

DETERMINACIÓN DE LA TENSIÓN DE ROTURA DE HUESOS COMBINANDO MEDIDAS EXPERIMENTAS Y SIMULACIONES

C. Crespo-Gomara¹, J. Aldazabal^{1*},

¹Tecnun - Universidad de Navarra, Pº Manuel de Lardizábal 13, 20018, San Sebastián, España.

* Persona de contacto: jaldazabal@tecnun.es

RESUMEN

La determinación de la carga capaz de soportar un hueso se puede medir experimentalmente mediante un ensayo de tracción convencional. Sin embargo, y dada la compleja geometría del hueso, con estos ensayos se hace muy difícil el cálculo directo de la tensión de rotura mismo.

El presente trabajo propone un método para poder determinar la tensión de rotura de un hueso. La primera etapa del método consiste en la determinación de la geometría del hueso mediante un escaneo 3D del mismo. Una vez escaneado el hueso se fija este en los utillajes de una máquina de ensayo universal mediante un adhesivo bicomponente. Tras el curado del adhesivo se ensaya el hueso para determinar la carga máxima capaz de soportar. Con la geometría 3D del hueso ensayado se genera un modelo de elementos finitos. A este modelo se le aplica una carga virtual y se determina tanto la zona de máxima tensión como el valor que alcanza esta. Dado el carácter frágil del hueso se le puede suponer un comportamiento elástico lineal del mismo hasta el fallo.

El método propuesto permite determinar, mediante la geometría y el ensayo del hueso, la tensión máxima que soporta.

PALABRAS CLAVE: Elementos finitos, ensayos mecánicos, hueso, tensión de rotura.

ABSTRACT

The determination of the load capable of supporting a bone can experimentally be measured with conventional tensile test. However, given the complex geometry of the bone, with these tests it is extremely difficult to directly calculate the fracture stress itself.

This work proposes a method to determine the fracture stress of a bone. The first stage of the method consists of determining the geometry of the bone. This can be done using a 3D scanner. Once the bone geometry has been obtained, it is fixed in the grips of a conventional testing machine. This was made using a bicomponent adhesive. After curing the adhesive, a regular test was performed to determine the maximum load capable of supporting the bone. With the 3D model of the bone tested, a finite element model was generated. A virtual normalised force was applied to this model and both the maximum stress zone and the value it reaches was determined. Given the brittle character of the bone, a linear-elastic behaviour was assumed.

Proposed method allows to determine, by means of the geometry and the test of the bone, the maximum tension that is capable of supporting.

KEYWORDS: Finite elements, mechanical test, bone, fracture stress.

1. INTRODUCCIÓN

Debido al alargamiento en la esperanza de vida de las sociedades modernas, las enfermedades y males asociados al sistema musculoesquelético son una de las principales causas de minusvalías y dolores crónicos.

La ausencia de mecanismos de regeneración o de reparación de tejidos articulares hace que estos problemas degenerativos acaben muchas veces en

artrosis. Este problema se caracteriza por una pérdida total de la función articular.

La regeneración ósea es un proceso fisiológico complejo y bien orquestado de reparación de tejidos, que se puede observar durante la curación normal de fracturas. Este proceso regenerativo está involucrado en la remodelación continua a lo largo de la vida adulta. Sin embargo, existen condiciones clínicas complejas en las que se requiere la regeneración de una gran cantidad de

masa ósea. En muchos de estos casos se ha de recurrir a fármacos o incluso a la ingeniería de tejidos.

Para comprobar la efectividad de los tratamientos aplicados en estas regeneraciones es necesario el poder cuantificar la resistencia mecánica de los huesos tras su regeneración [1]. Un ensayo de tracción puede servir para medir directamente la carga capaz de soportar un hueso, pero no así la tensión que soporta.

En este trabajo se ha estudiado y expuesto la metodología de trabajo para determinar la respuesta mecánica de una muestra de hueso de tibia regenerado de ratón. La longitud aproximada del hueso ensayado es de 18 mm.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En este apartado del trabajo se expone la metodología empleada para realizar los ensayos mecánicos para determinar la fuerza máxima que es capaz de soportar el hueso estudiado.

