 utilizado supone aproximadamente 20 kJ de energía liberada). A través de este indicador puede establecerse la diferencia entre atletas de nivel heterogéneo. En cambio, entre aquellos deportistas que tienen un $VO_{2máx}$ similar, las diferencias en el rendimiento no están dadas por esta variable sino por otros factores como la capacidad de mantener un alto porcentaje de $VO_{2máx}$ durante un tiempo prolongado.

El $VO_{2máx}$ de los deportistas y su capacidad de crecimiento, tiene un gran componente genético. Cuando la persona pasa de no estar entrenado a sí estarlo, puede acrecentar su $VO_{2máx}$ como indica el gráfico de la figura 6.53, pero esto es válido solo hasta cierto punto.

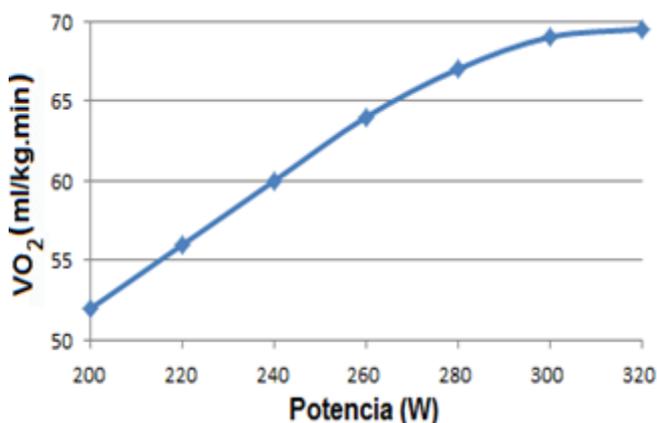


Fig. 6.51 Curva de VO_2 en función de la Potencia de un ciclista hasta llegar al $VO_{2máx}$

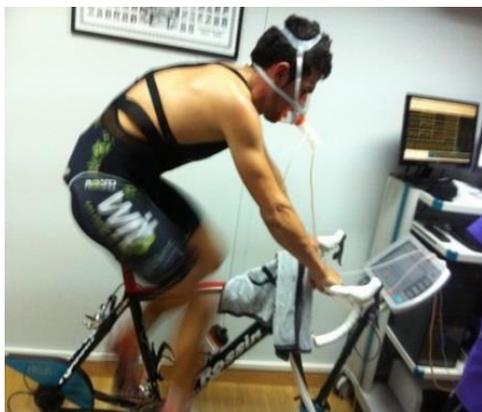


Fig. 6.52 Ciclista midiendo su VO_2

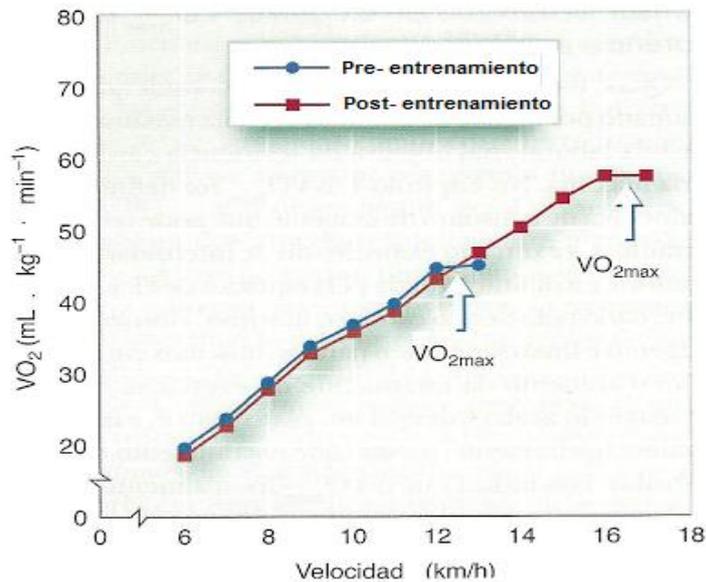


Fig. 6.53 VO₂ de un ciclista en función de su velocidad (pre y post entrenamiento)

Para atletas de alto nivel de entrenamiento, aumentar la intensidad del mismo no implica modificaciones apreciables en su VO_{2máx}. En este caso son otros los factores primordiales que influyen en la economía energética del movimiento del deportista, algunos dependientes de su estructura⁵³, otros de la técnica empleada.

En el cuadro de la figura 6.54 se registran valores de VO_{2máx} para deportistas de elite en distintas disciplinas.

Deporte	VO ₂ máx (ml/Kg.min)
Carrera de larga distancia	75-80
Esquí de fondo	75-80
Ciclismo de carretera	70-75
Carrera de media distancia	70-75
Patinaje	65-72
Natación	60-70
Remo	65-69
Carreras en pista	65-70
Piragüismo	60-68

Fig. 6.54 VO_{2máx} para atletas de elite de diversos deportes

(Modificado de De Neumann, 1988)

⁵³ Algunos estudios indican que, entre corredores de fondo de iguales características, aquellos que poseen pies de mayor tamaño consumen una Potencia mayor (Frederick, 1987).

Golpes potentes

En la figura 6.55 se observa la famosa foto que registra a [Rocky Marciano](#) dando el golpe de “knock out” sobre Joe Walcott, que lo llevó a obtener el Campeonato Mundial de los Pesos Pesados en 1952.

Desde la física podríamos describir el golpe haciendo mención a la energía cinética de Rocky y al trabajo realizado sobre la mandíbula de Walcott para llevarlo a la lona.

Es sabida la importancia de la masa del boxeador al momento de aplicar un golpe y por tal razón se separan las categorías de acuerdo al Peso de los deportistas. La energía cinética de traslación tiene una relación de proporcionalidad directa con la masa que se desplaza. Por esa razón, todo buen entrenador aconseja acompañar el movimiento del brazo-puño con el movimiento del cuerpo en su conjunto. De esta manera puede sumarse así, con el giro de caderas y hombros, hasta un 20% más de energía.

Tampoco es novedad que las consecuencias del impacto dependerán de la velocidad del puño y aquí la relación de la energía cinética de traslación es de proporcionalidad directa con el cuadrado de la velocidad. Es decir que lanzando igual el puñetazo, pero al doble de velocidad, la energía cinética con la que se llega al impacto se habrá cuadruplicado.

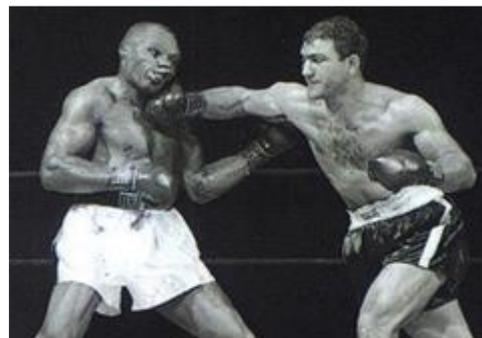


Fig. 6.55 Rocky Marciano



Fig. 6.56 Transferencia de energía mediante golpes de puño de boxeo y Artes Marciales Mixtas

Si consideramos la masa involucrada en el golpe (llamada también masa efectiva) como de $m = 2,0$ kg con una velocidad final de 12 m/s, su energía cinética es de 144 J. Mike Tyson lograba velocidades de impacto de $19,4$ m/s (70 km/h) alcanzando energías próximas a los 400 J.

Los nativos de la isla de Okinawa, tras la conquista por Japón en 1879 y frente a la prohibición de la tenencia de armas, desarrollaron el uso de su cuerpo para el combate, creando las artes marciales. En el estudio de la “Física del Karate” realizado por M. Feld, R. McNair y S. Wilk, registraron puñetazos de karate con velocidades que oscilan entre $5,7$ m/s y $9,8$ m/s, y patadas de $7,3$ m/s a $14,4$ m/s. Teniendo presente que en estas últimas no solo se involucra el pie sino el movimiento de toda la pierna, su energía cinética es mucho mayor a la alcanzada por el movimiento del puño. La energía cinética de los “martillazos” de puño tuvo valores entre 40 J y 100 J, que en general fueron suficientes para partir las tablas y bloques de hormigón utilizados.⁵⁴

⁵⁴ Necesitaron $12,3$ J para romper la madera y $37,1$ J para romper el hormigón utilizado.

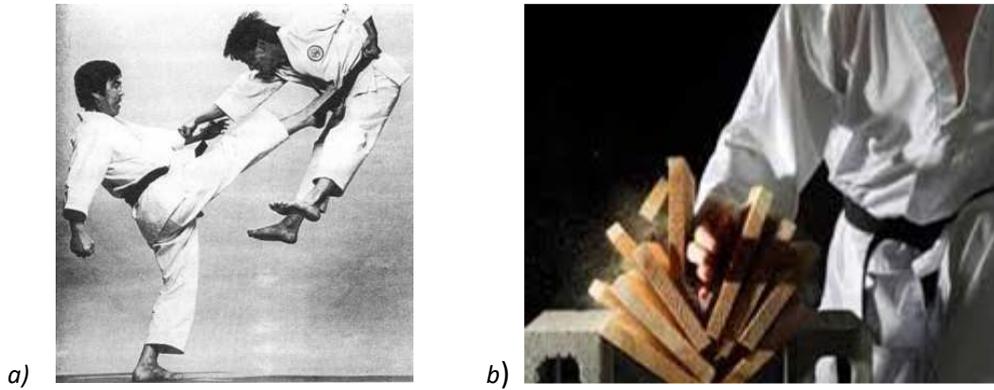


Fig. 6.57 Golpes de karate: a) Patada Mae Geri b) Golpe "de corte" con la mano

55

Resumiendo

Cuando se realiza un trabajo neto sobre un sistema (deportista o implemento) existe una transferencia de energía hacia o desde este hacia el ambiente.

Reconocemos variadas formas de energía que pueden considerarse en la actividad deportiva (cinéticas, potenciales, químicas, etc.) que pueden transformarse o transferirse durante la ejecución del deporte.

En todos los deportes se utiliza la Energía Interna que poseen los músculos y en muchos de ellos es conveniente poder hacerlo rápidamente, con gran Potencia. Las fibras musculares se disponen y trabajan de acuerdo a la optimización habitual de fuerza o velocidad de la articulación.

El coeficiente de restitución es una magnitud relevante en todos los deportes donde se experimentan impactos, ya sea para la eficacia deportiva o la salud de los atletas. También lo es el Volumen de Oxígeno utilizado (VO_2) y su capacidad máxima ($VO_{2m\acute{a}x}$), especialmente en los deportes aeróbicos.

Por último, los cálculos energéticos confirman lo ya sabido: no es aconsejable provocar y recibir el puñetazo de un boxeador o la patada de un karateca.

⁵⁵ La patada Mae Geri de karate también es llamada Ap Chagui en Taekwondo o Front Kick en Full Contact.

Enlaces para ampliar la información

- [Informe](#) donde se determina el coeficiente de restitución de una pelota de tenis de mesa (ping pong).
- Enlace a la [página](#) oficial de la empresa Mondo, constructora de las pistas de atletismo para la IAAF.
- En este [artículo](#) se analiza la pista de atletismo del Estadio Olímpico de Londres 2012.
- Aquí un [resumen](#) de las vías energéticas para la obtención del ATP.
- [Aquí](#) se presenta la herramienta de análisis de raquetas de Tenis Warehouse.
- En esta web se presenta un [análisis](#) muy completo de las distintas superficies de las canchas de tenis.
- En su artículo [“Flexible beam analysis of the effects of string tension and frame stiffness on racket performance”](#), R. Cross (Departamento de Física en Sidney, Australia) presenta un análisis energético de la interacción raqueta - pelota de tenis.
- [Aquí](#) un informe del “Test de Potencia de extremidades inferiores de corta duración: Pedaleo vs Salto”, realizado en la Facultad de Ciencias del Deporte de Toledo, Universidad de Castilla-La Mancha.

Preguntas y Problemas

- 1) Un deportista levanta pesas de masa $m= 40 \text{ kg}$ como se observa en la figura 6.59. Determine el Trabajo mecánico realizado por cada una de las fuerzas actuantes sobre las pesas, si el deportista:
- las eleva 2,0 m hasta detenerlas sobre su cabeza.
 - las sostiene inmóvil con los brazos extendidos durante 2,0s.



