

ANÁLISIS DINÁMICO DE LA MARCHA: ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL CALZADO EN LOS CENTROS DE PRESIÓN SOBRE LA HUELLA PLANTAR

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ
DE HENARES

Dr. SAN GIL SORBET
Dr. GÓMEZ PELLICO
Dr. FORRIOL CAMPOS
Dr. DÍEZ ULLOA

RESUMEN

Se ha realizado un estudio dinámico de la marcha normal, mediante el análisis de los centros de presión y su localización sobre la huella plantar en 33 sujetos sanos de ambos sexos, con edades comprendidas entre los 18 y 21 años.

Se considera la influencia del calzado sobre los parámetros analizados.

Se utilizaron unas plataformas de fuerza conectadas a un ordenador que nos permite localizar en la huella plantar los centros de presión, definidos como los puntos de aplicación de la resultante de las fuerzas ejercidas en cada eje ortogonal del espacio sobre la huella plantar, cada 15 ms, así como la cuantificación de dichas fuerzas.

El objetivo del trabajo es analizar los centros de presión sobre la huella plantar, con el pie descalzo, con zapatilla deportiva y con zapato.

Los componentes mayores de las fuerzas se registran en el eje vertical; los responsables de la propulsión (situados en la región distal) son mayores que los responsables de la frenada.

La trayectoria del Centro de Presión se desplaza por la hemihuella lateral y termina en el área distal medial.

Aunque con zapato se direcciona más el pie, las diferencias entre calzados no son significativas con respecto al estudio de los Centros de Presión sobre la huella.

Palabras clave: Marcha, Centros de Presión, Plataformas de fuerza.

INTRODUCCIÓN

El estudio del movimiento y de la marcha humana ha interesado al hombre desde la antigüedad. Los primeros estudios se basaban en la observación. Los avances de la ciencia y de la tecnología han aportado nuevos instrumentos de medida que han permitido analizar nuevos conceptos de la marcha humana.

En el *estudio del movimiento* podemos diferenciar ahora dos aspectos:

1. Análisis cinemático, que estudia el movimiento *lineal* y *angular*.

2. Análisis cinético, que analiza las *solicitaciones mecánicas, tanto internas como externas*, que actúan sobre el sistema en estudio; y que es posible gracias a los nuevos instrumentos de medida.

Se han desarrollado distintas técnicas para la medida directa de las fuerzas ejercidas por músculos y tendones: por una parte la electromiografía, que realiza una evaluación cualitativa de la actividad muscular; y, por otra parte, la medida de las solicitaciones ejercidas sobre el medio donde se ejecuta el movimiento.

Nos centraremos en los sistemas que determinan las fuerzas ejercidas sobre el medio por el sujeto en movimiento. Se han utilizado para esto *plataformas de presiones*, que registran la distribución de las presiones bajo el pie, basadas bien en sistemas ópticos, bien en la disposición de captadores de presión bajo el pie; *zapatos instrumentados* (1, 2); y *plataformas de fuerza* que son las que nosotros utilizaremos, que consisten básicamente en soportes instrumentados mediante captadores de fuerza de tipo extensiométrico conectados a un sistema de ordenadores, que permite una fácil toma de datos.

El objetivo del presente trabajo es analizar los centros de presión (CDP) sobre la huella plantar durante la marcha normal.

MATERIAL Y MÉTODO

Se ha estudiado el patrón de comportamiento del CDP ejercido durante la fase de apoyo del ciclo de la marcha del pie derecho en 33 sujetos de ambos sexos, 17 mujeres y 16 varones, con edades comprendidas entre los 18 y 21 años de edad y sin patología del aparato locomotor.

Se han utilizado dos plataformas de fuerza instrumentadas sobre galgas de tipo extensiométrico, conectadas a un sistema de ordenadores.

El sujeto, una vez habituado al entorno, realiza tres pases sobre las plataformas, inicialmente descalzo, a continuación con zapatillas deportivas y por último con zapatos planos de suela dura. Se recogen las huellas plantares en cada pase y se analiza la huella plantar del *pie de entrada* al paso.

