Aplicación del análisis 3D de elementos finitos en el estudio biomecánico de la dentición de mamíferos. Análisis preliminar en *Procervulus ginsburgi* (Cervidae, Artiodactyla)

D. DeMiguel^{1, 2}, J. Cegoñino³, B. Azanza^{2, 1}, I. Ruiz³, J. Morales¹

RESUMEN

La combinación de las complejas estructuras y de los diversos materiales que integran los dientes, restringe nuestro conocimiento acerca de su biomecánica. En este sentido, el análisis de elementos finitos (AEF) es un método utilizado en ingeniería y en estudios biomecánicos para estimar el rendimiento y las variaciones producidas por las tensiones y las deformaciones en estructuras mecánicas o del esqueleto humano, así como en tejidos blandos. En contadas ocasiones se ha aplicado este método al problema de diseño biomecánico de animales y aún menos en grupos fósiles. En este trabajo presentamos los resultados preliminares obtenidos al generar un completo y complejo modelo en 3D de elementos finitos del molar superior de un ciervo extinto para estudiar su funcionalidad y propiedades mecánicas.

Palabras clave: 3D AEF, *Procervulus ginsburgi*, cargas oclusales, distribución de tensiones, análisis de desplazamientos y deformaciones.

ABSTRACT

The combination of complex structures and diverse materials, restricts our knowledge of the biomechanics of teeth. In this sense, finite element analysis (FEA) is a method used in engineering and biomechanical studies to estimate the performance and changes produced by regimes of stress and strain in mechanic structures or the human skeleton, as well as in soft tissues. On only rare occasions it is applied to the problem of biomechanical design in animals and even less in fossil groups. In this work, we advance the preliminary results obtained on creating a complete complex 3D finite element model of the tooth of an extinct deer in order to test its functionality and mechanical properties.

Key words: 3D FEA, *Procervulus ginsburgi*, occlusal loading, stress distribution, deformation and strain analysis.

Introducción

Sin lugar a dudas, una de las claves del éxito de los mamíferos ha sido su dentición. Otros muchos grupos de animales presentan dientes, pero la especialización de la dentición de los mamíferos y la capacidad de preparar material vegetal y animal para su digestión, ha sobrepasado con creces lo encontrado en otros grupos.

El aparato cráneo-dental de los rumiantes, grupo que nos concierne, muestra importantes y singulares modificaciones adaptativas para la ingesta de una dieta estrictamente vegetariana que, por su relativamente bajo contenido proteico y su alto contenido en fibra, requiere una masticación intensa y prolongada. Así, la versatilidad del patrón selenodonto de dentición y la hipsodoncia (tendencia a incrementar en altura la corona del diente) se traducen como res-

¹ Departamento de Paleobiología. Museo Nacional de Ciencias Naturales. CSIC. José Gutiérrez Abascal, 2. 28006 Madrid.

² Departamento de Ciencias de la Tierra. Área de Paleontología. Facultad de Ciencias. Universidad de Zaragoza. Pedro Cerbuna, 12. 50009 Zaragoza.

³ Departamento de Ingeniería Mecánica. Área de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras. Centro Politécnico Superior. María de Luna, 3. 50018 Zaragoza.

puestas adaptativas a un amplio abanico de dietas y hacia un modo de vida en hábitats con variable cobertera vegetal. Los rumiantes son por ello los macromamíferos que muestran mayor éxito evolutivo en la actualidad.