Fig. 6.59 Levantando pesas



Fig. 6.58 Salto con garrocha

- 3) Un joven que se encuentra con las rodillas flexionadas, salta en la vertical como indica la figura 6.59, masa (que se indica con un punto rojo). Sabiendo que su altura es $h= 1,66 \text{ m}$
- Determine el Trabajo mecánico exteriores sobre el joven hasta
 - Explique las transferencias y durante el salto.



Fig. 6.59

rodillas flexionadas, salta en la logrando ascender su centro de rojo). y su masa $m= 58 \text{ kg}$: de cada una de las fuerzas llegar a la altura máxima. transformaciones de energía



Fig 6.60 Bungee Jumping

- 4) Un estudiante anima a su profesor de masa $m= 80 \text{ kg}$ a realizar un salto de Bungee Jumping (en este caso, a dejarse caer desde un puente de 13,2 m de altura atado a una cuerda elástica de longitud natural 3,2 m y constante elástica $k_e=400 \text{ N/m}$ (Figura 6.60). Determine:
- La velocidad máxima que alcanza el profesor en su caída.
 - La constante elástica mínima $k_{e_{\min}}$ que debería tener la cuerda para que no llegue a golpear contra el piso.
(Considere despreciable la interacción con el aire y una cuerda de constante elástica única)
- 5) La potencia entregada por un ciclista para circular a 20 km/h es de 100W.
- ¿Cuál es el valor medio de la fuerza que se opone a su marcha?
 - Si tomando una posición más aerodinámica logra reducir a la mitad la fuerza de oposición, manteniendo la potencia del pedaleo, ¿cuál será su nueva velocidad?

Actividades

- 1) a) Determinar el coeficiente de restitución de varias pelotas al caer sobre diferentes superficies desde cierta altura
b) Determinar si dicho coeficiente depende o no de la altura inicial de la caída.

Puede realizarse esta actividad:

- * Filmando la caída y el ascenso (midiendo velocidades o alturas).
- * Con un micrófono y un editor de audio como el [Audacity](#). [Aquí](#) una guía para ello.

- 2) Filmar la caída de un muñeco (que hace de clavadista) y determinar si se conserva o no su Energía Mecánica a partir de un programa de análisis de video.

Puede plantearse el mismo objetivo y método colocándole un paracaídas.

- 3) Soltar un autito de juguete desde cierta altura sobre la pista, en una rampa que termine en un tramo horizontal por encima del nivel del piso (Figura 6.61). Realizando las consideraciones necesarias calcule:

- a) ¿Dónde caerá el autito?
- b) ¿Con qué módulo de velocidad hará impacto en el piso?
- c) Realizar el experimento, filmar y analizar si los resultados coinciden o no con los esperados.
- d) En caso que no coincidan los resultados experimentales con los teóricos, explicar por qué pudo suceder esto.



Fig. 6.61

- 4) a) Determinar la variación de Energía Potencial máxima del centro de masa alcanzada en distintos saltos verticales:
 - * Comenzando con las rodillas flexionadas al máximo sin contramovimiento.
 - * Comenzando en posición erguida, realizando una flexión máxima con contramovimiento antes del salto.
 - * Realizando el salto luego de una carrera.
 - b) Comparar los resultados obtenidos.
 - c) Realizar un análisis energético de los distintos saltos.
- 5) Descender por un plano inclinado con un skate o con patines y realizar su filmación lateral. Determinar si se conserva o no su Energía Mecánica utilizando algún programa de análisis de video. Explicar los resultados obtenidos.

Capítulo 7 Una historia de giros y palancas

En este capítulo comenzaremos considerando el concepto de torque (o momento de fuerza) y su importancia para la rotación en la actividad deportiva.

Posteriormente definiremos las condiciones dinámicas del equilibrio de rotación, el centro de gravedad y los distintos tipos de palancas en el cuerpo humano.

Por último trataremos el momento de Inercia y la cantidad de movimiento angular analizando algunas situaciones deportivas donde esta última magnitud se conserva y otras donde no.

Torque o Momento de Fuerza

Para llegar a definir el concepto de torque y su relevancia para la rotación tomaremos como ejemplo la contracción del músculo bíceps braquial y el giro de la articulación del codo.

Este músculo puede ejercer una fuerza \vec{F} ⁵⁶ sobre el antebrazo, estando su punto de aplicación en cierta posición \vec{r} ⁵⁷ del origen del sistema de referencia elegido, que en este caso ubicaremos en el codo con el eje perpendicular al plano que contiene el brazo y el antebrazo⁵⁸ (ver fig. 7.1)

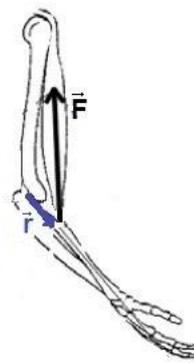


Fig 7.1 a) Contracción del bíceps braquial b) Fuerza sobre el antebrazo y posición de aplicación

Es útil considerar la fuerza muscular en sus componentes radial y tangencial. La radial \vec{F}_{\parallel} se dispone en igual dirección que el segmento óseo, es llamada estabilizante y no afecta directamente al giro de la articulación. La componente tangencial \vec{F}_{\perp} es perpendicular al radio de giro y es quien realiza torque ya que puede provocar una modificación en el movimiento de rotación de la articulación. Fig. 7.2

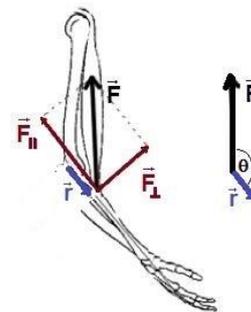


Fig 7.2 Componentes de dirección paralela \vec{F}_{\parallel} y perpendicular \vec{F}_{\perp} de la Fuerza del bíceps en relación al vector posición.

Formalmente se define el torque (momento) de la Fuerza \vec{F} como el producto vectorial entre \vec{r} y \vec{F} .

$$\vec{\tau} = \vec{r} \times \vec{F} \quad (\text{Ec.7.1})$$

Es una magnitud vectorial cuya unidad en el Sistema Internacional es el N.m, y su módulo está dado por el producto entre los módulos de \vec{r} y \vec{F}_{\perp}

$$\tau = r \cdot F_{\perp}$$

Por trigonometría llegamos a que

$$\tau = r \cdot F \cdot \text{sen}\theta \quad (\text{Ec.7.2}) \quad \text{Siendo } \theta \text{ el menor ángulo entre } \vec{r} \text{ y } \vec{F}$$

⁵⁶ La fuerza por unidad de sección para este músculo toma valores entre 30 N/cm² y 40 N/cm² (Cromer, 1992).

⁵⁷ Siendo r la distancia mínima entre el punto de aplicación de la fuerza y el eje de rotación.

⁵⁸ El bíceps braquial se inserta mediante un tendón en la tuberosidad radial, a una distancia r entre 3,0 cm y 5,0 cm del codo

También podríamos plantear esta igualdad cambiando el orden de los factores como $\tau = r \cdot \text{sen}\theta \cdot F$

Siendo $r \cdot \text{sen}\theta$ el módulo de la componente de \vec{r} perpendicular a \vec{F} .

La simbolizaremos \vec{r}_{\perp} y se le denomina "brazo" del torque o "brazo de palanca" Fig 7.3

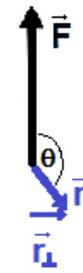


Fig 7.3 \vec{r}_{\perp} "brazo de palanca" de \vec{F}

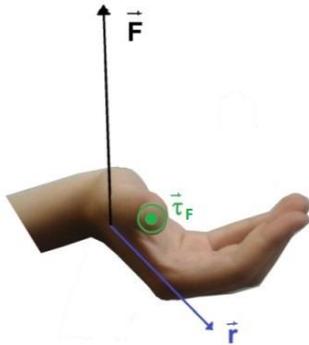


Fig. 7.4 Regla de la mano derecha para determinar el sentido del torque $\vec{\tau}_{\vec{F}}$

La dirección del torque es perpendicular al plano que contiene a \vec{r} y a \vec{F} , pudiendo determinarse su sentido por la regla de la mano derecha. Para ello se giran los dedos curvos desde \vec{r} hacia \vec{F} siguiendo el menor ángulo (θ) como indica la figura 7.4 El pulgar nos indicará el sentido del torque $\vec{\tau}_{\vec{F}}$.

En la práctica, al rotar el antebrazo en torno al codo, cambia el ángulo de inserción θ y varían las componentes \vec{F}_{\perp} y \vec{F}_{\parallel} en las distintas posiciones, haciéndose complejo el análisis dinámico. Ver figura 7.5

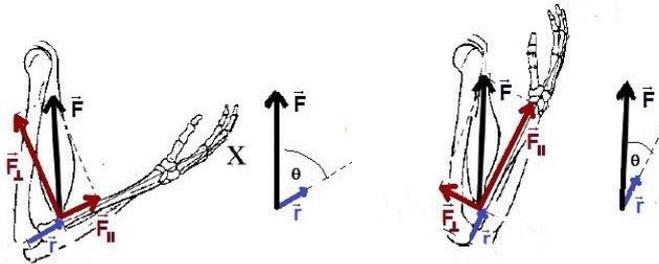


Fig. 7.5 Variación del ángulo entre \vec{r} y \vec{F} al girar la articulación

Torque Neto y equilibrio rotacional

Si se sostiene con la mano una mancuerna como indica la figura 7.6, podemos considerar las fuerzas y los torques aplicados sobre el sistema antebrazo-mano por el bíceps, por la mancuerna y por su propio Peso.

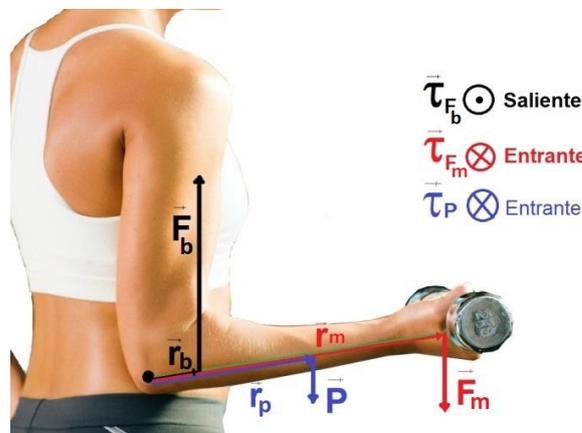


Fig. 7.6 Representación de fuerzas y torques aplicados sobre el sistema antebrazo-mano

Podríamos hacer más completo el modelo para el análisis de los torques actuantes considerando también la acción del músculo antagonista. Al contraerse el bíceps (agonista), otro músculo dispuesto tras el húmero llamado tríceps braquial (antagonista) se distiende (figura 7.7 a).

Para el movimiento excéntrico, al alinear nuevamente el brazo con el antebrazo, se contrae el tríceps, distendiéndose el bíceps (figura 7.7 b).

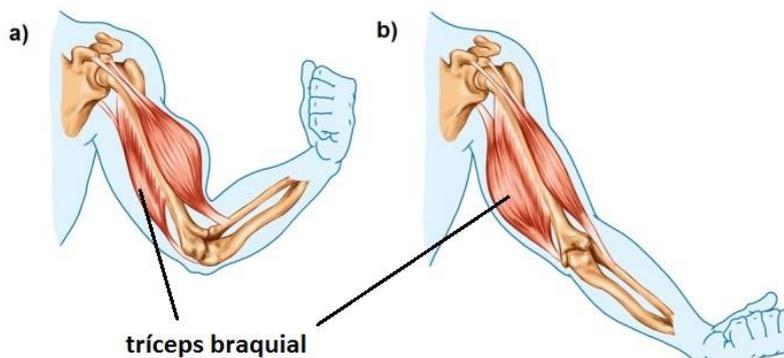


Fig. 7.7 a) Contracción del bíceps y distensión del tríceps b) Contracción del tríceps y distensión del bíceps

Cuando el torque neto, es decir la suma (vectorial) de todos los torques es nulo, el sistema estará en equilibrio rotacional. Si la articulación estaba en reposo mantendrá dicha posición estática. Si estaba ya girando, conservará su cantidad de movimiento angular.⁵⁹

Diseñados para ser veloces

Si la fuerza aplicada por el músculo (representada en la figura 7.8 a) se aplicara con el mismo ángulo, pero a una distancia mayor respecto al eje de rotación (representada en la figura 7.8 b), aumentaría su torque y por lo tanto la capacidad de sostener cargas mayores.

Sin embargo, dicha modificación implicaría que cada punto de la articulación (a igual contracción) recorrería una distancia d menor. Las velocidades tangenciales del movimiento serían de menor valor.

