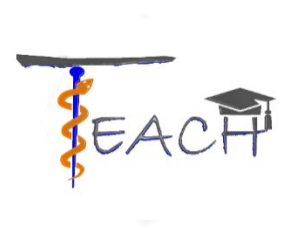


Development of innovative training solutions in the field of functional evaluation aimed at updating of the curricula of health sciences schools



MÓDULO FUNDAMENTOS DE LA BIOMECÁNICA

Unidad Didáctica D: TÉCNICAS PARA EL ANÁLISIS INSTRUMENTAL DE MOVIMIENTO Y FUERZAS

D.2. ¿Cómo se pueden medir las fuerzas y qué parámetros se pueden analizar? ¿Cuáles son sus principales aplicaciones?



Índice

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	3
2. FUERZAS DE REACCIÓN	5
Plataformas dinamométricas	5
Acelerómetros	8
3. PRESIÓN	12
Plataformas de presión	13
Plantillas instrumentadas	13
Otros sistemas	15
4. FUERZA MUSCULAR	17
Dinamómetros	17
5. PRINCIPALES ÁREAS DE APLICACIÓN	23
Entorno clínico.....	23
Deportes.....	24
Ergonomía.....	24
6. EJEMPLOS	25
7. IDEAS CLAVE	32
8. RERENCIAS	33

1. Introducción y objetivos

Conocer la fuerza ejercida por un cuerpo sobre otro o la carga ejercida sobre otro objeto es de suma importancia en muchos estudios biomecánicos. Las técnicas empleadas se basan en el análisis de movimientos, el estudio de materiales, el desarrollo de implantes, etc. Al igual que con otras técnicas, es importante conocer el objeto a medir para seleccionar el equipo más adecuado teniendo en cuenta factores como el rango de amplitud y frecuencia de adquisición, linealidad, precisión, fiabilidad y sensibilidad [1].

Para ello, un análisis biomecánico normalmente aplica técnicas cuantitativas que utilizan un sensor electromecánico, generalmente compuesto por un transductor que convierte una forma de energía en otra. En el caso del análisis de fuerza, los transductores de fuerza transforman cantidades físicas de fuerza, presión o momentos en una cantidad eléctrica cuantificable que puede ser analizada por un ordenador; es decir, proporcionan una señal eléctrica proporcional a la fuerza aplicada al sensor [2]. Existen muchos tipos de sensores con sus propias características y propiedades mecánicas (sensibilidad, tiempo de respuesta, rango de medida, etc.) en cuanto a medidas de fuerza como piezoeléctricos, piezorresistivos, capacitivos, galgas extensométricas, etc.

Hay dos campos principales diferentes de sensores de fuerza disponibles en el mercado: los que incluyen células de carga y los que tienen pequeños sensores de resistencia de detección de fuerza (FSR).

Las células de carga se pueden dividir en aquellas basadas en galgas extensométricas o sensores piezoeléctricos (Figura 1). En el caso de las galgas extensométricas, estas se adhieren a una viga o componente estructural que se dobla instantáneamente cuando se aplica una fuerza. Los transductores piezoeléctricos se basan en el efecto piezoeléctrico. Para este tipo de sensores se utilizan monocristales que producen una carga eléctrica cuando se aplica una tensión mecánica [1].

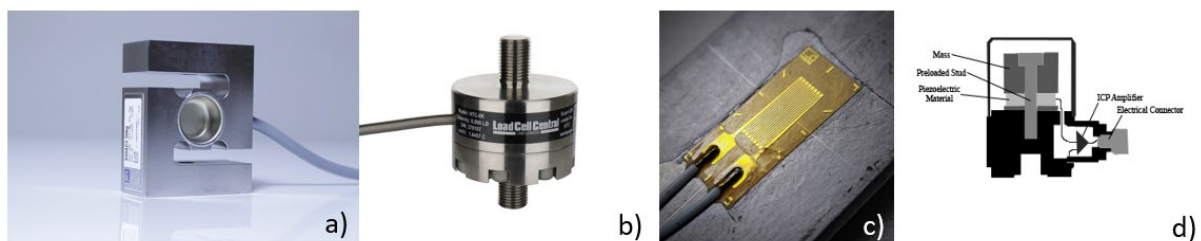


Figura 1 – Imagen de diferentes células de carga: a) y b); extensómetro: c), y d)diagrama de un sensor piezorresistivo:

Los sensores FSR (Figura 2) son dispositivos muy habituales en las medidas biomecánicas, especialmente en las relacionadas con el análisis de la distribución de la presión en la interfaz entre un segmento corporal y un objeto. Estos sensores son económicos, delgados y el acondicionamiento de la señal es simple [3].

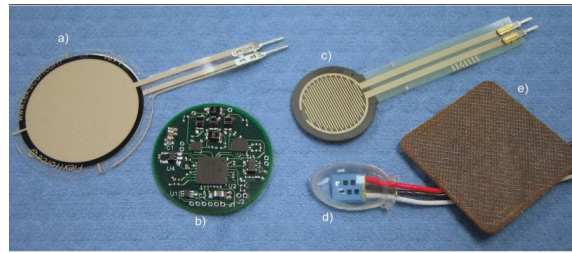


Figura 2 – Imagen de diferentes sensores de resistencia de detección de fuerza: a) Tekscan Flexiforce A401–25 FSR. b) Sensor de fuerza Sandia Optical 3D. c) Interlink 402 FSR. d) Sensor Sandia Bubble. e) Sensor capacitivo de Perfiles de Presión C500; extraído de Dabling et al. [3].

Los objetivos de esta unidad didáctica se centran en:

- Los principales grupos de técnicas de análisis de fuerzas.
- Cómo funcionan estas técnicas y la información proporcionada por este equipo.
- Las principales ventajas y desventajas de su uso.
- Una breve descripción de las áreas donde se utilizan técnicas instrumentales dinámicas de análisis biomecánico.
- Algunos ejemplos de uso y sistemas basados en este tipo de técnicas instrumentales.

Para facilitar su estudio, a continuación, se propone una clasificación general de estas técnicas en función del objetivo de la medición (Figura 3).

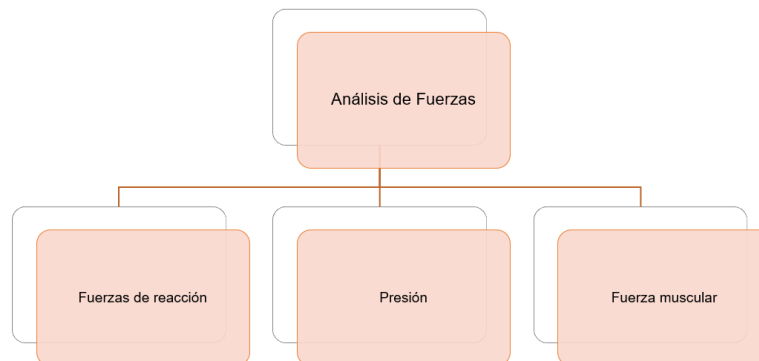


Figura 3 – Ejemplo de clasificación general de sistemas de análisis de fuerzas.

2. Fuerzas de reacción

A veces, es necesario evaluar las fuerzas ejercidas por el cuerpo humano en contacto con el suelo durante movimientos comunes como la marcha y la carrera. Por ello, el uso de técnicas instrumentales, como plataformas dinamométricas y acelerometría, genera resultados numéricos de la medición de impactos, amortiguamiento y registro de fuerzas de reacción.

Plataformas dinamométricas

Una plataforma dinamométrica es un dispositivo electrónico que nos permite analizar la carga que ejerce un sujeto sobre una superficie plana, generalmente a nivel del suelo. La fuerza más común que se ejerce sobre el cuerpo es la fuerza de reacción del suelo (GRF), que actúa sobre el pie durante diferentes movimientos como estar de pie, caminar o correr. Esta fuerza, de igual magnitud pero en sentido contrario a la aplicada por el individuo, es registrada y analizada por la plataforma dinamométrica. Las fuerzas son cantidades vectoriales, ya que no pueden ser determinadas solo por su valor: también es necesario conocer su dirección. Por tanto, serán representadas y tratadas como vectores. El vector de fuerza de reacción es tridimensional y consta de una componente vertical y dos componentes de corte que actúan sobre la superficie de la plataforma [2].

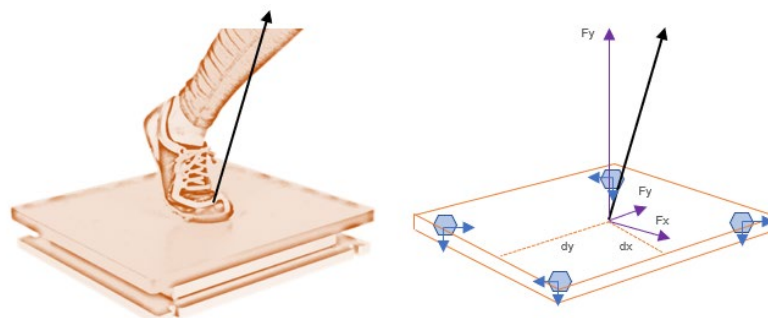


Figura 4 – Representación de la fuerza de reacción al pisar la plataforma de fuerza mediante cuatro galgas extensométricas; la fuerza se divide en los tres ejes del espacio, así como las coordenadas del punto de aplicación.

Las plataformas dinamométricas suelen estar compuestas por los siguientes elementos:

- Una superficie rígida, plana y estática ubicada a nivel del suelo, de dimensiones variables según el uso previsto.
- Sensores o transductores ubicados en la parte inferior de la plataforma para recopilar información sobre la carga aplicada.
- Software para analizar la señal de estos sensores y transformarla en resultados numéricos y gráficos interpretables.

En general, las plataformas actuales utilizan cuatro transductores triaxiales llamados células de carga, montados en un medidor de tensión o sensores piezorresistivos, ubicados en cada una de las cuatro esquinas de la plataforma. Un proceso de cálculo, que utiliza información de cada sensor, proporciona los tres componentes de la fuerza de reacción (F_x , F_y y F_z), el

momento de torsión en la plataforma (M) y las coordenadas del centro de presión (CoP), donde se supone que ocurre el punto de aplicación de la carga (Figura 4).

Durante el proceso de fabricación de este equipo, el coeficiente de conversión del sensor de voltios a fuerza se calcula antes de su uso, y luego se calibra el equipo para cuantificar el error de medición. Este proceso se realiza periódicamente según el fabricante como medida preventiva para asegurar la validez de las mediciones. Dado que fenómenos como la expansión, contracción o fricción afectan a estos sensores por su diseño mecánico, se suele realizar una tara inicial. Esta tara implica dar un valor cero al valor registrado por la plataforma antes de registrar las fuerzas del movimiento evaluado.

