

Estudio de tensiones generadas en férulas de yeso para fracturas de Colles mediante ensayos mecánicos y elementos finitos

MT Carrascal Morillo⁽¹⁾, A. Alonso López⁽¹⁾, I. Elbouyafrouri Cirauqui⁽¹⁾, AD. Delgado Martínez⁽²⁾,
A. Espejo Reina⁽²⁾

(1) Dpto. de Ingeniería Mecánica. UNED
mcarrascal@ind.uned.es

(2) Dpto. de Cirugía Ortopédica. Universidad del Jaén

Plaster cast, finite element, bending test, CT

Las fracturas de muñeca suponen una lesión de frecuencia considerable, principalmente en pacientes de edad avanzada. El tratamiento más habitual es el conservador, mediante reducción bajo anestesia local e inmovilización con vendas de yeso.

Usando como modelo similar al humano un brazo de maniquí ortopédico modificado específicamente para este estudio, se realizaron 10 prototipos de vendajes de yeso basados en dos técnicas de vendaje para fracturas de muñeca (5 prototipos con cada técnica), llamados prototipos F y prototipos C.

Los vendajes de yeso se sometieron a ensayos a flexión a tres puntos a una velocidad de 10 mm/min y a un estudio con tomografía computerizada (TC) a partir de la cual poder crear un modelo 3D para su posterior análisis por elementos finitos. El tipo de análisis realizado es estático no lineal debido al empleo de contactos para simular los tres puntos de apoyo.

De los resultados obtenidos en los ensayos, los vendajes de yeso con férulas de tipo F muestran una resistencia y una flecha de rotura mayor que las vendas de yeso de tipo C. Los resultados de la simulaciones concuerdan con los resultados de los ensayos. El test estadístico empleado en los ensayos fue el de Mann-Whitney con un nivel de significación estadística de $\alpha=0,05$.

1. INTRODUCCIÓN

En la extremidad distal del radio se localizan una sexta parte de las fracturas de todo el cuerpo; un 90% de ellas se corresponde con las fracturas de Colles [1]. Estas se producen principalmente cuando se extiende la mano para amortiguar la fuerza de caída. Son fracturas del hueso del radio justo por encima de la muñeca y se producen principalmente a flexión. El tratamiento más utilizado es el tratamiento conservador, es decir la inmovilización sin necesidad de cirugía, sugiriendo estudios recientes que con este tratamiento se obtienen resultados clínicos similares a la cirugía en pacientes mayores de 60 años [2,6]. Aunque se han desarrollado nuevos materiales [7,13], las vendas de yeso sigue siendo la forma más frecuente de inmovilización [2,14].

Aunque el yeso como material es isótropo, el vendaje de yeso le confiere una estructura con comportamiento anisótropo. Existen diferentes formas de colocar el vendaje para darle al conjunto mayor resistencia [15,17] (vendas de yeso largas frente a cortas [15], vendas de doble espesor frente a vendas de simple espesor reforzadas [16], vendas con simples cantos de refuerzos [17]) pero no hay un método excelente para considerarlo superior a otro.

La práctica habitual de este equipo de investigación consiste en aplicar un yeso circular cerrado a lo largo del brazo adaptado a su anatomía, si la reducción de la fractura no necesita cirugía, y si es necesaria la reducción de la fractura o se espera una gran inflamación, se aplica un molde de escayola circunferencial abierto. Aunque la realidad es

que un porcentaje importante de los vendajes de yeso no duran el tiempo de consolidación de las fracturas y hay que volver a reponerlas, por eso este estudio.

De otro modo y con el fin de conocer cuál de los prototipos de vendajes era más resistente se ensayaron a flexión a tres puntos porque esta configuración es una técnica estándar para conocer su resistencia y sus propiedades materiales necesarias para las simulaciones.

También se les realizó una tomografía computerizada (TC) que da una información mas precisa sobre la estructura y las propiedades geométricas de los prototipos

Se realizaron modelizaciones para comprobar si éstas se ajustaban a los ensayos experimentales y de esta forma testar la capacidad de las técnicas virtuales en los modelos biomecánicos complejos.

