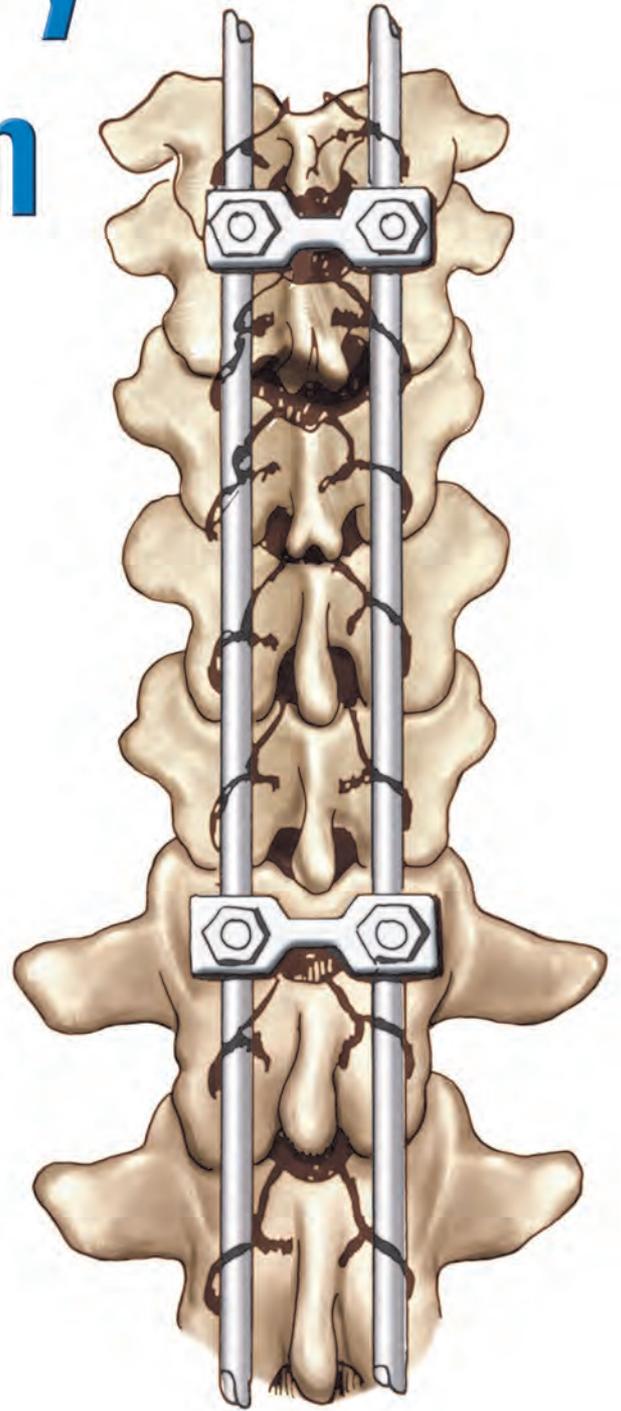
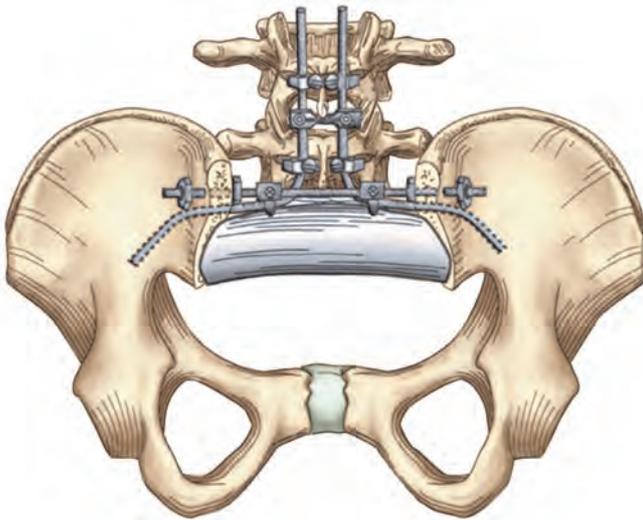


# Biomecánica y Estabilización de la Columna

Edward C. Benzel

Tercera edición



American  
Association of  
Neurological  
Surgeons



# Biomecánica y Estabilización de la Columna

**Edward C. Benzel, MD**

Presidente

Departamento de neurocirugía, Neurological Institute

Cleveland Clinic

Cleveland, Ohio



2018



## Contenido

### Sección I – Visión general de conceptos fundamentales

1. Anatomía biomecánicamente relevante y propiedades materiales de la columna y elementos asociados	2
2. Principios físicos y cinemática	16
3. Estabilidad e inestabilidad de la columna	28

### Sección II – Patología de la columna y elementos neurales

4. Calidad ósea	40
5. Enfermedades degenerativas e inflamatorias de la columna	46
6. Trauma, tumor e infección	65
7. Deformaciones de la columna	87
8. Lesión del elemento neural	95
9. Correlación de los dominios anatómicos y clínicos	106

### Sección III – Cirugía espinal

10. Abordajes quirúrgicos a la columna subaxial	112
11. Efectos desestabilizadores de la cirugía de columna	120
12. Fusión espinal	128

### Sección IV – Constructos de instrumentación espinal: principios generales

13. Propiedades del material de implante	142
14. Interfaces componente-componente	149
15. Interfaces implante-hueso	159
16. Atributos cualitativos de los implantes espinales: perspectiva histórica	174
17. Atributos cuantitativos de los implantes espinales	190
18. Diseño del constructo	201
19. Falla del constructo y prevención de la misma	217

### Sección V – Constructos de instrumentación espinal: consideraciones específicas de la región

20. Constructos craneocervicales y cervicales superiores	230
21. Constructos ventrales de la columna subaxial	251

22. Constructos dorsales de la columna subaxial	269
23. Constructos intervertebrales	294
24. Constructos lumbosacros-pélvicos	313
25. Matices regionales	326

## **Sección VI – Constructos de instrumentación espinal: manejo de la deformidad y estrategias de prevención**

26. Prevención y corrección de la deformidad: estrategias componentes	338
27. Prevención y corrección de la deformidad: estrategias clínicas complejas	354
28. Constructos de instrumentación y aplicaciones de fuerzas complejas	396

## **Sección VII – Patologías iatrogénicas y nuevas técnicas y tecnologías de cirugía espinal**

29. Subsistencia y estabilización espinal dinámica	416
30. Aumento vertebral	431
31. Degeneración y enfermedad del segmento adyacente	437
32. Tecnologías de preservación del movimiento	441
33. Cirugía espinal mínimamente invasiva	450
34. Falla del constructo y prevención de la misma: proceso de toma de decisión	455

## **Sección VIII – Estabilización no quirúrgica de la columna**

35. Reposo en cama y tracción	464
36. Órtesis espinal	471
37. Ejercicios, acondicionamiento y otras estrategias no quirúrgicas	481

## **Sección IX – Síntesis: juntando todo**

38. Evaluación biomecánica	496
39. Proceso de toma de decisión: una repetición	508

# Sección III

## Cirugía espinal

- |   |     |
|---|-----|
| 10. Abordajes quirúrgicos a la columna subaxial         | 112 |
| 11. Efectos desestabilizadores de la cirugía de columna | 120 |
| 12. Fusión espinal                                      | 128 |

**AMOLCA**  
PARA UNA PRÁCTICA EXITOSA

## 10. Abordajes quirúrgicos a la columna subaxial

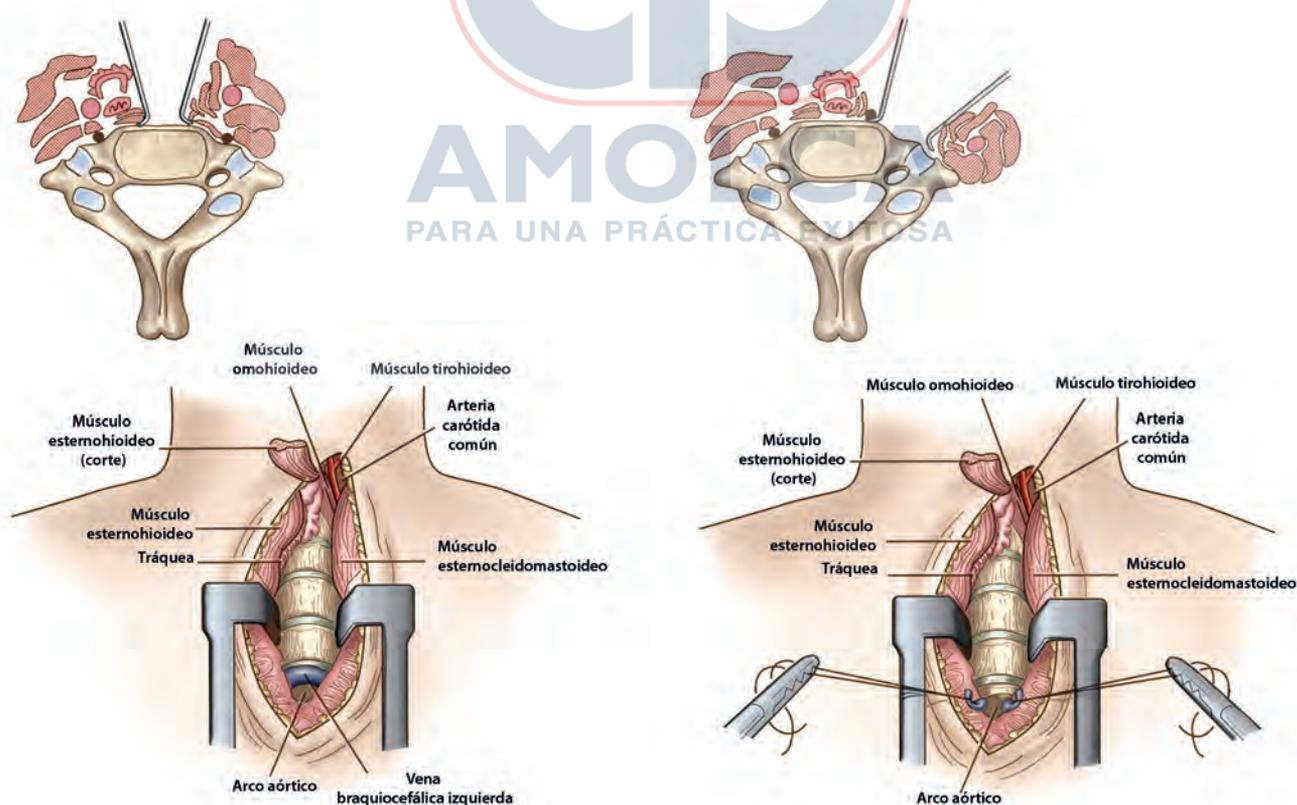
Los abordajes quirúrgicos a la descompresión, fusión e instrumentación espinal varían ampliamente. Este capítulo se centra en los abordajes quirúrgicos a la columna subaxial, para el propósito explícito de descompresión del elemento neural y la colocación de instrumentación. Se enfatiza e ilustra el “ángulo de visión”. En casi todos los casos, los abordajes tradicionales utilizados para la descompresión o la fusión se utilizan para la instrumentación. Sin embargo, existen diferencias y preocupaciones adicionales. Los abordajes mínimamente invasivos (exposición mínima) se discuten más adelante en este libro (capítulo 33) y, por lo tanto, no se discuten aquí.

### 10.1 Abordajes ventral y lateral a la columna cervical y torácica superior

El abordaje ventral tradicional a la columna cervical proporciona una exposición amplia de los cuerpos vertebrales cervicales ventrales.<sup>1</sup> Para el propósito de la colocación de la instrumentación, este abordaje proporciona una exposición apropiada de la columna.

Por lo común se usa una incisión casi horizontal, colocada a lo largo de un surco cutáneo. Si se desea una exposición prolongada de la columna cervical ventral, se usa una incisión

diagonal a lo largo del borde ventral del músculo esternocleidomastoideo. La disección roma y cortante cuidadosa se realiza a lo largo del borde medial del músculo esternocleidomastoideo, entre la tráquea y el esófago medialmente, y la arteria carótida, la vena yugular y el nervio vago lateralmente. El estiramiento y la compresión del nervio laríngeo recurrente pueden minimizarse mediante disección cortante cuidadosa, y mediante el uso de presiones bajas del manguito del tubo endotraqueal.<sup>2</sup> La disección subperiosteal, que comienza en la línea media y se extiende en dirección lateral hasta la parte más lateral del cuerpo vertebral, se realiza bilateralmente y más allá de la extensión rostral y caudal de la exposición vertebral planificada, según lo definido por la localización radiográfica (Fig. 10.1a).<sup>1,3,4</sup> Se tiene gran cuidado en minimizar la lesión del tronco simpático. Esta estructura es más medial y vulnerable en la columna cervical baja.<sup>5</sup> Dos puntos son cruciales: (1) el logro de una exposición más que adecuada, tanto lateralmente como rostral-caudalmente, y (2) el mantenimiento de esta exposición con una retracción autorretenida apropiada. Lo primero se logra mediante disección cortante y roma meticulosa con estiramiento mínimo de tejidos blandos. El último puede lograrse con uno de dos tipos de sistemas de retracción: (1) un sistema montado en el paciente, o (2) un sistema montado en la mesa. El primero ocasiona



**Fig. 10.1** Los abordajes (A) ventrales y ventrolaterales, y (B) laterales a la columna cervical subaxial, observados en vistas axiales. Note la disección subperiosteal, la colocación de retractores y las exposiciones ganadas de este modo. Los puntos muestran la cadena y los ganglios simpáticos. (C) El abordaje de esternotomía mediana obtiene acceso a las estructuras mediastinales y a la columna torácica superior. (D) Puede ligarse la vena innominada, pero la aorta aún limita la exposición caudal en forma significativa. Por lo tanto, la resección del manubrio y de la clavícula medial proporciona esencialmente la misma exposición otorgada por el abordaje de esternotomía mediana.

una aplicación de presión a los tejidos blandos asimétrica y a menudo excesiva. El último puede eliminar esta complicación mientras proporciona una mayor exposición. Como con todas las técnicas de instrumentación, es imperativo un conocimiento minucioso de los matices anatómicos y biomecánicos de los sitios de interface implante-hueso. En este aspecto, es crítica la minimización de la incidencia de lesión del nervio laríngeo recurrente. El conocimiento de la anatomía es la clave. La incidencia de lesión del nervio laríngeo recurrente es mayor en los casos más extensos y en las reintervenciones. Parece no haber diferencia en su incidencia relacionada con el lado de la exposición, como se pensó una vez.<sup>6</sup> La disección cortante cuidadosa también puede minimizar la incidencia de disfagia, la cual aumenta con la cirugía de revisión y con los niveles operados por encima.<sup>7</sup> La etiología de la disfagia posoperatoria es multifactorial y está relacionada con la disrupción de la función de deglución durante varias fases. El entendimiento de esto mejora el éxito del tratamiento y, obviamente, la prevención.<sup>8</sup>

La exposición de la columna cervical ventral mediante el abordaje ventral no produce una denervación significativa de los músculos. Aunque los músculos largos del cuello son lesionados, esto se realiza de forma simétrica a lo largo del rafe de la línea media. Además, se desconoce su importancia en la prevención de la deformidad espinal, pero muy probablemente es mínima.