Dependiendo del uso previsto de estas plataformas, las características más importantes que se deben considerar son:

- Rango de medición. Cuanto mayor sea el alcance, mayor versatilidad, ya que la plataforma se puede utilizar con movimientos que implican grandes fuerzas (saltos, deportes) y pequeñas fuerzas (andar, estar de pie); sin embargo, aumentar el rango afecta la precisión del equipo.
- Sobrecarga. Se considera la fuerza máxima que puede soportar la plataforma, siendo ésta mayor que el rango de medición.
- Diafonía. Indica la medida de fuerza en un eje diferente al de la aplicación real. Cuanto menor sea la sensibilidad cruzada, menor será el error de plataforma.
- Frecuencia natural o resonancia mecánica. Cuanto mayor es la frecuencia, mayor es la sensibilidad a los cambios bruscos de fuerza, como los que se producen en los saltos o los movimientos deportivos rápidos. Sin embargo, es posible que una plataforma con una alta frecuencia natural no mida correctamente a bajas frecuencias. Es importante asegurarse de que la plataforma mida fuerzas constantes, desde una frecuencia de 0 Hz.

Este equipo también se puede montar en una cinta de correr, pero las plataformas son limitadas porque el tipo de placa de fuerza que se puede integrar en la cinta de correr generalmente mide solo las fuerzas en la dirección vertical en función del contacto de los pies con el suelo [1]. Además, también existen plataformas portátiles, que se pueden mover e instalar en diferentes entornos; sin embargo, puede resultar difícil estudiar algunos movimientos ya que no están incrustados en un foso para colocarlos a nivel del suelo.

Actualmente, los sistemas de plataforma dinamométrica son muy utilizados en diferentes campos como el ámbito clínico y el deportivo. Algunos ejemplos son *el Kistler 3D Force Plate* (<https://www.kistler.com/en/product/type-9281e/>), una plataforma de fuerza tridimensional basada en transductores piezoeléctricos de cuarzo; *AMTI Force Platform System* (<https://www.amti.biz/optima.aspx>), que ofrece una gama de plataformas basadas en galgas extensométricas para medir la fuerza en tres dimensiones; *Dinascan/IBV* (<http:// analisisbiomecanico.ibv.org/productos/tecnicas-de-registro/dinascan-ibv.html>) Plataformas dinamométricas tridimensionales con transductores de fuerza extensométricos ubicadas debajo de las cuatro esquinas de la plataforma y orientadas de dos en dos en las direcciones anteroposterior y mediolateral.

Parámetros

Los parámetros habituales extraídos de las plataformas de fuerza son el **punto de aplicación** en coordenadas 2D en relación al plano de medición, la **magnitud** en newtons (N) o kilogramos (kg) del **vector fuerza** en los ejes espaciales (x, y, z) (Figura 5), y el **momento de torsión en X (x) generado en la plataforma**.

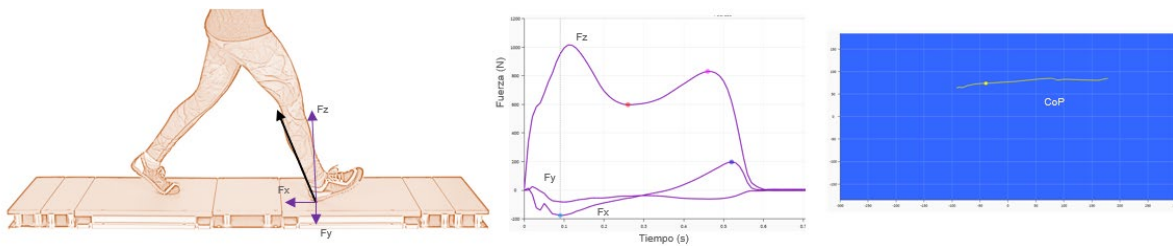


Figura 5 – Visualización de los tres componentes de la fuerza de reacción y representación del punto de aplicación (CoP) de la fuerza de reacción en la plataforma durante la marcha.

Ventajas y desventajas

A pesar de todas las características de este equipo, una plataforma de fuerza no puede proporcionar información sobre cómo se distribuye la fuerza de reacción en una superficie, como el pie. Por ello, se han desarrollado otros sistemas de análisis de distribución de fuerzas, como plantillas instrumentadas o plataformas de presión, que se describen más adelante en esta unidad.

En algunas áreas, como el ámbito clínico, se utilizan soluciones más económicas y versátiles a pesar de sus limitaciones, ya que este equipo implica altos costos y complejidad de uso. Uno de estos dispositivos es la plataforma Wii de Nintendo® (Figura 6). Este sistema utiliza una plataforma de fuerza (Nintendo® Wii Balance Board™) que proporciona información sobre el desplazamiento del centro de presión (CoP) en función del contacto de los pies con la plataforma. Cuatro sensores ubicados en las esquinas de la plataforma evalúan la distribución del peso estimando la posición de la CoP en el eje xy en el eje y registrando la fuerza de reacción vertical.



Figura 6 - Nintendo® Wii Balance Board™

Aunque este sistema ofrece menos funcionalidades que una plataforma dinamométrica tradicional, especialmente en lo que respecta a la evaluación de movimientos rápidos que implican una gran fuerza, como saltar y correr, abre un amplio abanico de usos, principalmente como herramienta para la rehabilitación del equilibrio, proporcionando información de interés el estudio de diferentes poblaciones, programas de formación, etc.

En los últimos años se han publicado numerosos trabajos en relación a sus aplicaciones clínicas, como el seguimiento de la mejora del equilibrio tras los programas de entrenamiento en poblaciones específicas, y sobre su validez y fiabilidad en la evaluación del control postural. En este sentido, diversos estudios evalúan las limitaciones y funcionalidades de este sistema en el ámbito clínico (Severini et al., 2017 "Uso de Nintendo Wii Balance Board para el análisis posturográfico de pacientes con esclerosis múltiple con deterioro mínimo del equilibrio"; Weaver et al., 2017 "Uso de la Nintendo Wii Balance Board para estudiar el control del equilibrio estático: consideraciones técnicas, congruencia de la placa de fuerza y el efecto de la duración de la batería"; Clark et al., 2018 "Fiabilidad y validez de la Wii Balance Board para la evaluación de equilibrio permanente: una revisión sistemática".)

Acelerómetros

Los acelerómetros son sensores que traducen la aceleración en una señal eléctrica. En general, su funcionamiento se basa en la inercia de una masa ubicada en un sensor de fuerza, siguiendo la segunda ley de Newton ($F = m \times a$) para obtener la aceleración.

El estudio de la aceleración que se produce en segmentos específicos nos permite cuantificar la transmisión (impacto, amortiguación, etc.) de las fuerzas de reacción en segmentos corporales específicos, así como estudiar funciones como la marcha y el equilibrio, y / o analizar y identificar actividades o movimientos específicos y su nivel de demanda. Dependiendo de la actividad o el objetivo del estudio, los acelerómetros se colocan en el objeto o segmento a evaluar uniéndolos al objeto a medir o en puntos específicos o regiones anatómicas que son claves para el estudio de ese movimiento o función. .

Hay tres clases comunes de acelerómetros: piezoeléctricos, piezorresistivos y capacitivos [4]. Tienen diferentes características en función de la aplicación prevista y las condiciones en las que tienen que trabajar. Este equipo de medida suele estar compuesto por un sensor, que mide los valores de aceleración de las vibraciones que recibe el cuerpo al que está adherido y transforma el parámetro físico (aceleración) en una señal eléctrica; un acondicionador de señal, que filtra y amplifica la señal del acelerómetro; y un sistema de análisis de datos, con una tarjeta de adquisición de los datos generados durante la medición y la capacidad de analizar dichos datos.

Hay acelerómetros que miden la aceleración en una dirección (monoaxial), dos (biaxial) o tres direcciones (triaxial). La selección de estos sensores depende del movimiento a evaluar, de los ejes de los que se extrae la información. También hay dos parámetros clave al seleccionar el sensor correcto: los rangos de operación de aceleración y frecuencia.

Con respecto a la aceleración, los acelerómetros piezorresistivos se utilizan en el estudio de la marcha humana por su excelente comportamiento en el rango de aceleración útil para la biomecánica (0 a 100 m/s²) y porque pueden medir bajas frecuencias, de 0 a 100 Hz. Estos acelerómetros pueden ser muy ligeros (5 g) y proporcionan una gran precisión. Su uso también es fundamental para el estudio del efecto amortiguador del calzado, ortesis o cualquier otro mecanismo, complemento o dispositivo (Figura 7)

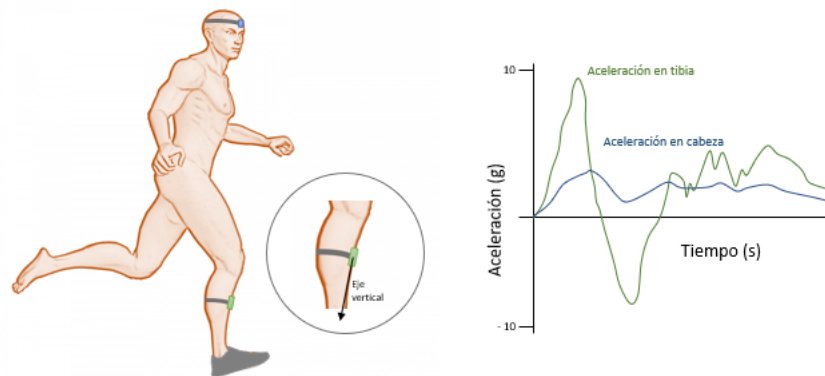


Figura 7 – Valoración de la absorción de impactos del calzado con 2 acelerómetros: uno situado en la frente (azul) y otro en la tibia (verde). Se observan picos de aceleración vertical en ambos acelerómetros en el tiempo de impacto y en la transición de carrera.

En cuanto a la frecuencia, las aceleraciones que se producen al saltar o correr no superan las 50 gravedades (g), por lo que no es recomendable utilizar acelerómetros de amplio rango, por ejemplo 500 g. Además, la precisión de un acelerómetro depende del rango de frecuencia a medir. Sin embargo, en un impacto o golpe accidental, se pueden alcanzar los 100 o 200 g. Por esta razón, los acelerómetros de hasta 500 g se utilizan en pruebas de accidentes automovilísticos con maniqués.

Actualmente, este tipo de sensores se pueden encontrar asociados a otros, como en la integración de lo que se denomina IMU (unidad de medida inercial), o en un dispositivo GPS (sistema de posicionamiento global), proporcionando información esencial o complementaria para obtener variables específicas, o en dispositivos móviles como un teléfono o un actígrafo.

Parámetros

Los parámetros que normalmente se extraen de un acelerómetro incluyen un componente inercial como la aceleración, aunque la conversión a fuerzas es fácil usando la fórmula $F = m \times a$, siendo la interpretación o análisis de los resultados más intuitivo; un componente estático, como la gravedad; y ruido, ya sea biológico o ambiental. El estudio de la aceleración nos permite cuantificar la frecuencia e intensidad del movimiento del cuerpo u objeto en los tres planos del espacio.

