

APORTE TECNOLÓGICO COMPLEMENTARIO PARA LA EVALUACIÓN DE LAS RE-ESTENOSIS ARTERIALES

JUAN C. MIGUEL,⁽¹⁾ MARIO MATTARA,⁽²⁾ RICARDO R. PONSO,⁽²⁾ SEBASTIÁN IDELSOHN,⁽¹⁾ ALBERTO E. D'OTTAVIO.^{(3)*}

1) Instituto Museo de Morfología Normal, Departamento de Ciencias Morfológicas, Facultad de Ciencias Médicas, Universidad Nacional de Rosario; 2) Departamento de Mecánica Aplicada, Facultad de Ingeniería, Ciencias Exactas y Agrimensura, UNR; 3) Cátedra de Histología y Embriología, Departamento de Ciencias Morfológicas, Facultad de Ciencias Médicas, UNR; y Carrera del Investigador Científico, Consejo de Investigaciones, UNR.

Resumen

El presente trabajo estudia el comportamiento del flujo sanguíneo a partir de arterias femorales humanas estenóticas con distintos grados de obstrucción (extraídas de autopsias y de amputaciones quirúrgicas), y de simulaciones producidas por un programa computacional simulador *ad hoc* basado en el método de los elementos finitos para líquidos newtonianos, homogéneos e incompresibles. Su empleo produjo numerosas curvas de máxima resumidas en un único gráfico de aplicación sencilla para su utilización en la práctica médica. Además de la evaluación del origen y del impacto de los remolinos analizando las distintas variables intervinientes (esto es: presión, velocidad y tensiones), los resultados aquí reportados pueden constituir, junto a los demás métodos usados actualmente, un complemento útil para el diagnóstico de estas estenosis.

Palabras clave: arterias femorales; estenosis; informática; morfología; humanos

Summary

COMPLEMENTARY DIAGNOSTIC TECHNOLOGY FOR THE EVALUATION OF ARTERIAL RE-STENOSES

This paper studies the performance of blood flow of stenotic human adult femoral arteries with different grades of obstruction (obtained from autopsies and surgical amputations), using simulations produced by a computerized software based on the method of finite elements for Newtonian, homogeneous and incompressible fluids. Its application generated numerous maximal curves, subsequently joined in a single graphic of easy use. Besides evaluating the origin and impact of turbulences by analyzing the different variables involved in such anomalous conditions (i.e., pressure, velocity field and stress tensors), the results here reported may constitute a useful complementary diagnostic method for these stenoses when added to those currently employed.

Key words: femoral arteries; stenosis; informatics; morphology; humans

* Dirección postal: Santa Fe 3100, 2000 Rosario, SF. Correo electrónico: aedottavio@hotmail.com

Introducción

Los resultados inmediatos y tardíos evidenciados por las distintas técnicas de revascularización de las arterias femorales humanas no son homogéneos y comprueban recidivas en alrededor del 15% de los casos.¹⁻¹³

En las últimas décadas se analizaron en modelos teóricos y con simulaciones por métodos numéricos los efectos de distintos grados de estenosis sobre el flujo sanguíneo, y distintos autores comprobaron alteraciones distales del flujo laminar.^{6, 7, 14-17} Este flujo anómalo favorecería la destrucción y agregación de elementos sanguíneos y facilitaría la formación en ocasiones de nuevas lesiones endoarteriales que podrían actuar como concausas de nuevas obstrucciones.^{3, 18-20}

Por tanto la persistencia –después de las técnicas de revascularización– de sectores previamente afectados por la acción de los remolinos, podría coadyuvar a la aparición de recidivas. En consecuencia el conocimiento del efecto de la estenosis sobre el comportamiento del flujo y la longitud del vaso afectada por los remolinos constituye un dato a tener en cuenta.

De acuerdo con experiencias previas en el uso de duplicadores mecánicos de pulsos para el estudio del flujo laminar, incompresible, newtoniano y viscoso, y aprovechando el avance de las computadoras, se desarrolló un programa computado simulador que utiliza el método de los elementos finitos y adaptado a las características físicas de la sangre.^{15, 16, 19-23}

Con estos antecedentes aplicados al estudio del flujo sanguíneo de las arterias femorales humanas con distintos grados de estenosis se estableció el objetivo de esta investigación:

1. Detectar zonas potencialmente re-estenóticas que superen la longitud prevista obtenida por los métodos habituales (arteriografía, eco-doppler, angio-resonancia magnética con gadolinio,²⁴ etc.) a través de datos morfológicos provenientes de modelos reales, de anatomía patológica y otros originados en simulaciones informáticas complementarias.
2. Obtener un gráfico con una única curva de máxima que a partir de innumerables curvas de máxima derivadas del procesamiento informático indique la longitud exacta del alcance de los remolinos y que complementada con los métodos antedichos contribuya a completar el diagnóstico y posibilite disminuir el número de re-estenosis.