La exposición lateral de la columna cervical puede obtenerse mediante un abordaje descrito por Verbiest.<sup>9</sup> Usualmente, al pasar a través de los mismos planos tisulares que los mostrados en la Fig. 10.1a, se usa este abordaje para ganar acceso a la cara más lateral de la columna, suprayacente a las arterias vertebrales. La retracción medial de la cadena simpática, con el músculo largo del cuello, a menudo preserva la función de esta estructura (Fig. 10.1b).<sup>10</sup>

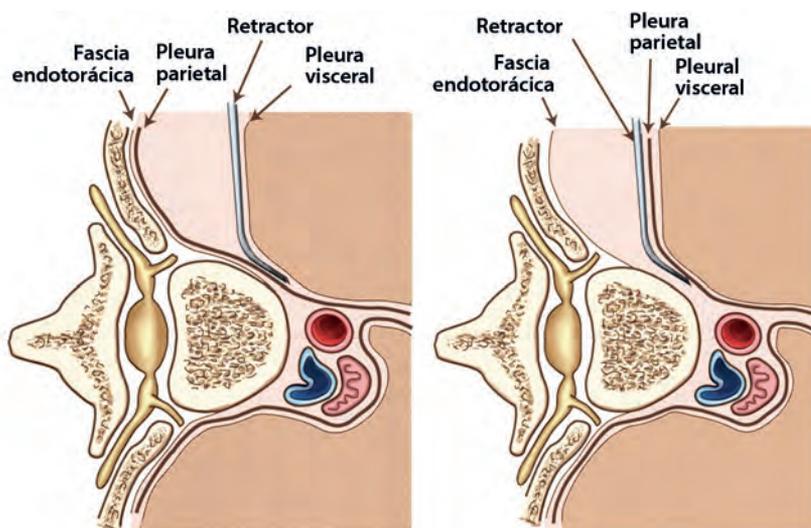
Pueden emprenderse exposiciones ventrales de la columna cervical alta para tratar varias patologías. El abordaje varía según la patología a tratar. De hecho, esto puede usarse para descompresión de la arteria vertebral atlantoaxial<sup>11</sup> o para un abordaje lateral extremo para resección de patologías ventrales como aquellas relacionadas con la apófisis odontoides o que involucran a la misma.<sup>12</sup>

La exposición ventral de la columna torácica superior puede alcanzarse mediante un abordaje de división del esternón (esternotomía mediana) (Fig. 10.1c).<sup>13</sup> Sin embargo, con su naturaleza extensa e invasiva, este abordaje puede no ser necesario en muchos casos. La exposición está limitada por estructuras vasculares. Un abordaje más limitado (menos invasivo) de manubriectomía (y resección de la clavícula medial) obtiene esencialmente el mismo acceso a la columna (Fig. 10.1d).<sup>10,14</sup> Teng et al., describieron un abordaje supraesternal bajo, con o sin manubriectomía y esternotomía, para dichas lesiones. Ellos también describieron la indicación para estos abordajes extendidos. Enfatizan la importancia de las imágenes por resonancia magnética (MR por sus siglas en inglés) en la unión cervicotorácica para evaluar la geometría del acceso y la exposición antes de la cirugía.<sup>15</sup> También puede considerarse un abordaje ventrolateral a través de la primera costilla.<sup>16</sup> No obstante, la escasez de experiencia clínica con este último es un factor limitante para su uso.

## 10.2 Abordajes ventrolateral, transtorácico y extrapleurales para toracotomía

El abordaje ventrolateral a la columna torácica puede usarse para la exposición ventrolateral desde alrededor de T5 hasta T10. La incisión del músculo intercostal, con o sin resección costal, proporciona acceso a la cavidad torácica. La retracción pulmonar cuidadosa proporciona una vista amplia de una porción larga de la columna. Posoperatoriamente, las costillas restantes pueden unirse con suturas circunferenciales fuertes para aumentar la estabilidad de la pared torácica (quizás al costo de una tendencia exagerada hacia deformación espinal, y del riesgo potencial de lesión de nervio intercostal, con una neuralgia intercostal acompañante).

La exposición desde la izquierda es impedida por la aorta, y la exposición desde la derecha es impedida por la vena cava. Estas estructuras poseen riesgos relacionados con la lesión vascular y la exposición quirúrgica (Fig. 10.2a). Además, el abordaje ventrolateral implica problemas con la visualización de todo el implante colocado ventralmente. Más aún, el saco dural no es descomprimido hasta que se han removido todas las estructuras ventrales. Esto puede crear un leve peligro con respecto a las cirugías de descompresión del saco dural.<sup>3</sup>



**Fig. 10.2** Abordaje transtorácico ventrolateral a la columna, observado en una vista axial. (A) La exposición obtenida es lateral a la ganada en la región cervical con el abordaje ventral. Note la exposición entre la pleura parietal y la pleura visceral. (B) Ilustración del abordaje de toracotomía extrapleurales. Note el abordaje entre la pleura parietal y la fascia endotorácica.

Por definición, la exposición transtorácica es asimétrica. La incisión del músculo intercostal rompe mínimamente la estabilidad. La resección costal, con la unión posoperatoria de las costillas restantes, predispone al paciente a una deformación espinal alrededor del plano coronal (escoliosis). En algunos casos, puede ser apropiado considerar el uso de técnicas de estabilización intraoperatoria para aumentar la estabilidad.

En la Fig. 10.2b<sup>17</sup> se muestra el abordaje extrapleurale para toracotomía. Este abordaje tiene una ventaja teórica con respecto a las complicaciones pulmonares, y proporciona casi la misma exposición que el abordaje de toracotomía. La toracotomía extrapleurale provee una ventaja significativa en la unión toracolumbar. El uso de la toracotomía extrapleurale en esta región permite que el diafragma sea desplazado hacia adelante, al contrario de cuando es incidido, lo cual se requiere en el abordaje transdiafragmático a la misma región (ver a continuación).

### 10.3. Abordaje transdiafragmático a la columna toracolumbar

El abordaje transdiafragmático a la columna permite una exposición ventrolateral de la unión toracolumbar. Aparte de la toracotomía extrapleurale y el abordaje extracavitario lateral, el abordaje transdiafragmático es el único que proporciona una exposición ventral de esta región de la columna (Fig. 10.3).<sup>3</sup>

Para este abordaje puede requerirse resección costal. Sin embargo, las costillas inferiores tienen un efecto mínimo sobre la estabilidad.

### 10.4 Abordaje extraperitoneal ventrolateral a la columna lumbar superior y media

El abordaje extraperitoneal ventrolateral a la columna lumbar superior es esencialmente el mismo abordaje utilizado para obtener acceso a la cadena simpática para simpatectomía en la región paravertebral lumbar.<sup>3,4,18</sup> Esta exposición proporciona acceso al canal espinal ventrolateral desde L2 hasta un sitio por debajo del borde de la pelvis. La disección procede en forma anatómica mediante incisiones de división a través de los

músculos oblicuo externo y transverso, a lo largo de las fibras musculares de cada capa muscular, hacia el espacio retroperitoneal y luego hasta la columna. Si es necesaria una exposición lumbar alta, el pilar diafragmático puede ser separado del ligamento longitudinal anterior de la columna vertebral. La cadena simpática puede visualizarse en el surco entre el músculo psoas y el cuerpo vertebral.

Una ventaja mayor de este abordaje es la naturaleza sencilla de la exposición, que es familiar para muchos cirujanos de columna y vasculares. Pese a ello, proporciona una exposición longitudinal decepcionantemente estrecha. Esta exposición es limitada a nivel rostral por el pilar del diafragma, y a nivel caudal por el borde de la pelvis. Este abordaje también hace difícil exponer los agujeros neurales sin retracción del músculo psoas —con el cual es difícil de comenzar— o resección del mismo. Las raíces nerviosas lumbares que salen, que pasan a través del músculo psoas, pueden ser lesionadas durante este abordaje. Es imperativo un conocimiento minucioso de la anatomía regional y su cuidado para proteger los elementos neurales. Las ventajas y desventajas de este abordaje son similares a las del abordaje transtorácico ventral (Fig. 10.4). En años recientes, se han empleado con éxito abordajes menos invasivos y miniabiertos. La preservación de la musculatura es la clave para disminuir la morbilidad.<sup>19</sup>

Esta exposición denerva de manera asimétrica y lesiona al músculo, aunque mínimamente. Una lesión unilateral al músculo psoas por una exposición subperiosteal lateral a lo largo del cuerpo vertebral puede ocasionar debilidad del flexor de la cadera. También puede afectar la estabilidad espinal directamente, a través de la disrupción del soporte espinal muscular (asimétricamente), e indirectamente mediante la debilidad inducida en el flexor de la cadera.

### 10.5 Abordaje extraperitoneal por el borde de la pelvis

El abordaje de la porción intrapélvica de la columna lumbosacra es retador. Una incisión que se comienza lateral y ligeramente por encima de la espina ilíaca anterosuperior puede prolongarse

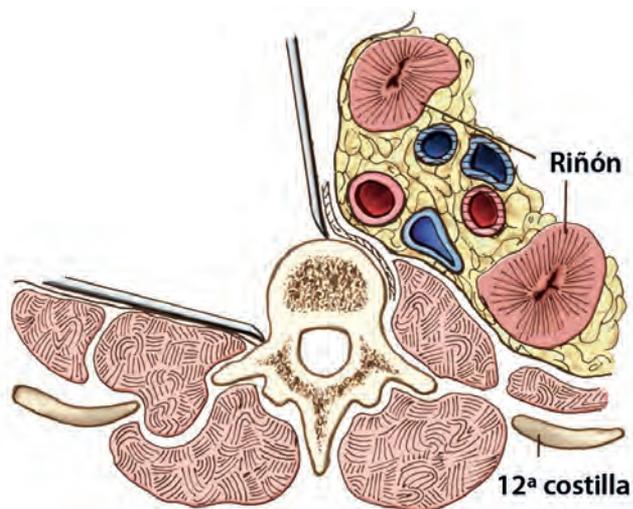


Fig. 10.3 Abordaje transdiafragmático a la columna toracolumbar, observado en una vista axial. Note la violación significativa de tejidos blandos requerida para este abordaje.

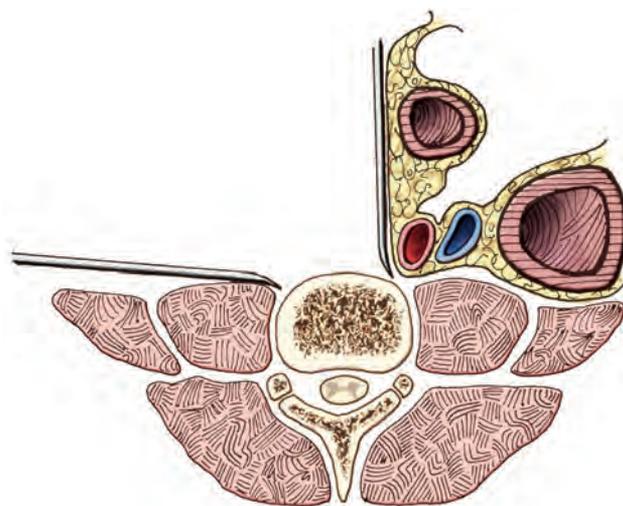
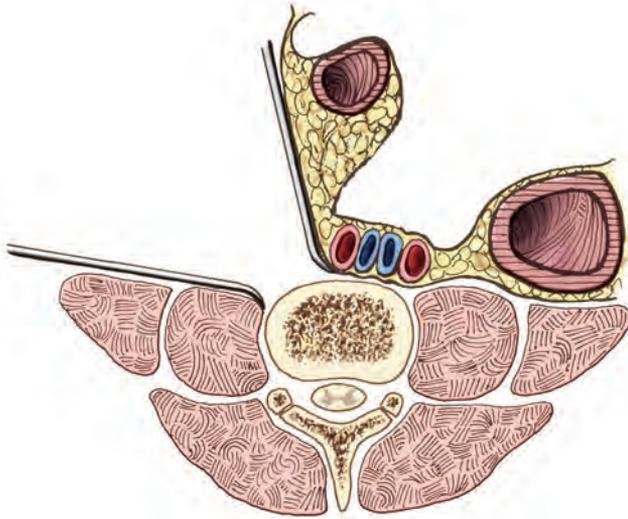


Fig. 10.4 Abordaje extraperitoneal ventrolateral a la columna lumbar, observado en una vista axial.



**Fig. 10.5** Abordaje extraperitoneal del borde de la pelvis para la columna lumbar baja, observado en una vista axial. Note que la exposición del cuerpo vertebral es menor que la lograda con abordajes más rostrales; esto se debe a los vasos ilíacos limitantes.

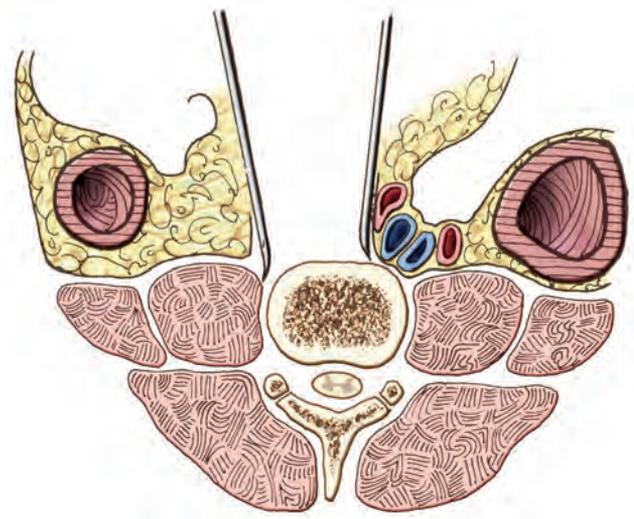
medial y caudalmente, paralela y rostral a la cresta ilíaca y el ligamento inguinal. Esto proporciona acceso al plano muscular por debajo de este nivel. Una incisión a lo largo de las fibras del músculo oblicuo externo y a través de las fibras del músculo oblicuo interno y el músculo transverso del abdomen proporciona a su vez acceso a las estructuras pélvicas extraperitoneales. Las estructuras extraperitoneales son recorridas desde el piso pélvico dorsal al peritoneo y la fascia renal.

Las ventajas de este abordaje incluyen una exposición relativamente buena del plexo lumbar intrapélvico desde una orientación ventral y lateral. Por otra parte, proporciona una exposición general limitada, y el nervio ciático intrapélvico, así como el plexo sacro inferior, son difíciles, e incluso imposibles, de visualizar de manera adecuada mediante este abordaje. Aunque la instrumentación espinal puede insertarse mediante esta exposición, la profundidad de la exposición y la yuxtaposición de las estructuras vasculares y la naturaleza precaria de los sitios de agarre de la instrumentación esencialmente determinan que se utilicen otros abordajes para la instrumentación espinal (Fig. 10.5).<sup>20</sup>

Los efectos de este abordaje sobre la estabilidad son similares a los del abordaje extraperitoneal ventrolateral (ver el texto precedente). Los abordajes laparoscópicos se han hecho populares.<sup>21</sup> Teóricamente, ellos involucran un menor trauma quirúrgico.