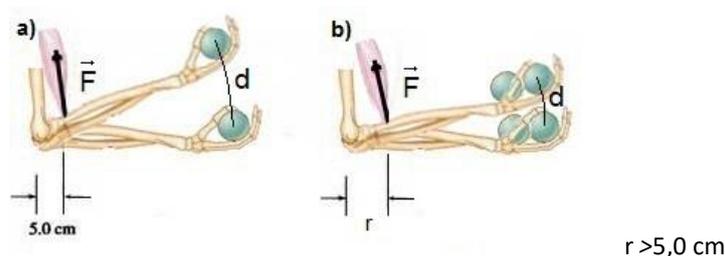


Fig. 7.8 Variación de la distancia (d) recorrida por la mano al cambiar el punto de inserción a igual contracción

Músculos como el representado en la figura 7.8 a son especializados “en velocidad”. La mayor parte de los músculos esqueléticos del ser humano tienen esta característica.

Cuando los músculos se insertan a gran distancia de la articulación, se identifican como especializados “en fuerza” por su capacidad para sostener grandes cargas.

⁵⁹ Más adelante definiremos formalmente la cantidad de movimiento angular y veremos ejemplos de su conservación

Existe por lo tanto una relación de compromiso entre el radio vector y la velocidad del extremo de la articulación. Aumentar el valor de una de estas variables significa disminuir el valor de la otra.

Ventaja mecánica y palancas en el cuerpo humano

En biomecánica se consideran los segmentos óseos como receptores de palancas. Los ejes de rotación se denominan “Fulcros” (generalmente se toma como fulcro una articulación), las fuerzas Peso de los segmentos se consideran “Resistencias” y la fuerza aplicada por el músculo mediante el tendón se denomina “Potencia”⁶⁰.

Las Palancas en el cuerpo humano se clasifican por su género.

En las de primer género el fulcro se encuentra entre la resistencia y la potencia. Tal es el caso de la articulación occipitoatloidea fig 7.9 a).

Las de segundo género son aquellas donde es la resistencia la que se dispone entre el fulcro y la potencia como en la articulación tibiotarsiana fig 7.9 b).

Por último tenemos las palancas de tercer género, también llamadas de velocidad. La potencia se dispone entre el fulcro y la resistencia. Son las más comunes en el cuerpo humano. Como ejemplo tenemos la ya analizada articulación del codo fig. 7.9 c)

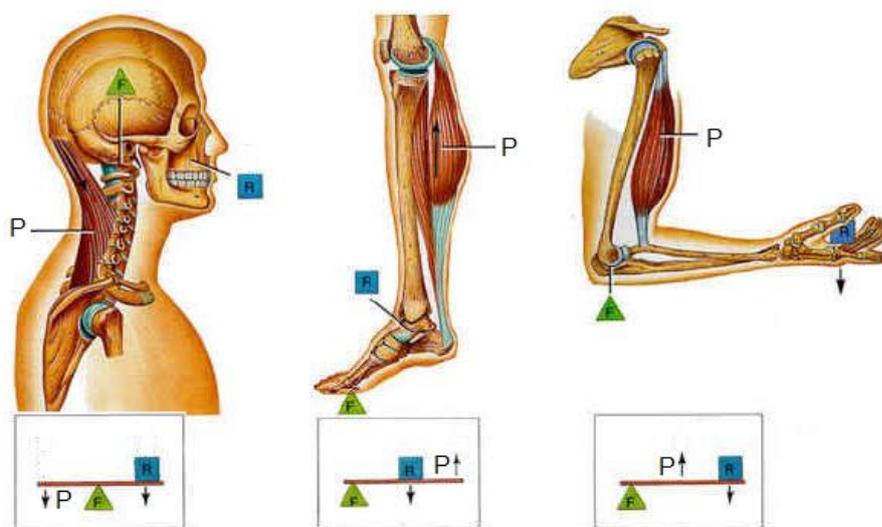


Fig. 7.9 Palancas en el cuerpo humano

a)

b)

c)

Se define como ventaja mecánica de una palanca al cociente entre las componentes perpendiculares al vector posición de la Potencia y la Resistencia

$$\frac{P}{R} = \frac{r_R}{r_P} \quad (\text{Ec.7.3})$$

Una ventaja mecánica “chica” prioriza la velocidad, mientras que una ventaja mecánica “grande” prioriza la fuerza. Por ejemplo, la pata delantera de un caballo de carreras tiene una ventaja mecánica máxima de 0,08. El armadillo que es un animal zapador, tiene una pata delantera cuya ventaja mecánica máxima es aproximadamente 0,25.

Las articulaciones reales siempre tienen fuerzas de rozamiento que reducen la ventaja mecánica real por debajo de su valor ideal.

⁶⁰ En ciencia las palabras “Resistencia” y “Potencia” tienen otro significado, pero se han hecho habituales estos términos en textos sobre palancas biomecánicas.

Centro de gravedad y condición para el equilibrio

Si cada elemento del cuerpo tiene una posición diferente respecto del eje de rotación elegido, ¿qué punto de aplicación se considera para determinar el torque del peso del cuerpo?

Se define una posición llamada centro de gravedad, de tal forma que el torque neto realizado por el Peso de todas las componentes de un sistema, es igual al que realizaría su Peso total aplicado en dicha posición.

Si se toma como eje cualquier línea que pase por el centro de gravedad, el torque neto producido por el Peso de todas las partes del objeto considerado es nulo.

El centro de gravedad es una posición que no necesariamente se encuentra dentro del propio cuerpo.

Si un cuerpo es rígido, la posición de su centro de gravedad estará siempre en la misma posición respecto a él. De no serlo, como acontece con el cuerpo humano, la ubicación del centro de gravedad cambiará con la postura. El centro de gravedad del cuerpo humano en la posición "fundamental" (Fig 7.10 a), está situado a la altura de la cadera (unos pocos centímetros por debajo de la altura del ombligo), por delante del sacro. En general se encuentra algo más bajo en las mujeres que en los varones por su constitución corporal de caderas anchas y espaldas más angostas.

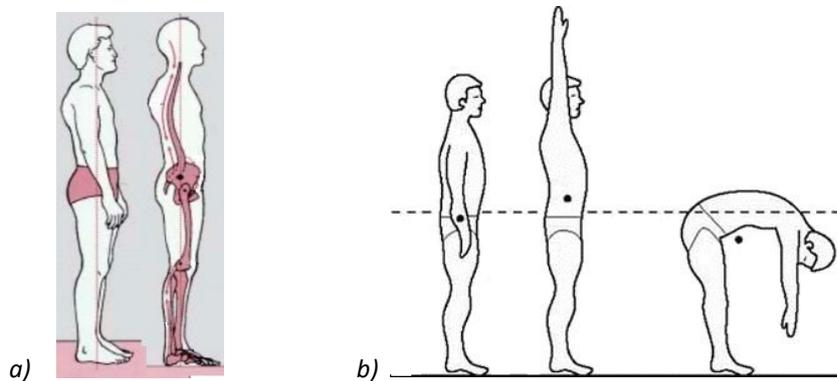


Fig. 7.10 Ubicación del centro de gravedad para distintas posturas

Ya que las dimensiones del cuerpo humano son despreciables respecto al radio terrestre, es posible considerar al campo gravitatorio uniforme y la posición del centro de gravedad coincidirá con la del centro de masa⁶¹.

Formalmente el Centro de masa para un conjunto de masas puntuales se define como:

$$\vec{r}_{cm} = \frac{1}{M} (m_1 \cdot \vec{r}_1 + m_2 \cdot \vec{r}_2 + \dots) \quad (\text{Ec. 7.4})$$

Donde M es la masa total de todas las partículas, m la masa de cada partícula y \vec{r} su posición.

Solo si la densidad del cuerpo es uniforme, la posición del centro de masa coincidirá con el centro geométrico del mismo. En el cuerpo humano no se da esta coincidencia ya que este se conforma por diversos tejidos y espacios con diversas densidades ρ .

Tejidos	Densidad (Kg/L)
Hueso	1.15 – 1.35
Músculo	1.04 – 1.06
Grasa	0.95 – 0.99

Fig. 7.11 Tejidos y su densidad de masa

⁶¹ Es el valor medio de la posición de todas las partes del sistema ponderadas de acuerdo a sus masas.

En el caso de un sistema continuo de materia como lo es el cuerpo humano, con masa M , si se realiza una partición en elementos de volumen dV , la posición del centro de masa se determina como

$$\vec{r}_{cm} = \frac{1}{M} (\vec{r}_1 \cdot \rho_1 \cdot dV_1 + \vec{r}_2 \cdot \rho_2 \cdot dV_2 + \dots) \quad (\text{Ec.7.5})$$

Donde ρ es la densidad de un elemento de volumen en la posición \vec{r} y dV un elemento de volumen

Existen programas informáticos que luego de indicado el sexo y marcadas algunas zonas del cuerpo de una persona, permiten determinar aproximadamente la posición del centro de masa en cierta postura. Para ello consideran la masa de cada segmento corporal en relación a la masa total del cuerpo y realizan cálculos de acuerdo a un modelo estadístico. El modelo más usado es el de los investigadores Dempster y Clause que obtuvieron sus datos a partir del desmembramiento de cadáveres.

En la tabla de la figura 7.12, la “MASA” es el valor del porcentaje de la masa del segmento corporal respecto a la masa total del cuerpo. “CG” es el valor porcentual de la distancia del centro de gravedad del segmento medido desde el punto proximal respecto a la longitud total del segmento correspondiente.

SEGMENTO	MASA	CG	Punto proximal	Punto distal
Cabeza y cuello	7.3%	46.40%	vertex	gonion medio
Tronco	50.7%	38.03%	huevo supraesternal	cadera media
Brazo	2.6%	51.30%	acromion	radiale
Antebrazo	1.6%	38.96%	radiale	art.muñeca
Mano	0.7%	82.00%	art.muñeca	estiloides 3ºdedo
Muslo	10.3%	37.19%	art.cadera	tibiale
Pantorrilla	4.3%	37.05%	tibiale	art.tobillo
Pie	1.5%	44.90%	talón	dedo 1º

Fig. 7.12 Datos de centro de gravedad para el cuerpo humano (Dempster y Clause)

Para que el cuerpo pueda encontrarse en equilibrio la proyección vertical del centro de gravedad debe caer dentro de la zona de apoyo o base de sustentación.

Normalmente esto ocurre mientras estamos parados con apoyo bipodal como indica la figura 7.13 .



Fig. 7.13 Proyección del centro de gravedad

Cuando una mujer se encuentra embarazada, el nuevo ser humano adelanta el centro de masa de ambos, por lo que la columna debe tomar otra curvatura y así se mantiene el centro de gravedad sobre la base de sustentación. Ver fig. 7.14

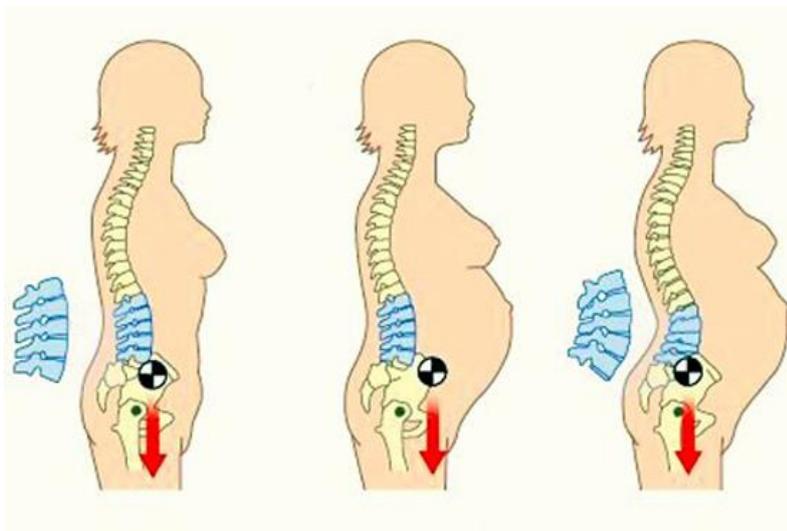


Fig. 7.14 Centro de gravedad en el embarazo

Mantenerse en equilibrio sobre una cuerda delgada siempre es más difícil que hacerlo sobre el piso ya que se reduce la base de sustentación fig. 7.15. Al contrario, colocar la rueda delantera de la bicicleta cruzada con la trasera nos permite ampliar la base de sustentación lo que nos posibilita con mayor facilidad mantener el equilibrio. Fig. 7.16



Fig 7.15 Parado sobre la cuerda



Fig. 7,16 Equilibrio sobre la bicicleta

En la figura 7.17 se indica el centro de gravedad de cada equilibrista así como el de ambos y se aprecia como la proyección vertical del común se ubica sobre las manos que se apoyan.



