

## STATISTICAL-BASED PROCEDURE FOR GENERATING EQUIVALENT VERTICAL GROUND REACTION FORCE-TIME HISTORY

García-Terán, José María<sup>1</sup>; García-Diéguex, Marta<sup>2</sup>; Magdaleno, Álvaro<sup>3</sup>; Fraile, Alberto<sup>4</sup>

### ABSTRACT

Ground reaction forces GRF are influenced by different factors. Because of that, the experimental dynamic response of a lightweight footbridge under pedestrian crossing may differ from the one estimated by simulation. For the loading model to be realistic, the best option is use real recordings. Even though the pedestrian is following a metronome, each footprint is different. This provides a variability that is not taken into account in the loading models normally used. If a big enough extensive database were available, the differences could be statistically characterized and some loading sequences could be computationally generated. A procedure to generate virtual GRF is presented in this paper. Time domain and frequency domain estimators are used in order to compare experimental and virtual GRF histories. As results, some differences will be analyzed and the main conclusions will be drawn.

*Keywords:* Vibration, gateways, human actions, statistical process control.

### 1. INTRODUCCIÓN.

La habilidad de caminar de forma erguida, aprendida de forma intuitiva por los niños entre los 12 y 18 meses, involucra la coordinación de gran parte de los órganos del cuerpo humano (cerebro, sistema nervioso, ojos, oídos, huesos, músculos,...). Para su desarrollo han sido necesarios miles de años de evolución, generando importantes transformaciones morfológicas en el cuerpo humano, como cambios en los huesos de pies, rodillas, cadera, y en la orientación de la columna vertebral.

Mecánicamente, el acto de andar tiene como objetivo mantener el cuerpo en equilibrio dinámico mientras se vencen las fuerzas gravitatorias, al mismo tiempo que se produce el avance sobre el terreno. Para ello se realizan trasvases sucesivos del peso de un pie al otro, produciéndose el contacto con el terreno con un único pie la mayor parte del tiempo, mientras el otro avanza por el aire. Este proceso genera fuerzas que se transmiten través de las plantas de los pies al terreno.

Desde el punto de vista estructural, las fuerzas generadas por una persona al andar sobre una superficie elástica vibrante pueden llegar a producir sensación de incomodidad e incluso mareo. Esto

<sup>1</sup> ITAP, EII, Universidad de Valladolid (SPAIN). teran@uva.es (Corresponding author)

<sup>2</sup> Dpto. Construction and Manufacturing Engineering, University of Oviedo (SPAIN). garciadmarta@uniovi.es

<sup>3</sup> ITAP, EII, Universidad de Valladolid (SPAIN). alvaro.magdaleno@uva.es

<sup>4</sup> ETSII, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid (SPAIN) afraile@etsii.upm.es

es debido a la interacción entre las fuerzas generadas por la oscilación de la superficie elástica y las fuerzas gravitacionales generadas por la persona al andar [1, 2].

Distintos autores [3, 4] han analizado las fuerzas generadas por la interacción entre la planta del pie y el terreno durante el proceso de marcha, conocidas como *GRF* (ground reaction forces), analizando las variables que influyen en su magnitud, clasificándolas en:

- Intrínsecas o asociadas a las personas, que a su vez se pueden diferenciar en “entre sujetos” (peso, estatura, edad, sexo y características anatómicas), y “dentro de cada sujeto” (movilidad, patologías, estado de ánimo, cansancio, consumo de alcohol o fármacos);
- Extrínsecas o asociadas al entorno [7], que a su vez se pueden clasificar en instrumentales (métodos de medición), cinemáticas (tipo y velocidad de marcha), de vestimenta (calzado, ropa, accesorios), entorno (viento, lluvia, nieve) y de terreno (dureza, inclinación, vibración).

El objetivo fundamental del trabajo presentado es generar fuerzas virtuales verticales equivalentes a las producidas por la marcha de una persona específica, una vez fijadas una serie de variables. En el trabajo se diferencian dos partes: una primera de adquisición de datos experimentales, procesado y tratamiento estadístico, y una segunda parte de generación de fuerzas y *GRF* virtuales, y de desarrollo del procedimiento para generar la marcha virtual estadísticamente equivalente.

Antes de la adquisición de datos experimentales se fijan el mayor número posible de variables controlables, de forma que el muestreo se realiza a un único individuo. Los datos experimentales obtenidos son las presiones verticales en cada sensor de cada pie de las plantillas instrumentalizadas utilizadas para este fin. Para su procesado se determinan la fuerza y los centros de presión (*CoP*, center of plantar pressure) de cada pie e instante. Posteriormente se determinan los *GRF* verticales de cada pie y del conjunto de ambos pies durante todo el tiempo de la marcha. Se aíslan los *GRF* verticales de cada paso y pie, y se definen patrones estadísticos de su comportamiento.

En la parte de generación de fuerzas se obtienen *GRF* verticales virtuales aislados distintos para cada paso y pie, estadísticamente equivalentes a los experimentales, y posteriormente se ensamblan para generar el historial de *GRF* de cada pie y el *GRF* conjunto de ambos pies durante la marcha, de forma que sean estadísticamente equivalentes a los parámetros de marcha del sujeto específico analizado.

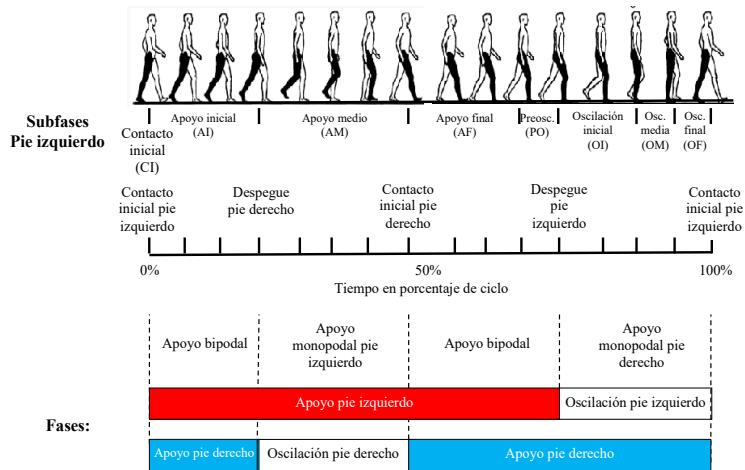
## 2. LA MARCHA. ADQUISICIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES.

El proceso de marcha se divide en distintas fases y subfases, siendo el primer nivel de análisis el ciclo (Fig. 5) o proceso que se produce entre los sucesivos contactos del talón de un pie con el suelo. Autores como Perry [9] dividen la marcha en dos fases:

- Apoyo podal: Caracterizado por el contacto del pie con el suelo. Esta fase comienza en el instante del impacto del talón de un pie con el terreno y finaliza en el instante de despegue de los dedos de dicho pie.
- Oscilación o avance aéreo: Caracterizada por el movimiento aéreo del pie. Comienza en el instante del despegue de los dedos y metatarsos de un pie del suelo y finaliza en el instante de contacto del talón de dicho pie con el terreno.

En función del número de pies que se encuentran en contacto con el suelo, el tiempo de un ciclo se divide en cuatro intervalos: dos bipodales, en los que ambos pies están en contacto con el terreno; y dos monopodales, en los que un pie está en contacto con el terreno mientras que el otro realiza el avance aéreo. El ciclo se divide a su vez en distintas subfases (Fig. 1).

Para definir la marcha se utiliza también el paso, siendo esta la distancia recorrida por el movimiento aéreo de cada pie, de forma que en un ciclo se dan dos pasos. Cada paso se caracteriza mediante su longitud o zancada (distancia aérea recorrida por un pie, medida desde los dedos en el instante de despegue hasta el talón en el instante de contacto), frecuencia (número de pasos por unidad de tiempo, medido en pasos por minuto -BPM, bit per minute- o herzios -Hz-), periodo (tiempo de un paso, medido en centésimas de segundo -cs-) y velocidad de marcha (distancia recorrida por unidad de tiempo, medida en metros por minuto -m/min- o kilómetros por hora -Km/h-).



**Figura 1.** Fases y subfases del ciclo de marcha (Fuente: Modificado de Racic).

Para la obtención de los registros experimentales se han usado plantillas instrumentalizadas [5] formadas por 99 captadores piezoelectrados en cada pie  $j$ , que informan de la presión durante el apoyo podal  $k$  de cada captador  $i$  (en  $kPa$ ) en cada centésima de segundo  $p_{i,j}(t_k)$ . Es de destacar que aunque los intervalos de tiempo de captación son de una  $cs$ , el estudio se realiza considerando el tiempo como variable discreta  $t_k$ . La transferencia de información se realiza mediante el sistema telemétrico pedar® (Fig. 2).



**Figura 2.** Sistema telemétrico pedar-insole-shoe (Fuente: <http://www.novelusa.com>).

El trabajo de campo se realizó en junio de 2016 en Valladolid (España), obteniéndose las muestras de la marcha sobre una superficie dura y fija.

Las variables intrínsecas se controlan monitorizando a una única persona (varón de 35 años, 1,77 m de altura y 666 N de peso), especialista en el uso de la instrumentación. Respecto de las variables extrínsecas se controlan las instrumentales (un único método de medición), cinemáticas (frecuencia de marcha inducida por metrónomo), vestimenta (misma ropa y calzado), entorno (muestras tomadas en un intervalo de tiempo corto y en el mismo día) y de terreno (superficie dura).

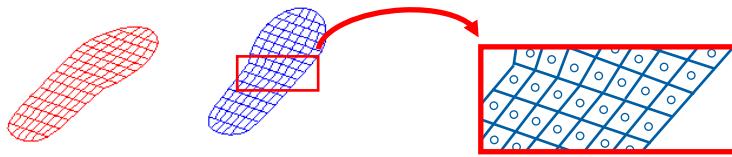
Con este procedimiento se obtuvieron siete muestras, las seis primeras realizando la marcha con distintas frecuencias inducidas, y la última con libertad de frecuencia de marcha.

### 3. PROCESADO DE DATOS EXPERIMENTALES.

Los subíndices que se utilizan en el estudio están asociados a los siguientes conceptos: Sensor ( $i=1..99$ ), diferenciándose cada uno de los 99 existentes en cada pie. Pie ( $j=izq, der$ ), diferenciándose las mediciones de los pies izquierdo y el derecho (Fig. 3). Apoyo podal ( $k=1..26$ ), diferenciándose cada apoyo realizado durante la marcha. Tiempo ( $t_l=1..30.000$ ), con lo que se considera el tiempo de forma discreta en cada centésima de segundo (cs). Todo ello genera un volumen aproximado de seiscientos mil datos por muestra.