### 10.6 Abordaje transperitoneal

Gran parte de la exposición lograda por las dos técnicas precedentes puede alcanzarse mediante el abordaje transperitoneal (Fig. 10.6).<sup>3</sup> Luego de la realización de una incisión estándar de laparotomía en la línea media y del ingreso en la cavidad peritoneal, se empaqueta el intestino delgado en el abdomen superior y se retrae hacia la derecha. El colon sigmoide es retraído lateralmente, y se realiza una incisión longitudinal en el peritoneo dorsal, en la línea media, para exponer la cara deseada del espacio retroperitoneal. En ocasiones, las raíces nerviosas izquierdas



**Fig. 10.6** Abordaje transperitoneal a la columna lumbar baja y lumbosacra, observado en una vista axial.

no pueden visualizarse con facilidad en esta forma. Si es necesario, el colon puede ser retraído medialmente y movilizarse de izquierda a derecha. Debe tenerse cuidado en evitar lesionar los uréteres. El promontorio del sacro es una referencia fácilmente identificable que debe utilizarse para identificar el interespacio L5-S1.

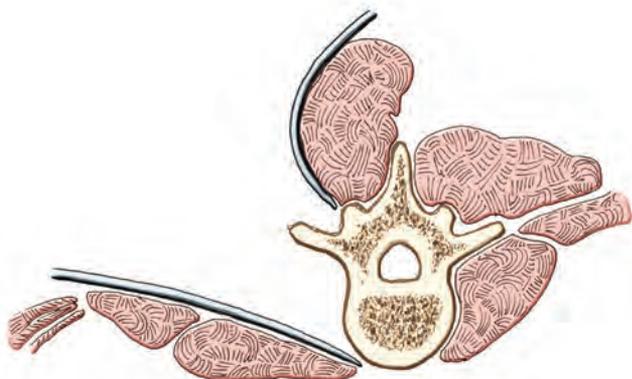
Se logra una exposición excelente del espacio retroperitoneal a través del abordaje transperitoneal. Las estructuras retroperitoneales inferiores se visualizan con mayor facilidad que las estructuras más proximales (más fácilmente, en especial a la derecha, debido a la localización del colon sigmoide a la izquierda). Las desventajas incluyen el requerimiento de una laparotomía y el potencial de lesión neural y vascular. El abordaje tiene la probabilidad de ser muy útil cuando se necesita una exposición amplia, como para los tumores de origen neural en los procedimientos quirúrgicos “de repetición”.

Las incisiones abdominales verticales en la línea media u horizontales afectan en forma mínima la estabilidad. En el período posoperatorio inmediato, la pérdida de fortaleza abdominal puede afectar de manera adversa la flexión espinal; sin embargo, este fenómeno es de vida corta.

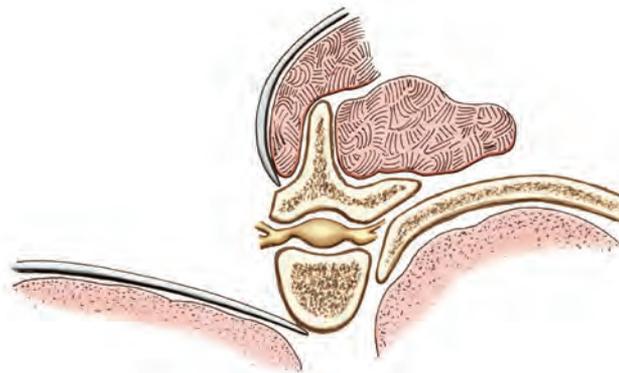
### 10.7 Abordaje extracavitario lateral a la columna torácica y lumbar

El abordaje extracavitario lateral a la columna, según lo descrito originalmente por Capener y popularizado por Larson y colegas, se utiliza comúnmente hoy en día para la descompresión quirúrgica de la columna torácica y lumbar.<sup>22-24</sup> Todas las regiones de la columna torácica y lumbar pueden ser abordadas con esta operación, aunque la exposición quirúrgica de la región lumbar baja mediante el abordaje extracavitario lateral requiere una resección significativa del ilíaco dorsal.

Las ventajas de este abordaje incluyen la falta de disección intratorácica o intrapélvica y la capacidad para extender la disección más lateralmente de lo que sería posible con un abordaje de foraminotomía amplia. Además, el abordaje extracavitario lateral proporciona la exposición para una descompresión ventral



**Fig. 10.7** Abordaje extracavitario lateral a la columna torácica y lumbar, observado en una vista axial.



**Fig. 10.8** Abordaje transcavitario lateral a la columna torácica, observado en una vista axial.

del saco dural, la colocación de instrumentación espinal dorsal y la fusión subsecuente (intervertebral y dorsal, en ese orden) a través de la misma incisión (Fig. 10.7). Las desventajas incluyen las dificultades de la disección a través de los planos tisulares y el trauma resultante de tejidos blandos en que se incurre.

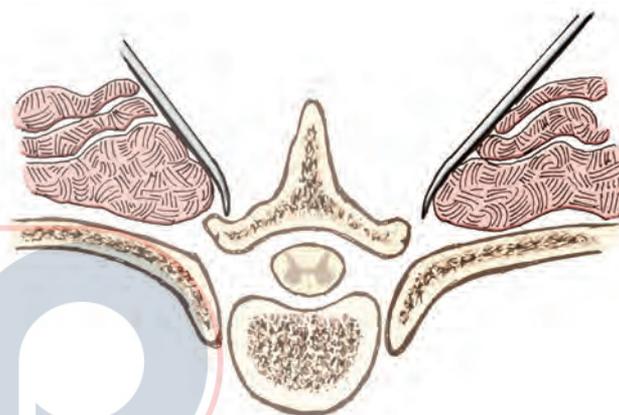
El abordaje extracavitario lateral a la columna implica una disección y denervación muscular asimétrica significativa, y lesión potencial de tejidos blandos. Esto puede afectar de manera adversa la estabilidad. La pérdida unilateral posoperatoria de función de los músculos paraespinosos, cuadrado lumbar, psoas, dorsal ancho, trapecio y/o intercostales, puede colocar estreses asimétricos indeseables en la columna. Esto debe ser tomado en cuenta durante el proceso de toma de decisión quirúrgica. El abordaje extracavitario lateral puede realizarse mediante el posicionamiento del paciente en forma prona en tres cuartos.<sup>25</sup> Esto facilita la visualización de la patología tanto por el cirujano como por el asistente.

El abordaje extracavitario lateral elimina la necesidad de realizar una incisión en el diafragma, como la que se requiere para el abordaje toracoabdominal. También tiene una ventaja sobre el abordaje de toracotomía extrapleurar, ya que proporciona exposición para la colocación de instrumentación dorsal a través de la misma incisión cutánea realizada para la descompresión ventral.

### 10.8 Abordaje transcavitario lateral a la columna torácica

El abordaje transcavitario lateral proporciona una verdadera exposición lateral de la columna sin la dificultad de la visualización anatómica asociada con el abordaje extracavitario lateral. Su ángulo de visualización está entre el de las exposiciones logradas con los abordajes transtorácico y extracavitario lateral. Las ventajas de ser capaces de observar la anatomía patológica a través de la pleura pulmonar parietal no alterada, y la exposición ligeramente más ventral que la proporcionada por el abordaje extracavitario lateral, con frecuencia pueden sobrepasar la desventaja de la invasión pleural (Fig. 10.8).

Los efectos del abordaje transcavitario lateral sobre la estabilidad son idénticos a los del abordaje extracavitario lateral a la columna torácica y lumbar (ver el texto precedente). Los efectos sobre la función pulmonar son similares a los del abordaje transtorácico.

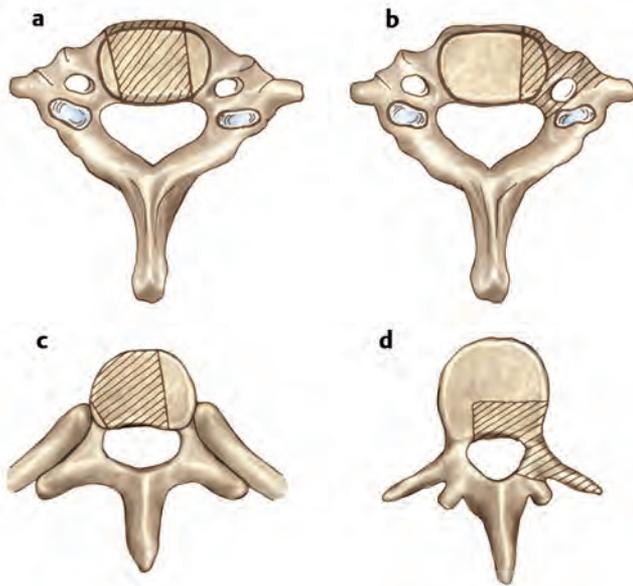


**Fig. 10.9** Abordaje dorsal a la columna subaxial, observado en una vista axial.

### 10.9 Abordajes dorsales a la columna

Los abordajes dorsales a la columna por lo general son directos; de este modo, casi siempre se usan incisiones en la línea media. En la región torácica y lumbar (en particular en la región torácica baja) pueden usarse incisiones alternativas. En el paciente delgado, con nutrición pobre y/o insensato, una incisión paramediana puede ayudar a evitar los problemas de curación de la herida al minimizar la presión incisional aplicada externamente. Luego de la incisión cutánea, se emprende la disección intermuscular con disección subperiostial. Esta última se realiza de la forma tradicional luego que el cirujano ha obtenido acceso a la línea media a lo largo de un plano subcutáneo. En la región cervical, el ligamento nual proporciona un corredor para los procesos espinosos. Kadri y Al-Mefty delinearon tres pasos para garantizar que se respete el plano de la línea media: (1) disección del ligamento nual con el tejido areolar graso de la porción lamelar, (2) aislamiento e incisión de la porción funicular desde dentro hacia afuera y (3) disección retrógrada de los músculos cerviconuales unidos al hueso occipital en un plano subperiostial.<sup>26</sup>

Luego se emplean varias técnicas para la preparación del sitio para la inserción de la instrumentación, según el implante seleccionado (Fig. 10.9). También puede obtenerse una exposición lateral extrema (dorsolateral).<sup>27,28</sup> La laminoplastia puede proporcionar una ventaja en ciertas situaciones.<sup>21,29-33</sup> Su capacidad para

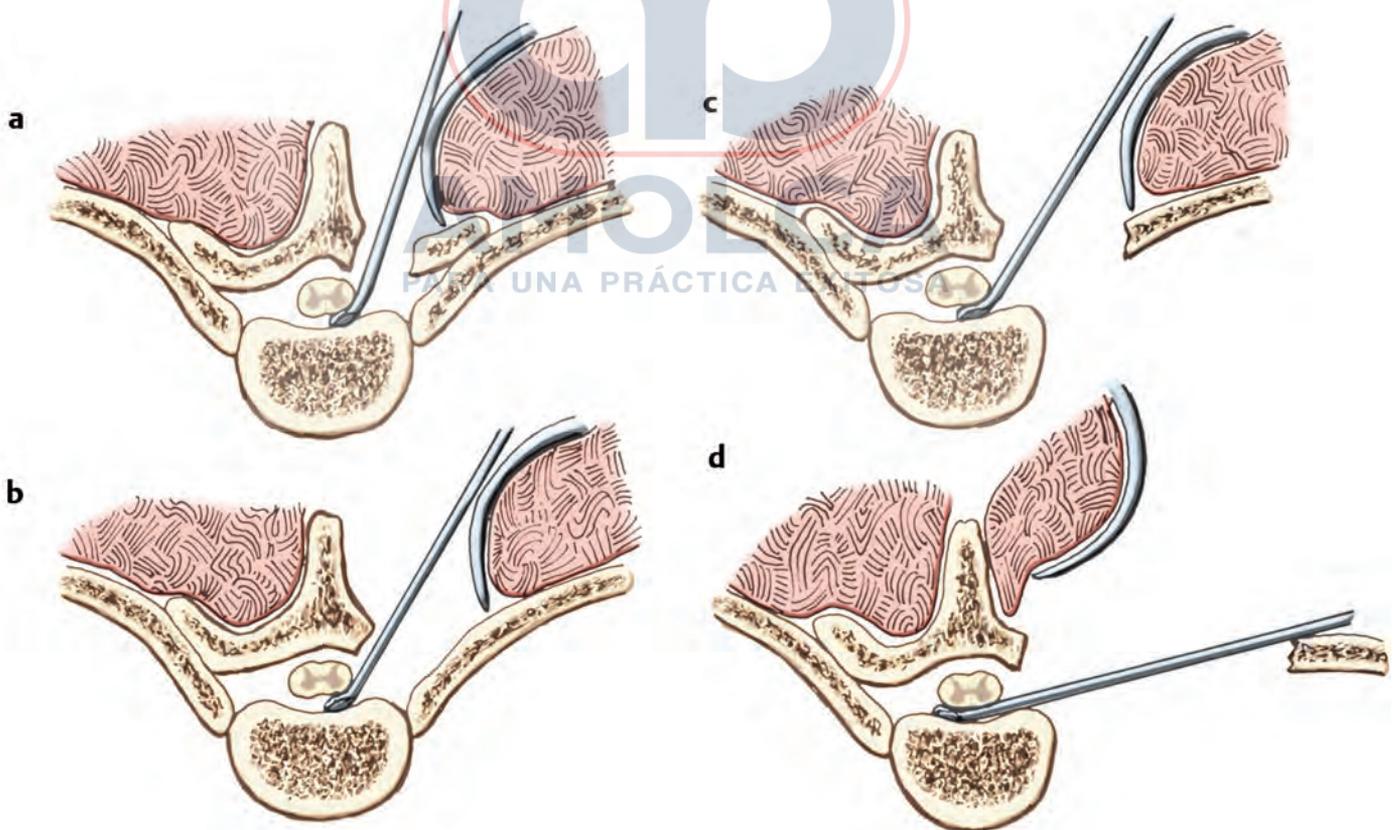


**Fig. 10.10** Exposiciones quirúrgicas ventrales y laterales del canal espinal, observadas en vistas axiales. (A) Cervical ventral. (B) Cervical lateral. (C) Extraperitoneal ventrolateral a la columna lumbar, extraperitoneal a la columna lumbar baja, extraperitoneal del borde de la pelvis a la columna lumbar baja y transperitoneal a la columna lumbar baja. (D) Extracavitaria lateral y trans-cavitaria lateral a la columna torácica y lumbar. El sombreado indica las áreas de remoción del hueso para obtener acceso al saco dural o la arteria vertebral.

