

LAS RELACIONES FORMA-FUNCIÓN EN BIOLOGÍA CONSIDERACIONES MECÁNICAS

Rafael Urrutia Zamudio*
José Luis del Olmo**
Rodolfo Limón Lasón***

Si consideramos el sistema ecológico que interacciona con los seres vivos, hemos de caer en cuenta que este medio ambiente es mecánicamente hostil, ya que fuerzas ambientales como la gravedad, presión y flujo de fluido y tensión superficial actúan continuamente sobre ellas. De este modo un organismo pequeño no estará en peligro de falla estructural por efectos de la gravedad, pero su vida será controlada en gran medida por los fenómenos fisicoquímicos de superficie, como la tensión superficial. La fuerza de gravedad es una amenaza que produce falla por flexión, principalmente en aquellos organismos que viven rodeados por aire; la reducción de masa en el sistema de sostén es el rasgo crítico que permite volar a las aves, mamíferos y grandes insectos.

Los grandes animales, particularmente los muy veloces como los gatos, perros y gacelas, han tomado medidas extremas en la especialización y uso de materiales de tracción, reducción en la cantidad y densidad de los materiales de compresión y mejoría en el diseño para reducir el peso.

Dado que la velocidad en tierra se consigue mediante patas o alas más largas y que la resistencia al pandeo requiere que al aumentar la longitud aumente desproporcionalmente el gro-

* Sección de Fisiología y Biomecánica. Departamento de Medicina del Deporte I.M.S.S., México.

** Departamento de Antropología Física. INAH. México.

*** Sección de Postgrado. ENEP, Iztacala, UNAM. México.

sor, pues el peso aumenta con el grosor, en la tierra hay un compromiso entre tamaño y velocidad, de tal manera que a diferencia del medio acuático el más grande no es el más rápido.

Las adaptaciones a la velocidad de un flujo líquido en los sistemas circulados están dados por variaciones en la resistencia y la rigidez. La propiedad del líquido que puede provocar falla en los biomateriales es el arrastre; a números de Reynolds mayores de 400 la interacción viscosa es menos importante que el gradiente de presión. Los organismos pueden evitar el arrastre excesivo siendo flexibles y doblándose con el flujo; esto explica la estructura, geometría y variación histológica en el sistema circulatorio de los mamíferos.

Durante la evolución, el fluido marino resultó útil como material de compresión, pero con el aumento de masa se hizo necesario la elaboración de materiales rígidos que resistieron la flexión, un escalón de este tipo permitió a los artrópodos y vertebrados poblar la tierra; la falta de este escalón en los moluscos, explica la carencia de éxito de estos animales para explotar ambientes terrestres de baja humedad y de alta velocidad del viento y factible desecación.

Los sistemas mecánicos de sostén de los organismos multicelulares son complejos en cuanto a que están conformados por más de un elemento estructural que además realiza otras funciones no estructurales, dificultando la tarea de separar las funciones de sostén de las otras.

Sin embargo tanto los sistemas sencillos como los complejos, tienen que resistir fuerzas de tracción de flexión y de compresión, todas ellas muy diferentes. La especialización de los materiales macromoleculares para resistir estas fuerzas es tan marcada como la especialización no mecánica de otras biomoléculas.

La consideración de la resistencia a la compresión y a la tracción explica la necesidad de hablar de un sistema de sostén en vez de esqueleto aunque, de hecho, los huesos solos no soportan ningún cuerpo sin la ayuda de los músculos y tendones que resisten la tracción.

La disposición espacial de una estructura mecánica considera los puntales, tirantes y vigas como elementos rígidos fundamentales. La mejoría estructural suele considerar criterios geométricos, de simetría, de peso mínimo, gasto mínimo, desgaste, fiabilidad y costo metabólico.

Los seres vivos poseen, con frecuencia, una organización estructural que no parece ser la mejor, lo que nos llevaría a cuestionar la importancia de la diferencia entre la estructura ideal y la teórica, probablemente esta diferencia nos informaría de aquellos detalles que no fueran considerados en el modelo teórico.

El teorema básico empleado en el análisis de estructuras ideales fué propuesto por Maxwell (1890), el cual demuestra que si se diseñan estructuras tridimensionales en las que todos los elementos estén sometidos a tracción o bien a compresión, entonces la estructura tendría un peso mínimo.

Parkes (1965) señaló que redes, como la espiral equiangular y el abanico circular, están muy próximas al peso mínimo y que cuando estas estructuras soportan cargas concentradas, la solución óptima está dada por la estructura de Michell (fig. 1).

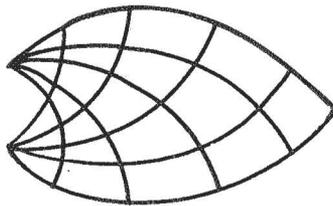


Fig. 1: La estructura de Michell (1904).

Este modelo es muy similar a la distribución de las trabéculas en el hueso esponjoso de la cabeza del fémur.

En la locomoción de los animales largos y delgados la división de la musculatura y de la cavidad corporal en series idénticas de segmentos, supone una ventaja estratégica frente a los no segmentados ya que se facilita la transmisión de la información nerviosa y un control sencillo y eficaz de movimientos como la marcha o la carrera.

