

Biomecánica clínica de la columna

R.C. MIRALLES MARREROA

La columna es un sistema dinámico compuesto por elementos rígidos, vértebras, y elementos elásticos, discos intervertebrales. Este sistema mecánico tiene que reunir a la vez las cualidades de resistencia y de elasticidad, ya que tiene que absorber las presiones que sobre ella se ejercen, tanto en los movimientos cotidianos, como en los ejercicios físicos más duros. Según White y Panjabi, las tres funciones de la columna son: permitir movimientos entre sus elementos (unidades funcionales), soportar pesos y proteger la médula y las raíces nerviosas.

Exceptuando el espacio comprendido entre la primera y segunda cervicales, entre los cuerpos vertebrales de las restantes se hallan los discos intervertebrales. El tamaño de estos discos suma, aproximadamente, un cuarto del total de la longitud de la columna hasta el sacro. Una deshidratación de estos discos provocará una disminución de entre 1,5 y 2 cm de la estatura total del individuo. En los individuos de edad avanzada se suele acompañar, además, de hundimientos vertebrales y aumento de la cifosis dorsal.

Las vértebras así constituidas y superpuestas delimitan tres pilares funcionales a lo largo del raquis. Un pilar anterior, constituido por la superposición de todos los cuerpos vertebrales, y dos columnas posteriores constituidas por la superposición de las apófisis articulares, que forman los pilares posteriores funcionales del raquis.

PILAR ANTERIOR DE LA COLUMNA

Está constituido por los cuerpos vertebrales y por los discos intervertebrales. Este pilar anterior es de soporte (vértebras) y elasticidad (discos).

Hospital Universitari Sant Joan
Facultat de Medicina i Ciències de la Salut
Universitat Rovira i Virgili
Reus, Barcelona

El cuerpo vertebral es un hueso corto, con el interior de tejido óseo esponjoso y una fina capa de hueso cortical que lo rodea. La capa cortical es más densa en las caras vertebrales, superior e inferior. En su interior se identifican las trabéculas que siguen las líneas de fuerza que atraviesan el hueso. Existen trabéculas de dirección vertical, que unen la cara superior y la inferior, otras horizontales, que unen las corticales laterales, y también hay dos sistemas de líneas oblicuas o fibras en abanico. Las trabéculas horizontales se dirigen desde la cara superior del cuerpo vertebral, pasando por los dos pedículos, hasta la apófisis articular superior y la espinosa, y desde la cara inferior del cuerpo vertebral, pasando por los pedículos, hasta la apófisis articular inferior y la espinosa.

El entrecruzamiento de estos sistemas trabeculares establece puntos de fuerte resistencia en los pedículos. Pero también puntos de menor resistencia, como el triángulo que se forma a nivel de la parte más anterior del cuerpo vertebral, donde sólo existen trabéculas verticales, y que es el lugar de asentamiento de fracturas por flexión.

Entre los dos cuerpos vertebrales adyacentes existe una articulación tipo anfiartrosis, que une las dos caras vertebrales mediante el disco intervertebral. Este disco es un sistema amortiguador, pretensado y cerrado, constituido por una parte central denominada núcleo pulposo, y una periférica llamada anillo fibroso. No existe una separación clara entre el núcleo y el anillo, sino que la parte más periférica del núcleo se confunde con la parte más profunda del ani-

Dirección para correspondencia:

Rodrigo C. Miralles Marreroa
Hospital Universitari Sant Joan
Facultat de Medicina i Ciències de la Salut
Universitat Rovira i Virgili
Reus, Barcelona

llo. La función fundamental es mantener separadas las dos vértebras y permitir movimientos de balanceo entre ellas. En las caras vertebrales de las vértebras adyacentes existen también dos capas de cartílago que las recubren, que forma la placa terminal vertebral y es parte integrante del disco.