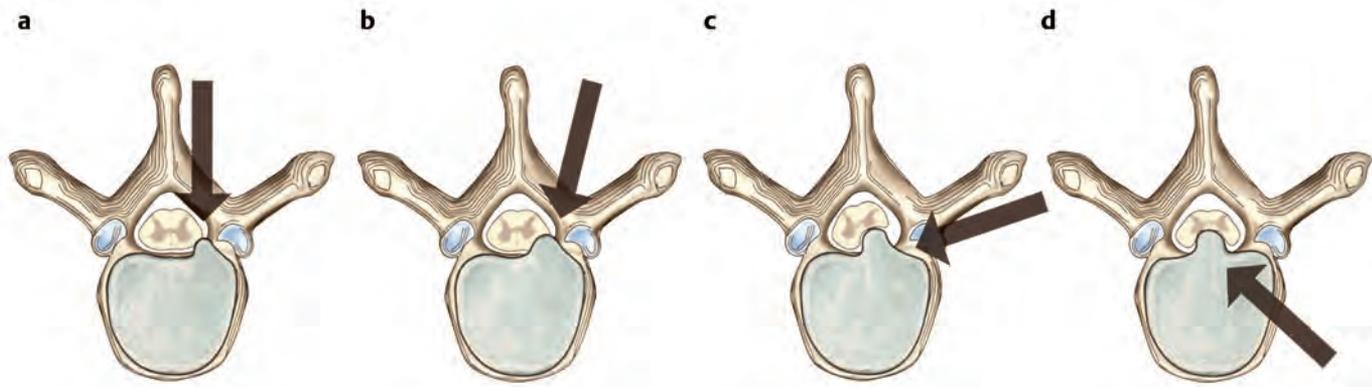
preservar la lordosis es debatible.<sup>32</sup> Finalmente, cuando existen patologías de múltiples niveles (por ejemplo, múltiples herniaciones de discos torácicos) muchas veces se requiere un abordaje dorsal. En dicha circunstancia, puede necesitarse un abordaje transfacetario de múltiple nivel.<sup>34</sup>

Las exposiciones de la columna dorsal normalmente son simétricas, aunque no siempre. Mientras más lejos proceda la disección lateralmente, mayor será la probabilidad de una denervación del músculo paraespinal. Además, la disección subperiosteal ocasiona lesión y disfunción muscular. En la región lumbar esto posee relativamente poca significancia, debido muy probablemente a la lordosis persistente. Empero, en la columna cervical y torácica superior, la disfunción del músculo paraespinal puede contribuir a la deformación por flexión, en especial en la región cervical en pacientes con una cifosis “efectiva” (ver capítulo 7). La denervación y lesión del músculo paraespinal puede jugar un papel contributivo significativo en este proceso. Casi siempre se requiere una disección foraminal lateral en la columna torácica y particularmente en la columna lumbar. En este aspecto es de gran relevancia tener conocimiento de la anatomía foraminal.<sup>35</sup>

Las sacrectomías totales requieren en parte un abordaje dorsal.<sup>36</sup> La descompresión, instrumentación y fusión pueden realizarse mediante este abordaje. El posicionamiento para la sacrectomía puede constituir todo un reto y estar plagado de complicaciones potenciales. Debe tenerse gran cuidado en evi-



**Fig. 10.11** Descompresión ventral potencial del saco dural lograda con una cureta de ángulo reverso a través de exposiciones quirúrgicas dorsales, observada en vistas axiales. (A) Laminectomía. (B) Abordaje transpedicular. (C) Abordaje costotransversectomía. (D) Abordaje extracavitario lateral (para comparación). Note que la diferencia principal entre el abordaje costotransversectomía y el abordaje extracavitario lateral es la dirección de la resección del músculo erector de la columna (medial para el abordaje extracavitario lateral, y lateral para la costotransversectomía). Note también que se logra una ventaja de aproximadamente 20 a 40 grados de “ángulo de visión” para la descompresión ventral del saco dural, con el abordaje extracavitario lateral versus el abordaje de costotransversectomía. La resección del músculo erector de la columna elimina gran parte de esta diferencia.



**Fig. 10.12** La relación de un fragmento de disco torácico herniado con el saco dural afecta la orientación de la exposición quirúrgica. Una herniación lateral puede abordarse (A) dorsalmente o (B) dorsolateralmente. (C) Una herniación situada más medialmente puede abordarse en forma lateral. Este último solo es apropiado si el saco dural no se “comba” sobre la cara lateral de la herniación. (D) Si lo hace, está indicado un abordaje más ventral. Si se utiliza un abordaje lateral, debe tenerse cuidado en evitar remover la porción lateral de la herniación, como se muestra en (C), para que se cree una configuración anatómica como la mostrada en (D).

tar las neuropatías por decúbito y las neuropatías compresivas. Estas se relacionan en gran medida con la duración prolongada de los procedimientos. En dichos casos es prudente utilizar protocolos preventivos.<sup>37</sup>

### 10.10 Selección del abordaje quirúrgico más apropiado

La elección del abordaje quirúrgico más apropiado para una tarea quirúrgica dada depende en gran medida de la visión de la columna que se necesite. Esto también determina el ángulo de exposición, así como la suficiencia de la descompresión del saco dural (Fig. 10.10, Fig. 10.11, Fig. 10.12).<sup>38</sup> Como ejemplo, la exposición para la resección de un disco torácico o de otra patología ventral está determinada por la relación del componente herniado con el saco dorsal (ver Fig. 10.12). Por lo tanto, con frecuencia se requieren abordajes ventrales para las patologías ventrales duras (osificaciones).<sup>39</sup> Finalmente, los abordajes laparoscópicos y otros abordajes quirúrgicos mínimamente invasivos han proporcionado una utilidad selectiva significativa.<sup>40</sup> Ellos se discuten más adelante en el libro (ver capítulo 33).

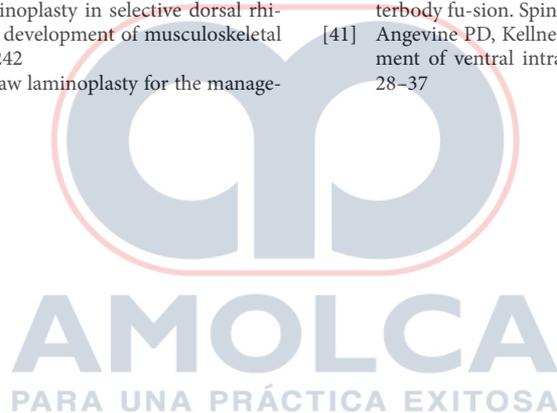
### 10.11 Abordajes a patologías intradurales

Las patologías intradurales frecuentemente requieren abordajes únicos e individualizados. La vasta mayoría puede abordarse mediante una exposición dorsal. Incluso pueden abordarse las patologías ventrales, con paciencia por parte del cirujano, desde exposiciones dorsolaterales. La mayoría de las patologías intradurales son tumores benignos (meningiomas y tumores de la vaina nerviosa). Dichas patologías muchas veces presentan un plano definido entre la médula espinal y el tumor, lo que facilita la exposición y resección. En circunstancias raras, los tumores ventrales verdaderos requieren un abordaje ventral.<sup>41</sup> Dos problemas fundamentales se asocian con este abordaje: (1) una exposición limitada a través de los cuerpos vertebrales y otras estructuras, y (2) problemas asociados con el cierre dural y la fuga subsecuente de líquido cefalorraquídeo. Las ventajas y desventajas deben ser sopesadas antes de la cirugía, cuando se planifican las estrategias quirúrgicas.

### Referencias

- [1] Smith GW, Robinson RA. The treatment of certain cervical-spine disorders by anterior removal of the intervertebral disc and interbody fusion. *J Bone Joint Surg Am* 1958; 40-A: 607–624
- [2] Apfelbaum RI, Kriskovich MD, Haller JR. On the incidence, cause, and prevention of recurrent laryngeal nerve palsies during anterior cervical spine surgery. *Spine* 2000; 25: 2906–2912
- [3] Johnson RM, Southwick WO. Surgical approaches to the spine. In: Rothman RH, Simeone FA, eds. *The Spine*. Vol 1. 2nd ed. Philadelphia, PA: W. B. Saunders; 1982:171–187
- [4] Southwick WO, Robinson RA. Surgical approaches to the vertebral bodies in the cervical and lumbar regions. *J Bone Joint Surg Am* 1957; 39-A: 631–644
- [5] Ebraheim NA, Lu J, Yang H, Heck BE, Yeasting RA. Vulnerability of the sympathetic trunk during the anterior approach to the lower cervical spine. *Spine* 2000; 25: 1603–1606
- [6] Beutler WJ, Sweeney CA, Connolly PJ. Recurrent laryngeal nerve injury with anterior cervical spine surgery risk with laterality of surgical approach. *Spine* 2001; 26: 1337–1342
- [7] Bazaz R, Yoo JU. Incidence of dysphagia following anterior cervical spine surgery. Paper No. 9 presented at: 29th Annual Meeting of the Cervical Spine Research Society; Monterey, CA; November 29–December 1, 2001
- [8] Donnelly RE, O'Brien MF, Dart D, Lowe TG, Dwyer TF. Dysphagia after multi-level cervical arthrodesis: a clinical and cineradiographic evaluation. Paper No. 10 presented at: 29th Annual Meeting of the Cervical Spine Research Society; Monterey, CA; November 29–December 1, 2001
- [9] Verbiest H. A lateral approach to the cervical spine: technique and indications. *J Neurosurg* 1968; 28: 191–203
- [10] Sharan AD, Przybylski GJ, Tartaglino L. Approaching the upper thoracic vertebrae without sternotomy or thoracotomy: a radiographic analysis with clinical application. *Spine* 2000; 25: 910–916
- [11] Seki T, Hida K, Akino M, Iwasaki Y. Anterior decompression of the atlantoaxial vertebral artery to treat bow hunter's stroke: technical case report. *Neurosurgery* 2001; 49: 1474–1476
- [12] Türe U, Pamir MN. Extreme lateral-transatlas approach for resection of the dens of the axis. *J Neurosurg* 2002; 96 Suppl: 73–82
- [13] Zengming X, Maolin H, Xinli Z, Qianfen C. Anterior transsternal approach for a lesion in the upper thoracic vertebral body. *J Neurosurg Spine* 2010; 13: 461–468
- [14] Sar C, Hamzaoglu A, Talu U, Domanic U. An anterior approach to the cervico-thoracic junction of the spine (modified osteotomy of manubrium sterni and clavicle). *J Spinal Disord* 1999; 12: 102–106
- [15] Teng H, Hsiang J, Wu C et al. Surgery in the cervicothoracic junction with an anterior low suprasternal approach alone or combined with manubriectomy and sternotomy: an approach selection method based on the cervicothoracic angle. *J Neurosurg Spine* 2009; 10: 531–542
- [16] Tubbs RS, Loukas M, Callahan JD, Cohen-Gadol AA. A novel approach to the upper anterior thoracic spine: a cadaveric feasibility study. *J Neurosurg Spine* 2010; 13: 346–350
- [17] McCormick PC. Retropleural approach to the thoracic and thoracolumbar spine. *Neurosurgery* 1995; 37: 908–914

- [18] Southerland SR, Remedios AM, McKerrell JG, Litwin D. Laparoscopic ap-approaches to the lumbar vertebrae. An anatomic study using a porcine model. *Spine* 1995; 20: 1620–1623
- [19] Brau SA. Mini-open approach to the spine for anterior lumbar interbody fusion: description of the procedure, results and complications. *Spine J* 2002; 2: 216–223
- [20] Benzel EC. Surgical exposure of the lumbosacral plexus and proximal sciatic nerve. In: Benzel EC, ed. *Practical Approaches to Peripheral Nerve Surgery*. Park Ridge, IL: American Association of Neurological Surgeons; 1992:153–170
- [21] Matsunaga S, Sakou T, Nakanisi K. Analysis of the cervical spine alignment following laminoplasty and laminectomy. *Spinal Cord* 1999; 37: 20–24
- [22] Capener N. The evolution of lateral rhachotomy. *J Bone Joint Surg Br* 1954; 36-B: 173–179
- [23] Larson SJ, Holst RA, Hemmy DC, Sances A. Lateral extracavitary approach to traumatic lesions of the thoracic and lumbar spine. *J Neurosurg* 1976; 45: 628–637
- [24] Maiman DJ, Larson SJ, Luck E, El-Ghatit A. Lateral extracavitary approach to the spine for thoracic disc herniation: report of 23 cases. *Neurosurgery* 1984; 14: 178–182
- [25] Benzel EC. The lateral extracavitary approach to the spine using the three-quarter prone position. *J Neurosurg* 1989; 71: 837–841
- [26] Kadri PAS, Al-Mefty O. Anatomy of the nuchal ligament and its surgical applications. *Neurosurgery* 2007; 61 Suppl 2: 301–304, discussion 304
- [27] Jane JA, Haworth CS, Broaddus WC, Lee JH, Malik J. A neurosurgical approach to far-lateral disc herniation. Technical note. *J Neurosurg* 1990; 72: 143–144
- [28] Maroon JC, Kopitnik TA, Schulhof LA, Abla A, Wilberger JE. Diagnosis and microsurgical approach to far-lateral disc herniation in the lumbar spine. *J Neurosurg* 1990; 72: 378–382
- [29] Cobb MA, Boop FA. Replacement laminoplasty in selective dorsal rhizotomy: possible protection against the development of musculoskeletal pain. *Pediatr Neurosurg* 1994; 21: 237–242
- [30] Edwards CC, Heller JG, Silcox DH. T-Saw laminoplasty for the management of cervical spondylotic myelopathy: clinical and radiographic outcome. *Spine* 2000; 25: 1788–1794
- [31] Saruhashi Y, Hukuda S, Katsuura A, Miyahara K, Asajima S, Omura K. A long-term follow-up study of cervical spondylotic myelopathy treated by “French window” laminoplasty. *J Spinal Disord* 1999; 12: 99–101
- [32] Sasai K, Saito T, Akagi S, Kato I, Ogawa R. Cervical curvature after laminoplasty for spondylotic myelopathy—involvement of yellow ligament, semi-spinalis cervicis muscle, and nuchal ligament. *J Spinal Disord* 2000; 13: 26–30
- [33] Tomita K, Kawahara N, Toribatake Y, Heller JG. Expansive midline T-saw laminoplasty (modified spinous process-splitting) for the management of cervical myelopathy. *Spine* 1998; 23: 32–37
- [34] Arnold PM, Johnson PL, Anderson KK. Surgical management of multiple thoracic disc herniations via a transfacet approach: a report of 15 cases. *J Neurosurg Spine* 2011; 15: 76–81
- [35] Akdemir G. Thoracic and lumbar intraforaminal ligaments. *J Neurosurg Spine* 2010; 13: 351–355
- [36] Gokaslan ZL, Romsdahl MM, Kroll SS et al. Total sacrectomy and Galveston L-rod reconstruction for malignant neoplasms. Technical note. *J Neurosurg* 1997; 87: 781–787
- [37] Sherman CE, Rose PS, Pierce LL, Yaszemski MJ, Sim FH. Prospective assessment of patient morbidity from prone sacral positioning. *J Neurosurg Spine* 2012; 16: 51–56
- [38] Stillerman CB, Chen TC, Couldwell WT, Zhang W, Weiss MH. Experience in the surgical management of 82 symptomatic herniated thoracic discs and re-view of the literature. *J Neurosurg* 1998; 88: 623–633
- [39] Hanai K, Ogikubo O, Miyashita T. Anterior decompression for myelopathy resulting from thoracic ossification of the posterior longitudinal ligament. *Spine* 2002; 27: 1070–1076
- [40] Zdeblick TA, David SM. A prospective comparison of surgical approach for anterior L4-L5 fusion: laparoscopic versus mini anterior lumbar interbody fusion. *Spine* 2000; 25: 2682–2687
- [41] Angevine PD, Kellner C, Haque RM, McCormick PC. Surgical management of ventral intradural spinal lesions. *J Neurosurg Spine* 2011; 15: 28–37



# 11. Efectos desestabilizadores de la cirugía de columna

Por su naturaleza, la cirugía de columna la desestabiliza, ya sea mediante la destrucción iatrogénica de los ligamentos espinales, lesión muscular, denervación muscular o mediante la reducción de la integridad ósea intrínseca. Siempre deben considerarse los efectos desestabilizadores de la cirugía espinal, y debe darse mayor consideración a los medios a través de los cuales puede restaurarse o aumentarse la estabilidad.

