



ORIGINAL

Resultados preliminares en el análisis de elementos finitos de aneurismas de aorta abdominal en rango no quirúrgico



A. Duque Santos*, A. Reyes Valdivia, M.A. Romero Lozano, E. Aracil Sanus, J. Ocaña Guaita y C. Gandarias Zúñiga

Servicio Angiología y Cirugía Vascular, Hospital Ramón y Cajal, Madrid, España

Recibido el 4 de diciembre de 2017; aceptado el 9 de enero de 2018

Disponible en Internet el 15 de febrero de 2018

PALABRAS CLAVE

Aneurisma de aorta abdominal;
Aneurisma pequeño;
Rotura;
Análisis de elementos finitos;
Estrés de pared

Resumen

Introducción: El diagnóstico y manejo del aneurisma de aorta abdominal depende del diámetro máximo de la aorta, cuyo crecimiento es impredecible. Nuestro objetivo fue comparar los resultados de las variables biomecánicas, obtenidas mediante el análisis de elementos finitos, entre 2 grupos con aneurismas pequeños (grupo I 40-49 mm, grupo II 50-54 mm).

Métodos: Realizamos un estudio prospectivo y monocéntrico con 23 pacientes con aneurisma de aorta abdominal pequeño (grupo I N = 14; grupo II N = 9), a los que se les realizó una angio-TC toracoabdominopélvica. Se midió y calculó el diámetro máximo, estrés pico de pared (PWR), riesgo de rotura pico de pared (PWRI), diámetro equivalente de riesgo de ruptura (RRED) y volumen del aneurisma y trombo mediante el análisis de elemento finitos, así como la diferencia entre el diámetro máximo y RRED (variabilidad).

Resultados: Hemos observado un mayor PWS, PWRR y RRED en el grupo II respecto al grupo I. Además, 5 de los pacientes (21,74%) mostraron una variación positiva (>0,5 mm de diferencia) y 2 de ellos (8,70%) obtuvieron un PWRR>0,5 asociado a un mayor riesgo de rotura del aneurisma.

Conclusión: PWS y PWRR son mayores en el grupo II, posiblemente con relación a un mayor tamaño del aneurisma. Son necesarios más estudios con mayor tamaño muestral, antes de utilizar este *software* para las decisiones clínicas.

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

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: africaduque@hotmail.com (A. Duque Santos).

KEYWORDS

Abdominal aortic aneurysm;
Small aneurysm;
Rupture;
Finite element analysis;
Wall stress

Preliminary results of finite element analysis for small abdominal aortic aneurysms**Abstract**

Introduction: The diagnosis and management of abdominal aortic aneurysms currently relies on the maximal aortic diameter, which grows in an unpredictable manner. The aim of this study was to compare the results of the biomechanical variables using finite elements analysis between the 2 groups of small aneurysms (group I 40-49 mm, group II 50-54 mm).

Methods: A total of 23 patients with abdominal aortic aneurysm (group I N=14, group II N=9) who had undergone a thoraco-abdominal angio computed tomography in this hospital were prospectively identified. Abdominal aortic aneurysms diameter, peak wall rupture (PWR), PWR Index, Rupture Risk Equivalent Diameter (RRED) abdominal aortic aneurysms and thrombus volume were measured and calculated using finite element analysis software. The variability between maximum abdominal aortic aneurysms diameter and RRED was also determined.

Results: An increased PWS, PWRR, and RRED, was observed in group II. Moreover, 5 (21.74%) patients had a positive variability (>0.5 mm), and 2 of them (8.70%) had a PWRR >0.5, which is associated with a higher aneurysm rupture risk.

Conclusion: PWR and PWRR are elevated in group II, perhaps secondary to a larger abdominal aortic aneurysms diameter. Further studies are required before using this software in clinical decisions.