Un parámetro común al calcular la actividad física con un acelerómetro son los episodios o períodos de actividad. Los episodios permiten conocer el equivalente metabólico o MET en función de la magnitud de la aceleración en los tres ejes registrados en un intervalo de tiempo específico a lo largo del registro. Esto nos permite cuantificar el tipo de actividad en diferentes categorías, desde sedentaria hasta vigorosa.

Al procesar la señal de aceleración, también es posible obtener los eventos temporales que caracterizan un movimiento específico (Figura 8), como la marcha humana. En este caso, los picos de aceleración máxima se producen en el impacto del talón en el suelo. Dependiendo de la instrumentación, si se aplica en un pie o en ambos, o en otro segmento como el tronco, se pueden extraer parámetros como cadencia, tiempo de paso y balanceo, tiempo de doble apoyo, etc.

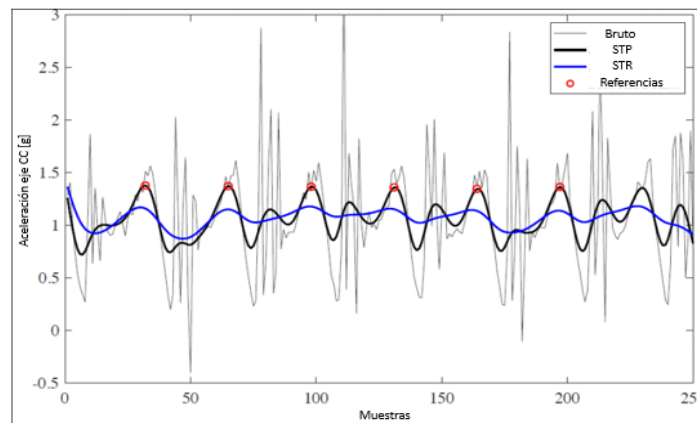


Figura 8 – Ejemplo de datos de diferentes pasos de la marcha obtenidos por un acelerómetro ubicado en la pierna: Raw (aceleración en el eje craneocaudal), STP (frecuencia de paso), STR (frecuencia de paso); extraído de Gurchiek et al. [5].

Ventajas y desventajas

La capacidad de estos sensores para cuantificar la aceleración, junto con su bajo consumo energético y su reducido tamaño, nos permite estudiar el movimiento de forma dinámica; Asimismo, dado que también reaccionan a la fuerza gravitacional, se pueden estudiar estáticamente las inclinaciones con respecto a la vertical, funcionando como inclinómetro, para analizar la postura corporal, por ejemplo.

La inexactitud de la ubicación del sensor, su ubicación en el tejido blando o el movimiento asociado de la interfaz entre el sensor y el segmento/objeto, condicionan la precisión y fiabilidad del sistema de medición. Además, si el sensor está ubicado demasiado cerca del centro de rotación, la amplitud de la señal registrada puede ser diferente [6].

Sin embargo, el grado de precisión requerido depende de lo que se esté midiendo. Por ejemplo, determinar la amortiguación del material a través de la instrumentación de la tibia no requiere la misma precisión que identificar y caracterizar movimientos como caminar o levantarse de una silla.

La fiabilidad y validez de las mediciones están sujetas a procesos de filtrado de señales y/o, si no hay procesos de calibración o recalibración del sensor, una desviación de la señal causada por cambios de temperatura o fluctuaciones generales en la ganancia o desgaste mecánico [7].

Como se discutió anteriormente, estos sensores son parte de unidades de medición inercial (IMU), junto con giroscopios y acelerómetros. Esto nos permite no solo obtener información sobre el movimiento, sino también evaluar las fuerzas de reacción que ocurren durante actividades específicas. Por ejemplo, hay algunos equipos disponibles en el mercado que pueden evaluar la marcha en carrera combinando variables cinemáticas y temporales, así como aquellas relacionadas con las fuerzas de impacto (Figura 9).



Figura 9 – Sistema de sensor de inercia GaitUp® para analizar la marcha al correr. El sensor está ubicado en la zona del antepié del corredor. Extraído de <https://gaitup.com/running-analysis/physirun-lab/>

3. Presión

Cuando el registro de las fuerzas de reacción es insuficiente para evaluar la distribución de fuerzas de una superficie corporal específica en contacto con un objeto, es necesario desarrollar un equipo para medir la presión y proporcionar información sobre cómo se distribuyen las presiones alrededor de todos los puntos de contacto [2]. La medición de la interfaz entre los tejidos blandos del cuerpo y diferentes dispositivos mecánicos es muy útil tanto para la investigación como para el desarrollo de aplicaciones clínicas. Por ejemplo, estudiar la distribución de la presión en las superficies internas de los encajes de prótesis, ortesis o plantillas correctivas con el fin de evaluar la comodidad, corrección o riesgo de complicaciones por picos de presión que potencialmente pueden causar úlceras o ampollas.

Los métodos tradicionales utilizados para analizar la presión son principalmente sistemas estáticos que no pueden determinar la forma o carga de la superficie durante la operación. Por lo general, se basan en moldes que se deforman con la carga o el peso, o con el análisis de imágenes. Estos sistemas tradicionales están destinados principalmente al análisis de presiones en la planta del pie. Incluyen:

- Podoscopio tradicional. Es un dispositivo que sirve para diagnosticar, visualizar y estudiar huellas y los diferentes ejes del pie. Se utiliza para la adquisición de huellas estáticas. El modelo tradicional está compuesto por una superficie transparente calibrada, que es el soporte del sujeto evaluado. Hay dos espejos debajo de esta superficie en una posición fija a 45° con respecto a la superficie transparente. Tiene una fuente de luz dirigida a la zona de apoyo del vidrio que aumenta el contraste con la zona que no está en contacto con el vidrio.
- Podoscopio computarizado. Este es un escáner debajo de una placa de vidrio que captura con precisión la forma del pie en 2D mientras se mueve en una dirección. El software asociado a este sistema proporciona un análisis digital de las medidas de huellas dactilares obtenidas.

Recientemente, se han desarrollado sistemas de análisis dinámico basados en sensores de resistencia de detección de fuerza modernos para registrar la distribución de la presión durante el desempeño de un segmento del cuerpo.

Los componentes básicos de estos sistemas de presión son:

- El **sensor de presión**, que mide y registra la cantidad física. Normalmente se define como el elemento que entra en contacto directo con la cantidad que se va a evaluar. El sensor recibe la cantidad física y la envía al transductor.
- El **transductor**, que normalmente se incluye en el sensor. Transforma la señal enviada por el sensor en otro tipo de señal, normalmente eléctrica, tanto de voltaje como de corriente, proporcional a la presión registrada por el sensor.
- Un sistema de recolección de datos con tarjeta de adquisición y software adaptado que calcula y representa los datos.

Los sensores más utilizados en este tipo de sistemas son sensores capacitivos, piezoeléctricos, resistivos y piezorresistivos. Las características de cada uno de ellos determinan su uso en función del objetivo de la evaluación.

Las especificaciones que se deben considerar para evaluar la idoneidad de un sensor de presión con respecto a los requisitos y limitaciones de su aplicación son la **linealidad**, que expresa la relación lineal entre voltaje y corriente; **histéresis**, que se refiere a la diferencia entre los valores de salida de una misma entrada, según el camino seguido por el sensor; **estabilidad térmica**, entendida como el comportamiento del sensor ante cambios de

temperatura; **precisión; rapidez de respuesta; repetibilidad; tamaño y rango de medición de presión.**

Los requisitos del sensor de presión para una aplicación específica son baja histéresis, linealidad adecuada de salida y rango de presión. Un rango de presión recomendado para el análisis de la marcha es de aproximadamente 1,00 kPa, pero para los deportes el rango de presión debería ser mayor debido a la naturaleza de los movimientos [8].

El equipamiento mostrado en esta unidad se clasificará según el objetivo: el estudio del pie descalzo o en calzado, y en relación al estudio de otros segmentos corporales. La resolución espacial, la frecuencia de adquisición, la sensibilidad, la precisión y la calibración son características determinadas por el uso previsto, que influye en su diseño.

Plataformas de presiones

La determinación objetiva de las presiones plantares y su ubicación exacta en la planta del pie durante la fase de apoyo del ciclo de la marcha es fundamental en la evaluación diagnóstica y la planificación del tratamiento de pacientes con trastornos dolorosos o sensibilidad en el pie.

Las plataformas de presión consisten en una superficie plana rígida en la que los sensores se distribuyen uniformemente en forma de matriz de tal manera que pueden registrar presiones con el mismo grado de precisión en toda la superficie de medición.

Este tipo de plataformas se utiliza normalmente para analizar el comportamiento del pie durante la marcha. Para realizar esta prueba, el sujeto debe caminar descalzo en línea recta una distancia mínima de 9 metros, proporcionando un número mínimo de 3 a 5 pasos en la plataforma. Esto significa que la recopilación de datos requiere varios pasos en la plataforma sin errores.

Plantillas instrumentadas

Las plantillas instrumentadas consisten en una serie de sensores distribuidos en la superficie de una plantilla flexible ubicada dentro del zapato para medir las presiones en la interfaz entre el pie y el zapato (Figura 10).

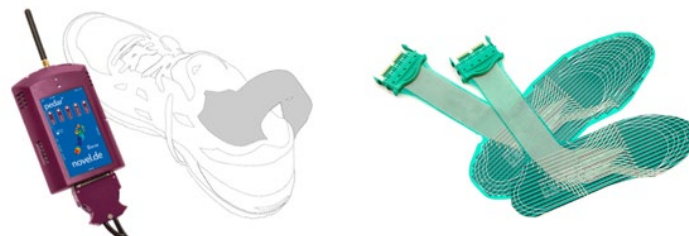


Figura 10 – Ejemplos de sistemas de análisis de presión plantar que utilizan una plantilla instrumentada Pedar © de Novel <https://www.novel.de/products/pedar/> (izquierda) y el F-Scan System © de Tekscan <https://www.tekscan.com/productos-soluciones/sistemas/f-scan-system> (derecha).

Las plantillas aportan datos cuantitativos y clínicamente útiles para la valoración funcional de la marcha, dolor plantar, prescripción y validación de ortesis de miembros inferiores, tanto en patologías musculoesqueléticas (traumáticas o no) como en patologías neurológicas, o prevención y seguimiento de úlceras en neuropatías como la diabética. neuropatía.

Este sistema está compuesto por sensores incrustados en las plantillas que recogen la cantidad y la transforman en una señal eléctrica; un amplificador de señal, que acondiciona la señal a niveles adecuados para que puedan ser adquiridos por el equipo de adquisición que realiza los cálculos y muestra los resultados. Debido a la naturaleza de los movimientos evaluados, estos sistemas transmiten los datos a través de Bluetooth/wi-fi, o integran dispositivos de memoria que registran, guardan y permiten descargar los datos para su análisis.

