

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



MÓDULO DE BIOMECÁNICA DE LA MARCHA

Unidad Didáctica D: ANÁLISIS INSTRUMENTADO DE LA MARCHA

D.1 ¿Qué tipo de protocolos de evaluación biomecánica instrumentada existen para la marcha?



D.1 ¿Qué protocolos de evaluación de instrumentos biomecánicos de la marcha existen?

- Parte 1 Fotogrametría
- Parte 2 Acelerómetros
- Parte 3 Plataformas dinamométricas
- Parte 4 Plantillas de presión instrumentadas
- Ideas clave
- Bibliografía

D.1 ¿Qué protocolos de evaluación de instrumentos biomecánicos de la marcha existen?

Parte 1. Fotogrametría y evaluación de la marcha.
Enfoque clínico

1. DEFINICIÓN

Fotogrametría La ~~foto~~ ~~grametría~~ ~~es~~ ~~la~~ ~~ciencia~~ ~~que~~ ~~tiene~~ ~~por~~ ~~objetivo~~ ~~obtener~~ ~~información~~ ~~fiable~~ ~~sobre~~ ~~las~~ ~~propiedades~~ ~~de~~ ~~superficies~~ ~~y~~ ~~objetos~~ ~~sin~~ ~~un~~ ~~contacto~~ ~~físico~~ ~~directo~~ ~~con~~ ~~los~~ ~~mismos~~, ~~y~~ ~~de~~ ~~medir~~ ~~e~~ ~~interpretar~~ ~~esta~~ ~~información~~.



2. ELEMENTOS DEL SISTEMA

- Sistema de **cámaras** de video y focos o sistema de iluminación
- Sistema de grabación y procesamiento de imágenes: **software**
- **Sistema de referencia**
- **Marcadores y accesorios**

2.1. ELEMENTOS DEL SISTEMA: CÁMARAS

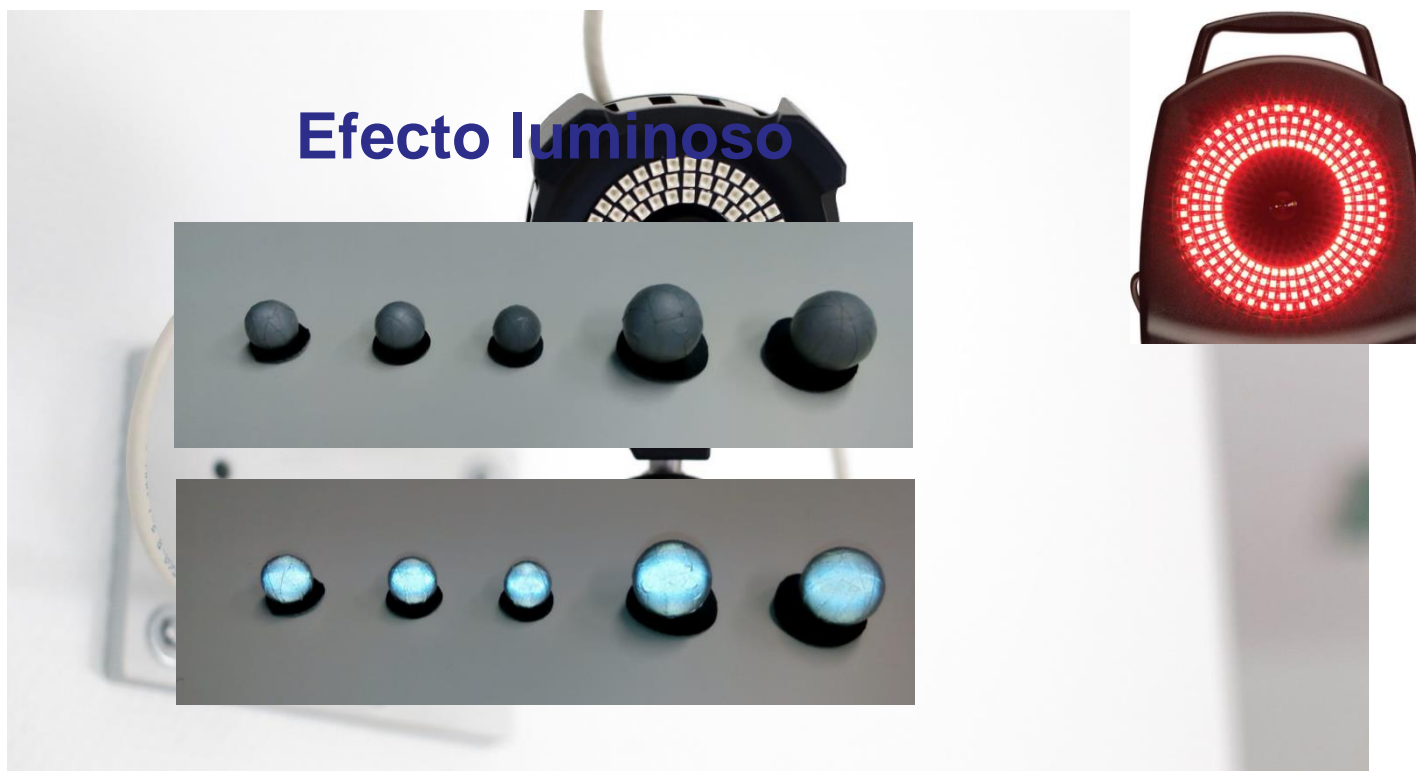
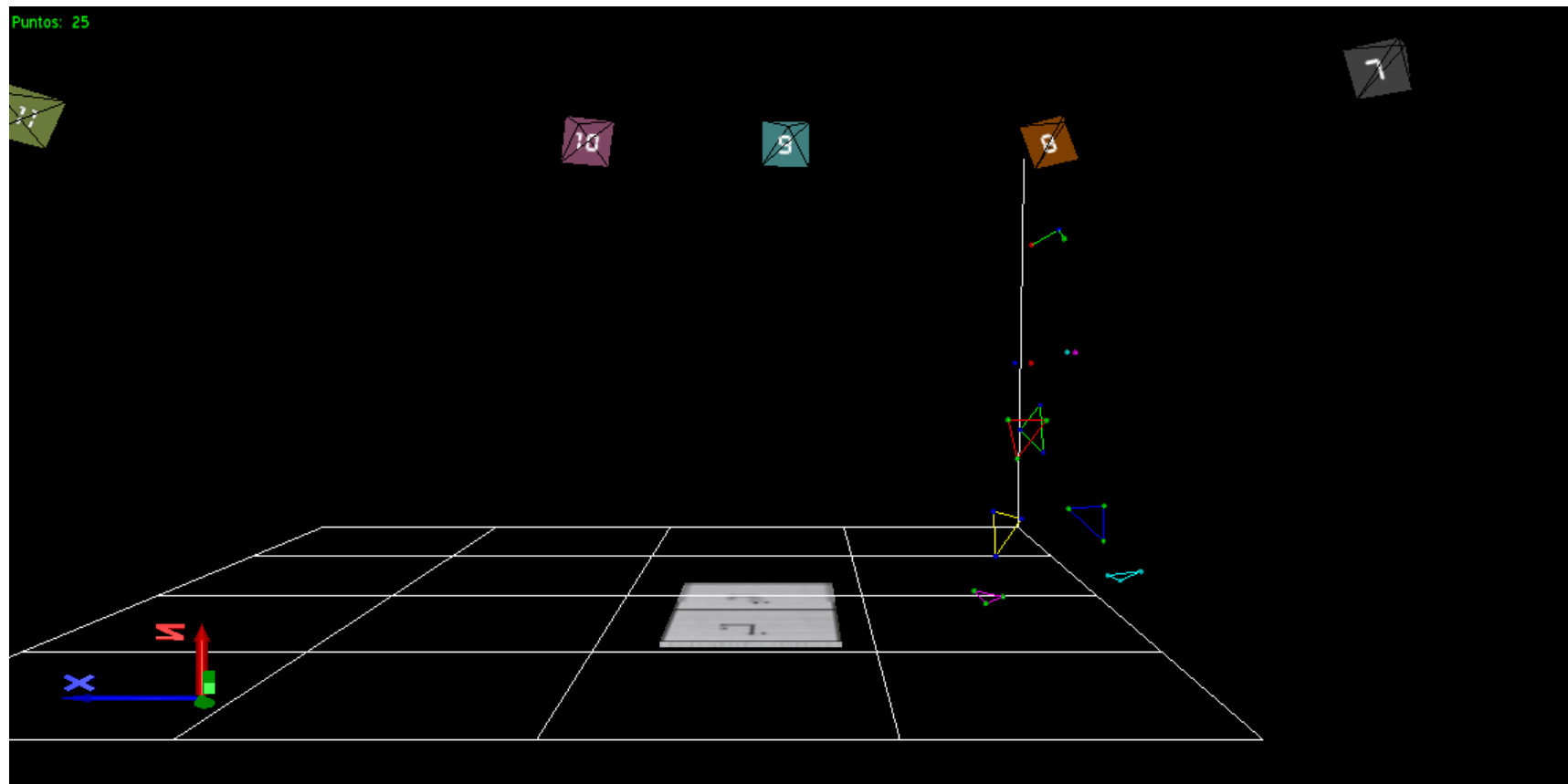


Figura 1. Smartcam del sistema de captura de movimiento kinescan / IBV

2.1. ELEMENTOS DEL SISTEMA: CÁMARAS



2.1. ELEMENTOS DEL SISTEMA: CÁMARAS



versus



Figura 2. Configuración de cámaras para análisis en dos dimensiones versus tres dimensiones. Laboratorio del Departamento de Medicina. Universidad de Valencia

2.1. ELEMENTOS DEL SISTEMA: CÁMARAS

Configuración de las cámaras por captación de movimiento

Sistema de dos dimensiones

- Una cámara.
- Plano de movimiento coronal o sagital.
- Posicionamiento ortogonal para la captura.

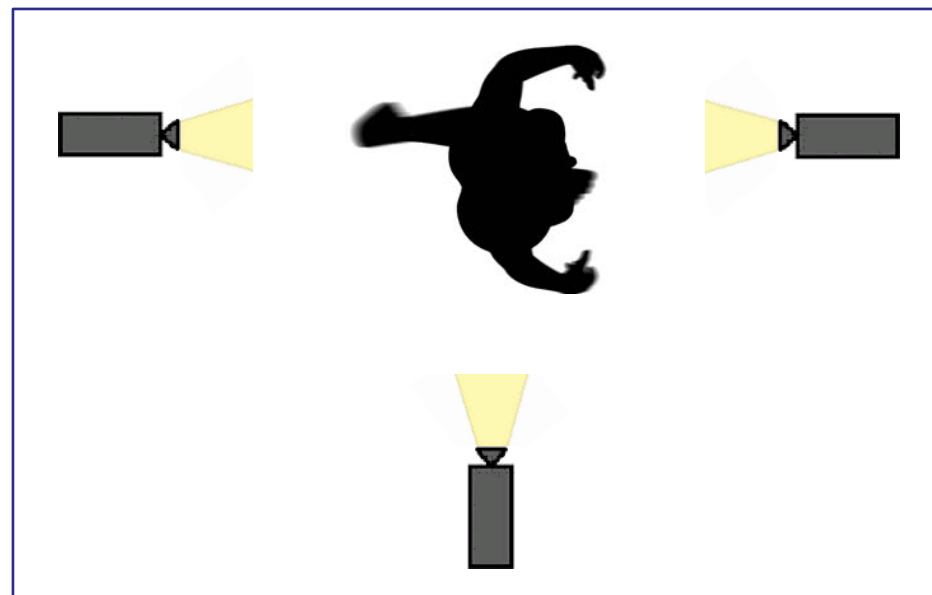


Figura 3. Configuración de las cámaras.
Video bidimensional

2.1. ELEMENTOS DEL SISTEMA: CÁMARAS

Configuración de las cámaras por captación de movimiento

Sistema de tres dimensiones

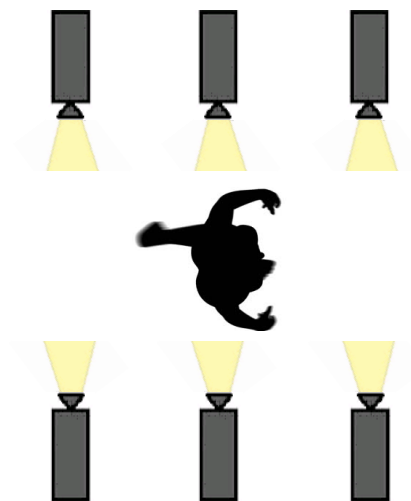


Figura 4. Configuración lineal de las cámaras

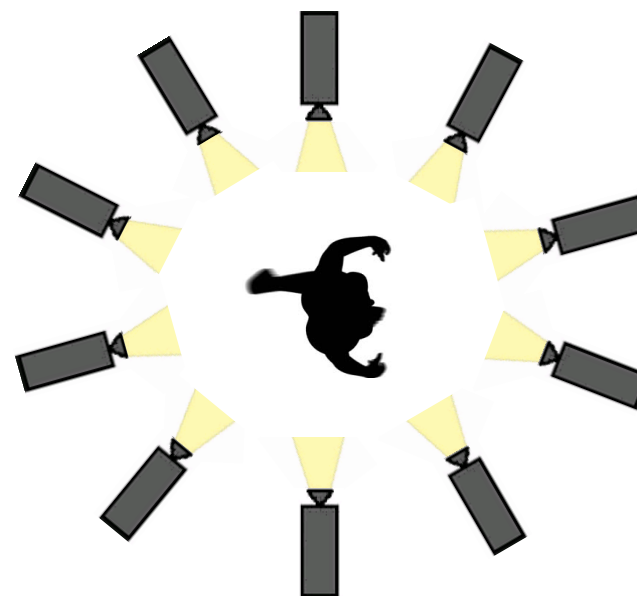


Figura 5. Configuración en paraguas de las cámaras

2.1. ELEMENTOS DEL SISTEMA: CÁMARAS

Grabación de frecuencias por segundo con sistema de fotogrametría

Autor	Tarea motora	Frecuencia	Muestra
Martin S. <i>et al.</i> 2014	Gait	75 Hz	Participantes sanos
Jeremy J.B. <i>et al.</i> 2007	Gait	120 Hz	Mujeres normalmente activas
Bisesti <i>et al.</i> 2015	Running	240 Hz	Participantes sanos
Huchez <i>et al.</i> 2013	Gymnastics	250 Hz	Atletas
Inoue <i>et al.</i> , 2014	Soccer	500 Hz	Atletas
Betzler <i>et al.</i> 2014	Golf	1000 Hz	Atletas

Tabla 1. Frecuencias de grabación (Hz) con sistema de captura de movimiento.

2.2. ELEMENTOS DEL SISTEMA: SOFTWARE

Grabación de imágenes

Procesamiento de imágenes



Figura 6. Software del sistema de captura de movimiento disponible en el mercado

2.3. ELEMENTOS DEL SISTEMA: SISTEMA DE REFERENCIAS

Sistema de coordinación global (SCG)

**CALIBRACIÓN
ESTÁTICA**

**CALIBRACIÓN
DINÁMICA**

2.3. ELEMENTOS DEL SISTEMA: SISTEMA DE REFERENCIAS

Calibración estática

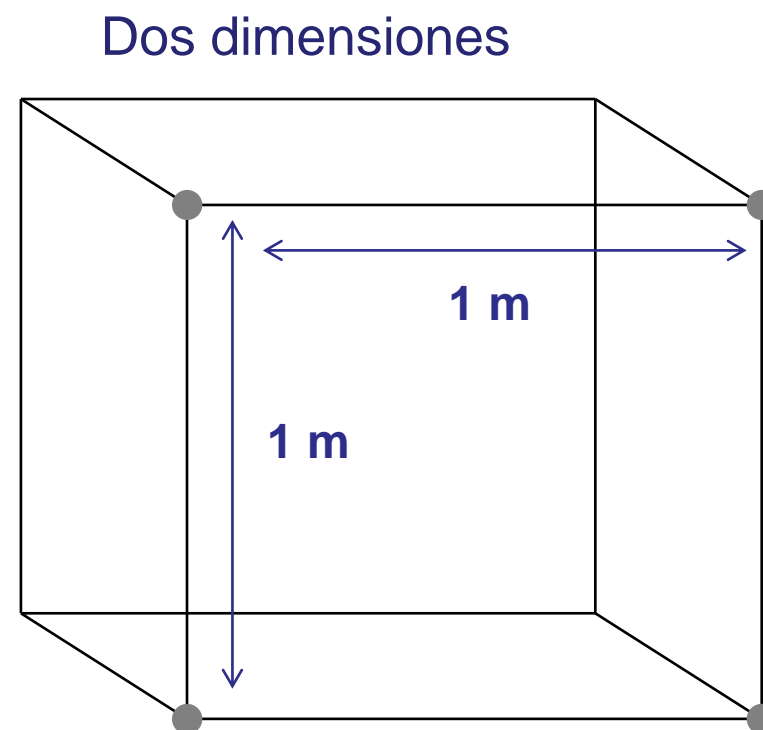


Figura 7. Estructura cúbica rígida para calibración de espacio estático en análisis bidimensional.

2.3. ELEMENTOS DEL SISTEMA: SISTEMA DE REFERENCIAS

Calibración estática



Tres dimensiones

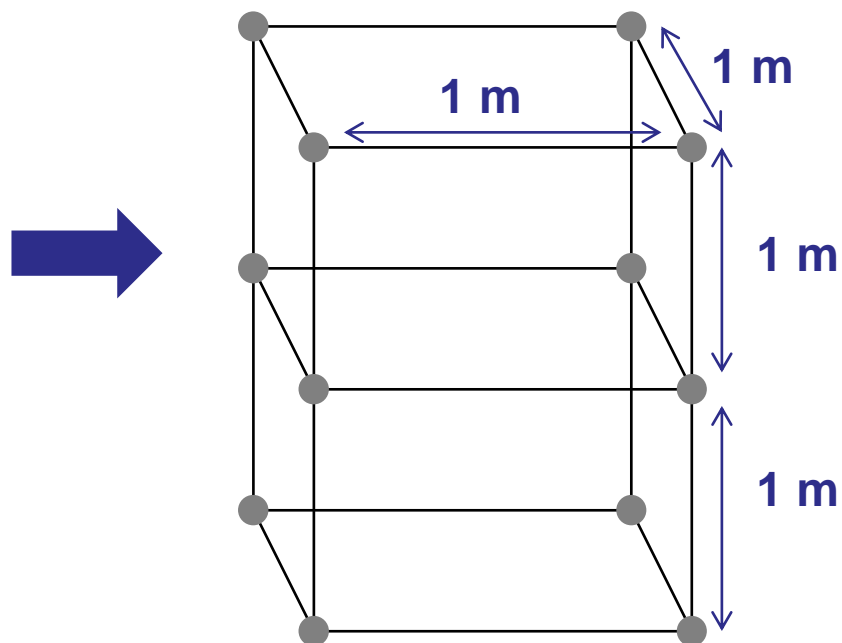


Figura 8. Estructura cúbica rígida para calibración de espacio estático en análisis tridimensional.