Los procedimientos quirúrgicos espinales ventrales y dorsales afectan la estabilidad espinal en varias formas. Esto está determinado predominantemente por la naturaleza de las estructuras espinales violadas por la exposición quirúrgica durante el procedimiento de cirugía. Si es biomecánicamente significativa, la reducción patológica (intrínseca) o iatrogénica (quirúrgica) de la estabilidad espinal debe ser compensada mediante una maniobra o combinación de tres maniobras terapéuticas: (1) manejo postural no quirúrgico (que incluye férula espinal externa) que proporcione tiempo para que la curación ósea y ligamentosa contrarreste la disrupción aguda de la integridad espinal; (2) colocación de puntal óseo espinal ventral (masa de fusión) o de instrumentación; y (3) colocación de instrumentación dorsal, con o sin fusión. El papel que juega cualquiera de estas maniobras terapéuticas depende del sesgo del cirujano y de la situación clínica. En este capítulo se aborda de manera específica el efecto de la desestabilización espinal iatrogénica.

## 11.1 Descompresión espinal ventral

### 11.1.1 Disrupción ligamentosa

Una porción significativa de la contribución a la estabilidad ligamentosa por las estructuras ligamentosas ventrales es a través de los ligamentos longitudinales anterior y posterior y el anillo fibroso. La disrupción del ligamento longitudinal anterior o posterior, o del anillo fibroso, ya sea por un proceso patológico ofensor o por un abordaje quirúrgico, puede reducir de manera sustancial la estabilidad intrínseca de la columna.

Las técnicas imagenológicas de resonancia magnética (MR por sus siglas en inglés) han proporcionado una herramienta diagnóstica para la evaluación de la integridad de las estructuras ligamentosas (ver capítulo 3).<sup>1</sup> Sin embargo, esta evaluación es estática; solo le informa al médico la extensión de la *continuidad* anatómica del ligamento y la presencia de lesión aguda de tejidos blandos, sin revelar nada acerca de la fortaleza del ligamento. Las radiografías dinámicas (proyecciones en flexión y extensión de la columna) pueden demostrar una falta de integridad si ocurre un movimiento excesivo. Pese a ello, si no ocurre una subluxación o movimiento excesivo durante los estudios radiográficos dinámicos, no se establece la presencia de *estabilidad* espinal. La protección y la presencia de férulas a nivel espinal, o el uso de técnicas imagenológicas inadecuadas, o una cooperación subóptima del paciente, pueden llevar a interpretaciones erróneas en este aspecto (ver capítulo 3). A pesar de estos factores, la contribución ligamentosa a la estabilidad casi siempre puede evaluarse de manera razonable antes de la cirugía.

Es difícil evaluar la extensión de la disrupción de las estructuras ligamentosas ventrales mediante una exposición quirúrgica. Varios hechos acerca de la anatomía y las características de la

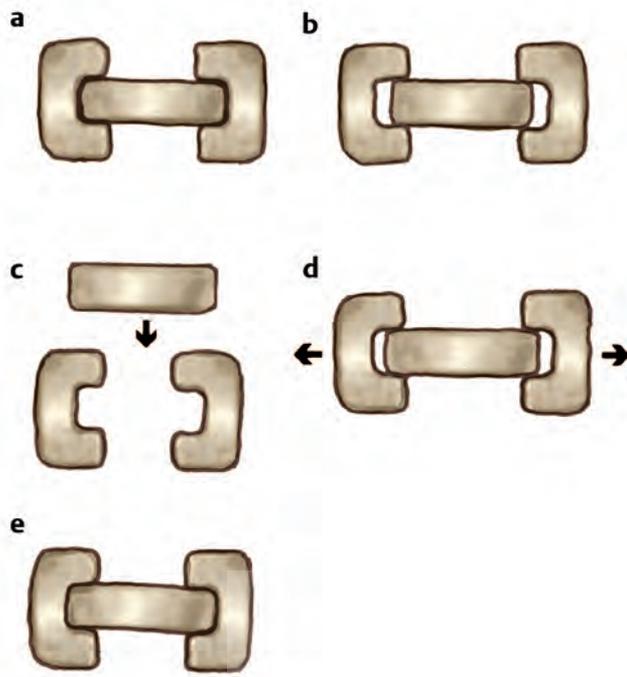
fortaleza de los ligamentos longitudinales anterior y posterior deben ser suficientes en la mayoría de los escenarios de toma de decisiones clínicas, en particular cuando se combinan con la información obtenida de las observaciones intraoperatorias.

El ligamento longitudinal anterior es un ligamento fuerte. También es relativamente amplio (ver capítulo 1). Si no está alterado antes de la cirugía, la exposición quirúrgica (incluso una exposición ventral amplia) por lo general no altera todo el ligamento. Por lo tanto, en la mayoría de los casos la contribución del ligamento longitudinal anterior a la estabilidad espinal posoperatoria es significativa. De este modo, la naturaleza de banda de tensión del ligamento longitudinal anterior en extensión se preserva parcialmente, lo cual limita la extensión. En consecuencia, esto es un factor limitante para la ligamentotaxia (ver capítulo 8).

Por otra parte, el ligamento longitudinal posterior es más débil que el anterior en todas las regiones de la columna. Además, presenta una cintura (es más estrecho) en la región media del cuerpo vertebral en cada nivel segmentario. El ligamento longitudinal posterior en la región media del cuerpo vertebral es más estrecho en cada nivel espinal que el saco dural. Por lo tanto, en cualquier nivel de la columna, una vertebrectomía que descomponga de manera adecuada el saco dural casi ciertamente alterará el ligamento longitudinal posterior totalmente a cualquier nivel de la columna. Así, se altera la naturaleza de banda de tensión del ligamento longitudinal posterior, y se deteriora su contribución a la limitación de la flexión (y distracción). Esto también limita la eficacia de la ligamentotaxia y de los procedimientos para realizar la misma.

Un cirujano puede adquirir un “sentido” para determinar la extensión de la estabilidad ligamentosa al momento de la cirugía, luego de la descompresión del saco dural (vertebrectomía). La aplicación de tracción, la distracción espinal con instrumentos como los separadores de cuerpos vertebrales, u otras manipulaciones espinales intraoperatorias, pueden proporcionarle al cirujano información vital acerca de la lasitud espinal. Esto puede ayudar a determinar si se necesita un implante espinal como complemento a la fusión intervertebral. Por ejemplo, la lasitud excesiva, según lo determinado por las maniobras de distracción intraoperatorias, puede sugerir que un injerto óseo intervertebral por sí solo no será suficiente.

Para que un injerto de puntal intervertebral sea inmediatamente efectivo como dispositivo de estabilización, debe posicionarse de manera segura en las muescas de los cuerpos vertebrales (es decir, los cuerpos vertebrales por encima y por debajo del puntal). Esto permite una fijación semirrígida de los cuerpos vertebrales que colindan con el puntal (Fig. 11.1a). Si la integridad ligamentosa no es adecuada, como lo demuestra la lasitud excesiva durante las maniobras intraoperatorias de estrés, el injerto de puntal no se fijará en forma segura en las muescas de los cuerpos vertebrales por encima y por debajo del puntal (Fig. 11.1b). La resistencia a la distracción proporcionada por los ligamentos intactos les permite a los cuerpos vertebrales “frenar” en el injerto de puntal. Este efecto de “frenado” es una parte integral de la mayoría de las técnicas de fusión intervertebral. La distracción espinal, seguida por la colocación de un injerto



**Fig. 11.1** (A) Injerto de puntal ventral del cuerpo vertebral firmemente posicionado en muescas relativamente profundas. (B) La laxitud ligamentosa produce incapacidad de los cuerpos vertebrales colindantes para aplicar suficiente fuerza al injerto de puntal para asegurar su posición. (C, D) Distracción (flechas horizontales) seguida por colocación de injerto óseo (flecha vertical) en muescas bien formadas, seguida por (E) la relajación de la distracción, que proporciona la base para una fusión intervertebral bien concebida si la resistencia ligamentosa a la distracción es adecuada.

de puntal bien confeccionado en muescas bien configuradas y luego por la relajación de la distracción, permite que se manifiesten las propiedades de “frenado” de los ligamentos y lleva a un constructo fuerte (Fig. 11.1c-e). De este modo, un implante espinal, reposo prolongado en cama, o una órtesis complementaria al procedimiento de descompresión-fusión usualmente son necesarios cuando se pierde esta resistencia ligamentosa a la distracción. Muchos implantes espinales colocados en modo de distracción, que incluyen las varillas de distracción de Harrington y los injertos de puntales intervertebrales, se basan en la resistencia espinal intrínseca a la distracción para obtener una seguridad óptima de fijación.

La disrupción del interespacio discal es una causa de inestabilidad espinal, aunque rara.<sup>2</sup> Este efecto es acumulativo.<sup>3,4</sup> Este puede ser evaluado con facilidad mediante imágenes de MR (Fig. 11.2). Sin embargo, como entidad aislada, no afecta de forma sustancial el proceso de toma de decisión, excepto por la necesidad de un período de órtesis espinal externa.<sup>1</sup> La contribución del anillo fibroso a la estabilidad espinal, aunque significativa, se asemeja a la de los ligamentos longitudinales anterior y posterior inmediatamente adyacentes. Su contribución no puede separarse de la correspondiente a estos ligamentos. Por lo tanto, no se requiere una consideración biomecánica separada. Empero, vale la pena enfatizar que el complejo anillo fibroso-ligamento longitudinal anterior-ligamento longitudinal posterior proporciona una estabilidad sustancial a la columna.

Chen et al., proporcionaron una excelente comprensión de la contribución ligamentosa a la estabilidad de la columna



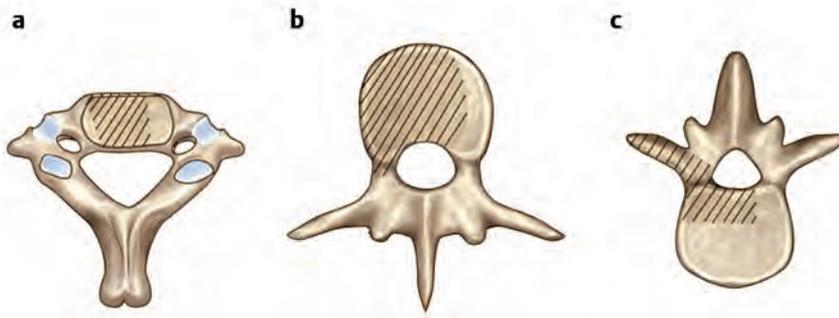
**Fig. 11.2** Imagen de resonancia magnética de un paciente con una disrupción posttraumática del interespacio discal. Note la lesión de tejidos blandos tanto prevertebral como dorsal (interespinosa).

cervical, particularmente en lo concerniente a las estructuras afectadas por las cirugías de descompresión cervical anterior.<sup>5</sup> Ellos demostraron la contribución sustancial de la disfunción del disco intervertebral, la articulación uncovertebral unilateral, la articulación uncovertebral bilateral y el ligamento longitudinal posterior a la inestabilidad espinal. Ellos concluyeron que la descompresión cervical anterior disminuye de manera significativa la estabilidad. Todas las estructuras antes mencionadas contribuyen en gran medida a esta estabilidad. Cabe mencionar que la flexión y la extensión fueron afectadas en gran manera por las disrupciones de las estructuras antes mencionadas.<sup>5</sup>

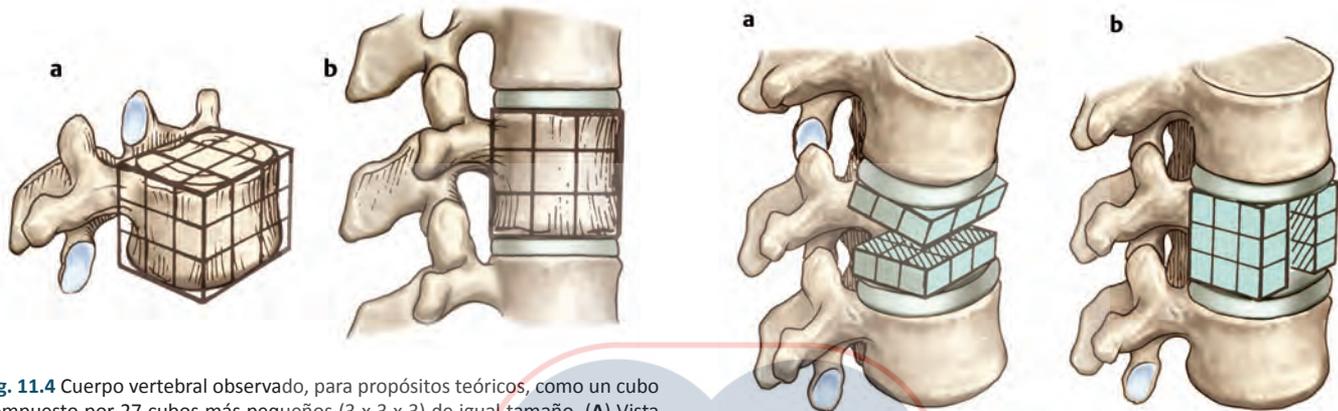
### 11.1.2 Disrupción ósea

Al igual que la inestabilidad por la pérdida de la integridad ligamentosa, la disminución de la integridad del cuerpo vertebral —ya sea ocasionada por el proceso patológico espinal<sup>6</sup> o por la remoción quirúrgica de hueso— reduce la estabilidad espinal. Las imágenes de MR son útiles para determinar la contribución ósea a la estabilidad. Las radiografías simples y la tomografía computarizada (CT por sus siglas en inglés) son mejores para este fin;<sup>2</sup> en cambio, no puede sobrevalorarse el uso de las reconstrucciones tomográficas sagitales o de las imágenes sagitales por MR para mostrar la anatomía del plano sagital.

La extensión de la descompresión espinal ventral afecta evidentemente la estabilidad de la columna. Una columna que se ha sometido a una vertebrectomía completa es menos estable intrínsecamente que otra que se ha sometido a una resección incompleta de cuerpo vertebral. Esto es cierto tanto para el abordaje ventral como para el lateral en la vertebrectomía. Sin embargo, raras veces se reseca todo el cuerpo vertebral. La fracción del cuerpo vertebral, así como la posición anatómica (en el plano anteroposterior) de la porción reseca del cuerpo vertebral, afecta de manera significativa la estabilidad espi-



**Fig. 11.3** Vistas axiales de la extensión de la remoción ósea (áreas sombreadas) en (A) una descompresión cervical ventral, (B) una descompresión ventrolateral torácica o lumbar, y (C) una descompresión extracavitaria lateral torácica o lumbar.

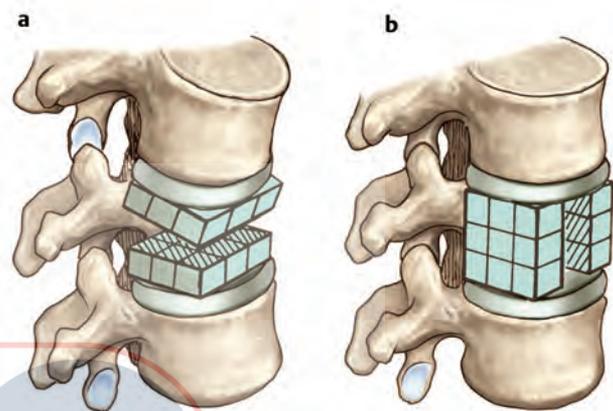


**Fig. 11.4** Cuerpo vertebral observado, para propósitos teóricos, como un cubo compuesto por 27 cubos más pequeños (3 x 3 x 3) de igual tamaño. (A) Vista oblicua. (B) Vista lateral.

nal. Por ejemplo, una corpectomía cervical estándar reseca de manera incompleta el cuerpo vertebral en toda la dimensión rostral-caudal del cuerpo vertebral (Fig. 11.3a). Similarmente, las descompresiones extracavitarias ventrolaterales (Fig. 11.3b) y laterales (Fig. 11.3c) resecan en forma incompleta el cuerpo vertebral sobre toda la dimensión rostral-caudal del mismo (ver capítulo 10). La fracción de hueso restante en la porción ventral (versus la porción dorsal) del cuerpo vertebral determina parcialmente la extensión de la estabilidad espinal ventral.