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

Introducción

El aneurisma de aorta abdominal (AAA) es una enfermedad local e irreversible, que afecta al 4-7% de la población mayor de 65 años¹. La importancia de su detección temprana radica en evitar el riesgo de sus complicaciones, como la de rotura del AAA, la cual está asociada a mortalidad de hasta el 70% en países desarrollados². Las guías clínicas internacionales actuales establecen el tratamientos de los AAA a partir de 55 mm de diámetro máximo o si hay crecimiento rápido durante el seguimiento^{1,2}. En la práctica clínica, los pacientes con AAA menores de 55 mm están en seguimiento clínico y ecográfico regular. Sin embargo, algunos ensayos clínicos han demostrado que entre un 10 y un 24% de los AAA rotos tienen un diámetro menor de 55 mm en el momento de la rotura³. Por otro lado, también se han publicado estudios que muestran AAA con diámetro mucho mayores de 55 mm que nunca llegan a romperse a lo largo del seguimiento⁴.

Existen estudios publicados que enfocan su área de interés en la valoración individual y morfológica de cada aneurisma, con información individualizada para cada uno de ellos^{5,6}. Entre los métodos que se utilizan con este fin, contamos con el análisis por elementos finitos (AEF). Esta herramienta es un *software* que, a partir de las imágenes de la angio-TC de cada aneurisma, realiza un análisis específico de la estructura y composición del aneurisma abdominal, y calcula el riesgo biomecánico de rotura de dicho aneurisma. Se han publicado algunos artículos que señalan que los parámetros biomecánicos estudiados están aumentados en pacientes con AAA rotos o complicados respecto al grupo de AAA asintomáticos^{2,7}.

A continuación, presentamos un estudio de cohortes que compara los resultados de las diferentes variables biomecánicas entre el grupo con AAA entre 40 y 49 mm de diámetro por TAC y el grupo con AAA \geq 50 mm.

Métodos

Hemos realizado un estudio de cohortes monocéntrico y prospectivo, de los pacientes portadores de AAA de pequeño tamaño (<55 mm) en seguimiento en nuestro servicio entre septiembre del 2016 y septiembre del 2017.

El criterio de inclusión en el estudio fue el de pacientes con diagnóstico ecográfico de AAA entre 40 y 50 mm de diámetro máximo. Describimos 2 tipos de criterios de exclusión:

a) Generales:

- Aneurisma de sector aorto-ilíaco con tratamiento previo.
- Paciente con enfermedad oncológica activa en el momento del estudio.
- Enfermedad renal de estadios III-IV sin tratamiento de soporte, que contraindique la realización de estudios con contraste.

b) Relativos al *software*:

- Aneurismas sintomáticos o de crecimiento rápido.
- Aneurismas inflamatorios.
- Pacientes con enfermedades del tejido conectivo.

Definiciones:

- *Peak wall stress*/estrés pico de pared (PWS): representa el estrés máximo en la pared aórtica. Depende de la geometría del aneurisma y de la presión arterial del paciente. Se expresa en kilopascales (kpa).
- *Peak wall rupture risk*/riesgo de rotura pico de pared (PWRR): representa el ratio entre el máximo estrés y fuerza de la pared (PWS/fuerza de la pared). Para su

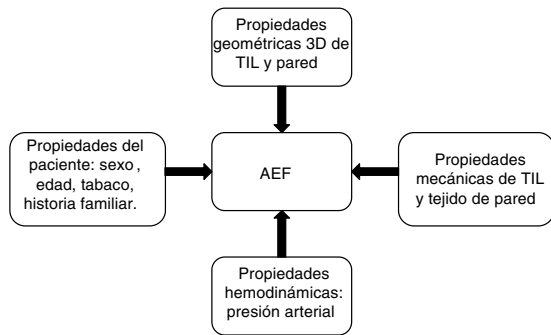


Figura 1 Variables que valorar para realizar el análisis de elementos finitos (AEF).

cálculo se añade información sobre el sexo y el trombo intraluminal del AAA.

- *Rupture risk equivalent diameter*/diámetro equivalente de riesgo de rotura (RRED): diámetro extrapolado al incluir el PWRR en una curva poblacional de pacientes con AAA (basado en los resultados de importantes ensayos clínicos como *Small United Kingdom Aneurysm Trial*).

La **figura 1** representa la interacción de las diversas variables estudiadas en el AEF. La variabilidad inter- e intra-observador de los diversos parámetros analizados por el *software* ha sido previamente validada.