El ordenador nos proporciona un listado con las coordenadas, cada 15 ms, de la localización de los centros de presión, o lo que es lo mismo, del punto de aplicación de la resultante de las componentes de las fuerzas ejercidas en cada eje del espacio, en una unidad de tiempo sobre la huella plantar. También se obtiene la cuantificación de dichos componentes expresados en Newtons, para evitar errores antropométricos se normalizan los valores dividiéndolos por el peso del sujeto (para facilitar el manejo numérico multiplicamos los valores por 1.000).

Para el análisis se divide la huella plantar en seis partes, consideraremos las áreas medial y lateral (divididas por la bisectriz de la huella) de las regiones proximal, media y distal del pie (Fig. 1).

En cada una de las seis áreas se estudia, con cada calzado y descalzo, el n° de puntos, lo que expresa las zonas de mayor apoyo, y las sollicitaciones medias registradas en sentido vertical, anteroposterior y transversal. Se calculan los impulsos verticales, anteroposteriores y transversales, multiplicando las sollicitaciones medias obtenidas en cada área por el tiempo de apoyo expresado en porcentaje del total (3). Se analiza también la localización y cuantificación de las fuerzas máximas registradas, la trayectoria de los centros de presión, los patrones de huellas observados y la localización del punto de cambio de sentido de las fuerzas anteriores a posteriores sobre el pie.

Con todos los datos se realiza un análisis estadístico, los resultados obtenidos en cada una de las áreas se comparan con el método de la t de Student.

RESULTADOS

N° puntos

Se registra una muestra cada 15 ms. Se contabiliza un total de 45.6 ± 1.3 puntos sobre la huella descalza, 40.3 ± 0.9 con deportiva y 41.3 ± 1.03 con zapato. Lo que supone una duración media de apoyo de 636 ms. Se encuentran diferencias significativas ($p < 0.001$) entre el pie descalzo y calzado. El pie está apoyado más tiempo descalzo que con calzado.

En la figura 2, se representa el porcentaje de CDP hallados en cada una de las 6 áreas estudiadas en la huella plantar; en orden decreciente, en el área 3 (lateral media), en el área 5 (lateral distal), en el área 6 (medial distal) y en el área 1 (lateral proximal) donde se encuentran más del 90% de los CDP.

Fuerzas

Como se puede observar en la figura 3, las componentes anteriores son mayores en las áreas 3 y 1, existiendo una

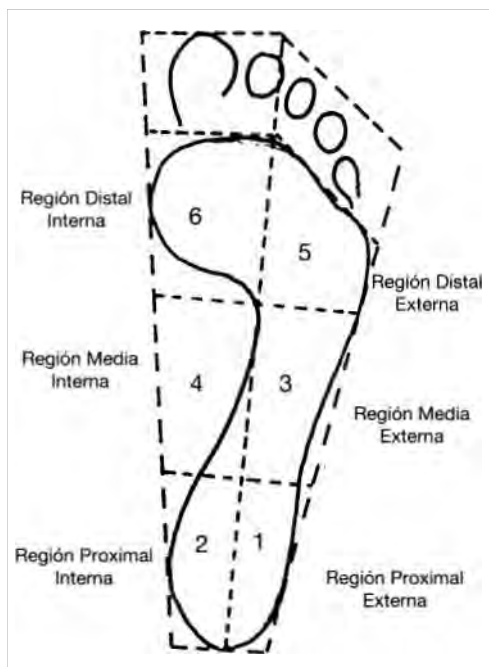


Fig. 1. Huella plantar dividida en seis áreas.

diferencia significativa entre la componente anterior media del área 3 y del área 1 ($p < 0.001$) con el pie descalzo, pero no cuando el paciente usa deporti-