Se va a indicar únicamente el proceso correspondiente a la muestra de frecuencia

Siendo los valores numéricos obtenidos en la muestra las presiones  $p_{i,j,k}(t_l)$  en cada sensor y cs.



**Figura 3.** Apoyo podal de cada pie en los que se indican los sensores. En la ampliación se muestran los baricentros de cada sensor (Fuente: El autor).

A partir de la presión experimental  $p_{i,j,k}(t_l)$ , conocido el área  $A_{i,j}$  de cada sensor  $i$ , se determina la fuerza producida  $f_{i,j,k}(t_l)$  en cada sensor, pie y apoyo podal en cada instante  $t_l$  (1).

$$f_{i,j,k}(t_l) = p_{i,j,k}(t_l) \times A_{i,j} \quad (1)$$

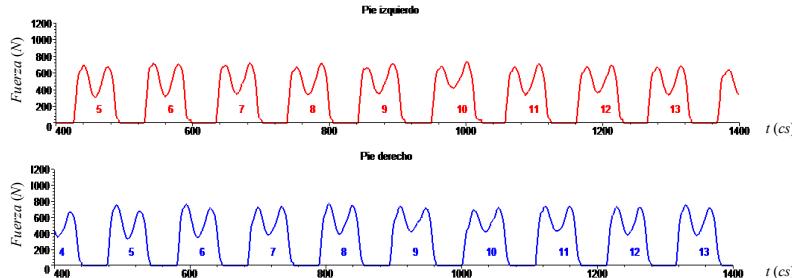
Con estas fuerzas  $f_{i,j,k}(t_l)$ , conocidas las coordenadas relativas de los baricentros  $xg_{i,j}, yg_{i,j}$  de cada sensor y pie, se determinan la resultante de fuerzas  $f_{j,k}(t_l)$  y el centro de presión plantar ( $CoP_{j,k}(t_l)$ ), definido mediante sus coordenadas  $(xb_{j,k}, yb_{j,k})$ , para cada pie en cada instante (2).

$$f_{j,k}(t_l) = \sum_{i=1}^{99} f_{i,j,k}(t_l) \quad xb_{j,k}(t_l) = \sum_{i=1}^{99} [f_{i,j,k}(t_l) \times xg_{i,j}] \quad yb_{j,k}(t_l) = \sum_{i=1}^{99} [f_{i,j,k}(t_l) \times yg_{i,j}] \quad (2)$$

A partir de los valores anteriores se determinan el campo de fuerzas de reacciones  $GRF_{j,k}(t_l)$  y la trayectoria del centro de presión  $CoP_{j,k}(t_l)$  de cada pie y apoyo plantar, en el intervalo de tiempo de contacto del apoyo con el suelo ( $t_{j,k}^{\min.} \leq t_l \leq t_{j,k}^{\max.}$ ) (3).

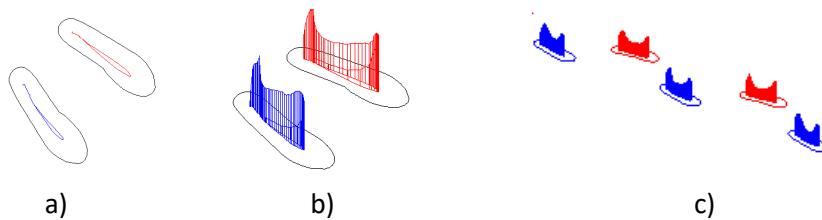
$$GRF_{j,k}(t_l) = f_{j,k}(t_{j,k}^{\min.} \leq t_l \leq t_{j,k}^{\max.}) \quad \left. \begin{aligned} & xb_{j,k}(t_{j,k}^{\min.} \leq t_l \leq t_{j,k}^{\max.}) \\ & yb_{j,k}(t_{j,k}^{\min.} \leq t_l \leq t_{j,k}^{\max.}) \end{aligned} \right\} \Rightarrow CoP_{j,k}(xb_{j,k}, yb_{j,k}, t_l) \quad (3)$$

En la Figura 4 se muestra las gráficas  $GRF_{j,k}(t_l) = f_{j,k} (400 \leq t_l \leq 1400)$  que representan las magnitudes de las fuerzas (N) respecto del tiempo (cs) generadas por los pies izquierdo (en rojo) y derecho (en azul), identificando los distintos apoyos podales ( $5 \leq k \leq 13$ ). El criterio de color asociado a cada pie se mantendrá en todo el estudio.



**Figura 4.**  $GRF_{j,k}(t_l) = f_{j,k} (400 \leq t_l \leq 1400)$  (Fuente: El autor).

En la Figura 5 se muestran representaciones de a) Trayectorias de los centros de presión  $CoP_{j,k}(t_l)$  de un apoyo podal de los pies izquierdo y derecho, b) Magnitudes de las  $GRF_{j,k}(t_l)$  situadas en sus  $CoP_{j,k}(t_l)$  correspondientes a un apoyo podal de cada pie, y c) Magnitudes de las  $GRF_{j,k}(t_l)$  situadas en sus  $CoP_{j,k}(t_l)$  correspondientes a una sucesión de apoyos podales de cada pie para durante la marcha.

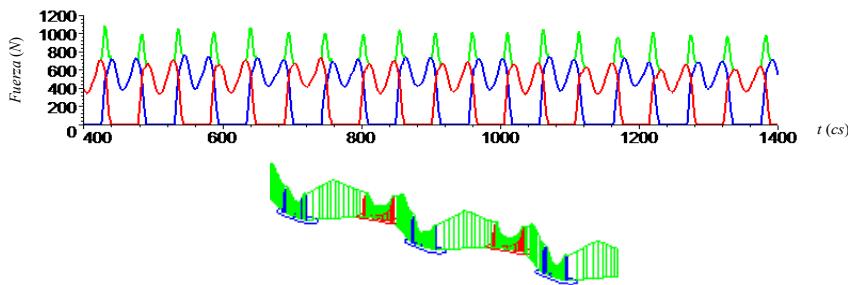


**Figura 5.** a) Centros de presión, b) Fuerzas de las  $GRF_{j,k}(t_l)$  en sus  $CoP_{j,k}(t_l)$ , c) Marcha (Fuente: El autor).

Con los valores anteriores se determinan la resultante del campo de fuerzas de reacción para el conjunto de los dos pies  $GRF_k(t_l)$ , mediante la suma de la suma de las fuerzas generadas por cada pie en cada instante, y la trayectoria de su centro de presión  $CoP_k(t_l)$  en el intervalo de tiempo de contacto con el suelo  $(t_{j,k}^{\min.} \leq t_l \leq t_{j,k}^{\max.})$  (4).

$$\begin{aligned} GRF_k(t_l) &= f_{j=izq,k} \left( t_{j,k}^{\min.} \leq t_l \leq t_{j,k}^{\max.} \right) + f_{j=der,k} \left( t_{j,k}^{\min.} \leq t_l \leq t_{j,k}^{\max.} \right) \\ &\quad \left. \begin{aligned} xb_k \left( t_{l,k}^{\min.} \leq t_l \leq t_{l,k}^{\max.} \right) \\ yb_k \left( t_{l,k}^{\min.} \leq t_l \leq t_{l,k}^{\max.} \right) \end{aligned} \right\} \Rightarrow CoP_k(xb_k, yb_k, t_l) \end{aligned} \quad (4)$$

En la parte superior de la Figura 6 se muestra la gráfica de fuerzas respecto del tiempo, con los colores anteriormente indicados (rojo y azul para los apoyos podales izquierdo y derecho, respectivamente), a las que se añade la línea de color verde correspondiente a las fuerzas resultantes para el conjunto de los dos pies  $GRF_k(t_l)$ , y en la parte inferior se representan las fuerzas generadas por los apoyos podales localizadas en los centros de presión de cada apoyo, a la que se añade la línea de color verde correspondiente a la resultante de fuerzas para el conjunto de los dos pies  $GRF_k(t_l)$  en sus centros de presión  $CoP_k(t_l)$  en una serie de apoyos podales durante la marcha.



**Figura 6.**  $GRF_k(t_l) = f_{j=izq,k} + f_{j=der,k}$  y  $CoP_k(t_l)$  (Fuente: El autor).

Como se puede comprobar en las Figuras 4 y 5, tanto los  $GRF_{j,k}(t_i)$  como las trayectorias de los  $CoP_{j,k}(t_i)$  son funciones discretas de cada pie, apareciendo únicamente durante el intervalo de tiempo en el que se produce el apoyo podal correspondiente, sin embargo para el caso de la acción conjunta de los dos pies, tanto el  $GRF_k(t_i)$  como la trayectoria del  $CoP_k(t_i)$  son funciones continuas, localizándose los máximos de la  $GRF_k(t_i)$  en los instantes en los que el contacto con el terreno es bipodal y trasladándose la trayectoria de los  $CoP_k(t_i)$  de un apoyo podal a otro durante la marcha, de forma que los máximos de fuerza de la  $GRF_k(t_i)$  se sitúan en puntos fuera de dichos apoyos.

