

ORIGINAL

Caracterización cinemática, electromiográfica y mediante ecodoppler del retorno venoso durante la marcha humana normal



S. Vicente^{a,*}, S. Lerma^{b,c}, L. de Benito^d, M. Gutierrez^d, J. Alfayate^d y J. Fontcuberta^e

^a Servicio de Cirugía Vascular, Hospital 12 de Octubre, Madrid, España

^b Laboratorio de Análisis del Movimiento, Hospital Infantil Universitario Niño Jesús, Madrid, España

^c Centro Superior de Estudios Universitarios La Salle, Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, España

^d Servicio de Cirugía Vascular, Hospital Universitario Fundación Alcorcón, Alcorcón (Madrid), España

^e Servicio de Cirugía Vascular, Hospitales Sanitas, Madrid, España

Recibido el 11 de noviembre de 2017; aceptado el 18 de enero de 2018

Disponible en Internet el 29 de marzo de 2018

PALABRAS CLAVE

Bomba muscular;
Insuficiencia venosa
crónica;
Estudio cinemático;
Ecodoppler

Resumen

Objetivos: La marcha es la forma de desplazamiento del ser humano. La interrelación fisiológica entre el sistema muscular y vascular ha sido poco estudiada. Conocemos la importancia de la bomba soleogemelar sobre el sistema venoso durante la marcha, por lo que proponemos un método de estudio de la hemodinámica venosa durante la marcha, un estudio que trata de correlacionar los hallazgos hemodinámicos con la secuencia de contracción y relajación muscular durante la marcha.

Material y métodos: Realizamos un estudio descriptivo prospectivo sobre un total de 50 adultos sanos en el Laboratorio de Análisis del Movimiento del Hospital Universitario Infantil Niño Jesús de Madrid. El sistema de captura del movimiento fue el SMART-D de BTS Bioengineering, formado por 8 cámaras optoelectricas y un *software* para reconstrucción en 3D. Se realizó EMG de superficie (EMGs) (Free EMG 300 de BTS Bioengineering) de los músculos gastrocnemio medial y lateral, y de los músculos tibial anterior y posterior. Los sujetos caminaron sobre una cinta sin fin BH (modelo Marathon) y se realizó ecodoppler venoso poplíteo (Nemio MX Toshiba) durante la marcha.

Resultados: Se estudió a 29 varones (58%) y a 21 (42%) mujeres, con una media de edad de 32 años. Se realizó el análisis y correlación del estudio de la marcha con la EMGs y el ecodoppler venoso y se obtuvo una onda positiva en el ecodoppler que se correlaciona con la contracción excéntrica del músculo gastrocnemio medial, que estabiliza la rodilla; una segunda onda de presión negativa como consecuencia del cierre valvular y relajación muscular y una tercera onda de presión positiva correlacionada con la contracción concéntrica del músculo gastrocnemio medial durante la flexión plantar y de la rodilla durante la fase de despegue de la marcha.

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: Sandravj1984@gmail.com (S. Vicente).

Conclusiones: Describimos un método de análisis de la bomba muscular gemelar en relación con la hemodinámica venosa y el efecto fisiológico de la bomba muscular sobre el sistema venoso profundo.

© 2018 SEACV. Publicado por Elsevier España, S.L.U. Todos los derechos reservados.

KEYWORDS

Muscular pump;
Venous insufficiency;
Kinematic study

Kinematic, electromyographic and Doppler ultrasound characteristics of venous return during the normal human gait

Abstract

Objectives: The gait is the pattern of movement of the human being. The physiological interrelation between the muscular and vascular system has not been sufficiently studied.

The importance of the soleus-calf muscle pump on the venous system during walking is known; therefore a method is proposed in order to study venous haemodynamics during walking. The aim of the study is to correlate the haemodynamic findings with the muscle contraction and relaxation sequence during walking.

Material and methods: A prospective descriptive study was conducted on a total of 50 healthy adults in the Movement Analysis Laboratory of the Niño Jesús Children's University Hospital in Madrid. The movement capture system was the SMART-D of BTS-Bioengineering, consisting of 8 optoelectronic cameras and software for 3 D reconstruction.

A surface electromyography (EMGs) was performed, using a Free EMG 300 (BTS Bioengineering) of the medial and lateral gastrocnemius muscle and the anterior and posterior muscle. The subjects walked on a treadmill (BH Marathon) and a popliteal venous Doppler ultrasound (Nemio MX Toshiba) was performed whilst walking.