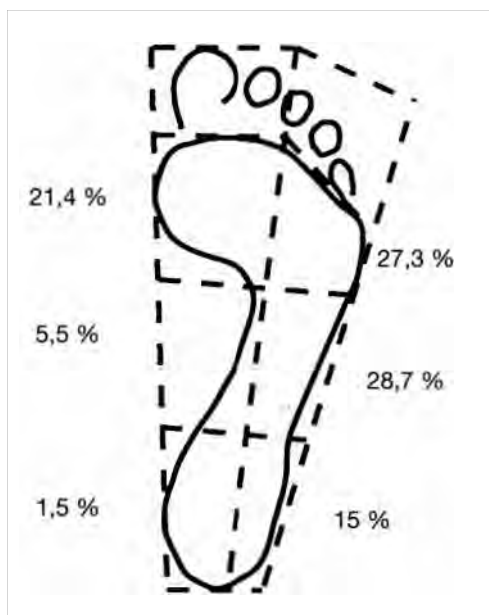


Fig. 2. Porcentaje de puntos registrados sobre cada área.

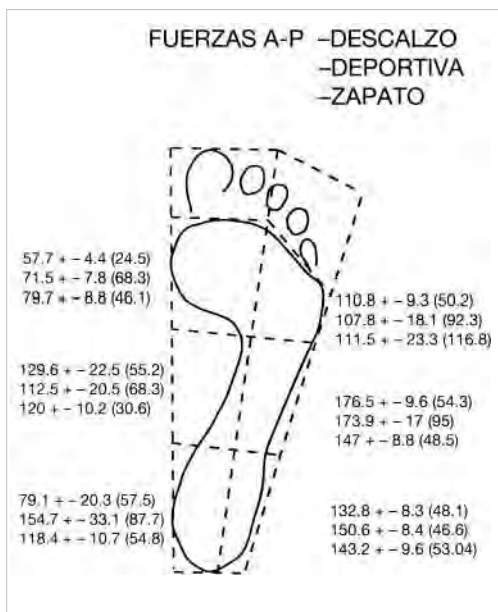


Fig. 3. Magnitudes de las componentes antero-posteriores.

va o zapato. Las menores fuerzas anteriores se observan en el área 6, con significación estadística ($p < 0.05$).

Las componentes transversales son mayores en las áreas 1, 2 y 3. No existen diferencias estadísticamente significativas entre ellas, pero sí entre éstas y la región distal donde se registran los valores más bajos (Fig. 4).

Las componentes verticales mayores se producen en las áreas 3 y 5; mientras que las menores se registran en las áreas 2 y 1. Encontramos diferencias significativas entre los valores registrados en 1 y 2, y los registrados en 3 y 5. (Fig. 5).

Impulsos

Los impulsos que se efectúan en los 3 ejes del espacio, están representados por regiones en las figuras 6, 7 y 8, expresados en porcentaje del total y en valor absoluto.

Aproximadamente el 50% de los impulsos anterior y lateral tiene lugar en las áreas laterales media y distal de la huella plantar (región 3 y 5) (Figs. 6 y 7).

El 75% de los impulsos verticales se producen en el área lateral de la región media del pie y en la región distal, correspondiéndose ésta con la zona de localización de las cabezas de los metatarsianos (región 3, 5 y 6) (Fig. 8).

Máximos (Fig. 9 y tabla 1).

Las fuerzas máximas ejercidas en sentido anterior se localizan principalmente en el área 3 (51.5%) y en el área 1 (38%), independientemente del calzado usado en la prueba.

Las fuerzas máximas mediolaterales también se localizan, fundamentalmente, en las áreas 3 y 1 en más del 90% de la huellas, y en las áreas 2 y 4 en menos del 10% de las huellas. Se encuentran diferencias significativas entre las fuerzas máximas transversales ejercidas con deportiva y con zapato ($p < 0.01$), siendo mayores las ejercidas con deportiva.

En el eje vertical la fuerza máxima se localiza en casi el 80% de las huellas en las áreas 5 y 6 siendo mucho menor (20%) la localización de estos máximos en las áreas 3, 1 y 4.

