

## ANALISIS MICROMECHANICO DE HUESOS

A. Lalegname, D. Sfer, G. Etse

Centro de Métodos Numéricos y Computacionales en Ingeniería  
Universidad Nacional de Tucumán  
Avda. Independencia 1800 – 4000 Tucumán Argentina  
e-mail: dsfer@herrera.unt.edu.ar

**Key words:** Microestructura, Elementos Finitos, Hueso, Porosidad.

**Abstract** *El análisis material a nivel micromecánico constituye uno de los métodos realista para reproducir el comportamiento de algunos materiales, en particular ha sido altamente satisfactorio en materiales cuasifrágiles. Por otro lado este camino de análisis también es aplicable a huesos. Fundamentalmente los resultados de este tipo análisis pueden utilizarse para la calibración de modelos continuos a través de los cuales se desarrollan simulaciones numéricas realistas de hueso. En este trabajo se presenta los resultados preliminares de una investigación enfocada a la simulación computacional del comportamiento no lineal de huesos. Se presenta un análisis micromecánico del material con estudios de sensibilidad de los parámetros mecánicos elásticos respecto del efecto tamaño, la porosidad y su distribución.*

## 1 INTRODUCCIÓN

El sistema óseo humano está diseñado para proteger órganos internos y para proporcionar tanto apoyos rígidos al cuerpo como sitios de atadura de músculos facilitando su accionar y de esta forma contribuir a estabilizar y movilizar al cuerpo. Los huesos tienen propiedades mecánicas únicas que le permiten realizar estas funciones, constituye uno de los materiales más rígidos del cuerpo. Entre sus características relevantes se destaca su notable capacidad de autoreparación ante eventuales degradaciones o daños, así como su veloz adaptación a los cambios en el campo de tensiones reinantes.

Se reconocen dos tipos fundamentales de estructuras óseas. Por un lado el hueso cancellous (llamado también trabecular o esponjoso) y por otro el cortical (llamado también compacto). El hueso cortical, cuya sección transversal se presenta en la figura 1, posee 4 veces más masa que el hueso cancellous. El material básico de ambos huesos pareciera ser el mismo y la distinción entre ellos estaría dada por el grado de porosidad y su distribución. El rango de porosidad del hueso cortical es de 5% al 30%, mientras que en el hueso cancellous es del 30% al 90%. La porosidad del hueso no es fija y puede cambiar con el transcurso del tiempo en respuesta a una alteración de cargas, enfermedad y envejecimiento.

El hueso cancellous está siempre rodeado por el hueso cortical. Este tipo de hueso se encuentra típicamente en los huesos alargados formando una especie de cobertura de contención o delimitación del hueso trabecular, constituyendo una cáscara del mismo.

En este trabajo se presenta la faz inicial de un programa de investigación enfocado al análisis microestructural del comportamiento del hueso. En esta línea se han desarrollado diversos ensayos numéricos de compresión sobre muestras de hueso. Sobre estas muestras se realizan estudios de sensibilidad a l efecto tamaño y se analiza la sensibilidad de su comportamiento de respuesta frente a la porosidad del hueso.

El objetivo final del programa de investigación en el que se enmarca este trabajo es desarrollar un modelo constitutivo continuo, no lineal para huesos basado en las propiedades mecánicas relevantes del mismo a nivel microestructural y con capacidad para reproducir la marcada anisotropía de su respuesta mecánica.

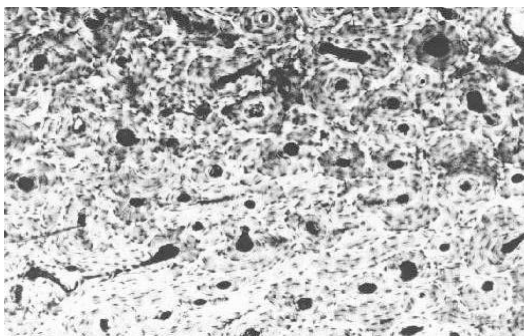


Fig. 1 Sección transversal del hueso cortical o compacto

## 2 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS HUESOS

Las propiedades mecánicas del hueso se determinan mediante ensayos de tracción, compresión, torsión, o de corte sobre especímenes. A partir de estos ensayos se pueden determinar la respuesta en términos de Fuerza – Desplazamiento, definiendo así las propiedades estructurales, o bien en términos de Tensión – Deformación, determinando las propiedades materiales. El análisis experimental de las propiedades mecánicas del hueso es altamente compleja debido a la anisotropía del mismo que requiere de múltiples ensayos, por otro lado el reducido tamaño de las muestras que se pueden conseguir y fundamentalmente porque se trata de un material vivo.