2.1 Preparación de las muestras

Una vez extraídas las muestras del animal se ha procedido a eliminar los posibles restos de piel con la ayuda de un bisturí. La pérdida de agua de los huesos modifica sus propiedades mecánicas [2]. Para evitar esta alteración de las propiedades mecánicas, la muestra, tanto recién extraída como limpia, se ha conservado en un bote de plástico estéril y hermético de 50 ml de capacidad. Antes de guardar el hueso en el bote, se ha envuelto en una gasa empapadas con agua desionizada.

Una vez el hueso se han limpiado, se ha determinado la dirección de aplicación de la carga. La figura 1 indica en azul la dirección empleada para aplicar la carga durante el ensayo.

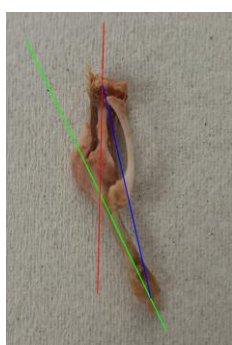


Figura 1. Posibles direcciones de aplicación de la carga en el hueso. La dirección empleada en este trabajo corresponde a marcada en azul.

Tras la limpieza del hueso se ha caracterizado geoméricamente, como se explicará en el apartado 3.1 del trabajo.

Para la fijación del hueso a la máquina se han mecanizado unos prismas de aluminio de 10×10×40 mm. A cada uno

de estos prismas se le ha practicado un agujero de unos 7 mm de profundidad y 3.5 mm de diámetro. Para fijar el hueso al prisma se ha empleado un adhesivo bicomponente *Araldite Rapid* de *Hustman Advanced Materials*. Tras mezclar los dos componentes del adhesivo se ha vertido la mezcla sobre el orificio y posteriormente se ha introducido uno de los extremos del hueso. Para lograr una alineación de este con la dirección deseada de aplicación de la carga se ha empleado un nivel laser que trazaba una línea totalmente vertical. El tiempo de curado empleado ha sido de aproximadamente 2 horas. La figura 2 muestra la fijación provisional del hueso, con ayuda de unas pinzas, para evitar su desalineación antes del curado y endurecimiento de la mezcla bicomponente.



Figura 2. Sistema empleado para mantener la alineación del hueso durante el curado del adhesivo.

Una vez curado el adhesivo se ha envuelto en una gasa y se ha almacenado en un bote hermético hasta su ensayo.

2.2 Montaje experimental

El ensayo de tracción se ha realizado con una máquina de ensayo universal Instron Mini44 con una celda de carga estática de 500 N. Dados los pequeños valores de carga esperados se ha empleado un amplificador de instrumentación para aumentar la resolución de la celda de carga. El factor de amplificación empleado ha sido de 20:1. La figura 3 muestra el montaje empleado. El amplificador utilizado se encuentra a izquierda de la imagen, junto a la consola de control.



Figura 3. Equipo empleado para determinar la carga a rotura del hueso.

Tras la fijación del bloque de aluminio a la mordaza superior de la máquina, se ha colocado otro bloque similar en la mordaza inferior y se ha rellenado el taladro practicado sobre el aluminio con epoxi. Tras el llenado se han aproximado las mordazas entre sí hasta que el extremo, hasta ahora libre del hueso, se ha sumergido en el adhesivo. Una vez que este extremo ha alcanzado la profundidad deseada se ha esperado 2 horas hasta el curado completo del epoxi. Durante el curado se han envuelto las piezas de aluminio y el hueso con una gasa empapada con agua desionizada. Durante este curado no se observó ningún incremento en la carga de la máquina, por lo que se puede considerar que el ensayo comenzará sin carga aplicada, y por tanto el método de fijación no introduce tensiones. En la figura 4 se parecía el hueso fijado a ambos bloques de aluminio y listo para ser ensayado.

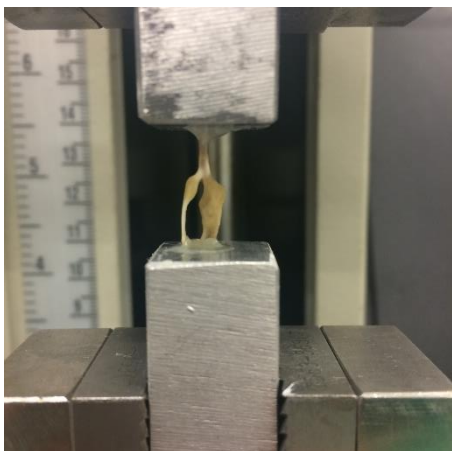


Figura 4. Hueso listo para ser ensayado y fijado a los dos bloques de aluminio mediante adhesivo.