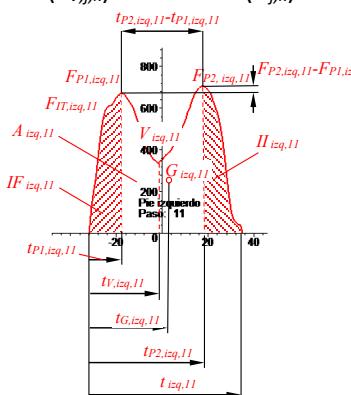
#### **4. Análisis estadístico.**

Para el análisis tanto de los  $GRF_{j,k}(t_i)$  como de las trayectorias de los  $CoP_{j,k}(t_i)$  de cada pie mediante análisis estadístico se aísla cada apoyo podal (5).

$$\begin{aligned} GRF_{j=izq,k}(t_l) &= f_{j=izq,k}(0 \leq t_l \leq 100) & GRF_{j=der,k}(t_l) &= f_{j=der,k}(0 \leq t_l \leq 100) \\ CoP_{j=izq,k} &= CoP_{j=izq,k}(xb_{j=izq,k}, yb_{j=izq,k}, t_l) & CoP_{j=der,k} &= CoP_{j=der,k}(xb_{j=der,k}, yb_{j=der,k}, t_l) \end{aligned} \quad (5)$$

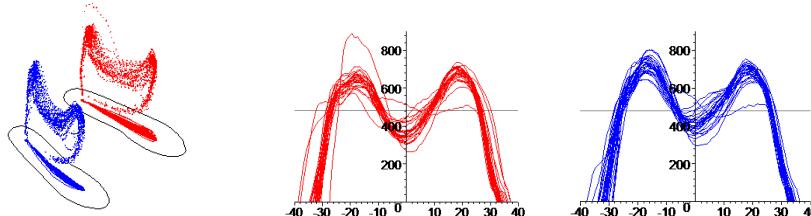
Para su caracterización estadística se consideran una serie de parámetros ( $\theta_{ij}$ ) en cada  $GRF_{j,k}(t_i)$ , como son (Fig. 7):

- Duración ( $t_{j,k}$ )
  - Área o impulso total ( $A_{j,k}$ ).
  - Área desde el comienzo del  $GRF_{j,k}$  hasta el primer pico singular ( $P1_{j,k}$ ) o impulso de frenada ( $IF_{j,k}$ ).
  - Área desde el segundo pico singular ( $P2_{j,k}$ ) hasta el final del  $GRF_{j,k}$  o impulso de impulsión ( $II_{j,k}$ ).
  - Localización temporal ( $t_{G,j,k}$ ) y fuerza ( $F_{G,j,k}$ ) del centro de fuerzas ( $G_{j,k}$ ) del área o impulso total.
  - Fuerza de impacto del talón ( $F_{IT,j,k}$ ).
  - Localización ( $t_{P1,j,k}$ ) y fuerza máxima en el apoyo ( $F_{P1,j,k}$ ) en el instante ( $P1_{j,k}$ ).
  - Localización ( $t_{P2,j,k}$ ) y fuerza máxima en el despegue ( $F_{P2,j,k}$ ) en el instante ( $P2_{j,k}$ ).
  - Intervalo de tiempo entre fuerzas máximas ( $t_{P2,j,k} - t_{P1,j,k}$ ) y diferencia de dichas fuerzas ( $F_{P2,j,k} - F_{P1,j,k}$ ).
  - Localización ( $t_{V,j,k}$ ) y fuerza mínima ( $F_{V,j,k}$ ) en el valle ( $V_{j,k}$ ).



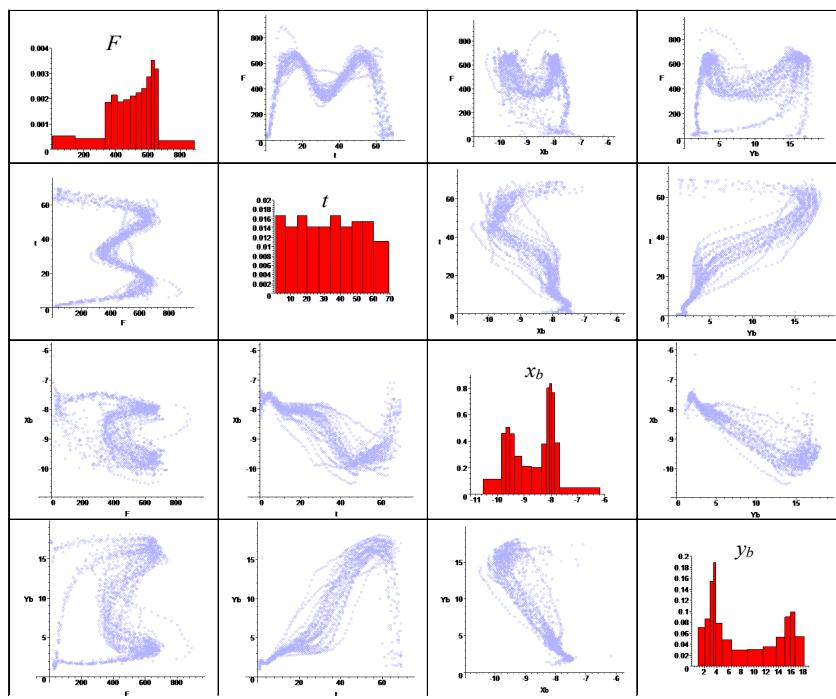
**Figura 7.** Parámetros característicos ( $\theta_{j,k}$ ) de la GRF<sub>izq,11</sub> (Fuente: Propia del autor).

En la Figura 8 se muestran los puntos de los  $GRF_{j,k}(t_i)$  representados sobre sus correspondientes  $CoP_{j,k}(t_i)$  de cada pie, y las mismas  $GRF_{j,k}(t_i)$  representadas respecto del tiempo, localizadas estas últimas en el baricentro del área de cada  $GRF_{j,k}(t_i)$ .



**Figura 7.**  $GRF_{j,k}(t_i)$  respecto de  $CoP_{j,k}(t_i)$  de cada pie, y  $GRF_{j,k}(t_i)$  respecto del tiempo. (Fuente: El autor).

Se aprecia que las variables que influyen en el estudio son las fuerzas de los  $GRF_{j,k}(t_i)$ , el tiempo ( $t_i$ ) y las  $CoP_{j,k}(t_i)$  definidas mediante sus coordenadas  $CoP_{j,k} = CoP_{j,k}(xb, yb, t_i)$ , por lo que el estudio es multivariante. En la Figura 9 se representa en forma de tabla la distribución de las variables de estudio  $F$ ,  $t$ ,  $xb$ ,  $yb$ , y la relación entre cada par de variables.



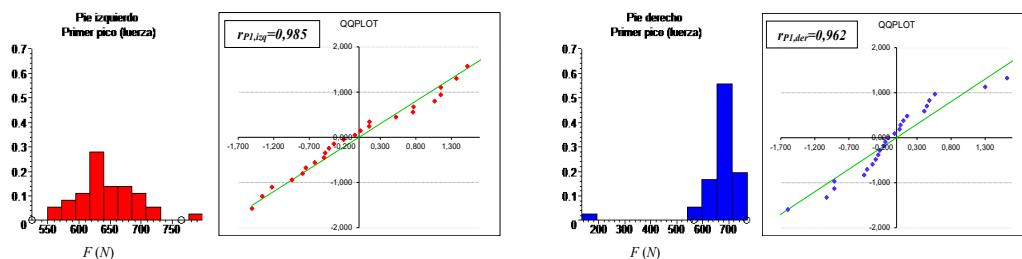
**Figura 9.** Distribución de las variables  $F$ ,  $t$ ,  $xb$ ,  $yb$ , y relación entre cada par de variables.  
(Fuente: El autor).

De la muestra se eliminan los  $GRF_{j,k}(t_i)$  con parámetros característicos ( $\theta_{j,k}$ ) atípicos (outlier) utilizando el test de Tukey. Para ello se determinan el primer y tercer cuartil ( $Q_{1,\theta_{j,k}}$  y  $Q_{3,\theta_{j,k}}$ , respectivamente) cuya diferencia (rango intercuartílico  $IQR_{\theta_{j,k}}$ ) multiplicada por un coeficiente  $k'$  determina los valores atípicos (6). Los  $GRF_{j,k}(t_i)$  sin atípicos serán utilizados en los análisis, denominados  $GRF_{j,k}(t_i)$  truncados.

$$\theta_{j,k}^{atip.} < Q_{1,\theta_{j,k}} - k' \cdot IQR_{\theta_{j,k}} \quad \theta_{j,k}^{atip.} > Q_{3,\theta_{j,k}} + k' \cdot IQR_{\theta_{j,k}} \quad (6)$$

La Fig. 10 muestra los histogramas de  $F_{p1,i,k}$  de cada apoyo podal, indicando mediante círculos los extremos del comportamiento atípico para  $k'=1,5$ . En el eje vertical se representa la frecuencia relativa y en el horizontal las fuerzas (en  $N$ ). Se comprueba que ambos comportamientos tienen forma acampanada simétrica.

A la derecha de los histogramas se muestran las gráficas QQPlot y los coeficientes de correlación de Pearson ( $r_{p1,i,j}$ ) cuyos valores son próximos a 1, asociados a comportamiento normal. Estos resultados se repiten en todos los parámetros de los  $GRF_{j,k}(t_i)$ , comprobándose dicho comportamiento.



**Figura 10.** Histogramas de las fuerzas  $F_{P1,i,k}$  de las  $GRF_{j,k}(t_i)$  y QQPlot con coeficientes de correlación de Pearson ( $r_{P1,j}$ ) para cada pie. (Fuente: El autor).

El procesado se realiza individualizando los valores para cada paso ( $i$ ), muestra ( $j$ ) y pie (izquierdo y derecho), utilizando un código de color para su identificación (rojo - pie izquierdo, azul - pie derecho).

Los resultados de las muestras se van a analizar con distintos niveles: a nivel de parámetros característicos ( $\theta$ ) se definen y determinan sus magnitudes ( $\theta_{ij}$ ) para cada  $GRF_{ij}$  independiente [10, 11, 12] y se generan los patrones correspondientes; a nivel de  $GRF$  se determina un patrón localizando los  $GRF_{ij}$  en sus centros de fuerzas ( $G_{ij}$ ); a nivel plantar se determinan las fuerzas de cada captador, se agrupan en las distintas zonas plantares, y se generan los patrones resultantes de cada zona.

En todos los niveles del análisis los patrones se definen mediante su tendencia central y desviación, con los que se obtienen los límites de referencia que permitan determinar si el comportamiento de algún parámetro del sistema, que como se comprobará inicialmente sigue una distribución normal específica, influido por la modificación de alguna variable mantiene o modifica ese comportamiento.

#### 4.1. GRF y fuerzas en las zonas plantares.

A partir del principio de acción y reacción, cuando una persona camina se generan fuerzas recíprocas entre el pie y el terreno, de forma que al andar el pie ejerce sobre el suelo una fuerza igual y de sentido contrario a la que ejerce el suelo. A estas fuerzas de reacción del suelo se las denomina con el acrónimo en inglés *GRF* (Ground reaction forces).

Han sido diversos los estudios realizados para obtener un patrón de los *GRF* [13] con el objetivo de poder aplicarlos a cualquier individuo. Debido a la influencia de las múltiples variables que afectan a la marcha los patrones obtenidos son genéricos y no incluyen variables del entorno.

En los muestreos utilizados en este trabajo para la obtención de los patrones, tanto la pendiente como la vibración del terreno son nulas, por lo que la única variable influyente es la frecuencia de marcha. Aunque esta ha estado marcada con un metrónomo en las seis primeras muestras, en cada paso tiene una magnitud distinta. Las medias ( $y_{f,j}$ ) y desviaciones estándar ( $s_{n-1,f,j}$ ) de las frecuencias (en BPM) de los pasos de cada muestra aparecen reflejadas en la *Tabla 2*.

