

BIOMECÁNICA DE LA COLUMNA VERTEBRAL Y SISTEMAS DE REPARACIÓN (I)

Por Sección de Implantes

INSTITUTO DE BIOMECÁNICA DE VALENCIA

El raquis es una estructura constituida por vértebras, ligamentos, discos intervertebrales y músculos. Las vértebras se articulan entre sí de forma controlada a través de los discos intervertebrales, formando un complejo sistema mecánico con barras (vértebras), articulaciones (carillas articulares y discos), elementos pasivos (ligamentos) y elementos activos (músculos). El raquis por sí solo sufriría grandes deformaciones frente a cualquier tipo de carga. Para evitarlo, es necesario la actuación de fuertes masas musculares que proporcionen la rigidez y estabilidad que esta estructura posee *in vivo*. Se ha observado que la aplicación de una fuerza de compresión de 2 kg hace pandear el raquis aislado, produciendo una deformación permanente del mismo cualquier carga adicional. Sin embargo, *in vivo*, puede soportar hasta 1400 kg de carga axial (en atletas de élite), debido principalmente a la acción muscular.

La columna vertebral realiza tres funciones biomecánicas básicas. En primer lugar, transfiere el peso y las cargas mecánicas externas, soportadas por la cabeza, el tronco y los brazos, hacia las extremidades inferiores. Además, posibilita el movimiento entre la cabeza, el tronco y la pelvis. Y finalmente, protege la delicada médula espinal de fuerzas y desplazamientos potencialmente peligrosos producidos por movimientos fisiológicos o traumáticos.

Mientras que en el plano frontal, el raquis aparece normalmente recto y simétrico, en el plano lateral aparecen cuatro curvatu-

En la primera parte de este artículo se pretende dar una visión general de la fisiología, biomecánica y alteraciones del raquis, con ánimo de facilitar la lectura de la segunda parte en la que se analiza el funcionamiento de los distintos sistemas de reparación utilizados en la columna vertebral.

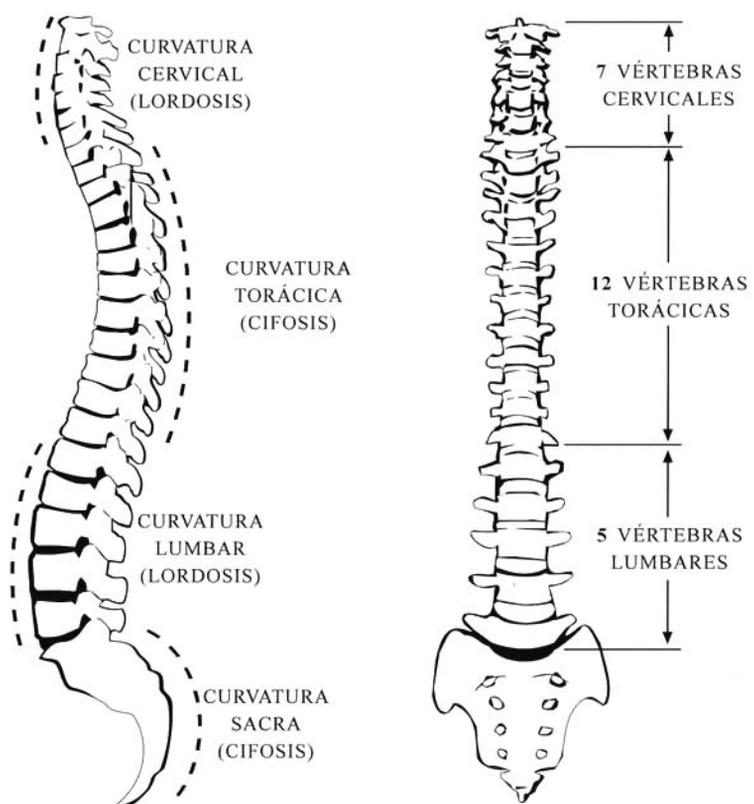


FIGURA 1. Vista frontal y lateral del raquis humano

ras fisiológicas. Estas curvas son convexas anteriormente (lordosis) en las zonas cervical y lumbar, y convexas posteriormente (cifosis) en las zonas torácica y sacra (Figura 1). El hombre, que es el único animal cuya locomoción se encuentra localizada únicamente en los miembros inferiores es asimismo el único que posee lordosis lumbar y cervical