El núcleo pulposo es una masa gelatinosa de material mucoide muy hidrófilo. En ella se han identificado mucopolisacáridos, que son moléculas compuestas por dos tipos de monosacáridos alternantes. La unión de estos mucopolisacáridos a determinadas cadenas polipeptídicas forma los proteoglicanos, grandes moléculas de glucoproteínas, cuya función principal es la de absorber y retener agua como una esponja. El 70-90% del núcleo es agua, el 65% de su peso seco son proteoglicanos y del 15 al 20% es colágeno. La capacidad del disco intervertebral para resistir compresiones depende de su contenido en proteoglicanos.

Biomecánicamente, la naturaleza fluida del núcleo hace que, bajo compresiones, intente deformarse y transmitir la presión aplicada en todas direcciones, como lo haría un balón relleno de líquido. En su interior no existen ni vasos ni nervios. Los vasos ya han desaparecido en el disco a la edad de 4 años.

El anillo fibroso consiste en capas concéntricas sucesivas de fibras colágenas, ordenadas oblicuamente con 30° de inclinación a derecha e izquierda de forma alternante entre cada capa, lo que hace que sean prácticamente perpendiculares entre sí. Esta arquitectura le da la capacidad de soportar compresiones, pero está mal preparado para los cizallamientos. El anillo es más grueso en la parte anterior que en la posterior en las zonas de lordosis (cervical y lumbar).

El agua representa el 60-70% de su peso y el colágeno constituye el 50-60% del peso seco. En el núcleo predomina el colágeno tipo II (de naturaleza elástica) y en el anillo domina el colágeno tipo I capaz de soportar tensiones.

Los movimientos que se producen en el disco son debidos a su propia elasticidad (estructura pretensada) y a la forma y orientación de las articulaciones zygoapofisarias. Tiene una deformación viscoelástica debida a la entrada y salida de fluidos por la diferencia entre la presión mecánica y osmótica. Este comportamiento viscoelástico contribuye a las modificaciones de altura durante las primeras horas del día.

PILAR POSTERIOR

Está constituido por la superposición de las articulaciones zygapofisarias y los istmos. A diferencia de las articulaciones intersomáticas, éstas son sinoviales, característica que implica movimiento. Las articulaciones zygapofisarias están formadas por la apófisis articular inferior de una vértebra y la apófisis articular superior de la vértebra inmediatamente inferior.

Las superficies articulares pueden ser planas o estar ligeramente curvadas en el plano transversal y están recubiertas de cartílago articular. El papel mecánico de las superficies articulares es el de freno y orientador del movimiento, el de contribuir a la transferencia de cargas, y resisten torsiones y cizallamiento. A nivel lumbar las carillas articulares y los discos contribuyen en un 80% a la estabilidad.

En hiperextensión de la columna las articulaciones en faceta absorben una cantidad muy significativa de las presiones que se ejerzan sobre la columna.

La capacidad de movimiento que se puede generar a nivel del disco (como amortiguador) y de las articulaciones interapofisarias es alto, por ello Junghans denominó segmento móvil a la zona limitada por el disco, agujero de conjunción y articulaciones, con sus ligamentos.

La transmisión de pesos a lo largo de la columna se realiza en las zonas lordóticas sobre el pilar posterior y en las cifóticas a través del pilar anterior.

La orientación de las carillas articulares es distinta dependiendo del segmento de columna donde nos encontremos, lo que parece que influencia el comportamiento cinemático de la columna.

A nivel torácico, las facetas articulares son verticales y tienen una orientación circular que no impide el movimiento rotatorio entre dos vértebras adyacentes, siendo las costillas las que limitarán este movimiento. Aproximadamente, se hallan orientadas 60° con respecto al plano transversal y 20° con respecto al frontal. Pueden realizar movimientos de lateralización y rotación, así como ligeros movimientos de flexoextensión. A nivel de la última dorsal y primera lumbar se produce un cambio en la orientación de las facetas, que pasan a tener una dirección radial, cosa que limita las rotaciones axiales.

En la región lumbar baja, las facetas articulares están ligeramente desplazadas hacia el plano frontal, dirigidas hacia atrás y adentro, por lo que se encuentran casi enfrentadas, lo que permite perfectamente las rotaciones axiales y, además, están mejor adaptadas a soportar las fuerzas de cizallamiento debidas a la orientación oblicua hacia delante de los discos intervertebrales de L4-L5 y de L5-S1. En esta región tienen una orientación de 45° con respecto al plano frontal y 90° con respecto al transversal, y se pueden realizar movimientos de flexión, extensión y lateralizaciones, pero no de rotaciones.