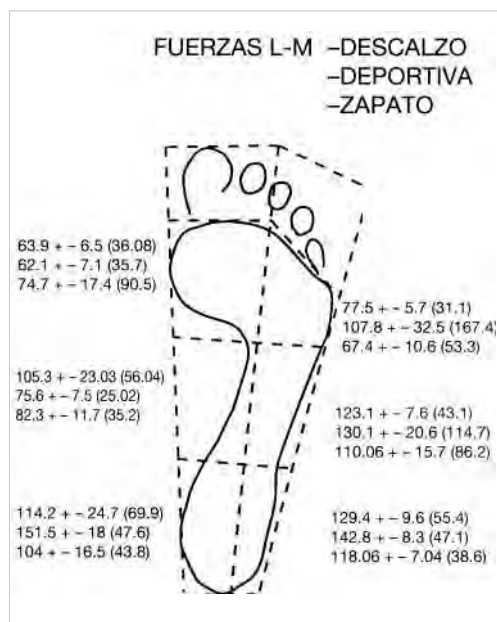


Fig. 4. Magnitudes de las componentes transversales.

No se encuentran diferencias significativas debidas a los distintos calzados.

Los valores máximos verticales son aproximadamente 1.132 veces el peso del cuerpo, significativamente mayores que los ejercidos en el plano antero-posterior (20% del peso) y éstos a su vez mayores que los lateromediales (15%) ($p < 0.001$).

Trayectoria (Fig. 10)

Se observa que el centro de presiones se desplaza por la región lateral, externamente a la bisectriz de la huella plantar y cuando llega al antepié, en la zona correspondiente a las cabezas de los metatarsianos, se desplaza hacia la parte medial de la región distal de la huella plantar, situándose internamente a la bisectriz.

La distancia a la bisectriz comienza siendo de 16.3 ± 1.7 mm con el pie descalzo, 36.4 ± 27.07 mm con deportiva y 11.09 ± 1.6 mm con zapato. Hallamos diferencias significativas entre el zapato y el pie descalzo ($p < 0.02$).



Fig. 5. Magnitudes de las componentes verticales.

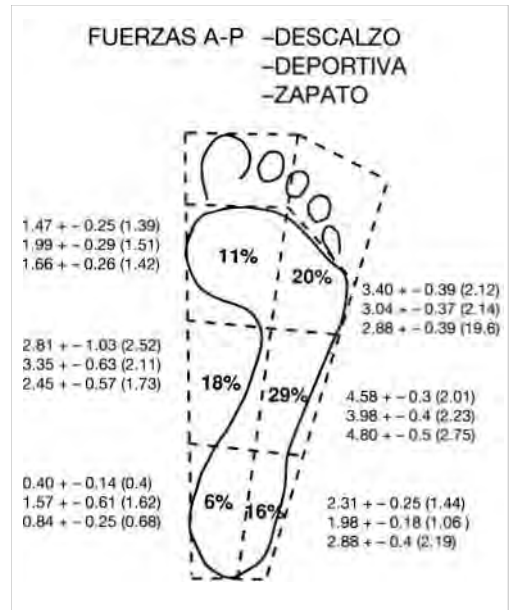


Fig. 6. Impulsos anteroposteriores en % y en valor absoluto.

Progresivamente esta distancia va disminuyendo hasta alcanzar la bisectriz aproximadamente hacia el 75% del tiempo de apoyo, a continuación comienza a distanciarse hacia la parte medial terminando el apoyo a -18.9 ± 3.1 mm en la huella «H» (descalzo), a -11.81 ± 2.3 mm en la «D» (deportiva) y a 12.09 ± 2.45 mm en la «Z» (zapato). Existen diferencias significativas entre la huella «H» y la «D» ($P < 0.03$); y entre la «Z» y la «H» ($p < 0.04$).

Patrones de huella (Fig. 11).

Se observan distintos tipos de patrones de huella, el más frecuente es aquel en que los centros de presión se desplazan desde el área proximal lateral de la huella a la media y distal laterales y a la distal medial, presentando o no apoyo en los dedos. El 50.5% de las huellas siguen estos patrones, concretamente el 54% de las «H» y «Z» y el 42% de los «D».