y, por tanto, dicha curvatura cabe atribuirle a una adaptación de su columna vertebral a la posición de bipedestación. Con la edad, la forma de la curva raquídea tiende a una cifosis general. En parte, esto se debe a que la forma de la columna está determinada principalmente por los dis-



cos intervertebrales, y en mucha menor medida por los cuerpos vertebrales. Consecuentemente, cuando los discos degeneran y reducen su espesor, las curvas lordóticas tienden a desaparecer.

Una vez definidas las estructuras que integran el raquis, el siguiente paso para comprender su comportamiento biomecánico es conocer la cinemática y las cargas mecánicas que soporta.

El raquis puede realizar desplazamientos según las tres direcciones del espacio y giros alrededor de los tres ejes. Los patrones de movimiento del raquis son: la flexo-extensión contenida en el plano sagital compuesta de rotaciones y traslaciones, la flexión lateral que incluye rotaciones y traslaciones contenidas en el plano frontal y la rotación axial que es un movimiento de rotación puro alrededor del eje longitudinal de las vértebras. En ausencia de solicitaciones externas, la movilidad del raquis se debe a la actuación de la musculatura, de forma que los músculos agonistas inician el movimiento, mientras que los antagonistas lo controlan.

El raquis puede dividirse en las siguientes zonas:

- La región cervical que comprende el complejo occipital-atlas-axis (C0-C1-C2) y la zona cervical media-inferior (C2-T1).
- La región torácica o dorsal, en la que se distinguen las siguientes zonas: la superior (T1-T4), la media (T4-T8) y la inferior (T8-T12).
- La región lumbar que se divide en: la zona lumbar (L1-L5), la zona lumbosacra (L5-S1) y la región sacroilíaca.

El movimiento global del raquis puede considerarse como la acción combinada de un conjunto de unidades vertebrales funcionales, cuyo rango y tipo de movilidad vertebral de un nivel a otro depende básicamente de la orientación de las carillas articu-

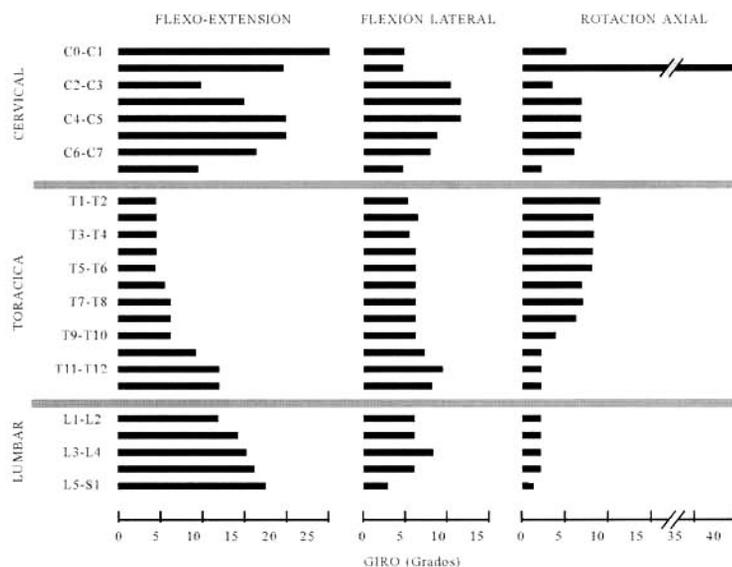


FIGURA 2. Rangos de movimiento de cada uno de los segmentos del raquis

lares. En la figura 2 se muestran los rangos de movimiento de todos los segmentos del raquis. Excluyendo la zona cervical, el rango de flexo-extensión aumenta progresivamente hacia la región lumbar, la flexión lateral presenta un máximo en los segmentos dorsales inferiores, siendo prácticamente nula en la zona lumbar, y la rotación axial es máxima en los segmentos dorsales superiores y mínima en la zona lumbar.