2.3. ELEMENTOS DEL SISTEMA: SISTEMA DE REFERENCIAS

Calibración dinámica

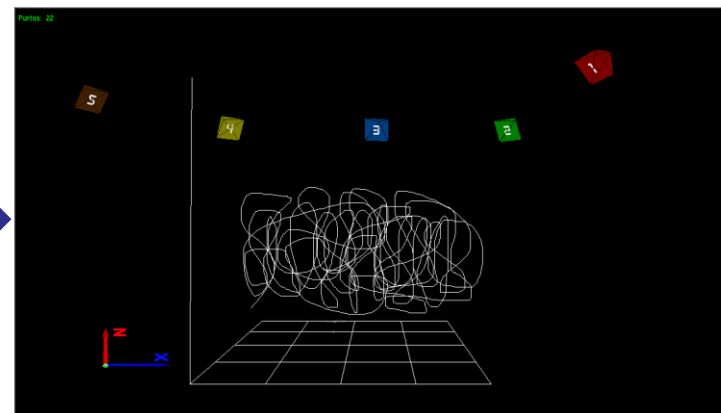
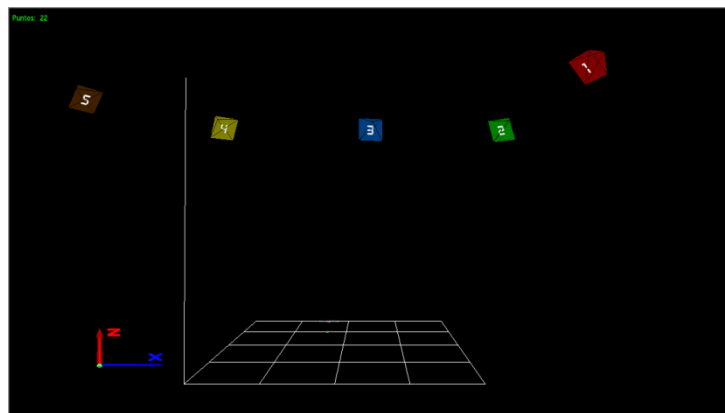
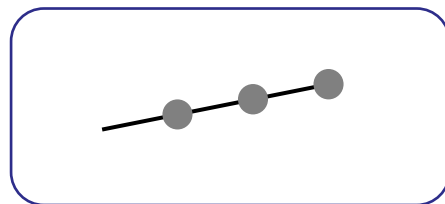


Figura 9. Calibración de espacio dinámico con una varita y una nube de seguimiento

2.4. ELEMENTOS DEL SISTEMA: MARCADORES Y ACCESORIOS

Marcadores

➤ Marcadores pasivos

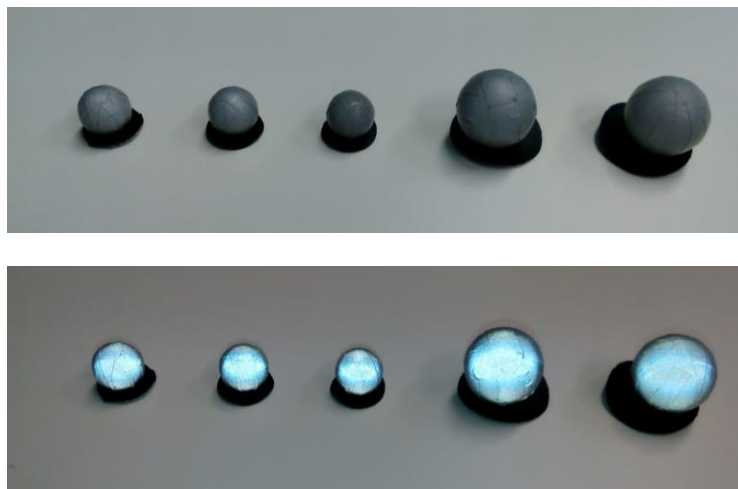


Figura 10. Marcadores pasivos individuales

Material reflectante Scotchlite

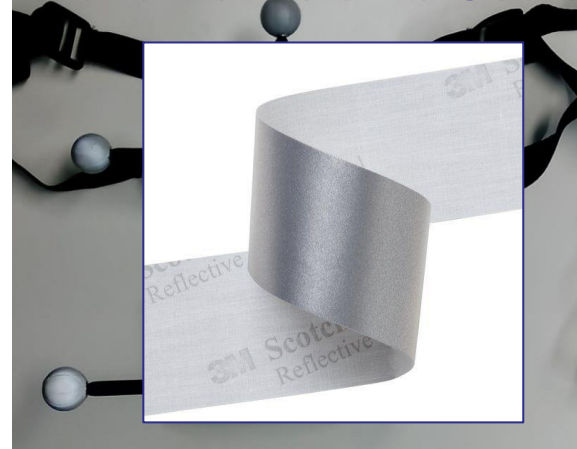


Figura 11. Marcadores pasivos en grupo

2.4. ELEMENTOS DEL SISTEMA: MARCADORES Y ACCESORIOS

Marcadores y otros materiales

➤ Marcadores activos



Figura 12: Marcadores activos
(Imagen de J. Richards et al.2018)

➤ Otros materiales



Figura 13: Adhesivo de doble contacto

Fotogrametría y evaluación de la marcha

Aproximación clínica

3. Protocolo de evaluación

3.1. DEFINICIÓN DE MOVIMIENTO Y MODELO BIOMECÁNICO

¿Qué queremos medir?



Figura 14. Configuración para el análisis del movimiento del tobillo. De A. Ali y T. Gevers. 2011

versus

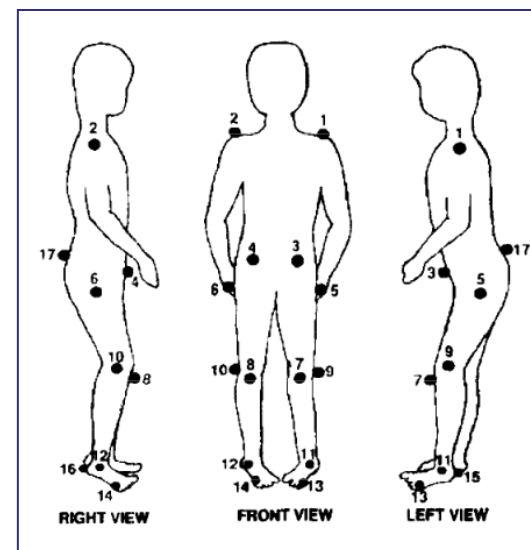


Figura 15. Configuración para el análisis de la marcha de la extremidad inferior. De Eng H. Lee et al. 1992

3.1. DEFINICIÓN DE MOVIMIENTO Y MODELO BIOMECÁNICO

Configuraciones del modelo biomecánico para el análisis de la marcha.

➤ Conjunto de marcadores simple

- Cabeza del quinto metatarsiano.
- Maléolo lateral
- Cóndilo lateral del fémur.
- Trocánter mayor
- Espina iliaca anterior superior
- Proceso acromion
- Cóndilo lateral del húmero.
- Proceso estiloides en la muñeca

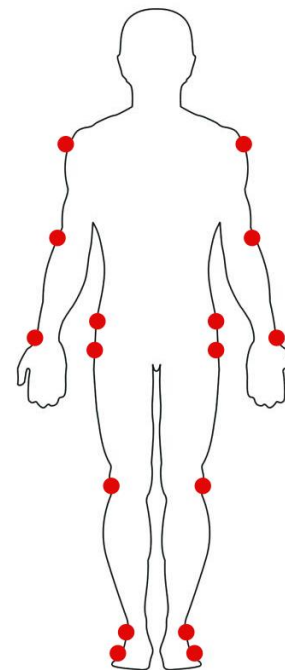


Figura 16. Configuración de conjunto de marcadores simple

3.1. DEFINICIÓN DE MOVIMIENTO Y MODELO BIOMECÁNICO

Configuraciones del modelo biomecánico para el análisis de la marcha.

➤ Set de Vaughan Marker

- Cabeza del quinto metatarsiano
- Maléolo lateral
- Talón Referencia
- Tuberosidad de la tibia funcional del pie
- Epicóndilo femoral
- Trocánter mayor pélvica
- Espina ilíaca superior anterior
- Sacro

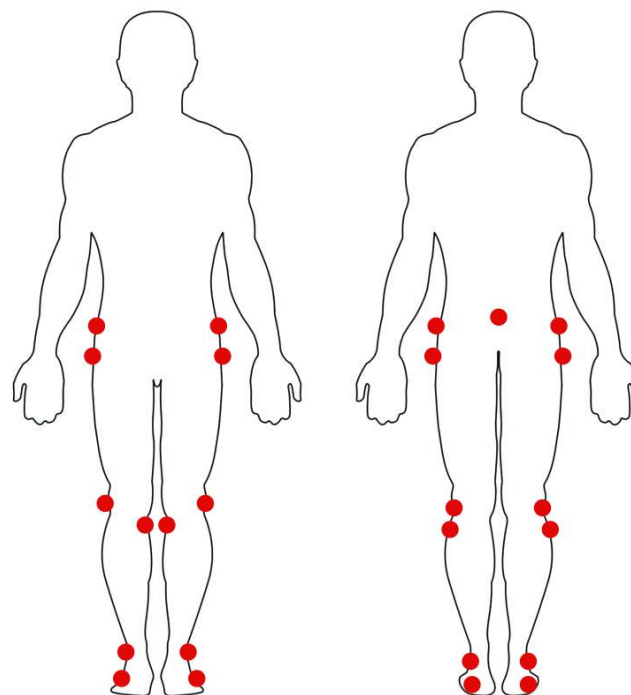


Figura 17. Configuración del conjunto de marcadores Vaughan

3.1. DEFINICIÓN DE MOVIMIENTO Y MODELO BIOMECÁNICO

Configuraciones del modelo biomecánico para el análisis de la marcha.

➤ Set de Helen Hayes

- Cabeza del segundo metatarsiano
- Maléolo lateral
- Varillas tibiales y femorales para rotaciones
- Tacón femorales y tibiales.
- Varita tibial
- Epicóndilo femoral
- Varita femoral
- Trocánter mayor
- Espina ilíaca superior anterior
- Sacro

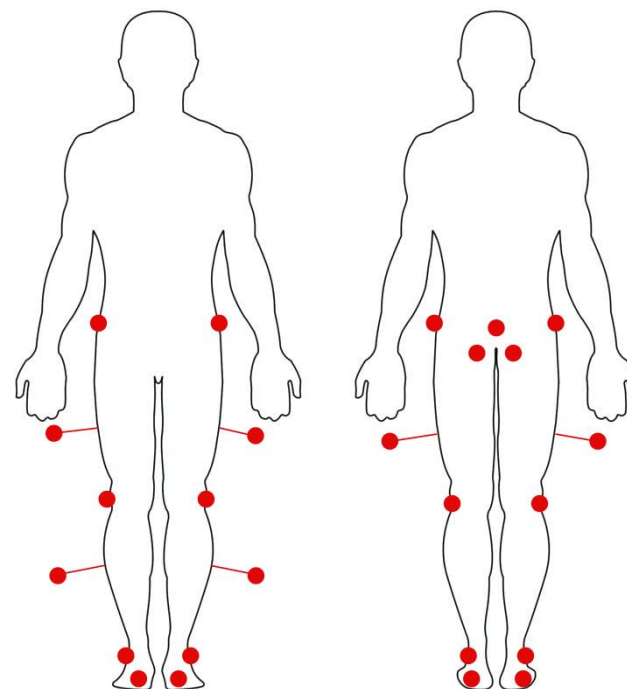


Figura 18. Configuración del conjunto de marcadores Helen Hayes

3.1. DEFINICIÓN DE MOVIMIENTO Y MODELO BIOMECÁNICO

Configuraciones del modelo biomecánico para el análisis de la marcha.

- Calibrate Anatomical System Technique Marker set (CAST)
 - Estandarizar la descripción de la pelvis y la extremidad inferior.
 - Seis grados de libertad
 - Tres movimientos lineales o traslacionales.
 - Tres rotaciones o movimientos angulares.
 - Dos tipos de marcadores: anatómico y segmento.

3.1. DEFINICIÓN DE MOVIMIENTO Y MODELO BIOMECÁNICO

Calibrate Anatomical System Technique Marker set (CAST)

➤ Marcadores anatómicos

- Utilizado para la calibración del modelo.
- Ubicados lateral y media a las articulaciones
- Articulaciones instrumentadas: proximal y distal a cada segmento
- Sistema de coordenadas globales → Sistema de coordenadas locales

Local coordinates system
(LCS)



Global coordinates system
(GCS)

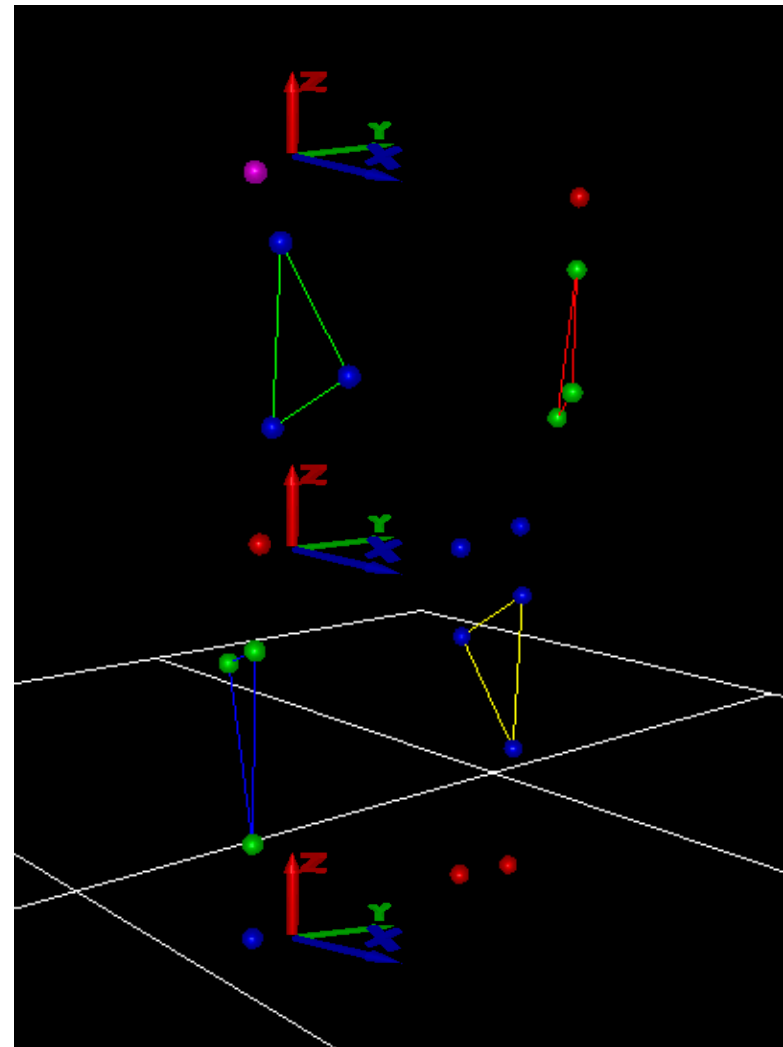
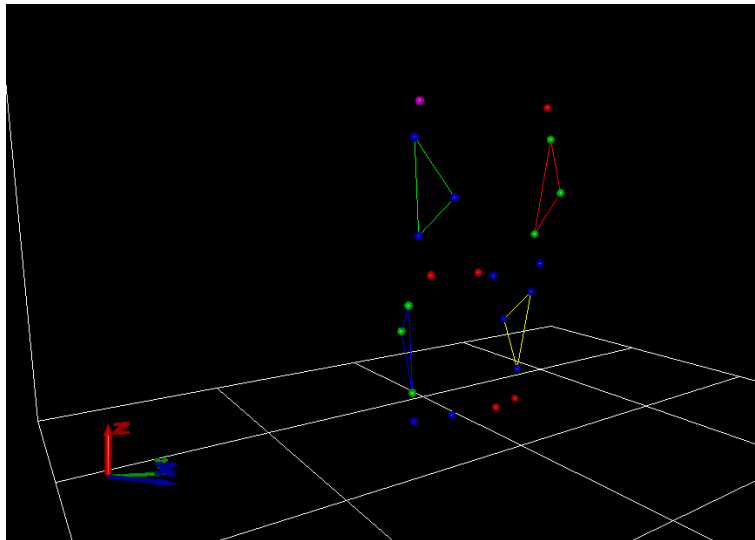


Figura 19. Sistema de coordenadas globales versus sistema de coordenadas locales

3.1. DEFINICIÓN DE MOVIMIENTO Y MODELO BIOMECÁNICO

Calibrate Anatomical System Technique Marker set (CAST)

➤ Marcadores anatómicos

Segmento podal

↳ Cabeza metatarsal
Maleolo de tobillo

Segmento tibial

↳ Maleolo de tobillo
Cóndilos Femorales

Segmento femoral

↳ Cóndilos Femorales
Trocánter mayor

Segmento pélvico

↳ Ilíaco posterior superior
Ilíaco antero superior

3.1. DEFINICIÓN DE MOVIMIENTO Y MODELO BIOMECÁNICO

Calibrate Anatomical System Technique Marker set (CAST)

➤ Marcadores de segmento

- Pueden estar ubicados arbitrariamente en el segmento.
- Ratreo fácil
- No co-lineares
- Al menos 3 marcadores por cada segmento

3.2. CAPTACIÓN DE INFORMACIÓN

1º

Escena de calibración
estática

2º

Escena de prueba de
marcha

3.2. CAPTACIÓN DE INFORMACIÓN

¿Qué es importante durante la grabación de la marcha?

- Suficiente espacio para dar varios pasos.
- Realización de la marcha sin provocar interferencias en la instrumentación del modelo.
- Los marcadores deben estar visibles en todo el registro de la medición.
- Instrucciones estandarizadas.

3.3. DIGITALIZACIÓN DE MEDIDAS

La digitalización o el seguimiento es el proceso de identificación de puntos en el cuerpo utilizando marcadores o una impresión visual de los centros articulares. Existen dos métodos de digitalización: manual y automático.