A aquellos pacientes que cumplieron los criterios de inclusión y exclusión del presente estudio se les realizó una anamnesis general y vascular detallada, analítica sanguínea para control de la función renal y se solicitó una angio-TC toracoabdominopélvica según el protocolo diagnóstico de nuestro centro. Dichos estudios anonimizados fueron enviados para análisis con el *software* A4clinics-Research Edition™ (VASCOPS®, GmbH, Graz, Austria). Todos los pacientes firmaron un consentimiento informado con el que aceptaban su inclusión en el estudio.

Se crearon 2 grupos de estudio: el grupo I, compuesto por pacientes en el rango de 40-49 mm de diámetro por TAC y el grupo II, compuesto por pacientes con diámetro ≥ 50 mm.

El objetivo principal del estudio fue describir la existencia de diferencias entre ambos grupos respecto de las variables en estudio (PWS, PWRR y RRED) que analiza el *software* A4clinics.

Los objetivos secundarios fueron el análisis comparativo entre ambos grupos del volumen total del aneurisma (VTA), volumen del trombo (VTr) y relación VTA/VTr y del porcentaje de pacientes con una variación (RRED-Diámetro AAA en TC) de 5 mm, tanto positiva como negativa.

Estadística

Se ha realizado exclusivamente un estudio descriptivo de los datos obtenidos, al tratarse de un estudio preliminar con un escaso número de pacientes en cada grupo.

Resultados

La **figura 2** muestra el diagrama de los pacientes incluidos y excluidos en el estudio. Se realizó estudio biomecánico de 25 pacientes, de los cuales fueron descartados 2 por

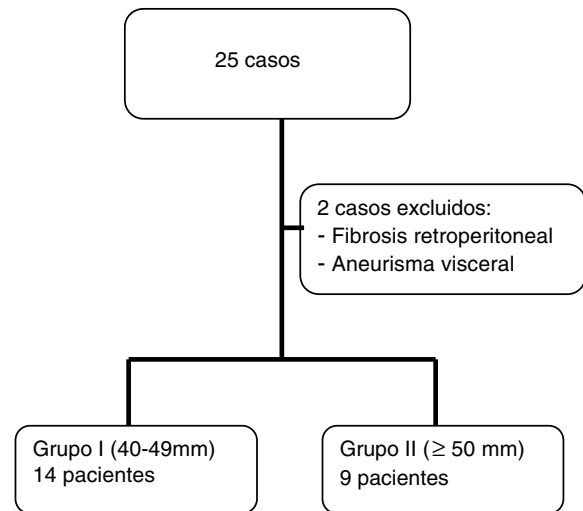


Figura 2 Gráfico-resumen del número de pacientes incluidos y excluidos y su distribución en los grupos en estudio, según el diámetro máximo del aneurisma.

presentar criterios de exclusión en la TC. El número total de pacientes incluidos en el análisis fue de 23. Se incluyeron 14 pacientes (60,87%) en el grupo I (diámetro entre 40 y 49 mm) y los 9 pacientes restantes (39,13%), en el grupo II (diámetro ≥ 50 mm).

La **tabla 1** resume los resultados de cada una de las variables analizadas en el presente estudio, en cada uno de los grupos.

La **tabla 2** describe de forma individual a aquellos pacientes con una variación mayor de 5 mm entre el diámetro máximo en la TC y el RRED ($n = 12$; 52,17%). Se puede apreciar con sombreado los 5 (21,74%) pacientes con variabilidad positiva (más de 5 mm de diferencia entre la TC y RRED, a favor del RRED); 3 de ellos pertenecientes al grupo I y los 2 restantes en el grupo II. De estos 5 individuos, solamente los 2 pacientes (8,70%) pertenecientes al grupo II tenían el PWRR $> 0,5$ y por lo tanto, un riesgo de rotura de aneurisma pequeño significativamente aumentado. En los 7 pacientes restantes (30,43%), se objetivó una variación negativa (más de 5 mm de diferencia entre la TC y RRED, a favor de la TC), 3 de ellos pertenecientes al grupo I y 4 al grupo II.