Fig 7.17 Centro de gravedad tomando como sistema cada equilibrista y su conjunto

Centro de gravedad y natación

La posición del centro de gravedad CG no coincide generalmente con la del centro volumétrico CV (llamado también de flotación CF), posición que puede ser considerada como punto de aplicación del Empuje⁶² cuando el cuerpo está sumergido en un fluido.

Si el cuerpo se encuentra extendido con los brazos próximos a él como muestra la figura 7.18 a) , el CF se encuentra entre 2,0 cm y 6,0 cm por encima del CG.

Al querer flotar con el cuerpo horizontal, el Peso y el Empuje provocan un torque resultante no nulo, un desequilibrio rotacional, que provoca el giro y el descenso de las piernas en el agua.

Si queremos “hacer la plancha” y mantenernos en equilibrio, debemos extender los brazos hacia atrás y llenar nuestros pulmones de aire hasta que queden alineados el centro de gravedad y el centro de flotación en el eje vertical como muestra la figura 7.18 b).

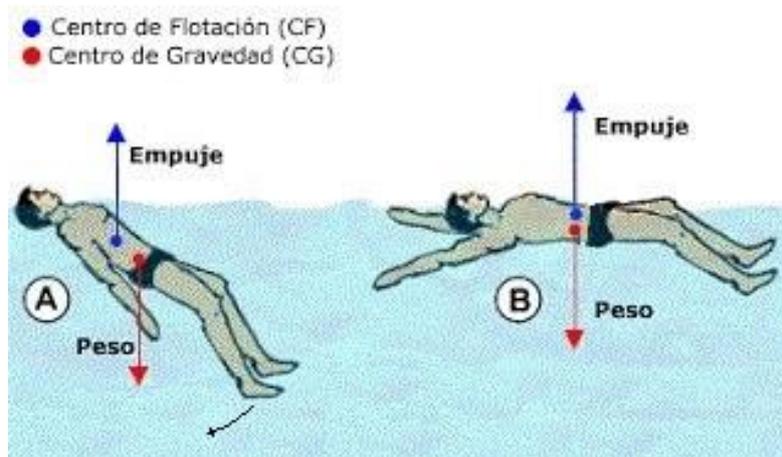


Fig. 7.18 a) Desequilibrio de rotación por torque neto no nulo en el agua b) Equilibrio rotacional por torque neto nulo

Conservación de la cantidad de movimiento angular

La cantidad de movimiento angular (o momento angular) \vec{L} es un vector que puede definirse como el producto del momento de Inercia del cuerpo I por la velocidad angular de giro $\vec{\omega}$.⁶³

$$\vec{L} = I \cdot \vec{\omega} \quad (\text{Ec.7.6})$$

El momento de inercia de un cuerpo puntual es directamente proporcional a su masa y al cuadrado del módulo de la posición respecto al eje de giro.

$$I = m \cdot r^2 \quad (\text{Ec.7.7})$$

Si el cuerpo es extenso podemos considerar su inercia como la suma de la inercia de muchos cuerpos puntuales ubicados en distintas posiciones

$$I = m_1 \cdot r_1^2 + m_2 \cdot r_2^2 + \dots$$

El módulo de la velocidad angular se define como la rapidez con que varía el ángulo de un radio de giro respecto a un eje.

$$|\vec{\omega}| = \frac{d\theta}{dt} \quad (\text{Ec.7.8})$$

⁶² Fuerza vertical y hacia arriba que aplica un fluido sobre un cuerpo cuando este ocupa un volumen dentro del mismo.

⁶³ Esto es válido si el cuerpo gira alrededor de alguno de sus tres ejes principales

Su sentido se determina por regla de la mano derecha. Ubicando los dedos curvos en el sentido de la rotación, el pulgar nos dará el sentido de $\vec{\omega}$.

Para variar la cantidad de movimiento angular de un sistema es necesario un torque neto sobre este.

El módulo del torque neto es igual a la rapidez con que varía la cantidad de movimiento angular y su sentido igual al de la variación de la cantidad de movimiento.

$$\vec{T}_{neto} = \frac{d\vec{L}}{dt} \quad (\text{Ec.7.9})$$

Si el momento de inercia es constante un torque neto no nulo implica una variación de la velocidad angular

$$\vec{T}_{neto} = I \frac{d\vec{\omega}}{dt}$$

Ya que $\frac{d\vec{\omega}}{dt}$ se define como la aceleración angular $\vec{\alpha}$,

$$\vec{T}_{neto} = I \cdot \vec{\alpha}$$

(Ec.7.10)

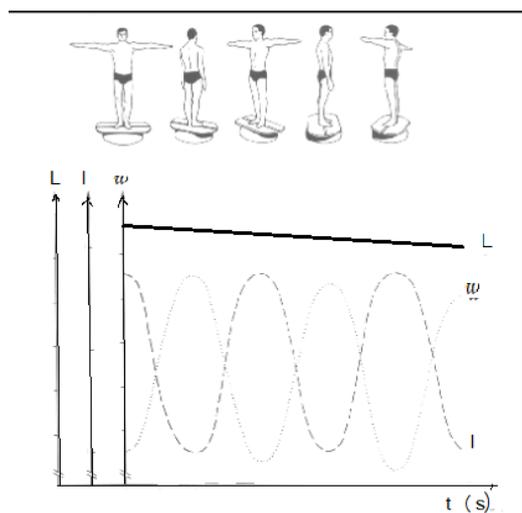


Fig.7.19 Torque y aceleración angular en un bate de beisbol

Quando todos los torque aplicados a un cuerpo se equilibran entre sí, el torque neto es nulo.

Si el torque neto sobre el sistema es nulo, la cantidad de movimiento angular se conserva.

Dada esta condición se da una relación inversamente proporcional entre el momento de inercia y la velocidad angular. Si el momento de inercia se reduce en cierta proporción, la velocidad angular de giro aumenta en la misma proporción. Y lo contrario. Si el momento de inercia aumenta en cierta proporción, la velocidad angular disminuye en la misma proporción.



En el caso del hombre, al tratarse de un cuerpo poliarticulado, si se mantiene la cantidad de movimiento angular, puede cambiarse su velocidad angular, alejando o acercando los segmentos corporales al eje de giro. Esto se realiza en la fase aérea de muchos saltos de trampolín o gimnasia deportiva.

Al girar en una plataforma o sobre el hielo (Fig 7.20), si puede desprejarse el torque que realiza la fuerza de rozamiento, el torque neto es nulo y se conserva la cantidad de movimiento angular.

Fig 7.20 a) Hay 1993. Gráfico de L, I y ω en función del tiempo al girar en plataforma giratoria

También se hace evidente esta transformación en el salto de trampolín.

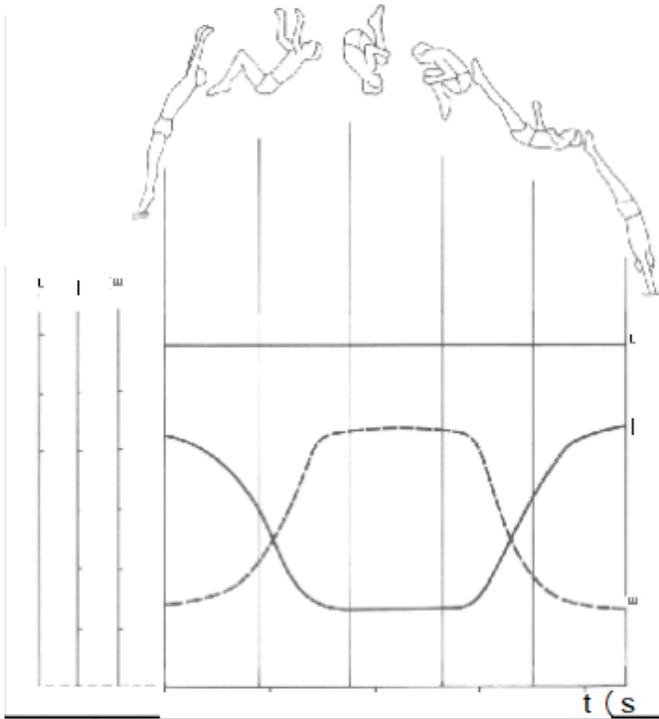


Fig 7.21 Gráfico de L, l y w en función del tiempo al girar en salto de trampolín. Hay 1993

Cuando se realiza un lanzamiento como el de bala o jabalina se utiliza el efecto llamado “látigo”. Fig 7.22

En él, movimientos rotatorios de partes del cuerpo muy masivas van dando lugar a otras menos masivas con el consiguiente aumento de la velocidad. De esta manera se produce una gran aceleración de una cadena cinética⁶⁴ abierta.



Fig 7.22 Efecto látigo en jabalina

⁶⁴ Se denomina “cadena cinética” al conjunto de articulaciones y músculos agonistas que intervienen de forma coordinada para lograr un gesto.

Cuando el torque cambia todo

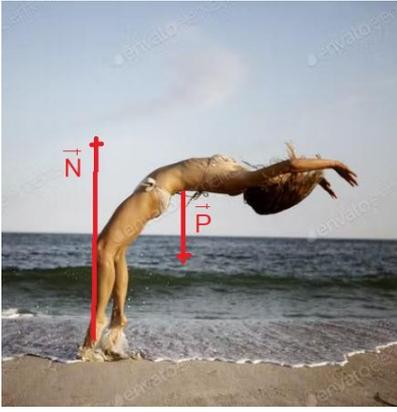


Fig. 7.23

Si se quiere realizar un salto mortal hacia atrás (Fig 7.23), se hace retroceder el centro de gravedad del cuerpo y se busca que el torque de la fuerza Normal respecto a dicho centro produzca un giro del cuerpo por sobre la cabeza.

En esta ocasión se aprovecha un torque neto no nulo para variar la cantidad de movimiento angular en el sentido deseado.

Un dato muy importante que se proporciona en los autos es el torque aplicado tanto en el motor como en las llantas. Por ejemplo para el auto Hyundai i25 1.6 (a nafta), el valor de torque que proporciona el fabricante para este motor es de 15,9 Kgfm⁶⁵. De acuerdo al cambio en que esté funcionando el auto será el torque aplicado en sus ruedas. Un mayor torque en ellas (cambios bajos) determina una mayor palanca para el avance. Son los necesarios para el arranque o para subir un repecho. Los cambios altos ejercen menor torque pero permiten girar a mayor velocidad.

Fig 7.24 Hyundai i25 1.6



Resumiendo

Cuando queremos analizar los giros o las situaciones de equilibrio de rotación en cuerpos extensos como el cuerpo humano, no alcanza con conocer las fuerzas sino que debemos conocer el torque que ellas producen.

Esto es útil tanto para describir como para mejorar una técnica deportiva.

Queda pendiente mencionar múltiples aplicaciones al campo del deporte, pero creemos que no es necesario extendernos más en este capítulo y animamos al lector que se anime a tal desafío.

⁶⁵ 15,9Kgfm (kilogramos fuerza metros) equivalen a 156 Nm en el Sistema Internacional.

Enlaces

Contracción del bíceps braquial <http://www.efdeportes.com/efd171/abordaje-fisico-matematico-del-gesto-articular.htm>

<http://radunga-dejandohuella.blogspot.com.uy/2014/01/kevin-love-en-busca-del-centro-de.html>

[“Determinación del centro de gravedad en el cuerpo humano mediante el método segmental”](#) Prof. Edgar Lopategui Corsino.

El torque (Par motor) en la rueda

https://www.youtube.com/watch?v=iwg9OGdn4_o

[¿Qué es el momento angular?](#) Dra. María Vieites Díaz

Preguntas y Problemas

- 1) ¿Cómo puede Michael Jackson y sus bailarines tomar la postura “antigravedad”? ¿No contradice las condiciones de equilibrio de rotación?



Fig. 7.26

2)



Fig. 7.27

¿Por qué los autos al frenar comprimen la suspensión delantera inclinándose hacia adelante?