ELEMENTOS ESTABILIZADORES PASIVOS

A nivel del pilar anterior y situados entre los cuerpos vertebrales están el ligamento longitudinal anterior y el ligamento longitudinal posterior.

El ligamento longitudinal anterior es una fuerte banda de fibras que se extiende a lo largo de la cara ventral de la columna vertebral, desde el cráneo hasta el sacro, cubriendo las caras anteriores de los cuerpos vertebrales y los discos intervertebrales.

A causa de su disposición longitudinal, este ligamento sirve principalmente para soportar las separaciones entre los cuerpos vertebrales, siendo más eficaz durante los movimientos de extensión de la columna, aunque su resistencia no es uniforme, ya que es más resistente en sus inserciones sobre los platillos vertebrales que entre ellas. La resistencia del ligamento longitudinal anterior es el doble que la del longitudinal posterior.

El ligamento longitudinal posterior se extiende a lo largo de toda la columna siguiendo la cara posterior de los cuerpos vertebrales y los discos. Forma una banda estrecha central, que se expande lateralmente en la parte posterior de los discos intervertebrales, dándole el aspecto de una sierra dentada. Sus fibras se mezclan con las del anillo fibroso. Se opone a la separación de las caras posteriores de los cuerpos vertebrales.

Los ligamentos situados en el pilar posterior son el ligamento amarillo, el ligamento interespinoso y el supraespinoso.

El ligamento amarillo es una estructura ligamentosa par, corta y gruesa, que une las láminas de vértebras

consecutivas. Histológicamente está formado por un 20% de fibras de colágeno y un 80% de elastina.

El ligamento amarillo se tensa en flexión, en flexión lateral, pero prácticamente nada en los giros laterales.

Los ligamentos interespinosos unen entre sí las apófisis espinosas adyacentes y se oponen a la separación de las apófisis espinosas y limitan los movimientos de deslizamiento hacia delante de las articulaciones intersomáticas, aunque solamente entra en carga hacia el final de la flexión.

El ligamento supraespinoso está situado en la línea media, saltando entre los vértices de las apófisis espinosas y los espacios espinosos y se opone también a la separación de las apófisis espinosas y, por tanto, también se oponen a los movimientos de deslizamiento hacia delante de los cuerpos vertebrales.

Los ligamentos de la columna presentan una abundante inervación. Han sido identificados mecanorreceptores en el ligamento longitudinal anterior y en las dos o tres capas más periféricas del *anulus* y tiene importancia en la información sobre la postura.

BIOMECÁNICA

Conceptualmente la estabilización de la columna es debida a tres subsistemas, uno pasivo, otro activo y un control neural de retroalimentación (*feedback*). El sistema pasivo es la columna osteoarticular en sí, el activo es el formado por los músculos y tendones, y el neural es un mecanismo transductor localizado en los ligamentos, tendones y músculos que soportan la columna, junto con los centros neurales de control. Las presiones que puede soportar la columna, dependiendo de la flexión que se encuentre o del peso que soporte, pueden llegar a ser de 5.000 a 8.000 N. En condiciones normales los segmentos más inferiores soportan 2.100 N, es decir, entre dos y tres veces el peso corporal.

Los cambios diurnos modifican la cantidad de líquidos de la columna y con ello su resistencia. El disco se deshidrata y se hace más elástico, protruye más, es más laxo a la compresión y flexible a la inclinación. Por ese motivo existen unos sofisticados mecanismos de control suplementario de la columna.

Aponeurosis toracolumbar

Se trata de un sistema importante de protección de la columna. Consiste en tres hojas aponeuróticas que envuelven los músculos de la columna lumbar separándolos en tres compartimentos. La hoja anterior es bastante delgada y deriva de la fascia del cuadrado lumbar.