La disposición ósea y distribución de músculos y ligamentos de la columna vertebral de los cuadrúpedos, está planeada para transmitir la fuerza gravitatoria del peso corporal en forma de tensiones de compresión hacia la cintura pélvica y escapular; por eso la tendencia de los grandes animales terrestres de aumentar la cantidad y proporción de materia ósea en la espina.

El mecanismo antigravitacional de los cuadrúpedos obliga a mantener múltiples articulaciones de las extremidades en flexión parcial por medio de la actividad muscular siendo ésta una solución bioenergéticamente costosa. La excepción sería el elefante, cuyas extremidades funcionan como columnas estáticas para sostener su gran peso; en relación con su tamaño la musculatura de sus extremidades es diminuta y ni siquiera le permite saltar a cortas distancias.

En los cuadrúpedos muy veloces, la columna vertebral se flexiona con cada paso del galope; ésto agrega una longitud a la zancada, mayor que la esperada si el cuerpo se flexionara. En los cuadrúpedos galopantes y saltadores las características hidrostáticas de la cavidad abdominal cuya presión interna está controlada por el diafragma y los músculos abdominales externos, proporciona un componente útil, resistente a la compresión, que contribuye a la rigidez o enderezamiento de la columna vertebral.

De todos los mamíferos el hombre ha adoptado el mecanismo antigravitacional más económico una vez que alcanza la postura erecta, durante la cual la actividad muscular es mínima.

Aunque en la postura bípeda actúan varias articulaciones, es la estructura de la columna vertebral la principal responsable de la misma, la unidad funcional está constituida por la unión vértebra-disco-vértebra, la porción lumbar se encuentra sometida a cargas significativamente mayores que el resto; las fuerzas compresivas importantes frecuentemente fracturan el cuerpo vertebral antes de que el disco intervertebral sea dañado, el núcleo pulposo recibe la fuerza compresiva y el anillo fibroso la fuerza de tensión. Esta habilidad para almacenar y distribuir las cargas decrece con la degeneración del disco. Las propiedades mecánicas del cartílago derivan de su organización hidrostática (gel de proteoglicano y malla de colágeno), que actúa como un material que tiende a mantener la forma, pero es capaz de resistir las fuerzas de compresión y de tensión.

La estructura y propiedades mecánicas de los materiales rígidos poseen compuestos básicos unidos en forma covalente, se encuentran en forma cristalina y tienen tendencia no deseable a la fractura; para compensar esta tendencia los biomateriales se han combinado con material viscoso-elásticos, linealmente elástico.

El hueso formado por un tercio de su peso seco en colágeno, un sistema proteína-polisacárido-glicoproteína y fosfato cálcico en forma imperfecta de hidroxiapatita, representa el principal componente de sostén del cuerpo humano. Su curva de carga-deformación ante un ensayo de tracción rápido, muestra un tramo elástico recto y un punto de cesión bien definido, el comportamiento elástico se debe a los escasos componentes viscoso elásticos los cuales le permiten soportar una deformación de 4% y absorber hasta seis tantos de energía, antes de ceder.

Los animales activos experimentan más cargas dinámicas que los débiles y no es sorprendente que los vertebrados hayan desarrollado materiales esqueléticos resistentes.

Se sabe que la rigidez del hueso depende críticamente del contenido de mineral del mismo, a mayor mineralización más rigidez y resistencia estática; sin embargo, la forma de absorber y almacenar la energía durante la carga estática y el impacto, muestra que un tejido excesivamente mineralizado se comporta como una estructura frágil a la fractura, solamente en huesos que no cargan se presenta una especial mineralización como es el caso de los huesecillos del oído de la ballena.

El hueso es muy sensible a la concentración de tensiones debido a que el flujo plástico que rodea una zona de muesca no es lo suficientemente grande. Cuando la carga repetida produce una fractura que no se hubiera producido con carga única, se habla de falla o fractura por fatiga; los médicos ortopédicos llaman a las fracturas por fatiga, fractura por tensión, las que son muy difíciles de investigar en cuanto a la capacidad del cuerpo para reparar las fracturas incipientes.

Piekarski (1970) aplicó carga al hueso de manera especial y logró producir una fractura que avanzaba lentamente, la cual permitía observar el comportamiento y distribución de la grieta; sin embargo la progresión de la fractura necesitaba de un aporte de energía mayor del habitual, este hecho casa con los principios de la termodinámica que exigen mayor aporte de energía para la creación de nuevas superficies; de hecho una fractura en el hueso es un aumento de la superficie del mismo.

REFERENCIAS

MAXWELL, J.C. (1880). *Scientific Papers*, Cambridge Univ. Press, Londres. Vol. 2.

MICHELL, A.G.M. (1904). The limits of economy of material in frame structures. *Philos. Mag.* 8: 589-597.

PARKES, E.W. (1965). *Braced Frameworks*. Pergamon Press, Oxford.

PIEKARSKI, K. (1970). Fracture of Bone. *J. Appl. Physics.* 41: 215-223.