El segundo patrón en frecuencia es aquel en que los CDP se desplazan sólo por la región lateral de la huella sin presentar ningún punto en la región medial (12% de las huellas).

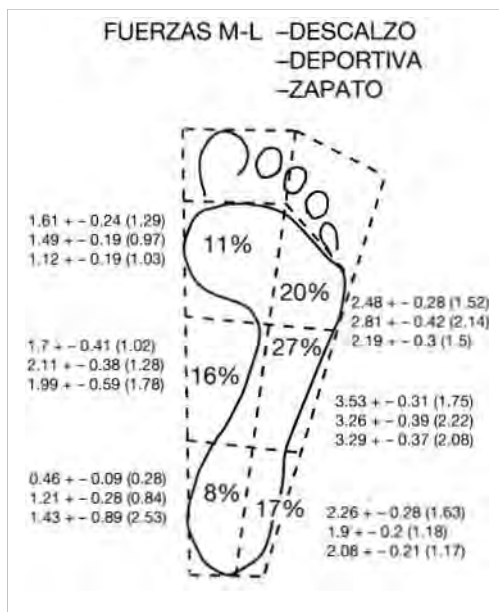


Fig. 7. Impulsos transversales en % y en valor absoluto.

En tercer lugar el patrón en herradura con CDP en el área proximal medial, región lateral y área distal medial (9%).

El 26% restante presenta distintos patrones.

Cambio de sentido: anterior-posterior

Las fuerzas pasan de ser el reflejo de la recepción del peso del cuerpo (sentido anterior) y una fuerza en la dirección de la marcha a ser una fuerza de propulsión hacia atrás (sentido posterior), en la región distal del pie, áreas 6 y 5.

No se encuentran diferencias significativas debidas al calzado.

DISCUSIÓN

Las plataformas de fuerzas han añadido un nuevo concepto, el de centro de presión, a los numerosos estudios que han tenido lugar sobre las presiones ejercidas por el pie o por una parte del mismo.

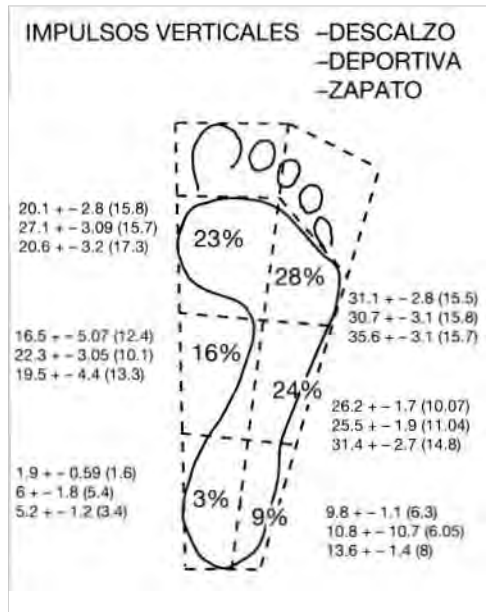


Fig. 8. Impulsos verticales en % y en valor absoluto.

ELFTMAN, 1934 (4), estudió con un método propio muy copiado posteriormente las presiones desarrolladas por el pie durante la marcha, llegando a la conclusión de que el eje dinámico del pie se dirige desde la parte lateral del talón hacia la parte medial del tercer metatarsiano, cambiando luego su dirección para dirigirse hacia adentro y salir entre el primer y segundo dedo. Similares son los hallazgos encontrados por CAVANAGH, 1978 (5); DRAGANICH, 1980 (6) y MOTRIUK, 1990 (7). El período de apoyo de un pie durante la marcha se divide clásicamente en tres fases, una primera de apoyo de talón, durante la cual la resultante de las fuerzas de reacción pie-suelo se dirige hacia abajo, adelante y afuera. Una segunda fase de apoyo monopodal, donde la resultante sigue la misma dirección que en el caso anterior y, por último, una tercera fase de apoyo del antepié y de los dedos o fase de despegue donde el sentido de las fuerzas antero-posteriores se invierte, de ahí que la resultante de las fuerzas que

actúan en este momento se dirige hacia atrás, abajo y afuera (8).