A grandes rasgos un molar superior de rumiante (fig. 1) está constituido por zonas elevadas (cúspides y estilos), que se identifican con diversos prefijos (*para-*, *meso-*, *meta-*, *proto-*, *hipo-*, *ento-*), y zonas deprimidas (fosetas y valles). Cuando el diente apenas está desgastado por su uso durante la masticación, las cúspides presentan forma de cresta afilada y sus ápices son puntiagudos (fig. 1b). Las cúspides pueden ser principales (*conos*) y secundarias (*cónulos*) y están constituidas por un pilar y dos crestas (*cristas*) que se disponen desde el pilar hacia los extremos anterior (*pre-*) o posterior (*post-*) del diente pudiendo o no conectar con un estilo (la «postprotocrista» es, por ejemplo, la cresta del protocono que se proyecta desde su pilar hacia la zona posterior del diente). Las crestas de los conos linguales configuran una forma de media luna dividiendo al molar en dos lóbulos separados por un profundo valle. De ahí, que el patrón morfológico de los molares de los rumiantes reciba el nombre de «selenodonto». La mayor o menor relevancia del grosor de las crestas labiales (o bucales) con relación al pilar del cono y estilos, se refleja en el relieve de la muralla externa del diente (fig. 1b). Existen otros elementos morfológicos de suma importancia en la sistemática de los rumiantes, tal es el caso de la existencia de arrugas o repliegues (*pliegues*, *cíngulos*) en las capas más superficiales del diente. Entre los que cabe destacar el «pliegue central» (fig. 1a), elemento característico de los molares superiores de los ciervos que en el curso de la evolución de este grupo reemplaza a la postprotocrista (Azanza, 2000).

El conocimiento de la biomecánica y morfología de la dentición es esencial no sólo para inferir su tipo de estilo alimenticio, sino también para deducir qué funciones desempeñan en el proceso de masticación estructuras de gran relevancia en sistemática y filogenia (como el pliegue central señalado anteriormente). Inferir la función de las estructuras dentales ha sido uno de los principales objetivos de muchos estudios paleontológicos, y varios métodos se han propuesto para guiar esta inferencia de la función a partir de la estructura (Rudwick, 1964).

Los análisis 3D de elementos finitos (Zienkiewicz, 1971) son una técnica de modelización matemática que examinan las distribuciones de las ten-

Fig. 1.—Esquema básico de la morfología y orientación de los molares superiores del ciervo extinto *Procervulus ginsburgi*. A) vista de la superficie de masticación (oclusal), y B) vista de la muralla externa.

siones y las deformaciones de un modelo geométrico compuesto por una malla de elementos a los cuales se les da unas propiedades materiales concretas. Este tipo de análisis comenzó a desarrollarse gracias a la industria aeronáutica, necesitada de una herramienta de análisis con la que abordar los complejos problemas de geometría y cargas que en ella se presentan. Gracias a su rápido desarrollo, el método fue aplicado con gran éxito a otros campos. Actualmente forma parte básica de la ingeniería moderna y es aplicable a toda clase de problemas, siendo una herramienta numérica muy poderosa para el análisis de estructuras, transferencia de calor, dinámica de fluidos o electromagnetismo.

Igualmente es una técnica de gran utilidad en la resolución de problemas de biomecánica y morfología. Su aplicación no obstante se ha centrado fundamentalmente en el campo de la biomedicina. De los muchos trabajos realizados sobre elementos finitos en morfología funcional de humanos, la mayoría se centran en estudios de la dentición (Ausiello *et al.*, 2001) y de prótesis de huesos (Couteau *et al.*, 1998). En lo referente a grupos fósiles, poco se ha realizado hasta la fecha. Reciente se ha aplicado a grandes rasgos en estudios sobre la biomecánica cráneo-mandibular de *Allosaurus* (Rayfield *et al.*, 2001) o sobre la biomecánica de los tabiques internos de la concha en ammonoideos (Hassan *et al.*, 2002).

Con este método de los elementos finitos, pretendemos abordar el estudio de las funciones que desempeñan las estructuras dentales de los rumiantes, cuya morfología varía a lo largo de la evolución de las distintas líneas, pudiendo llegar a desaparecer o ser relevados por otras estructuras. En este trabajo preliminar avanzamos los primeros resultados que hemos obtenido en esta novedosa línea de investigación.

Fig. 2.—Modelo sólido del segundo molar superior de *Procervulus ginsburgi*.