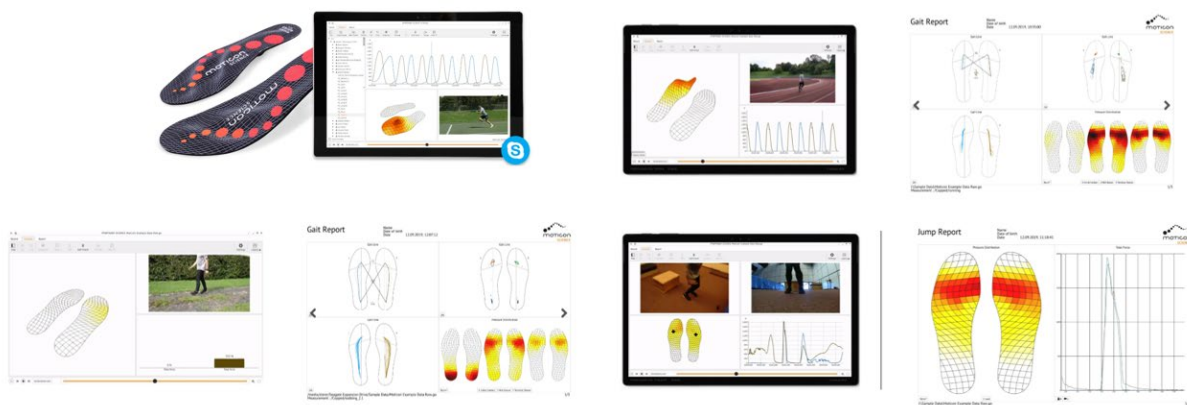


Figura 11- Ejemplo del sistema de plantillas Moticon Sensor Foot Dynamics® para análisis de presión en diferentes movimientos e información gráfica obtenida: marcha (abajo a la izquierda), carrera (arriba a la derecha) y salto con caída (abajo a la izquierda); extraído de <https://www.moticon.de/apps-overview/#outcomes>

La instrumentación y la portabilidad de estos sistemas permiten realizar mediciones como la marcha humana y la carrera en diferentes entornos y condiciones (Figura 11), a menudo fuera del contexto del laboratorio. Proporciona información relevante sobre el comportamiento de

los materiales y el diseño del calzado, superficies, técnica deportiva, tratamientos ortopédicos o efectos de diferentes intervenciones en patologías traumáticas o neurológicas.

Parámetros

Los parámetros habituales relacionados con el análisis de presión, en este caso asociados al apoyo plantar, incluyen la representación de las curvas de presión de cada sensor durante el tiempo de apoyo; la presión máxima registrada por un sensor; la presión media registrada por un sensor o conjunto de sensores en un área específica, normalmente asociada con una región anatómica como el talón o el área del metatarso; cálculo de la posición del centro de presión (CoP) y su excursión durante todo el apoyo; el cálculo de la fuerza vertical resultante, como resultado de integrar la información de cada sensor en el tiempo; etc., así como información relevante como la cadencia, el tiempo de apoyo o la estimación de ángulos como el ángulo de progresión de la marcha, etc.

Ventajas y desventajas

Es necesario considerar una serie de ventajas y desventajas a la hora de seleccionar un sistema como una plataforma o plantillas para realizar las mediciones. Algunos de ellos se enumeran a continuación:

- Número de sensores, también conocido como resolución espacial. Una de las ventajas de utilizar una plataforma de presión es la gran cantidad de sensores distribuidos en matriz, que proporcionan información sobre todas las áreas del pie y facilitan el cálculo de la fuerza vertical. La resolución de las plantillas es menor que en las plataformas de presión, pero aportan información sobre la interacción pie-zapato que la plataforma no ofrece y que puede ser de gran relevancia clínica, por ejemplo, a la hora de valorar el correcto funcionamiento de una órtesis.
- Los materiales de las plantillas, como polímeros o elastómeros, la posibilidad de que el sensor se resbale y las condiciones de calor y humedad dentro del zapato pueden alterar el comportamiento del sensor y afectar la repetibilidad.
- Para obtener resultados fiables, es necesario recopilar un número mínimo de pasos para realizar los cálculos. Un problema asociado a las medidas de la plataforma es la "orientación" de la plataforma por parte del paciente evaluado, lo que significa que el paciente altera el patrón de marcha para colocar su pie en contacto con la plataforma y, en consecuencia, también se alteran los resultados obtenidos.
- Las plantillas permiten medir la marcha, y muchos otros movimientos, fuera de un ambiente controlado, lo que nos permite evaluar sujetos con alteraciones como patologías neurológicas que impiden el movimiento natural y el apoyo en la plataforma.
- Una de las principales limitaciones de ambos dispositivos y fuente de innovación en esta tecnología es la obtención de medidas fiables de presiones tangenciales debidas a movimientos de torsión o cizallamiento. Este tipo de presión se ejerce tangencialmente a la superficie y por tanto la dirección de su aplicación es paralela a la superficie.

Otros sistemas

Además del análisis de la presión del pie, existen otros análisis de presión relacionados con otras partes del cuerpo. Por este motivo, se han desarrollado equipos basados en los mismos sensores de presión para adaptarse al objetivo del estudio.

Esterillas de presión

Los sensores de presión también se pueden utilizar para determinar la presión ejercida por un segmento o todo el cuerpo en diferentes superficies. Al evaluar grandes superficies con diferentes perfiles o firmeza, se utilizan esteras de presión. Las esteras de presión están fabricadas con materiales de tipo textil, adaptables a estas superficies, donde los sensores de presión se insertan en una matriz.

Estos tapetes se utilizan, por ejemplo, para evaluar las superficies de las sillas de ruedas (Figura 12) con el fin de evaluar la reducción de las presiones nocivas sostenidas en el tiempo que pueden causar problemas de ulceración. En este sentido, también son muy utilizados para analizar superficies de cama (Figura 12) con pacientes encamados, o para determinar la distribución de presión de la persona sobre diferentes diseños de firmeza y colchón en busca de higiene y comodidad postural.



Figura 12 – Ejemplos de colchonetas de presión Xsensor © para evaluar la superficie de sillas de ruedas y camas, imágenes extraídas de <https://xsensor.com/applications/wheelchair-seating/> y <https://xsensor.com/applications/mattress-design-rd/>

Guantes de presión

En este caso, los sensores incrustados en los guantes se utilizan para medir la distribución de la presión en diferentes áreas de la mano en diversas acciones que afectan las actividades de la vida diaria, como agarrar, pellizcar los dedos (Figura 13), o durante el uso de algunas herramientas o dispositivos. , en el campo de la ergonomía del trabajo (Figura 13).



Figura 13 – Ejemplo de un sistema de análisis de presión en Tactile Glove - Hand Pressure Measurement por PPS ©, imágenes extraídas de <https://pressureprofile.com/body-pressure-mapping/tactile-glove>

En el ámbito deportivo, muchos deportes utilizan dispositivos o herramientas como raquetas, palos, remos, palos de golf, etc., o las manos como elemento para disparar, golpear o detener la pelota, como en el voleibol, balonmano, etc.

Este equipo puede evaluar la presión de los impactos, la presión en cada región anatómica y la evolución de la presión palmar o digital a lo largo del tiempo. Este tipo de análisis evalúa la funcionalidad durante actividades que implican presión en el miembro superior y estudia la influencia de las vibraciones provocadas por el equipamiento deportivo [10].

4. Fuerza muscular

Cuando es necesario cuantificar la respuesta de un músculo o un grupo de músculos a una solicitud externa, se utilizan técnicas instrumentales para registrar la fuerza que ejercen, como los **dinamómetros** y equipos **isocinéticos convencionales**, u otros sistemas que cuantifican la fuerza ejercida durante un ejercicio. movimiento específico.

Dinamómetros

Un dinamómetro es un dispositivo estático que se utiliza para medir fuerzas o pesar objetos. El dinamómetro tradicional, inventado por Isaac Newton, basa su funcionamiento en el alargamiento de un resorte que sigue la ley de elasticidad de Hooke, que establece que "la deformación de un material elástico es directamente proporcional a la fuerza aplicada". Así, conociendo la constante de deformación del resorte y el desplazamiento, y aplicando esta ley, se puede conocer la fuerza aplicada [11]. Sin embargo, este tipo de dinamómetro no nos permite conocer la evolución de la fuerza a lo largo del tiempo.

Existen varios tipos de dinamómetros: hidráulicos, neumáticos, mecánicos, etc., que se han vuelto habituales en el ámbito clínico o deportivo. Es el caso de la evaluación de la fuerza de la mano, donde el uso de este tipo de dinamómetro está muy extendido (Figura 14), debido a su portabilidad, facilidad de uso y bajo costo, aunque su resolución y precisión no son las adecuadas en algunos casos y estudios. .



Figurea14 –Ejemplos de dinamómetros (de izquierda a derecha): resorte mecánico (dinamómetro manual Saehan Smedley), neumático (dinamómetro manual Saehan), hidráulico (dinamómetro manual hidráulico Baseline®) e hidráulico digital (dinamómetro manual digital Jamar Plus +).

Los diseños se han variado y mejorado en función de las necesidades y de los segmentos o grupos musculares que se pretenden medir. Actualmente se utilizan dinamómetros electrónicos, que han sustituido a los resortes por elementos como células de carga o galgas. También realizan medidas de fuerza y deformación, tanto absolutas como en el tiempo, no solo en posición estática o isométrica, sino también en movimiento o de forma isotónica, analizando el rendimiento muscular tanto concéntrico como excéntrico.

El objetivo de esta unidad didáctica es mostrar algunos de estos dinamómetros clasificados según sean estáticos o dinámicos.

Dinamómetros convencionales

Estos dinamómetros se pueden definir como equipos estáticos, ya que solo pueden medir fuerzas u otras cantidades como presiones o momentos sin movimiento. Proporcionan una medida con el segmento corporal que se va a evaluar en una posición fija registrando el resultado de una contracción isométrica del grupo o grupos musculares solicitados.

Dinamómetros portátiles

Estos dinamómetros no son fijos y necesitan la participación del examinador. En la dinamometría manual, el examinador toma el dispositivo con la mano y lo aplica directamente al segmento de la articulación a evaluar para resistir la fuerza ejercida por dicho grupo de músculos en la dirección adecuada. La bibliografía describe diferentes protocolos para este tipo de valoración muscular, tanto de miembros superiores como inferiores (Figura 15), que, en general, buscan posiciones que neutralicen el efecto de la gravedad.



Figura 15 – Ejemplo de un dinamómetro digital manual: microFET@2 de Hoggan Scientific ©, imágenes extraídas de <https://hogganscientific.com/product/microfet2-muscle-tester-digital-handheld-dynamometer/>

Una vez colocado correctamente el dinamómetro, los pacientes ejercen una fuerza progresiva contra el dispositivo durante unos segundos hasta alcanzar su máxima capacidad muscular, mientras que el examinador resiste esta fuerza sin moverse, y sin ejercer una fuerza mayor que la producida por el sujeto en para obtener una contracción isométrica, es decir, sin desplazamiento articular.