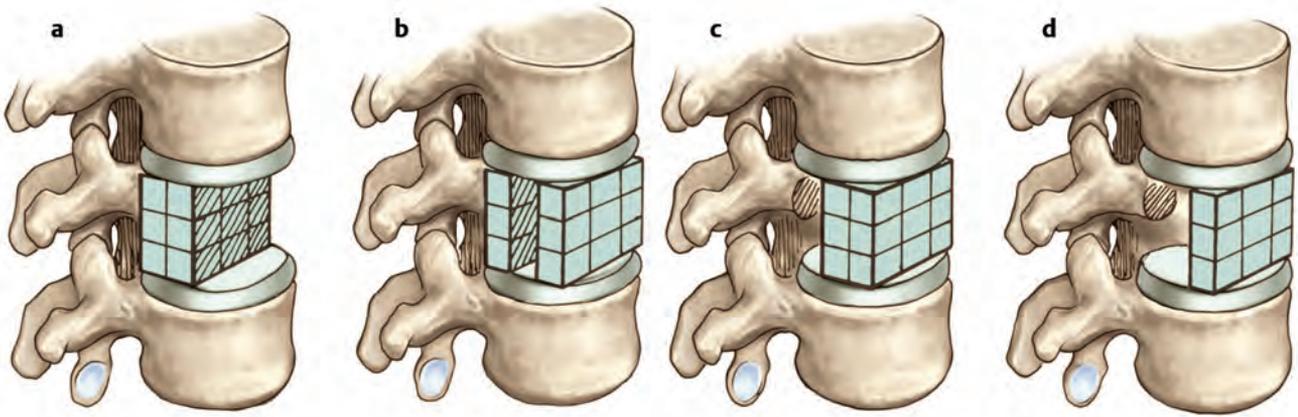
La localización del segmento resecaado también afecta la extensión de la desestabilización espinal iatrogénica. Para ilustrar este punto, considere que el cuerpo vertebral es un cubo compuesto por 27 cubos más pequeños de igual tamaño (Fig. 11.4). También asuma que está presente una estabilidad de la columna posterior. La remoción quirúrgica del tercio medio (es decir, la capa media de nueve cubos) del cuerpo vertebral, como se observa en el plano sagital, desestabiliza macroscópicamente la columna (Fig. 11.5a), mientras que la remoción quirúrgica del tercio medio, como se observa en el plano coronal-sagital, no lo hace (Fig. 11.5b). En el primer caso, las columnas de Denis anterior y media<sup>7</sup> se alteran en toda la sección transversal del cuerpo vertebral, y se produce pérdida de estabilidad. En el último caso, solo se ha alterado un tercio de la integridad de las columnas anterior y media de Denis.

Las vertebrectomías parciales, como se observan en el plano sagital, también varían en su efecto desestabilizador en virtud de la porción del cuerpo vertebral removida. Por ejemplo, la remoción de la sección ventral (los nueve cubos ventrales) muy probablemente tendrá un efecto significativo sobre la estabilidad, mientras que la remoción de las secciones de cubos



**Fig. 11.5** Resecciones de porciones del cuerpo vertebral "cúbico" mostrado en la Fig. 9.4. (A) Resección (o disrupción) del tercio axial medio (horizontal) del cuerpo vertebral en su dimensión sagital, como el que puede ocurrir luego de trauma. (B) Resección del tercio sagital medio (vertical) del cuerpo vertebral. Note que la resección en (B) no desestabiliza significativamente la columna, incluso aunque las resecciones óseas son de magnitudes similares (es decir, se resecan volúmenes similares de hueso).

tanto media como dorsal puede no producir una situación significativamente inestable si los siguientes componentes siguen intactos: (1) la sección ventral de cubos, (2) el ligamento longitudinal anterior, (3) la integridad ligamentosa de la columna dorsal y (4) la integridad ósea de la columna dorsal (Fig. 11.6). La minimización de la extensión de la resección del cuerpo vertebral disminuye la desestabilización iatrogénica por el procedimiento quirúrgico. En el caso de verdaderos abordajes quirúrgicos ventrales, una estrecha depresión de resección del cuerpo vertebral produce una menor resección y un menor ancho de disrupción del ligamento longitudinal anterior. Por otra parte, una resección estrecha del cuerpo vertebral a menudo produce una exposición inadecuada del canal espinal y descompresión del saco dural (Fig. 11.7). De forma similar, una tendencia natural de los cirujanos es a descomprimir el canal espinal más que adecuadamente en el lado opuesto a donde se encuentran parados, y a descomprimir de forma inadecuada el saco dural en el mismo lado en que se encuentran de pie (Fig. 11.8). Por lo tanto, requiere consideración una descompresión "en frasco de Erlenmeyer". Este tipo de descompresión compensa varios de los problemas aquí delineados. Esta implica una descompresión estrecha a nivel ventral y una descompresión más ancha a nivel dorsal (Fig. 11.9a); en consecuencia, permite una descompresión amplia del saco dural y los agujeros neurales. Esto se logra



**Fig. 11.6** Resecciones de porciones del cuerpo vertebral “cúbico” mostrado en la Fig. 11.4. La vertebrectomía parcial que involucra la remoción de la porción ventral (A) en el plano coronal del cuerpo vertebral afecta la estabilidad en mayor grado que la resección de la porción media (B) o dorsal (C) del cuerpo vertebral en el plano coronal. (D) De hecho, la resección tanto del tercio medio como del tercio dorsal del cuerpo vertebral (en presencia de una columna posterior intacta y de un tercio vertebral intacto del cuerpo vertebral) puede no alterar en forma significativa la integridad espinal.



**Fig. 11.7** Vertebrectomía cervical estrecha (área sombreada). Note que el ancho del saco dural es mayor que el ancho de la depresión.

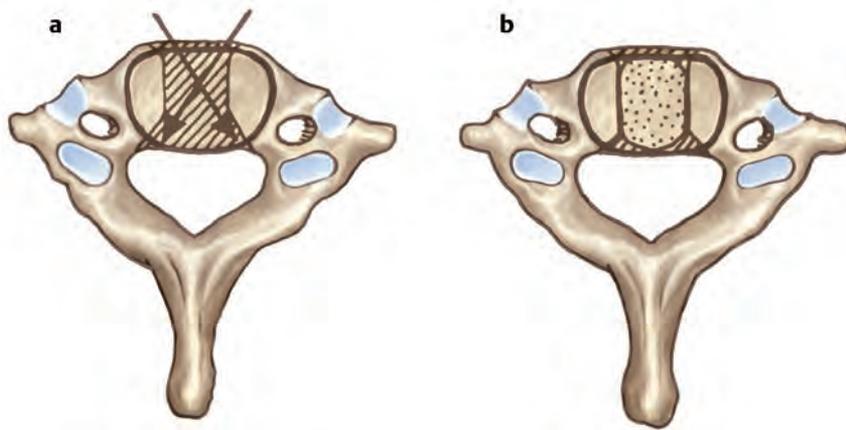
mediante la compensación del cirujano para la tendencia natural conocida a descomprimir en forma inadecuada el saco dural en el lado cercano del paciente, mediante la descompresión del saco dural desde ambos lados de la mesa. Esto proporciona una buena visión a cada lado del canal espinal expuesto (descompresión amplia) mientras permite que sea suficiente una resección ventral mínima del cuerpo vertebral (lo que minimiza la desestabilización iatrogénica de la columna; Fig. 11.9b). La minimización de la resección ventral del cuerpo vertebral también proporciona un mayor soporte lateral para el injerto de puntal (ver capítulo 12 y Fig. 11.9b).

Los abordajes laterales para la descompresión ventral del saco dural (por ejemplo, mediante descompresión extracavitaria lateral de la columna) también pueden desestabilizar innecesariamente la columna si se realiza una resección excesiva del cuerpo

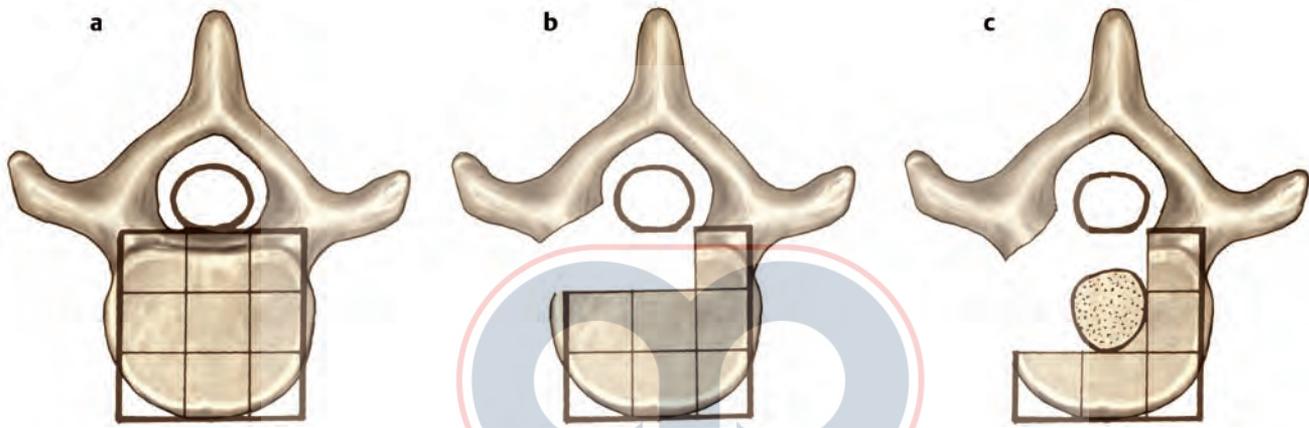
**Fig. 11.8** Resultado final de la tendencia natural del cirujano a desviarse de la línea media, con error más comúnmente hacia la descompresión del lado opuesto al lado del paciente (área sombreada) en donde se encuentra el cirujano.

vertebral. Como se mencionó arriba, si la cara ventral del cuerpo vertebral está quirúrgicamente inalterada y los elementos dorsales no han sido violados, puede haber una estabilidad sustancial. Por lo tanto, la minimización de la remoción del hueso debe ayudar en la adquisición de estabilidad posoperatoria. La preservación de la integridad de las caras ventral y lateral del cuerpo vertebral es particularmente importante.

La ilustración del cuerpo vertebral al dividirlo en tercios en cada plano (para un total de 27 segmentos cúbicos) también es útil para conceptualizar la naturaleza desestabilizadora de un procedimiento quirúrgico mediante el abordaje extracavitario



**Fig. 11.9** (A) Exposición “en frasco de Erlenmeyer” del canal espinal en una vista axial. La vista del saco dural se realiza si la columna se observa desde ambos lados del paciente durante la descompresión. La vista lograda de este modo es señalada por las flechas. El ancho relativamente estrecho de la porción ventral de la depresión incrementa la estabilidad mediante (1) la minimización de la remoción de hueso y (2) el ajuste ceñido del injerto óseo subsecuente (*área punteada*). (B) Esto proporciona estabilidad lateral para el puntal por medio de un efecto de refuerzo.



**Fig. 11.10** El cuerpo vertebral hipotético de 27 cubos puede usarse para mostrar la resección ósea lograda mediante una descompresión extracavitaria lateral del saco dural torácico o lumbar. (A) Vista preoperatoria de la columna. (B) La resección de componentes óseos (*cubos*) en la cara más dorsal del cuerpo vertebral permite la preservación sustancial de la integridad ósea. Luego se requiere una mayor resección ósea para la colocación del injerto de puntal. (C) Extensión final de la remoción ósea, con el injerto óseo (*área punteada*) en su sitio.

lateral (Fig. 11.10a). La descompresión del saco dural debe involucrar el plano más dorsal, solo en el lado de la exposición (Fig. 11.10b). Los planos medio y ventral pueden considerarse para el injerto óseo. Si se va a minimizar una desestabilización iatrogénica ventral, no debe alterarse quirúrgicamente el plano ventral (los nueve cubos ventrales). En consecuencia, en este caso hipotético, el plano ventral debe dejarse intacto y el plano medio debe usarse como un sitio para la colocación de la fusión intervertebral (Fig. 11.10c). Esto tiene más sentido si el cirujano también considera que el plano medio es el más consistente con el eje instantáneo de rotación (IAR por sus siglas en inglés) y, por lo tanto, se encuentra en una posición óptima para el soporte de carga axial por el injerto de puntal colocado quirúrgicamente (ver capítulo 2).

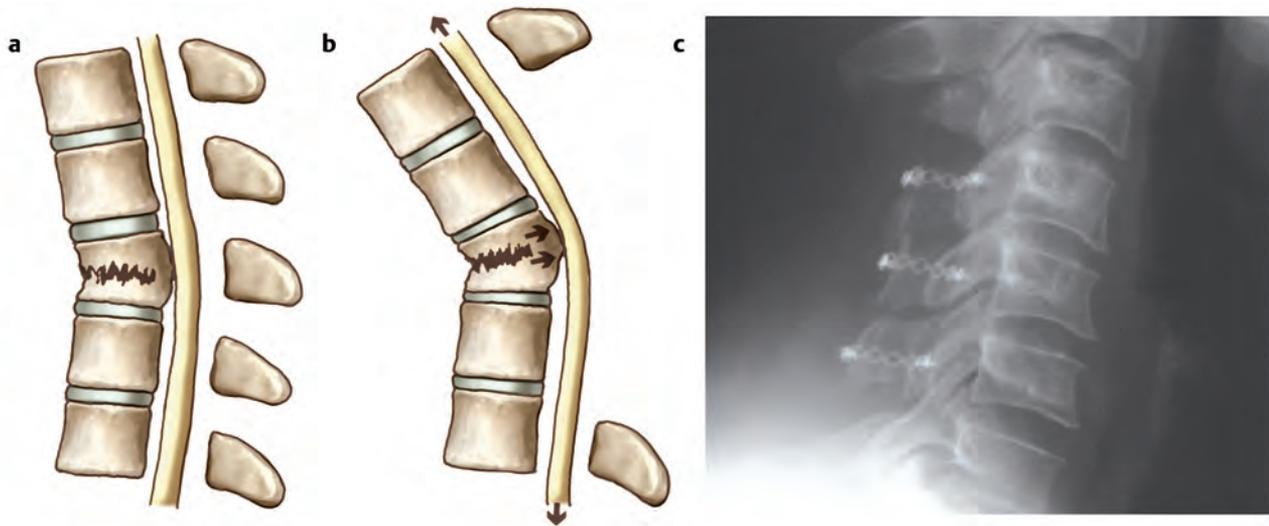
El efecto de la articulación uncovertebral sobre la estabilidad es significativo. Esto es particularmente cierto para la extensión, inclinación lateral y torsión.<sup>8</sup>