Materiales y métodos

Para este primer estudio, se modelizó un segundo molar superior de *Procervulus ginsburgi* Azanza, 1993. *Procervulus* Gaudry, 1878 es uno de los rumiantes con apéndices craneales más antiguo, registrándose por primera vez en el Mioceno inferior (MN 3) de Europa. El pliegue central, presente en el protocono de sus molares superiores (fig. 1a), ha sido considerado como una de las novedades evolutivas que le sitúan próximo a los verdaderos ciervos, bien como grupo hermano (Ginsburg, 1985) o bien como grupo basal (Azanza, 1993, 2000; Azanza *et al.*, 1999) de la familia Cervidae. La especie *P. ginsburgi* es una de las especies de *Procervulus* más antiguas y la mejor representada del Neógeno español. Se describió a partir del material recuperado en Artesilla (Villafeliche, Zaragoza), yacimiento ubicado en el área-tipo del Aragoniense (Cuenca de Calatayud-Daroca). Daams *et al.* (1999) sitúan la fauna de Artesilla en el Aragoniense inferior (Mioceno inferior, unidad MN 4, biozona C), estimando una antigüedad de 16,51 millones de años.

Generación del modelo sólido

El modelo sólido fue generado mediante la digitalización 3D de un segundo molar superior de *P. ginsburgi* y completado con datos bibliográficos acerca de la morfoestructura y de las propiedades estructurales de las diferentes capas que constituyen un diente (Hillson, 2005).

Para evitar el deterioro de la pieza dental original y facilitar el escaneado 3D dada la complicación de los molares de

rumiantes por la presencia de profundas fosas, se realizó una réplica de alta resolución en poliuretano y se dividió antero-posteriormente en dos mitades.

La digitalización 3D de la réplica se realizó mediante un proceso de inspección sin contacto, utilizando un sistema óptico tridimensional por luz blanca. Para poder realizar este digitalizado con la máxima exactitud y resolución, fue necesario el montaje de la pieza en una estructura que garantizase la alineación y el acceso del digitalizado por las zonas requeridas, prestando un mayor cuidado en las fosetas dentales, y la realización de barridos del objeto desde diversos puntos de vista.

Con toda la información procesada del digitalizado de la pieza, se obtuvo un modelo sólido (fig. 2) que necesitó de operaciones de edición para corregir pequeños errores (eliminar las zonas con defectos o elementos ajenos a la pieza), suavizar su geometría y simplificar algunos datos redundantes del escaneado.

Generación del modelo AEF

Tratado y optimizado el sólido, se redefinió su volumen mallando con elementos sólidos tridimensionales de tipo hexaedros, prismas de base triangular y tetraedros, resultando finalmente un modelo de 71.841 elementos y 43.748 nodos (fig. 3).

Una vez definida la morfología externa del molar y dado que el modelado en elementos finitos de cualquier sólido requiere que se simulen todos los componentes que lo integran, representamos los dos tipos de tejidos mineralizados que constituyen el esquema básico interno de un diente de mamífero; esmalte y

Fig. 3.—Modelo AEF del segundo molar superior de *Procervulus ginsburgi*.

dentina. Para este propósito, creamos una capa externa de 0,5 milímetros de espesor que simule el esmalte dentario y que limite con la parte interna que correspondería a la dentina.

Dada la semejanza histológica y estructural entre la dentición de bóvidos y cérvidos y debido a la ausencia de datos en la bibliografía para estos últimos, asumimos igualmente similitud en sus propiedades materiales (tal y como han asumido otros autores para grupos mucho más distantes, por ejemplo en Rayfield *et al.*, 2001), y asignamos a nuestro modelo las propiedades materiales correspondientes a los bóvidos (Lin & Douglas, 1994): un coeficiente de Poisson de 0.3 y un módulo de Young de 10.67 GPa para la dentina, y de 0.3 y 50.14 GPa, respectivamente, para el esmalte.

Simulación numérica

Dado que no se disponen de datos sobre la fuerza de mordida en los rumiantes, exploramos dos hipótesis de comportamiento del modelo AEF con diferentes fuerzas de mordida. En la simulación 1 (fig. 4; a-c) se utilizó una fuerza de mordida con carga oclusal por molar de 400 N equivalente a la de un humano

(Ausiello *et al.*, 2001), y en la simulación 2 (fig. 4, d-f) una carga de 694.6 N equivalente a la de un león (Thomason, 1991). En ambas simulaciones realizamos un análisis de compresión y otro de desplazamiento y deformación. Todos los análisis efectuados fueron elástico-lineales.