La zona cervical presenta dos zonas claramente diferenciadas: el complejo occipital-atlas-axis (C0-C1-C2) y el raquis cervical medio e inferior (C2-T1). En la primera zona la rotación axial suma el 60% de la rotación axial de la zona cervical, siendo también importante el rango de flexo-extensión. En la segunda zona, la mayor parte del movimiento de flexo-extensión se encuentra en la zona central, en particular en las articulaciones C4-C5-C6. Para los movimientos de flexión lateral y rotación axial, existe una tendencia a la disminución de los rangos de movimiento en dirección caudal.

Cuando un individuo realiza una determinada tarea, sobre el raquis actúan un conjunto de cargas que genéricamente pueden clasificarse en externas e internas. Las cargas externas in-

cluyen las debidas propiamente a la tarea (como el levantamiento de pesos o desplazamiento de los mismos) y las debidas al peso propio de los segmentos corporales. Las cargas internas son todas aquellas que se desarrollan para mantener el raquis en equilibrio. En este grupo se encuentran las fuerzas musculares, las de los ligamentos, la debida a la presión abdominal y las de reacción entre los elementos del raquis.

Una caracterización completa del raquis requiere conocer las cargas internas que sufren los elementos del raquis bajo cargas externas conocidas, pues además del interés puramente científico hay múltiples evidencias que indican que las cargas mecánicas que soporta el raquis están directamente relacionadas con la etiología de diversas patologías. Con este objetivo existen modelos biomecánicos analíticos que permiten conocer los valores que alcanzan dichas cargas al realizar un ejercicio determinado.

El modelo más sencillo consiste en suponer que las cargas externas generan un momento externo y una fuerza de compresión intervertebral (F_c), equilibra-



Implantes

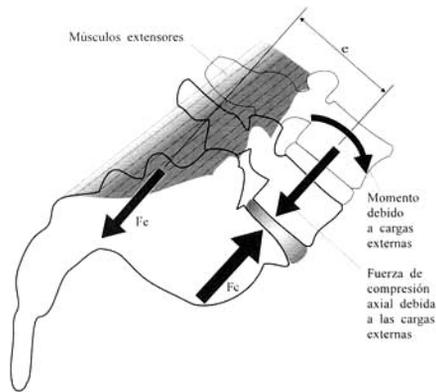


FIGURA 3 Modelo simplificado de las cargas que actúan a nivel lumbar

dos por una única fuerza extensora debida a los músculos paravertebrales (F_e) que actúa con un determinado brazo de palanca (generalmente considerado de $e=5$ cm). Para simplificar aún más el modelo se considera que todas las fuerzas están contenidas en el plano sagital (Figura 3).

Mediante este modelo simple puede determinarse la fuerza de compresión a nivel de L5-S1, así como la influencia que tienen la magnitud del peso que se levante y la distancia del mismo al cuerpo (Figura 4). Puede observarse que en una persona que levanta un peso de 20 kg a una

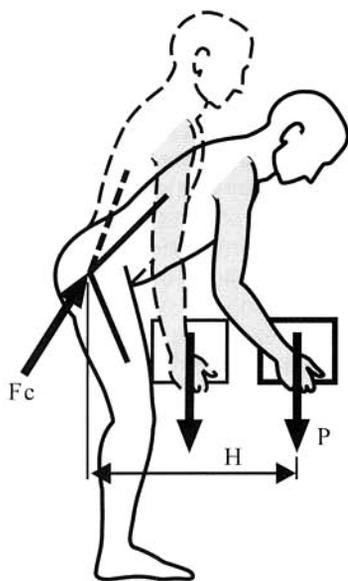


FIGURA 4. Efecto de la variación del peso externo soportado y del brazo de palanca del mismo sobre la carga de compresión intervertebral a nivel de L5-S1

distancia de 20 cm, su columna tendrá que soportar 250 kg, mientras que si la distancia aumenta a 50 cm la columna tendrá que soportar una carga cercana a los 600 kg. Se debe tener en cuenta que el valor medio de la resistencia a compresión de una vértebra antes de lesionarse es de 500 kg. Por tanto, no sólo el aumento de peso es peli-

groso para la integridad de nuestras vértebras sino también el aumento de la distancia del peso al cuerpo.