Material y Método

Para la confección del modelo matemático se utilizaron 14 segmentos de arterias femorales con variable grado de estenosis provenientes en 6 casos de autopsias y en 8 de amputaciones de hombres adultos (55 ± 5 años), fijados con formol, glicerina y alcohol y posteriormente disecados y divididos en dos hemi-arterias por un corte sagital. En toda la longitud de cada vaso se midieron, mediante un calibre y bajo lupa binocular Zeiss (de 6 a 40x), los diámetros y la luz cada 3 mm.

Todos los datos se incorporaron al programa computado simulador para efectuar la modelización y discretización de la geometría arterial lograda.^{16, 18-20, 22}

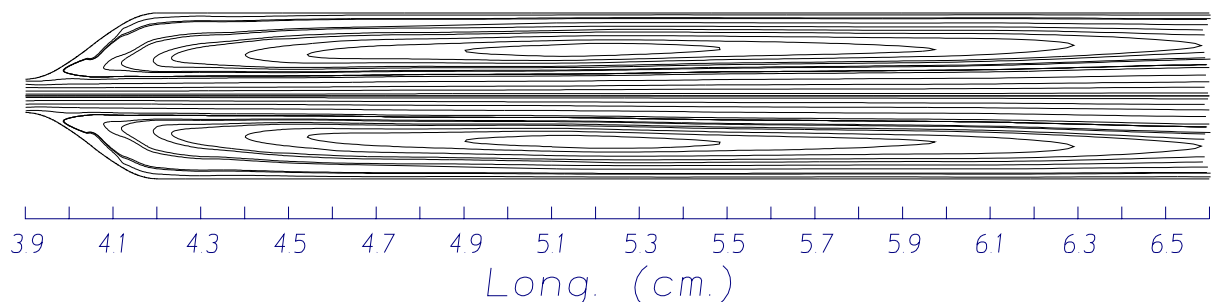
Esta combinación morfológico-informática posibilitó el estudio simulado partiendo de los modelos reales referidos y el hallazgo en el continuo de los campos de presión, de velocidades y de tensiones que, utilizados en la obtención de las líneas de corriente, permitieron visualizar e interpretar las condiciones del flujo problema. Además se realizó el análisis gráfico capaz de determinar en cualquier punto del flujo los valores de las variables involucradas, especialmente la formación y el alcance de los remolinos.

Siguiendo las normas internacionales este trabajo se ajustó a lo establecido por la Comisión de Bioética de la Facultad de Ciencias Médicas, Universidad Nacional de Rosario.

Resultados

En la Figura 1 se observan, en los sitios con remolinos, las grandes zonas de flujo "muerto" y la distancia en que el fluido comienza a normalizarse, donde no se detecta velocidad alguna opuesta al flujo principal. Nótese además que en la zona central el flujo adopta un perfil parabólico y el sentido de circulación se invierte a medida que, por la presencia del remolino, aumenta la distancia con respecto al eje de simetría del vaso.

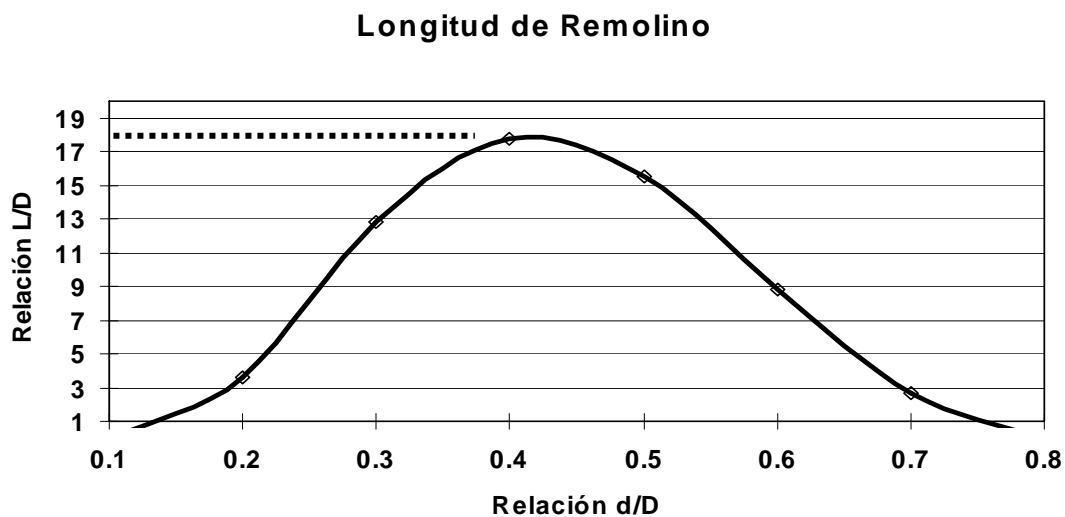
Figura 1: Líneas de corriente reveladas distalmente a una estenosis dada.