Uno de los músculos más importantes cuya aponeurosis forma parte de la fascia toracolumbar es el dorsal ancho. Éste se origina en las apófisis espinosas de la séptima a la duodécima vértebras dorsales, todas las lumbares, sacro e ilion, y se inserta en el troquín del húmero. Una de las funciones de este músculo es la de tensar la aponeurosis toracolumbar. En la acción de sentarse, si se utiliza el apoyabrazos de las sillas, esta aponeurosis se tensa y facilita la acción muscular al aplicar los músculos contra la columna y, por la acción envolvente de esta aponeurosis, multiplica el efecto.

Las aponeurosis de los músculos abdominales se continúan con la fascia toracolumbar y forman un zuncho alrededor de la columna, estabilizándola durante la flexoextensión y ayudando a mantener tensa la cámara hidroaérea.

Floyd y Silver observaron que a partir de los 40° de flexión de la columna los músculos lumbares, estudiados por EMG, dejan de actuar (fenómeno de la relajación muscular) y la estabilidad depende de la fascia toracolumbar.

La fascia está bien inervada en individuos sanos, pero se ha demostrado que en pacientes con dolor lumbar existe una inervación deficitaria.

Cámara hidroaérea

Al abdomen se le puede considerar como una estructura hinchable, o cámara hidroaérea, cerrada por la musculatura abdominal, el diafragma y los músculos perineales. En las maniobras de Valsalva se transforma la cavidad abdominotorácica en una cavidad cerrada, con la contracción de los músculos abdominales. El aumento de presión dentro de la cavidad abdominotorácica la transforma en una estructura rígida situada por delante del raquis que transmite los esfuerzos de la cintura pelviana y el periné. Ello reduce, de manera notable, la compresión longitudinal a nivel de los discos intervertebrales. Además, con este mecanismo la tensión de los músculos espinales baja un 55%.

La rotación del tronco tiene factores adversos sobre la cámara hidroaérea, es decir, sobre la posibilidad de realizar la maniobra de Valsalva, lo cual favorecería las lesiones lumbares por rotación.

Sistema amortiguador

El disco intervertebral tiene por función permitir el movimiento entre los cuerpos vertebrales y transmitir las cargas de un cuerpo vertebral a otro. Un disco sano se comporta como una estructura pretensada con una presión de 5 atmósferas. El núcleo está fuertemente hidratado; a los 15 años su contenido de agua es del 88%, pero con la edad se deshidrata y pierde capacidad amortiguadora, llegando a los 75 años con sólo el 65% de agua.

Tanto el núcleo pulposo como el *anulus* participan en el soporte y transmisión del peso, pero en distinta proporción (el núcleo un 75% y el *anulus* un 25%). Si sus fibras de colágeno están intactas y mantienen la capacidad de hidratarse, el anillo se comporta como una masa sólida y es capaz de soportar el peso de forma pasiva. El anillo fibroso aislado, sometido a fuerzas de un modo prolongado, tiende a deformarse y aplastarse bajo el peso. El *anulus* y el núcleo se comportan como un par funcional.

El núcleo se comporta como una pelota llena de líquido, capaz de deformarse, pero no de comprimirse (comportamiento viscoelástico). Cuando una fuerza es aplicada sobre el núcleo desde arriba, tiende a reducirlo en altura, con lo que el núcleo trata de expandirse de forma radial, contra las paredes del *anulus*. Esta expansión radial ejerce una presión en el anillo que tiende a distender las capas de fibras colágenas hacia fuera; pero la capacidad elástica de este material le permite resistir esta distensión y oponerse a la presión ejercida por el núcleo.

Por regla general, el anillo es lo bastante resistente como para impedir cualquier tendencia del disco a protruir hacia los lados. La aplicación de una fuerza de 40 kg en un disco intervertebral ocasiona solamente 1 mm de compresión vertical y 0,5 mm de expansión radial del disco. Una fuerza vertical de 100 kg lo comprime sólo 1,4 mm y provoca una expansión lateral de 0,75 mm.