- 3) En el cuadro de la figura 7.28 la letra “m” significa la masa total de la persona y la letra “h” su altura en una postura erguida. Determinar las coordenadas del Centro de Masa del lector en dicha postura.

Parte del cuerpo	Masa	x(C.M.)	y(C.M.)
Tronco y Cabeza	0,593m	0,10h	0,70h
Brazos	0,053m	0,14h	0,75h
Antebrazos y manos	0,043m	0,24h	0,64h
Muslo	0,193m	0,12h	0,42h
Piernas y Pies	0,118m	0,10h	0,19h

Fig. 7.28

- 4) Las balanzas que representa la figura 7.29 fueron taradas luego que se colocara la tabla sobre ella. Al acostarse un niño se observa en las balanzas los valores indicados. Determine el centro de gravedad del niño en el eje horizontal para dicha posición.

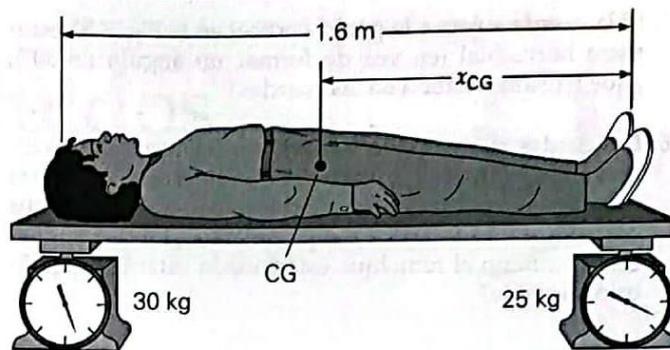


Fig. 7.29

- 5) ¿Cuál es el módulo de la fuerza F_a que es necesario aplicar en el sistema representado en la Fig.7.30 para levantar la pesa de masa $m=10$ Kg con velocidad constante? ¿Cuál es entonces la ventaja mecánica de este sistema?

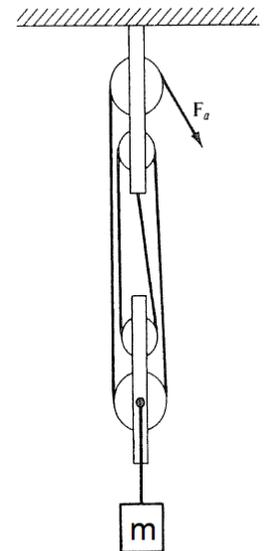


Fig. 7.30

- 6) De acuerdo a la figura 7.31 ¿qué fuerza \vec{F}_m realiza el músculo para sostener el brazo estirado si la masa del mismo es de 3,0 Kg? (\vec{F}_j es la fuerza que realiza la articulación sobre el húmero)

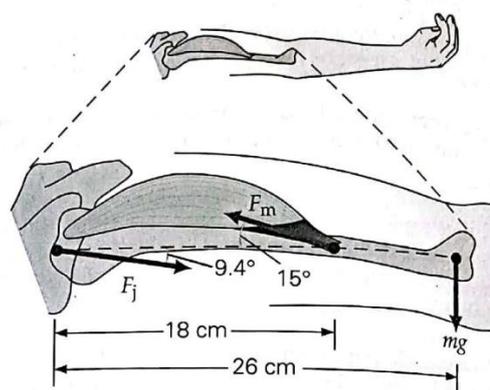


Fig 7.31

- 7) Un mástil de masa $m= 80$ Kg se mantiene en la vertical debido a las fuerzas que le aplican los estayes como muestra la figura 7.32. La tensión en el estay más corto vale 800 N. ¿Cuál es el valor de la tensión en el otro estay y de las otras fuerzas que se aplican al mástil?

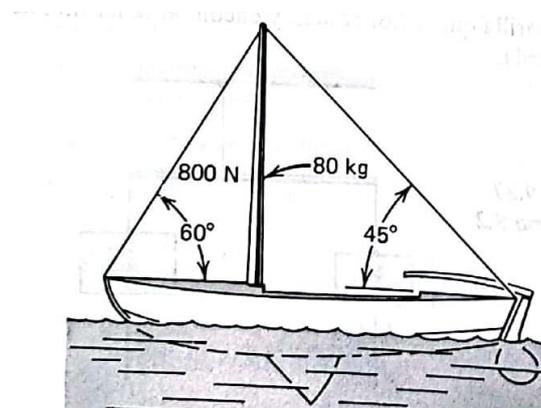


Fig. 7.32

- 8) Un trampolín uniforme de masa 60 Kg se mantiene fijo en dos puntos como se muestra en la figura 7.33. Si un clavadista de masa 80 Kg está en reposo parado en el extremo del trampolín, ¿cuáles son las fuerzas que actúan en los dos puntos de apoyo?

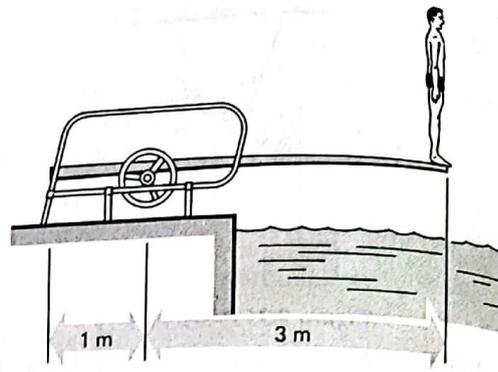


Fig. 7.33

Actividades

- 1) Tomar asiento tal como se muestra en la figura 7.34. Buscar levantarse sin inclinar el torso hacia adelante ni cambiar la zona de apoyo de los pies. Luego ponerse de pie sin las condiciones previas. ¿Cómo logró pararse? ¿Por qué?



Fig. 7.34

- 2) Dos estudiantes de pie se inclinan hacia adelante buscando llegar hasta los pies. Luego repiten la acción simultáneamente pero estando uno junto al otro, de espaldas, juntando sus talones. ¿Qué se observa? ¿Por qué?
- 3) Los estudiantes comienzan parándose en un solo pie. Luego intentan hacer lo mismo pero teniendo el pie de apoyo tocando el zócalo contra la pared. ¿Qué se observa? ¿Por qué?
- 4) Colocando distintos puntos de agarre en el antebrazo y con un dinamómetro adecuado o un sensor de fuerza ir cambiando el punto de aplicación de la fuerza y el ángulo en que se aplica la misma. Sacar conclusiones cualitativas o cuantitativas.
- 5) Si se cuenta con una plataforma de giro con bajo rozamiento, comenzar a girar de pie con los brazos extendidos para luego acercarlos rápidamente al eje de giro. Se hace más notorio el efecto si en las manos se sostienen pesas o mochilas. ¿Qué conclusiones puedo sacar de esta actividad?

Capítulo 8 Interactuando con los fluidos

Si pensamos en el movimiento de un deportista dentro de un fluido, seguramente se nos venga a la mente un nadador o una nadadora en el agua.

Sin embargo, el aire es el fluido donde todo deportista se desenvuelve y su influencia sobre él o sobre los implementos que maneja puede ser muy significativa.

Comenzaremos este capítulo dándonos un chapuzón en la piscina para luego pasar a considerar cómo también el aire afecta el rendimiento deportivo.

Como sapo de otro pozo

Sin dudas el ser humano no está diseñado para moverse con facilidad en fluidos de densidad próxima o mayor a la de su cuerpo. Si bien en el aire se desempeña de buena forma, en el agua se vuelve mucho más lento y predecible. El agua es aproximadamente 780 veces más densa que el aire.



Fig. 8.1 Nadando crol

El hombre debe respirar fuera del líquido al no tener agallas y la falta de aletas no le permite empujar suficiente agua para propulsarse velozmente.

Mientras que los mejores corredores del mundo tienen una velocidad máxima en el entorno de 40 Km/h, la velocidad máxima de nado se aproxima a 9,0 Km/h.

Pero veamos cuales son las fuerzas fundamentales aplicadas sobre el nadador cuando este avanza.

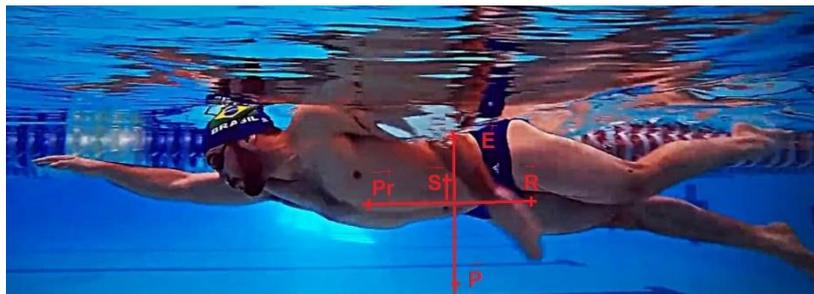


Fig. 8.2 Fuerzas durante el nado

Estará aplicada la fuerza Peso (\vec{P}), igual que si estuviera en el aire, ya que no cambia la masa del nadador ni el campo gravitatorio existente en esa zona.

Al estar parte de su cuerpo sumergido en el agua se hace más significativa una fuerza también presente en el aire, fuerza vertical y hacia arriba llamada Empuje (\vec{E}).

El agua además aplica una fuerza de propulsión (\vec{Pr}) ya que el nadador empuja agua hacia atrás, recibiendo de esta (dado el Principio de Interacción⁶⁶) una fuerza hacia adelante que le permite avanzar.

⁶⁶ También denominado Principio de Acción y Reacción en el capítulo 3. Mejor nombrado como Interacción porque el par de fuerzas sucede simultáneamente.

Pero además de empujar el agua hacia atrás, también lo hace hacia abajo, obteniendo de esta una fuerza vertical y ascendente que llamaremos de sustentación (\vec{S})⁶⁷

Y está presente también una fuerza de Resistencia (\vec{R}) que ofrece el agua al atleta, la cual se opone al movimiento de este y que analizaremos posteriormente.

Pero comencemos por la segunda fuerza mencionada, el Empuje. Sobre la primera, el Peso, ya hemos hablado suficientemente en el capítulo 3.

Hombre al agua

Es bien conocido el principio de [Arquímedes](#), el cual dice que todo cuerpo sumergido en un fluido experimenta una fuerza vertical hacia arriba cuyo módulo es igual al del Peso del fluido desplazado.

Esa fuerza se denomina Empuje.

Cuando caminamos en el agua (figura 8.3), nos sentimos “más livianos” ya que el Empuje tiene sentido contrario al Peso y esto hace menor la fuerza Normal del piso aplicada sobre nuestros pies

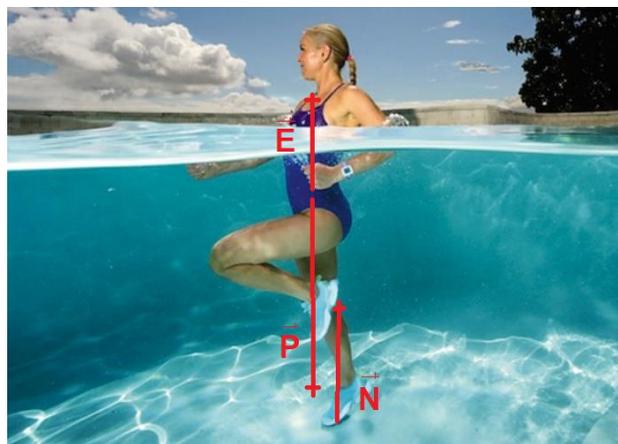


Fig. 8.3 Caminando dentro del agua.

Ya analizamos en el Capítulo 7 como la fuerza Empuje nos permite también mantenernos flotando en el agua, hacer “la plancha”.

Al llenar nuestros pulmones de aire, aumentamos el volumen de nuestro tórax, aumenta el agua desplazada y por lo tanto el valor del Empuje. También disminuimos la densidad media de nuestro cuerpo $\bar{\rho}_c$

El módulo del Peso de un cuerpo puede determinarse como $P = \bar{\rho}_c \cdot V_c \cdot g$

El módulo del Empuje del fluido se determina como $E = \rho_F \cdot V_{FD} \cdot g$

(Siendo ρ la densidad de masa, g la aceleración gravitatoria y V_{FD} el volumen del fluido desplazado)

De acuerdo a esto, ya que la densidad del hielo es aproximadamente 0,92Kg/l, y la del agua

$\rho = 1,0\text{Kg/l}$ podemos afirmar que el 92% de un iceberg se encuentra sumergido bajo la superficie del agua (Fig. 8.4)



Fig. 8.4 Iceberg flotando en agua

⁶⁷ La fuerza de sustentación y de propulsión son simplemente componentes de una única fuerza que realiza el agua al nadador por el movimiento de este.