La **figura 3** muestra una imagen de un paciente con riesgo de rotura incrementado según el *software*. En comparación, la **figura 4** muestra el análisis de elementos finitos de un paciente excluido de este estudio por tener fibrosis retroperitoneal asociada al aneurisma.

Discusión

El presente estudio muestra las diferencias en los parámetros resultado del AEF, enfocado principalmente en la evaluación del PWS, PWRR y RRED en aneurismas de pequeño tamaño o rango no quirúrgico. Es, a nuestro entender, el primer reporte de aneurismas en este rango de tamaño que muestra las diferencias entre el diámetro máximo en TC y el RRED obtenido mediante el análisis del estrés biomecánico, utilizando el *software* previamente descrito.

La fiabilidad de las decisiones clínicas para el tratamiento del AAA en un único parámetro universal, como

Tabla 1 Resultados de las variables en estudio en cada uno de los grupos y el total de la cohorte

	Grupo I n = 14 (60,87%)	Grupo II n = 9 (39,13%)	Total (n = 23)
Diám. AAA (mm)	46,85 ± 2,11	52,74 ± 2,17	49,16 ± 3,61
PWS (kpa)	169,71 ± 37,8	189,90 ± 24,53	177,61 ± 34,11
PWRR	0,38 ± 0,08	0,44 ± 0,10	0,40 ± 0,09
RRED (mm)	45,60 ± 7,89	51,51 ± 9,16	47,91 ± 8,71
Vol. TIL (cm ³)	37,97 ± 21,34	43,14 ± 24,18	40,00 ± 22,10
Vol. AAA (cm ³)	107,91 ± 37,90	121,76 ± 23,97	113,33 ± 33,25
Ratio TIL/AAA	0,35 ± 0,16	0,34 ± 0,16	0,35 ± 0,16

Diám. AAA: diámetro máximo del aneurisma de aorta abdominal; kpa: kilopascales; PWRR: riesgo de rotura pico de pared; PWS: estrés pico de pared; RRED: diámetro equivalente de riesgo de rotura; Vol. AAA: volumen del aneurisma de aorta abdominal; Vol. TIL: volumen de trombo intraluminal.

Tabla 2 Descripción individual de pacientes con variación > 5 mm entre diámetro TAC y RRED

Pac.	Diám. AAA (mm)	PWS (kpa)	PWRR	RRED	Δ (mm)	Vol. TIL (cm ³)	Vol. AAA (cm ³)	Ratio TIL/AAA
Grupo I								
1	49	228	0,47	55	6	83	218	0,38
2	46	87	0,16	24	-22	39	64	0,61
3	48	152	0,34	42	-6	48	110	0,44
4	46,20	217,70	0,47	54,70	8,50	7,10	115	0,06
5	48,20	158,30	0,33	41,60	-6,60	41,40	104,10	0,40
6	47,70	209	0,45	52,90	5,20	23,40	127,40	0,18
Grupo II								
7	55,3	188,10	0,39	47	-8,30	19,30	120,10	0,16
8	50	191	0,36	44,60	-5,40	6,40	84,20	0,08
9	52	166,50	0,35	43,30	-8,70	37,20	129,60	0,29
10	54,3	166,60	0,55 ^a	62	7,70	80,50	158,30	0,51
11	53,7	223,30	0,65 ^a	69,90	16,20	53,10	120,60	0,44
12	51,1	168,60	0,37	45,30	-5,80	36,10	96,50	0,37

Δ: incremento (RRED-Diám AAA); Diám. AAA: diámetro máximo del aneurisma de aorta abdominal; kpa: kilopascales; Pac: paciente; PWRR: riesgo de rotura pico de pared; PWS: estrés pico de pared; RRED: diámetro equivalente de riesgo de rotura; Vol. AAA: volumen de aneurisma de aorta abdominal; Vol. TIL: volumen de trombo intraluminal.

Sombreado: pacientes con variación positiva.

^a Pacientes con PWRR > 0,50 y RRED en rango quirúrgico.