**Tabla 2.** Media y desviación estándar de las frecuencias de los pasos de cada muestra.

	Muestra (j)						
	1	2	3	4	5	6	7
$y_{f,j}$ (BPM)	94,0	88,4	86,3	68,4	99,3	100,7	75,1
$s_{n-1,f,j}$ (BPM)	2,53	3,27	3,16	4,47	2,00	2,11	6,19

A partir de los datos de los captadores se determinaron los  $GRF_{ij}$ , a las que se aplicó un procedimiento para la eliminación de las incidencias en los registros de presión, identificando y aislando posteriormente los pasos de cada muestra (Fig. 6).

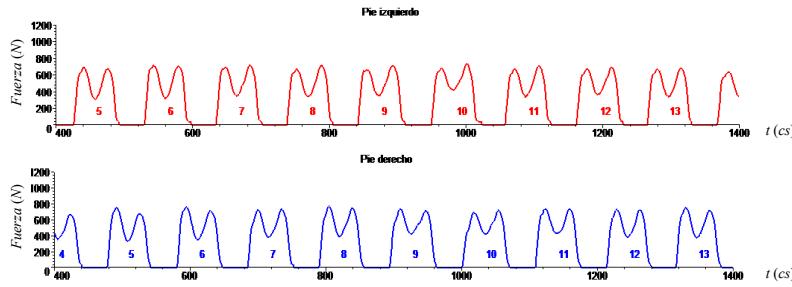


Figura 6.  $GRF_{i3}$  (Fuente: Propia del autor).

Se definen una serie de parámetros ( $\theta_{ij}$ ) que permiten caracterizar cada  $GRF_{ij}$ , como son (Fig. 7):

- Duración ( $t_{ij}$ )
- Área o impulso total ( $A_{ij}$ ).
- Área desde el comienzo del  $GRF_{ij}$  hasta el primer pico singular ( $P1_{ij}$ ) o impulso de frenada ( $IF_{ij}$ ).
- Área desde el segundo pico singular ( $P2_{ij}$ ) hasta el final del  $GRF_{ij}$  o impulso de impulsión ( $II_{ij}$ ).
- Localización ( $t_{G,ij}$ ) y fuerza ( $F_{G,ij}$ ) del centro de fuerzas ( $G_{ij}$ ) del área o impulso total.
- Fuerza de impacto del talón ( $F_{T,ij}$ ).
- Localización ( $t_{P1,ij}$ ) y fuerza máxima en el apoyo ( $F_{P1,ij}$ ) en el instante ( $P1_{ij}$ ).
- Localización ( $t_{P2,ij}$ ) y fuerza máxima en el despegue ( $F_{P2,ij}$ ) en el instante ( $P2_{ij}$ ).
- Intervalo de tiempo entre fuerzas máximas ( $t_{P2,ij} - t_{P1,ij}$ ) y diferencia de dichas fuerzas ( $F_{P2,ij} - F_{P1,ij}$ ).
- Localización ( $t_{V,ij}$ ) y fuerza mínima ( $F_{V,ij}$ ) en el valle ( $V_{ij}$ ).

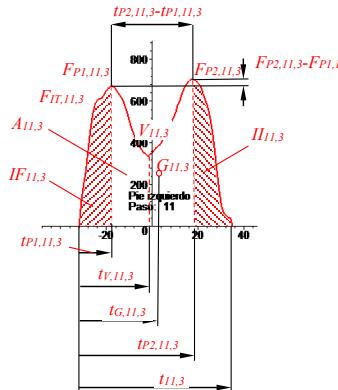


Figura 7. Parámetros característicos ( $\theta_{11,3}$ ) de la  $GRF_{11,3}$  (Fuente: Propia del autor).

Entre los parámetros característicos existen algunos singulares como son las fuerzas en el primer pico  $F_{P1}$ , el segundo pico  $F_{P2}$  y el valle entre picos  $F_V$ . En la Fig. 8 se representa la  $GRF_{5,3}$  del pie izquierdo en la que se indican las fuerzas e instantes en los que aparecen los parámetros singulares  $F_{P1,5,3}$ ,  $F_{V,5,3}$ ,  $F_{P2,5,3}$ . Además se añaden los instantes  $IT$  (impacto del talón) e  $IFD$  (igualdad de fuerzas de los pies en el despegue). Se muestran también las fuerzas de cada zona de las plantillas en dichos puntos obtenidas a partir de las presiones plantares de los sensores.

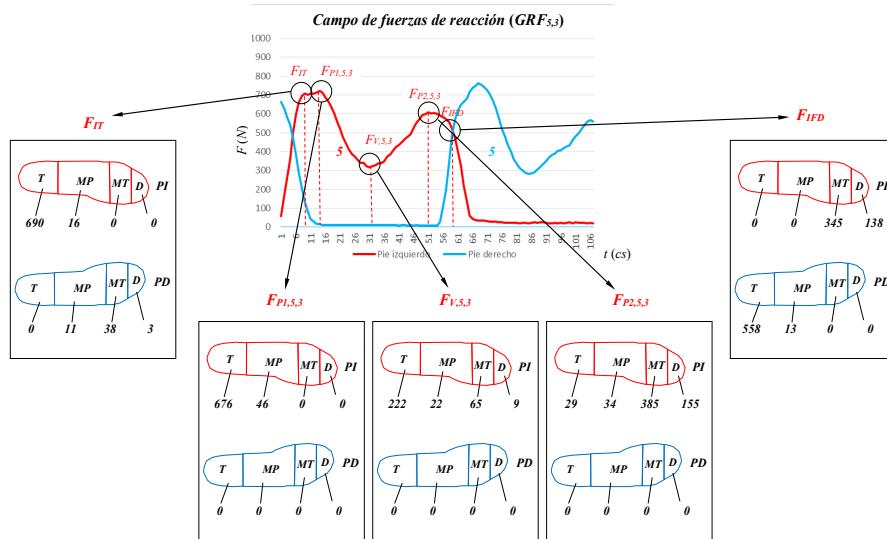


Figura 8.  $GRF_{5,3}$  de ambos pies. Fuerzas en las zonas plantares (Fuente: Propia del autor).

En la Fig. 9 izquierda se representan la  $GRF_{5,3}$  del pie izquierdo ( $GRF, PI$ ) y las correspondientes fuerzas en las zonas plantares localizando los puntos singulares. A su derecha la  $GRF_{5,3}$  sobre su baricentro con posición variable en el tiempo respecto de los sensores de la planta del pie y la velocidad de variación de dicho baricentro. Se comprueba que en las zonas plantares en las que aparecen mayores fuerzas ( $F_{P1}$  y  $F_{P2}$ ) las velocidades del baricentro son bajas, mientras que en el medio pie donde las fuerzas son inferiores ( $F_V$ ) las velocidades son más elevadas.

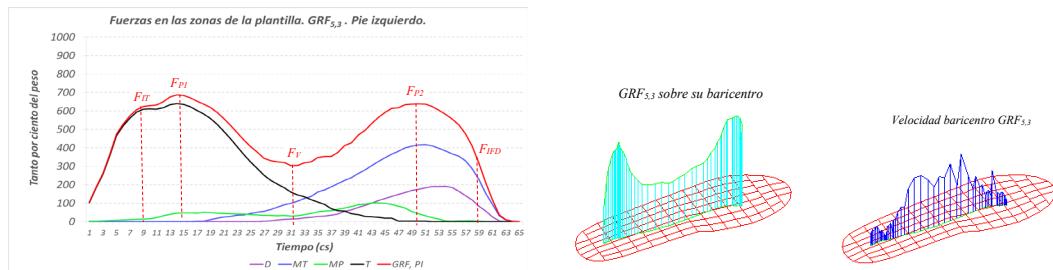
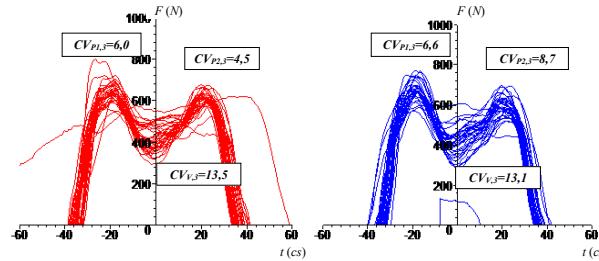


Figura 9.  $GRF_{5,3}$ , fuerzas en las zonas plantares.  $GRF_{5,3}$  sobre su baricentro y velocidad del baricentro. Pie izquierdo. (Fuente: Propia del autor).

Se comprueba también que son las zonas del talón y metatarsos ( $T, MT$ ) las que soportan mayores fuerzas e impulsos, siendo la influencia del medio pie y los dedos ( $MP, D$ ) mucho menores.

En la Fig. 10 se representan los  $GRF_{i3}$  (muestra 3) de cada pie localizado en el centro de fuerzas del impulso ( $G_{i3}$ ). A partir de la media y la desviación estándar ( $\bar{y}_{\theta,3}, s_{n-1,\theta,3}$ ) de cada parámetro característico se obtienen sus coeficientes de variabilidad ( $CV_{\theta,j}$ ) mediante la Eq. (1), no considerando los valores extremos para evitar distorsiones.

$$CV_{\theta,3} = \frac{s_{n-1,\theta,3}}{\bar{y}_{\theta,3}} \times 100 \quad (1)$$

Figura 10.  $GRF_{i3}$  y  $CV_{\theta,3}$  de los parámetros  $F_{P1}$ ,  $F_{P2}$   $F_v$  (Fuente: Propia del autor).

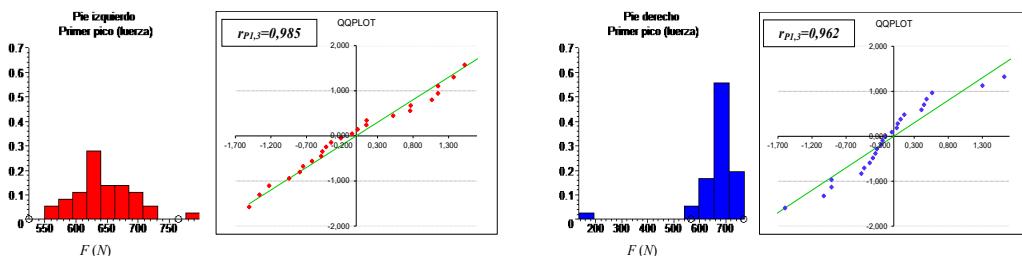
#### 4.2. Eliminación de valores atípicos.