La validez y fiabilidad de estas medidas dependen, en la mayoría de los casos, de la reproducibilidad del protocolo de medida y de la capacidad del examinador para resistir correctamente la fuerza ejercida por el sujeto evaluado. Para mejorar este aspecto también se utilizan sistemas para estabilizar los segmentos a evaluar. A pesar de ello, la bibliografía incluye estudios que describen que los resultados obtenidos con el dispositivo manual se correlacionan significativamente con los obtenidos con un dinamómetro isocinético y con la realización de diversas actividades funcionales como sit-to-stand (STS), caminar y subir escaleras [12].

Dinamómetros de mano

La principal diferencia entre estos dinamómetros y los anteriores es su diseño y finalidad, que es exclusivamente la valoración de la fuerza de agarre de la mano y, en algunos casos, la fuerza de pellizco.

El sujeto puede utilizar estos instrumentos sin la ayuda del examinador. En algunos casos, su diseño les permite adaptarse a diferentes antropometrías de la mano y / o evaluar diferentes posiciones de agarre. Sin embargo, al igual que los dinamómetros de mano, para garantizar la fiabilidad de los resultados, se deben seguir estrictos protocolos de posicionamiento y las instrucciones proporcionadas por el examinador.

La mayoría de ellos miden los valores máximos de fuerza de agarre, donde solo hay un grado de libertad y falta versatilidad para evaluar diferentes actividades relacionadas con la función de la mano. Sin embargo, la evaluación de la fuerza máxima de agarre es un parámetro muy utilizado en la actualidad, no solo para determinar la capacidad muscular de la mano, sino porque se relaciona en muchos estudios con diferentes capacidades clínicas, psicológicas y fisiológicas, especialmente en los ancianos. Así, se puede utilizar fácilmente como indicador en estudios o procesos relacionados con el envejecimiento, seguimiento de lesiones, rehabilitación o procesos terapéuticos en diferentes áreas.

Algunos de ellos, basados en galgas extensométricas e incluyendo software de procesamiento de señales, muestran gráficamente variaciones de fuerza a lo largo del tiempo, lo que nos permite evaluar, por ejemplo, pendientes de fuerza y fatiga muscular (Figura 16).



Figura 16 – Ejemplo de dinamómetros electrónicos basados en galgas extensométricas para medir la fuerza de agarre y pellizco, así como la fatiga muscular: (arriba) dinamómetros con cable e inalámbricos de Vernier ©, imágenes extraídas de <https://www.vernier.com/products/sensors/hand-> Dinamómetros /, (abajo) ejemplo del dinamómetro NedVEP / IBV asociado con el software NedMano / IBV, que proporciona representaciones de las repeticiones de fuerza máxima de agarre de la mano derecha (rojo) y la mano izquierda (azul).

Dinamómetros isocinéticos

Son dispositivos dinámicos ya que miden fuerzas u otras cantidades como momentos de giro, con el cuerpo en movimiento y generando desplazamiento. Este equipo proporciona una medición de tales cantidades según el tiempo y el tipo de movimiento, ya que el equipo se mueve con el cuerpo al que está adherido o fijado.

Estos dinamómetros resisten la fuerza muscular ejercida por el sujeto en forma de giro (torque) controlando la velocidad de ejecución a una frecuencia específica. Para mantener una velocidad de rendimiento constante, la resistencia generada por el equipo varía en función de

la fuerza aplicada por el sujeto. Por ejemplo, cuando el sujeto ejerce una fuerza que podría generar una velocidad superior a la seleccionada, el dinamómetro aumenta la resistencia para que actúe como freno y se mantenga la velocidad estable. Si la fuerza desarrollada es menor que la fuerza necesaria para mantener el movimiento a la velocidad establecida, el equipo disminuye la resistencia para ayudar a mantener la velocidad. Estos instrumentos proporcionan información sobre la fuerza aplicada en todo el rango de movimiento [13].

Los primeros dinamómetros isocinéticos de la década de 1960 consistían en una estructura que contenía un pistón hidráulico, una válvula controlable, un brazo de palanca y una celda de carga, que presentaban resistencia pasiva en todo el rango de movimiento de la articulación. Posteriormente se realizaron mejoras en los denominados dinamómetros isocinéticos activos que incluían una fuente de energía activa más grande en forma de motor eléctrico y un ordenador. Además, incluyen un potenciómetro montado en el eje de rotación, que proporciona información sobre el ángulo y, en algunos casos, un tacómetro independiente que mide la velocidad angular [14].

De esta forma, las capacidades de un músculo se pueden medir de forma isométrica, concéntrica y excéntrica bajo diferentes condiciones obteniendo información sobre la señal de fuerza y los momentos en tiempo real tanto en forma numérica como gráfica [15].



Figura 17 – Ejemplos de equipo dinamométrico isocinético (de izquierda a derecha): evaluación de codo y rodilla utilizando System 4 Pro™ de Biodex™, imágenes extraídas de <https://www.biodex.com/physical-medicine/products/dynamometers/system-4-pro/>; y evaluación de la columna cervical utilizando la unidad MCU Multi-Cervical de BTET™, imagen extraída de <https://www.btetechnologies.com/rehabilitation/mcu/>

Este equipo se utiliza para evaluar las articulaciones de los miembros superiores e inferiores y la columna (Figura 17), siendo la rodilla una de las primeras articulaciones en ser estudiadas con esta metodología. Una prueba isocinética común para evaluar la capacidad muscular máxima implica realizar tres o cuatro contracciones consecutivas después de un período de familiarización con el dispositivo y un calentamiento previo.

Se deben tener en cuenta algunos factores a la hora de utilizar esta técnica de medición, como los relacionados con el sujeto (edad, sexo, etc.), el equipo utilizado y el protocolo de medición. La valoración mediante este tipo de dinamómetro está altamente protocolizada, ya que el sujeto debe estar correctamente posicionado y las articulaciones a evaluar deben estar alineadas con precisión con los ejes de rotación del dinamómetro para obtener una correcta valoración; por lo tanto, el profesional que realiza la evaluación debe estar capacitado para realizarla correctamente e interpretar los resultados.

Dado que varían la resistencia y se adaptan al estímulo de sobrecarga más alto en todo el rango de movimiento de la articulación, estos dinamómetros no solo se utilizan como sistemas de medición, sino también como herramientas de rehabilitación y entrenamiento para el acondicionamiento muscular.

En los últimos años, la investigación relacionada con la aplicación de la dinamometría isocinética se ha centrado en aspectos metodológicos como el diseño del protocolo y la reproducibilidad de los resultados de las pruebas, su aplicación en grupos específicos de sujetos y / o pacientes, y su implementación en el campo médico-legal [15].

Parámetros

Los parámetros que se suelen extraer de este equipo son los relacionados con la fuerza. El principal resultado que proporciona el equipo dinamométrico convencional es el valor absoluto de la fuerza muscular máxima, generalmente expresada en Newtons. A partir de este valor es posible obtener la **fuerza media** (media de la fuerza muscular máxima realizada en diferentes repeticiones), variabilidad de las medidas utilizando, por ejemplo, el **coeficiente de variación** (desviación estándar de las fuerzas máximas con respecto a la fuerza media expresado como porcentaje), o el **índice de pérdida de fuerza** con respecto al grupo muscular evaluado de la extremidad contralateral.

Los dispositivos isocinéticos proporcionan información sobre el valor absoluto de la fuerza muscular máxima (N) ejercida en cada punto del rango articular, el **momento de torsión o torque** (Nm) y la **velocidad angular** (m/s) a la que se realizó la prueba. El **valor máximo del momento / fuerza** en la curva de la posición del ángulo con respecto al momento (MAP) (Figura 18) se considera la medida estándar en los ensayos isocinéticos.

Además, los resultados de una evaluación isocinética generalmente se expresan como una comparación o un porcentaje. Los parámetros que se calculan habitualmente son **comparaciones bilaterales** (diferencia de fuerza entre miembro dominante/contralateral y / o miembro sano / patológico), comparaciones **secuenciales** (diferencias entre dos periodos o situaciones diferentes), comparaciones con **curvas tipo** del torque, comparaciones entre **grupos de músculos opuestos**, comparaciones entre el trabajo **concéntrico y excéntrico** y comparaciones de la fuerza ejercida **a diferentes velocidades**.

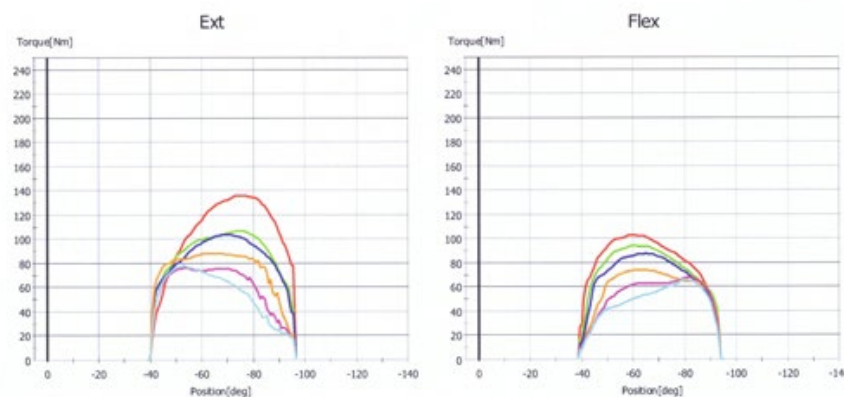


Figura 18 – Ejemplo de una representación de la curva MAP de un movimiento de extensión (izquierda) y un movimiento de flexión (derecha), imagen extraída de <https://www.isokinetics.net/index.php>

Ventajas y desventajas

Las ventajas de los sistemas dinamométricos manuales incluyen portabilidad, bajo coste y facilidad de uso en comparación con los sistemas dinamométricos isocinéticos.

Una de las principales desventajas del uso de dinamómetros de mano es la influencia del examinador en la fiabilidad de las mediciones. Para la evaluación de grupos musculares debilitados o lesionados, los resultados, validez y reproducibilidad son adecuados; pero esto puede variar dependiendo de la fuerza del examinador, la variabilidad de la colocación del dinamómetro perpendicular a la dirección de la fuerza y el grupo muscular evaluado; por ejemplo, los resultados obtenidos para el miembro inferior suelen ser menos reproducibles que los del miembro superior, donde la mayor fuerza generada es mayor.

Los sistemas isocinéticos tienen una serie de ventajas sobre los sistemas dinamométricos portátiles convencionales, como la seguridad del sujeto durante la ejecución del movimiento frente a una resistencia acomodativa, protocolos estrictos y bien definidos, la capacidad de adaptarse a la resistencia, la selección de la actuación, velocidad, y la valoración de la fuerza muscular mediante trabajos concéntricos y excéntricos, así como un trabajo isométrico.