En este trabajo se trata de comprobar la resistencia a las fuerzas normales aplicadas, sobre los dos prototipos de vendajes de yeso de uso común. Una con vendaje circunferencial simple utilizando tres vendas de yeso de fraguado rápido colocado a lo largo del contorno del brazo circunferencialmente (configuración C); y otra con vendaje circunferencial con férula, también con tres vendas de yeso, la primera de ella colocada a modo de férula dorsal para después completar el vendaje con las otras dos vendas colocadas con la técnica circunferencial (configuración F).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para la realización del estudio se realizaron 10 prototipos de vendajes de yeso basados en dos técnicas de vendaje para fracturas de muñeca, usando como modelo humano un brazo de maniquí ortopédico modificado específicamente para este estudio (5 prototipos para cada técnica):

a) Vendaje circunferencial simple (tipo C): se aplicó una capa sobre el antebrazo con venda de acolchado Texban[®]-s (Texpol, 100% polyester, 10cm x 2,7 m) para luego colocar 3 vendas de yeso Gypse[®] de fraguado rápido (BSN medical, 10 cm x 2, 7 m) circunferencialmente. A cada prototipo se le denominó con la letra C y un número, según el orden en que se sometieron al estudio (ej. C1) como se muestra en la “figura 1”.

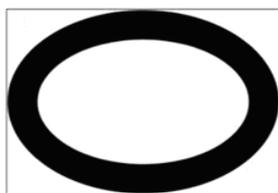


Figura 1. Diagrama de la vista axial de un vendaje circunferencial tipo C

b) Vendaje circunferencial con férula (tipo F): tras colocar la capa previa de venda de acolchado, se aplicó la primera de las tres vendas a modo de férula dorsal para después completar el vendaje con las otras dos con la técnica circunferencial. A cada prototipo se le denominó con la letra F y un número, según el orden en que se sometieron al estudio (ej. F1) como se muestra en la “figura 2”.

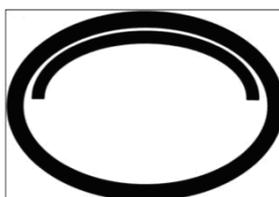


Figura 2. Diagrama de la vista axial de un vendaje circular con férula

Para la obtención de las propiedades materiales, cada prototipo se sometió a un ensayo a flexión a tres puntos a la velocidad de 10 mm/min, y distancia entre puntos 13,5 mm como

se muestra en la figura n° 3. Los parámetros obtenidos en los ensayos fueron: la carga máxima hasta la rotura P(N) y la flecha máxima f(mm). Una estimación del módulo de elasticidad de cada tipo de férula, utilizado como propiedad material en las simulaciones, se

calculó mediante la relación $E = \frac{Pl^3}{48I\delta}$, donde l es la longitud entre apoyos e I es el momento de inercia de la sección en el apoyo central.

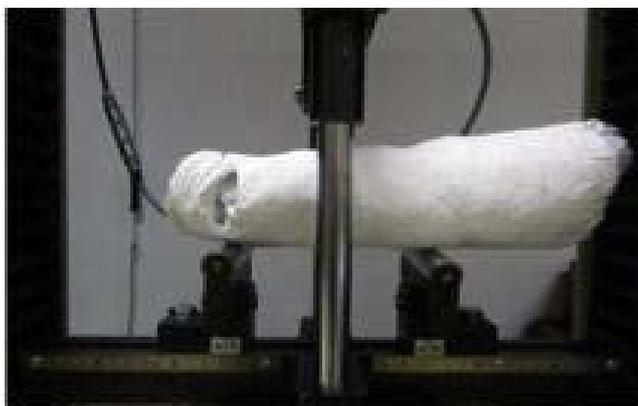


Figura n° 3. Ensayo a flexión a tres puntos

A cada uno de los prototipos a estudio se le realizó una Tomografía Computarizada (TC) con el dispositivo Brilliance CT 64-channel scanner® de Phillips.