A fin de establecer de manera práctica la relación entre el grado de estenosis y la longitud necesaria para la normalización del flujo, se tabularon los resultados obtenidos desde 1 a 10 mm de diámetro vascular, con todos los grados de estenosis posibles para cada sección, para diferentes longitudes y para distintos números de Reynolds. Esto permitió que el programa computado completara con simulaciones los datos reales recogidos a partir de las arterias estudiadas y determinara la totalidad de la escala para la aplicación clínica.

Los gráficos de centenares de estenosis posibles traducidas en curvas de máxima susceptibles de representar la casi totalidad de los regímenes factibles, se resumieron en una única curva de máxima en cuya abscisa se representan los valores de la relación d/D y en la ordenada las distancias referidas al diámetro D ; con la relación L/D post-estenosis donde comienza a normalizarse el flujo (Figura 2).

Figura 2: Curva de máxima para el cálculo rápido del alcance de la alteración post-estenótica del flujo sanguíneo. La *ordenada* relaciona la longitud máxima con probabilidad de alteración del flujo (formación de remolinos), con el diámetro del vaso a estudiar. Los cm de longitud los da en relación al diámetro normal del vaso y en la medida que se desee (cm, mm, etc.). La *abscisa* recoge la relación entre el diámetro de la estenosis (d) y el diámetro de la luz del vaso (D).



Los resultados informáticos resultaron compatibles con los estudios anatomopatológicos. preliminares de cada una de las 14 arterias estudiadas, especialmente con las medidas $d/D < 0,4$ en el material proveniente de las 8 amputaciones.

Conclusiones

Es bien conocido que las estenosis originan graves perturbaciones del flujo que se manifiestan en la formación de remolinos que, de acuerdo a este estudio, alcanzan longitud superior a la prevista. En obstrucciones de 30% el flujo necesita para normalizarse una distancia aproximadamente equivalente a 18 veces el diámetro del vaso afectado, y en obstrucciones mayores tiende a convertirse hidrodinámicamente en ineficaz por falta de presión, aunque el perfil parabólico se recupere primero.

En consecuencia, la longitud del vaso comprometido distalmente a la estenosis es un dato útil para completar el diagnóstico y seleccionar la terapéutica.

Al respecto, las características del programa desarrollado no sólo posibilitan la obtención de este dato sino la de cualquier otra variable en cualquier punto del modelo mediante el estudio de las líneas de corriente resultantes. En igual sentido, el empleo de un único gráfico que incorpora datos derivados de otros métodos diagnósticos permite en cada caso conocer la longitud de manera precisa, y resulta útil para la selección de la terapéutica.

Aplicación del modelo

Determinar mediante otros métodos diagnósticos el diámetro del vaso y la longitud de la estenosis. A través de la relación d/D proyectar en el gráfico de la Fig. 2 el valor de la ordenada correspondiente, multiplicado por el diámetro del vaso. Se obtiene así la longitud de la patología que orienta hacia una terapéutica con menor riesgo teórico de recidiva.

En caso de vasos con estenosis múltiples y cercanas se estudia cada una y se efectúan los cálculos sobre la base de los valores de la ubicada más distalmente. Si la relación d/D se halla entre 0,4 y 0,15 la sección se considerará siempre como si el valor fuera 0,4 pues, prescindiendo de la caída de la curva, es posible la existencia de lesiones endoarteriales que necesiten esa conducta.

Cabe destacar que aunque este trabajo se realizó en hombres adultos, sus resultados son extrapolables a mujeres en distintas edades y con distintas variables sanguíneas y parietales vasculares, ya que el programa se vale de la ley de semejanza con el número de Reynolds para las variables intervinientes. Además debe señalarse que estos resultados obtenidos en arterias femorales son aplicables a cualquier arteria de más de 1mm de diámetro luminal.

Por último, la compatibilidad de los resultados informáticos con los estudios anatomopatológicos preliminares corroborarían la posible persistencia de segmentos arteriales ya afectados, origen de recidivas estenóticas.

Los datos aportados por esta investigación brindan la posibilidad de su utilización en futuros estudios clínicos, como complemento de los métodos diagnósticos habituales para ampliar sus posibilidades y colaborar en establecer terapéuticas pasibles de reducir el número de re-estenosis.