Si se desea conocer la repercusión que dichas cargas tiene sobre las estructuras de la columna, es necesario recurrir a modelos de elementos finitos (Figura 5). Este método aborda la resolución del estado tenso-deformacional de estructuras complejas sometidas a cargas, mediante la descomposición del modelo en un conjunto de elementos conectados entre sí, denominado malla de elementos finitos, para los que se resuelven de forma aproximada las ecuaciones que proporciona la ciencia de los materiales.

De todo lo anterior se deduce

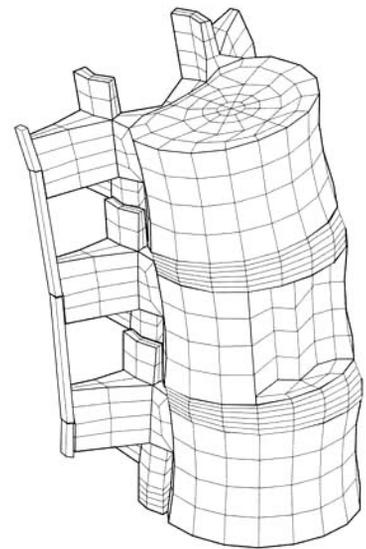
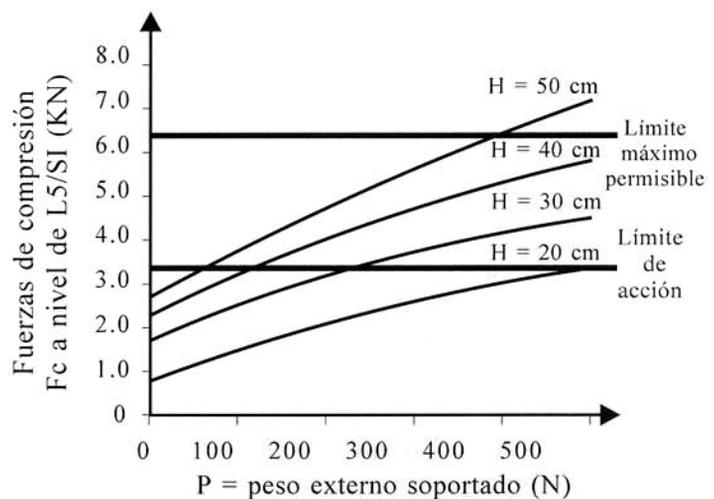


FIGURA 5. Modelo de elementos finitos de dos discos y tres vértebras. En la vértebra central se simula una posible fractura en el cuerpo vertebral

que el raquis y los elementos que lo componen son estructuras sometidas a sollicitaciones muy elevadas y, por tanto, son muy susceptibles a sufrir gran número de patologías y lesiones, pudiéndose agrupar en función de su etiología en:

- Lesiones traumáticas.
- Patologías degenerativas.
- Deformidades del raquis.



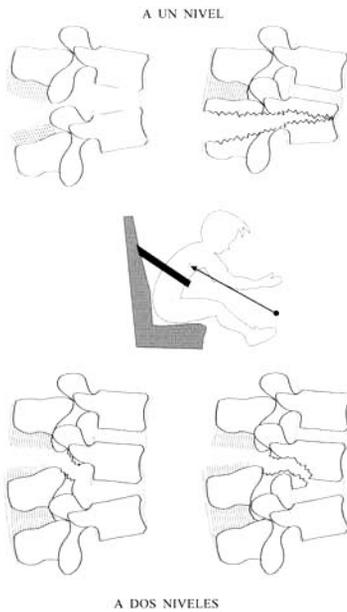


FIGURA 6. Lesiones por cinturón de seguridad

Lesiones traumáticas

Si consideramos las cargas implicadas en los mecanismos de lesión, se observa que éstas se producen predominantemente por fuerzas y momentos contenidos en el plano sagital. Una fractura muy común en este plano es la lesión por cinturón de seguridad, producida como resultado de una deceleración rápida de un vehículo, teniendo el pasajero el cinturón colocado (Figura 6). Como consecuencia se produce una flexión anormalmente grande de la zona lumbar, que genera una rotura de los ligamentos posteriores y en el peor de los casos una rotura de la vértebra.

