

MODELO BIOMECÁNICO TRIDIMENSIONAL DE FRACTURAS DE HUESOS LARGOS. APLICACIÓN AL ESTUDIO DE PARÁMETROS DE DISEÑO DE SISTEMAS DE FIJACIÓN EXTERNA

Mario Comín

Instituto de Biomecánica de Valencia

CON EL FIN DE DISPONER DE UNA HERRAMIENTA QUE PERMITA LA EVALUACIÓN biomecánica de parámetros de diseño de sistemas de fijación de fracturas y a la vez obtener información cuantitativa del estado de consolidación alcanzado por la fractura, se ha desarrollado y validado un modelo tridimensional de callo de fractura en huesos largos. En el artículo se muestra el trabajo realizado para la puesta a punto de la herramienta y la aplicación de la misma en el estudio de sistemas de fijación externa.

Three-dimensional biomechanical model of long bone fractures. Application to the study of design parameters for external fixators

A three-dimensional model of long bone fractures has been developed and validated. It will serve for the biomechanical evaluation of fracture fixation systems as well as a means to obtain quantitative information on the fracture healing status. The article describes the work done to set up this tool and its application in the study of external fixation systems.

En la práctica clínica, la evaluación de la evolución del proceso de consolidación de fracturas se ha llevado a cabo tradicionalmente mediante la exploración y la radiografía convencional, técnicas que no aportan un conocimiento objetivo sobre el estado de la reparación y, en particular, sobre el estado mecánico de consolidación alcanzado por el callo de fractura. Por ello, en los últimos años se están llevando a cabo en la Sección de Implantes e Instrumental Quirúrgico del Instituto de Biomecánica de Valencia (IBV) importantes esfuerzos por obtener información cuantitativa de dicho proceso, habiéndose centrado los estudios por un lado en la investigación y desarrollo de técnicas de monitorización de la fractura y, por otro, en la modelación teórica del hueso en reparación. >

Figura 1. Fijador externo experimental sobre espécimen óseo de tibia de conejo con osteotomía transversa.

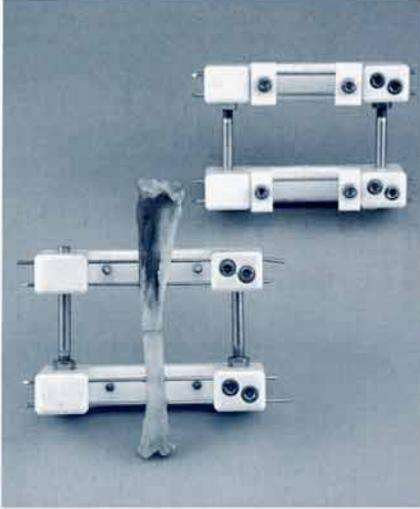


Figura 2. Modelo geométrico 3D por zonas del callo desarrollado a partir de variables dimensionales medidas en radiografía y TAC.

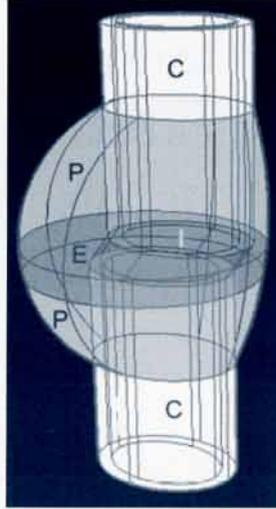
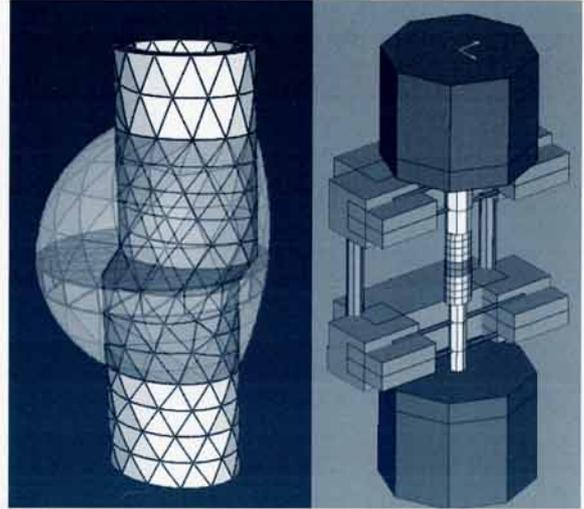


Figura 3. Malla de elementos finitos del modelo de callo de fractura y combinación con el modelo del sistema de fijación externa empleado.



>En el presente artículo se describe el trabajo realizado para desarrollar y validar un modelo teórico de callo de fractura que puede emplearse por un lado para estimar cuantitativamente el estado mecánico de la consolidación alcanzada por el callo en reparación y, por otro, para la evaluación biomecánica de sistemas de fijación externa. Esta evaluación biomecánica podría emplearse para diseñar mejores fijadores e incluso para adaptar pautas terapéuticas personalizadas en función del estado de reparación alcanzado.

En la **fase experimental** de este trabajo se ha obtenido información cuantitativa dimensional y densitométrica (a partir de imágenes de TAC y radiografía convencional), así como valores característicos de la evolución mecánica de callos experimentales en fracturas de tibia de conejo, estabilizadas mediante sistemas de fijación externa (**Figura 1**).