Digitalización
manual

Digitalización
automática

3.4. OBTENCIÓN DE RESULTADOS

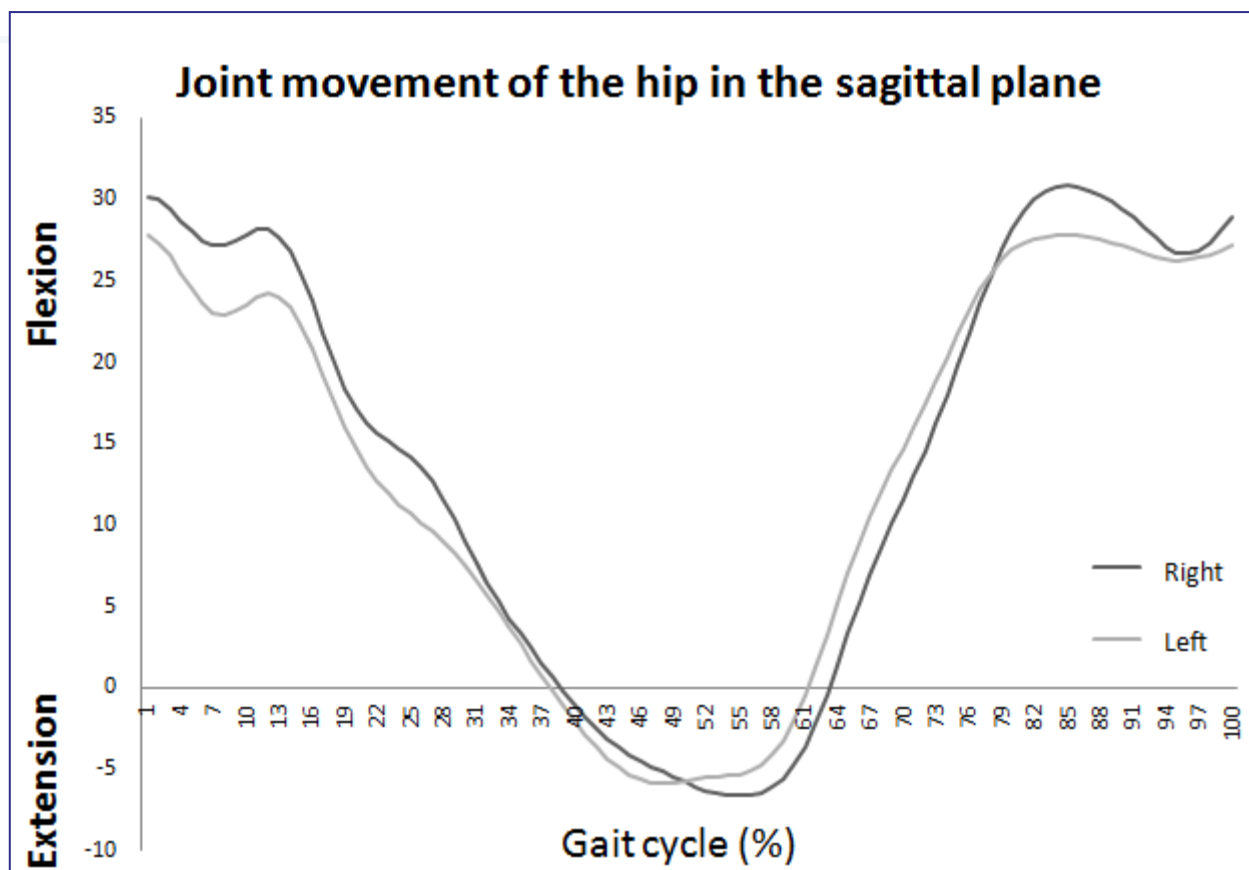


Figura 20. Análisis del movimiento de la cadera relacionado con el ciclo de la marcha.

3.4. OBTENCIÓN DE RESULTADOS

Resultados del sistema de fotogrametría	
Cinemáticas	Espacio-temporales
Rango de movimientos <ul style="list-style-type: none"> • Flexo-extensión • Rotación Interna-externa • Abducción-adducción 	Velocidad de marcha (m/s)
	Longitud de zancada (m)
	Tiempo de zancada (s)
	Longitud de paso (m)
Ángulo pico <ul style="list-style-type: none"> • Flexión plantar y dorsal máxima de tobillo. • Flexión y extensión máxima de rodilla. • Flexión y extensión máxima de cadera. 	Amplitud de paso (m)
	Cadencia (pasos / min)
	Ángulo de pie en fase apoyo/balanceo
	Duración fase apoyo (s) o (%)
	Duración fase balanceo (s) o (%)
	Tiempo de doble apoyo (%)

Tabla 2. Principales resultados del análisis cinemático

3.4. OBTENCIÓN DE RESULTADOS

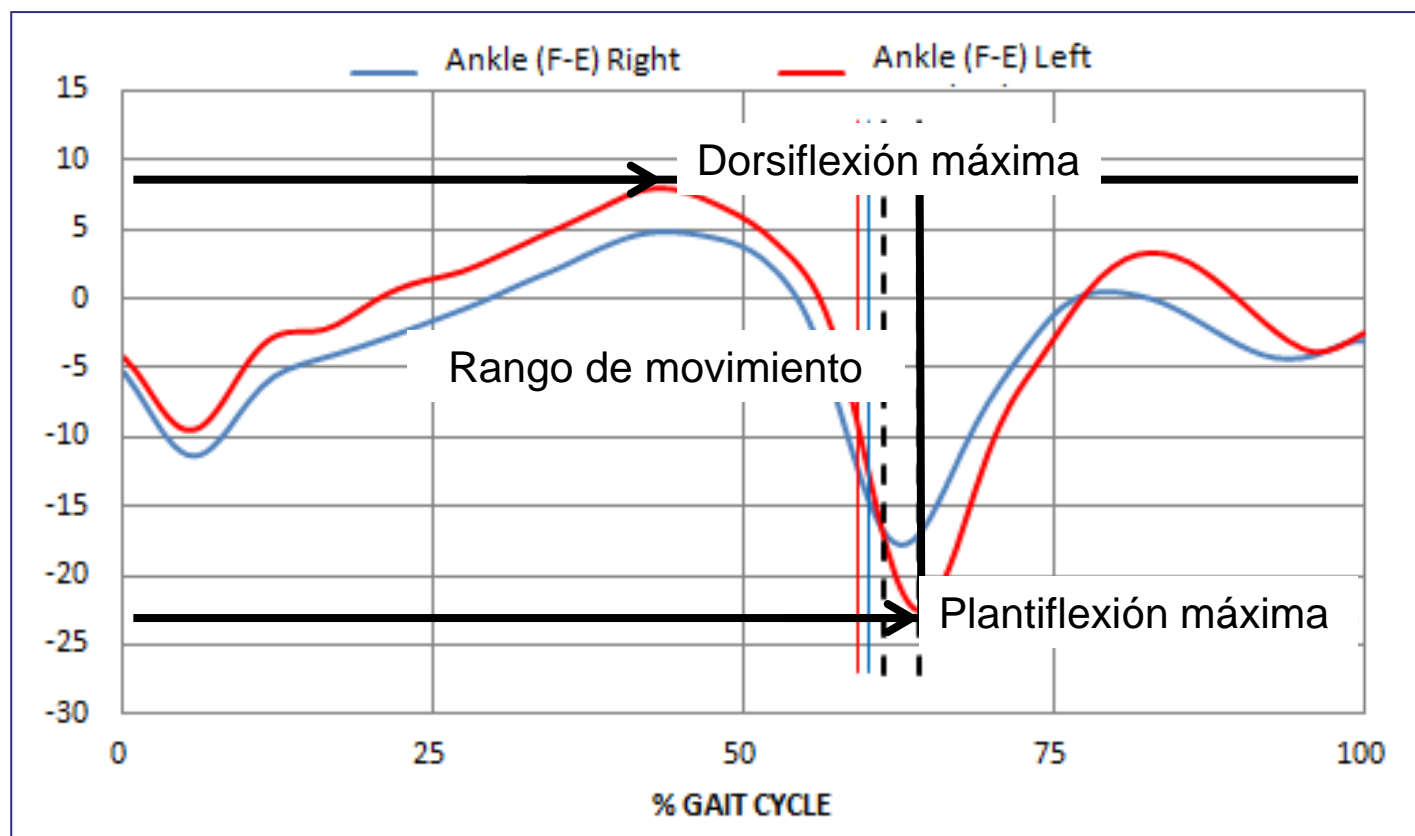


Figura 21. Curva de movimiento del tobillo en el ciclo de la marcha. Análisis del rango de movimiento versus ángulo máximo

4. VENTAJAS Y DESVENTAJAS

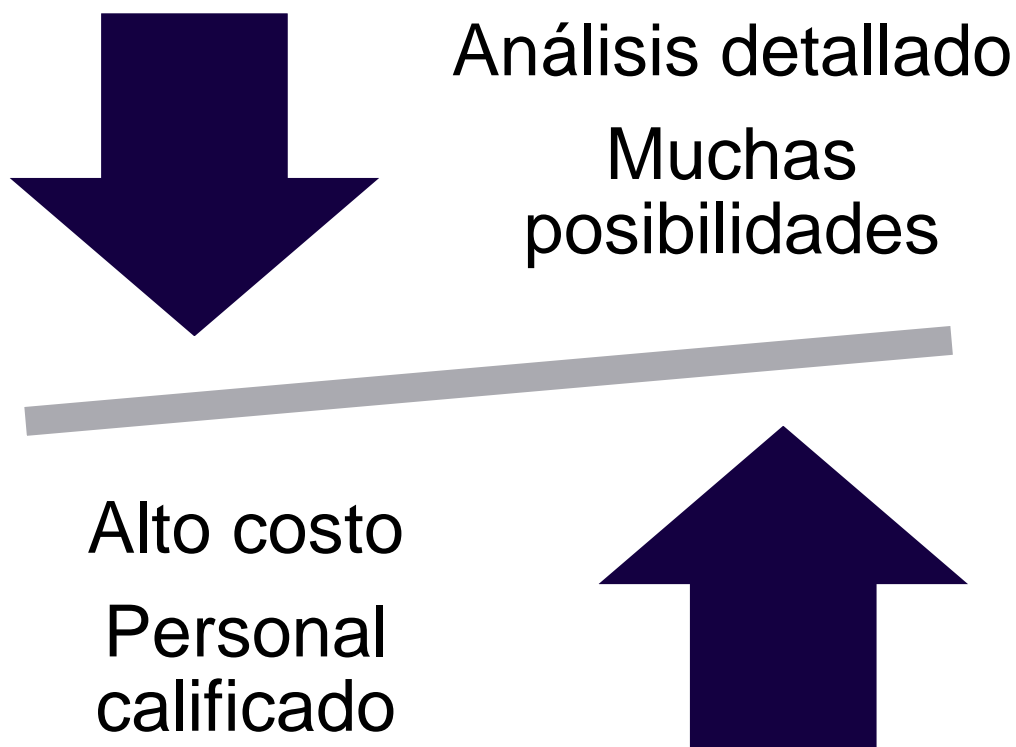


Figura 22. Diagrama con las características del sistema de fotogrametría.

4. VENTAJAS Y DESVENTAJAS

Errores asociados con la técnica de medición.

- Errores relacionados con la colocación de marcadores: artefactos de tejidos blandos
 - Errores relativos: movimiento entre dos o más marcadores
 - Errores absolutos: movimiento de un marcador con respecto al hito óseo que representa

4. VENTAJAS Y DESVENTAJAS

Errores asociados con la técnica de medición.

- Errores relacionados con la distorsión de la imagen.
 - Usualmente con cámaras de video estándar en análisis bidimensional
 - Distorsión del marcador por el movimiento del segmento distal de mayor velocidad

4. VENTAJAS Y DESVENTAJAS

Errores asociados con la técnica de medición.

- Errores en la estimación del centro de un marcador



Figura 23. Representación del centroide del marcador en relación con su tamaño.

4. VENTAJAS Y DESVENTAJAS

Errores asociados con la técnica de medición.

➤ Otro tipo de errores

- Relacionado con las repeticiones de la marcha → estandarización del procedimiento
- Baja validez externa → no representativa

D.1 ¿Qué protocolos de evaluación de instrumentos biomecánicos de la marcha existen?

Parte 2. Acelerómetros y evaluación de la marcha.
Enfoque clínico

1. DEFINICIÓN

Acelerómetros

- Los acelerómetros son dispositivos que miden la aceleración aplicada a lo largo de un eje.
- Son una tecnología básica que convierte el movimiento mecánico en una señal eléctrica.
- Su función interna se basa en la inercia de una masa ubicada en un sensor de fuerza, siguiendo la segunda ley de Newton para obtener la aceleración.

$$F = m * a$$

Figura 1. Segunda ley de Newton.

1. DEFINICIÓN

Acelerómetros en la marcha

- Aceleración experimentada por los segmentos de las extremidades inferiores.

Aceleración lineal

$m/s^2 \rightarrow g$ (gravedad)

Cambio en la velocidad lineal en intervalor de tiempo sucesivos

Aceleración (+)

Desaceleración (-)



Figura 2. Representación de aceleración del segmento tibial al caminar.

2. ELEMENTOS DEL SISTEMA

SENSOR

- Dispositivo que mide los valores de aceleración de la vibración del cuerpo al que está unido.

Uniaxial

Triaxial

AMPLIFICADOR

- Dispositivo que amplifica la señal recibida por el acelerómetro y la envía a una computadora.

ANALIZADOR

- Es una computadora con el software que recibe los datos de aceleración y permite su posterior análisis.

2. ELEMENTOS DEL SISTEMA

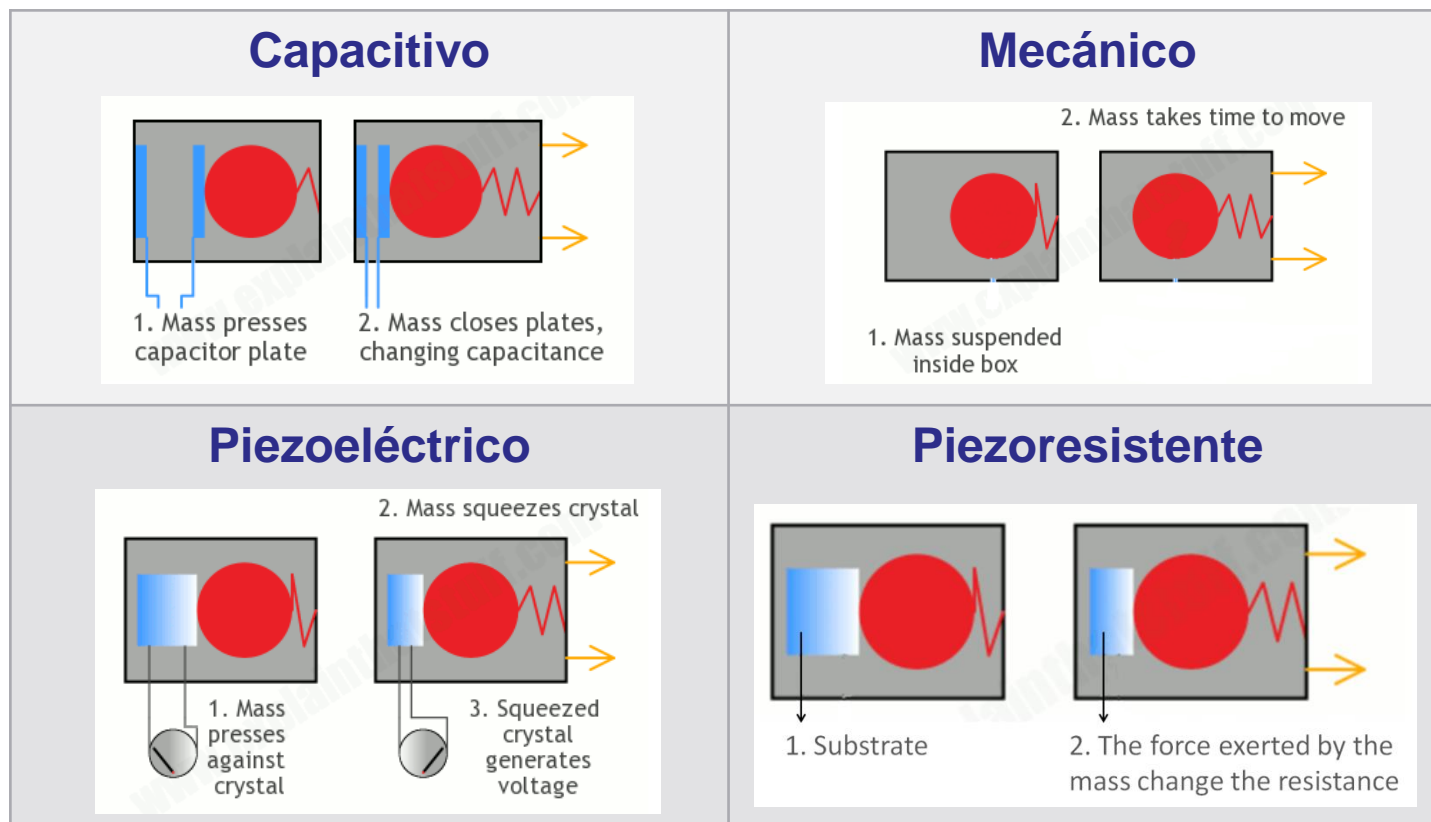


Figura 3. Las imágenes muestran el funcionamiento de los diferentes tipos de sensores utilizados en un dispositivo acelerómetro. Imágenes de Woodford, Chris. (2009/2014) Acelerómetros.

3. PROTOCOLO DE EVALUACIÓN

Consideración previa

- Para medir partes del cuerpo, se colocan acelerómetros en la parte del cuerpo cuyo movimiento se está estudiando.
- Para medir los movimientos de todo el cuerpo, se utilizan múltiples instrumentos.
- En el análisis de la marcha para medir el movimiento del segmento del cuerpo, solo se necesita una frecuencia más baja (60-100 Hz) y un rango más pequeño (típicamente 6-9 g)

3. PROTOCOLO DE EVALUACIÓN

Colocación del equipo en el cuerpo

➤ **La importancia de la fijación**

- Una buena fijación permitirá que el dispositivo represente la aceleración del hueso subyacente.
- Para evitar el movimiento relativo del sensor
- Para evitar tejidos blandos

➤ **Material adhesivo**

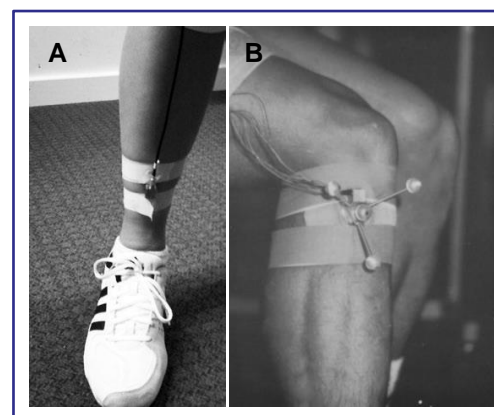


Figura 4. Elementos para fijar el acelerómetro en la tibia. (A) Sistema no invasivo, (B) Sistema invasivo, acelerómetro sujeto a pasadores Steinmann debajo de la piel. Imagen de Sinclair et al. (2013) y Lafortune M. et al. (1991)

3. PROTOCOLO DE EVALUACIÓN

➤ Colocación anatómica

TRONCO

- Vértebra L5
- Sacro

CABEZA

- Frente
- Region posterior

TIBIA

- Area anteromedial
- Proximal o distal

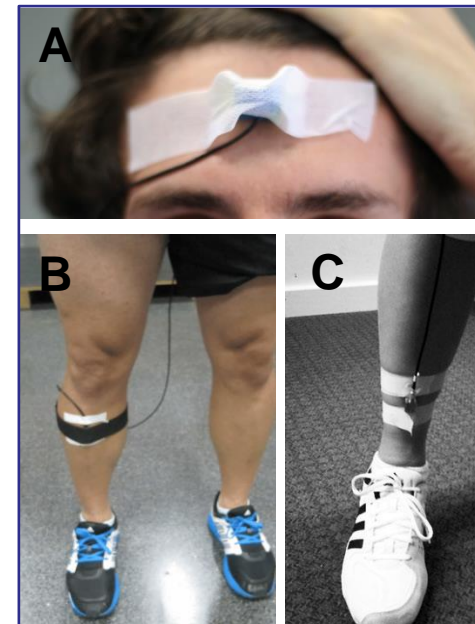


Figura 6. Colocación habitual del acelerómetro (A) Ubicación de la frente. (B) Ubicación tibial en el extremo proximal y el área anteromedial. (C) Ubicación tibial en el extremo distal para la medición del impacto en el suelo.