El ensayo de tracción se ha realizado a una velocidad 0,3 milímetros por minuto. La toma de datos se ha efectuado con una cadencia de 10 Hz. Con estos parámetros cada valor de carga registrado corresponde a un desplazamiento teórico de la cruceta de 0,0005 mm. Para la toma de datos se ha empleado una tarjeta de adquisición Advantech PCL-818H, de 12 bits de resolución y frecuencia de muestreo máxima de 100 kHz. Con el montaje empleado la resolución obtenida en el registro de la carga ha sido de 0,02 N.

3. MODELO COMPUTACIONAL

En este apartado del trabajo se expone la metodología empleada para la realización de la modelización del comportamiento mecánico del hueso.

3.1 Caracterización geométrica

La etapa previa a la modelización corresponde a la obtención de la geometría del hueso. Para esto se ha desarrollado un montaje de tomografía computarizada mediante la proyección de sombras. Una vez montado el sistema se ha fijado el hueso sobre un motor paso a paso con una resolución de 4095 pulsos por vuelta (figura 5).

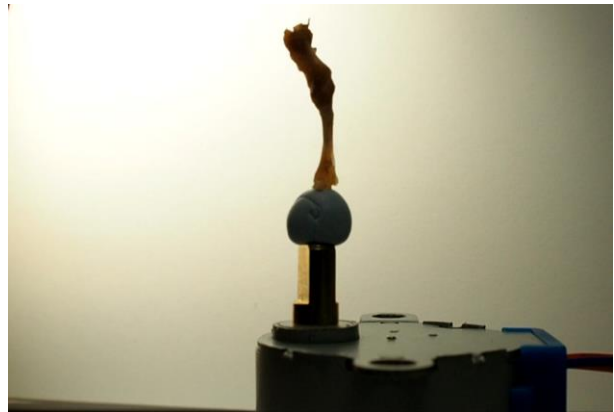


Figura 5. Posicionamiento del hueso sobre el motor para tomar imágenes durante la rotación del mismo.

La toma de imágenes se ha efectuado de forma continua, empleado para la reconstrucción del volumen del hueso únicamente 36 imágenes de una rotación total de 180°. La diferencia de orientación entre cada dos imágenes consecutivas ha sido de 5,0°.

Tras la toma de las imágenes, y mediante un programa desarrollado en C, se ha procedido a reconstruir la geometría del hueso. La resolución espacial durante la reconstrucción de la superficie ha sido de aproximadamente 50 μm. La figura 6 muestra la geometría del hueso reconstruido.

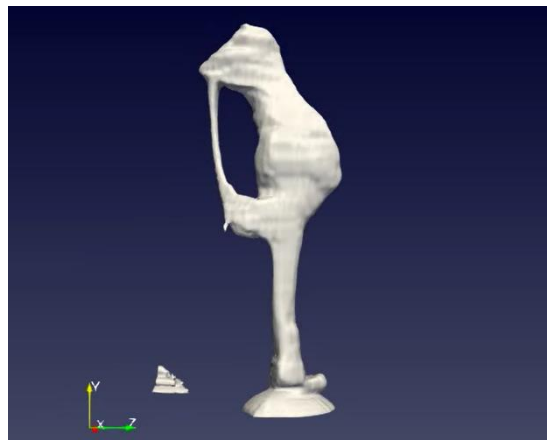


Figura 6. Geometría del hueso reconstruida

3.2 Modelo computacional

Una vez obtenida la geometría del hueso se ha importado esta al código de elementos finitos Ansys 18.1.

Las propiedades mecánicas asignadas para el hueso, y mostradas en la tabla 1 se han obtenido de la bibliografía [3-5].

Tabla 1. Propiedades mecánicas del hueso.

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo Elástico, E	15	GPa
Módulo Cortadura, G	12	GPa
Módulo Poisson, ν	0,3	
Densidad, ρ	2441	kg/m ³

Para simular el ensayo se han fijado los nodos de la parte inferior de la geometría y se ha aplicado una carga distribuida en la superficie superior. Se ha supuesto un comportamiento elástico lineal hasta el fallo. Durante la simulación la carga aplicada sobre la probeta ha sido tal que se obtuviera una tensión máxima de 1 Pa. Para comprar los resultados del ensayo real con los del modelo simplemente se han escalado las tensiones obtenidas del modelo con la carga real, en newtons, soportada por el hueso real.