Results: The study included a total of 50 participants, with a mean age of 32 years, and 29 (58%) men and 21 (42%) women. The analysis and correlation of the study was performed, with the EMGs and the venous Doppler ultrasound, with a positive wave being obtained with the Doppler ultrasound that correlated with the eccentric contraction of medial gastrocnemius muscle, stabilising the knee. There was a second wave of negative pressure as a consequence of valvular closure and muscle relaxation. A third wave of positive pressure was then recorded that correlated with the concentric contraction of the medial gastrocnemius muscle during plantar and knee flexion during the take-off phase of the gait.

Conclusions: The haemodynamic evaluation of the venous system by non-invasive tests can provide an objective basis for the diagnosis, evolution, and prognosis of patients with chronic venous insufficiency.

© 2018 SEACV. Published by Elsevier España, S.L.U. All rights reserved.

Introducción

La marcha es el principal sistema de desplazamiento del ser humano^{1,2}. Para ser llevada a cabo, es preciso la integridad y total coordinación de los sistemas nervioso, muscular y esquelético³.

Además del papel fisiológico del sistema vascular, sus relaciones con el resto de los sistemas han sido poco estudiadas⁴⁻⁶.

La denominada bomba muscular, mediada por la acción compresiva del gastrocnemio, se contempla como uno de los mecanismos que favorece el retorno venoso^{7,8}. El estudio invasivo de las presiones musculares y su papel en la modificación de la presión venosa fue estudiado por Alimi et al.⁹, que encontraron una asociación entre el sistema venoso profundo y la acción de la musculatura profunda de la pierna durante la marcha y la ejecución de movimientos.

Los sistemas actuales de evaluación y diagnóstico de los pacientes con insuficiencia venosa crónica se realizan con

el paciente en posición estática. Esto no permite valorar de forma objetiva la interacción entre ambos sistemas durante la marcha.

El objetivo de nuestro estudio consiste en determinar cuál es el efecto exacto de la bomba muscular sobre el sistema venoso durante la marcha humana normal.

Material y métodos

Las medidas cinemáticas se realizaron en el Laboratorio de Análisis del Movimiento del Hospital Infantil Universitario Niño Jesús (Madrid). El estudio fue aprobado por el Comité Ético del hospital. A todos los participantes del estudio se les informó y se les solicitó el consentimiento informado.

Dicho laboratorio cuenta con una zona de captura de movimiento de 8 m de largo, 2,5 m de ancho y 2 m de alto (40 m³).

El estudio se realizó sobre 50 voluntarios sanos, de edades comprendidas entre los 18 y los 50 años, a los que previamente se les realizó un estudio de la marcha para descartar anomalías. Los sujetos fueron informados del objeto del estudio, de la exploración y de su inocuidad.

Se excluyó a todos aquellos pacientes en los que se objetivó mediante ecografía anomalía del sistema venoso superficial o profundo, así como a aquellos pacientes con antecedentes clínicos de trombosis venosa profunda, cirugía o escleroterapia venosa previa. Fueron excluidos también todos aquellos pacientes con dificultad para caminar, o con alteraciones patológicas de la marcha (estudio realizado sobre 2 plataformas dinamométricas Kistler®).

Análisis de la marcha

Para realizar la captura de movimiento (*gold standard*) se utilizó un sistema SMART-D de BTS Bioengineering®, compuesto por 8 cámaras optoelectrónicas con una frecuencia de captura de 250 Hz y una resolución de 1,4 Mp, y por una unidad de procesamiento con *software* para reconstrucción en 3D del movimiento y para su posterior análisis.

La información electromiográfica de superficie se recogió con un sistema FreeEMG 300 de BTS Bioengineering®.

Los sujetos comenzaron a caminar en una cinta sin fin (*treadmill*) de marca BH® (modelo Marathon) durante 10 min para que se adaptaran. Asumimos que la marcha sobre una cinta sin fin es igual a la marcha humana normal.

De forma simultánea, se realizó un electromiograma de superficie (EMGs) de los músculos gastrocnemios medial y lateral, y de los tibial anterior y posterior. La EMGs nos aporta información sobre la secuencia de activación de los músculos durante la marcha.

La exploración vascular se efectuó mediante un ecodoppler color (modelo Nemio MX®, Toshiba Medical Systems) aplicando una sonda intraoperatoria de 7 MHz del modelo PVF-738F.