En general los huesos están sometidos a una amplia variedad de estados de carga. Al estar de pie una persona solicita a su fémur a un estado de compresión. Eventualmente puede también estar sometido a una flexocompresión, con una porción del hueso sometido a tracción. También puede presentarse una sollicitación de corte en el caso que la pierna golpee con una mesa.

La figura 2 muestra una fractura típica del hueso provocado por el estado de compresión dominante.

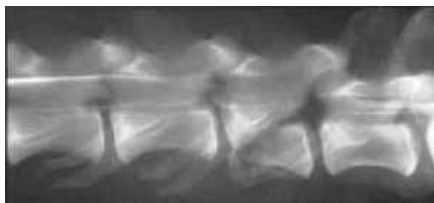


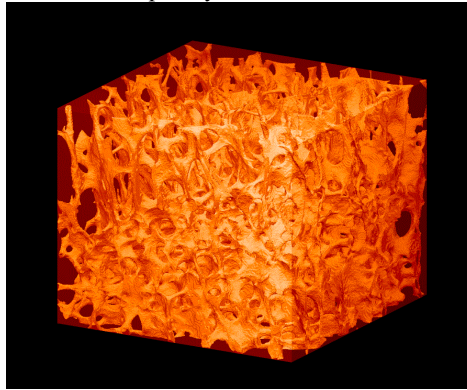
Fig.2 : Fractura oblicua de la vértebra causada por compresión

## 3 GENERACIÓN DE LA MALLA DE ELEMENTOS FINITOS

Existe una serie de antecedentes en la bibliografía específica que presentan estudios de elementos finitos aplicados a huesos, muchos de ellos presentando mallas bidimensionales. La propuesta actual

está enfocada a la generación de una malla 3D representativa de la microestructura del hueso.

La malla esta representada por una red de  $21 \times 21 \times 21$  nudos que permiten generar 8000 elementos, a esta red se le extraen los elementos representativos de los poros. Los poros están representados mediante elipsoides distribuidos de manera arbitraria en el volumen de la muestra y con un tamaño representativo de la situación real. La figura 3 muestra una imagen correspondiente a una porción de hueso trabecular obtenida por rayos X.



**Fig.3:** imagen microscópica de una muestra de hueso trabecular

Para modelar diferentes porosidades se procede a una variación del tamaño de dichos elipsoides.

Los elementos residuales que quedan luego de extraer los poros constituyen el material de la estructura ósea caracterizada por los parámetros mecánicos de los huesos. En esta modelación se utilizan elementos sólidos 3D de 8 nodos, constituyendo un modelo cúbico con elementos finitos sobre una red de  $20 \times 20 \times 20$ -elementos. Las propiedades materiales corresponden a un material elástico lineal ( $E= 10$  GPa.,  $\nu=0.2$ ).

A cada uno de los modelos de elementos finitos se los somete a un ensayo de compresión con control de deformaciones. En esta simulación se consideran condiciones de borde homogéneas de manera que los nodos de la cara inferior sólo se les impide el desplazamiento vertical, es decir que el ensayo se materializa aplicando un descenso de los nodos de la cara superior, registrándose las correspondientes reacciones en estos nudos. En las figuras 4a y 4b se presentan los modelos utilizados.

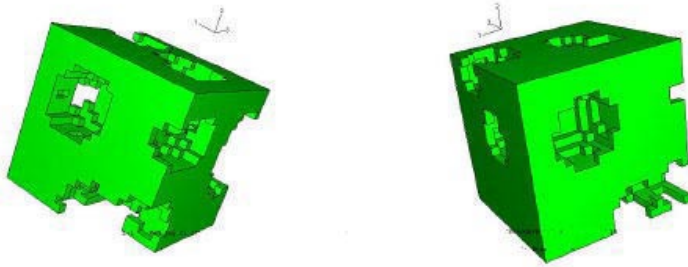


Fig. 4a Modelos 3D utilizados en el análisis

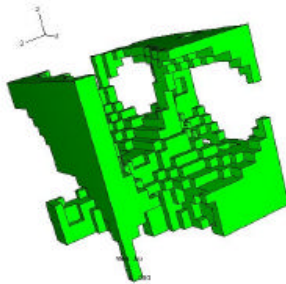


Fig. 4b Modelo 3d utilizado en el análisis

#### 4 DESARROLLO DEL ANÁLISIS

Se divide el valor de la reacción observada en el valor del Área transversal y obtenemos una tensión nominal  $\sigma_{nom}$  que al comparada con la deformación vertical experimentada por el espécimen permite obtener la curva tensión deformación característica del material. Es así que se obtiene el módulo elástico equivalente del sistema óseo  $E_{equiv}$ . que en el caso más general no coincide con el del material constitutivo.