Los ficheros DICOM obtenidos de los TC fueron tratados con el software Geomagic, en donde tras ser limpiados se calculó el momento de inercia de la sección central y se exportaron las mallas generadas a formato STL. Estas mallas se emplearon para generar una malla de elementos sólidos tetraédricos de 10 nodos con el programa Mentat para su posterior análisis por elementos finitos. El prototipo de vendaje se considero como un material elástico lineal e isótropo.

En el análisis por elementos finitos la acción de los tres apoyos se modelizó mediante contactos. En los tres casos se emplearon contactos del tipo rígido-flexible y sin considerar el efecto de rozamiento. Al igual que en el ensayo, el movimiento del apoyo central se controló por desplazamiento. Debido a la irregularidad de la geometría del prototipo de vendaje resulta muy difícil posicionarlo sobre los apoyos sin que haya penetración entre las superficies con la consiguiente generación de tensiones iniciales al detectar el contacto. Con el programa Marc se resuelve este problema ya que tiene la capacidad de aproximar una superficie rígida sobre una flexible hasta que entren en contacto, sin generar tensiones iniciales. En el análisis además se asumió pequeñas deformaciones y grandes desplazamientos.

La resolución se llevó a cabo en dos estados de carga. El primer estado de carga se empleó para la detección del contacto inicial entre las superficies que interactúan. El segundo estado de carga se empleó para simular la acción del rodillo central. El problema es no lineal al asumirse grandes desplazamientos y a las interacciones de contacto entre los apoyos y el modelo de prototipo de vendaje, empleándose en la resolución el método de Newton-Raphson completo con una tolerancia en fuerzas de 5E-3 y en desplazamientos de 1E-1, e incremento automático de la carga.

Los resultados fueron sometidos a tratamiento estadístico mediante el software libre R-commander (R Development Core Team (2011) <http://www.R-project.org/>). Se describieron las variables, en general, y específicamente para cada tipo de molde de yeso. Estas variables fueron: media, mediana, desviación típica y rango. Las pruebas no paramétricas (U de Mann-Whitney para muestras independientes, con un grado de significación de $\alpha < 0,05$) se aplica para cada variable en el contraste de hipótesis, que era:

- H_0 : La variable no tiene diferencias estadísticamente significativas según el tipo de yeso.
- H_1 : La variable presenta diferencias estadísticamente significativas según el tipo de yeso.

3. RESULTADOS

Los datos de los ensayos se muestran en la Tabla 1 y los resultados del estudio estadístico se resumen en la Tabla 2. La carga máxima a flexión se dio en las férulas del tipo F con una diferencia estadísticamente significativa ($p = 0,021$). La flecha máxima también fue superior en las férulas de tipo F con diferencia estadísticamente significativa ($p = 0,009$). El momento de inercia en el eje de flexión fue superior en F, mientras que el módulo de elasticidad fue mayor en C, aunque en ninguno de ellos fue estadísticamente significativa.

	Tipo de férula	Número de muestras	Media	Minimo	Máxima
Carga max (N)	F	5	2195,38	1371,80	2913,70
	C	5	1273,38	974,40	1674,00
Flecha Max. (mm)	F	5	32,27	25,74	37,20
	C	5	14,18	6,21	21,44
Momento de inercia (mm ⁴)	F	5	1088541,4	778784,00	1851762,00
	C	5	800620,8	697006,00	904181,00
Módulo de elasticidad (N/mm ²)	F	5	3,59	1,81	5,16
	C	5	4,26	2,15	7,55

Tabla 1. Resultados de los ensayos

	Valor medio	Probabilidad	Test	Resultados
Carga máx. (N)	F=2195,38 C=1273,38	0,021	Mann-Whitney	Estadísticamente significativo
Flecha máx. (mm)	F=32,27 C=14,18	0,009		
Momento de inercia (mm ⁴)	F=1088541,4 C=800620,8	0,076		No estadísticamente significativo
Módulo de elasticidad (N/mm ²)	F=3,59 C=4,26	0,602		

Tabla 2. Análisis estadístico de los ensayos

Los resultados de las simulaciones se muestran en las figura 4, 5 y 6.