ARCAN, 1976 (9), sostiene que en el pie normal, las cargas se dividen un $42.8 \pm 6.5\%$ en el antepié, de las cuales más de la mitad se producen en la porción medial. El $9 \pm 4.7\%$ se producen en la región media del pie y el $48.2 \pm 8.4\%$ restante, en la región proximal o del talón. En nuestro estudio, gracias a las plataformas que permiten medir el tiempo de apoyo durante la marcha, observamos el mayor número de puntos, y por lo tanto el mayor tiempo de apoyo en la región distal de la huella plantar, fundamentalmente en su área lateral, después en el área lateral de la región media del pie y, por último, en el área lateral del talón. Al igual que DRAGANICH, 1980 (6), encontramos que el apoyo sobre el talón es corto, por lo tanto la velocidad en el área proximal es alta y va decreciendo según nos acercamos a la región distal, donde

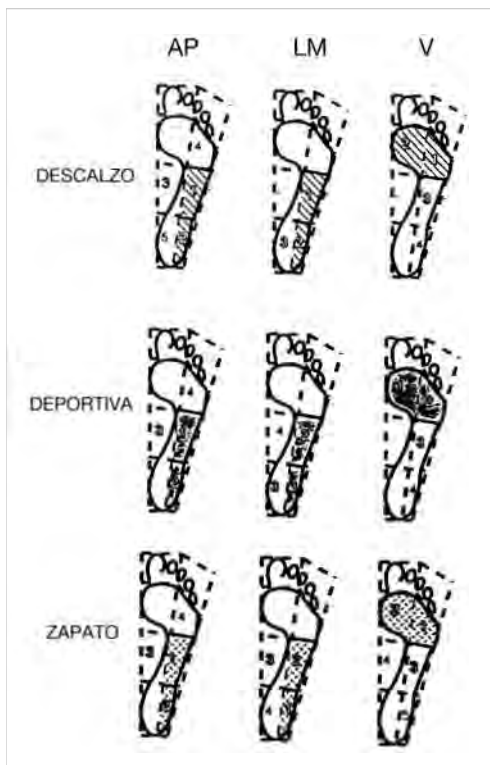


Fig. 9. Localización de las fuerzas máximas.

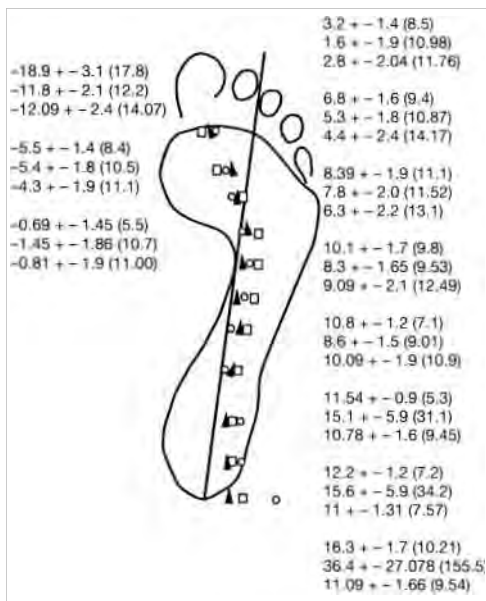


Fig. 10. Trayectoria del CDP descalzo (cuadrado), con deportiva (círculo) y con zapato (flecha).

encontramos el mayor número de puntos y la velocidad es menor; es en esta zona donde se desarrolla la propulsión del pie.

Los componentes de fuerza más altos registrados se encuentran, como es previsible, en el eje vertical, ya que van a ser las componentes verticales las responsables de impulsar el pie, consiguiendo el movimiento de todo el cuerpo, y del apoyo del peso del cuerpo en la fase de frenada. Las mayores fuerzas verticales medias se han encontrado en las áreas laterales de las regiones media y anterior de la huella, mientras que las mayores fuerzas lateromediales y antero-posteriores se encuentran en la región media y proximal de la huella.