El abordaje fue posterior, en una proyección longitudinal de la porción más proximal de la vena poplítea, con un ángulo doppler de 50 a 60° de insonación, en sentido longitudinal sobre la vena poplítea, justo antes del anillo de Hunter. La sonda se posicionó con una esponja rodeada de cinta adhesiva para evitar el artefacto secundario a la mano del explorador y a la flexoextensión de la rodilla durante la marcha.

De esta manera, al integrar la información del sistema locomotor con el estudio ecográfico simultáneo, podremos objetivar el efecto que los músculos ejercen sobre el sistema

venoso al caminar y qué músculos son los responsables de dicho efecto.

Las medidas antropométricas necesarias para construir el modelo tridimensional se tomaron en una camilla de exploración estándar y se utilizó un goniómetro universal, una cinta métrica y un calibre curvo. Para las medidas de talla y peso se utilizó una báscula digital SECA 769® con tallímetro.

Software

El *software* empleado para la elaboración del modelo cinemático consta de 3 programas integrados: Smart-Capture®, que se utiliza para la captura de movimiento integrando todos los sistemas disponibles en el laboratorio; Smart-Tracker®, utilizado para reconstruir el modelo cinemático y Smart-Analyzer®, que se usa para elaborar el informe clínico del que se obtienen los datos cinemáticos del miembro inferior en los 3 planos del espacio.

Inicialmente se obtuvieron los parámetros de la fase de apoyo y oscilante, así como parámetros espaciales (longitud del paso y velocidad) y gráficas sobre la cinemática de la marcha de cada sujeto para objetivar la ausencia de anomalías (fig. 1).

Se obtuvieron las curvas del EMGs (fig. 2), de las que se tomaron 4 ciclos de la marcha y se correlacionaron con las gráficas de cinemática de rodilla, cadera y tobillo (fig. 3) junto con la imagen ecográfica.

Resultados

En total fueron estudiadas 50 personas sanas, de edades comprendidas entre los 18 y los 50 años (media: 32 años). Eran 29 (58%) varones y 21 (42%) mujeres, sin factores de riesgo cardiovascular ni antecedentes personales de interés ni tratamiento en el momento del estudio.

En el estudio ecográfico, aparece en todos los pacientes una curva positiva de gran amplitud, seguida de una pequeña curva negativa y una nueva curva positiva de menor amplitud que la previa. En todos los casos fue factible la determinación, y la morfología de la curva fue similar en todos ellos.

Con base en los resultados obtenidos y en la correlación entre ecodoppler, EMGs y las gráficas cinemáticas, proponemos que, en sujetos sanos, el primer pico obtenido en la imagen ecográfica (fig. 4 A) corresponde a la contracción excéntrica del músculo gastrocnemio medial. Esto se correlaciona en la marcha humana normal con la segunda fase de apoyo plantar, cuando todo el pie está en contacto con el

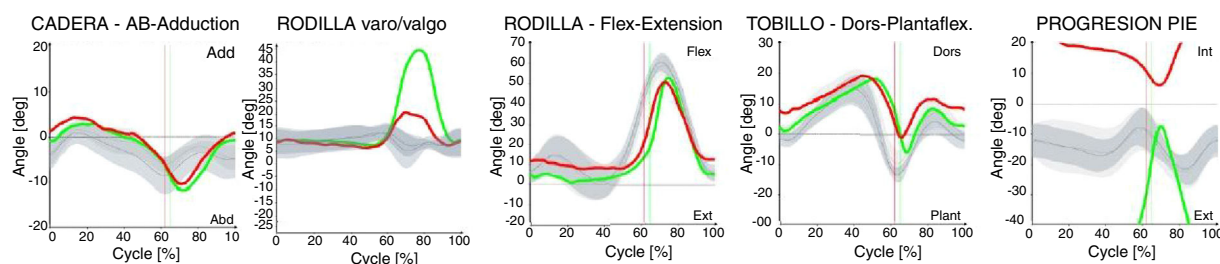


Figura 1 Gráficas sobre la cinemática de la marcha.