4. MEDIDAS Y RESULTADOS

4.1 Resultados experimentales

La figura 7 muestra el registro carga-desplazamiento durante la realización del ensayo.

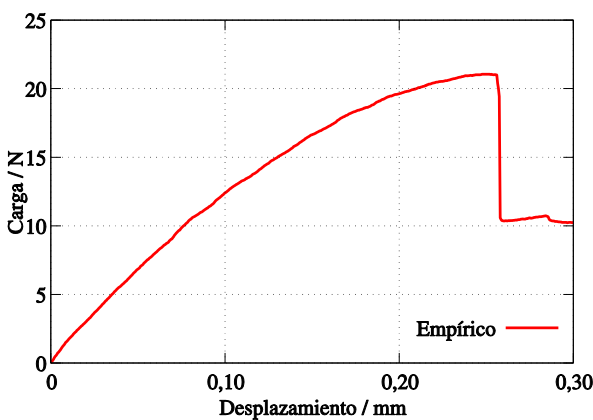


Figura 7. Registro carga-desplazamiento obtenido durante el ensayo de la tibia de ratón.

En la primera parte de la gráfica se observa una relación lineal entre la carga y el desplazamiento. La ecuación 1 muestra la expresión del ajuste lineal obtenido considerando pequeños desplazamiento (desde 0 hasta 0,1 mm).

$$F = 130,48 x \quad (1)$$

Donde F corresponde a la fuerza aplicada, en N, y x al desplazamiento de la cruceta, en milímetros.

Durante el ensayo se ha observado una pequeña deformación del epoxi. Esta deformación ayuda a explicar la caída de la carga observada en el registro. Si bien esa caída de la carga se produce a deformaciones relativamente grandes, se puede garantizar que la carga de rotura del hueso ha sido de 21,06 N. Tras alcanzar la carga máxima se ha producido el fallo de la tibia (indicado en rojo) y posteriormente de la fíbula.

La figura 8 muestra el aspecto del hueso una vez ensayado. La fractura del hueso se ha producido sobre la bifurcación del hueso, en la zona de la tibia paralela a la fíbula.

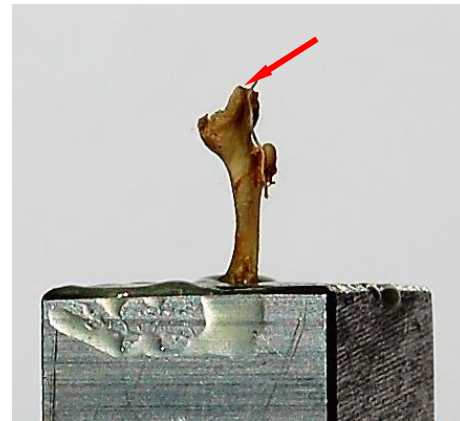


Figura 8. Aspecto de la tibia tras ser ensayada. El fallo se ha producido encima de la bifurcación del hueso.

4.2 Resultados del modelo

La geometría del hueso reconstruida ha estado compuesta por 23851 elementos tetraédricos. La carga aplicada sobre el modelo ha sido tal que la tensión principal máxima resultante sea de un Pascal. La figura 9 muestra los resultados de tensión principales que aparecen sobre el hueso.

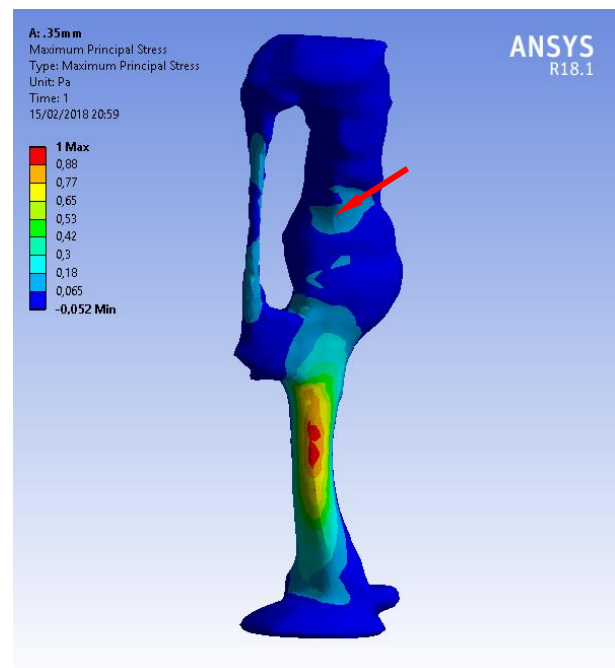


Figura 9. Distribución de tensiones principales normalizadas sobre el hueso cargado.