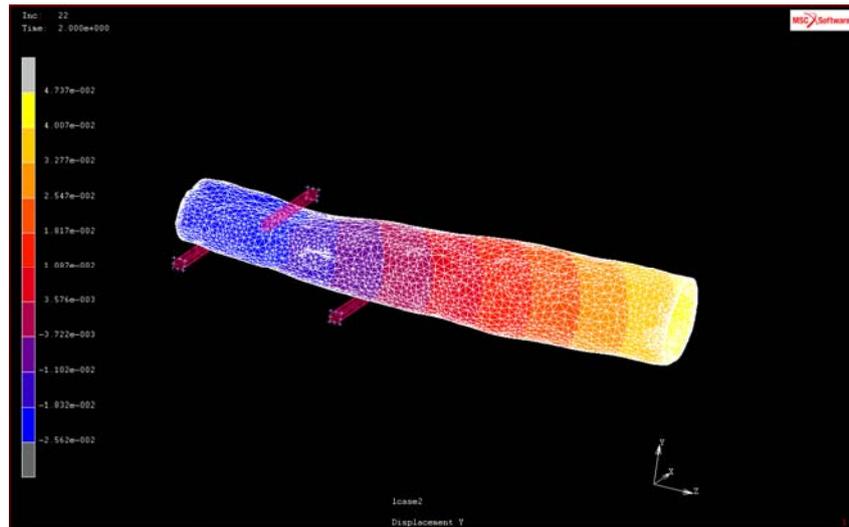


Figura nº 4. Resultados de los desplazamientos

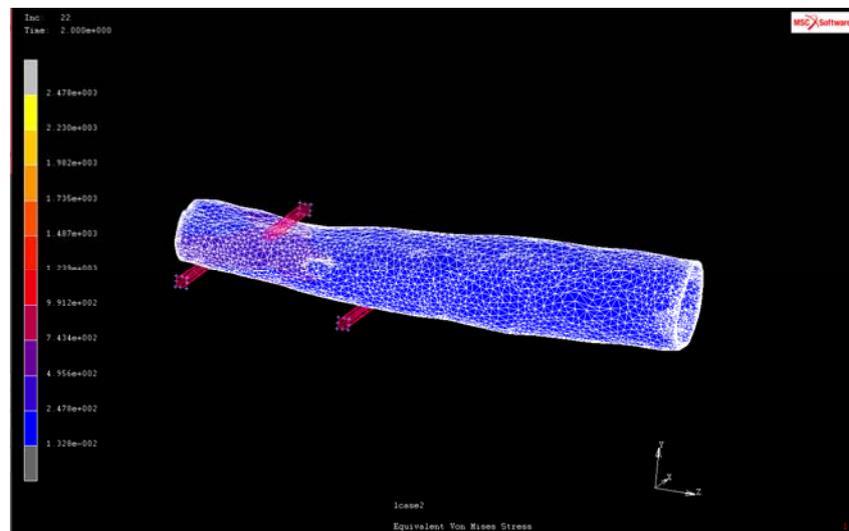


Figura nº 5. Resultados de las tensiones YY

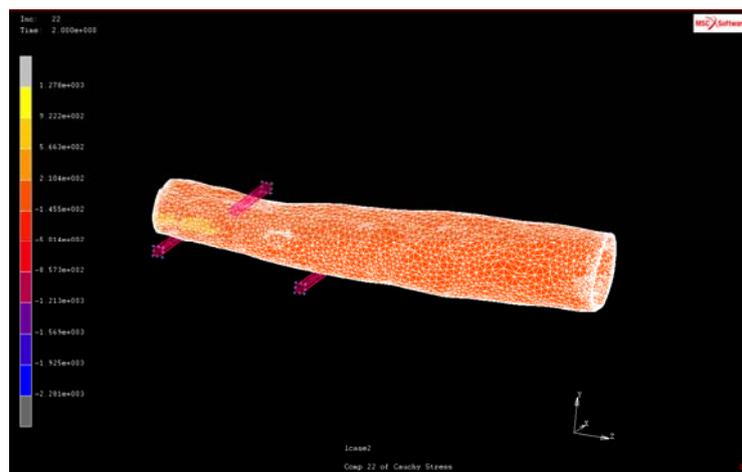


Figura nº 6. Resultados de las tensiones de Von Mises

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La principal conclusión de este estudio constatado en los ensayos mecánicos es que los vendajes de yeso del tipo F son más resistentes a flexión a tres puntos que los del tipo C. Los ensayos se realizaron a flexión a tres puntos en vez de a cuatro puntos porque nos parecía una configuración de carga realista al hacer incidir el tercer apoyo sobre la angostura de la muñeca porque es el "punto débil" de la venda de yeso [18-20] donde se produce una concentración de tensiones y donde puede romper la venda de yeso antes de la consolidación de la fractura. Esta es la razón por la que se hizo este estudio, responder a la pregunta sobre la mejor configuración de la colocación de las vendas para evitar este tipo de rotura sin aumentar la cantidad de yeso.

Una objeción a este estudio se puede encontrar en el pequeño número de muestras que se ensayaron, pero consideramos que esto no es un problema ya que a pesar del corto número de ellas, se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los prototipos F y C. Así que podemos considerar que los resultados son concluyentes.

En cuanto a las simulaciones podemos decir que el utilizar dos estados de carga se debe a que el primer estado de carga, de aproximación de los rodillos, es especialmente importante dada la irregularidad de las superficies de las vendas de yeso. Esta irregularidad hace que sea muy difícil posicionar los rodillos sobre la venda para que inicialmente estén en contacto. El segundo estado de carga se refiere a la velocidad de ensayo con el que incide el rodillo central sobre el prototipo, parámetro necesario controlar en el ensayo. También consideramos pequeñas deformaciones y grandes desplazamientos en las simulaciones debido a que en el ensayo encontramos pequeños movimientos de traslación y rotación de la parte de la ménsula, así