Además, nos permiten objetivar las curvas de fuerza / rango de movimiento y comparar los diferentes valores obtenidos dentro de un examen, así como con los de otros exámenes. Es un dispositivo preciso para evaluar la función muscular en su conjunto o en diferentes puntos del rango articular.

Sin embargo, la interpretación de los resultados de fuerza obtenidos con el equipo isocinético no está exenta de dificultades; otras desventajas incluyen la influencia de los períodos de aceleración / desaceleración, la influencia de la variabilidad de las mediciones en el cálculo de ciertos parámetros o la falta de procedimientos estandarizados a pesar de la investigación intensiva y los esfuerzos generalizados para optimizar las pruebas.

Algunos estudios también argumentan que la fuerza dinámica medida por este equipo tiene poca relación con el estado funcional del paciente después de un procedimiento conservador o quirúrgico.

5. Principales áreas de aplicación

Las técnicas instrumentales de análisis de fuerzas permiten conocer cómo se produce el movimiento humano mediante el análisis de diferentes variables. El análisis de fuerzas proporciona información sobre por qué ocurre un movimiento y complementa el análisis descriptivo del movimiento proporcionado por la información cinemática. Las variables de estudio se determinan en los procedimientos de medición seleccionados para caracterizar el objetivo del estudio.

Estas metodologías de análisis biomecánico instrumentado se implementan en algunas áreas en el día a día debido a las mejoras de estas tecnologías en cuanto a portabilidad, incorporación a materiales textiles y conectividad con aplicaciones móviles, como es el caso de los sistemas de análisis de presión. Sin embargo, es importante especificar correctamente las características técnicas de los equipos, procedimientos de uso, fiabilidad y validez en relación con las aplicaciones a las que están destinados para evitar un uso inadecuado por parte de profesionales, docentes o usuarios finales.

Las áreas de uso más habituales son las relacionadas con el ámbito clínico, el deporte y la ergonomía. Algunos de los casos de aplicación más comunes en estas áreas se enumeran a continuación.

Entorno clínico

Dentro del campo clínico, las principales aplicaciones y usos de estas técnicas son:

- Caracterizar los movimientos normales y propios de patologías específicas, tanto neurológicas como musculoesqueléticas, especialmente en relación con la marcha.
- Cuantificar objetivamente la capacidad funcional de la persona para realizar actividades de la vida diaria y determinar el grado de alteración.
- Planificar las estrategias de rehabilitación, monitorear su avance y adaptarlas.
- Para ayudar a tomar decisiones sobre si continuar, modificar o finalizar un tratamiento.
- Ayudar a implantar y adaptar órtesis y / o ayudas técnicas.
- Obtener indicadores del efecto de un procedimiento para mejorar la eficiencia de los procesos actuales.
- Establecer pautas y monitorear mediante tecnologías portátiles que mejoren la adherencia y motivación de las personas en procesos específicos relacionados con la salud.

Deportes

Dentro del ámbito deportivo, las principales aplicaciones y usos de estas técnicas son:

- Controlar la técnica deportiva y mejorar el rendimiento corrigiendo cuantitativamente errores y deficiencias en los movimientos técnicos.
- Apoyar a los profesionales en sus técnicas de entrenamiento valorando la asimilación del entrenamiento por parte del deportista.

- Identificar los factores de riesgo de lesiones específicas asociadas a variables anatómicas, técnicas y las características físicas y comportamientos de los materiales utilizados en la práctica deportiva.
- Evitar lesiones asesorando sobre cómo realizar las técnicas deportivas de forma segura, en base a la información que brindan estas técnicas.
- Realizar un seguimiento de la evolución de diversas variables de interés en el proceso de rehabilitación deportiva, que ayuden a la recuperación y adaptación a la práctica deportiva.

Ergonomía

Las principales aplicaciones de las técnicas instrumentales en el campo de la ergonomía en el lugar de trabajo y el diseño de productos son:

- Evaluación / descripción del riesgo musculoesquelético asociado a un trabajo.
- Caracterización de posiciones repetitivas y movimientos articulares involucrados en un trabajo específico.
- Identificación de patrones de comportamiento provocados por fatiga muscular y sobrecarga en tareas relacionadas con el trabajo.
- Ayuda en el rediseño y validación de trabajos y productos.
- Evaluación de dispositivos y ayudas externas en el contexto laboral.
- Desarrollo de producto bajo criterios ergonómicos.

6. Ejemplos

En este apartado se incluyen algunos ejemplos de estudios y aplicaciones destinados a nivel profesional o de usuario, que utilizan diferentes técnicas instrumentales para el análisis del movimiento en línea con los objetivos descritos anteriormente.

En los últimos años se han publicado un número cada vez mayor de artículos de investigación **clínica** relacionados con el análisis biomecánico, lo que muestra un interés creciente en la información diferenciadora extraída de estas técnicas. Esta información se aplica principalmente en áreas asociadas a la evaluación funcional de las capacidades de las personas, caracterización de diversas patologías, establecimiento y planificación de una rehabilitación, etc., en su mayoría relacionados con las fuerzas de reacción y presiones generadas en la marcha humana y en el mantenimiento del equilibrio, así como la valoración de las diferentes manifestaciones de la fuerza muscular.

Rehabilitación

El actual aumento de la esperanza de vida provoca el envejecimiento de un mayor porcentaje de la población. Esta población demandará más asistencia sanitaria por la pérdida progresiva de sus capacidades funcionales asociada al riesgo de disminuir su funcionalidad o padecer patologías neuromusculares. Esta pérdida funcional, por ejemplo, está asociada al riesgo de caídas con importantes consecuencias para la calidad de vida de las personas. Esto afecta a los sistemas de salud, ya que su capacidad asistencial puede verse reducida significativamente.

En este contexto, se buscan soluciones a través de nuevas tecnologías de bajo costo que brinden alternativas a los tratamientos hospitalarios y permitan el monitoreo y control remoto. Los sistemas que registran movimientos y fuerzas, generalmente en un entorno basado en videojuegos, permiten implementar ejercicios de entrenamiento y rehabilitación, y monitorear los avances. El número cada vez mayor de estas iniciativas en el ámbito clínico proporciona pruebas de su eficacia. Una de estas razones es la capacidad de generar adherencia a los tratamientos debido al componente tecnológico y lúdico que brindan estas herramientas.

Como ejemplo, el uso de la Nintendo © Wii Balance Board (WBB) está cada vez más extendido dentro de la comunidad clínica por sus múltiples ventajas como precio, portabilidad y rendimiento, que es comparable al de equipos de mayor costo, especialmente en rehabilitación. La mayoría de propuestas de pautas y formación en rehabilitación que utilizan esta plataforma están destinadas a pacientes con patologías neurológicas (hemiplejía, Parkinson, Alzheimer, daño cerebral, etc.) o vestibulares. El trabajo de Llorens et al. [16] "Rehabilitación del equilibrio utilizando ejercicios de Wii Balance Board hechos a medida: efectividad clínica y mantenimiento de ganancias en una población con lesión cerebral adquirida" estudia si el entrenamiento con ejercicios de rehabilitación personalizados utilizando la plataforma de fuerza (Figura 19) mejora el equilibrio en una muestra de sujetos con daño cerebral adquirido y si este efecto perdura en el tiempo en ausencia de este entrenamiento. Una de sus conclusiones indica que la realización de ejercicios con este equipo aporta efectos beneficiosos duraderos en la muestra estudiada en comparación con un grupo control que utiliza tratamientos convencionales.



Figura 19- Pacientes interactuando con el prototipo del sistema de rehabilitación virtual easy balance (eBaViR), imágenes extraídas de Llorens et al. [dieciséis].

Evaluación del efecto de una intervención

El principal objetivo de los procedimientos quirúrgicos tras una lesión musculoesquelética es restaurar la articulación dañada a su estado anterior o con la mayor funcionalidad posible. Una de las principales variables para evaluar los resultados de las técnicas quirúrgicas empleadas es la fuerza muscular. Para valorar la eficacia de una intervención quirúrgica, la valoración isométrica de un grupo muscular específico no aporta la información necesaria y es necesario valorar la fuerza en todo su rango articular.

El estudio de The et al. [17] “Resultados funcionales a largo plazo y evaluación de la fuerza isocinética después de la tenotomía artroscópica del tendón de la cabeza larga del bíceps” evalúa la función biomecánica de la parte superior del brazo después de una tenotomía artroscópica de la cabeza larga del bíceps (LHB) a largo plazo hacer un seguimiento. La técnica instrumental utilizada para medir la fuerza es el sistema Biodex® (Biodex Medical Systems, Shirley, NY, EE. UU.). La fuerza isocinética se evalúa a una velocidad de $120^\circ / s$ en todo el rango de flexión y supinación del codo, tanto en el brazo lesionado como en el sano. Las variables de estudio, en este caso torque para un análisis posterior, son los valores de torque pico promedio y el trabajo total (el área bajo la curva después de representar gráficamente los valores de torque durante el rango de la articulación) realizado en todo el rango de la articulación (Figura 20). Una de las conclusiones de este estudio muestra una reducción significativa en el pico de fuerza tanto en flexión como en supinación del codo; sin embargo, la función clínica sigue siendo buena debido a que las compensaciones musculares del miembro superior conservan la potencia y el trabajo realizado en todo el rango articular.

El objetivo de estos estudios es evaluar los resultados de una técnica quirúrgica en lesiones, poblaciones y necesidades específicas. Esto permite asegurar la correcta prescripción o proponer modificaciones, lo que contribuye al avance de los tratamientos.