En cada muestra se eliminan los  $GRF_{ij}$  con parámetros característicos ( $\theta_{ij}$ ) atípicos (outlier) utilizando el test de Tukey. Para ello se determinan el primer y tercer cuartil ( $Q_{1,\theta_j}$  y  $Q_{3,\theta_j}$ , respectivamente) cuya diferencia (rango intercuartílico  $IQR_{\theta_j}$ ) multiplicada por un coeficiente  $k$  determina los valores atípicos según la Eq. (2). Los  $GRF_{ij}$  sin atípicos serán utilizados en los análisis, denominados  $GRF_{ij}$  truncados.

$$\begin{aligned} \theta_{ij}^{atip.} &< Q_{1,\theta_j} - k \cdot IQR_{\theta_j} \\ \theta_{ij}^{atip.} &> Q_{3,\theta_j} + k \cdot IQR_{\theta_j} \end{aligned} \quad (2)$$

La Fig. 11 muestra los histogramas de  $F_{P1,i,3}$  de cada pie, reflejando mediante círculos los extremos del comportamiento atípico para  $k=1,5$ . El eje vertical muestra la frecuencia relativa y el horizontal las fuerzas (en N). Se comprueba que ambos comportamientos tienen forma acampanada simétrica.

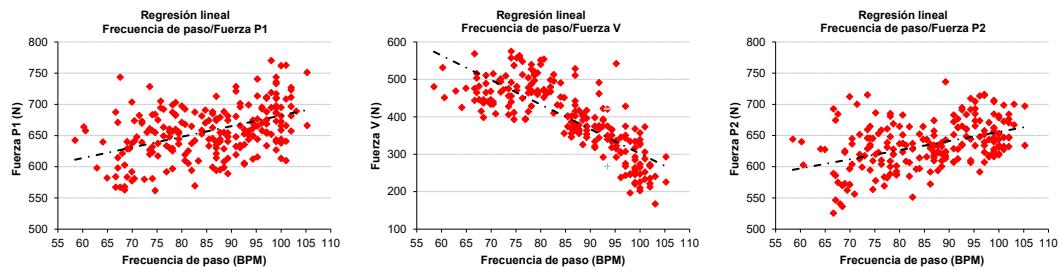
A la derecha de los histogramas se muestran las gráficas QQPlot y los coeficientes de correlación de Pearson ( $r_{P1,3}$ ) cuyos valores son próximos a 1, asociados a comportamiento normal. Estos resultados se repiten en todos los parámetros de los  $GRF_{ij}$ , comprobándose dicho comportamiento.

Figura 11. Histogramas de las fuerzas  $F_{P1,i,3}$  de las  $GRF_{i3}$  y QQPlot con coeficientes de correlación de Pearson ( $r_{P1,3}$ ) para cada pie. Muestra 3 (Fuente: Propia del autor).

#### 4.3. Influencia de la frecuencia de paso.

Es conocido que la frecuencia de paso influye en los  $GRF$  lo que se verifica utilizando técnicas de regresión y análisis de varianza (ANOVA).

Para la regresión se agrupan para cada pie los  $GRF_{ij}$  truncados de todas las muestras y se determinan los parámetros característicos de cada una en función de la frecuencia de paso (en BPM). En la Fig. 12 se muestran las nubes de puntos correspondientes a las fuerzas  $F_{P1}$ ,  $F_v$ ,  $F_{P2}$  para el pie izquierdo. Los valores de los coeficientes de Pearson son bajos ( $r_{f,P1}=0,440$ ,  $r_{f,V}=-0,795$ ,  $r_{f,P2}=0,426$ , respectivamente) evidenciando la falta de correlación lineal entre la frecuencia y la fuerza correspondiente.



**Figura 12.** Regresión lineal.  $F_{P1}$ ,  $F_V$ ,  $F_{P2}$  respecto de la frecuencia de paso. Pie izquierdo (Fuente: Propia del autor).

Se analiza la existencia de variaciones significativas en las medias de los parámetros característicos ( $\mu_{\theta,j}$ ) de las muestras truncadas con frecuencia inducida (de la 1 a la 6) usando la prueba de hipótesis Eq. (3).

$$\begin{cases} H_0 : \mu_{\theta,1} = \mu_{\theta,2} = \mu_{\theta,3} = \mu_{\theta,4} = \mu_{\theta,5} = \mu_{\theta,6} \\ H_1 : \mu_{\theta,k} \neq \mu_{\theta,m} \text{ para al menos un par de valores} \end{cases} \quad (3)$$

Para tomar la decisión se utiliza el análisis de varianza (ANOVA) para cada pie con modelo de efectos fijos y muestras desequilibradas (de distintos tamaños) en las que el tratamiento diferenciador entre muestras es la frecuencia de paso. En la Tabla 3 se indican los resultados del ANOVA para el parámetro característico  $F_{P1}$  del pie izquierdo con un nivel de significación  $\alpha=0,10$ .

**Tabla 3.** ANOVA del conjunto de las muestras. Fuerza en el primer pico singular ( $P1$ ). Pie izquierdo.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	$F_o$	$F$
Niveles	204968,10	5,00	40993,62	37,03	1,89
Error	160536,02	145,00	1107,14		
Total	365504,12	150,00			

Se comprueba que no cumple el criterio de aceptación (Eq. 4) y se concluye que la variación de la media de las muestras truncadas del parámetro  $F_{P1}$  está influenciada por la frecuencia de paso.

$$p\{F_o \leq F_{\alpha,a-1,N-a}\} = 1 - \alpha \Rightarrow p\{37,03 \leq 1,89\} = 0,90 \quad (4)$$

Realizando los ANOVA de los demás parámetros característicos de cada pie se obtuvo en todos los casos el mismo resultado de rechazo, por lo que se concluye que la frecuencia influye de manera sustancial en los parámetros característicos de los  $GRF_{ij}$  de los pasos.

Para evitar la influencia de la frecuencia en los patrones a determinar y al mismo tiempo no generar un exceso de dispersión por considerar frecuencias excesivamente altas (marcha rápida) o bajas (marcha lenta), se van a obtener dichos patrones a partir de los  $GRF_{ij}$  truncados de las muestras con un rango de frecuencias entre 80 y 95 BPM que cubre las generadas en la marcha libre.

#### 4.4. Obtención de patrones.

A nivel de parámetros característicos ( $\theta$ ) de los  $GRF_{ij}$  truncados, se ha comprobado que tienen comportamiento normal, por lo que se obtienen las tendencias centrales y los límites que serán usados como patrón. De esta forma, si la marcha no está influida sustancialmente por la variable modificada, el valor de cada parámetro ( $\theta$ ) se encontrará con una probabilidad muy elevada (0,9973) dentro de los límites de referencia  $\pm 3\sigma_\theta$ .

La tendencia central y las desviaciones estándar poblacionales ( $\hat{\mu}_\theta, \hat{s}_\theta$ ) de cada parámetro ( $\theta$ ) se estiman mediante la media, varianza y desviación estándar muestrales ( $\bar{y}_\theta, s_{n-1,\theta}^2, s_{n-1,\theta}$ ) obtenidas mediante las expresiones Eq. (5)

$$\bar{y}_\theta = \frac{\sum_{i=1}^n y_\theta}{n} \quad s_{n-1,\theta}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_\theta - \bar{y}_\theta)^2}{n-1} \quad s_{n-1,\theta} = \sqrt{s_{n-1,\theta}^2} \quad (5)$$

La tendencia central y los límites superior e inferior de cada parámetro ( $TC_\theta, LCS_\theta, LCS_\theta$ ) se obtienen mediante las expresiones Eq. (6)

$$TC_\theta = \bar{y}_\theta \quad LCS_\theta = \bar{y}_\theta + 3s_{n-1,\theta} \quad LCI_\theta = \bar{y}_\theta - 3s_{n-1,\theta} \quad (6)$$

En la Fig. 13 se representan el patrón de la fuerza  $F_{P2}$  mediante el valor medio y los límites, y los valores correspondientes de una serie de  $GRF$  truncados para el pie izquierdo. Este proceso se repitió con cada parámetro característico ( $\theta$ ).

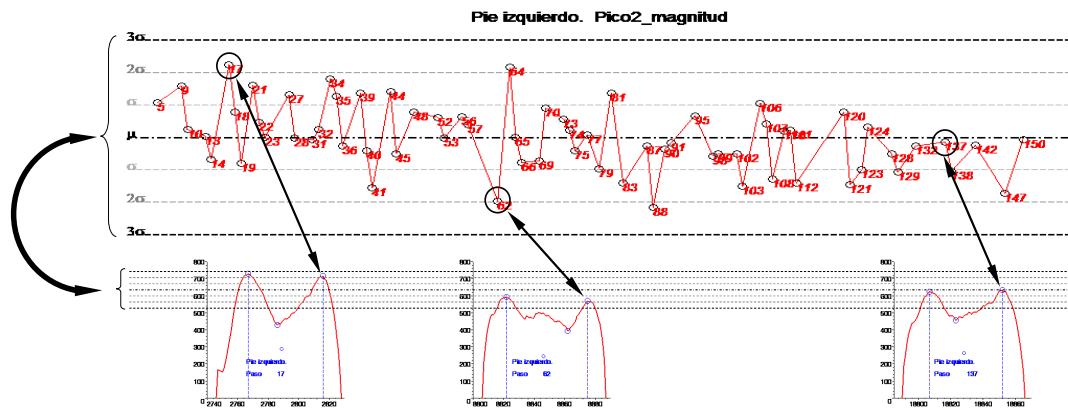
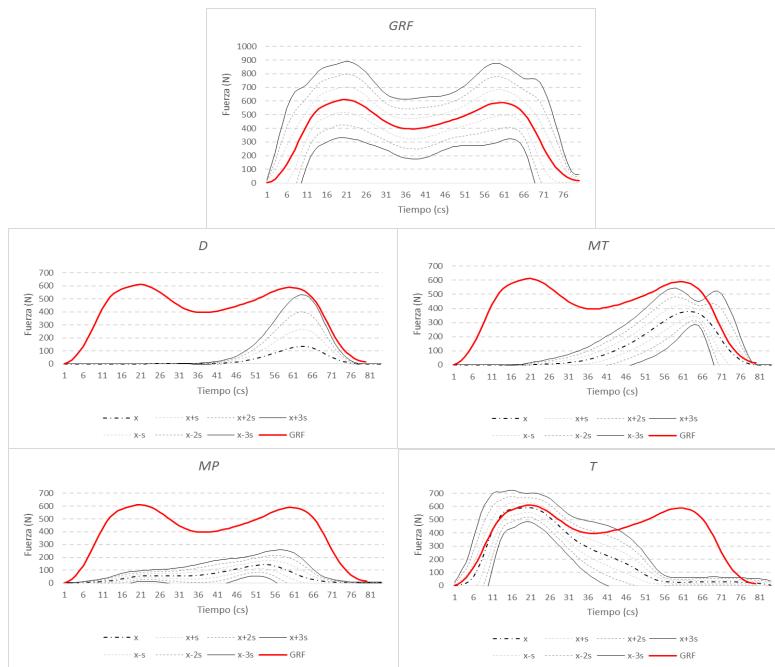


Figura 13.  $F_{P2}$  de  $GRF$  truncados (Fuente: Propia del autor).