En el caso de una persona que llena sus pulmones de aire, su densidad media puede alcanzar el valor de 0,96 Kg/l. Por tanto un 4% de su cuerpo estará por fuera del agua.



Fig. 8.5 Porcentaje del cuerpo flotando en agua con inspiración completa



Fig. 8.6 Sumergido en el agua

Cuando un sujeto se encuentra quieto, habiendo espirado todo el aire, sin apoyo, completamente sumergido en el agua ($V_c = V_{FD}$), su centro de masa comenzará a moverse hacia abajo ya que la densidad media del cuerpo humano es mayor a la del agua.

Solo la grasa del cuerpo tiene una densidad menor siendo su valor entre 0,95 Kg/l y 0,99 Kg/l.

En esta situación la densidad media del cuerpo es aproximadamente 1,06 Kg/l, por lo que va a experimentar una fuerza neta igual a un 6% de su peso corporal. Si el sujeto tiene una masa de 90 Kg, su Peso es 882 N. Recibirá una fuerza neta de 53 N vertical y hacia abajo y acelerará hasta que la resistencia del agua (que aumenta con la velocidad) hará que llegue a una velocidad límite. En esta nueva situación mantendrá constante la velocidad al ser la fuerza neta nula.

En principio parecería que tener un mayor porcentaje de grasa corporal sería un beneficio para los nadadores ya que mejora su flotabilidad. Más adelante veremos que al aumentar la grasa aumenta también su resistencia de forma y por lo tanto más que ventajoso resulta perjudicial.

Las mujeres presentan mejor flotabilidad que los varones ya que tienen en general un mayor porcentaje de tejido graso.

La mayor densidad esquelética de los nadadores de África subsahariana implica una disminución de su flotabilidad y por lo tanto de sus posibilidades de éxito en los diversos estilos de nado.



Fig. 8.7 Nadador de África subsahariana

Si aumentamos la densidad del agua, por ejemplo en piscinas con agua de mar, aumenta la flotabilidad de los nadadores y de esta forma mejoran sus marcas. Esto no está permitido reglamentariamente, pero es útil en circuitos de aguas abiertas donde además puede estar permitido el uso de trajes de neopreno lo cual aumenta aún más la flotabilidad.

Por la gran salinidad y por lo tanto gran densidad de las aguas del mar Muerto se hace muy apreciable el aumento de la flotabilidad.



Fig. 8.8 Flotando en aguas del mar Muerto

Acuapropulsión

Como ya dijimos la fuerza de propulsión se origina fundamentalmente en el desplazamiento hacia atrás del agua que realiza el nadador con sus manos y pies mientras que la fuerza de sustentación se origina principalmente por los desplazamientos verticales de los mismos.

Si queremos avanzar en el agua se trata entonces de realizar la mayor fuerza posible sobre el fluido, desplazar mucha agua (gran masa) y con gran aceleración.

Para desplazar más agua podemos ponernos implementos que los animales tienen naturalmente, como por ejemplo las patas de ranas o las manoplas de natación. Al aumentar la superficie de contacto aumenta la masa de agua empujada.



Fig 8.9 Patas de rana y manoplas de natación

El impulso que recibe la mano al empujar agua hacia atrás vale igual que el producto de la masa que desplaza por su velocidad. La energía necesaria para mover dicha masa de agua es $m \cdot v^2/2$. Es más eficiente entonces desde el punto de vista mecánico mover mucha agua a baja velocidad que mover poca agua con gran velocidad. Dicho de otro modo, si el producto $m \cdot v$ es el mismo, el gasto energético ($m \cdot v^2/2$) será menor cuanto mayor sea la masa y menor la velocidad.

Si empujas un auto, a medida que este toma velocidad es más difícil aplicarle mayor fuerza. Lo mismo sucede con el agua. Por eso las manos durante el nado van buscando “aguas quietas” de forma de obtener la mayor propulsión.

La propulsión en el agua es un tema abierto en cuanto a la investigación y se siguen descubriendo nuevos elementos influyentes en la misma.

Desde la década de 1980 se está estudiando la importancia de la generación de vórtices⁶⁸ incidentes en la propulsión y se sigue analizando, cada vez con tecnología más desarrollada, su fundamental relevancia.

Lo bueno de tener sustento

Cuando el nadador desplaza el agua hacia abajo recibe una fuerza hacia arriba. Pero esto no solo lo realiza con las manos y pies. Todo segmento corporal que avanza tiene un ángulo de ataque. Es decir, el ángulo de ese segmento corporal con la velocidad de avance en relación al fluido.

⁶⁸ Flujo que rota en sentido de espiral



Fig. 8.10 Nado mariposa

Como un ala de un avión que se desplaza en el aire, el cuerpo va chocando contra el agua empujándola hacia abajo. De esta forma recibe una fuerza hacia arriba que aporta a la sustentación.



Fig. 8.11 Fuerza de sustentación en un avión

¡Qué contra la Resistencia!

Cuando el nadador avanza en el agua, esta le aplica una fuerza de resistencia que se opone a su movimiento. Podemos encontrar tres tipos de fuerzas de resistencia: resistencia de forma, por oleaje y por fricción

La Resistencia de forma es la más significativa de todas, también es llamada resistencia de presión ya que se debe a que esta variable adquiere durante el movimiento un mayor valor delante del cuerpo que detrás de él.

Esa diferencia de presiones se opone al avance del cuerpo y produce que el agua pase de tener un flujo laminar a tener un flujo turbulento. Fig 8.12

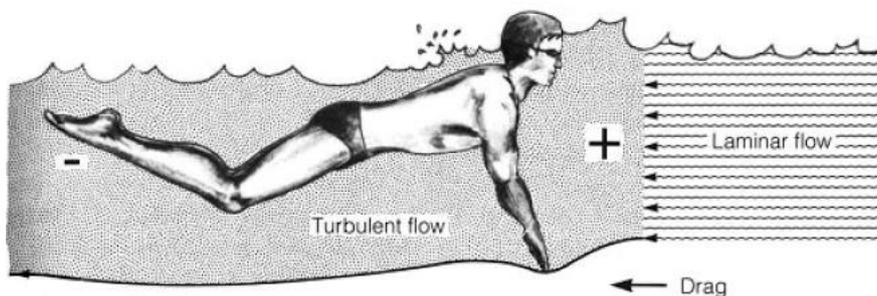


Fig. 8.12 Resistencia de forma

El módulo de la resistencia de forma puede determinarse como:

$$R_f = \frac{1}{2} S C_{ra} v^2 \rho \quad (\text{Ec.8.1})$$

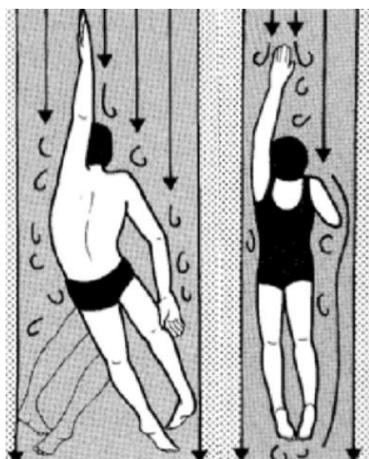
Siendo S la superficie frontal de choque con el agua
 C_{ra} el coeficiente de resistencia activa
 v la velocidad relativa del nadador respecto al agua
 ρ la densidad del fluido (en este caso el agua)

La densidad del agua no se puede cambiar en competencia y la velocidad se busca que sea la mayor posible. Por ello se tratará de disminuir la superficie frontal y el coeficiente de resistencia.

El nadador debe en todo momento, pero fundamentalmente en su ingreso al agua, buscar la menor superficie de choque con la misma (Ver fig. 8.13). Una excesiva musculación, especialmente en los hombros puede ser perjudicial por el aumento de la sección de choque y por lo tanto de la resistencia.



Fig. 8.13 Disminución de área de choque



También la pérdida de la alineación del cuerpo durante el nado conlleva a una mayor superficie de choque y por lo tanto a una mayor resistencia. Ver Fig. 8.14

Cuando se nada en la superficie, lo mejor es tener poca superficie de choque bajo el agua, tener buena flotabilidad. Los trajes de neopreno, mejorando la flotabilidad, pueden disminuir hasta un 15% la resistencia.

Fig. 8.14 Mala y buena alineación del cuerpo

La Resistencia de oleaje solo se presenta cuando el nadador se mueve en la interface agua-aire. No cuando se nada por debajo del agua.

Esta resistencia surge de la interacción del sujeto con las olas que él mismo o los otros nadadores producen.

Los más perjudicados son los competidores que nadan próximo a las paredes de la piscina ya que en ellas se produce la reflexión de las olas volviendo al carril próximo.

Para disminuir la resistencia por oleaje se utilizan los corchetes o boyas en las cuerdas que marcan los andariveles. Ellos con su giro amortiguan el oleaje en mayor o menor medida de acuerdo a la calidad de los mismos.



Fig. 8.15 Modelización de corchetes ideales

De la misma manera que sucede con la resistencia de forma, una buena técnica de nado disminuye el oleaje y por lo tanto la resistencia.

La resistencia que ofrece el agua al nadar sobre su superficie hace que incluso sea más eficiente el nado por debajo del agua si se emplea la patada “de delfín”. Fig 8.16

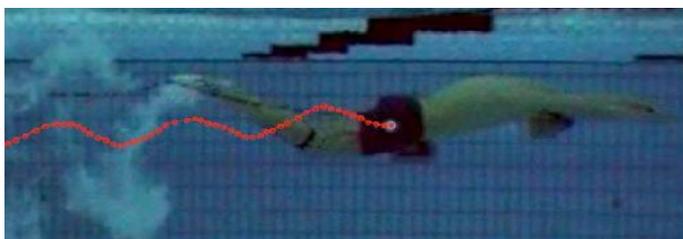


Fig.8.16 Patada delfin subacuática

Esto lo tenía bien claro el ruso Denis Pankrátov (Fig 8.17), quien ganó la medalla de oro en los Juegos Olímpicos de Atlanta 1996 en la especialidad 100 m mariposa, habiendo nadado más de media piscina por debajo del agua.

Poco le duró el éxito a Denis, ya que en el Congreso Técnico de 1998, la Federación Internacional de Natación FINA limitó el nado subacuático en pruebas de mariposa a solo quince metros.



Fig. 8.17 Denis Pankrátov

Tenemos también la **Resistencia por Fricción** o por arrastre viscoso.

El módulo de esta resistencia depende de la viscosidad del fluido, de la velocidad de nado, de la superficie de contacto del nadador con el fluido y del coeficiente de fricción de la piel o el traje.

Como la viscosidad del agua no puede cambiarse (salvo por la temperatura) y la velocidad se busca maximizar, debe disminuirse la superficie de contacto con el agua y bajar el coeficiente de fricción.

Para disminuir la fricción se depila a los bañistas porque, aunque parezca insignificante, las carreras se definen actualmente por una centésima de segundo y cualquier detalle marca la diferencia.

Los trajes Speedo o “piel de tiburón” permitieron disminuir la resistencia por fricción hasta un 8%. Fig. 8.18

Debido al incremento de récords que se dieron a partir del uso de estos trajes en el mundial de natación del 2009 Roma (Italia), la Federación Internacional de Natación (FINA) prohibió el uso de ellos para la competición a partir del año 2010. A partir de ese año, si bien se han dado nuevos récords olímpicos y mundiales, el número de ellos ha decaído notoriamente.



Fig. 8.18 Trajes “piel de tiburón”

¿Y en el aire qué?

Las mismas fuerzas que consideramos por la interacción con el agua las tenemos en este otro fluido, solamente que sus valores suelen ser normalmente mucho menores.

El empuje que recibimos al estar sumergidos en el aire es de un orden mil veces inferior a la fuerza Peso, ya que la densidad del aire es aproximadamente mil veces menor a la densidad media del cuerpo humano. Por tal motivo normalmente despreciamos la fuerza empuje del aire en relación a las otras fuerzas sobre el cuerpo.

La propulsión es normalmente tan débil que es insignificante para el deporte. Sí podemos ver su aplicación en un avión a chorro, o simplemente un globo que deja escapar el aire.