(Recibido: agosto de 2003. Aceptado: diciembre de 2003)

Referencias

1. Ahn SS, Reger VA, Kaiura TT: *Endovascular femoropopliteal bypass in human cadaver and animal studies*. Ann Vascular Surg 9:28-36, 1995.
2. Klinkert P, Schepers A, Burger DHC, Van Bockel JH, y col: *Vein versus polytetrafluoroethylene in above-knee femoropopliteal bypass grafting: Five-year results of a randomized controlled trial*. J Vasc Surg 37:35-40, 2003.
3. May P: *Wavelet analysis of blood flow singularities by using ultrasound data*. Ann Res Briefs 349-362, 2002.
4. Jackson MR, Belott TP, Dickason T, y col: *The consequences of a failed femoropopliteal bypass grafting: comparison of saphenous vein and polytetrafluoroethylene grafts*. J Vasc Surg 32:498-504, 2000.
5. Melliere D, Cron J, Allaire E, y col: *Indications and benefits of simultaneous balloon angioplasty and open surgery during elective lower limb revascularization*. Cardiovasc Surg 7:242-6, 1999.
6. Taylor PR, Wolf HJ: *Graft stenosis*. J Surg 77:1125-8, 1990.
7. Testini M, Todisco C, Greco L, y col: *Femoro-femoral graft after unilateral obstruction of aortho-bifemoral bypass*. Minerva Cardioangiol 46:15-9, 1998.
8. Casselman F, Van Elst F, Spoelstra H: *Femoropopliteal bypass*. Acta Chir Belg 1:23-6, 1997.
9. Haimovich H: *Patterns of arteriosclerotic lesions of the lower extremity*. Arch Surg 10:895-918, 1967.
10. Disselhoh B, Buth J, Jabinovicz J: *Early detection of stenosis of femorodistal grafts*. Eur J Vasc Surg 3:43-8, 1989.
11. Katsamouris AN, Giannoukas AD, Alamanos E, y col: *Experience with new techniques for extra-anatomic arterial reconstruction of the lower limb*. Ann Vasc Surg 14:444-9, 2000.
12. Patel KR, Rabinowitz D, Hastings B, Dardik H: *Femorocaval bypass with femoral crossover bypass for iliofemoral and caval occlusion*. J Vasc Surg 26:989-93, 1997.
13. Walls DB, Powell RJ, Stujel TA, y col: *Superficial femoral arterystenoses: characteristics of progressing lesions*. J Vasc Surg 25:512-3, 1997.

14. Beckers P, Idelsohn SR: *A conforming finite element for the analysis of viscous incompressible fluid flow*. Proceedings of the 2nd International Conference on Finite Elements 2:437-81, 1980.
15. Leone JM, Gresho PM: *Finite element simulations of steady, two-dimensional, viscous, incompressible flow over a step*. J Comp Phys 41:167-91, 1981.
16. Mattara M, Ponso RR: *Determinación de la variación del flujo en estenosis arteriales utilizando métodos numéricos*. Sociedad Argentina de Bioingeniería (SABI):25-9, 1990.
17. Miguel JC, Sosa S: *Circulación suplementaria de los miembros inferiores: correlación anátomo-patológica*. Comunicación al XXXIII Congreso de la Asociación Rioplatense de Anatomía, Corrientes (Argentina), 1996.
18. Miguel JC, D'Ottavio AE, Mattara M, Ponso RR: *Estudio computado del flujo ante distintos grados de obstrucciones de arterias femorales*. Comunicación al XXXV Congreso de la Asociación Rioplatense de Anatomía, Rosario (Argentina), 1998
19. Miguel JC, Mattara M, Ponso RR, D'Ottavio AE: *Simulated computational analysis for poststenotic blood flow applied to real models*. Biocell 24:67, 2000.
20. Miguel JC, Mattara M, Ponso RR, y col: *Graphics on the poststenotic flow in human adult femoral arteries*. Biocell 26:141, 2002.
21. Gresho PM, Lee RL, Sani RL: *On the time-dependent solution of the incompressible Navier-Stokes equation in two and three dimensions*. En: "Recent Advances in Numerical Methods in Fluids". Pineridge Press; Swansea, 1980.
22. Idelsohn SR, Costa LE, Ponso RR: *A comparative computational study of blood flow through prosthetic heart valves using the finite element method*. J Biomech 18:97-115, 1985.
23. Sani RL, Gresho PM, Lee RL, y col: *The cause and cure of the spurious pressures generated by certain FEM*. Int J Num Meth Fluids 1:171-204, 1981.
24. Solernó R, Cherro A, Ferrari P, y col: *Angio-resonancia magnética con gadolinio como método diagnóstico de vasculopatía de miembros inferiores (resumen)*. Arq Bras Cardiol 81(Supl 1):53, 2003.