En la figura 5a, 5b y 5c se presenta la distribución de tensiones axiales (según el eje 3) en los modelos numéricos

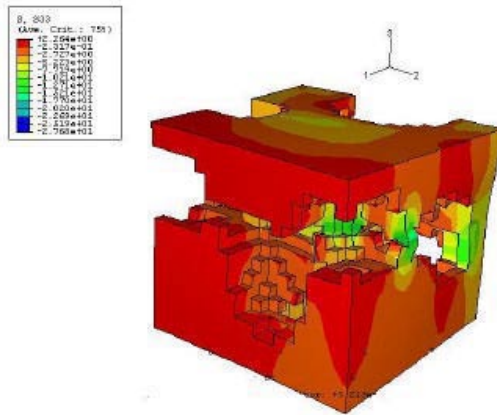


Fig. 5a Distribución de tensiones axiales en el modelo

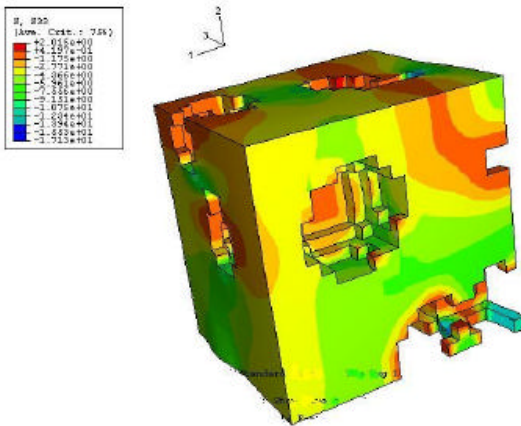


Fig. 5b Distribución de tensiones axiales en el modelo

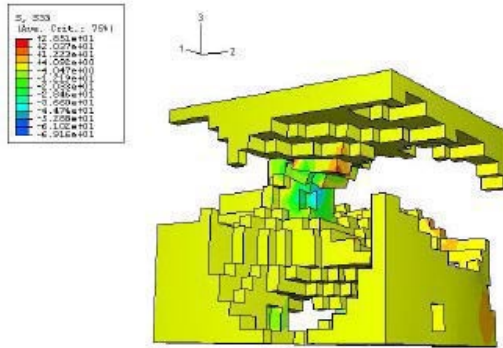


Fig. 5c Distribución de tensiones axiales en el modelo

### 5 SENSIBILIDAD AL EFECTO DEL TAMAÑO

En esta sección se presenta los resultados del estudio de la sensibilidad al tamaño de los elementos de la muestra. Este análisis considera repetir lo realizado, pero con el tamaño de la muestra amplificado y reducido, respectivamente. El factor utilizado en este análisis es un factor de escala 3 y 1/3. En la tabla 1 se resumen las características del modelo y en la tabla 2 se presentan los resultados del análisis.

Tabla 1. Características del modelo

Número de Elementos	Número Total de Elementos	Porosidad considerada (%)
5916	8000	26.05
	Modulo de Young (Kg/cm <sup>2</sup> )	Coef. de Poisson
	1.00E+05	0.2

Tabla 2. Resultados efecto tamaño

Tamaño de muestra	Reacciones (Kg)	$\sigma_{nom}$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	$\epsilon_{vert}$ (%)	$E_{equiv}$ (Kg/cm <sup>2</sup> )
20 * 20 * 20	678.94	1.697	0.03	5657.89
20/3 * 20/3 * 20/3	226.59	5.098	0.09	5664.92
60 * 60 * 60	2036.843	0.566	0.01	5657.89

## 6 EFECTO DE LA POROSIDAD

Para este análisis se han considerado diferentes tamaños de los volúmenes de los poros y consecuentemente una variación de la porosidad. A cada uno de los modelos se lo sometió a un ensayo de compresión con control de desplazamiento tal cual se explicó precedentemente.

A continuación en la siguiente tabla se resumen los resultados

Tabla 3: Resultados efecto porosidad

Porosidad %	Reacciones (Kg)	$\sigma_{nom}$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	$\epsilon_{vert}$	$E_{equiv}$ (Kg/cm <sup>2</sup> )
26.05	-1154.20	-2.88	0.0003	9618.38
45.87	-554.79	-1.387	0.0003	6232.8
59.16	-847.01	-2.12	0.0003	7058.45

Se observa que el incremento de la porosidad no necesariamente implica la caída del módulo elástico en una dirección determinada es por ello que se analiza el comportamiento de estos mismos modelos frente a ensayos de compresión en las otras dos direcciones ortogonales.