Fig. 8.19 Saltador de esquí buscando sustentación

La sustentación sí es para algunos deportes una fuerza fundamental. Apreciemos en la figura 8.19 la posición que toma el saltador de esquí, su ángulo de ataque, para que al igual que el ala de avión mencionada anteriormente recibir la máxima fuerza del aire hacia arriba y así estar más tiempo avanzando por el aire.

Un disco si es lanzado con el ángulo de ataque correcto, gracias a esta fuerza de sustentación, tiene un alcance mayor que si viajara en el vacío.



Fig. 8.20 Discóbolo de Mirón 450 a.c.

La fuerza de resistencia cuando son grandes las velocidades del aire toma un rol primordial.



Comencemos con el ejemplo del ciclismo. Al ser en rutas o pistas generalmente abiertas, tenemos también la influencia del viento. Importa el movimiento relativo del ciclista respecto al aire.

Fig. 8.21 [Milton Wynants](#)⁶⁹ representando a Uruguay

Cada elemento del ciclista con su bicicleta contribuye a la resistencia con el aire.

75%	Ciclista incluido ropa y casco
8%	Cuadro
8%	Ruedas
9%	Componentes manillar, freno, bielas, cambio, bidón, cables, etc

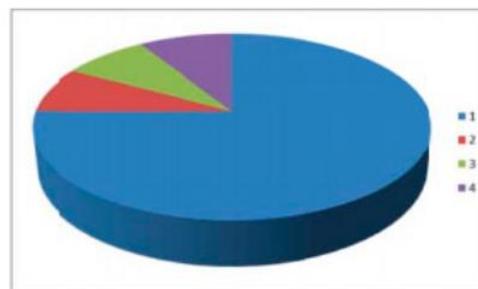


Fig. 8.22 Porcentajes de resistencia en un ciclista

Como se mencionó en el agua, para avanzar rápido es conveniente disminuir la superficie de choque. Por eso los ciclistas se arquean sobre su bicicleta tratando de disminuir el área frontal lo más posible. Los manubrios actuales están adaptados para eso y su ropa, ajustada al cuerpo, busca el mismo efecto.

Fig. 8.23

⁶⁹ Medalla de bronce para Uruguay en Sidney 2000.



Fig. 8.23

a) Área frontal de choque.



b) Manubrio aerodinámico

A una velocidad de 16 Km/h un ciclista con bicicleta clásica emplea el 50% de su energía en vencer la resistencia del aire.



Los cascos aerodinámicos buscan evitar la formación de torbellinos, de vórtices tras la región posterior de la cabeza, lo que generaría una zona de baja presión dificultando el avance. La rueda lenticular (enteriza) también busca disminuir la turbulencia generada por el propio ciclista..

Fig. 8.24 Casco aerodinámico y rueda lenticular

En otros deportes podemos afirmar que las pelotas de tenis nuevas tienen más pelusa que las ya usadas y por lo tanto presentan más resistencia del aire. Por tal motivo el sacador avisa a su contrincante cuando va a sacar con pelotas nuevas.

Los esquiadores de velocidad una vez cruzada la meta se incorporan y extienden sus brazos buscando que una mayor resistencia con el aire los frene cuanto antes. También hay autos de aceleración y aviones que despliegan un “paracaídas” de frenado cuando quieren detenerse.



Fig.8.25 Paracaídas de frenado en un auto

Pasemos entonces al paracaidismo. Hagamos ahora un salto de altura. Cuando una persona se lanza al aire en principio tiene aproximadamente la aceleración gravitatoria ya que la única fuerza significativa es su Peso.

Pero a medida que va ganando velocidad va aumentando la fuerza de resistencia con el aire. De acuerdo a como sea la postura del paracaidista, la superficie de choque que ofrezca, será la rapidez con que gana velocidad y su velocidad límite.

Si el saltador salta de cabeza, su velocidad será mayor que si cae con los brazos extendidos (haciendo “el ángel”), puesto que cayendo de cabeza el aire opondrá menos resistencia,

Al alcanzar cierta velocidad la fuerza de resistencia iguala el valor del Peso y bajará con velocidad constante. Esta velocidad límite puede ser aproximadamente 55 m/s.

Al abrir el paracaídas, la resistencia crece ya que aumenta la superficie de choque y se hace mayor que el Peso. Se experimenta una aceleración contraria a la velocidad lo que hace que esta disminuya su valor con la consiguiente disminución de la resistencia.

Esto hasta que nuevamente se igualen los módulos de la fuerza resistencia con el Peso, para terminar bajando con velocidad constante (aproximadamente 5,0 m/s) hasta llegar al piso.

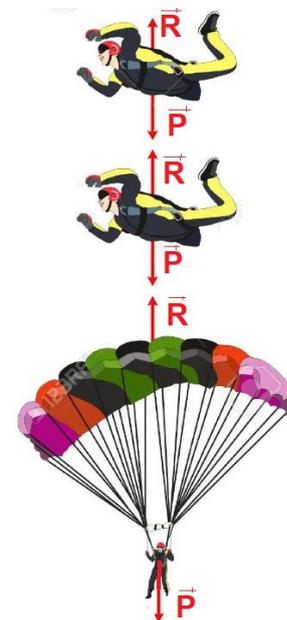


Fig. 8.26 Fuerzas sobre paracaidista

Arrojados por el aire

No solamente el deportista experimenta las fuerzas que le aplica el aire sino todos los implementos que utiliza y fundamentalmente aquellos objetos que arroja (especialmente si viajan a gran velocidad)

Puede ser el caso de una pelota de fútbol, de golf, un disco o una jabalina.



Fig. 8.27 Lanzamiento de disco

Comencemos por nuestro deporte más popular, el fútbol.

El gol de la envidia



En 1924 la Selección Uruguaya de Fútbol había ganado los Juegos Olímpicos realizados en Colombes (Francia) y fue invitada por su par argentina a jugar un partido amistoso en la vecina orilla. En dicha ocasión un jugador argentino⁷⁰ lanzó un tiro de esquina de tal forma que realizó una curva lateral en el aire ingresando directamente al arco uruguayo. Fig. 8.28. Le llamaron el “gol olímpico” por haberse realizado contra los campeones olímpicos.⁷¹

Fig. 8.28 Primer gol “olímpico”

Pero ¿por qué se produce esa comba?, ¿qué factores entran en juego?

⁷⁰ Cesáreo Onzari

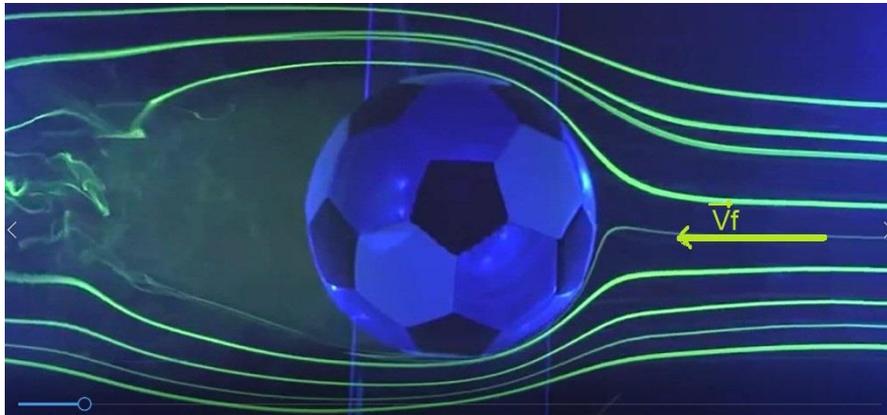
⁷¹ Antes de esa fecha los goles realizados directamente desde el tiro de esquina eran anulados

Está claro que para que suceda esa curvatura lateral la pelota tiene que ir con efecto, tiene que girar sobre sí misma lateralmente. Ese efecto se denomina Magnus en honor al físico y químico alemán [Heinrich Gustav Magnus](#) (1802-1870), quien estudió la desviación de las balas de cañón en su trayectoria por el aire al salir girando. Fig. 8.29



Fig. 8.29 Heinrich Magnus

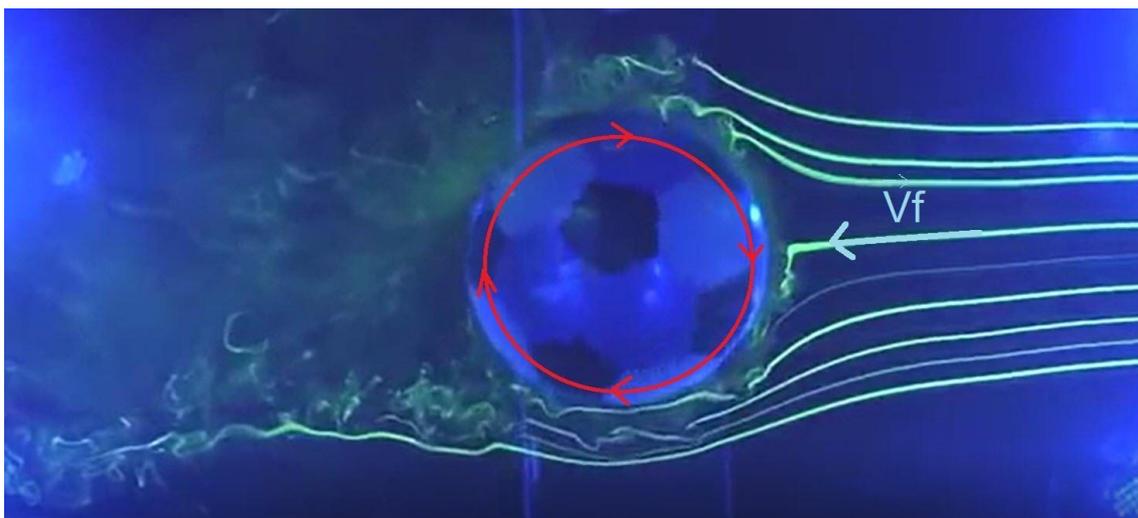
Pero volvamos a la pelota de fútbol.



8.30 Vista aérea de una pelota que no gira en una corriente de fluido

Si la pelota no gira el flujo de velocidad del fluido⁷² en torno a la misma es simétrico, por lo que la pelota no tendrá desvíos laterales. No habrá efecto Magnus.

Debido a la fricción entre la pelota y la capa de aire más próxima a este, hay una capa llamada capa límite que tiene una velocidad próxima a la velocidad tangencial de la pelota.



8.31 Vista aérea de una pelota giratoria en una corriente de fluido

Como puede verse en la figura 8.29, al girar la pelota, por un lado (superior en la figura) se enfrentan las corrientes de aire y se frena la corriente del fluido. Por el otro lado (inferior en la figura) aumenta la velocidad de la misma dirigiéndola (debido a su viscosidad) hacia el lado contrario.

⁷² Es lo mismo que la pelota avance en el fluido que sea el fluido el que avanza hacia la pelota, lo importante es el movimiento relativo pelota-fluido.

Si la pelota desvía la corriente de aire hacia un lado (en este caso hacia el lado superior de la figura), ella misma experimentará un desvío en sentido contrario (Principio de Interacción).

En el tenis se utilizan muchos los giros en la pelota, pero fundamentalmente el top spin, el efecto hacia adelante. Con este efecto en la pelota se logra que la curvatura de la trayectoria sea mayor que si simplemente se aplicara el Peso porque se le suma la fuerza de Magnus (\vec{F}_m) como fuerza vertical descendente. De esa forma la pelota puede pasar la red a gran velocidad para luego “clavarse” dentro de la cancha del adversario.

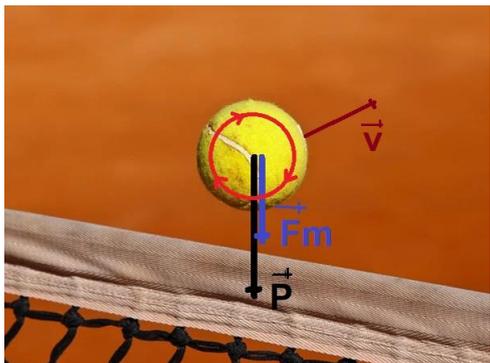


Fig. 8.32 Fuerza Magnus en el tenis



Fig. 8.33. [Rafael Nadal](#)

Actualmente el jugador que más efecto le da a la pelota es Rafael Nadal. Ha llegado a producir golpes con un spin de más de 5500 rpm y en polvo de ladrillo la pelota tiene luego de sus golpes una frecuencia de giro media de 3600 rpm lo que le da una gran curvatura a la trayectoria de la pelota.