3. PROTOCOLO DE EVALUACIÓN

Obtención de resultados

- Amplitud pico de aceleración
 - Pico positivo
 - Pico negativo
 - Diferentes ejes
 - Tiempo entre picos

- Parámetros espaciotemporales

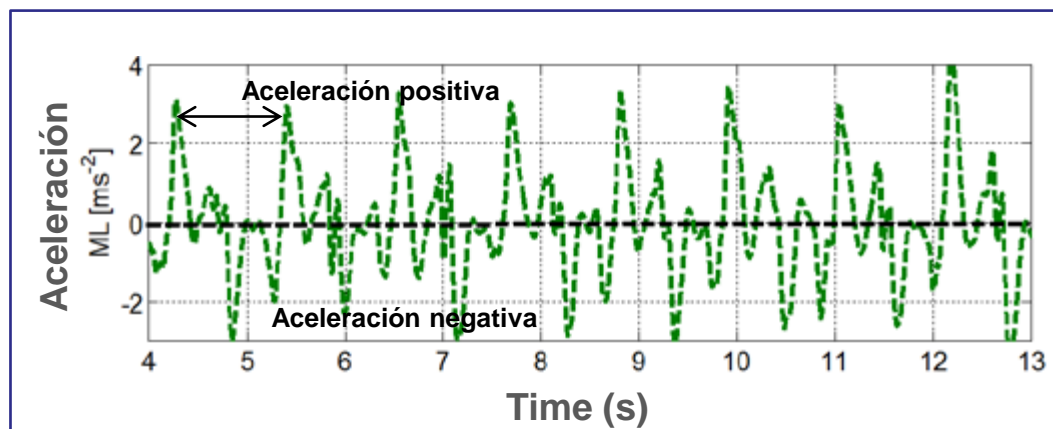


Figura 7. Aceleraciones de la cabeza durante la marcha. Imagen de Brodie, Matthew A D. et al. (2015)

4. VENTAJAS Y DESVENTAJAS

Ventajas



Bajo coste



Transportable



Información en tiempo real

Desventajas



Sensible a los golpes por una gran desaceleración



Alteraciones de precisión debido a la inestabilidad de la fijación de la piel.



Sistema cableado limita la evaluación

D.1 ¿Qué protocolos de evaluación de instrumentos biomecánicos de la marcha existen?

Parte 3. Plataformas
dinamométricas y evaluación de la
marcha.
Enfoque clínico

1. DEFINICIÓN

Plataforma Dinamométrica

- Equipo para medir fuerzas
- Extendidamente usado para el análisis de la marcha humana y el equilibrio, como también en diversas actividades humanas.
- Fijado en el piso.

Fuerzas de Reacción del Suelo (FRS)

Centro de Presiones (CP)

2. ELEMENTOS DEL SISTEMA

2.1 La Plataforma

➤ Tipo de sensores



Figura 1. Plataforma de fuerzas Bertec de manómetro

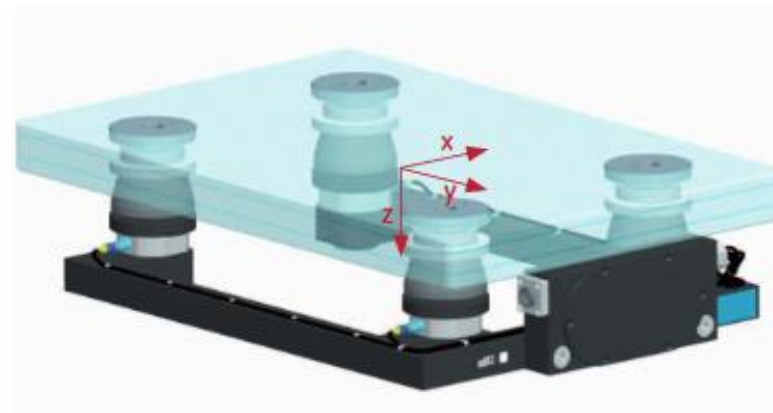


Figura 2. Plataforma de fuerzas Kistler de sensores piezoeléctricos

2. ELEMENTOS DEL SISTEMA

2.1 La plataforma

Principales características de las plataformas piezoeléctricas y manométricas

Manométrica	Piezoeléctrica
El material distorsionado produce una resistencia (deformación).	Deformación del cristal que genera una corriente eléctrica.
Menos sensible, menos rango de medición de fuerza.	Más sensible, gran rango de medición de fuerza.
Frecuencia de 400-500 Hz.	Mayor frecuencia, 1000 Hz en tres direcciones.
Adecuado para uso general.	Más recomendado para actividades con contenido de frecuencias altas.
Menor coste económico.	Mayor coste económico.

2. ELEMENTOS DEL SISTEMA

2.1 La plataforma

- Configuración sobre el piso.

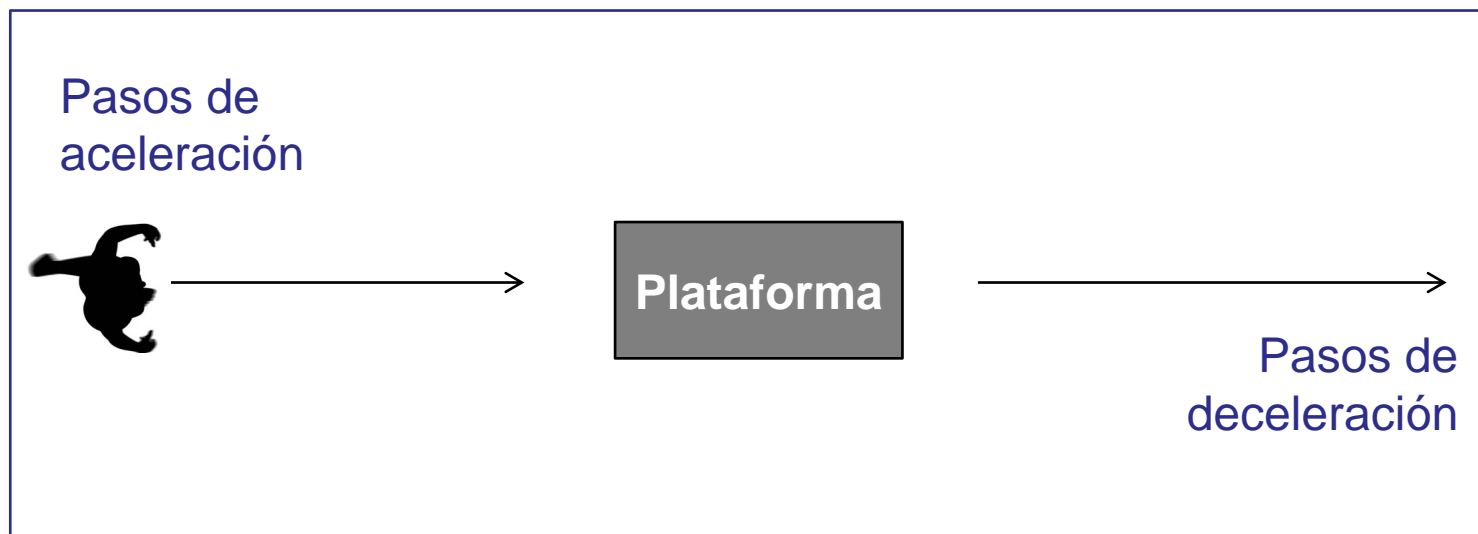


Figura 3. Posicionamiento de las plataformas dinamométricas en el centro de la pasarela..

2. ELEMENTOS DEL SISTEMA

2.1 La plataforma

➤ Configuración sobre el piso

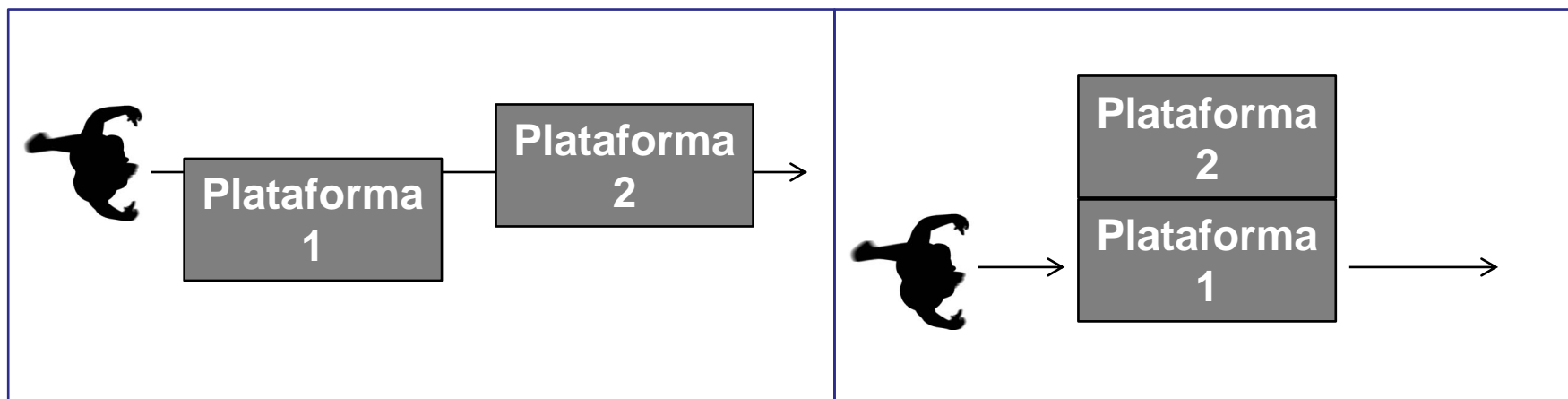


Figura 4. Configuración de dos plataformas dinámicas. (Izquierda) Configuración básica para el análisis de la marcha. (Derecha) Configuración básica para diferentes funciones.

2. ELEMENTOS DEL SISTEMA

2.1 La plataforma

- Configuración sobre el piso

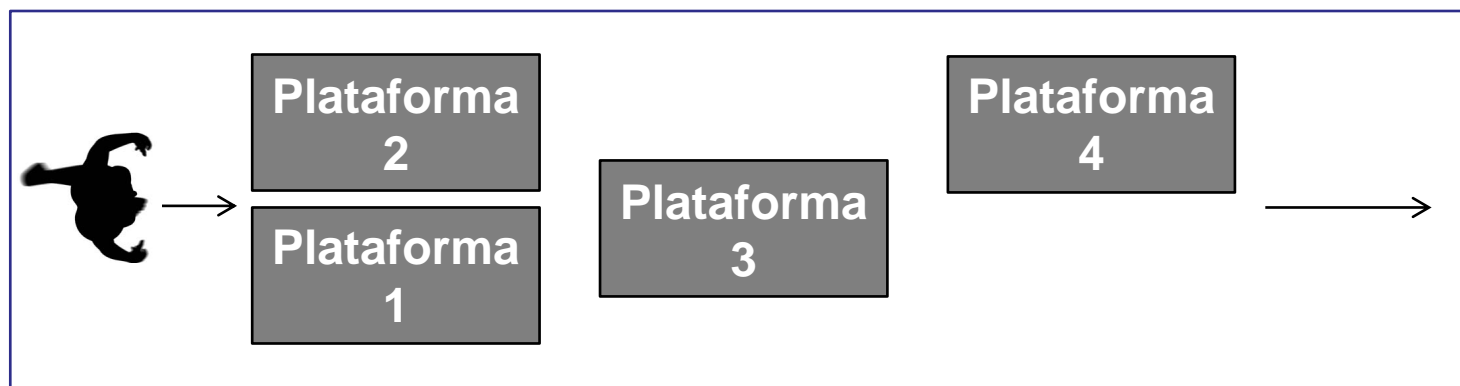


Figura 5. Configuración óptima con cuatro plataformas dinamométricas para el análisis de la marcha y otras funciones.

2. ELEMENTOS DEL SISTEMA

2.1 La plataforma

➤ Configuración sobre el piso

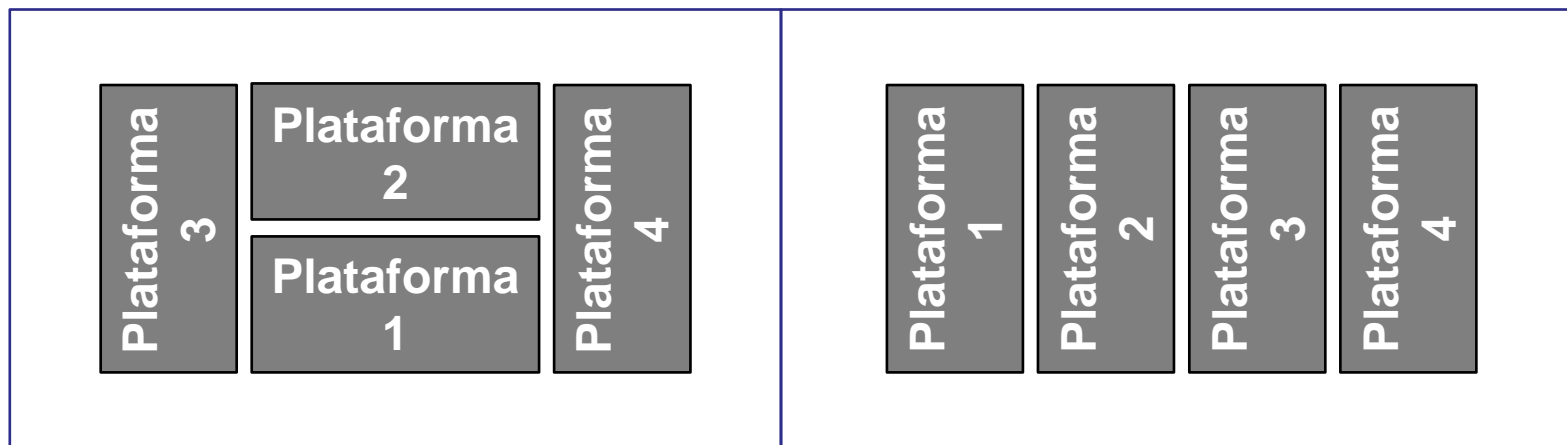


Figura 6. Configuración con cuatro plataformas dinamométricas para el análisis de la marcha en niños con trastornos neurológicos.

2. ELEMENTOS DEL SISTEMA

2.2 *El software*

Registro de fuerzas de reacción del suelo y la posterior edición de los datos.

Control de la velocidad de la marcha

Management of more than one instrumental technique at the same time

3. PROTOCOLO DE EVALUACIÓN

CALIBRACIÓN

DATOS ANTROPOMÉTRICOS

CAPTACIÓN DE DATOS

REVISIÓN DE LAS PRUEBAS

OBTENCIÓN DE RESULTADOS

3.1. CALIBRACIÓN DEL EQUIPO

- Procedimiento que indica el sistema cuando no hay carga. Señal a cero.
- Procedimiento de reinicio
- Evite la posible deriva de señal

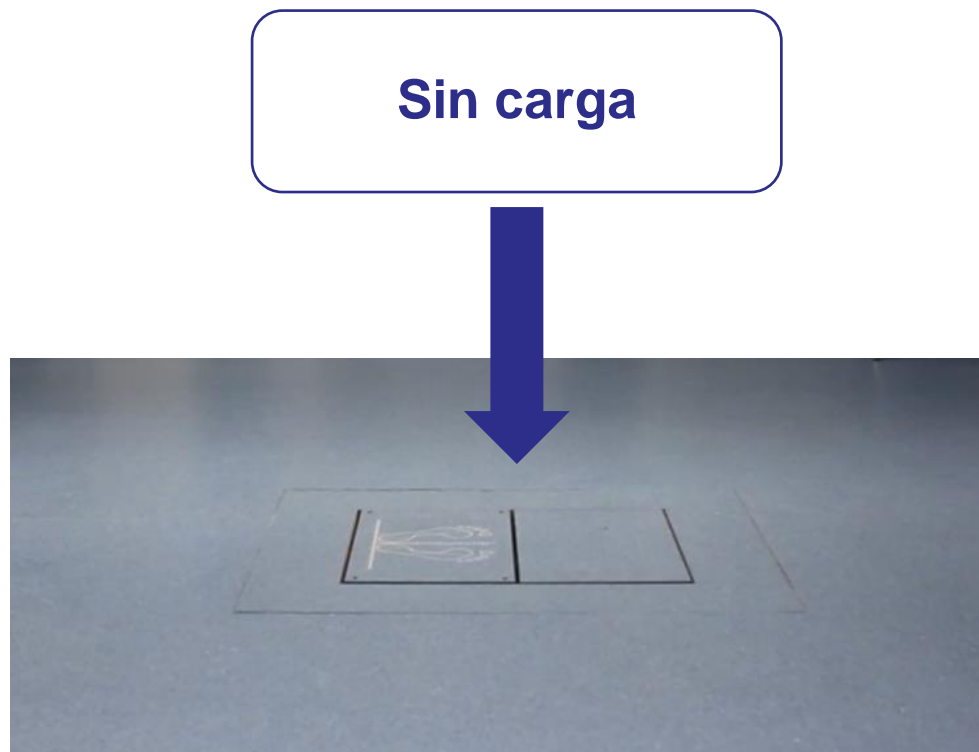


Figura 7. Plataforma de fuerza sin carga para el procedimiento de calibración.