A fin de profundizar el análisis del efecto de la porosidad en el comportamiento de la muestra, se someten a estos mismos modelos a ensayos de compresión en las otras 2 direcciones. De esta manera podemos concluir a cerca de la influencia de la distribución de la porosidad en el comportamiento de la muestra.

En la siguiente tabla se vuelcan los resultados correspondientes

Tabla 4: Resultados efecto de la porosidad y su distribución

Porosidad %	Reacciones (Kg)	$\sigma_{nom}$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	$\epsilon_{vert}$	$E_{equiv}$ (Kg/cm <sup>2</sup> )
26.05	1154.20	2.88	0.0003	9618.38
26.05	1067.16	2.66	0.0003	8893.02
26.05	1066.21	2.66	0.0003	8885.15
45.87	554.79	1.387	0.0003	4623.28
45.87	626.58	1.566	0.0003	5221.58
45.87	657.75	1.644	0.0003	5481.27
72.41	158.93	0.397	0.0003	1324.40
72.41	405.69	1.01	0.0003	3380.76
72.41	869.65	2.17	0.0003	7247.07

En el gráfico de la figura se presenta la relación entre la porosidad y el módulo equivalente. Se observa claramente que para el caso de porosidades elevadas, es decir superiores al 60%, es decir las correspondiente al hueso cancellous, la forma y dirección de la porosidad puede provocar importantes cambios en el módulo elástico equivalente. En el gráfico se ha representado el módulo equivalente para los diferentes grados de porosidad, además se presenta una curva para cada dirección de ensayo.



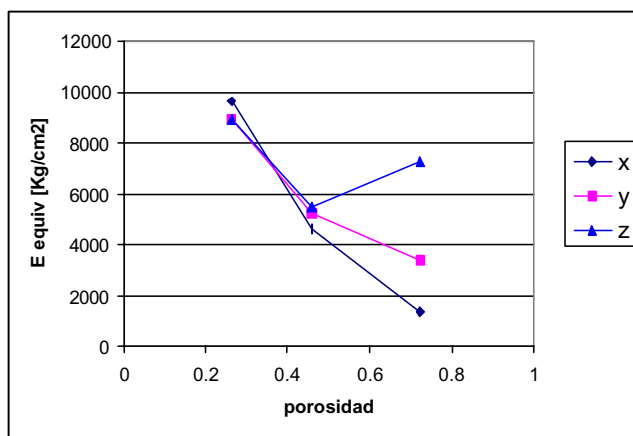


Figura 6. Variación del módulo equivalente en función de la porosidad

## 7 CONCLUSIONES

En el presente trabajo se presentan resultados preliminares de un amplio programa de investigación relacionado con la simulación computacional del comportamiento no lineal de huesos. A fin de caracterizar el modelo material continuo que se desarrollará oportunamente se ha estudiado en esta fase preliminar las influencias de la porosidad y el tamaño de la muestra ósea en el comportamiento de respuesta a nivel micromecánico. Estos resultados permitirán calibrar las funciones internas del modelo continuo macro con el que se estudiará el comportamiento del hueso.

Los resultados preliminares permiten concluir que el grado de porosidad de hueso afecta sensiblemente los parámetros mecánicos del conjunto y a partir de ciertos valores de la porosidad los parámetros mecánicos elásticos son fuertemente dependientes de la disposición de las fibras de la microestructura, efecto que deberá contemplarse en el modelo macro. Por otro lado los resultados observados muestran que el efecto tamaño de la muestra no afectan las propiedades mecánicas elásticas.

## 8 REFERENCIAS

- [1] Cowin, S.C.: Bone Mechanics. CRC Press, (1991)
- [2] Yuehuei, H.A., Draughn R.A. : Mechanical testing of bone and the bone-implant interface. CRC Press (2000)
- [3] A. J. C. Ladd, J. H. Kinney , D. L. Haupt, and S. A. Goldstein “Finite-element modeling of trabecular bone: Comparison with mechanical testing”. J. Orthop. Res. 16 (1998) 622-628,
- [4] O. Roa, I. Carol, C. López, R. Contro. “Microstructural Analisis of Cancellous Bone taking into account geometrically Non linear effects. ECCOMAS 2000 – Barcelona, España Sep. 2002.