En el caso de hueso ensayado se prevé una tensión máxima en la parte situada debajo de la bifurcación. Sin embargo, el hueso real se ha fracturado por la zona indicada en rojo en la figura 8 y 9. La figura 10 muestra un detalle de la zona de rotura, donde se indica que la tensión máxima es aproximadamente un 10% del valor máximo esperado.

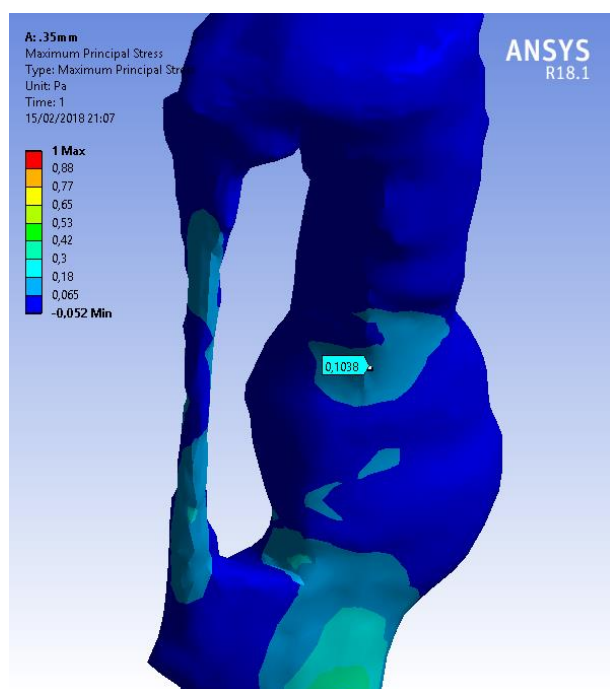


Figura 10. Tensión principal máxima normalizada en la zona de rotura del hueso.

4.3 Discusión de los resultados

El hueso ensayado corresponde a un hueso previamente cortado y regenerado. Esta zona regenerada corresponde a la zona por la que posteriormente falló.

El fallo se ha producido en la zona de mayor tensión principal calculada, dentro de la zona regenerada. Este resultado es razonable pero la carga de rotura ha sido mucho menor de lo esperada (un 10% de la nominalmente esperada). Esta discrepancia puede deberse principalmente a dos factores: una mala definición del hueco interior del hueso o una clara no isotropía en las propiedades del mismo.

5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha propuesto y validado un método para poder determinar la carga a rotura de huesos con geometrías complejas.

La determinación de la zona de fallo predicha por las simulaciones de elementos finitos ha sido correcta, si bien los valores esperados son mucho menores de los realmente medidos.

La determinación exacta de la geometría interna del hueso y de la anisotropía de su respuesta mecánica es clave para poder predecir de forma precisa la tensión de rotura.

REFERENCIAS

- [1] C.H. Turner, Biomechanics of bone: Determinants of skeletal fragility and bone quality. *Osteoporos. Int.*, **13**, 97-104, 2002.
- [2] J.D. Currey, T. Landete-Castillejos, J.A. Estevez, A. Olguin, A.J. Garcia, L. Gallego, The Young's Modulus and Impact Energy Absorption of Wet and Dry Deer Cortical Bone. *The Open Bone Journal*, **1**, 38-45, 2009.
- [3] D.T. Reilly, A.H. Burnstein, V.H. Frankel. The elastic modulus of bone. *J. Biomech.*, **7**, 271-272, 1974.
- [4] A.H. Burnstein, D.T. Reilly, M. Martens. Aging of bone tissue: Mechanical properties. *J. Bone Joint Surg. Am.*, **58**, 82-86, 1976.
- [5] D. Guede, P. Gonzalez, J.R. Caeiro, Biomecánica y hueso (I): Conceptos básicos y ensayos mecánicos clásicos. *Rev. Osteoporos. Metab. Miner.*, **5**, 43-50, 2013.