3.2. OBTENCIÓN DE DATOS ANTROPOMÉTRICOS

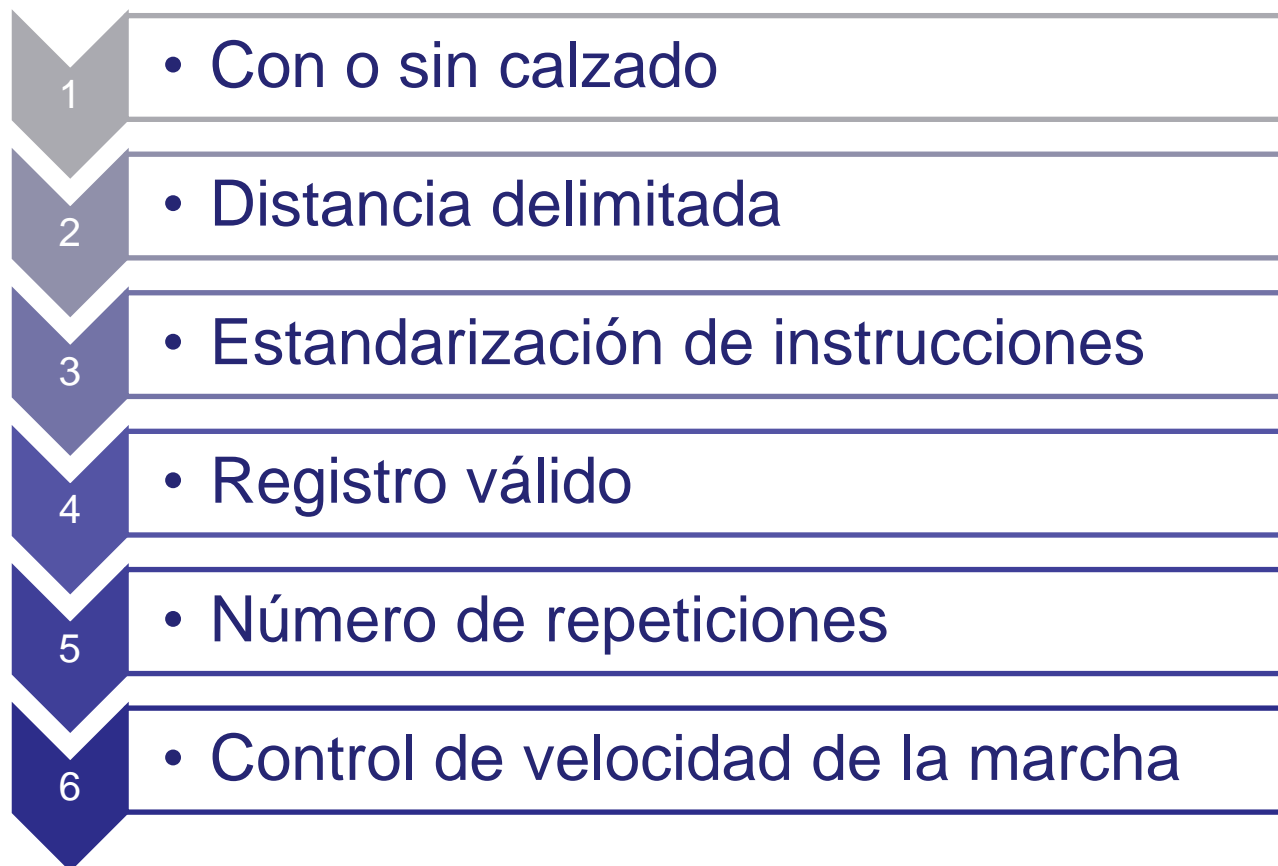
- Los datos antropométricos son cruciales para describir a los participantes en un estudio o para hacer comparaciones entre grupos.
- El peso de la persona evaluada es importante para usar las fuerzas de reacción del suelo registradas en las comparaciones posteriores del análisis entre grupos.



*Normalización
de las
fuerzas.*

Figura 8. Registro de peso en una plataforma dinamométrica antes del análisis de la marcha.

3.3. PROCEDIMIENTO DE OBTENCIÓN DE INFORMACIÓN



3.3. PROCEDIMIENTO DE OBTENCIÓN DE INFORMACIÓN

- Con o sin calzado

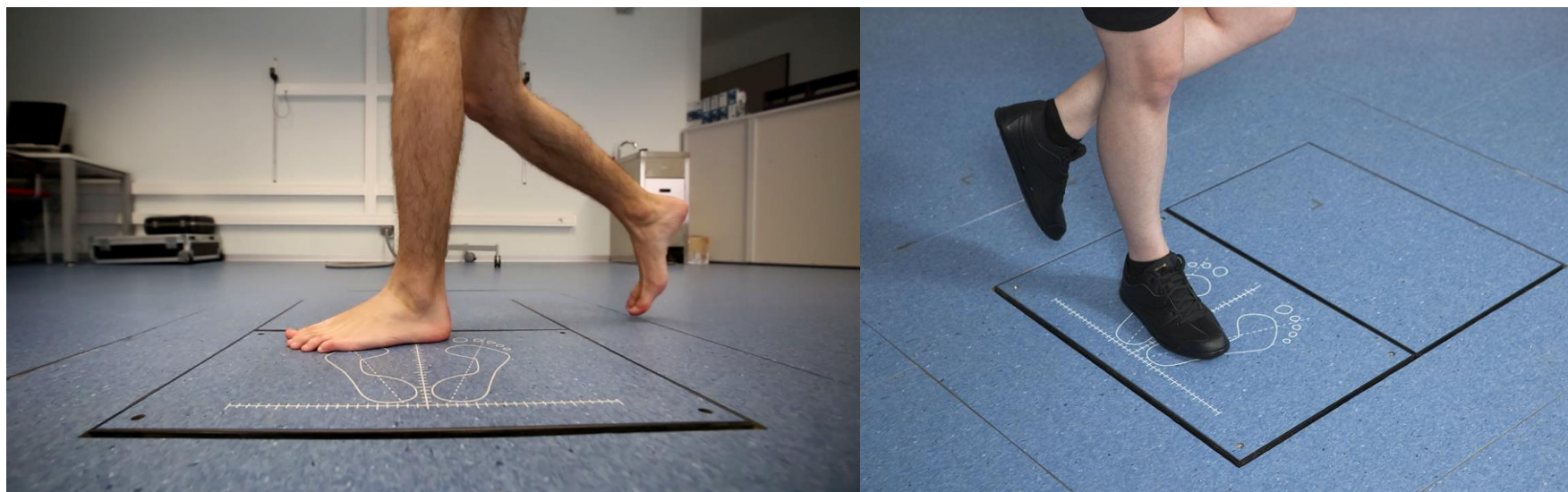


Figura 9. Modalidades de evaluación de la marcha con plataforma dinamométrica.

3.3. PROCEDIMIENTO DE OBTENCIÓN DE INFORMACIÓN

➤ Distancia delimitada



Figura 10. Pasarela delimitada de la evaluación de la marcha con plataforma dinamométrica. (Derecha) Espacio que permite la aceleración antes del paso dentro de la plataforma. (Izquierda) Espacio para la desaceleración después de pisar la plataforma.

3.3. PROCEDIMIENTO DE OBTENCIÓN DE INFORMACIÓN

➤ Estandarización de instrucciones

Caminar en línea recta de una marca a otra cuando se da la indicación de "inicio"

Caminar mirando hacia adelante

Caminar a una velocidad cómoda, habitual o autoseleccionada

Caminar sin ningún tipo de soporte para evitar transmitir la fuerza a otro punto

3.3. PROCEDIMIENTO DE OBTENCIÓN DE INFORMACIÓN

➤ Registro válido



Figura 11. Evaluación de la marcha con plataforma dinamométrica. (Izquierda) Repetición válida. (Medio) Registro no válido debido a la interferencia del paso anterior. (Derecha) Registro no válido debido a la interferencia del siguiente paso.

3.3. PROCEDIMIENTO DE OBTENCIÓN DE INFORMACIÓN

➤ Número de repeticiones

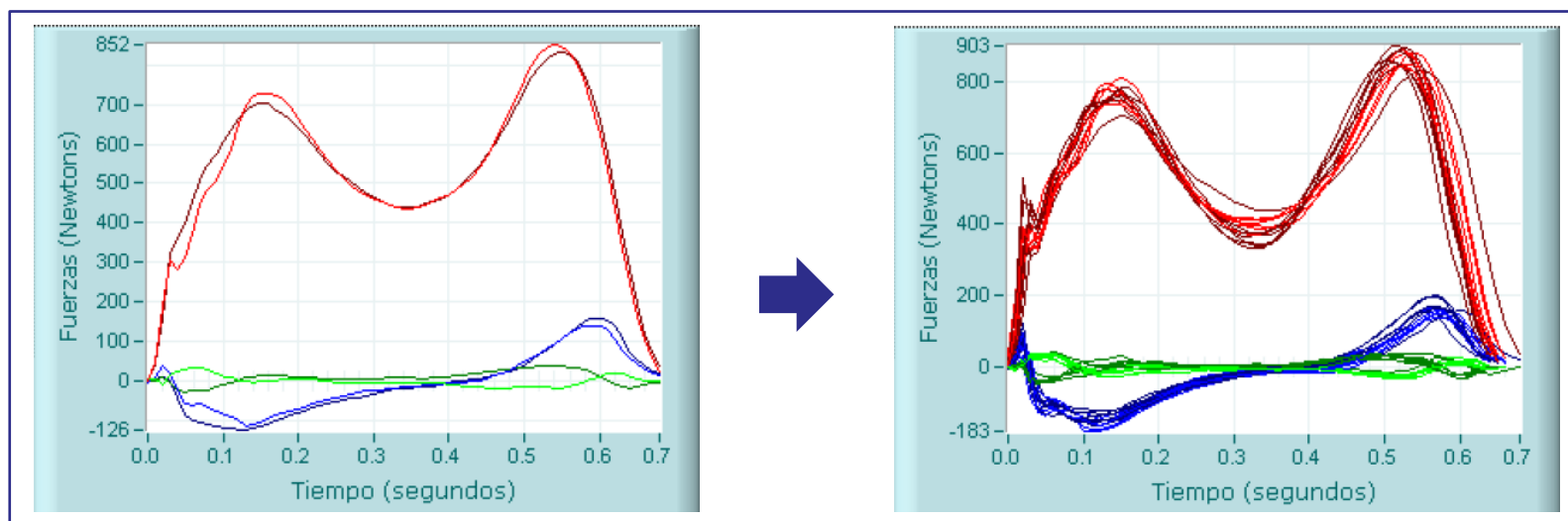


Figura 12. Curvas de fuerzas de reacción del suelo. Rojo: fuerza vertical. Azul: fuerza anterior-posterior. Verde: fuerza mediolateral. (Izquierda) Evaluación que incluye un único registro de fuerzas de reacción para el pie derecho y el izquierdo. (Derecha) Evaluación que incluye varios registros para pie derecho e izquierdo.

3.3. PROCEDIMIENTO DE OBTENCIÓN DE INFORMACIÓN

➤ Control de velocidad de la marcha

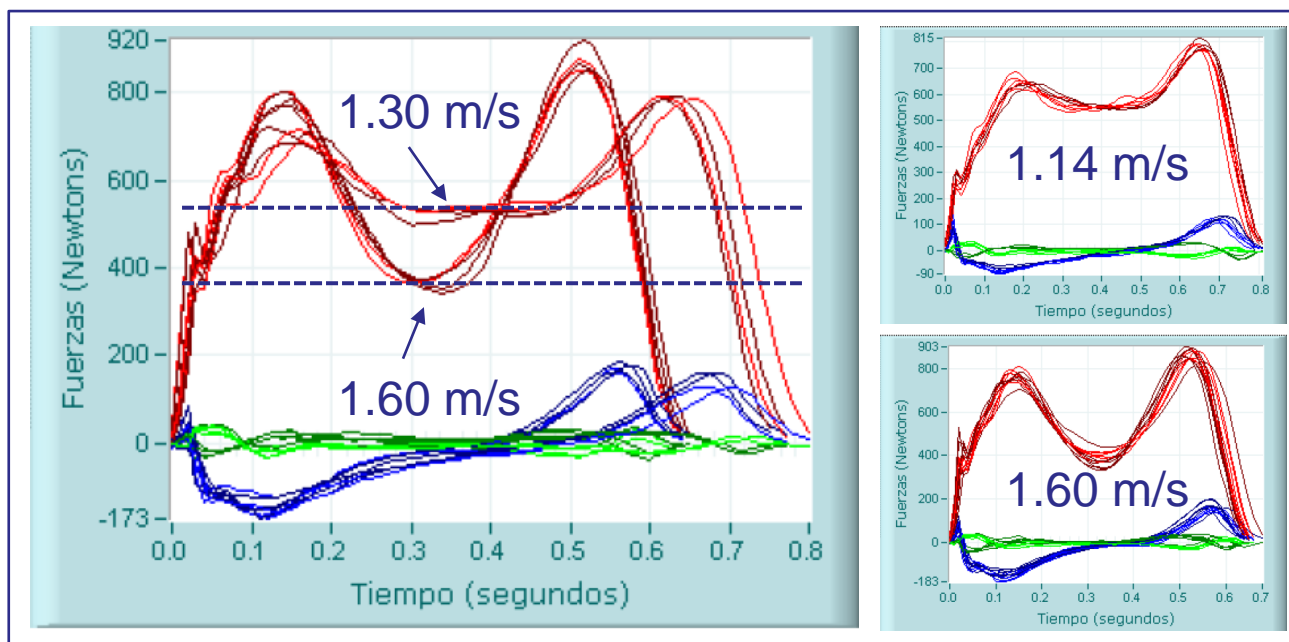


Figura 13. Curvas de fuerzas de reacción del suelo a diferentes velocidades de marcha (m/s, metro por segundo). En cada gráfico, la magnitud de la fuerza (N, Newton) se muestra en el eje Y y el tiempo (s) en el eje X.

3.4. REVISIÓN DE LAS REPETICIONES RECOLECTADAS

- Verifique las diferencias de velocidad de cada repetición de la marcha
- Eliminar curvas con una morfología claramente diferente de la mayoría de las curvas registradas

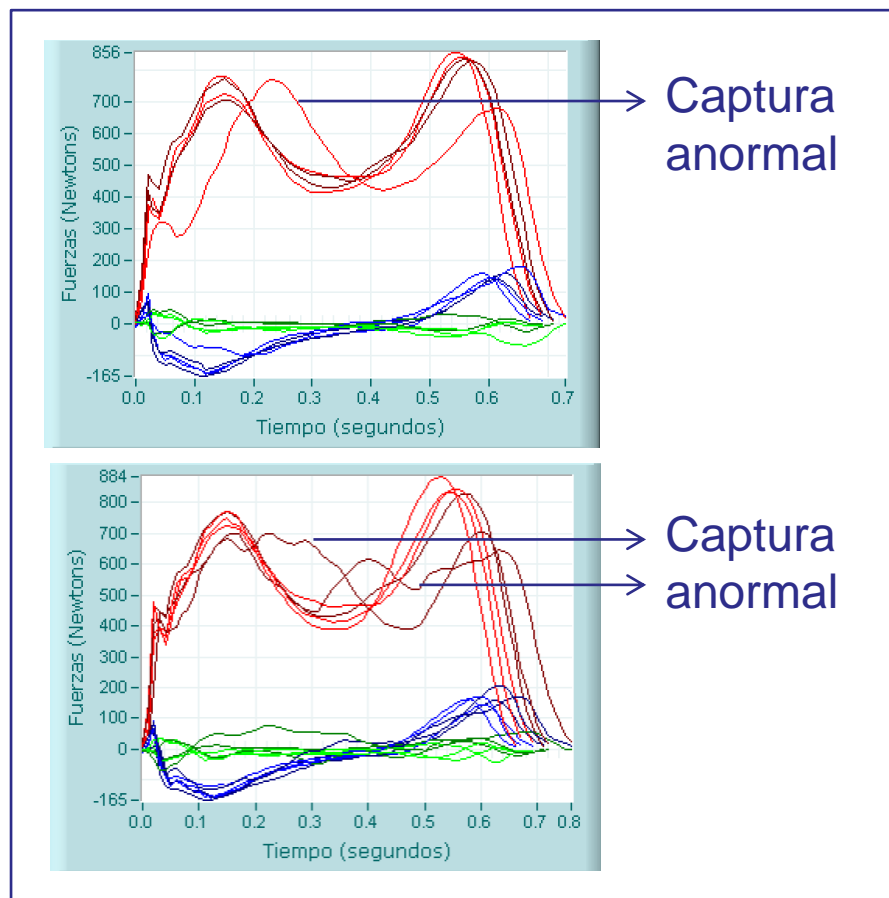


Figura 14. Ejemplos de evaluación de la marcha con plataformas dinamométricas. En ambos gráficos, el participante sufre una inversión involuntaria del tobillo.

3.5. LECTURA DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Fuerzas de reacción del suelo (FRS)

- Fuerza un resultado cuerpo suelo o como p la pos durante como la fuerza de reacción del suelo.

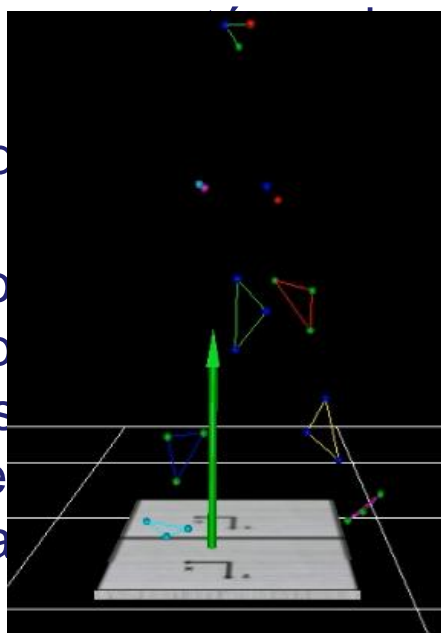


Figura 15. Vector de fuerza de reacción del suelo.

Centro de presiones (CP)

- La posición en el piso de los vectores de fuerza de reacción del suelo se conoce como el Centro de presión.
- El CP se refiere al punto de presión promedia debajo del pie o pies.