## 11.2 Descompresión espinal dorsal

La laminectomía también reduce la estabilidad intrínseca de la columna. Morgan y colegas documentaron una incidencia elevada de deterioro neurológico poslaminectomía luego del trauma espinal.<sup>9</sup> Este se relaciona con uno de tres factores o una

combinación de los mismos: (1) neurotrauma intraoperatorio; (2) creación de una angulación aguda del saco dural en los límites de una descompresión, que puede producir distorsión neural (ver capítulo 8); y (3) desestabilización de la columna, lo que exagera una deformidad espinal preexistente. Esta última entidad ocurre con mayor frecuencia a medida que se incrementa el ancho de la laminectomía.<sup>10</sup> Un ligero incremento en una deformidad por flexión creada por los efectos desestabilizadores de una laminectomía en presencia de una lesión de masa ventral produce distorsión neural tanto mediante flexión como mediante distracción sobre el pivote ventral (Fig. 11.11a,b). La incidencia de deformación por flexión luego de una laminectomía cervical es significativa.<sup>11</sup> La creación de una angulación aguda del saco dural en los límites de una laminectomía también es una manifestación de una cirugía pobremente concebida (ver capítulo 8). En consecuencia, estos dos últimos factores son prevenibles. La laminoplastia puede permitir la preservación parcial de la banda de tensión dorsal, y limita potencialmente de este modo uno de los efectos negativos de una laminectomía (Fig. 11.11c).<sup>12,13</sup>

La desestabilización iatrogénica de la columna normalmente es predecible. Esta se relaciona con frecuencia con incrementos en la flexibilidad.<sup>14</sup> Sin embargo, debido a que la extensión de la



**Fig. 11.11** Exageración de la deformidad por flexión luego de una laminectomía. (A) Vista sagital preoperatoria. (B) Vista sagital posoperatoria. Note la distorsión neural por distracción (flechas verticales) y la inmovilización sobre la compresión ventral (flechas horizontales). Una laminoplastia como la observada en una radiografía lateral (C) permite la retención de la integridad de la banda de tensión dorsal. Note la naturaleza de puerta abierta de la laminoplastia, con las “puertas” mantenidas abiertas por miniplacas.

inestabilidad creada *no siempre* es obvia, en especial durante o poco después de la cirugía, es difícil estar seguro que no ha ocurrido una desestabilización iatrogénica. La desestabilización iatrogénica inaceptable puede prevenirse por una de dos técnicas, o por ambas: (1) disrupción limitada de la integridad espinal y (2) adición de un procedimiento de aumento de estabilidad (por ejemplo, colocación de un implante espinal o uso de una laminoplastia).<sup>12,15,16</sup> El reconocimiento de cualquier necesidad de este último es imperativo, pero no siempre es obvio. Finalmente, quizás debería considerarse una laminoplastia debido a su efecto teórico preservador de la anatomía.<sup>17</sup> No obstante, esto no está libre de complicaciones.<sup>18,19</sup>

Tres factores están involucrados en la desestabilización iatrogénica por medio del abordaje dorsal. El primero involucra la falta de reconocimiento de la presencia de inestabilidad espinal ventral. La configuración de la columna puede jugar un papel en la contribución de la inestabilidad ventral a la extensión de la desestabilización iatrogénica por el abordaje posterior. Casi sin importar la extensión mínima de desestabilización dorsal iatrogénica, la presencia de inestabilidad espinal ventral predice un resultado pobre desde un punto de vista estructural.

El segundo factor involucra la resección de los ligamentos interespinosos. Aunque dichos ligamentos son relativamente débiles, tienen una ventaja biomecánica en virtud del largo momento de fuerza (que se extiende desde el proceso espinoso hasta el IAR; ver capítulo 3).

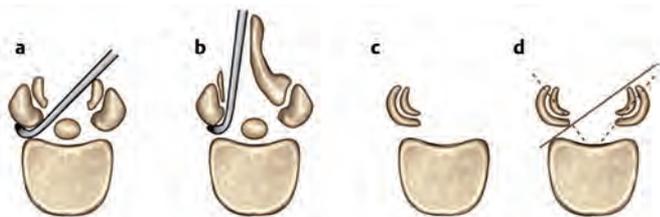
El cirujano debe tener en mente que el ligamento interespinoso muchas veces está ausente a nivel L5-S1, y es deficiente a nivel L4-L5.

El tercer factor es la disrupción quirúrgica de la carilla articular. Sin importar la región de la columna involucrada, la resección excesiva de la carilla articular puede producir inestabilidad. En la columna cervical, se ha documentado que la extensión de resección tolerable es de un tercio a la mitad de la carilla articular (ver capítulo 3).<sup>10</sup> En la región lumbar, la disrupción facetaria se asocia con una mayor incidencia de ines-

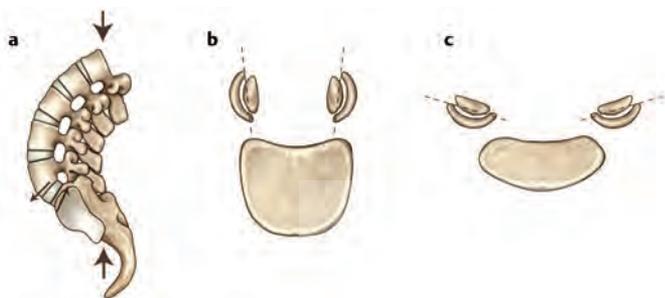
tabilidad glacial. Existe controversia acerca de lo deseable del manejo intraoperatorio con fusión, con o sin instrumentación, cuando existe una deformidad traslativa preexistente.<sup>20,21</sup> Sin embargo, debe tenerse en mente que la espondilolistesis lumbar degenerativa raras veces progresa más allá de una deformación traslativa del 30% del cuerpo vertebral.<sup>22</sup> En consecuencia, debe cuestionarse el valor de la fusión de rutina y la instrumentación luego de la descompresión del canal espinal.

La laminoplastia cervical se ha sugerido como una alternativa a la laminectomía estándar para la patología compresiva de la columna cervical, en particular cuando se consideran los efectos desestabilizadores de la cirugía espinal. La laminoplastia por sí sola puede desestabilizar la columna en menor magnitud que la laminectomía, aunque esto no se ha probado de forma inequívoca.<sup>23-25</sup> De nota particular en este aspecto está el hecho de que las diversas técnicas de laminoplastia se asocian con resultados clínicos variables, según la técnica, y que la movilidad cervical puede contribuir al desarrollo de un deterioro retrasado de la mielopatía cervical.<sup>26</sup> La preservación de las inserciones del músculo extensor profundo en los procesos espinosos y otras estructuras óseas relevantes puede disminuir la desestabilización.<sup>27</sup> La minimización similar de las disrupciones óseas y de tejidos blandos puede afectar de manera positiva el resultado clínico.<sup>28</sup> En este aspecto, la laminectomía ha mostrado tener un mayor efecto desestabilizador que la laminotomía. A su vez, la laminectomía produce un mayor estrés del interespacio discal en el anillo ventral en comparación con la laminotomía.<sup>29</sup> Al llevar este concepto un paso hacia adelante, las cirugías lumbares que preservan mejor la integridad del complejo de la carilla articular inducen menos inestabilidad biomecánica, y alteran la cinemática en un menor grado en comparación con aquellas que no la preservan.<sup>30</sup>

Las correlaciones clínicas no son uniformemente consistentes con respecto a los efectos desestabilizadores de la cirugía espinal. La remoción unilateral de la *pars interarticularis* ha mostrado ser efectiva para aliviar los síntomas radiculares lum-



**Fig. 11.12** La anatomía de la carilla articular lumbar puede preservarse si se utiliza la trayectoria apropiada para la descompresión del receso lateral. (A) La trayectoria quirúrgica de una laminectomía proporciona acceso al receso lateral y descompresión sin una desestabilización significativa de la carilla articular y la columna. (B) Una laminotomía proporciona un acceso más vertical. El acceso a los recesos laterales está obstruido por los procesos espinosos. Se requiere una mayor resección de la carilla articular (en comparación con la laminectomía). Esto puede desestabilizar innecesariamente a la columna. (C) La geometría en forma de copa de la carilla articular debe tomarse en consideración en este aspecto. (D) La preservación de la porción ventral de la copa mediante el uso de una trayectoria quirúrgica apropiada (*línea sólida*) debe ayudar en la adquisición de estabilidad posoperatoria al minimizar la resección de la carilla articular. El ángulo de la carilla articular es mostrado por las líneas punteadas.



**Fig. 11.13** (A) La columna lumbar baja y lumbosacra es sometida a cargas traslativas significativas (*flechas pequeñas*), particularmente si existe una lordosis excesiva y se aplican cargas axiales (*flechas grandes*). (B) Las carillas articulares con orientación sagital (*líneas punteadas*) resisten pobremente la traslación. Esto es más evidente en L4-L5, la carilla articular de orientación sagital más caudal. (C) La articulación L5-S1 está orientada coronalmente (*líneas punteadas*). Por lo tanto, resiste bien la traslación (si está intacta) a pesar de las cargas traslativas significativas aplicadas. (Las líneas punteadas representan los ángulos de la carilla articular).

bares, sin un incremento en la incidencia de dolor de espalda bajo.<sup>31</sup> Esto sugiere que dicha operación no es desestabilizadora. De hecho, Tender et al., han demostrado en un estudio biomecánico que la remoción unilateral de la *pars interarticularis* no incrementa la movilidad espinal. En consecuencia, la resección unilateral de la *pars interarticularis* no parece desestabilizar en forma significativa la columna.<sup>32</sup>

La integridad de las carillas articulares lumbares puede alterarse en forma mínima durante la laminectomía si se utiliza una trayectoria óptima (ver capítulo 5 y Fig. 11.12a).<sup>33-37</sup> Esto no es necesariamente así para la laminotomía (Fig. 11.12b). En cambio, sí es de esta forma para la resistencia a la deformación por flexión.<sup>38</sup> Se debe tener en mente que las carillas articulares lumbares tienen forma de “copa” (Fig. 11.12c). La naturaleza horizontal relativa de estas articulaciones, combinada con su forma en copa, crea una ventaja para el cirujano durante la descompresión si se considera en forma apropiada la anatomía facetaria (Fig. 11.12d).<sup>39-46</sup> Esto también aplica a la columna torácica.<sup>47</sup>

La combinación de una carilla articular con orientación vertical y una postura lordótica exagerada predispone a la columna lumbar a una deformación traslativa. La orientación relativamente vertical del interespacio discal en la región lumbar baja hace que una carga axial aplicada lleve al ejercicio de una fuerza de cizallamiento en la columna. Las carillas articulares con orientación vertical están pobremente posicionadas para inhibir esta deformación traslativa, mientras que las carillas horizontales (coronales) tienen una posición favorable para inhibir esta deformación traslativa (Fig. 11.13). Los pacientes lesionados por estas fuerzas aplicadas pueden beneficiarse de la fusión e instrumentación si se realiza una laminectomía, particularmente si se crea en forma quirúrgica una disrupción adicional de la carilla articular.

Las cirugías de descompresión articular se asocian con el potencial de inestabilidad iatrogénica. Esto es en especial cierto en la unión cervicotorácica, la cual es una unión particularmente

vulnerable debido al cambio abrupto de movilidad (cervical) a inmovilidad (torácica). Steinmetz et al., concluyeron que la laminectomía a través de la unión cervicotorácica debe complementarse con instrumentación y fusión, y que las corpectomías multinivel ventrales a través de la unión cervicotorácica deben suplementarse con instrumentación dorsal. Ellos también concluyeron que debe considerarse una instrumentación complementaria para aquellos pacientes que se han sometido a cirugía cervical previa, aquellos con una historia de uso de tabaco, o aquellos que se someten a cirugía para corrección de deformidad.<sup>48</sup> Sin embargo, no pase por alto que la depresión y la ansiedad pueden alterar los resultados clínicos —incluso en pacientes con síntomas claros de mielopatía.<sup>49</sup> Los puntajes de depresión y ansiedad se asocian fuertemente con disminución de la movilidad, e inconsistentemente con disfunción del brazo. Se concluyó que la disfunción ambulatoria puede ocasionar o exacerbar los síntomas de depresión y ansiedad en pacientes con mielopatía espondilótica cervical.<sup>49</sup>

La sacrectomía radical es desestabilizadora. No obstante, incluso este grado de inestabilidad puede ser manejado de manera exitosa con instrumentación.<sup>50,51</sup>

## Referencias

- [1] Benzel EC, Hart BL, Ball PA, Baldwin NG, Orrison WW, Espinosa MC. Magnetic resonance imaging for the evaluation of patients with occult cervical spine injury. *J Neurosurg* 1996; 85: 824-829
- [2] Benzel EC, Kesterson L, Willis BK, Orrison WW, Espinosa MC. Magnetic resonance imaging, computed tomography, and plain film comparison in acute cervical spine trauma. Poster No. 26 presented at: Annual Meeting of the Congress of Neurological Surgeons; Orlando, FL: October 1991
- [3] Chen TY, Crawford NR, Sonntag VK, Dickman CA. Biomechanical effects of progressive anterior cervical decompression. *Spine* 2001; 26: 6-13, discussion 14
- [4] Wall EJ, Bylski-Austrow DI, Shelton FS, Crawford AH, Kolata RJ, Baum DS. Endoscopic discectomy increases thoracic spine flexibility as effectively as open discectomy. A mechanical study in a porcine model. *Spine* 1998; 23: 9-15, discussion 15-16