A nivel de  $GRF$ , en la Fig. 14 parte superior se representan los patrones de la tendencia central y los límites de las fuerzas transmitidas en cada instante ( $\bar{y}_i \pm k \cdot s_{n-1,i}, k=1..3$ ) llevados sobre la vertical de la  $GRF$  media. A nivel de cada zona plantar ( $D, MT, MP$  y  $T$ ) el procedimiento se repitió de forma análoga.

Estos serán los patrones de comportamiento obtenidos mediante marcha en suelo rígido fijo que se utilizarán para la comparación con los valores obtenidos en la marcha sobre pasarelas.



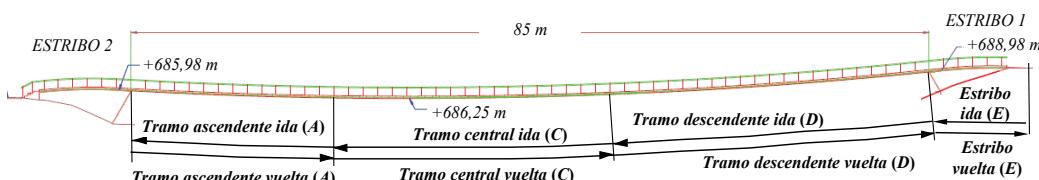
**Figura 14.** Patrones de fuerzas GRF y fuerzas de las zonas plantares (Fuente: Propia del autor).

## 5. RESULTADOS PASARELA PEDRO GOMEZ BOSQUE (PGB).

La pasarela PGB tienen las siguientes características:

- Su superficie está recubierta por una capa elástica.
- La pendiente es distinta en cada punto.
- Los extremos están a distinta altura (las trayectorias de ida y vuelta no son equivalentes).

Las variables modificadas respecto de la referencia son la superficie dura y fija existente en el patrón que cambia a elástica vibratoria; y la pendiente nula en el patrón que cambia a variable en cada punto.



**Figura 15.** Pasarela PGB. Tramos. (Fuente: A. J. Narros).

Se realizaron tres muestreos sin excitación (identificados del 12 al 14) y ocho con excitación inducida (del 15 al 22). El análisis se dividió en dos trayectorias (ida y vuelta) con cuatro tramos: estribo 1 (E), descendente (D), central (C) y ascendente (A) (Fig. 15) cuyas características se indican en la Tabla 5.

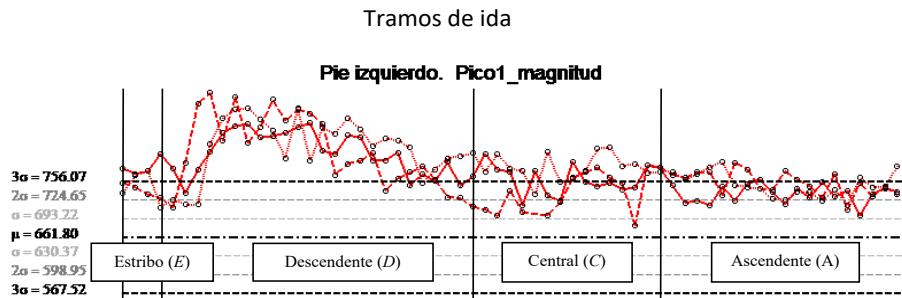
**Tabla 5.** Tipo de base y pendiente de los tramos de la pasarela PGB.

Denominación tramo ida	Características		Denominación tramo vuelta	Características	
	Base	Pendiente		Base	Pendiente
<b>Estribo (E)</b>	Rígida	Nula	<b>Descendente (D)</b>	Vibratoria	Negativa
<b>Descendente (D)</b>	Vibratoria	Negativa	<b>Central (C)</b>	Vibratoria	Nula
<b>Central (C)</b>	Vibratoria	Nula	<b>Ascendente (A)</b>	Vibratoria	Positiva
<b>Ascendente (A)</b>	Vibratoria	Positiva	<b>Estribo (E)</b>	Rígida	Nula

## 5.1. Resultados sin vibraciones inducidas.

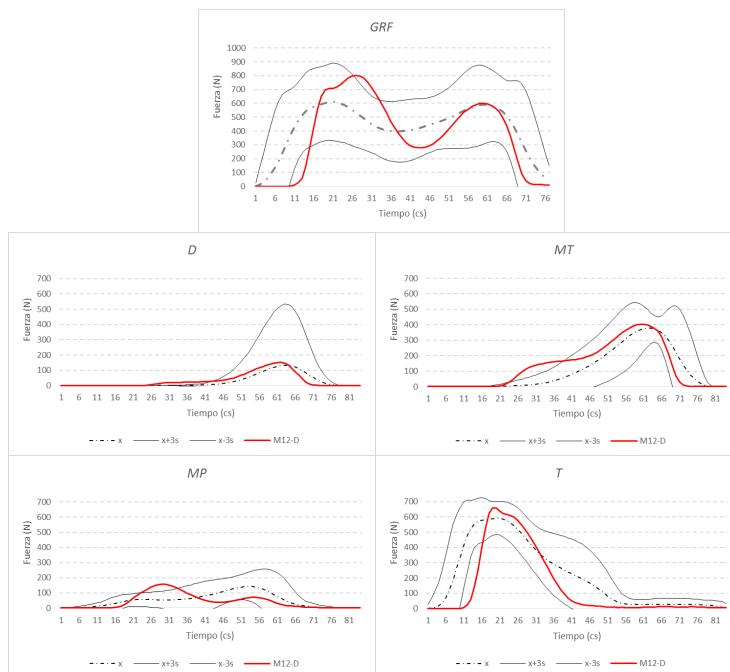
A nivel de parámetros característicos aparecen tendencias claramente distintas a las de los patrones. En la Fig. 16 se muestran para la fuerza  $F_{P1}$  los límites de referencia y los resultados de las muestras sin vibración inducida (12, 13 y 14) para el pie izquierdo en los tramos de ida ( $D$ ,  $C$  y  $A$ ). Se comprueba que los resultados de las distintas muestras tienen las mismas tendencias, con valores alejados de la media patrón, e incluso claramente fuera de los límites en el tramo descendente ( $D$ ).

**PASARELA PGB SIN VIBRACIÓN INDUCIDA**



**Figura 16.** Pasarela PGB sin vibración inducida.  $F_{P1}$  de las muestras 12, 13 y 14 respecto de la referencia para el pie izquierdo. Tramos de ida (Fuente: Propia del autor).

A nivel de  $GRF$ , en la Fig. 17 parte superior se muestran los valores medios en el tramo descendente de ida de la muestra 12 (color rojo) respecto del patrón. Se comprueba que la duración media del paso es menor (un 10,7%), y que los valores de  $F_{P1}$  son mayores (un 30,9%), los de  $F_V$  menores (un 30,1%) y los de  $F_{P2}$  prácticamente iguales a la media patrón, sin salirse de los límites (el intervalo 26-31 fuera del límite es debido a la diferente localización de las curvas por la menor duración media del paso).



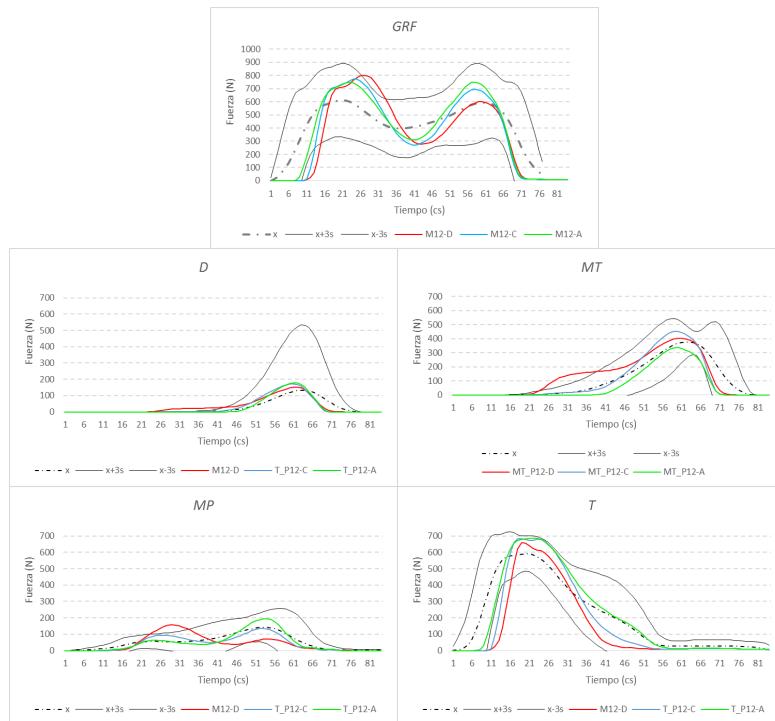
**Figura 17.** Pasarela PGB sin vibración inducida. Valores medios de las fuerzas de la muestra 12.  $GRF$  y zonas plantares. Tramo descendente ida (Fuente: Propia del autor).

A nivel de las zonas plantares, en la Fig. 17 también se muestran sus magnitudes (color rojo) respecto de los patrones. Es de resaltar que las fuerzas en las zonas *MT* y *MP* en el intervalo 26-31 (correspondiente a  $F_{P1}$ ) se encuentran por encima del límite, y que en la zona *T* es muy inferior a la media en el intervalo 36-56 (correspondiente a  $F_V$ ).

En la Fig. 18 se muestran los valores medios de las *GRF* y las fuerzas en las zonas plantares de la muestra 12 comparando los tramos descendente, central y ascendente de la ida (*D*-rojo, *C*-azul, *A*-verde) respecto del patrón.

A nivel de *GRF* se comprueban tiempos de contacto menores que el del patrón en todos los tramos, siendo menor en el tramo descendente y mayor en el ascendente. Los valores  $F_{P1}$  y  $F_{P2}$  son superiores a la media patrón en los tres tramos, y los valores de  $F_V$  inferiores.