3.5. LECTURA DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Los componentes de las fuerzas de reacción del suelo

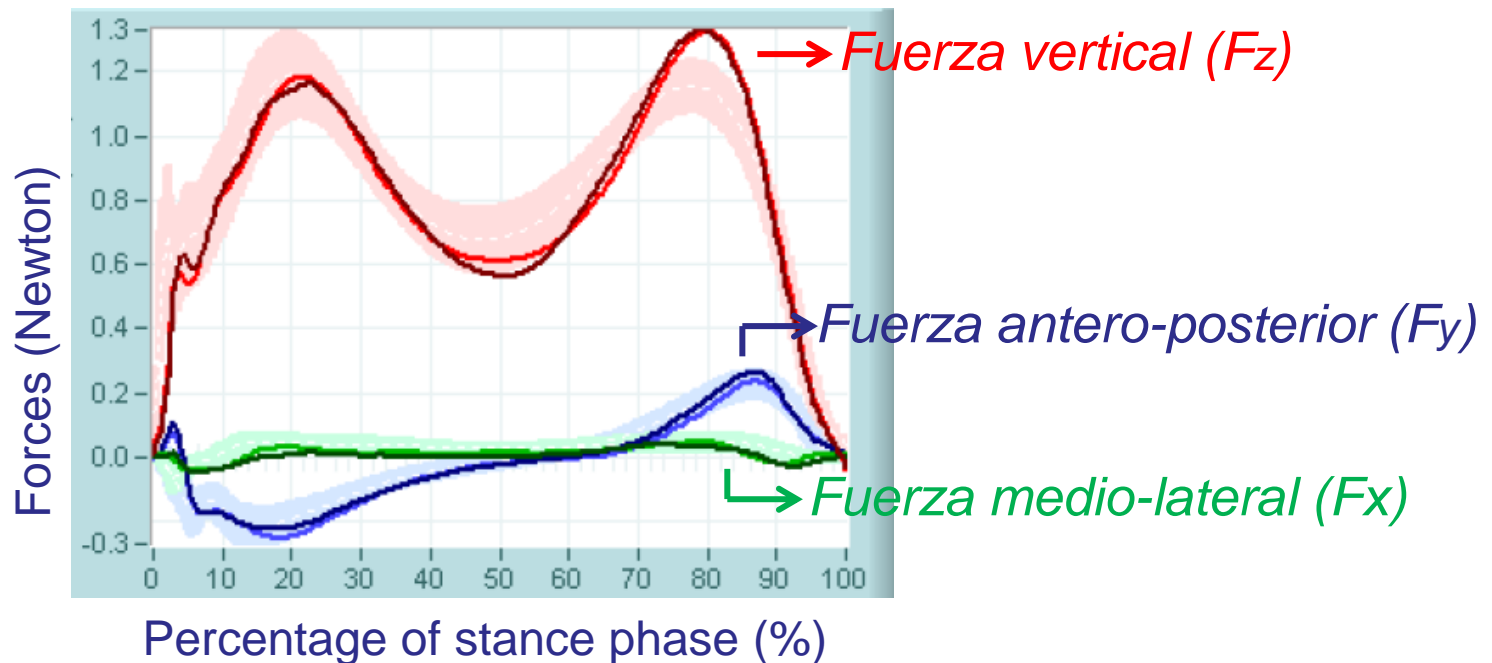
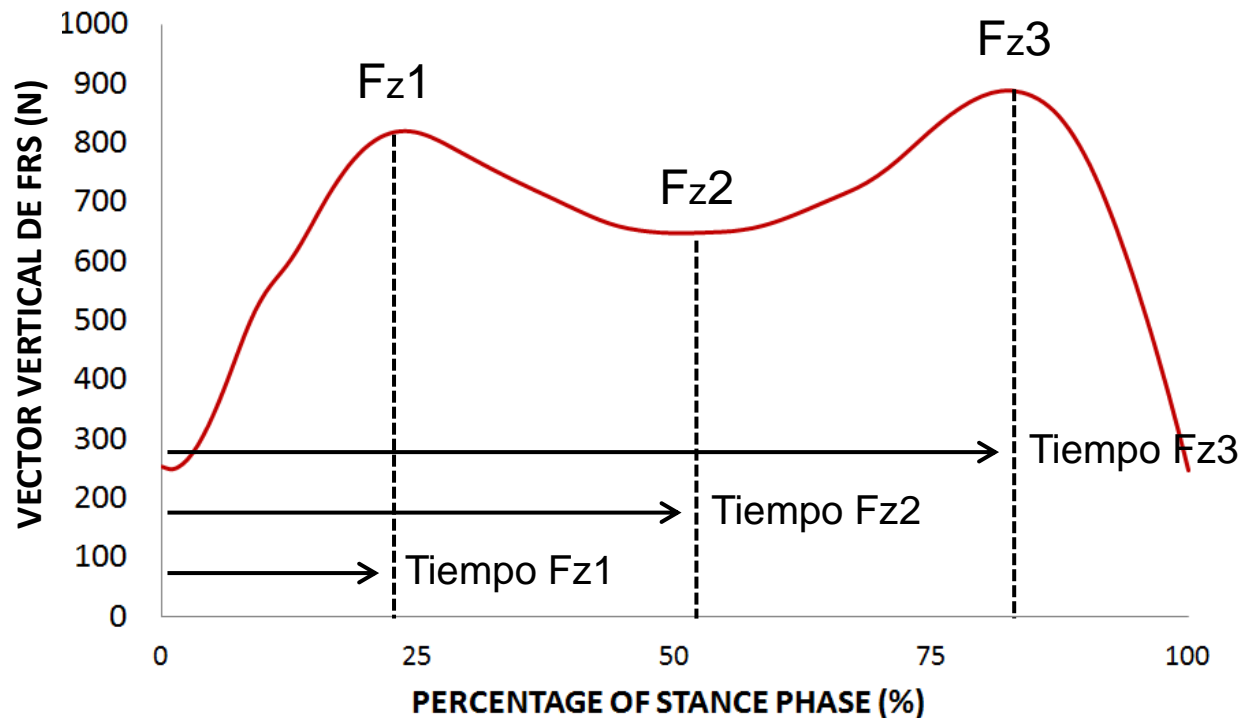


Figura 16. Fuerza de reacción del suelo y sus tres componentes..

3.5. LECTURA DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Las fuerzas de reacción del suelo: componente vertical



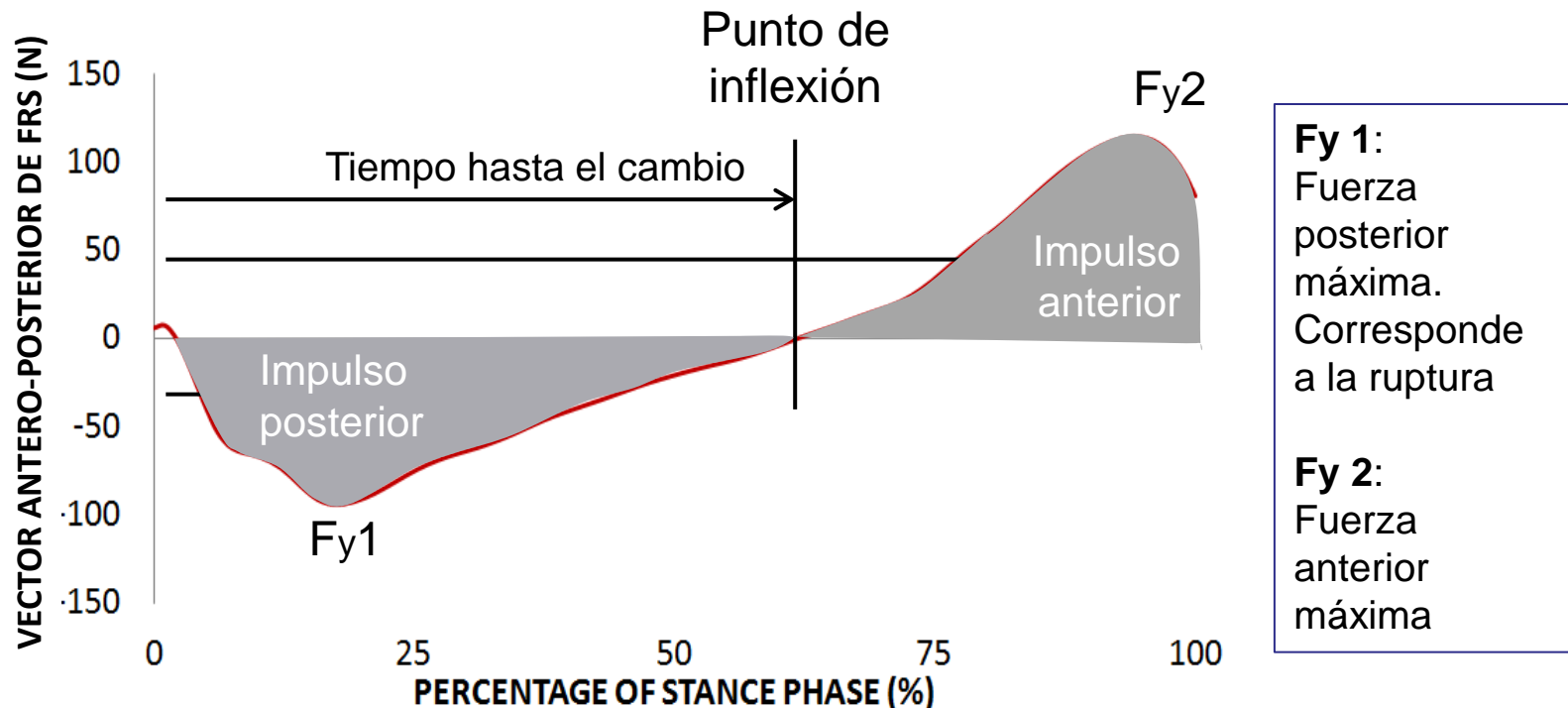
Fz 1: Pico de fuerza en máxima tolerancia de peso.

Fz 2: Pico de fuerza en posición media.

Fz 3: Pico de fuerza en la fase de

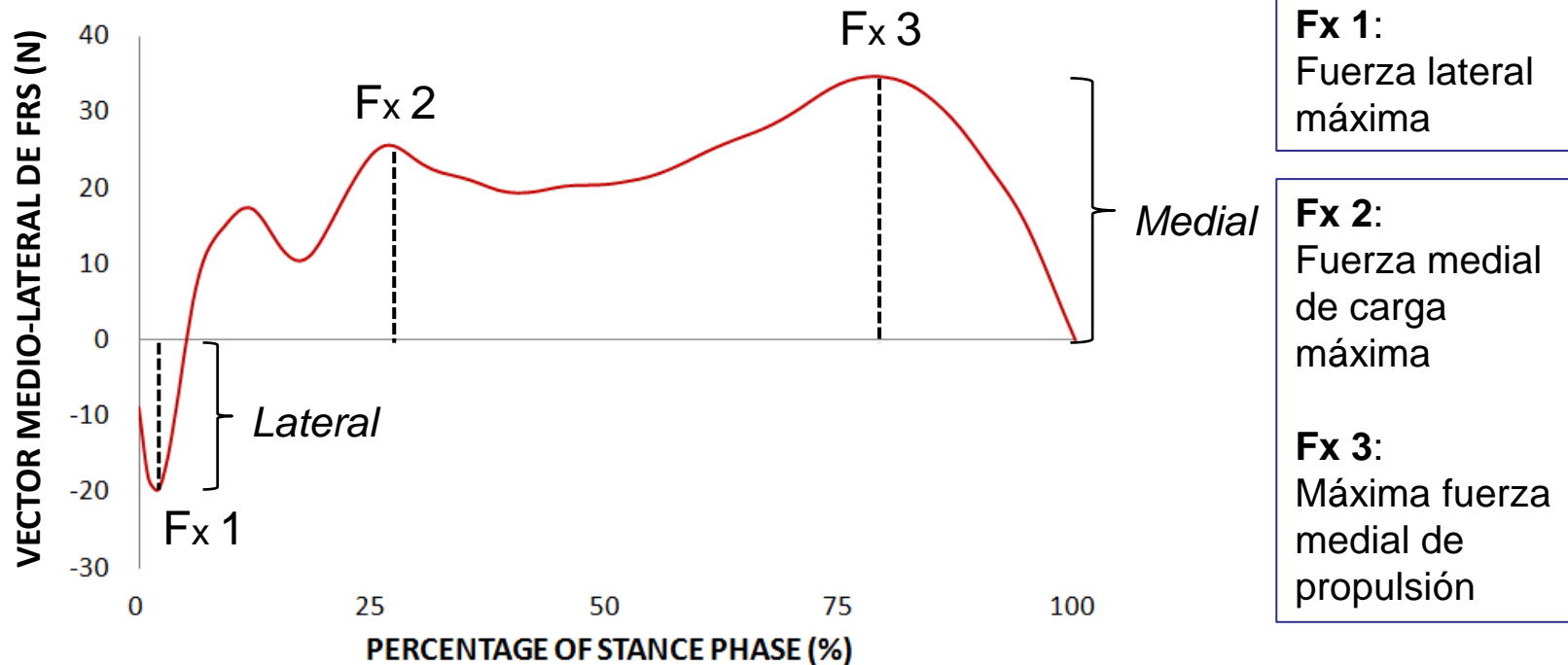
3.5. LECTURA DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Las fuerzas de reacción del suelo: componente antero-posterior



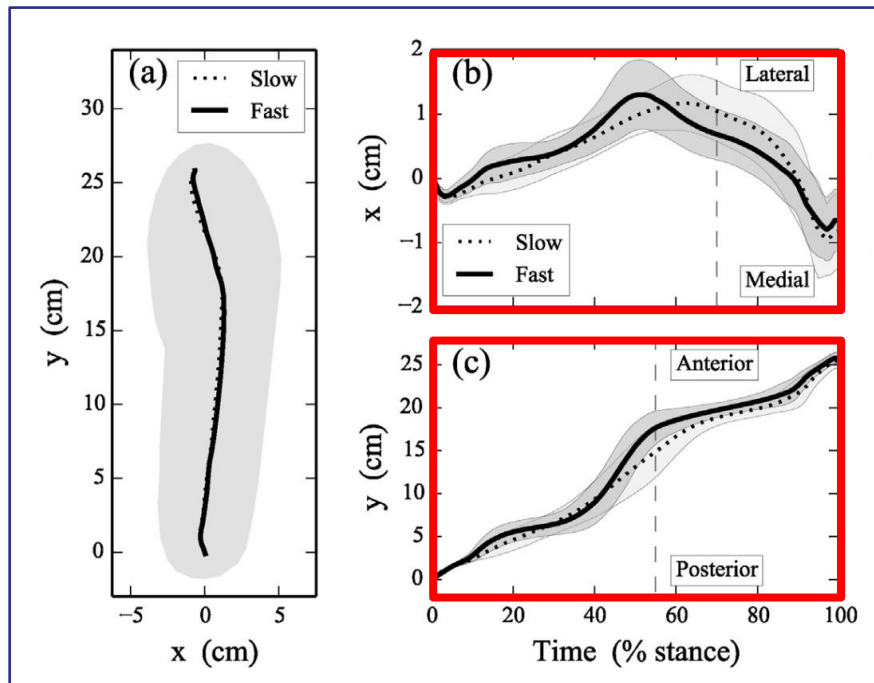
3.5. LECTURA DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Las fuerzas de reacción del suelo: componente medio-lateral



3.5. LECTURA DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

El centro de presiones (CP)



Medial-lateral contra Anterior-posterior

Velocidad de CP a lo largo del tiempo (fase de apoyo)

Figura 17. Movimiento del centro de presión durante la marcha a velocidad lenta (línea discontinua) y rápida (línea continua). De Todd C. Pataky y col. 2014.

- a) Trayectoria en los ejes X e Y
- b) Movimiento medial-lateral
- c) Movimiento anterior-posterior

3.5. LECTURA DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Diagrama de Pedotti

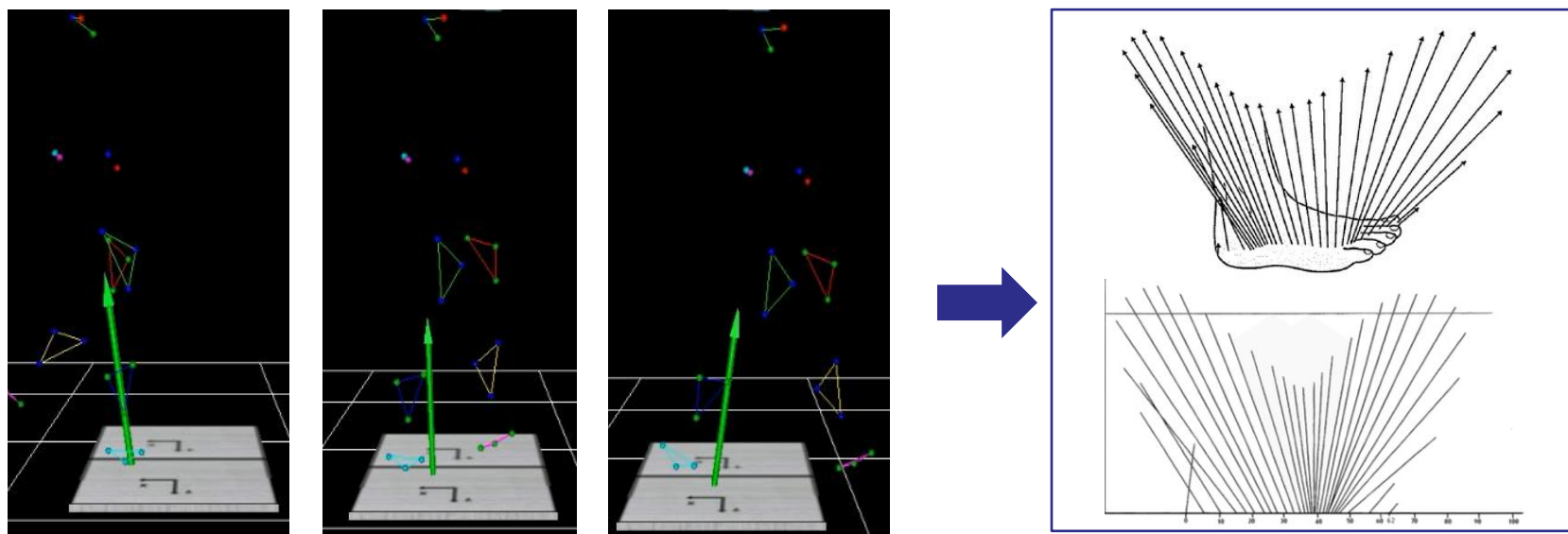


Figura 18. Diagrama de Pedotti. Cada flecha representa el vector de reacción del suelo en cada punto de la fase de apoyo, siendo la base de cada vector el centro de presión en ese punto en el tiempo. Imagen del Análisis de movimiento clínico, Vrije Universiteit. Disponible: www.studeersnel.nl.