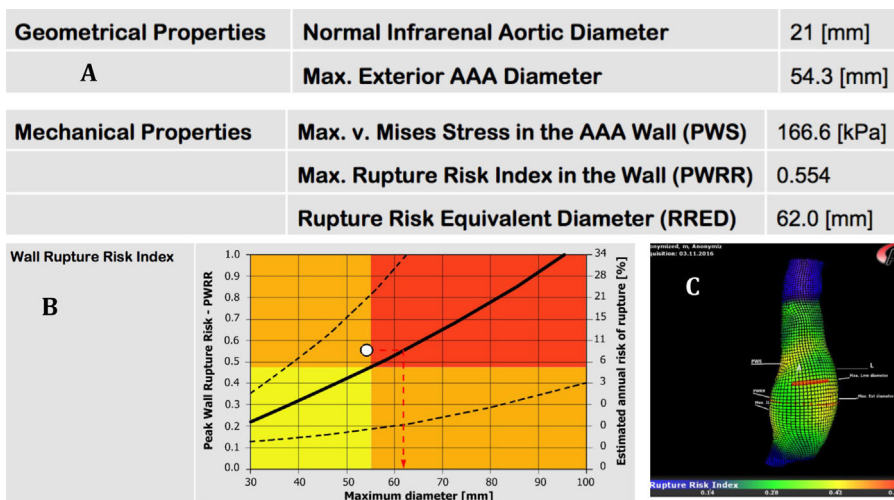


Figura 3 Paciente con riesgo de rotura incrementado según el software A4clinics. A) Propiedades geométricas y mecánicas del aneurisma en estudio tras el análisis de elementos finitos. B) Gráfico que representa del aumento del PWRR (riesgo de rotura pico de pared) y RRED (diámetro equivalente de riesgo de rotura). C) Reconstrucción tridimensional del aneurisma con escala de grises.