A nivel de zonas plantares se encuentran marcadas diferencias entre los valores existentes en las zonas *MT* (intervalo 26-46), *MP* (intervalos 21-61) y *T* (intervalo 31-56) en los tramos descendente (rojo) y ascendente (verde).



**Figura 18.** Pasarela PGB sin vibración inducida. Valores medios de las fuerzas de los *GRF*y en las zonas plantares. Tramos *D*, *C* y *A* ida. Muestra 12 (Fuente: Propia del autor).

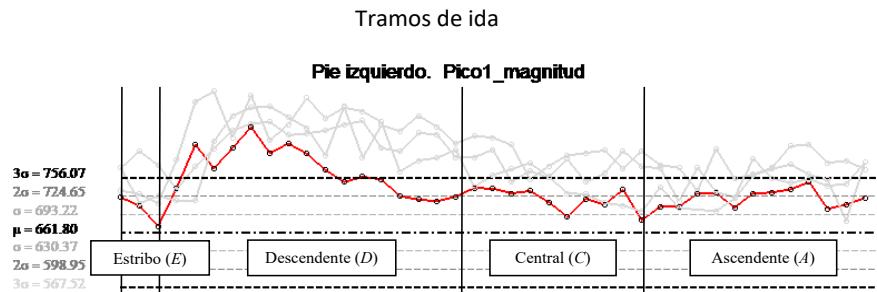
## 5.2. Resultados con vibraciones inducidas.

Se realizaron ocho registros de ida y vuelta (identificados del 15 al 22) sobre la pasarela con distintas excitaciones inducidas. Se van a analizar algunos resultados.

A nivel de parámetros característicos en la Fig. 19 se muestran para las fuerzas  $F_{P1}$  los valores del patrón, los resultados de las tres muestras (12, 13 y 14) sin vibración inducida (color gris) y los de la muestra 21

con vibración inducida para el pie izquierdo en los distintos tramos de ida. Se reproducen las mismas tendencias que las existentes sin vibración inducida pero con valores inferiores.

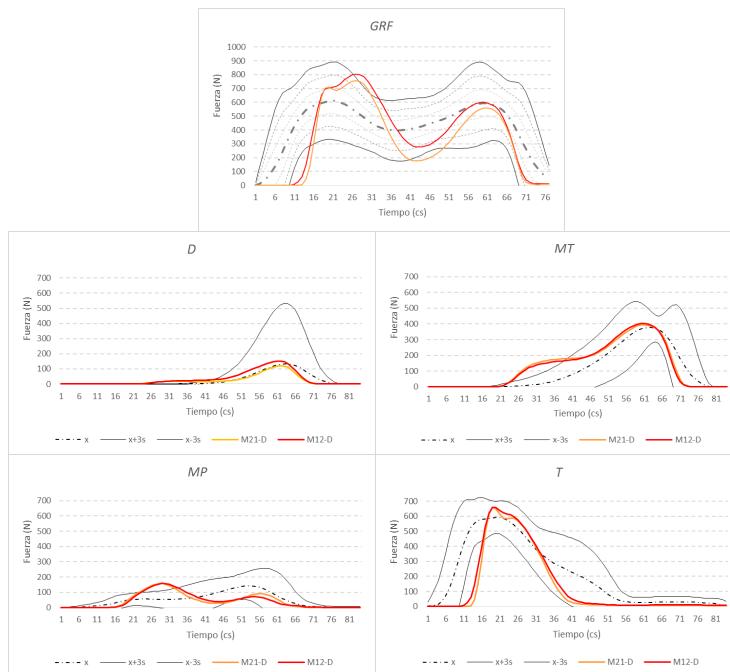
#### PASARELA PGB CON VIBRACIÓN INDUCIDA



**Figura 19.** Pasarela PGB con vibración inducida.  $F_{P1}$  de la muestra 21 respecto del patrón y de las muestras sin vibración inducida para el pie izquierdo. Tramo de ida (Fuente: Propia del autor).

A nivel de *GRF*, en la parte superior de la Fig. 20 se muestran los valores medios en el tramo descendente de ida de la muestra 21 (con vibración inducida, color amarillo) y 12 (sin vibración inducida, color rojo) respecto del patrón. Se comprueba que las fuerzas de la muestra 21 son menores que las de la 12 en  $P_1$  y  $P_2$ , pero sobre todo en  $V$  (55,1% respecto de la referencia y 36,0% respecto de la muestra 12).

A nivel de las zonas plantares, en la Fig. 20 se muestran los valores medios de las fuerzas con vibración inducida (color amarillo) y sin vibración inducida (color rojo) respecto de los patrones, comprobándose que son próximos entre si, con la aparición de una fluctuación acusada en el talón en el intervalo 21-26.



**Figura 20.** Pasarela PGB con vibración inducida. Valores medios de las fuerzas de la muestra 21 respecto de la muestra 12 y el patrón. *GRF* y zonas plantares. Tramo descendente ida (Fuente: Propia del autor).

## 6. RESULTADOS PASARELA MUSEO DE LA CIENCIA (MC).

La pasarela MC tienen las siguientes características:

- El análisis se realizó en el tramo más próximo al MC.
- Su superficie es de chapa de aluminio.
- La pendiente es constante no nula, con extremos a distinta altura (ida y vuelta no equivalentes).

Las variables modificadas respecto de la referencia son la superficie dura y fija en el patrón que cambia a elástica y vibratoria; y la pendiente nula en el patrón que cambia a no nula constante.

Se realizaron tres muestreos sobre la pasarela sin excitación (identificados del 38 al 40) y tres con excitación inducida (del 41 al 43). El análisis se dividió en trayectorias de ida (ascendente A) y vuelta (descendente D) (Fig. 21).

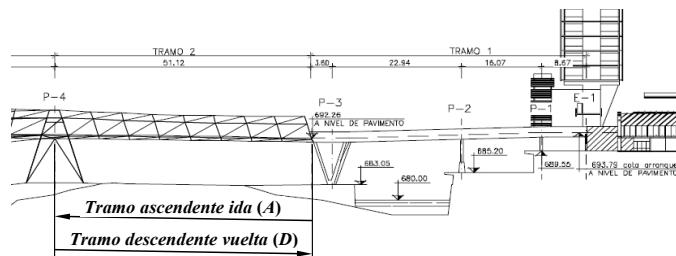


Figura 21. Pasarela MC. Tramos (Fuente: P Ladret y A. González, Freyssinet, S.A.)

## 6.1. Resultados sin vibraciones inducidas.

A nivel de parámetros característicos en la Fig. 22 se muestran para las fuerzas  $F_{P1}$  los límites de referencia y los resultados de las muestras sin vibración inducida (38, 39 y 40) para el pie izquierdo en el tramo descendente de vuelta. Se comprueba que los valores tienen un comportamiento más aleatorio que en la pasarela PGB aunque con tendencia por encima de la media patrón.

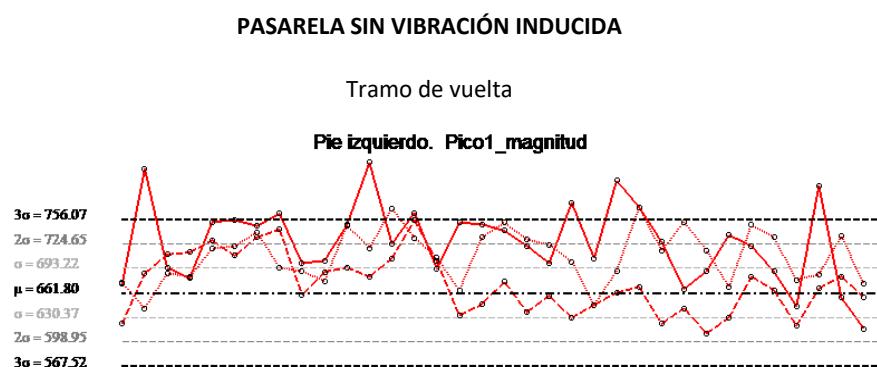
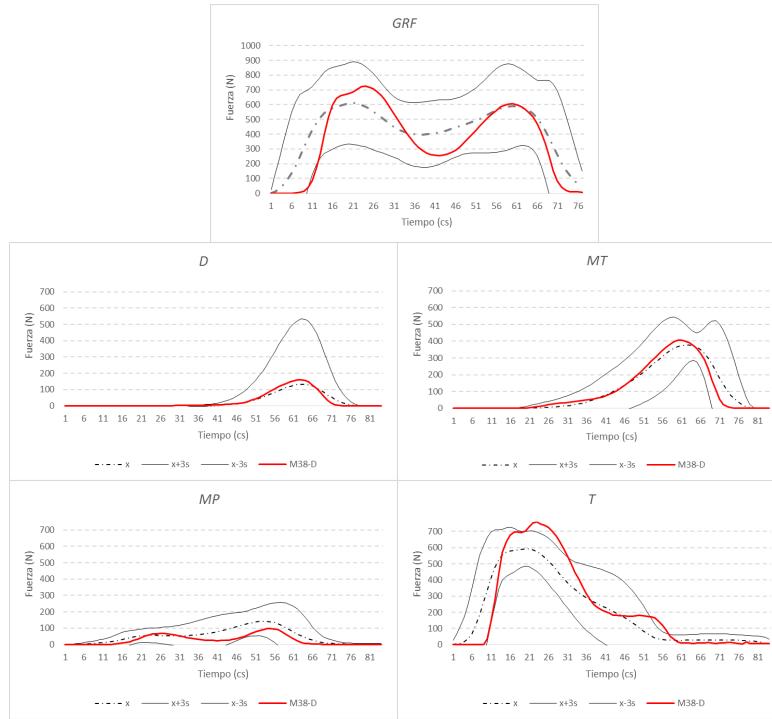


Figura 22. Pasarela MC sin vibración inducida.  $F_{P1}$  de las muestras 38, 39 y 40 respecto de la referencia para el pie izquierdo. Tramo Descendente. (Fuente: Propia del autor).

A nivel de GRF, en la parte superior de la Fig. 23 se muestran los valores medios en el tramo descendente de la muestra 38 (color rojo) respecto del patrón. Se comprueba que la duración media del paso es menor (un 14,3%) y que los valores de las fuerzas  $F_{P1}$  y  $F_{P2}$  son mayores (un 18,6% y 2,0% respectivamente), mientras que la fuerza  $F_V$  es menor (un 35,6%), de forma semejante a lo que ocurría en la pasarela PGB.



**Figura 23.** Pasarela MC sin vibración inducida. Valores medios de las fuerzas de la muestra 38. GRF y en zonas plantares. Tramo de ida. (Fuente: Propia del autor).