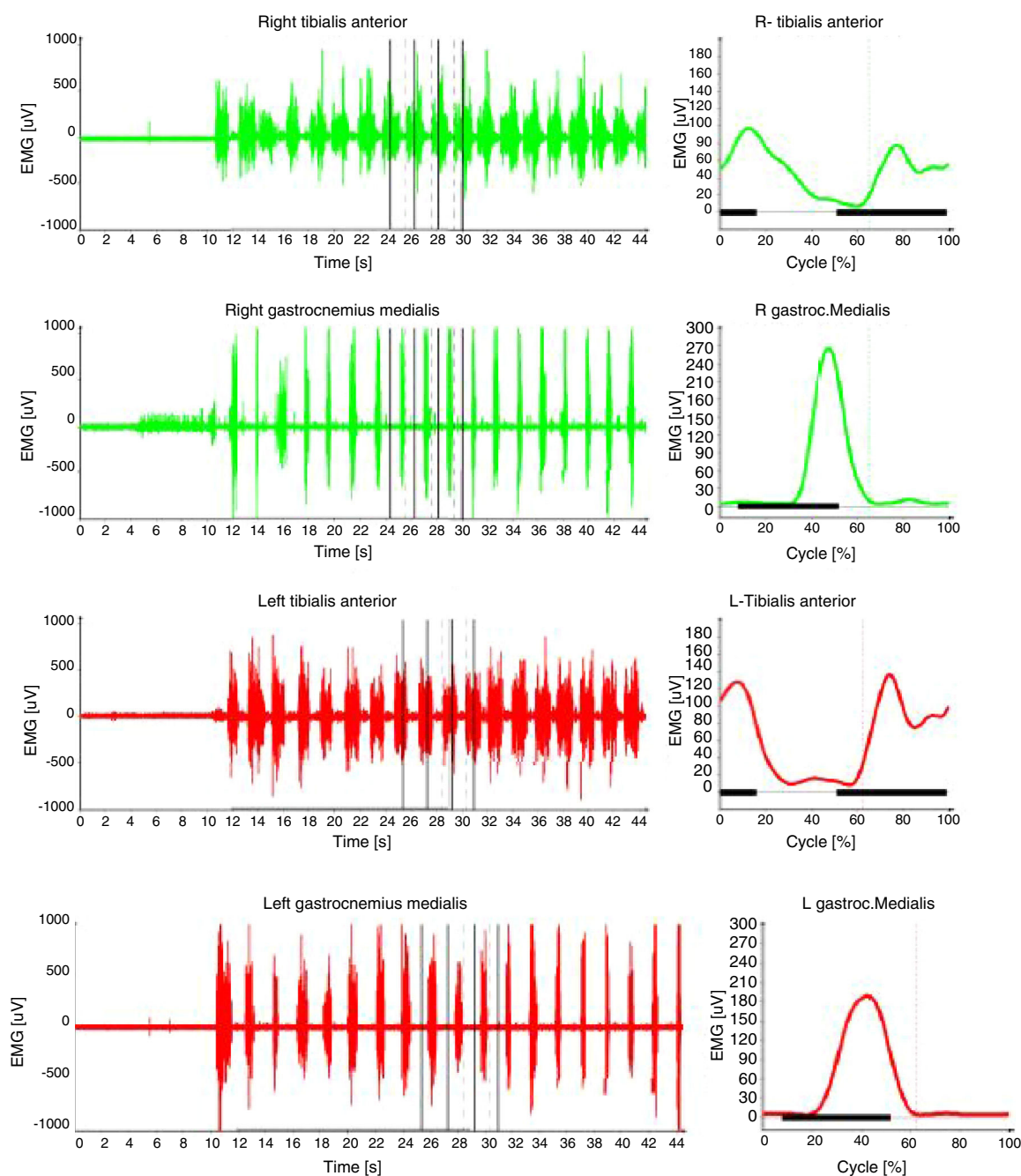


Figura 2 Electromiografía.

suelo, momento en que actúa en primer lugar el gastrocnemio mediante una contracción excéntrica, estabilizando la rodilla al desacelerar el desplazamiento anterior de la tibia con relación al pie en el momento de iniciarse la elevación del talón.

El segundo pico (fig. 4 B) positivo, de menor amplitud, se corresponde con la acción concéntrica del músculo gastrocnemio medial, momento de la marcha en que solidariza el pie al segmento tibial, que sigue avanzando hacia delante, permitiendo así que el talón despegue del suelo. Al final de la fase de apoyo, realiza una extensión del tobillo que impulsa el cuerpo hacia delante.

Discusión

La insuficiencia venosa crónica se define como aquellas manifestaciones clínicas, consecuencia de la hipertensión venosa, definidas a su vez como el fallo en la reducción de la presión venosa con el ejercicio¹⁰.