3.5. LECTURA DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

El momentum en una plataforma de fuerzas

- No directamente medible
- Se puede calcular con la ubicación del centro de la plataforma en las direcciones medial-lateral y anterior-posterior

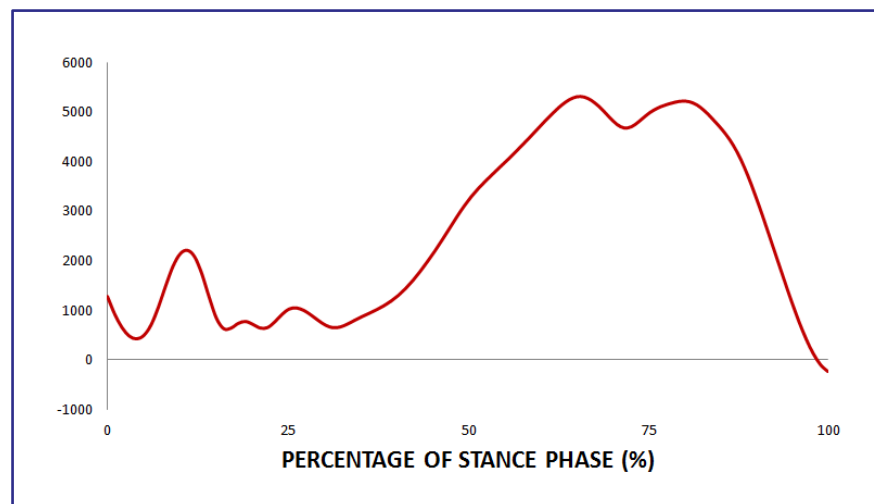


Figura 19. Momentum en la plataforma durante la fase de apoyo de una evaluación de la marcha del sujeto sano.

4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS

Ventajas

- No se requiere instrumentación
- Facilidad de uso e interpretación de los resultados
- Equipo de medición preciso
- Desarrollo de plataformas portátiles

Desventajas

- Debe construirse a lo largo de un recorrido
- El número de las diferentes superficies de contacto a medir es limitado
- Necesidad de más de una plataforma
- Alto costo económico

D.1 ¿Qué protocolos de evaluación de instrumentos biomecánicos de la marcha existen?

Parte 4. Plantillas de presión instrumentadas y evaluación de la marcha.
Enfoque clínico

1. DEFINICIÓN

Plantillas instrumentadas para presiones plantares

- Técnica de análisis cinético.
- Plantillas con sensores de presión.
- Sistema de presión en los zapatos.
- Equipo portátil.
- Evaluación de la marcha en condiciones funcionales.
- *Importancia de medir la presión.*

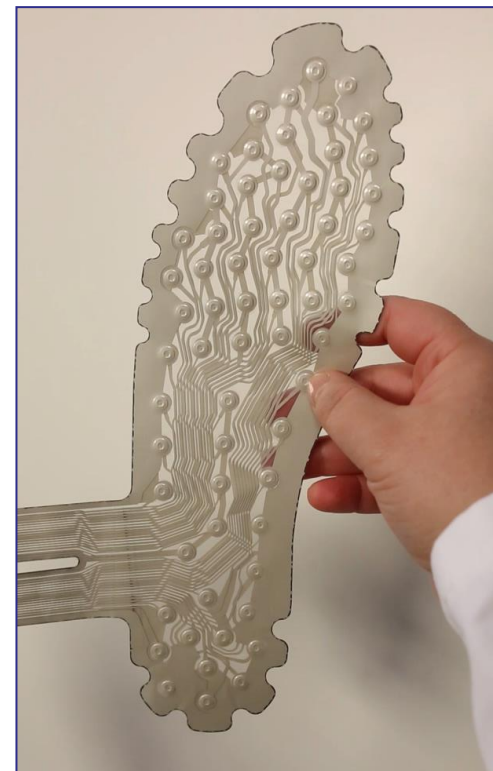


Figura 1. Plantillas instrumentadas con sensores de presión.

2. ELEMENTOS DEL SISTEMA

- Las plantillas con sensores de presión.
- Un amplificador de señal.
- Un módulo transmisor inalámbrico.
- Software (y computadora).



Figura 2. Elementos de un sistema de medición de la presión plantar basado en plantillas instrumentadas. Sistema de Biofoot / Institutos de Biomecánica de Valencia.

2. ELEMENTOS DEL SISTEMA

Plantillas instrumentadas

- Tipos de sensores.
- Diferentes tamaños.
 - Evitar pliegues.
 - Distribución de sensores.
- Unidad presión: kPa
- Mantenimiento cauteloso.

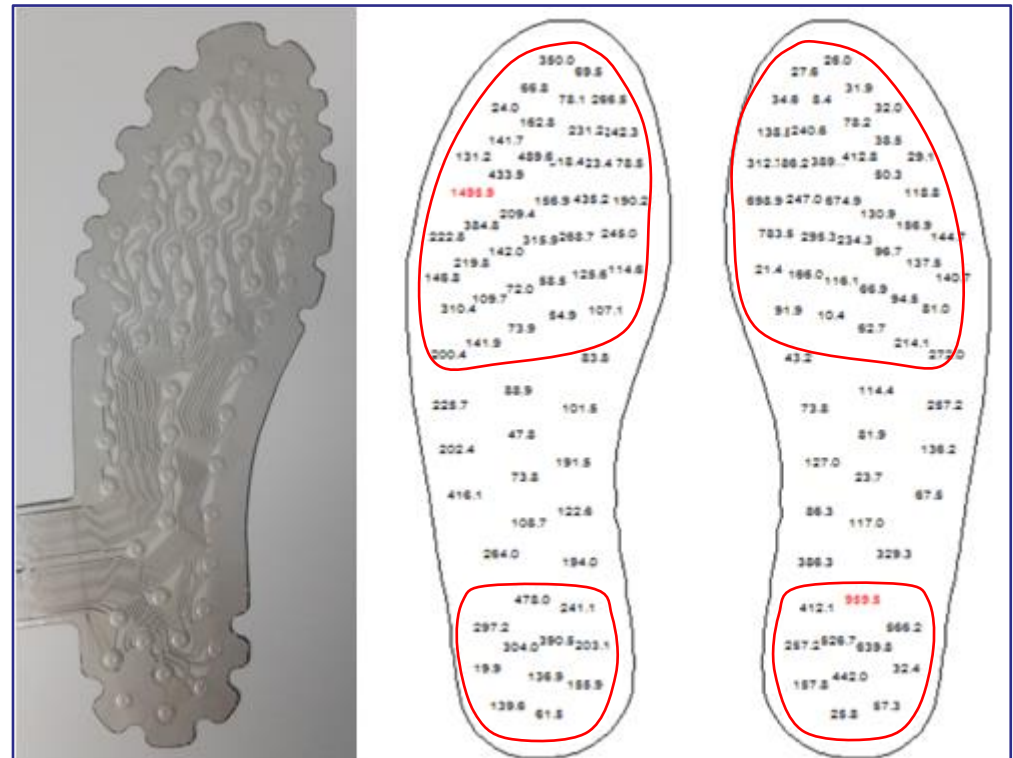


Figura 3. Distribución del sensor de presión en la plantilla instrumentada.

2. ELEMENTOS DEL SISTEMA

Plantillas instrumentadas: tipos de sensores

Capacitiva

Medición de los cambios en capacitancia eléctrica

Resistiva

Medición de los cambios en Resistencia eléctrica

Piezoelectrica

Medición del voltaje desde la presión aplicada a un material

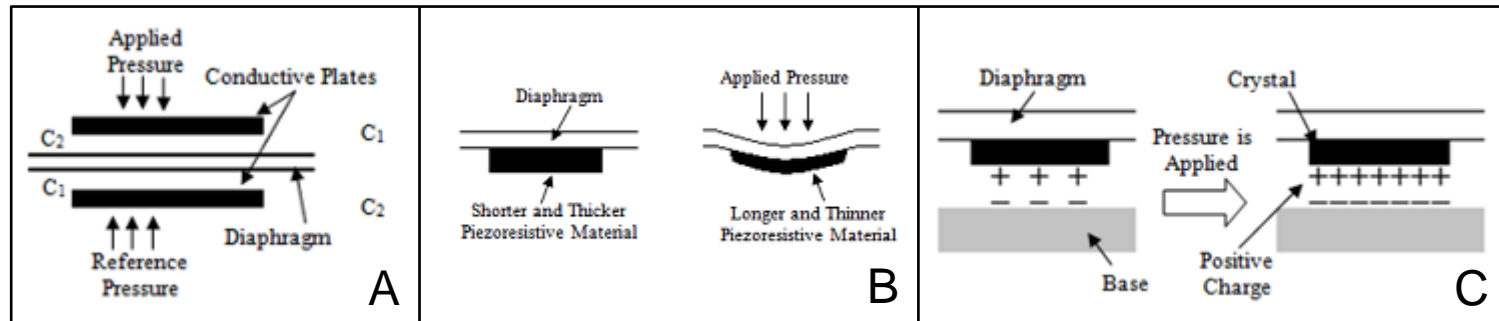


Figura 4. Funcionamiento de sensores de presión. (A) Capacitivo. (B) Resistivo. (C) Piezoeléctrico. Imágenes de Nader Ahmadzadeh et al. 2016

2. ELEMENTOS DEL SISTEMA

Plantillas instrumentadas y elementos

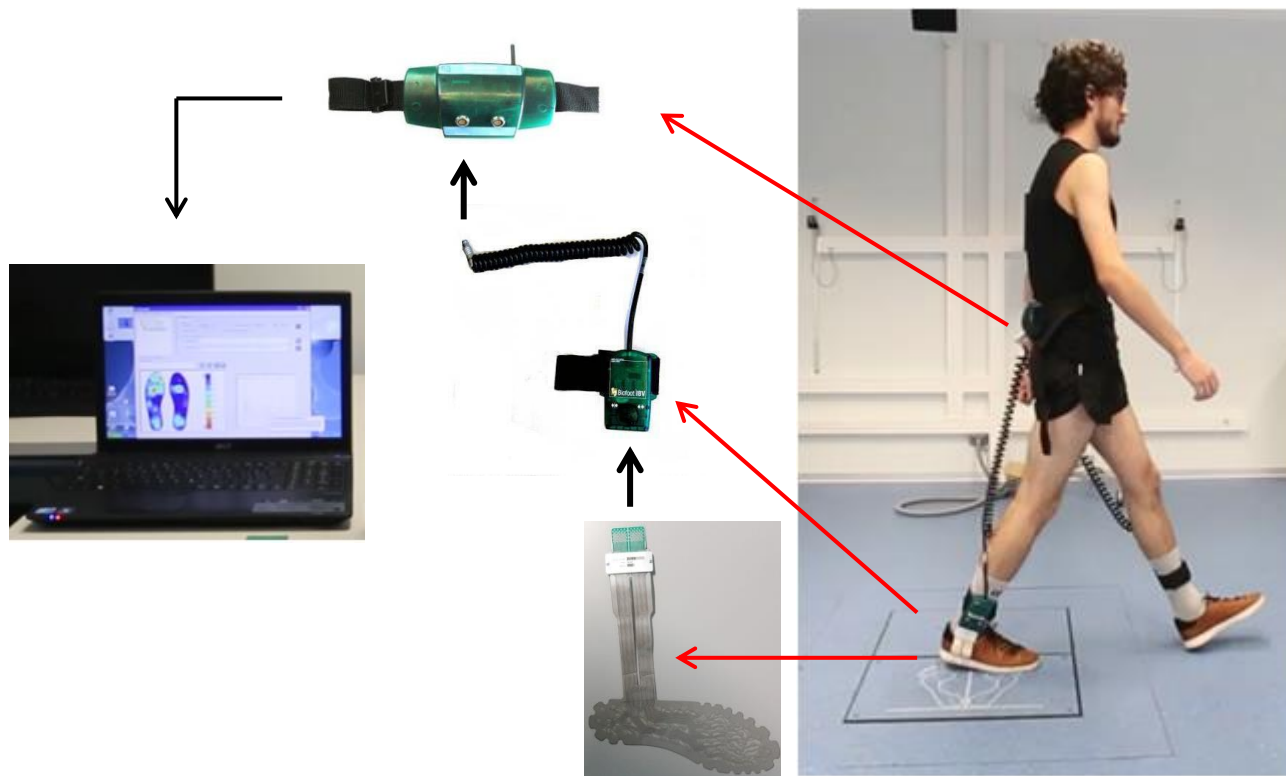


Figura 5.
Sistema de medición plantar.

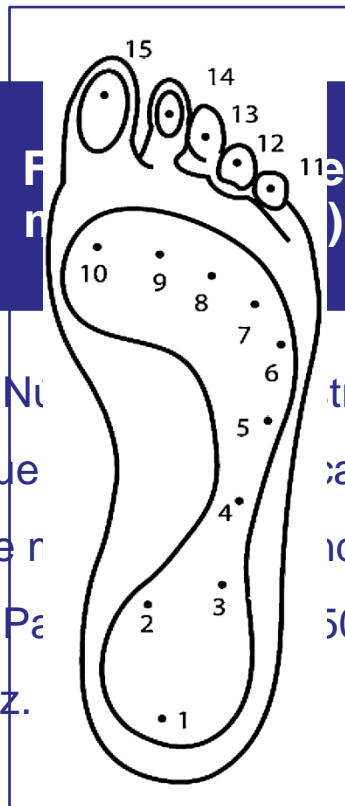
2. ELEMENTOS DEL SISTEMA

Especificaciones técnicas y recomendaciones de marcha

Número de sensores por plantilla.

- 24 - 1000 sensores por plantilla.
- Zonas críticas.

F
n
de r
➤ Pe
Hz.



Rango de presión (kPa)

- Rango de presión capaz de realizar una medida.
- Marcha normal: 200-500 Hz.
- Neuropatología diabética

Figura 6. Áreas anatómicas del pie que soportan el mayor peso corporal. Imagen de Lin Shu et al. 2010

3. PROTOCOLO DE EVALUACIÓN

Selección de plantillas e instrumentación

- Plantilla adecuada
"No demasiado apretado o suelto"
- Sujeto sentado
- Zapato cerrado



Figura 7. Posicionamiento de plantillas.
Sistema de Biofoot / Institutos de Biomecánica de Valencia.

3. PROTOCOLO DE EVALUACIÓN

Calibración plantillas instrumentadas



- Es necesario evitar la deriva de señal.
- La calibración de los sensores de presión en todo el sistema varía considerablemente
 - De pie con el peso del sujeto.
 - Sentado.
- Sistema con sensores piezoeléctricos: Período para la adaptación de temperatura y humedad dentro del calzado.

Figura 8. Posición para el procedimiento de calibración.

3. PROTOCOLO DE EVALUACIÓN

Control de la velocidad de la marcha

**Velocidad de la marcha
cómoda**

Lenta

Rápida

Variaciones de velocidad
entre ensayos de la misma
condición: no más del 10%

- Las magnitudes de las fuerzas generadas al caminar dependen de varios factores, incluida la velocidad.
- En una evaluación de las presiones plantares, la velocidad realizada debe ser controlada.
- Un aumento en la velocidad al caminar provoca un aumento en las presiones debajo del pie.

3. PROTOCOLO DE EVALUACIÓN

Obtención de resultados

$$\text{Presión} = \frac{\text{Fuerza}}{\text{Area}}$$

- Definición de presión
- Escala cromática

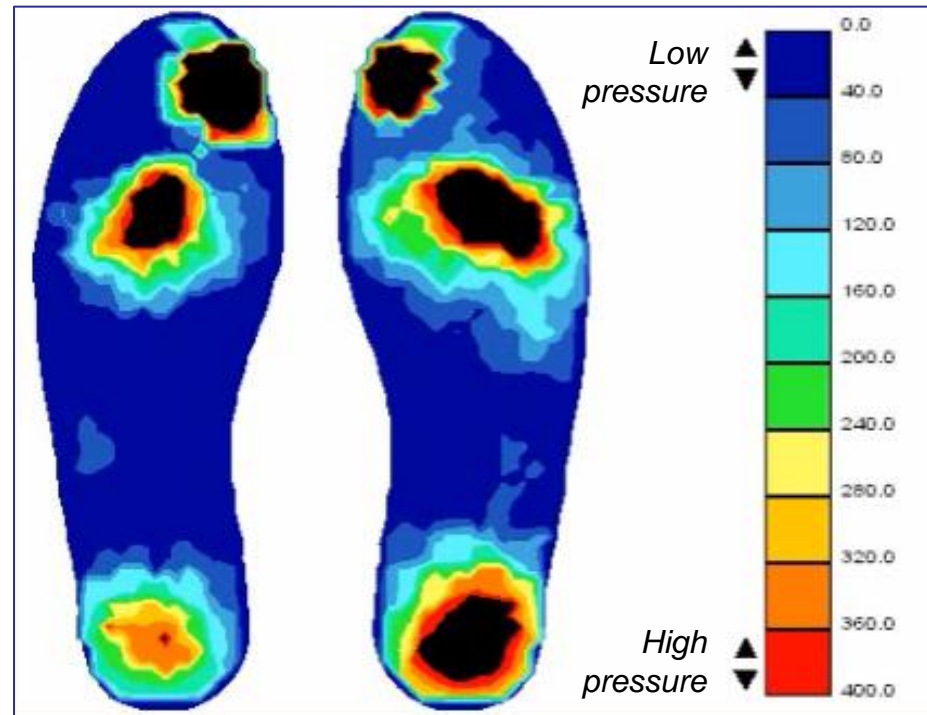


Figura 9. Mapa de escala cromática de una evaluación de presión plantar.

3. PROTOCOLO DE EVALUACIÓN

Obtención de resultados

- Regiones de interés.
- Medias de presiones.
- Pico de presión.

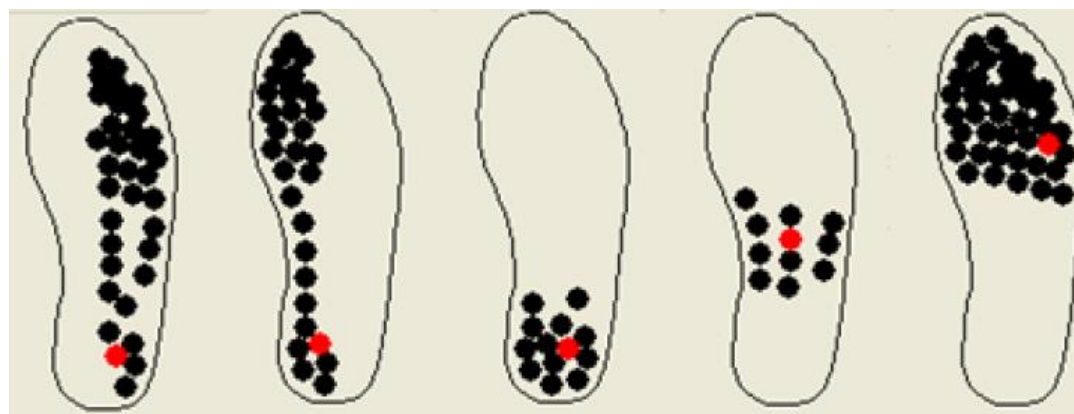


Figura 10. Estudio de las presiones plantares por área del pie. En orden de izquierda a derecha: área medial, área externa, talón, mediopié y antepié. Imagen del manual de usuario, sistema Biofoot / Biomechanics Institutos de Valencia

3. PROTOCOLO DE EVALUACIÓN

Obtención de resultados

- Integral presión-tiempo.
- Centro de presiones.
- Otros parámetros espaciotemporales.