Otro tipo de fracturas muy comunes son las de compresión y las de estallido. Las primeras están causadas por fuerzas de compresión axiales aplicadas sobre los cuerpos vertebrales, por momentos de flexión o por una combinación de ellos. Las fracturas por compresión van asociadas a diversos grados de acuñamiento de los cuerpos vertebrales. En las segundas se acepta que el mecanismo de lesión es semejante al de una fractura de compresión, pero aso-

ciado a impactos de alta energía.

Patologías degenerativas

La degeneración discal conlleva una destrucción de las fibras anulares normales, hasta tal punto que el disco ya no es capaz de llevar a cabo una función mecánica adecuada. El fenómeno puede ir asociado a procesos artríticos degenerativos de los cuerpos vertebrales y/o de las articulaciones intervertebrales. En muchos casos la degeneración discal desemboca en una degeneración extrema del núcleo produciendo dolor de espalda, o la degeneración se estabiliza quedando dañadas las estructuras del disco. En este último caso se pueden generar distribuciones anormales de carga en el disco, que pueden dañar sus fibras y producir una hernia discal (Figura 7). A menudo aparece dolor al presionar la hernia discal contra alguna raíz nerviosa del canal medular.

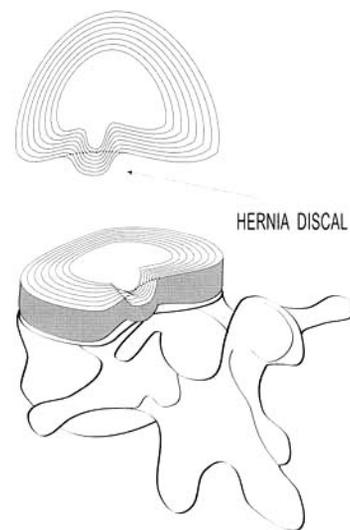


FIGURA 7. Hernia discal

Deformidades del raquis

La deformidad más relevante de la columna vertebral es la escoliosis. Corresponde a una alteración de la morfología del raquis en los tres planos del espacio, en la que se asocia una curvatura o flexión lateral (en el plano frontal) con una rotación

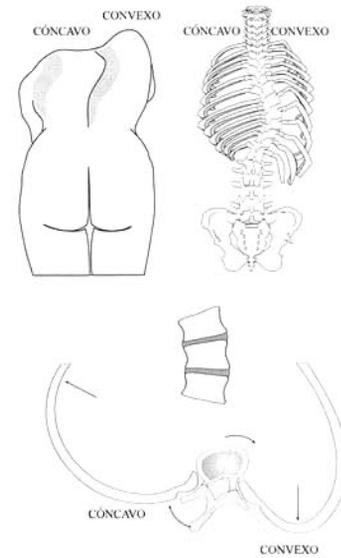


FIGURA 8. Cambios morfológicos habituales en la escoliosis

vertebral en el plano transversal (Figura 8). En la mayoría de los casos no es posible hallar una causa concreta que justifique la escoliosis; se habla entonces de escoliosis idiopática. No obstante existen distintos tipos de escoliosis que corresponden a etiologías conocidas, como es el caso de las escoliosis paralíticas.

El grave desequilibrio muscular que acontece en las parálisis asimétricas por poliomielitis es una causa de escoliosis conocida desde hace mucho tiempo. En estos casos, la curva se desarrolla por una mayor tracción de los músculos de un lado sin oposición de los músculos del lado contralateral de la columna.

Otras deformidades importantes son aquéllas que se producen preferentemente en el plano sagital (cifosis y lordosis) y la espondilolistesis que se asocia con una traslación anterior de la vértebra afecta respecto a la vértebra adyacente inferior.

En la segunda parte de este artículo se analizarán los diferentes tratamientos, tanto ortopédicos como quirúrgicos, de la columna vertebral, así como criterios de evaluación y diseño de los implantes de raquis.

□