Bajo circunstancias normales, las válvulas venosas¹¹ y la bomba muscular de la extremidad inferior limitan la acumulación de sangre en los miembros inferiores.

Los efectos fisiológicos de la gravedad y la presión hidrostática opuestos al flujo del retorno venoso en la posición de bipedestación son contrarrestados con un mecanismo

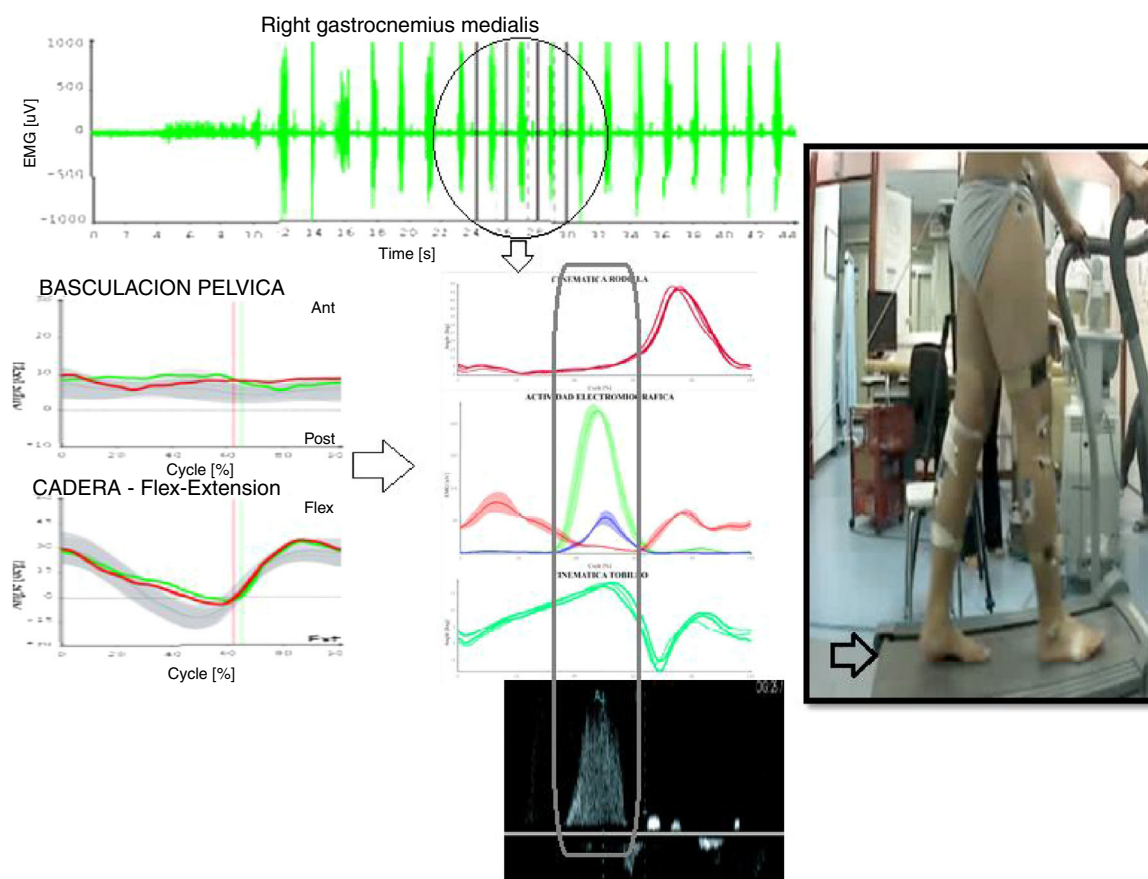


Figura 3 Combinación de las gráficas cinéticas, EMG y curva Doppler.

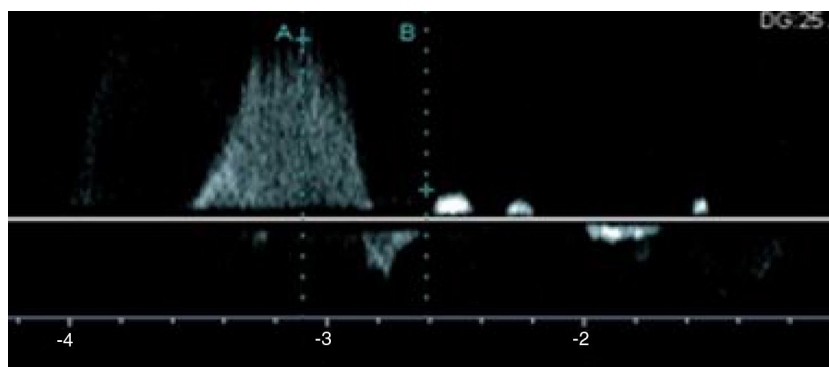


Figura 4 Imagen ecográfica: curva positiva (A y B) y curva negativa.

eficiente muscular y un pequeño gradiente dinámico de presión^{5,12}.