La presión en sentido vertical hace que la columna aumente de altura cuando los discos sanos se hidratan un promedio de 20 mm. El 40% de este aumen-

to de altura se produce a nivel de los discos lumbares (sin cambio en la lordosis) y otro 40% a nivel torácico con corrección de la lordosis. La flexión lumbar disminuye en las primeras horas del día por dicho motivo. Es decir, durante las primeras horas del día la columna es más rígida pero va aumentando su movilidad hasta unos 12,5°. Estos discos tan hidratados son más fáciles de lesionar durante estas primeras horas.

Otra propiedad del disco es la capacidad que posee para absorber y almacenar energía. Las fibras de colágeno son elásticas, se distienden como muelles y, como tales, almacenan la energía que las distendió. Cuando las cargas aplicadas al disco desaparecen, la capacidad de recuperación elástica del colágeno hace que la energía almacenada en él se utilice para devolver a la normalidad cualquier deformación que haya podido sufrir el núcleo.

Los movimientos de separación o distracción de los cuerpos vertebrales comportan un estiramiento de las fibras de colágeno del anillo fibroso, por lo que cada fibra es tensada resistiendo la tracción. Al estar el anillo muy densamente poblado por fibras de colágeno, éste es altamente resistente a la tensión.

Al flexionar la columna, la compresión del anillo en la parte anterior desplaza la estructura semilíquida del núcleo hacia atrás. Si al mismo tiempo se aplica una carga sobre el disco, la presión en él aumentará y se ejercerá sobre la parte posterior del anillo que ya se halla tensada por la separación de los cuerpos vertebrales. Un anillo sano resistirá bien esta combinación de tensión y compresión, pero si éste ha sufrido lesiones anteriores se pueden observar rupturas de la parte posterior del anillo con el resultado de la extrusión o herniación del núcleo pulposo.

No sólo el grosor de la parte posterior del disco tiene importancia en la resistencia del mismo, sino también la forma que éste tiene. Los discos que tienen la parte posterior cóncava están mejor diseñados para resistir las flexiones que aquellos que la tienen convexa, ya que a igualdad de diámetro tienen mayor sección.

Durante los movimientos de torsión de las articulaciones intersomáticas únicamente aquellas fibras de colágeno inclinadas en la dirección del movimiento estarán tensadas, mientras las restantes estarán relajadas. El anillo resiste los movimientos de torsión con la mitad del total de sus fibras de colá-

geno. Por ello, será este movimiento de torsión el más lesivo para el disco intervertebral.

Si tomamos como referencia la postura en bipedestación como un 100% de compresión sobre los discos lumbares, en decúbito soportaran un 25%, en bipedestación inclinando el cuerpo un 150%, y en posición sentado doblado el cuerpo hacia delante un 200%, todo ello sin levantar ningún peso.

En un movimiento de presión axial sobre la columna (llevar un peso sobre la cabeza) se provocan fuerzas de contacto altísimas a nivel de las facetas articulares L5-S1, sobre todo cuando existe una gran hiperlordosis. Este «bloqueo» disminuye la posibilidad de rotaciones a nivel de este segmento móvil, pero aumenta las presiones sobre los pedículos y *pars interarticularis*.

La contracción simultánea de los músculos durante los movimientos aumenta sustancialmente la presión intradiscal, siendo más de un 200% que sin contracción muscular.

INERVACIÓN

A nivel del agujero de conjunción el nervio raquídeo o espinal se divide en ramo anterior y ramo posterior. El ramo anterior va directamente a la extremidad correspondiente y no da inervación al raquis.

El ramo posterior del nervio raquídeo, una vez se halla fuera del agujero de conjunción, se dirige hacia atrás, abajo y afuera, pasa sobre las apófisis transversas hasta llegar a los canales paravertebrales y se divide en tres ramas, una rama medial que inerva las articulaciones interapofisarias y el arco posterior, una rama intermedia que inerva los músculos y las aponeurosis y una rama lateral cutánea.

La rama medial atraviesa el canal que le deja el ligamento mamiloaccesorio, y cuando atraviesa la lámina vertebral se divide en múltiples ramas para los músculos de los canales paravertebrales, ligamentos y articulaciones interapofisarias. Cada rama media inerva dos articulaciones, la inmediatamente superior y la inferior. Sin embargo, cada articulación recibe inervación adicional por su cara anterior a cargo de otras terminaciones del ramo dorsal.