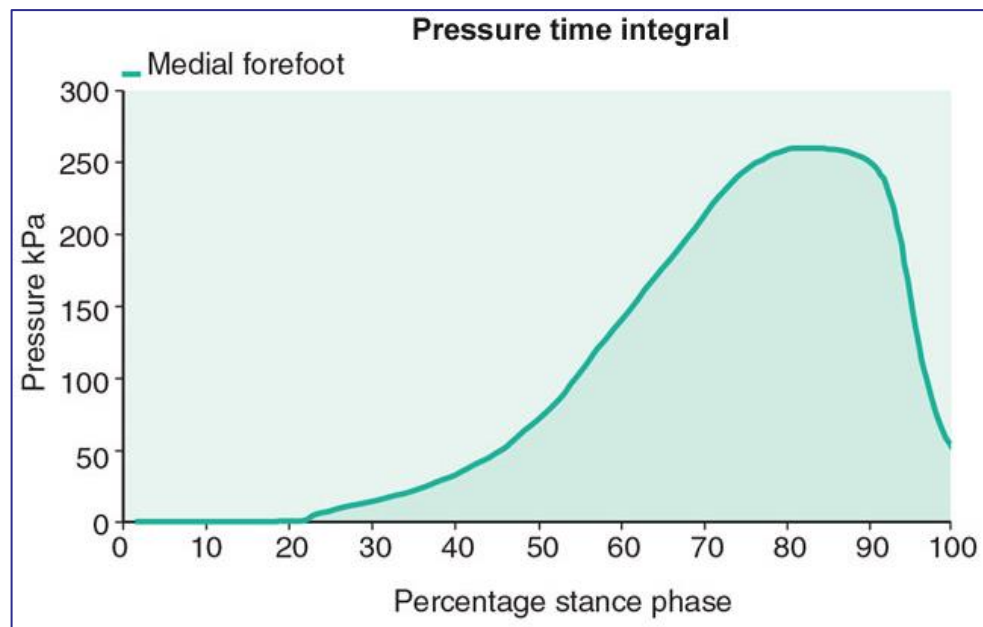


Figura 11. Curva integral presión-tiempo. Imagen de Richards J. (2018) The Comprehensive Textbook of Clinical Biomechanics. 2da ed..

4. VENTAJAS Y DESVENTAJAS

Ventajas	Desventajas
Permite la medición directa de la presión que actúa sobre el pie.	La curvatura del pie.
Valoración en condiciones funcionales: en movimiento y con zapatos	La falta de espacio para los transductores. El uso de cables desde el interior del zapato.
No requiere una preparación excesiva del tema.	No se recomienda comparar los valores de medición de presión entre diferentes sistemas.

D.1 ¿Qué protocolos de evaluación de instrumentos biomecánicos de la marcha existen?

Ideas Clave

IDEAS CLAVE

- La marcha humana se puede evaluar con diferentes instrumentos de evaluación biomecánica, que nos permiten objetivar su desempeño y sus déficits.
- La fotogrametría es una técnica para medir variables cinemáticas a partir de imágenes, ya sea de cámaras fotográficas o de video..
- Para realizar un análisis de la marcha con fotogrametría, es necesario instrumentar a la persona evaluada con un modelo biomecánico compuesto por marcadores que indicarán los puntos que componen los segmentos corporales que realizan el movimiento.

IDEAS CLAVE

- El modelo biomecánico más utilizado para medir la marcha es la Técnica del Sistema Anatómico Calibrado (CAST), que permite analizar la marcha en los tres planos de movimiento.
- Entre las variables clínicas de la marcha que se pueden medir con fotogrametría se encuentran Rango de movimiento de flexión-extensión, rotación interna-externa, abducción-aducción en cada articulación del modelo biomecánico y ángulos pico, que se refiere al grado máximo de movimiento alcanzado en la curva analizada.

IDEAS CLAVE

- La aceleración lineal durante la marcha se puede medir con un sistema de acelerómetro y se refiere al cambio en la velocidad lineal en intervalos de tiempo sucesivos. La unidad de aceleración, en el Sistema Internacional de Unidades, es metros por segundo cuadrado (m/s^2), aunque a menudo se puede encontrar expresada en relación de gravedad (g). La aceleración positiva tiene un valor positivo, pero un valor negativo representa una desaceleración.
- El protocolo que utiliza acelerómetros en el análisis de la marcha normalmente consiste en colocar un acelerómetro en el tronco, la cabeza y el segmento tibial. Uno de los puntos más importantes del protocolo es la fijación del acelerómetro en la piel, que debe evitar el movimiento relativo del acelerómetro para representar fielmente la aceleración del segmento a medir.

IDEAS CLAVE

- Una plataforma de fuerza o una placa de fuerza es un equipo para medir las fuerzas de reacción del suelo (FRS) y su punto de aplicación conocido como centro de presión (COP). Es un elemento ampliamente utilizado en la evaluación de la marcha y el equilibrio humanos, así como en varias actividades y funciones humanas.
- Las fuerzas registradas dependerán, como ya hemos dicho, de la velocidad, pero también del peso de la persona valorada. Por eso, para poder realizar comparaciones entre individuos necesitamos dividir las fuerzas obtenidas por el peso de la persona y así obtener un parámetro adimensional comparable entre sujetos. Por otro lado, el control de la velocidad de la marcha también es necesario entre las pruebas de marcha de la misma condición.

IDEAS CLAVE

- El vector de fuerza de reacción del suelo tiene tres componentes, en los tres ejes del espacio: a) Componente de fuerza vertical en el eje Z, b) Fuerza antero-posterior en el eje Y, y c) Componente medial-lateral en el eje X.
- Las plantillas instrumentadas para presión plantar son una técnica de análisis cinético que, dentro de las plantillas, cuentan con varios sensores de presión distribuidos estratégicamente, para medir la presión plantar estática y dinámica. Estas plantillas se ubican dentro del calzado de la persona evaluada, por lo que es un equipo portátil y permiten la evaluación de la marcha en condiciones funcionales, es decir, con calzado y en movimiento. La importancia de medir la presión plantar es que las presiones excesivas pueden causar daño tisular.

IDEAS CLAVE

- En el análisis de las presiones plantares, es más útil estudiar los parámetros para cada zona del pie. Generalmente los dispositivos permiten analizar los resultados de la presión plantar dividida en el talón, mediopié, antepié y zona interna y externa del pie.

D.1 Which gait biomechanical instruments evaluation protocols exist?

Bibliografía

5. BIBLIOGRAFÍA (Parte 1)

1. Ali Salah A., Gevers T., Editors. Compute Analysis of Human Behavior. 1st ed. London (England): Springer, 2011.
2. Armand, S., Decoulon, G., Bonnefoy-Mazure, A. (2016) Gait analysis in children with cerebral palsy. EFORT Open Rev, 1.
3. Bauer, JJ., Pavol, MJ., Snow, CM., Hayes, WC. (2007) MRI-derived body segment parameters of children differ from age-based estimates derived using photogrammetry. Journal of Biomechanics, 40, 2904-2910. doi:10.1016/j.jbiomech.2007.03.006.
4. Cappozzo, A., Croce, U. D., Leardini, A., Chiari, L. (2005). Human movement analysis using stereophotogrammetry Part 1: theoretical background. Gait & Posture, 21(2), 186–196. doi:10.1016/j.gaitpost.2004.01.010
5. Chiari, L., Croce, U. D., Leardini, A., Cappozzo, A. (2005). Human movement analysis using stereophotogrammetry Part 2: Instrumental errors. Gait & posture, 21(2), 197-211. doi:10.1016/j.gaitpost.2004.04.004
6. Croce, U. D., Leardini, A., Chiari, L., Cappozzo, A. (2005). Human movement analysis using stereophotogrammetry Part 4: assessment of anatomical landmark misplacement and its effects on joint kinematics. Gait & posture, 21(2), 226-237. doi:10.1016/j.gaitpost.2004.05.003.
7. Leardini, A., Chiari, L., Croce, U. D., & Cappozzo, A. (2005). Human movement analysis using stereophotogrammetry Part 3. Soft tissue artifact assessment and compensation. Gait & Posture, 21(2), 212-225. doi:10.1016/j.gaitpost.2004.05.002
8. Lee, EH., Goh, JC., Bse K. (1992) Value of gait analysis in the assessment of surgery in cerebral palsy. Arch Phys Med Rehabil, 73(7), 642-6.

5. BIBLIOGRAFÍA (Parte 1)

8. Lu, T.-W., & Chang, C.-F. (2012). Biomechanics of human movement and its clinical applications. *The Kaohsiung Journal of Medical Sciences*, 28(2), S13–S25. doi:10.1016/j.kjms.2011.08.004
9. Monk A. P. , Van Oldernrijk J. , Riley Nicholas D. , Gill H.S., Murray D. W. (2016). Biomechanics of the lower limb. *Surgery*, 34(9), 427-435. doi:10.1016/ j.mpsur.2016.06.007
10. Pueo, B., Jimenez-Olmedo JM. (2017). Application of motion capture technology for sport performance analysis. El uso de la tecnología de captura de movimiento para el análisis del rendimiento deportivo. *Retos*, 32(2), 241-247.
11. Pantzar-Castilla, E., Cereatti, A., Figari, G., Valeri, N., Paolini, G., Della Croce, U., Magnuson, A., Riad, J. (2018) Knee joint sagittal plane movement in cerebral palsy: a comparative study of 2-dimensional markerless video and 3-dimensional gait analysis. *Acta Orthopaedica*, 89(6), 656-661. DOI 10.1080/17453674.2018.1525195.
12. Richards J., Editor. *The Comprehensive Textbook of Clinical Biomechanics*. 2nd ed. Preston (UK): Elsevier, 2018.
13. Sandau, M., Koblauch, H., Moeslund, T. B., Aanæs, H., Alkjær, T., & Simonsen, E. B. (2014). Markerless motion capture can provide reliable 3D gait kinematics in the sagittal and frontal plane. *Medical Engineering & Physics*, 36(9), 1168–1175. doi:10.1016/j.medengphy.2014.07.007
14. Schenk, T. (2005). *Introduction to photogrammetry*. The Ohio State University, Columbus, 106.
15. Zuk, M., Pezowicz, C. (2015) Kinematic Analysis of a Six-Degrees-of-Freedom Model Based on ISB Recommendation: A Repeatability Analysis and Comparison with Conventional Gait Model. *Applied Bionics and Biomechanics*, 503713. doi: 10.1155/2015/503713.

5. BIBLIOGRAFÍA (Parte 2)

1. Brodie M., Beijer T., Canning C. and Lord S. Head and pelvis stride-to-stride oscillations in gait: validation and interpretation of measurements from wearable accelerometers. *Physiol. Meas.* 36 (2015) 857–872.
2. Godfrey A., Del Din S., Barry G., Mathers J.C., and Rochester L. Instrumenting gait with an accelerometer: A system and algorithm examination. *Med Eng Phys.* 2015 Apr; 37(4): 400–407.
3. Jarchi D., Pope J., Lee T.K. M., Tamjidi L., Mirzaei A. and Sanei S. A review on accelerometry based gait analysis and emerging clinical applications. *EEE Rev. Biomed. Eng.*, vol. 11, pp. 177–194, 2018.
4. Lafortune M. Three-dimensional acceleration of the tibia during walking and running. *J. Biomechanics* Vol. 24, N° 10, pp. 877-886, 1991.
5. Richards J., Editor. *The Comprehensive Textbook of Clinical Biomechanics*. 2nd ed. Preston (UK): Elsevier, 2018.
6. Salah A., Gevers T., Editors. *Compute Analysis of Human Behavior*. 1st ed. London (England): Springer, 2011.
7. Sant'Anna A., Wickstrin N. Developing a Motion Language: Gait Analysis from accelerometers sensor systems. 3rd International Conference on Pervasive Computing Technologies for Healthcare, London, 1-3 April, 2009, pp. 1-8. 108 (2012) 715-723.

5. BIBLIOGRAFÍA (Parte 2)

8. Sinclair J., Hobbs S., Protheroe L., Edmundson C., Greenhalgh A. Determination of gait events using an externally mounted shank accelerometer. *Journal of Applied Biomechanics*, 2013, 29, 118-122.
9. Woodford, Chris. Accelerometers. [cited 2020 January]. Web site available: <https://www.explainthatstuff.com/accelerometers.html>.
10. Tao W., Liu T., Zheng R., Feng H. Gait Analysis Using Wearable Sensors. *Sensors* 2012, 12(2), 2255-2283.
11. Yang M., Zheng H., Wang H. McClean S., Newell D. iGait: An interactive accelerometer based gait analysis system. *Compute methods and programs in biomedicine* 108 (2012) 715-723.

5. BIBLIOGRAFÍA (Parte 3)

1. Ali Salah A., Gevers T., Editors. Compute Analysis of Human Behavior. 1st ed. London (England): Springer, 2011.
2. Azadian E., Majlesi M., Jafarnezhadgero A.A. The effect of working memory intervention on the gait patterns of the elderly. *Journal of Bodywork & Movement Therapies* 22 (2018) 881e887.
3. Claudiane Arakaki Fukuchi, Reginaldo Kisho Fukuchi and Marcos Duarte. Effects of walking speed on gait biomechanics in healthy participants: a systematic review and meta-analysis. *Systematic Reviews* (2019) 8:153.
4. G. Ryckewaert, A. Delval, S. Bleuse, J.-L. Blatt, L. defebvre. Biomechanical mechanisms and centre of pressure trajectory during planned gait termination. *Neurophysiologie Clinique/Clinical Neurophysiology* (2014) 44, 227—233.
5. Hadar Shauliana, Deborah Solomonow-Avnona, Amir Hermanb, Nimrod Rozenc, Amir Haima, Alon Wolfa. The effect of center of pressure alteration on the ground reaction force during gait: A statistical model. *Gait & Posture* 66 (2018) 107–113.
6. Lucia Bizovska, Zdenek Svoboda, Patrik Kutilek, Miroslav Janura, Ales Gaba. Variability of centre of pressure movement during gait in young and middle-aged women. *Gait & Posture* 40 (2014) 399–402.

5. BIBLIOGRAFÍA (Parte 3)

7. Moon-Seok Kwon, Yu-Ri Kwon, Yang-Sun Park, Ji-Won. Comparison of gait patterns in elderly fallers and non-fallers. *Technology and Health Care* 26 (2018) S427–S436.
8. Richards J., Editor. *The Comprehensive Textbook of Clinical Biomechanics*. 2nd ed. Preston (UK): Elsevier, 2018.
9. Sánchez J., Prat J., Hoyos J., Viosca E., Soler C., Comín M., Lafuente R., Cortés A., Vera P. *Biomecánica de la marcha normal y patológica*. Valencia, España: Instituto de Biomecánica de Valencia, 1993.
10. Sławomir Winiarski, Alicja Rutkowska-Kucharska. Estimated ground reaction force in normal and pathological gait. *Acta of Bioengineering and Biomechanics* Vol. 11, No. 1, 2009.
11. Todd C. Pataky, Mark A. Robinson, Jos Vanrenterghem, Russell Savage, Karl T. Bates, Robin H. Crompton. Vector field statistics for objective center-of-pressure trajectory analysis during gait, with evidence of scalar sensitivity to small coordinate system rotations. *Gait & Posture* 40 (2014) 255–258.
12. Vipul Lugade and Kenton Kaufman. Center of Pressure Trajectory during Gait: A Comparison of Four Foot Positions. *Gait Posture*. 2014 May ; 40(1): 252–254.
13. Zdenek Svoboda, Lucia Bizovska, Miroslav Janura, Eliska Kubonova, Katerina Janurova, Nicolas Vuillerme. Variability of spatial temporal gait parameters and center of pressure displacements during gait in elderly fallers and nonfallers: A 6-month prospective study. *PLoS One*. 2017 Feb 27;12(2):e0171997.

5. BIBLIOGRAFÍA (Parte 4)

1. Béseler M.R., Grao C.M., Gil Á. y Martínez Lozano M.D.. Valoración de la marcha mediante plantillas instrumentadas en pacientes con espasticidad de miembros inferiores tras infiltración con toxina botulínica. *Neurología*. 2012;27(9):519—530.
2. Brus S.A, Waaijman R. The value of reporting pressure–time integral data in addition to peak pressure data in studies on the diabetic foot: A systematic review. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. 2013 Feb;28(2):117-21.
3. Dyer Philip S. and Morris Stacy J. Bamberg. Instrumented Insole vs. Force Plate: A Comparison of Center of Plantar Pressure. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*. 2011;2011:6805-9.
4. Instituto de Biomecánica de Valencia (IBV). Biofoot/IBV Manual de Usuario. Séptima versión. Valencia, España: Instituto de Biomecánica de Valencia, 2012.
5. Lin Shu, Tao Hua, Yangyong Wang, Qiao Li, David Dagan Feng, and Xiaoming Tao. In-Shoe Plantar Pressure Measurement and Analysis System Based on Fabric Pressure Sensing Array. *IEEE Trans Inf Technol Biomed*. 2010 May;14(3):767-75.
6. Martínez A., Sánchez Ruiza, M. Barrés Carsíb, C. Pérez Lahuerta, A. Guerrero Alonsoc y C. Soler Gracia. A new diagnostic and therapeutic diagnostic method of the foot disease based on biofoot/ibv instrumented insoles. *Rehabilitación* Vol. 37. Núm. 5. Páginas 240-251 (Enero 2003).

5. BIBLIOGRAFÍA (Parte 4)

7. Martínez-Nova A., Sánchez-Rodríguez R., Cuevas García J.C. Patrón de presiones plantares en el pie normal: Análisis mediante sistema Biofoot de plantillas instrumentadas. *El Peu* 2006;26(4):190-194.
8. Martínez-Novaa A., Cuevas-Garcíaa J.C., Sánchez-Rodrígueza R., Pascual-Huertab J., Sánchez-Barrado E. Study of plantar pressure patterns by means of instrumented insoles in subjects with hallux valgus. *Revista Española de Cirugía Ortopédica y Traumatología (English Edition)*. Volume 52, Issue 2, March–April 2008, Pages 94-98.
9. Martínez-Nova A., Sánchez-Rodríguez R., Leal-Muro A., Pedrera-Zamorano J.D. Dynamic Plantar Pressure Analysis and Midterm Outcomes in Percutaneous Correction for Mild Hallux Valgus. *J. Orthop Res.* 2011 Nov;29(11):1700-6.
10. Nurul Amziah, Yunus, Izhal Abdul Halin, Nasri Sulaiman, Noor Faezah Ismail, Ong Kai Sheng. Valuation on MEMS Pressure Sensors and Device Applications. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electronics and Communication Engineering* Vol:9, No:8, 2015.
11. Richards J., Editor. *The Comprehensive Textbook of Clinical Biomechanics*. 2nd ed. Preston (UK): Elsevier, 2018.
12. Wertsch J., Webster J., Tompkins W. A portable insole plantar pressure measurement system. *Journal of Rehabilitation Research and Development* Vol. 29 No. 1, 1992 Pages 13-18.



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.