Sin embargo, la bomba muscular podría compensar algunos casos de reflujo y obstrucción y prevenir la aparición de los síntomas de la insuficiencia venosa crónica^{13,14}.

Existen 3 bombas musculares en las extremidades inferiores: plantar, soleogemelar y en el muslo, de las cuales la más importante por su eficiencia es la soleogemelar.

La presión venosa periférica varía considerablemente en la red venosa, desde 85 mmHg en la posición de bipedestación hasta 25 mmHg durante la marcha. Está estrechamente influida por las bombas musculares y las articulaciones (de

forma conjunta). La caída de la presión en personas sanas comienza entre los 3 y los 12 pasos⁵, de forma relativamente independiente de la velocidad del paso y dependiente de la movilidad del tobillo y de la rodilla, así como de la efectividad de la bomba soleogemelar.

Dicha bomba es la más eficiente, tiene la mayor capacidad y genera la mayor diferencia de presiones (200 mmHg durante la contracción muscular). El volumen gemelar de una pierna normal supone entre 1.500 y 3.000 cc y un volumen venoso de 100 a 150 cc, y presenta una capacidad de eyección de entre el 40 y el 60% con cada contracción, conduciendo así la mayor canti-

dad de retorno venoso hacia la vena poplítea y la vena femoral.

En cuanto a la fisiología valvular, en un estudio publicado por Lurie et al.^{15,16}, describen las 4 fases del mecanismo de cierre valvular: *opening phase*, *equilibrium phase*, *closing phase*, *closed phased*.

Es cierto que, en el diagnóstico actual de la insuficiencia venosa crónica, se cuestiona la sensibilidad de test como el de van Bemmelen¹⁷ (que valora el tiempo de cierre valvular) y el de Psathakis (índice de flujo) porque, para provocar y cuantificar el reflujo venoso, desafortunadamente, se realizan con el paciente en posición estática, sin tener en cuenta la influencia de la bomba muscular.

Nuestro estudio, sin embargo, tiene en cuenta los componentes dinámicos, musculares y articulares, describe la onda venosa que aparece como consecuencia de la contracción muscular y determina en qué momentos de la marcha se producen.

Visualizamos mediante la ecografía la presencia de 2 curvas positivas que aparecen como consecuencia de la acción concéntrica y excéntrica del músculo gastrocnemio medial. La curva negativa descrita entre ambas podríamos justificarla como consecuencia del retroceso por el cierre valvular asociado a la relajación muscular, también denominado golpe de ariete o pulso de Zhukowski. Dado que la sangre es un fluido elástico, ante el cierre brusco de las válvulas, las partículas del fluido que se han detenido son empujadas por las que vienen inmediatamente detrás y que están aún en movimiento como consecuencia del impulso realizado por la contracción excéntrica del músculo gastrocnemio medial. Esto origina una sobrepresión que comprime ligeramente el fluido y disminuye su volumen mientras la vena se dilata. Una vez que el fluido se detiene, tiende a expandirse de nuevo y la vena dilatada previamente retoma su dimensión normal. En conjunto, estos efectos dan una onda de presión en el sentido contrario. Finalmente, se produce la segunda curva positiva, de menor amplitud, como consecuencia de la acción concéntrica del músculo gastrocnemio medial. Esta acción concéntrica es la encargada de generar el movimiento de flexión plantar y flexión de la rodilla en el inicio del despegue.

Nuestro estudio describe un método de análisis de la bomba gemelar sobre el sistema venoso y la descripción de una curva ecográfica (aún no descrita) y su correlación con el sistema muscular. Se trata de un primer paso para la posterior correlación con el sexo, el IMC de los pacientes y la medición de características de la curva (amplitud y velocidades medias normales).