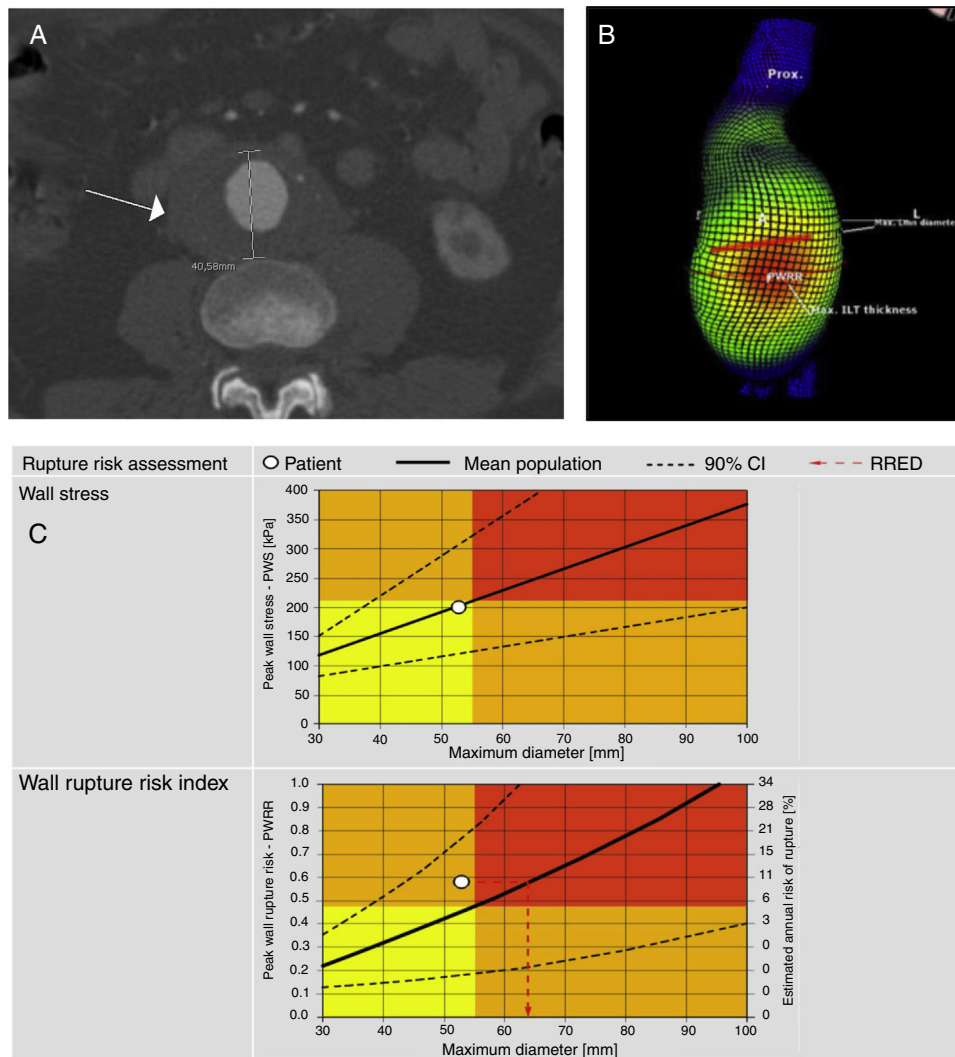


Figura 4 Paciente excluido del estudio con fibrosis retroperitoneal. A) Imagen axial de angio-TC que muestra AAA con diámetro máximo de 40,5 mm y fibrosis retroperitoneal (FR) asociada (flecha). B) Reconstrucción tridimensional con escala de grises y PWRR (riesgo de rotura pico de pared) en rojo, falsamente elevado por la FR en zona central PWRR. C) Gráfico de análisis de elementos finitos con representación del PWRR y RRED (diámetro equivalente de riesgo de rotura), falsamente elevado por la FR. Figura disponible a color en la versión web del artículo.

es el diámetro máximo aórtico, se encuentra en estudio en la actualidad. Fillinger et al. reportaron en su estudio el análisis de las curvas ROC para el PWS y el diámetro del AAA, y encontraron que el PWS tenía mejor sensibilidad y especificidad⁸. La asociación entre el incremento del PWS y la rotura aórtica está establecida por múltiples publicaciones⁹⁻¹¹, aunque la metodología de los reportes en ocasiones concluye resultados mixtos y, en algunos casos, confusos^{7,12}.

Inicialmente, se estableció el valor de PWRR > 1,0 como indicador de riesgo de rotura¹¹. Sin embargo, estudios recientes creen conveniente utilizar un valor mucho menor (PWRR > 0,50)^{2,7}. Erhart et al. demostraron que todos los pacientes con diagnóstico de rotura de AAA tenían un PWRR > 0,50, así como el 87% de los aneurismas sintomáticos respecto al grupo de los AAA asintomáticos⁷. La literatura describe la prevalencia de rotura de AAA en pacientes con diámetros < 5,5 cm entre el 10 y el 24%^{3,4}: estos pacientes

son objeto de estudio debido a las importantes consecuencias en términos de morbimortalidad.

Larsson et al. intentaron relacionar el estrés de la pared aneurismática con el género, sin encontrar diferencias significativas entre el PWS y PWRR entre hombres y mujeres, aunque sí una tendencia a mayor PWRR en mujeres¹³.

Encontramos en la literatura varios estudios que describen un aumento del RRED en pacientes con aneurismas rotos, usando el AEF. Sin embargo, algunos estudios han mostrado un posible sesgo en los resultados de los parámetros biomecánicos, debido a que los grupos no eran comparables en cuanto al tamaño de los aneurismas⁷. Por otro lado, Erhart et al. reportan un incremento significativo del RRED en pacientes con AAA roto analizando las TAC prerrotura con relación a un grupo control con AAA intacto, con diámetros equivalentes entre ambos grupos. Este estudio elimina, por tanto, el posible sesgo previamente mencionado y

muestra la utilidad del RRED para la estratificación del riesgo de rotura de pacientes con AAA asintomático de pequeño tamaño².

Para realizar un cálculo correcto del estrés de la pared aórtica con el *software* A4clinics, es necesario analizar información de factores como: el trombo intraluminal, el engrosamiento de la pared, la presión arterial..., entre los principales. Con relación al trombo intraluminal existe información aún controvertida en la bibliografía. Cappele et al. proponen en su estudio que cuando la relación entre el volumen del trombo y el volumen del aneurisma es mayor a 0,45 existe un riesgo de rotura incrementado¹⁴. Se ha descrito que la inclusión del trombo intraluminal en el AEF, al comparar un grupo de AAA rotos con AAA asintomáticos, mejora de forma significativa la predictibilidad de rotura¹¹.