La fase de **modelación teórica**, que ha tenido como objetivo la generación de un modelo de elementos finitos del callo de fractura que reproduzca la evolución de las propiedades mecánicas del mismo, ha consistido en el desarrollo de un **modelo geométrico tridimensional** general (**Figura 2**) que permite considerar las características dimensionales esenciales del callo de fractura y en la generación de una **malla de elementos finitos** que incluya las propiedades del sistema de fijación empleado (**Figura 3**).

Una vez se ha validado el modelo, mediante el contraste de los valores de rigidez estimados por el modelo y los obtenidos experimentalmente, éste puede aplicarse, por un lado, para realizar modelos particularizados de

fracturas a partir de imágenes de radiografía y TAC y poder estimar el nivel mecánico de reparación alcanzado y, por otro, para evaluar la capacidad de evolución de los tejidos del callo de fractura en función de los parámetros de diseño del sistema de fijación empleado.

En la **figura 4** se puede ver mediante un corte transversal del modelo a nivel interfragmentario cómo se distribuyen las deformaciones unitarias bajo una carga fisiológica. Se observa que los valores máximos de esfuerzos mecánicos no se encuentran contenidos en los planos anatómicos y, por tanto, el empleo de modelos bidimensionales de uso muy extendido proporciona información muy limitada.

La aplicación del modelo tridimensional generado en combinación con la hipótesis de diferenciación tisular de Heigele y Claes (1997), que estima la tendencia de la evolución de diferentes tejidos en función del ambiente mecánico al que están sometidos, permite evaluar el efecto sobre el proceso de consolidación de diferentes parámetros de diseño de sistemas de fijación.

En la **figura 5** se observa que, al emplear un fijador externo con baja rigidez en las etapas iniciales de la consolidación, las cargas externas fisiológicas crean a nivel del callo un ambiente mecánico (de niveles de presión hidrostática y deformación unitaria) que de acuerdo a la hipótesis de diferenciación tisular impediría que en una zona del callo de tamaño considerable los tejidos no pudiesen diferenciarse hacia tejido óseo.

Sin embargo, al aplicar suplementos rigidizadores sobre el fijador externo las zonas donde la consolidación estaría comprometida se ven reducidas drásticamente (**Figura 6**).

Figura 4. Distribución de deformaciones normales en un corte transversal realizado a nivel interfragmentario bajo carga de compresión fisiológica.

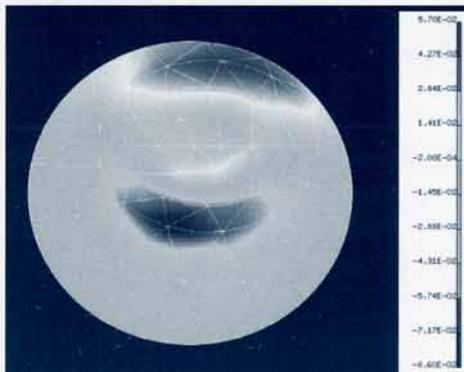


Figura 5. En color más oscuro se muestran dos zonas (una anterior más grande y una posterior) donde el modelo predice una evolución del tejido indiferenciado hacia tejido conectivo pero no hacia tejido óseo.



Figura 6. Al emplear un fijador con rigidez suplementada, prácticamente en la totalidad del callo, el tejido incipiente podría diferenciarse hacia tejido óseo mediante osificación directa (zona clara) o mediante osificación indirecta o endocondral (zona gris). En tono más oscuro se muestra la pequeña zona anterior a la que ha quedado limitada la zona de osificación comprometida.



Se ha aplicado el modelo en la evaluación biomecánica de diferentes variables de diseño de sistemas de fijación externa entre las que se encuentran:

- el material de los tornillos de fijación
- el diámetro de los tornillos
- el número de tornillos
- la luz de los tornillos
- la configuración (unilateral, bilateral o espacial)
- la dinamización axial

En la **figura 7** se muestran los valores máximos estimados por el modelo de presión hidrostática alcanzados en la zona de callo interfragmentaria. Se observa que de las combinaciones estudiadas únicamente el empleo de suplementos rigidizadores (topes), el empleo de agujas de mayor diámetro y la configuración espacial del fijador permitirían predecir una correcta evolución del callo en las etapas iniciales de la consolidación hacia tejido óseo.

A partir de los resultados obtenidos, se observa que la herramienta desarrollada y validada, aunque aún se encuentra alejada del mundo clínico, presenta una amplia potencialidad tanto en su aplicación en este campo, como en el del diseño de sistemas de fijación mejorados.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo que ha sido financiado parcialmente por el Ministerio de Industria y Energía (MINER) a través de la iniciativa ATYCA (Apoyo a la Tecnología, la Seguridad y la Calidad Industrial) en un proyecto de título "Modelo biomecánico de callo de fractura para la evaluación de sistemas de fijación", realizado durante los años 1997, 1998 y 1999 (R275/1997, R253/1998, R26/1999), y que ha contado con la colaboración de la empresa ERESA para la realización de las exploraciones de TAC, ha quedado plasmado en la tesis doctoral de título "Caracterización biomecánica del proceso de reparación de fracturas: Desarrollo de un modelo evolutivo de callo de fractura" presentada y defendida por Mario Comín en la UPV en el mes de julio de 2000.

Figura 7.