Tras dicho estudio, las próximas líneas de trabajo vendrán derivadas de determinar la variación que se produce entre sujetos sanos de diferentes edades y con diferente musculatura, para así establecer los rangos normales y de las diferencias existentes entre personas con insuficiencia venosa crónica y personas sanas en cuanto a la curva producida como consecuencia de la presión soleogemelar, de modo que podamos realizar diagnósticos más sensibles y predecir, de entre nuestros pacientes, aquellos candidatos a presentar insuficiencia venosa crónica o a experimentar su empeoramiento.

Conclusión

Es, por tanto, evidente que debemos estudiar el sistema venoso y sus anomalías como un fenómeno global y dinámico, con distintos elementos implicados (reflujo, válvulas, bomba muscular).

Lo que se demuestra con este estudio es la forma fisiológica de interactuar entre dichos elementos.

La evaluación hemodinámica del sistema venoso mediante test no invasivos puede proporcionar una base objetiva para el diagnóstico, evolución y pronóstico de los pacientes con insuficiencia venosa crónica.

Las implicaciones terapéuticas de la evaluación dinámica de la función venosa podrían ayudar a identificar aquellas situaciones clínicas en las que el paciente se pudiera beneficiar de ejercicios concéntricos o excéntricos de la musculatura flexora plantar para mejorar los mecanismos de retorno venoso.

Conflicto de intereses

No hay conflicto de intereses.

Bibliografía

1. Sutherland DH. The evolution of clinical gait analysis. Part II-kinematics. *Gait Posture*. 2002;16:159-79.
2. Sutherland DH. The evolution of clinical gait analysis part III-kinetics and energy assessment. *Gait Posture*. 2005;21:447-61.
3. Zajac FE, Neptune RR, Kautz SA. Biomechanics and muscle coordination of human walking Part I: Introduction to concepts, power transfer, dynamics and simulations. *Gait Posture*. 2002;16:215-32.
4. Ludbrook J. The musculo-venous pumps of the human lower limb. *Am Heart J*. 1966;71:635-41.
5. Pollack AA, Wood EH. Venous pressure in the saphenous vein at the ankle in man during exercise and changes in posture. *J Appl Physiol*. 1949;1:649-62.
6. White JV, Katz ML, Cisek P, Kreithen J. Venous outflow of the leg: anatomy and physiologic mechanism of the plantar venous plexus. *J Vasc Surg*. 1996;24:819-24.
7. Meissner MH, Moneta G, Burnand K, Gloviczki P, Lohr JM, Lurie F, et al. The hemodynamics and diagnosis of venous disease. *J Vasc Surg*. 2007;46:45-245.
8. Kan YM, Delis KT. Hemodynamic effects of supervised calf muscle exercise in patients with venous leg ulceration: A prospective controlled study. *Arch Surg*. 2001;136:1364-9.
9. Alimi YS, Barthelemy P, Juhan C. Venous pump of the calf: A study of venous and muscular pressures. *J Vasc Surg*. 1994;20:728-35.
10. Ramelet AA, Perrin M, Kern P, Bounameaux H. *Phlebology the guide*. Vol 1. 5th ed. Francia: Masson; 2008.
11. Stücker M, Reich S, Robak-Pawelczyk B, Moll C, Rudolph T, Altmeyer PJ, et al. Changes in venous refilling time from childhood to adulthood in subjects with apparently normal. *J Vasc Surg*. 2005;41:296-302.
12. Araki CT, Back TL, Padberg FT, Thompson PN, Jamil Z, Lee BC, et al. The significance of calf muscle pump function in venous ulceration. *J Vasc Surg*. 1994;20:872-7.
13. Plate G, Brudin L, Eklof B, Jensen R, Ohlin P. Congenital vein valve aplasia. *World J Surg*. 1986;10:929-34.

14. Padberg FT Jr, Johnston MV, Sisto SA. Structured exercise improves calf muscle pump function in chronic venous insufficiency: A randomized trial. *J Vasc Surg.* 2004;39:79–87.
15. Lurie F, Kistner RL, Eklof B, Kessler D. Mechanism of venous valve closure and role of the valve in circulation: A new concept. *J Vasc Surg.* 2003;38:955–61.
16. Lurie F, Kistner RL, Eklof B. The mechanism of venous valve closure in normal physiologic conditions. *J Vasc Surg.* 2002;35:713–7.
17. Van Bemmelen PS, Bedford G, Beach K, Strandness DE. Quantitative segmental evaluation of venous valvular reflux with duplex ultrasound scanning. *J Vasc Surg.* 1989;10:425–31.