Existe una extensa distribución de pequeñas fibras libres y terminaciones encapsuladas en la cápsula articular, incluyendo nervios conteniendo sustancia P.

Cuando la cápsula articular es traccionada o comprimida, los mecanorreceptores tanto de bajo como de alto umbral se estimulan. Cuando la cápsula y los músculos próximos se inflaman existe una sensibilización y excitación de los nervios capsulares.

La rama lateral sensitiva atraviesa la musculatura paravertebral de forma zigzagueante y con trayecto inconstante, pero perfora la aponeurosis para hacerse superficial en puntos muy concretos próximos a las espinosas. Las ramas que provienen del nivel dorsolumbar se van separando de la línea media a medida que descienden, pasando por encima de la cresta ilíaca a unos 10 cm de la línea media e inervando la región glútea.

El nervio sinovertebral de Lushcka es una rama recurrente del ramo ventral que se introduce nuevamente en el raquis para inervar la cara posterior de los cuerpos vertebrales, el ligamento vertebral común posterior y las partes periféricas del anillo fibroso del disco intervertebral.

La inervación de la columna está a cargo del ramo posterior del nervio raquídeo y del nervio de Lushcka. El ramo anterior no da inervación pero se puede afectar por compresión tanto del disco protruido o herniado como por un estrechamiento óseo debido a una estenosis de canal.

ERGONOMÍA

La postura de la parte alta de la columna es secundaria a la extensión de la cadera y a la lordosis lumbar. Una postura óptima y económica se obtiene equilibrando estos dos elementos. Una pérdida de la lordosis lumbar (cifosis lumbar) provoca una hiperextensión de la cadera y una verticalización del sacro, lo que compensa el desplazamiento del centro de gravedad. En la espondilolistesis sucede lo mismo.

Durante los movimientos de torsión existe un aumento de la compresión discal que es el doble de la presión sin torsión. Se ha demostrado de forma epidemiológica que las torsiones son un riesgo para la columna y motivo de aparición de dolor lumbar. Más

del 60% de las lesiones lumbares bajas se relacionan con movimientos de torsión de la columna. La resistencia de la columna disminuye cuando se asocia asimetría (inclinación-rotación). La resistencia en actividad isocinética (sin contracción de los músculos) es entre el 60 y el 70% menor que con movimiento isométrico (contracción muscular). Las mujeres tienen menor resistencia a la torsión de la columna. La rotación causa asimetría en la activación muscular lumbar, provoca una concentración de presiones en los segmentos motores y reduce la estabilidad de la columna, a lo que se sumará la fatiga muscular.

Parece ser que la presión dentro del compartimento muscular lumbar está en relación con determinadas enfermedades dolorosas. La utilización de soportes lumbares (fajas) adecuados mejora la facilidad para levantar pesos, según un estudio realizado en mujeres sanas.

En vivo se ha demostrado que la frecuencia de la resonancia de la columna es de 4-5 Hz, y en muchas circunstancias se excita esta frecuencia. La exposición prolongada a las vibraciones en todo el cuerpo induce a cambios degenerativos en la columna (cabinas de caminos, tractores, máquinas neumáticas). El riesgo aumenta con la edad y el tipo de trabajo y disminuye con el número de ciclos. Las modificaciones en la configuración de los asientos de trabajo reduce la presión sobre el disco intervertebral y las tracciones sobre la parte posterior del disco.

Un factor muy importante en la estabilidad de la columna lumbar son las facetas articulares, y es imprescindible evitar la realización de facetectomías completas durante la cirugía de esta zona, admitiéndose las facetectomías parciales mediales o transversales. La presión sobre las articulaciones puede aumentar mucho cuando la altura del disco disminuye por pérdida de su contenido líquido o por degeneración, provocando dolor.

BIBLIOGRAFÍA

1. Miralles RC. Biomecánica clínica del aparato locomotor. Barcelona: Masson; 1998.