como deslizamientos de las superficies en contacto. Debido a la irregularidad de la geometría del prototipo de vendaje resulta muy difícil posicionarlo sobre los apoyos sin que haya penetración entre las superficies con la consiguiente generación de tensiones iniciales al detectar el contacto. Con el programa Marc se resuelve este problema ya que tiene la capacidad de aproximar una superficie rígida sobre una flexible hasta que entren en contacto, sin generar tensiones iniciales.

También se puede objetar sobre la velocidad a que se hicieron los ensayos, a baja velocidad, que sabemos influye sobre la carga de rotura ya que en estudios realizados se ha comprobado que la velocidad de ensayo altera la carga a flexión [20].

Otra limitación del estudio es que la resistencia a la rotura por flexión fue sólo analizada en el eje longitudinal. Esto implica que nuestro estudio sólo demuestra que la rotura a flexión puede prevenirse mediante el método de vendaje circunferencial con férula.

El hecho de mayor resistencia en los prototipos F frente a los C permite obtener una inmovilización más estable y resistente en el tratamiento conservador de las fracturas del radio distal, con la misma cantidad de yeso. Además, el uso de vendajes del tipo F permite una mejor adaptación a la anatomía del antebrazo y esta configuración de vendaje no supone una mayor complicación técnica ni mayor coste. Como es sabido, las fracturas del radio distal implican un 16% de las fracturas de todo el cuerpo, y un 90% de ellos son extraarticulares [1]. Como varios autores refieren [2-6], el tratamiento conservador con el yeso es el tipo más utilizado en pacientes de edad avanzada, por lo que la adición de una férula del tipo F debe ser utilizada de forma habitual en la práctica clínica.

En conclusión, la aplicación de una férula de yeso antes del vendaje circular para el tratamiento conservador en las fracturas de Colles es mejor que el vendaje circunferencial simple con la misma cantidad de yeso. La carga que soporta el vendaje circunferencial con férula es mayor a igual peso y coste. Por lo que se recomienda esta forma de aplicación de vendaje.