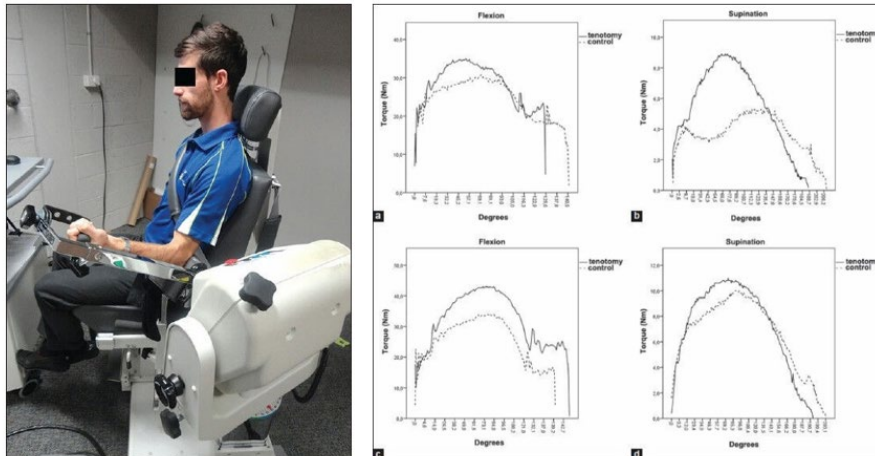
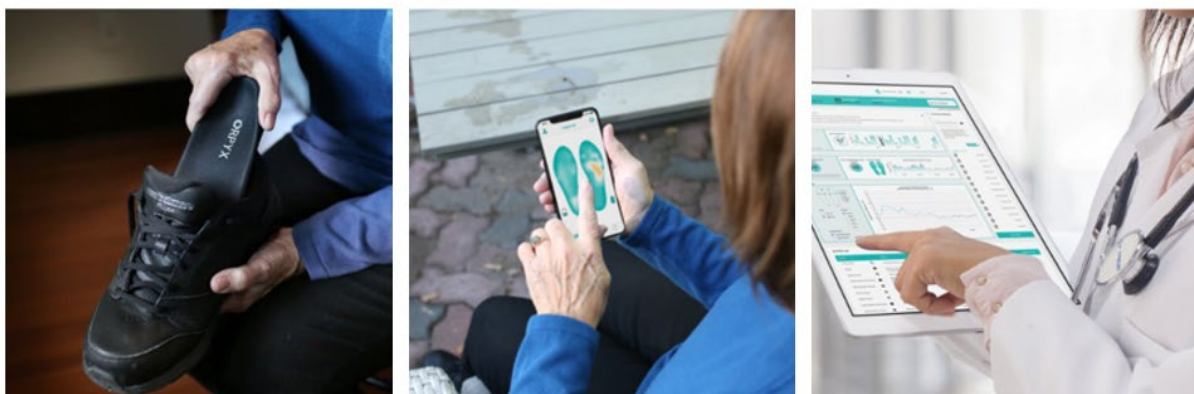


Figura 20 – Positioning of the patient in the Biodex® system (left) and results of the torque curves of the healthy arm (dashed line) and the injured arm (solid line) of two patients for flexion and supination (right), images extracted from The et al. [17].

Monitoreo de actividad

La diabetes provoca alteraciones a nivel circulatorio y neurológico periférico que afectan la sensibilidad y capacidad propioceptiva de los miembros inferiores durante la marcha. Uno de los problemas asociados a esta patología es el desarrollo de úlceras en los pies, que es una de las principales causas de hospitalización en personas con diabetes. Si no se controlan factores como aumentos excesivos de presión, temperatura y / o humedad, pueden producirse problemas circulatorios graves y provocar afecciones cutáneas graves, como úlceras o incluso amputaciones.

Iniciativas como el sistema Orpyx® SI pueden registrar presiones plantares y temperatura gracias a una plantilla sensorizada. Esta grabación analiza las huellas en la vida diaria e informa a los usuarios sobre la evolución de su huella a través de una aplicación móvil; además, recoge los datos y los envía al profesional médico para evitar posibles complicaciones (Figura 21).



Figs 21 – Orpyx® SI, plantilla sensorizada, aplicación móvil con información gráfica y registro de la actividad diaria del sujeto, imágenes extraídas de <https://www.orpyx.com/>.

Las aplicaciones en el ámbito del **deporte** son más populares en cuanto a impacto y demanda se debe principalmente al creciente número de personas que hacen deporte y participan en diferentes disciplinas relacionadas con las políticas de promoción de la salud a través de la actividad física.

El uso de técnicas instrumentales de análisis biomecánico permite extraer información cuantitativa relacionada con las técnicas de entrenamiento, la selección de material didáctico o el seguimiento de variables relacionadas con el rendimiento y la protección de la salud [2]. Las principales aplicaciones del análisis de fuerzas de reacción y presiones se centran en el análisis de la técnica de carrera, la interacción con el calzado o diversos materiales relacionados con la absorción de impactos y coeficientes de fricción, la capacidad de controlar el equilibrio, así como el estudio de la fuerza muscular. y sus principales manifestaciones en el deporte, como la máxima fuerza dinámica, máxima fuerza explosiva, etc.

Factores de riesgo en la prevención de lesiones deportivas

Las lesiones implican periodos de inactividad deportiva y, en algunos casos, incluso impiden que la persona vuelva a la práctica habitual con un cierto nivel de exigencia. Por ello, la identificación de factores que pueden incrementar el riesgo de lesión es uno de los principales objetivos dentro del deporte, especialmente a nivel profesional. Existen muchas pruebas clínicas, radiológicas o fisiológicas que estudian varios factores que contribuyen a las lesiones. En este sentido, también existen factores relacionados con la biomecánica del movimiento deportivo que nos permiten analizar mediante estas técnicas de análisis biomecánico variables específicas del movimiento deportivo asociadas a la ocurrencia de lesiones.

El análisis de fuerzas es uno de los métodos utilizados para lograr este objetivo. A continuación se incluyen un par de ejemplos para ilustrar el potencial de estos sistemas de análisis de fuerza en el estudio y prevención de lesiones deportivas.

Las lesiones del ligamento cruzado anterior (LCA) son uno de los problemas de rodilla más importantes en los deportes. Una lesión del LCA y la posterior rehabilitación lleva largos periodos de tiempo y, en algunos casos, impide que la persona vuelva a la práctica deportiva de alto nivel y exigencia. Es importante conocer los mecanismos que provocan este tipo de lesión, objetivar los factores necesarios para la recuperación y establecer el tiempo de recuperación ideal. Son múltiples los factores internos (anatómicos, fisiológicos, etc.) y externos (calzado, superficie, etc.) que influyen en esta lesión, algunos de ellos relacionados con la biomecánica del miembro inferior. Uno de los aspectos más estudiados es la influencia de la biomecánica de las articulaciones de los miembros inferiores en las acciones de salto de aterrizaje, como su efecto sobre factores específicos de riesgo de lesión como el valgo dinámico de la rodilla. Como ejemplo, el artículo de Tran et al. [18] "El efecto de la posición de apoyo del pie sobre los factores de riesgo biomecánicos asociados con la lesión del ligamento cruzado anterior" estudia la influencia de la posición del pie en el salto de aterrizaje (Figura 22). Para el registro de las fuerzas de reacción se utilizan placas de fuerza Bertec (Bertec Corporation, Columbus, OH, EE. UU.) Sincronizadas con equipos de análisis de movimiento óptico para obtener las variables de estudio.

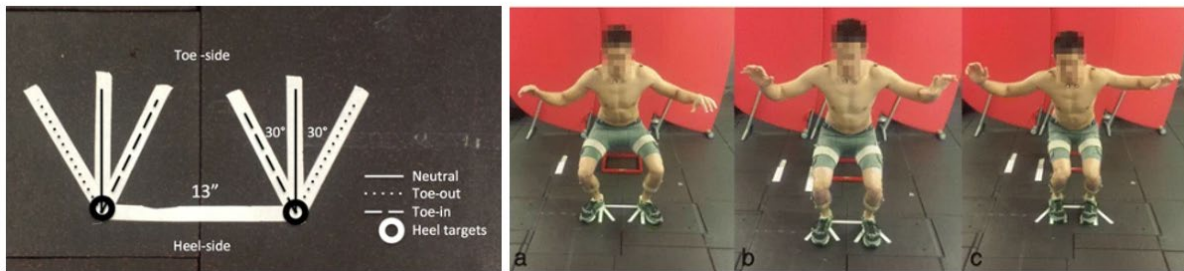


Figura 22 – Plantilla en la plataforma que muestra las posiciones de los tres pies en el rellano (izquierda) y ejemplo de recepción de salto en estas tres posiciones: convergencia, neutral y convergencia; imágenes extraídas de Tran et al. [18].

Los resultados de este estudio muestran que la posición de aterrizaje con los dedos hacia adentro aumenta el número de factores de riesgo asociados con la lesión del LCA. Cambiar la posición del pie en el suelo parece alterar significativamente la biomecánica de las extremidades inferiores tanto en hombres como en mujeres durante un salto a dos piernas y puede ser un objetivo para la modificación del patrón de movimiento [18].

En el caso de la carrera, existen varios sistemas de análisis de la presión plantar para caracterizar la huella del atleta, y como en el siguiente ejemplo, para monitorear y analizar los cambios de la huella durante la carrera, además de registrar diferentes variables asociadas al entrenamiento. El sistema SensoriaFitness® consta de un calcetín con sensores de presión en zonas específicas del pie, que miden los cambios que se producen en el soporte durante la carrera y transmiten la información en tiempo real a una aplicación móvil (Figura 23). De esta forma, los usuarios pueden ver la información sobre los cambios que pueden ocurrir en su entrenamiento y pueden estar relacionados con un posible riesgo de lesión.



Figura 23 – Sistema de sensor de presión integrado en la aplicación Sensoria © Smart Sock, Sensoria © Core y Sensoria® Run, imágenes extraídas de <https://www.sensoriafitness.com/>

Evaluación técnica deportiva

Correr es uno de los deportes más practicados a nivel mundial. Un número cada vez mayor de personas practica la carrera a nivel amateur. Una de las razones es el hecho de que solo necesitas un par de zapatos y tiempo disponible para practicar la carrera. Sin embargo, como en otras disciplinas, la técnica deportiva y el material utilizado son elementos importantes para un rendimiento eficaz y prevención de lesiones. Numerosos trabajos se centran en el estudio de diferentes variables como las fuerzas de reacción de la pisada y, más concretamente, en la fuerza de reacción en la fase de pisada.

Para este tipo de estudio, se utilizan plataformas dinamométricas para analizar la fuerza de reacción vertical del golpe del pie. A modo de ejemplo, la Figura 24 muestra las distintas morfologías de la fuerza de impacto según el tipo de pisada al correr descalzo o con calzado. Además de caracterizar el tipo de técnica de carrera (antepié, mediopié y retropié), nos permiten estudiar la relación de la técnica, la eficiencia y el riesgo de lesión mencionado anteriormente..

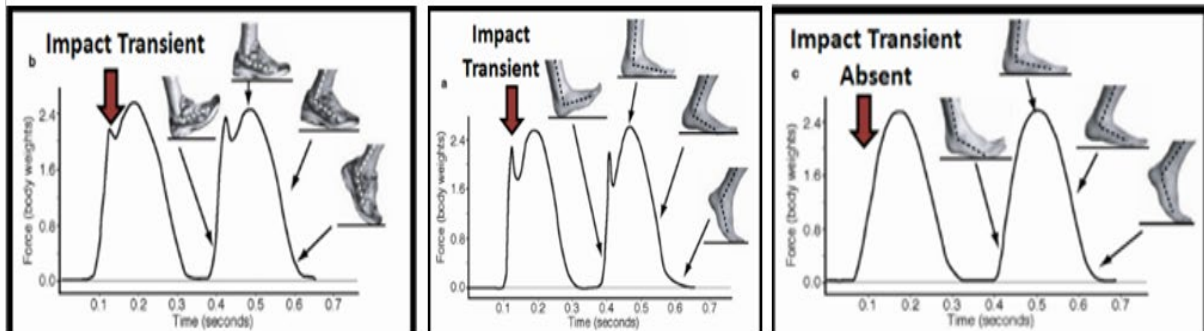


Figura 24 – Morfologías de las fuerzas de reacción verticales al correr con impacto inicial del retropié en el calzado (izquierda), descalzo (centro) y soporte del mediopié descalzo (derecha)

<http://barefootrunning.fas.harvard.edu/4BiomechanicsofFootStrike.html>

En el campo de la **ergonomía**, se utilizan técnicas instrumentales en el ámbito ocupacional para registrar la carga y capacidad muscular durante el desempeño de diferentes tareas. Esto permite investigar, estudiar y desarrollar metodologías para la correcta adaptación de los entornos y productos, y determinar, por ejemplo, el riesgo de trastornos musculoesqueléticos. Estas técnicas también nos permiten diseñar y validar diferentes productos o entornos desde una perspectiva ergonómica, es decir, considerando las necesidades y características del tema.