Para evaluar la distribución de las tensiones y las deformaciones en las simulaciones, anclamos el modelo por su base para reproducir el contacto entre la corona y las raíces fijadas al maxilar. Las distintas cargas a las que sometimos el sólido presentaron vectores verticales y fueron distribuidas a lo largo de las crestas dentales, para reproducir la oclusión con los molares inferiores.

Resultados

La figura 4 muestra los resultados numéricos obtenidos en las dos simulaciones efectuadas con diferente carga oclusal por molar. Con el fin de comparar ambas simulaciones y facilitar la interpretación de los resultados, realizamos una única escala equivalente de tensiones y de deformaciones.

Fig. 4.—Resultados numéricos obtenidos al explorar el comportamiento del modelo AEF con fuerza de mordida equivalente a la de un humano (carga oclusal por molar de 400 N, simulación 1) y con fuerza equivalente a la de un león (carga de 694.6 N, simulación 2). Los esquemas a, b y d, e muestran la distribución de tensiones von Mises (KPa) en perspectiva oclusal y labial. Los resultados de desplazamientos (mm) se detallan en vista oclusal mediante los esquemas c y f.

En la simulación 1, las tensiones von Mises medias de valor 54,7 MPa aparecen ampliamente distribuidas a lo largo de las crestas y pilares de los conos labiales (paracono y metacono), y de manera muy puntual en los estilos (parastilo y mesostilo). Sin embargo, en los conos linguales (protocono y metacónulo) las tensiones se distribuyen en las crestas más que en los pilares, siendo las crestas posteriores del protocono (postprocrista y pliegue central) las que muestran tensiones medias ligeramente más altas. En la simulación 2, con mayor carga oclusal por molar, las tensiones medias permanecen en las mismas zonas por suponer en ambas simulaciones un comportamiento elástico-lineal, sin embargo, aumentan sus valores hasta 90,9 MPa. En ningún momento se supera la tensión del límite elástico.

Los resultados de deformaciones máximas obtenidos a partir del análisis elástico-lineal muestran que las tensiones y las deformaciones son más importantes en los conos labiales (pilares y crestas) que en los linguales, siendo el pilar del paracono la zona que sufre un mayor desplazamiento tanto en la simulación 1, con valores de desplazamiento de 10 µm, como en la 2, con valores de 18 µm.

Discusión y conclusiones

En este trabajo pionero hemos aplicado el análisis 3D de elementos finitos en el estudio biomecánico de un segundo molar superior del ciervo extinto *Procervulus ginsburgi*, analizando la oclusión con los molares inferiores.

Para los dos niveles simulados de carga oclusal por molar, el estado tensional y de deformaciones presentan los mismos máximos debido a que el análisis realizado es elástico-lineal y, por tanto, proporcional.

En las dos simulaciones realizadas bajo distintas fuerzas de mordida, las cúspides labiales y en particular el paracono, son las que parecen soportar una mayor concentración de las tensiones y unas mayores deformaciones como consecuencia de la oclusión con las piezas dentales inferiores. Son precisamente estas zonas las que se encuentran reforzadas por estilos, especialmente el parastilo y mesostilo parecen absorber parte de las tensiones que afectan al paracono. De la misma manera, también se ven relacionadas con la distribución de las tensiones ciertas estructuras relevantes en la morfología del diente. Esto sucede con el pliegue

central, que absorbe parte de las tensiones que afectan a la postprotocrista. Llama la atención que las deformaciones en la postmetacónulocrista son algo mayores que las que se observan en la postprotocrista y pliegue central. En esta zona es frecuente la aparición de pliegues (pliegue del metacónulo en Azanza, 2000) y de hecho en algunos ejemplares de la población de Artesilla se observa un pequeño abultamiento en la postmetacónulocrista (inexistente en el ejemplar modelizado). Estos datos nos permiten plantear la hipótesis de que si la presencia de repliegues en el esmalte reduce o redistribuye las deformaciones en las crestas, el pliegue central (apomorfía que comparte *Procervulus* con la familia Cervidae) es una estructura cuya función adaptativa es absorber parte de las tensiones y deformaciones que afectan a la postprotocrista, la zona de mayor desgaste de los segundos molares superiores.