También es muy notorio el uso del efecto Magnus en el tenis de mesa. La pequeña masa de la pelota y los grandes efectos que se logran posibilitan grandes aceleraciones, ya sean laterales como verticales.



Fig. 8.34 María Pía Lorenzotti⁷³ en tenis de mesa.

⁷³ María Pía Lorenzotti es la primera jugadora uruguaya de tenis de mesa en clasificarse a los Juegos Panamericanos. Medalla de bronce en la categoría sub 21 del Sudamericano 2015 Mendoza, Argentina. Campeona nacional tanto en la rama femenina como masculina

Dame vórtices para ir más lejos



A comienzos del 1900, un profesor de la universidad, jugando al golf, apreció que una pelota que en origen era lisa y esférica, llegaba más lejos al estar abollada. Esta simple observación se siguió repitiendo y derivó que en 1905 un fabricante inglés llamado William Taylor introdujera en el diseño los famosos alvéolos o pozos que todos hoy conocemos.

Fig. 8.35 Actual pelota de golf

Al avanzar la pelota en el aire, se establece un flujo laminar alrededor de su superficie, generándose en la parte posterior una amplia zona de baja presión. De esta forma, cuanto más rápido se mueva la pelota de golf mayor es la diferencia de presión entre la parte anterior y posterior.

Si, por el contrario, la pelota tiene hoyos se crea un flujo turbulento, que hace que el punto de separación de la corriente sea más tardío. De esta manera disminuye la zona de baja presión y provoca menor resistencia. El número al cual el flujo cambia de estado laminar a estado turbulento se denomina número de Reynolds y depende de la velocidad de la pelota.

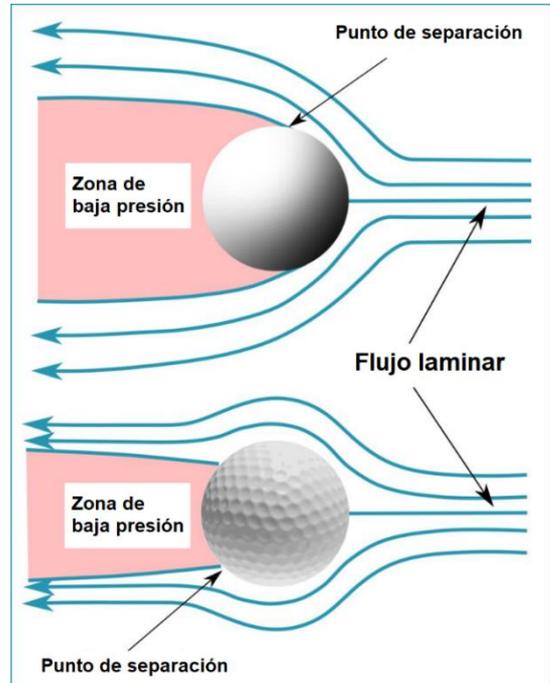


Fig. 8.36 Flujo en pelota lisa y con alvéolos

Los hoyos de las pelotas de golf permiten un alcance hasta tres veces mayor comparado con el que se obtiene con mismo golpe sobre una pelota lisa.

Actualmente el número de alvéolos es entre 250 y 450. Si bien los alvéolos hexagonales son los que disminuyen al máximo la resistencia, por ahora se ha optado por los alvéolos redondos como los estándares para la práctica de este deporte.

Resumiendo

Es fundamental en la práctica de muchos deportes conocer la interacción con los fluidos ya sea con el agua y/o con el aire. Dicha interacción puede ser muy compleja pero podemos aproximarnos a la realidad mediante los modelos teóricos existentes.

Invito a los lectores a profundizar en este tema mediante otras lecturas y videos. Verán que vale la pena tomar aire y zambullirse en esta apasionante área de conocimiento.

[Enlaces para ampliar la información](#)

El hombre que cambió las reglas de la natación.

<https://www.jotdown.es/2016/04/historias-olimpicas-hombre-cambio-literalmente-las-reglas-la-natacion/>

Physics Ch.2.1 Part 2 Air resistance and terminal velocity

<https://www.youtube.com/watch?v=9imImfmt2BE>

La física detrás del tiro con efecto **<https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=YIPO3W081Hw>**

How SMOOTHNESS of a SOCCER BALL affects curve!

<https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=akjObPKKD7I>

The Science of Curveballs

<https://www.youtube.com/watch?v=t-3jnOIJg4k>

Efectos en tenis de mesa

<https://www.pingpongplus.com/blog/efectos-en-tenis-de-mesa/>

Preguntas y Problemas

- 1) ¿Por qué los globos rellenos de helio ascienden en vez de descender?



Fig 8.37

- 2) Al pararse en una piscina un ser extraterrestre de masa 25,0 Kg sumergido totalmente en el agua, comprobamos que recibe una fuerza Normal del piso de 220 N. Sabiendo que la densidad del agua es 1000 kg/m^3 , calcular:
- El empuje que recibe.
 - El volumen de su cuerpo.
 - La densidad de su cuerpo.
- 3) ¿Cuál será el volumen sumergido de un tronco de densidad $0,4 \text{ g/cm}^3$, de volumen 95 dm^3 al flotar en el agua del río?



Fig. 8.38

- 4) Un ciclista experimenta una fuerza de resistencia con el aire de 60 N cuando presenta una superficie frontal de choque de $0,5 \text{ m}^2$ viajando a una velocidad de 72 Km/h. La densidad del aire a esa temperatura es de $1,2 \text{ Kg/m}^3$.
- Determina el coeficiente de resistencia activa del ciclista
 - ¿Cómo cambiará el valor de la fuerza de resistencia si la velocidad disminuye a la mitad?



Fig 8.39

Actividades

- 1) Remontar una cometa y ver la importancia del ángulo de ataque para la fuerza de sustentación
- 2) Unir un globo a una cuerda con un canutillo, inflarlo y dejar que suelte el aire avanzando por la cuerda para ver la fuerza por propulsión.
- 3) Hacer levitar una pelota liviana sobre un chorro de aire. Puede ser una pelota de tenis de mesa o espuma plast sobre un secador de pelo.
- 4) Dejar rodar un cilindro de papel sobre un plano inclinado para ver el efecto Magnus al caer luego de llegar al fin del mismo.
- 5) Lanzar aire con un secador de pelo entre dos globos próximos. O soplar entre dos hojas linderas.
- 6) Filmar y analizar la caída de un objeto liviano (por ejemplo un pirotín), que llegue a su velocidad límite antes de tocar el piso.

Anexo 1: Análisis de video: TIPS para filmar ⁷⁴

- **Escala:**

- ✓ Se debe ubicar una referencia de longitud conocida (por ejemplo, una vara de un metro). La misma debe encontrarse en el plano del movimiento.

- **Cámara de video:**

- ✓ Durante la filmación, la cámara debe permanecer fija. Se recomienda emplear un trípode o similar.
- ✓ El objetivo de la cámara ha de estar paralelo al plano donde se desarrolla el movimiento que se desea analizar.
- ✓ Para minimizar la distorsión introducida por las lentes se debe evitar el uso de gran angular. Para ello la cámara ha de alejarse lo máximo posible del plano de la acción, encuadrando este último mediante el zoom óptico.
- ✓ El tiempo de exposición debe ser el mínimo posible, para lo cual es necesario una muy buena iluminación.

- **Iluminación:**

- ✓ La filmación debe realizarse en un recinto muy iluminado (preferentemente con luz solar y focos adicionales).
- ✓ La iluminación debe ser lo más difusa y uniforme posible.
- ✓ Se debe minimizar las sombras proyectadas por el cuerpo en movimiento.

- **Fondo:**

- ✓ El contraste entre el objeto a estudiar y el fondo ha de ser el máximo posible.
- ✓ En caso de que el tiempo de exposición de la cámara sea automático, se recomienda que el color del fondo sea blanco.

- **Frecuencia de muestreo:**

- ✓ El número de fotogramas por segundo (FPS) debe ser el máximo posible.
- ✓ Al intentar analizar un fenómeno periódico se debe prestar especial atención al valor de FPS. Este último debe ser mucho mayor a la frecuencia del fenómeno estudiado.

Para realizar una filmación de alta frecuencia de muestreo puede utilizarse la opción “cámara lenta” de algunos dispositivos. En este caso hay que tener en cuenta que se filma a cierta frecuencia (por ejemplo a 200 FPS) y se reproduce a otra (normalmente 30 FPS). Por lo tanto habrá que pasar a tiempo real el tiempo que indique el análisis del video.

⁷⁴ Aporte del Prof. Fernando Tornaría

Bibliografía

- Aguado Jódar, X. (1993). *Eficacia y técnica deportiva: análisis del movimiento humano*. España: INDE.
- Aguado Jódar, X. (1997). *Biomecánica aplicada al deporte*. España: Universidad de León.
- Aguado, X; Izquierdo, M; Gonzáles; JL. (1997). *Biomecánica fuera y dentro del laboratorio*. España: Universidad de León.
- Armenti, A. (1992). *The Physics of Sports*. Nueva York: Springer.
- Blazeovich, A. (2007). *Sports Biomechanics [Biomecánica deportiva]*. Londres: A&C Black Publishers Limited.
- Cromer, A. *Physics for the life sciences [Física para las ciencias de la vida]*. 2ª ed. McGraw Hill Book C
- De Ambrosio, M. (2009). *El deportista científico*. Buenos Aires: Siglo Veintiuno Editores.
- Diñeiro, J. M.; Alberdi, C.; Alfonso, S. ; Berroguí, M. *La física, tú y el deporte*. Universidad Pública de Navarra.
- Donskoi, D; Zatsiorski, V. (1988). *Biomecánica de los ejercicios físicos*. Moscú: Ráduga.
- Egaña E.; Berruti M.; González A. (2011). *Interacciones – Fuerzas y Energías*. Contexto.
- Epstein, D. (2014). *The Sports Gene [El gen deportivo]*. New York: Penguin Group.
- Hay, J.G. (1993). *The Biomechanics of Sports Techniques [La Biomecánica de las técnicas deportivas]*. New Jersey: Ed. Prentice Hall.
- Hecht, E. (1998). *Física 1 Algebra y Trigonometría*. 2ª ed. Thomson.
- Hewitt, P. G. (1995). *Física Conceptual*. 2ª ed. Addison-Wesley Iberoamericana.
- Izquierdo, M. (2008). *Biomecánica y Bases Neuromusculares de la Actividad Física y el Deporte*. Buenos Aires - Madrid: Médica Panamericana.
- Kane, J.; Sternheim, M. (1991). *Physics [Física]*. 2ª ed. New York: John Wiley & Sons.
- McNeill Alexander, Robert. (1982). *Biomechanics [Biomecánica]*. Londres: Chapman and Hall.
- Resnick, R.; Halliday, D.; Krane, K. (2003). *Física*. 4ª ed. México: Continental.
- Ruiz, J.A.; Brito, E.; Navarro,R.; Navarro, M.; García J.M. (2011). *Análisis del movimiento en el deporte*. Sevilla: Wanceulen.
- Sanz, E.; Ponce de León, A. (2005). *Biomecánica de la Actividad Física y el Deporte: Problemas Resueltos* (1era ed.). La Rioja: Servicio de publicaciones, Universidad de la Rioja.
- Savirón, J.M. (1986). *Problemas de Física General en un año olímpico*. Barcelona: Reverte.
- Sears, F.; Zemansky, M.; Young, H.; Freedman, R. (2004). *University Physics. Volume 1 [Física universitaria Volumen 1]*. 11ªed. Pearson Education.

Webgrafía

- Excelentes [artículos](#) de divulgación del profesor Xavier Aguado Jódar en el diario El País de Madrid.
- Una referencia fundamental para quien quiera profundizar en el tema de la Biomecánica, son las [publicaciones](#) en la Revista del Instituto de Biomecánica de Valencia.
- “[Dejando huellas](#)”, es un Blog con breves e interesantes comentarios sobre la ciencia aplicada a los distintos deportes.
- Aquí la versión digital de algunas publicaciones de “[Cultura, ciencia y deporte](#)”, revista de la Universidad Católica de San Antonio.
- Variadas e interesantes publicaciones se encuentran en la “[Revista Internacional de Medicina y Ciencias de la Actividad Física y el Deporte](#)”. Aquí algunos números de acceso libre en la web.
- “[Física con ordenador](#)”, es un curso interactivo de Física en internet, con numerosas explicaciones y animaciones, presentado por Ángel García Franco.