Simulación de trabajos y tareas laborales

Hay algunos equipos que pueden evaluar, por ejemplo, la fuerza muscular durante la realización de tareas específicas similares a las tareas laborales. Esto nos permite conocer la capacidad muscular de grupos musculares específicos del individuo al realizar tareas asociadas a los requerimientos del trabajo y estudiar su desempeño. Además, esto también se puede utilizar para actividades de rehabilitación.

Un ejemplo es el equipo BTE © Simulator II® (Figura 25). Este equipo puede reproducir múltiples actividades de los miembros superiores relacionadas con el trabajo o tareas de la vida diaria, incluida la capacidad de evaluar la fuerza muscular de forma isométrica o isotónica concéntrica y generar protocolos de valoración y rehabilitación.

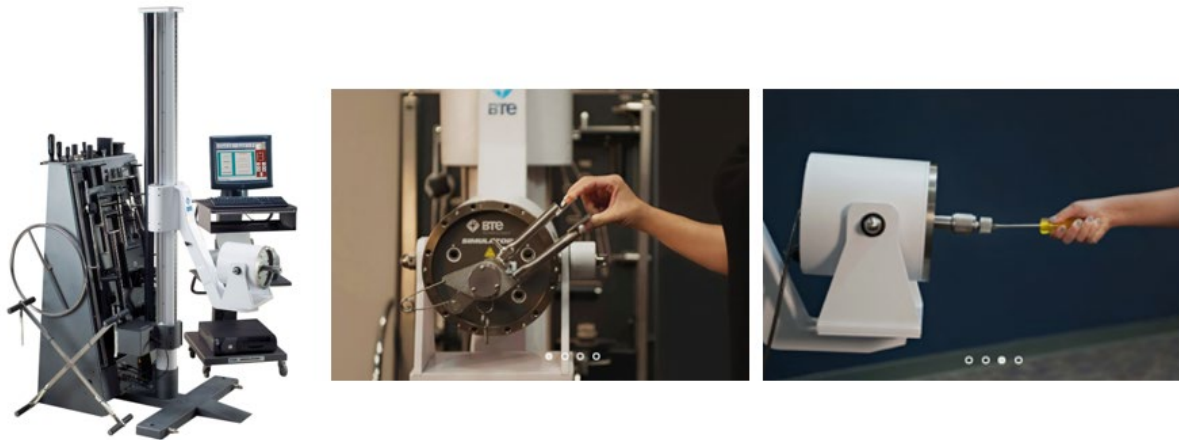


Figura 25 – El BTE © Simulator II® y un ejemplo de evaluación de la fuerza muscular en las actividades diarias (pellizco digital) y / o actividades laborales (atornillar), imágenes extraídas de <https://www.btetechnologies.com/rehabilitation/simulator-ii/>

Evaluación de producto

Estos dispositivos también se pueden utilizar en el diseño o evaluación de productos siguiendo criterios ergonómicos. Esta evaluación nos permite comparar los resultados obtenidos con criterios de referencia.

El registro de presiones para analizar la interacción entre el sujeto y un producto proporciona un ejemplo de esto. Por ejemplo, el sistema Tactilus Bodyfitter® de Sensor Products Inc. (EE. UU.) Consiste en un tapete de presión que analiza la distribución de la presión y la magnitud entre el sujeto y la superficie de acostado. Esta información se registra y proporciona gráficamente a través de mapas de presión (Figura 26).



Figura 26 – Ejemplo de un análisis de la distribución de presión entre persona - colchón utilizando el sistema Tactilus Bodyfitter® y mapa de presión (derecha), imágenes extraídas de <https://www.sensorprod.com/dynamic/mattress.php>

7. Ideas clave

Las principales ideas clave de esta unidad didáctica son:

- Existen diferentes tipos de sensores con diferentes características para analizar la fuerza en estudios biomecánicos.
- Los principales parámetros de fuerza extraídos de estas técnicas están relacionados con el registro de las fuerzas de reacción en los tres ejes del espacio, presiones, aceleraciones y fuerza muscular.
- Estos sensores se incluyen en diferentes equipos en función del objeto a medir y sus características.
- Para seleccionar un sensor según el objeto a medir, es necesario conocer las características técnicas y especificaciones de los diferentes sensores, así como sus procedimientos de medición.
- Se implementan técnicas instrumentales específicas de análisis biomecánico en áreas como el ámbito clínico, el deporte y la ergonomía con múltiples aplicaciones.
- El continuo desarrollo tecnológico, como los sistemas de grabación portátiles y la conexión a aplicaciones móviles, permitirá desarrollar nuevas aplicaciones de evaluación biomecánica y ampliar sus áreas de aplicación.

8. Referencias

- [1] Aritan S. (2014) Biomechanical Measurement Methods to Analyze the Mechanisms of Sport Injuries. In: Doral M., Karlsson J. (eds) Sports Injuries. Springer, Berlin, Heidelberg
- [2] Winter, David A. Biomechanics and Motor Control of Human Movement. Fourth Edition. Ed. John Wiley & Sons, Inc., 2009.
- [3] Dabling, J. G., Filatov A. and Wheeler, J. W. Static and cyclic performance evaluation of sensors for human interface pressure measurement. Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, San Diego, CA, 2012, pp. 162-165. [DOI: 10.1109/EMBC.2012.6345896](https://doi.org/10.1109/EMBC.2012.6345896)
- [4] Wong, Wai Yin & Wong, M. S. & Lo, Kam. (2007). Clinical Applications of Sensors for Human Posture and Movement Analysis: A Review. Prosthetics and orthotics international. 31. 62-75. [DOI: 10.1080/03093640600983949](https://doi.org/10.1080/03093640600983949).
- [5] Gurchiek, R.D. et al. Remote Gait Analysis Using Wearable Sensors Detects Asymmetric Gait Patterns in Patients Recovering from ACL Reconstruction, 2019 IEEE 16th International Conference on Wearable and Implantable Body Sensor Networks (BSN), Chicago, IL, USA, 2019, pp. 1-4. [doi: 10.1109/BSN.2019.8771038](https://doi.org/10.1109/BSN.2019.8771038).
- [6] Pimentel do Rosario, J.L. Biomechanical assessment of human posture: A literature review. Journal of Bodywork and Movement Therapies. Volume 18, Issue 3, July 2014, Pages 368-373. <https://doi.org/10.1016/j.jbmt.2013.11.018>.
- [7] Kavanagh, J. J., Menz, H.B. Accelerometry: A technique for quantifying movement patterns during walking. Gait & Posture. Volume 28, Issue 1, July 2008, Pages 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2007.10.010>.
- [8] Razak, A.H.A., Zayegh, A., Begg, R.K., Wahab, Y. Foot Plantar Pressure Measurement System: A Review. Sensors 2012, 12(7), 9884-9912. <https://doi.org/10.3390/s120709884>.
- [9] Orlin, M.N., McPoil, T.G. Plantar Pressure Assessment, Physical Therapy, Volume 80, Issue 4, 1 April 2000, Pages 399-409, <https://doi.org/10.1093/ptj/80.4.399>.
- [10] Gámez, J., Garrido, D., Montaner, C., Alcántara, E. "Aplicaciones tecnológicas para el análisis de la actividad física para el rendimiento y la salud" en Biomecánica y Bases Neuromusculares de la Actividad Física y el Deporte, M. Izquierdo, Ed. Buenos Aires, Madrid: Médica Panamericana, 2008, pp. 173 – 197.
- [11] Christenson, Jeff. Sensors and Transducers. In: Handbook of Biomechanics, Jacob Segil, Ed. London : Academic Press, is an imprint of Elsevier 2019, Pages 61-93.
- [12] Bohannon, R.W. Considerations and Practical Options for Measuring Muscle Strength: A Narrative Review. BioMed Research International, vol. 2019, Article ID 8194537, 10 pages, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/8194537>.

[13] Ostering, L.R. Isokinetic dynamometry: implications for muscle testing and rehabilitation. *Exercise and sport sciences reviews*, 1986, vol. 14, p. 45-80.

[14] D. Gordon E. Robertson, Graham E. Caldwell, Joseph Hamill, Gary Kamen, Saunders N. *Research methods in biomechanics*. Second Edition, Ed. Human Kinetics, Inc., 2013.

[15] Dvir, Z. Isokinetic Muscle Testing: Reflections on Future Venues. *Hong Kong Physiotherapy Journal*, Volume 18, Issue 2, August 2000, Pages 41-46. [https://doi.org/10.1016/S1013-7025\(00\)18002-9](https://doi.org/10.1016/S1013-7025(00)18002-9)

[16] Llorens, Roberto & Albiol, Sergio & Gil-Gomez, Jose-Antonio & Alcañiz Raya, Mariano & Colomer, Carolina & Noé, Enrique. Balance rehabilitation using custom-made Wii Balance Board exercises: Clinical effectiveness and maintenance of gains in an acquired brain injury population. *International Journal on Disability and Human Development*, 2014;13(3): 327 – 332. [doi: 10.1515/ijdh-2014-0323](https://doi.org/10.1515/ijdh-2014-0323).

[17] The, B., Bratty, M., Wang, A., Campbell, P. T., Halliday, M. J., & Ackland, T. R. Long-term functional results and isokinetic strength evaluation after arthroscopic tenotomy of the long head of biceps tendon. *International journal of shoulder surgery*, 2014; 8(3): 76–80. [doi:10.4103/0973-6042.140114](https://doi.org/10.4103/0973-6042.140114).

[18] Tran, A.A., Gatewood, C., Harris, A.H.S. et al. The effect of foot landing position on biomechanical risk factors associated with anterior cruciate ligament injury. *J EXP ORTOP* 3, 13 (2016). <https://doi.org/10.1186/s40634-016-0049-1>.



El apoyo de la Comisión Europea para la producción de esta publicación no constituye una aprobación del contenido, el cual refleja únicamente las opiniones de los autores, y la Comisión no se hace responsable del uso que pueda hacerse de la información contenida en la misma.