Los valores de fuerzas máximas se ejercen también en el eje vertical, como es de suponer, pues los valores de impacto y propulsión del pie son significativamente mayores que los lateromediales y anteroposteriores que sirven para direccionar el pie. Coincidimos con EBERHART y cols., 1947 (10), en que las magnitudes de las fuerzas axia-

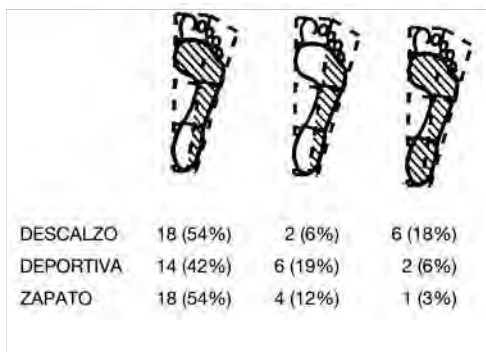


Fig. 11. Patrones de huella.

les máximas son aproximadamente de 1 a 1.5 veces el peso del cuerpo. La localización de los valores máximos de fuerzas verticales se encuentra en la región distal, seguido del área media lateral. En algunas ocasiones encontramos estos máximos recogidos en el área lateral proximal, pero con muy poca frecuencia. Esto nos hace sospechar que las fuerzas responsables de propulsar el pie son mayores que las fuerzas responsables de la fase de frenada.

KATOH y cols., 1983 (3), en sujetos descalzos encuentra que el impulso vertical se desarrolla en un 54% a nivel de la región distal y en un 25% y 21% a nivel de la región media y proximal de la huella plantar respectivamente. Nuestros resultados confirman este comportamiento. Sin embargo, en la región media hemos hallado un 39% del impulso vertical y en la región proximal un 13%. Estas diferencias pueden ser debidas al mayor número de muestras tomadas por nosotros.

El centro de presiones se desplaza generalmente a lo largo de la hemihuella lateral y cuando llega al antepié (zona correspondiente a las cabezas de los metatarsianos) se desplaza al área medial distal, para terminar en el primer espacio interdigital. Por lo que no estamos de acuerdo con HUTTON y cols., 1976 (11), para quien desde el momento de apoyo del talón hasta la

elevación del mismo, el CDP se desplaza rápidamente desde el borde interno de la región proximal por el borde interno de la huella plantar. Los hallazgos de CAVANAGH, 1978 (5), y MORTIUK, 1990 (7), sobre la trayectoria son similares a los nuestros.

Coincidimos en señalar con LORD, 1981 (12) y GODFREY y cols., 1967 (13), que las solicitaciones a las que se ve sometida la región distal de la huella plantar son semejantes a las que soporta el talón, donde las solicitaciones latero-mediales y antero-posteriores son de mayor magnitud que en la región distal que a su vez presenta unas solicitaciones verticales superiores y que se aplican durante mayor tiempo. Lo que hace que los impulsos sean mayores en la región distal de la huella plantar que en la proximal.

Esto nos hace sospechar que el talón y la región media podrían servir para direccionar el apoyo del pie mientras que la región distal, más grande y más ancha, tendría como misión la de soportar e impulsar las solicitaciones que transmite el cuerpo. El impulso vertical de la región distal es unas tres veces mayor que el de la región proximal.

No estamos de acuerdo con los resultados obtenidos por HUTTON y cols., 1976 (11) para quien desde el momento de apoyo del talón hasta la elevación del mismo, el CDP se desplaza rápidamente desde el área medial de la región proximal por la región medial de la huella plantar. Tras el contacto del talón, aumentan las solicitaciones verticales y el CDP progresa en sentido distal. Las fuerzas verticales correspondientes al impacto del pie con el suelo se observan en la región 3, porción lateral de la región media, de la huella, por lo que nos resistimos a denominarlas como muchos autores clásicos, fuerza vertical del talón.