A nivel de las zonas plantares, en la Fig. 23 también se muestran los valores medios de las fuerzas del tramo descendente (color rojo) respecto de los patrones. En los dedos (*D*) las fuerzas son superiores a la media en el intervalo 51-66 (apoyo final), e inferiores en el intervalo 66-76 (apoyo final). En la zona *MT* son inferiores a la media en el intervalo 66-76, y superiores en los intervalos 21-36 y 46-66. En la zona *MP* son inferiores a la media en los intervalos 11-21 y 31-71 y superiores en 21-31. En la zona *T* son inferiores a la media en los intervalos 1-11 y 36-46, y superiores en el 11-36 y 46-61, estando por encima del límite superior en el intervalo 21-31.

La aparición de una mayor fuerza del impulso de frenada  $F_{P1}$  respecto de la media patrón, en el intervalo 26-31, es debido a valores por encima del límite patrón en la zona *T* del mismo intervalo, mientras que el valor por debajo de la media patrón en  $F_V$ , en el intervalo 41-46, es debido a valores por debajo de la media en las zonas *MP* y *T*.

## 6.2. Resultados con vibraciones inducidas.

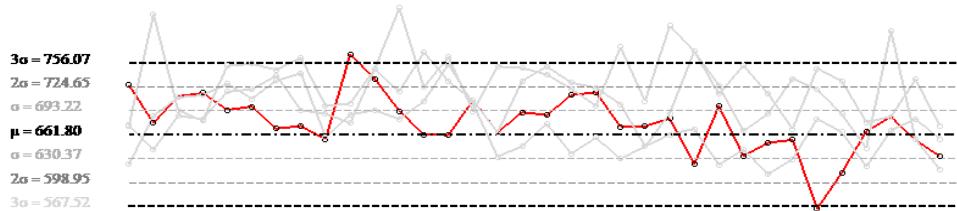
Se realizaron tres registros de ida y vuelta (identificados del 41 al 43) sobre la pasarela con distintas excitaciones inducidas. Se van a analizar algunos resultados.

A nivel de parámetros característicos en la Fig. 24 se visualizan para  $F_{P1}$  la media y los límites del patrón, los resultados de las muestras sin vibración inducida (38, 39 y 40, color gris) y de la muestra 41 con vibración inducida para el pie izquierdo del tramo de ida. Se comprueba que el comportamiento es más aleatorio que en las muestras de la pasarela *PGB*.

### PASARELA CON VIBRACIÓN INDUCIDA

Tramo de vuelta

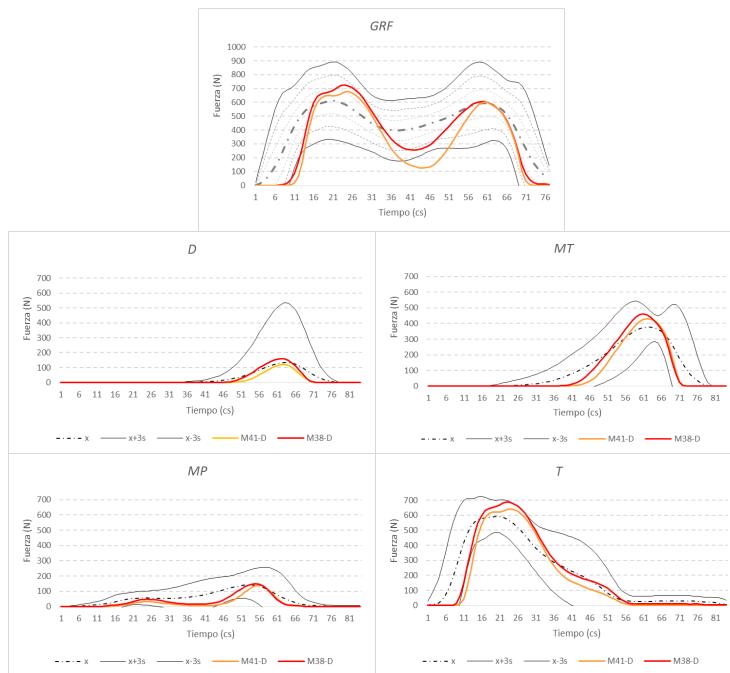
**Pie izquierdo. Pico1\_magnitud**



**Figura 24.** Pasarela MC con vibración inducida.  $F_{P1}$  de la muestra 41 respecto de las muestras 38, 39 y 40, y la referencia para el pie izquierdo Tramo descendente. (Fuente: Propia del autor).

A nivel de *GRF*, en la parte superior de la Fig. 25 se muestran los valores medios de las fuerzas en el tramo de vuelta de las muestras 41 (con vibración inducida, color amarillo) y 38 (sin vibración inducida, color rojo) respecto del patrón. Se comprueba que las fuerzas de ambas muestras son próximas en los puntos  $P1$  y  $P2$ , pero la de la muestra 41 es menor en  $V$  (68,7% respecto de la media de referencia y 50,6% respecto de la muestra 38), estando por debajo del límite.

A nivel de las zonas plantares, en la Fig. 25 se muestran también los valores medios de las fuerzas con y sin vibración inducida (colores amarillo y rojo respectivamente) respecto de los patrones. Se comprueba que los resultados de las fuerzas con vibración inducida son iguales o menores a los correspondientes sin vibración inducida en todas las zonas.



**Figura 25.** Pasarela MC con vibración inducida. Valores medios de las fuerzas de la muestra 41 respecto de la muestra 38 y el patrón. *GRF* y zonas plantares. Tramo ida (Fuente: Propia del autor).

El mínimo de la *GRF* de la muestra 41 en el intervalo 41-46 correspondiente a la  $F_V$  es debido a las menores fuerzas en ese intervalo en las zonas plantares *MT*, *MP*, y *T*.

## 7. CONCLUSIONES.

A partir del análisis realizado se desprende que al fijar las magnitudes de ciertas variables, la variabilidad de las fuerzas asociadas a los parámetros característicos de las *GRF* se comporta de forma normal, permitiendo obtener patrones de comportamiento para unas variables específicas. Para profundizar en el análisis de las fuerzas que aparecen en el contacto entre la planta del pie y el suelo es necesario utilizar la información con el nivel de detalle adecuado (parámetros característicos, *GRF* o zonas plantares).

En los instantes en los que las fuerzas del *GRF* son más elevadas ( $F_{P1}$  y  $F_{P2}$ ) la velocidad del baricentro es menor, y en los que las fuerzas son menores ( $F_V$ ) la velocidad es mayor.

Cuando la marcha se realiza sobre superficies vibratorias, el tiempo de contacto pie-superficie se reduce respecto del obtenido sobre superficie rígida, al mismo tiempo el comportamiento de las fuerzas de contacto se ve influido por la magnitud de la pendiente.

Al caminar sobre una superficie vibratoria sin vibración inducida con pendiente negativa (descendente) se produce un aumento de la fuerza  $F_{P1}$  debido a las mayores magnitudes de fuerzas transmitidas por las zonas plantares *MT*, *MP* y *T*; y una importante disminución de la fuerza  $F_V$  debido a las menores fuerzas transmitidas por la zona *MP* y *T* efectos repetidos en las dos superficies vibratorias analizadas.

El talón es la zona plantar más sensible a la vibración, de forma que las fuerzas transmitidas por él están claramente diferenciadas para los casos de superficie rígida y superficie vibratoria.

Si en la superficie vibrante se induce una vibración, se produce una disminución en los valores de las fuerzas  $F_{P1}$ ,  $F_{P2}$  y  $F_V$  respecto de las existentes sin vibración inducida. La disminución de la fuerza  $F_V$  es especialmente singular, localizándose por debajo de los valores límites de la referencia patrón. Los bajos valores de  $F_V$  son debidos a las menores fuerzas transmitidas por las zonas plantares del medio pie y talón (*MP* y *T* respectivamente) respecto de la referencia.

## 8. AGRADECIMIENTOS.

Los autores agradecen la financiación parcial del Ministerio de Economía y Competitividad a través de los proyectos BIA2014-59321 y BIA2015-71942-REDT.

## 9. REFERENCIAS.

- [1] Fernandez, J. (2015). Acciones humanas sobre estructuras (pp. 213). Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- [2] Archbold, P., Mullarney, B. (2011). The influence of selected gait parameters on vertical pedestrian. 4th International Conference. (pp. 759-798). Wroclaw: Poland.
- [3] Racic, V., Mark, J., Brownjohn & W. (2011). Stochastic model of near-periodic vertical loads due to humans walking. Advanced Engineering Informatics 25, 259–275.
- [4] Thór Ingólfsson, E. (2011). *Pedestrian-induced lateral vibrations of footbridges. Experimental studies and probabilistic modelling*. UK: DTU Civil Engineering Report.
- [5] Morris, S., Benbasat, A., Moxley, D., Krebs, D. and Paradiso, J. (2008) Gait Analysis Using a Shoe-Integrated Wireless Sensor System. IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, 12, 413-425.
- [6] Hernández-Stengele, F., (2008). *Diseño y construcción de prototipo neumático de prótesis de pierna humana*. México: Universidad de las Américas.

- [7] Collado, S., Pascual, F., Álvarez, A., Rodríguez, L., (2003) Análisis de la marcha. Factores moduladores. Revista de la Facultad de Ciencias de la Salud. 1. 1-22.
- [8] Encarnación, A. (2012) *Análisis biomecánico de la marcha nórdica: Efectos de la experiencia y de la velocidad de práctica sobre el patrón de presión plantar, las fuerzas de reacción del suelo y los niveles de impacto*. Valencia. Universidad de Valencia.
- [9] Perry, J. (2010) Gait analysis: normal and pathological function. p 551. US. Journal of Sports Science and Medicine.
- [10] Figueiredo, F., da Silva, J., de Lima, L., Vellasco, P., Andrade, S., (2008). A parametric study of composite footbridges under pedestrian walking loads, *Engineering Structures*. 30. 605–615.
- [11] Caprani, C., Keogh, J., Archbold, P. & Fanning, P. (2011) Characteristic Vertical Response of a Footbridge Due to Crowd Loading. 8th International Conference on Structural Dynamics, EURODYN 2011 (pp. 978-985). Belgium.
- [12] Racic, V., Pavic, A., Brownjohn, J. (2009) Experimental identification and analytical modelling of human walking forces: Literature review. *Journal of Sound and Vibration* (pp. 1–49). UK.
- [13] Sanderson, D., Cavanagh, P. (1987). An investigation of the in-shoe pressure distribution during cycling in cycling or running shoes, *Biomechanics X-B* (pp 903-907). Illinois.