5. REFERENCIAS

- [1] Enrique-Fidalgo A, Delgado-Martínez AD. *Fracturas de la extremidad inferior del cúbito y del radio. Su tratamiento*, Cirugía Ortopédica y Traumatología, Médica Panamericana, 2009: 537-43.
- [2] Handoll HH, Huntley JS, Madhok R. *External fixation versus conservative treatment for distal radial fractures in adults*. Cochrane Database Syst Rev 2007;18(3):CD006194.
- [3] Aktekin CN, Altay M, Gursoy Z, Aktekin LA, Ozturk AM, Tabak AY. *Comparison between external fixation and cast treatment in the management of distal Radius fractures in patients aged 65 years and older*. J Hand Surg 2010;35(5):736-42.
- [4] Arora R, Lutz M, Deml C, Krappinger, D, Haug L, Gabl M. *A prospective randomized trial comparing nonoperative treatment with volar locking plate fixation for displaced and unstable distal radial fractures in patients sixty-five years of age and older*. J Bone Joint Surg [Am] 2011;93(23):2146-53.
- [5] Wong TC, Chiu Y, Tsang WL, Leung WY, Yam SK, Yeung SH. *Casting versus percutaneous pinning for extra-articular fractures of the distal radius in an elderly Chinese population: a prospective randomised controlled trial*. J Hand Surg Eur 2010;35(3):202-8.
- [6] Azzopardi T, Ehrendorfer S, Coulton T, Abela M. *Unstable extra-articular fractures of the distal radius: a prospective, randomised study of immobilisation in a cast versus supplementary percutaneous pinning*. J Bone Joint Surg [Br] 2005;87(6):837-40.
- [7] Colditz JC. *Plaster of Paris: the forgotten hand splinting material*. J Hand Ther 2002;15(2):144-57.
- [8] Deshpande SV. *An experimental study of pressure-volume dynamics of casting materials*. Injury 2005;36(9):1067-74.
- [9] Zmurko MG, Belkoff SM, Herzenberg JE. *Mechanical evaluation of a soft cast material*. Orthopedics 1997;20(8):693-8.
- [10] Bowker P, Powell ES. *A clinical evaluation of plaster-of-Paris and eight synthetic fracture splinting materials*. Injury 1992;23(1):13-20.
- [11] Philbin TM, Gittins ME. *Hybrid casts: a comparison of different casting materials*. J AM Osteopath Assoc 1999;99(6):311-2.
- [12] Charles MN, Yen D. *Properties of a hybrid plaster-fibreglass cast*. Can J Surg 2000;43(5):365-7.
- [13] Berman AT, Parks BG. *A comparison of the mechanical properties of fiberglass cast materials and their clinical relevance*. J Orthop Trauma 1990;4(1):85-92. 7
- [14] Blakeney WG. *Stabilization and treatment of Colles' fractures in elderly patients*. Clin Interv Aging 2010;18(5):337-44.
- [15] Stewart T, Cheong W, Barr V, Tang D. *Strong and light plaster casts?* Injury 2009;40(8):890-3.
- [16] Theopold C, Bush JA, Wilson SW, Bayat A. *Optimal plaster conformation derived using a custom-made jig to obtain maximum strength of protective plaster of Paris for hand surgery*. J Trauma 2007;63(5):1074-8.
- [17] Alemdaroglu KB, Iltar S, Cimen O, Uysal M, Alagoz E, Atlihan D. *Risk factors in redisplacement of distal radial fractures in children*. J Bone Joint Surg [Am] 2008;90(6):1224-30.
- [18] Marcheix PS, Peyrou P, Longis B, Moulies D, Fourcade L. *Dorsal distal radius fractures in children: role of plaster in redisplacement of these fractures*. J Pediatr Orthop B 2011; 20(6):372-5.

- [19] Alemdaroglu KB, Iltar S, Aydogan NH, Say F, Kilinc CY, Tiftikc U. *Three-point index in predicting redisplacement of extra-articular distal radial fractures in adults*. Injury 2010;41(2):197–203.
- [20] Ani Ural, P Zioupos. *Evaluation of influence of strain rate on Colle's fracture load*. Journal of biomechanics, 2012
- [21] P. Varga, S. Baumbach, D. Pahr, P.K. Zysset. *Validation of an anatomy specific finite element model Colles's fracture*. J. of Biomechanics;2009; 42:1726-1731