| | FMAX AP | FMAX ML | FMAX V |
|-----------|-------------------|------------------|---------------------|
| DESCALZO | 153.03±7.7 (44.4) | 117.8±7.5 (43.1) | 733.5±25.09 (144.1) |
| DEPORTIVA | 144.06±8.6 (49.7) | 122.4±7 (40.3) | 744.6±26.6 (153.2) |
| ZAPATO | 143.7±7.4 (43) | 105.5±7.7 (44.7) | 718±34.8 (200.4) |

Tabla I. *Magnitudes de las fuerzas máximas.*

Concluimos que:

- La zona de principal apoyo del pie es la hemihuella lateral y el área distal medial; donde se registran más del 80% de los Centros de Presión. La región distal es la más importante en el desarrollo de la marcha, mientras que las áreas media y proximal mediales (áreas 2 y 4) apenas tienen importancia en la recepción de los Centros de Presión.

- Las componentes mayores de las fuerzas se registran en el eje vertical, las responsables de la propulsión son mayores que las responsables de la frenada. El impulso más importante también es el vertical, localizado en la región distal, y es el responsable de propulsar el pie. Las componentes transversales y anteroposteriores son las responsables de direccionar el pie y se localizan en las áreas media lateral y retropié.

- Aunque con zapato se direcciona más el pie, las diferencias entre calzados no son significativas en cuanto al estudio de los Centros de Presión sobre la huella plantar.

BIBLIOGRAFÍA

1. BAUMANN, J. H. and BRAND, P. W.: «Measurement of pressure between foot and shoe». *Lancet* 23: 629-632, 1963.
2. SPOLEK, G. A. and LIPPERT, F. G.: «An instrumented shoe as portable force measuring device». *J. Biomechanics* 9, 12: 779-785, 1976.
3. KATOH, Y.; CHAO, EYS, LAUGHMAN, R. K.; SCHNEIDER, E. and MORREY B. F.: «Biomechanical analysis of foot function during gait and clinical applications». *Clin. Orthop. rel. Res.* 177: 23-33, 1983.
4. ELFTMAN, H.: «A cinematic study of the distribution of pressure in the human foot». *Anat. Rec.* 59: 481-492, 1934.
5. CAVANAGH, P. R.: «A technique for averaging center of pressure parts from a force platform». *J. Biomechanics* 11: 487-491, 1978.
6. DRAGANICH, L. F.; ANDRIACHI, T. P.; STRONGWATER, A. M. and GALANTE, J. O.: «Electronic measurement of instantaneous foot-floor contact patterns during gait». *J. Biomechanics* 13: 875-880, 1980.

7. MOTRIUK, H. U. and NIGG B. M.: «A Technique for normalizing centre of pressure paths». *J. Biomechanics* 23, 9: 927-932, 1990.

8. LORD, G.; GERTAZ, R. and GANDOLFI, R.: «La marche normale et ses alterations après arthroplastie totale du membre inferieur». *Rev. Chir. Orthop.* 63: 221-236, 1977.

9. ARCAN, M. and BRULL, M. A.: «A fundamental characteristic of the human body and foot, the foot-ground pressure pattern». *J. Biomechanics* 9, 7: 453-457, 1976.

10. EBERHART, M.; INMAN, V. T. and SAUNDERS, M.: *Force plate studies. A fundamental study in human*

locomotion and other information relating to design of artificial limb. A Report to the National, 1947.

11. HUTTON, W. C.; STOTT, J. R. R. and STOKES, I. A. F.: «The mechanics of the foot». En: *The foot and its disorders.* L. Klenerman, Ed. Blackwell, Oxford, UK, 30-48, 1976.

12. LORD, M.: «Foot pressure measurement: a review of methodology». *J. Biomed. Eng.* 3: 91-99, 1981.

13. GODFREY, C. M.; LAWSON, G. A. and STEWART, W. A.: «A method for evaluation of pedal pressure changes during weight bearing: preliminary observations on normal an arthritics». *Arthr. Rheum.* 10: 135-140, 1976.