En estudios posteriores se analizarán las zonas de máxima tensión tangencial, relacionadas con el desgaste del diente, y se modificará el estado de cargas aplicado para simular mejor el proceso de masticación.

El análisis de los elementos finitos es una potente herramienta de estudio utilizada rutinariamente en ingeniería. Sin embargo, a la vista de los resultados, también es lo suficientemente práctica y eficaz como para ser aplicada con la misma frecuencia en paleontología, y en mayor grado en el estudio de vertebrados fósiles.

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestro más sentido agradecimiento y especial recuerdo hacia la doctora Dolores Soria, a quien le hubiese gustado ver los primeros resultados de la línea de investigación que iniciamos juntos. Deseamos dedicar este trabajo a su memoria. El trabajo se ha realizado en el marco del proyecto del MEC BTE2003-03001.

Referencias

- Ausiello, P., Apicella, A., Davidson, C. L. y Rengo, S. (2001). 3D-finite element analyses of cusp movements in a human upper premolar, restored with adhesive resin-based composites. *J. Biomech.*, 34: 1269-1277.
- Azanza, B. (1993). Sur la nature des appendices frontaux des cervidés (Artiodactyla, Mammalia) du Miocène inférieur et moyen. Remarques sur leur systématique et leur phylogénie. *C. R. Acad. Sci. Paris*, s. II, 316: 717-723.
- Azanza, B. (2000). *Los Cervidae (Artiodactyla, Mammalia) del Mioceno de las Cuencas del Duero, Tajo,*

- Calatayud-Teruel y Levante*. Memorias del Museo Paleontológico de la Universidad de Zaragoza, 8, 376 págs.
- Couteau, B., Hobatho, M. C., Darmana, R., Brignola, J. C. y Arlaud, J. Y. (1998). Finite element modelling of the vibrational behaviour of the human femur using CT-based individualized geometrical and material properties. *J. Biomech.*, 31: 383-386.
- Daams, R., Meulen, A. J. van der, Álvarez Sierra, M^a de los A., Peláez-Campomanes, P., Calvo, J. P., Alonso Zarza, M. A., Krijgsman, W. (1999). Stratigraphy and sedimentology of the Aragonian (Early to Middle Miocene) in its type area (North-Central Spain) *Newsl. Stratigr.*, 37: 103-139.
- Hassan, M. A., Westermann, G. E. G., Hewitt, R. A. y Dokanish, M. A. (2002). Finite-element analysis of simulated ammonoid septa (extinct Cephalopoda): Septal and sutural complexities do not reduce strength. *Paleobiology*, 28: 113-126.
- Hillson, S. (2005). *Teeth*. Second Edition. Cambridge University Press, 373 págs.
- Lin, C. P. y Douglas, W. H. (1994). Structure-Property Relations and Crack Resistance at the Bovine Dentin-Enamel Junction. *J. Dental. Res.*, 73: 1072-1078.
- Rayfield, E. J., Norman, D. B., Horner, C. C., Horner, J. R., May Smith, P., Thomason, J. J. y Upchurch, P. (2001). Cranial design and function in a large theropod dinosaur. *Nature*, 409: 1033-1037.
- Rudwick, M. J. S. (1964). The inference of function from structure in fossils. *British J. Phil. Sci.*, 15: 27-40.
- Thomason, J. J. (1991). Cranial strength in relation to estimated biting forces in some mammals. *Can. J. Zool.*, 69: 2326-2333.
- Zienkiewicz, O. C. (1971). *The Finite Element Method in Engineering Science*, McGraw-Hill, London, 521 págs.

Recibido el 27 de noviembre de 2006

Aceptado el 15 de diciembre de 2006