Existen otros marcadores biomecánicos estudiados en esta entidad. Sonesson et al. estudiaron la rigidez de la pared aórtica en grupos de pacientes con AAA rotos e intactos, sin encontrar diferencias significativas¹⁵. Ruegg et al. reportaron un análisis de AAA de crecimiento rápido y un grupo de crecimiento lento usando una técnica no invasiva de medición de rigidez arterial llamada índice de aumento (Alx): concluyeron que no se encontraron diferencias a nivel hemodinámico entre ambos grupos¹⁶.

El análisis del estrés de la pared mediante la dinámica de fluidos computacionales y la interacción de la estructura de fluidos son técnicas de reciente estudio. Precisan de un modelo tridimensional similar al AEF. Boyd et al. encontraron, usando la dinámica de fluidos computacionales, que la zona de estrés de cizallamiento de la pared no correlacionaba con el sitio de rotura¹⁷. Xenos et al. compararon el PWS y el PWRR en 8 pacientes con AAA intactos y 8 pacientes con AAA rotos. El resultado coincide con aquellos descritos usando el AEF, al obtener los AAA rotos valores más elevados de PWS y coincidir con el sitio de rotura¹⁸.

En el análisis de nuestros resultados, las diferencias encontradas entre ambos grupos en los valores de PWS, PWRR y RRED son esperables, debido a las diferencias conocidas en el tamaño del aneurisma en ambos grupos. Queremos destacar los 5 pacientes (21,74%) con variación positiva (incremento mayor de 5 mm en el RRED respecto del diámetro máximo del TAC), de los cuales 2 (8,70%) obtuvieron un PWRR > 0,50 y, por lo tanto, tendrían asociado un mayor riesgo de rotura. Por el contrario, obtuvimos 7 pacientes (30,43%) con variación negativa; uno de ellos mostró la máxima variación negativa: 22 mm. Este hallazgo creemos que es debido a la disposición geométrica del trombo (función protectora) y a la escasa extensión longitudinal del sector dilatado.

Cabe preguntarse si este *software* es de utilidad en aneurismas saculares (disposiciones irregulares y muy focales). Aunque no se encuentra como criterio de exclusión anatómico, se menciona que el *software* está diseñado para estudio exclusivo de aneurismas abdominales infrarrenales de morfología fusiforme.

La extrapolación de los resultados a las decisiones clínicas es el hito final de estos estudios. Creemos, sin embargo, que futuros estudios con mayor tamaño muestral deben ser realizados antes de incluirlo como una herramienta de apoyo diagnóstico.

Limitaciones

La principal limitación del estudio es el número reducido de pacientes incluidos en cada grupo, aunque la mayoría de los reportes en la literatura aportan resultados con tamaños muestrales pequeños. Además, esto ha impedido la realización de un análisis estadístico de los datos obtenidos.

Conclusiones

El presente estudio aporta información sobre el AEF de los aneurismas considerados de tamaño pequeño para intervención quirúrgica y reporta mayor PWS y PWRR en el grupo de aneurismas de mayor tamaño (grupo II). El hallazgo de 5 pacientes (21,74%) con variación positiva > 5 mm del RRED es relevante en cuanto al posible mayor riesgo de rotura asociado a estos aneurismas.

Aún es necesaria la realización de estudios con mayor tamaño muestral, antes de utilizar este *software* para las decisiones clínicas.

Conflicto de intereses

No existe conflicto de intereses.

Bibliografía

- Moll FM, Powell JT, Fraedrich G, Verzini F, Haulon S, Waltham M, et al. Management of abdominal aortic aneurysms clinical practice guidelines of the European Society for Vascular Surgery. *Eur J Vasc Endovasc Surg.* 2011;41:S1-58.
- Erhart P, Roy J, de Vries JP, Lindquist M, Grond-Ginsbach C, Hyhlik-Durr A, et al. Prediction of rupture sites in abdominal aortic aneurysm after finite element analysis. *J Endovasc Ther.* 2015;1-6.
- Nicholls SC, Gardner JB, Meissner MH, Johansen HK. Rupture in small abdominal aortic aneurysm. *J Vasc Surg.* 1998;28:884-8.
- Kubicek L, Sataffa R, Vlachovsky R, Polzer S, Kruzliak P. Incidence of small abdominal aortic aneurysm rupture, impact of comorbidities and our experience with rupture risk prediction base on wall stress assessment. *Cor Vasa.* 2015;57:e127-32.
- Soto Carricas B, Escudero Rodriguez JR. Análisis biomecánico con análisis por elementos finitos del aneurisma de aorta abdominal, una herramienta prometedora para la evaluación del riesgo de rotura. *Angiología.* 2015;67:237-9.
- Lindquist M, Hultgren R, Gasser TC, Roy J. Volume growth of abdominal aortic aneurysm correlates with baseline volumen and increasing finite element analysis-derived rotura risk. *J Vasc Surg.* 2016;63:1434-42.
- Erhart P, Hyhlik-Durr A, Geisbusch P, Kotelis D, Muller-Eschner M, Gasse TC, et al. Finite element analysis in asymptomatic, symptomatic, and ruptured abdominal aortic aneurysms: In search of new rupture risk predictors. *Eur J Vasc Endovasc Surg.* 2015;49:239-45.
- Fillinger MF, Marra SP, Raghavan ML, Kennedy FE. Prediction of rupture risk in abdominal aortic aneurysm during observation: Wall stress versus diameter. *J Vasc Surg.* 2003;37:724-32.
- Gasser TC. Biomechanical rupture risk assessment. A consistent and objective decision-making tool for abdominal aortic aneurysm patients. *Aorta.* 2016;2:42-60.
- Khosla S, Morris DR, Moxon JV, Walker PJ, Gasser TC, Golledge. Meta-analysis of peak Wall stress in ruptured, symptomatic and intact abdominal aortic aneurysm. *BJS.* 2014;101:1350-7.

11. Gasser TC, Auer M, Labruto F, Swedenborg J, Roy J. Biomechanical rotura risk assessment of abdominal aortic aneurysm: Model complexity versus predictability of finite element simulations. *Eur J Vasc Endovasc Surg.* 2010;40:176–85.
12. Indrakusuma R, Jalalzadeh H, Planken RN, Marquering HA, Legemate DA, Koelemay MJ, et al. Biomechanical imaging markers as predictors of abdominal aortic aneurysm growth or rotura: A systematic review. *Eur J Vasc Endovasc Surg.* 2016;52:475–86.
13. Larsson E, Labruto F, Gasser C, Swedenborg J, Hulgren R. Analysis of aortic wall stress and rotura risk in patients with abdominal aortic aneurysm with a gender perspective. *J Vasc Surg.* 2011;54:295–9.
14. Cappeller WA, Engelmann H, Blechschmidt S, Wild M, Lauterjung L. Possible objectification of a critical maximum diameter for elective surgery in abdominal aortic aneurysms based on one- and three-dimensional ratios. *J Cardiovasc Surg.* 1997;38:623–8.
15. Sonesson B, Sandgren T, Lanne T. Abdominal aortic aneurysm wall mechanics and their relation to risk of rupture. *Eur J Vasc Endovasc Surg.* 1999;18:487–93.
16. Ruegg G, Masson R, Hardinge M, Perkins J, Husmann M, Erich W. Augmentation index and central aortic blood pressure in patients with abdominal aortic aneurysm. *J Hypertens.* 2010;28:2252–7.
17. Boyd AJ, Kuhn DCS, Lozowy RJ, Kulbisky GP. Low wall shear stress predominates at sites of abdominal aortic aneurysm rupture. *J Vasc Surg.* 2016;63:1613–9.
18. Xenos M, Labropoulos N, Rambhia S, Alemu Y, Einav S, Tasiopoulos A, et al. Progression of abdominal aortic aneurysm towards rupture – refining clinical risk assessment using a fully coupled fluid-structure interaction method. *Ann Biomed Eng.* 2015;43:139–53.