- [5] Chen TY, Crawford NR, Sonntag VKH, Dickman CA. Biomechanical effects of progressive anterior cervical decompression. *Spine* 2001; 26: 6–13, discussion 14
- [6] Oda K, Shibayama Y, Abe M, Onomura T. Morphogenesis of vertebral deformities in involutional osteoporosis. Age-related, three-dimensional trabecular structure. *Spine* 1998; 23: 1050–1055, discussion 1056
- [7] Denis F. The three column spine and its significance in the classification of acute thoracolumbar spinal injuries. *Spine* 1983; 8: 817–831
- [8] Kotani Y, McNulty PS, Abumi K, Cunningham BW, Kaneda K, McAfee PC. The role of anteromedial foraminotomy and the uncovertebral joints in the stability of the cervical spine. A biomechanical study. *Spine* 1998; 23: 1559–1565
- [9] Morgan TH, Wharton GW, Austin GN. The results of laminectomy in patients with incomplete spinal cord injuries. *Paraplegia* 1971; 9: 14–23
- [10] Raynor RB, Pugh J, Shapiro I. Cervical facetectomy and its effect on spine strength. *J Neurosurg* 1985; 63: 278–282
- [11] Kaptain GJ, Simmons NE, Replogle RE, Pobereskin L. Incidence and outcome of kyphotic deformity following laminectomy for cervical spondylotic myelopathy. *J Neurosurg* 2000; 93 Suppl: 199–204
- [12] Baisden J, Voo LM, Cusick JF, Pintar FA, Yoganandan N. Evaluation of cervical laminectomy and laminoplasty. A longitudinal study in the goat model. *Spine* 1999; 24: 1283–1288, discussion 1288–1289
- [13] Edwards CC II, Heller J, Murakami H, Rodts G. Laminoplasty vs. laminectomy with fusion for multi-level cervical myelopathy: independent matched cohort analysis. Paper presented at: 15th Annual Meeting of the North American Spine Society; New Orleans, LA; October 25–28, 2000:11–12
- [14] Cusick JF, Pintar FA, Yoganandan N. Biomechanical alterations induced by multilevel cervical laminectomy. *Spine* 1995; 20: 2392–2398, discussion 2398–2399
- [15] Grubb MR, Currier BL, Stone J, Warden KE, An K-N. Biomechanical evaluation of posterior cervical stabilization after a wide laminectomy. *Spine* 1997; 22: 1948–1954
- [16] Hamanishi C, Tanaka S. Bilateral multilevel laminectomy with or without posterolateral fusion for cervical spondylotic myelopathy: relationship to type of onset and time until operation. *J Neurosurg* 1996; 85: 447–451
- [17] Kohno K, Kumon Y, Oka Y, Matsui S, Ohue S, Sakaki S. Evaluation of prognostic factors following expansive laminoplasty for cervical spinal stenotic myelopathy. *Surg Neurol* 1997; 48: 237–245
- [18] Hosono N, Yonenobu K, Ono K. Neck and shoulder pain after laminoplasty. A noticeable complication. *Spine* 1996; 21(17): 1969–1973
- [19] Uematsu Y, Tokuhashi Y, Matsuzaki H. Radiculopathy after laminoplasty of the cervical spine. *Spine* 1998; 23: 2057–2062
- [20] Herkowitz HN, Kurz LT. Degenerative lumbar spondylolisthesis with spinal stenosis. A prospective study comparing decompression with decompression and intertransverse process arthrodesis. *J Bone Joint Surg Am* 1991; 73: 802–808
- [21] Shenkin HA, Hash CJ. Spondylolisthesis after multiple bilateral laminectomies and facetectomies for lumbar spondylosis. Follow-up review. *J Neurosurg* 1979; 50: 45–47
- [22] Rosenberg NJ. Degenerative spondylolisthesis: surgical treatment. *Clin Orthop Relat Res* 1976; 117: 112–120
- [23] Patel CK, Cunningham BJ, Herkowitz HN. Techniques in cervical laminoplasty. *Spine J* 2002; 2: 450–455
- [24] Steinmetz MP, Resnick DK. Cervical laminoplasty. *Spine J* 2006; 6 Suppl: 274S–281S
- [25] Heller JG, Edwards CC, Murakami H, Rodts GE. Laminoplasty versus laminectomy and fusion for multilevel cervical myelopathy: an independent matched cohort analysis. *Spine* 2001; 26: 1330–1336
- [26] Ogawa Y, Chiba K, Matsumoto M et al. Long-term results after expansive open-door laminoplasty for the segmental-type of ossification of the posterior longitudinal ligament of the cervical spine: a comparison with nonsegmental-type lesions. *J Neurosurg Spine* 2005; 3: 198–204
- [27] Hosono N, Sakaura H, Mukai Y, Ishii T, Yoshikawa H. En bloc laminoplasty without dissection of paraspinal muscles. *J Neurosurg Spine* 2005; 3: 29–33
- [28] Thomé C, Zevgaridis D, Leheta O et al. Outcome after less-invasive decompression of lumbar spinal stenosis: a randomized comparison of unilateral laminotomy, bilateral laminotomy, and laminectomy. *J Neurosurg Spine* 2005; 3(2): 129–141
- [29] Rao RD, Wang M, Singhal P, McGrady LM, Rao S. Intradiscal pressure and kinematic behavior of lumbar spine after bilateral laminotomy and laminectomy. *Spine J* 2002; 2: 320–326
- [30] Detwiler PW, Spetzler CB, Taylor SB, Crawford NR, Porter RW, Sonntag VKH. Biomechanical comparison of facet-sparing laminectomy and Christmas tree laminectomy. *J Neurosurg* 2003; 99 Suppl: 214–220
- [31] Tender GC, Baratta RV, Voorhies RM. Unilateral removal of pars interarticularis. *J Neurosurg Spine* 2005; 2: 279–288
- [32] Tender GC, Kutz S, Baratta R, Voorhies RM. Unilateral progressive alterations in the lumbar spine: a biomechanical study. *J Neurosurg Spine* 2005; 2: 298–302
- [33] Darden BV, Wade JF, Alexander R, Wood KE, Rhyne AL, Hicks JR. Far lateral disc herniations treated by microscopic fragment excision. Techniques and results. *Spine* 1995; 20: 1500–1505
- [34] Ehni BL, Benzel EC. Lumbar discectomy. In: Benzel EC, ed. *Spine Surgery: Techniques, Complication Avoidance, and Management*. New York, NY: Churchill Livingstone; 1999:389–399
- [35] Müller A, Reulen H-J. A paramedian tangential approach to lumbosacral extraforaminal disc herniations. *Neurosurgery* 1998; 43: 854–861, discussion 861–862
- [36] Osman SG, Nibu K, Panjabi MM, Marsolais EB, Chaudhary R. Transforaminal and posterior decompressions of the lumbar spine. A comparative study of stability and intervertebral foramen area. *Spine* 1997; 22: 1690–1695
- [37] Weiner BK, McCulloch JA. Microdecompression without fusion for radiculopathy associated with lytic spondylolisthesis. *J Neurosurg* 1996; 85: 582–585
- [38] Lu WW, Luk KDK, Ruan DK, Fei ZQ, Leong JC. Stability of the whole lumbar spine after multilevel fenestration and discectomy. *Spine* 1999; 24: 1277–1282
- [39] Epstein NE. Decompression in the surgical management of degenerative spondylolisthesis: advantages of a conservative approach in 290 patients. *J Spinal Disord* 1998; 11: 116–122, discussion 123
- [40] Fox MW, Onofrio BM, Onofrio BM, Hanssen AD. Clinical outcomes and radiological instability following decompressive lumbar laminectomy for degenerative spinal stenosis: a comparison of patients undergoing concomitant arthrodesis versus decompression alone. *J Neurosurg* 1996; 85: 793–802
- [41] Jönsson B, Annertz M, Sjöberg C, Strömquist B. A prospective and consecutive study of surgically treated lumbar spinal stenosis. Part I: Clinical features related to radiographic findings. *Spine* 1997; 22: 2932–2937
- [42] Jönsson B, Annertz M, Sjöberg C, Strömquist B. A prospective and consecutive study of surgically treated lumbar spinal stenosis. Part II: Five-year follow-up by an independent observer. *Spine* 1997; 22: 2938–2944
- [43] Robertson PA, Grobler LJ, Novotny JE, Katz JN. Postoperative spondylolisthesis at L4–5. The role of facet joint morphology. *Spine* 1993; 18: 1483–1490
- [44] Thomas NW, Rea GL, Pikul BK, Mervis LJ, Irsik R, McGregor JM. Quantitative outcome and radiographic comparisons between laminectomy and laminotomy in the treatment of acquired lumbar stenosis. *Neurosurgery* 1997; 41: 567–574, discussion 574–575
- [45] Tuite GF, Stern JD, Doran SE et al. Outcome after laminectomy for lumbar spinal stenosis. Part I: Clinical correlations. *J Neurosurg* 1994; 81: 699–706
- [46] Tuite GF, Doran SE, Stern JD et al. Outcome after laminectomy for lumbar spinal stenosis. Part II: Radiographic changes and clinical correlations. *J Neuro-surg* 1994; 81: 707–715
- [47] Stillerman CB, Chen TC, Couldwell WT, Zhang W, Weiss MH. Experience in the surgical management of 82 symptomatic herniated thoracic discs and re-view of the literature. *J Neurosurg* 1998; 88: 623–633
- [48] Steinmetz MP, Miller J, Warbel A, Krishnaney AA, Bingaman W, Benzel EC. Regional instability following cervicothoracic junction surgery. *J Neurosurg Spine* 2006; 4: 278–284
- [49] Stoffman MR, Roberts MS, King JT. Cervical spondylotic myelopathy, depression, and anxiety: a cohort analysis of 89 patients. *Neurosurgery* 2005; 57: 307–313, discussion 307–313
- [50] Gokaslan ZL, Romsdahl MM, Kroll SS et al. Total sacrectomy and Galveston L-rod reconstruction for malignant neoplasms. Technical note. *J Neurosurg* 1997; 87: 781–787
- [51] Tomita K, Tsuchiya H. Total sacrectomy and reconstruction for huge sacral tumors. *Spine* 1990; 15: 1223–1227

## 12. Fusión espinal

### 12.1 Injerto óseo

El injerto óseo y la fusión ósea resultante son los componentes de una cirugía exitosa de estabilización de la columna que lleva a la estabilidad final de la misma. No importa qué tan seguro pueda parecer un dispositivo de fijación interna, eventualmente fallará a menos que se logre la fusión y estabilidad ósea. Existe una “carrera” proverbial entre la falla del implante y la adquisición de la fusión ósea. Luego de un procedimiento de fusión, el implante y su interfaz con el hueso se harán progresivamente más débiles y la unión ósea por lo general se hace más fuerte —a menos que, obviamente, se produzca la fusión ósea (Fig. 12.1). Por lo tanto, la mayoría de las técnicas de fijación interna deben aplicarse en conjunción con un injerto óseo. Por supuesto, existe una excepción cuando se realiza un procedimiento de instrumentación espinal sin una cirugía de fusión en casos de descompresión y/o estabilización por cáncer de columna.

Los injertos óseos intervertebrales ventrales proporcionan excelentes características de fortaleza final.<sup>1-3</sup> Ellos son colocados en la región de la columna que soporta peso, a lo largo del eje instantáneo de rotación (IAR por sus siglas en inglés). La carga de peso en sí misma promueve la curación y la fusión ósea, de acuerdo con la ley de Wolff.<sup>4</sup> Sin embargo, debe tenerse cuidado en prevenir la deformación progresiva luego de la colocación de una fusión intervertebral ventral. Stauffer y Kelly han reportado una elevada incidencia de deformidades angulares luego de fusiones ventrales por trauma de la columna cervical en pacientes tratados sin instrumentación.<sup>5</sup> Pueden ser necesarios procedimientos de estabilización dorsal (ya sea solos o en combinación con descompresión ventral y fusión) para lograr una estabilidad aceptable y una descompresión del elemento neural en dichos casos. Similarmente, pueden usarse técnicas de placas ventrales para este propósito. No obstante, sin aumento de la estabilidad dorsal debe considerarse con cuidado su uso para este propósito, debido a que su capacidad para resistir la flexión es mucho menor que su capacidad para resistir la extensión.

Por sí mismos, los injertos óseos dorsales generalmente no soportan peso. La flexión de la columna (que ocasiona una flexión ventral al IAR) origina la distracción de los segmentos a

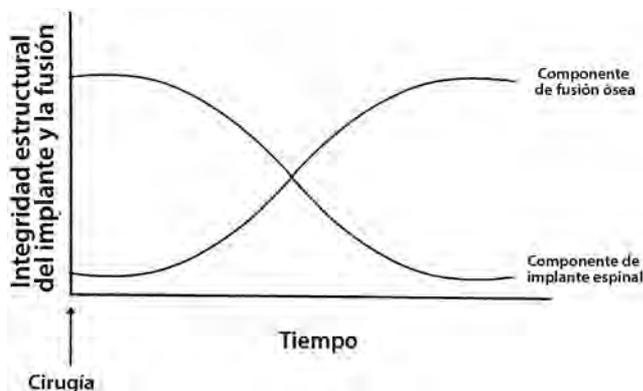


Fig. 12.1 Luego de la cirugía, la relación entre la adquisición de la fusión ósea y la integridad del implante espinal cambia con el tiempo.

ser fusionados (dorsales al IAR; ver capítulo 1). A menos que se proporcione un soporte ventral de resistencia de la carga axial (es decir, mediante un injerto ventral de puntal óseo intervertebral) o que ya exista dicho soporte (por ejemplo, en paciente con facetas cervicales bloqueadas sin fractura del cuerpo vertebral), deben evitarse los injertos óseos dorsales salvo que un constructo de instrumentación acompañante proporcione el soporte de estabilización necesario. Si se aplica el injerto óseo en asociación con fijación de la banda de tensión en un constructo de flexión (como con el alambrado interespinoso), debe proporcionarse un soporte ventral de carga axial si se sospecha una capacidad de soporte de peso ventral.

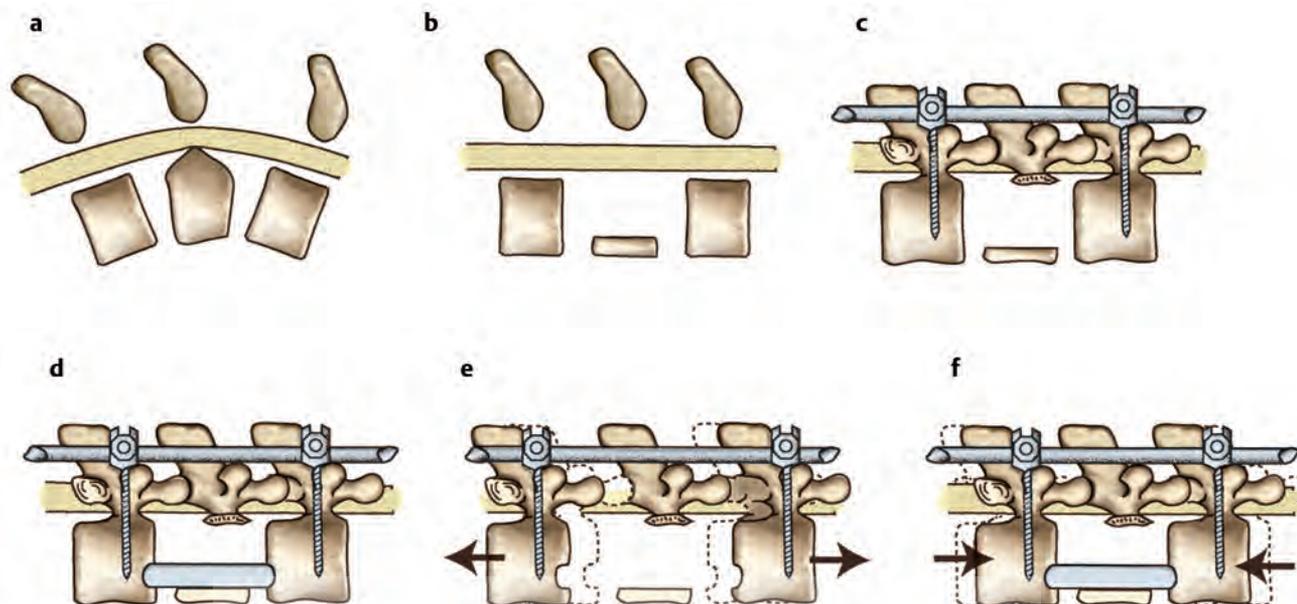
Con frecuencia, los procedimientos de estabilización se realizan luego de cirugías descompresivas. Por lo tanto, la reducción de una masa ventral que ejerce pinzamiento en la médula espinal muchas veces requiere un abordaje quirúrgico además del utilizado para colocar el dispositivo de instrumentación dorsal. Más aún, como el saco dural es descomprimido antes de la manipulación de la columna, el aspecto ventral de la cirugía (descompresión) debe realizarse primero (antes de la colocación del dispositivo de instrumentación dorsal).<sup>6</sup> En situaciones en que la distracción espinal es el modo deseado de aplicación, el injerto óseo intervertebral no debe ser colocado hasta que se hayan aplicado los dispositivos de instrumentación dorsal (por miedo de alterar en forma adversa la biomecánica espinal al aflojar el injerto óseo ya colocado).<sup>6</sup> Teóricamente, en este caso el orden más apropiado de los procedimientos debe ser el siguiente: primero, descompresión de los elementos neurales y aflojamiento/relajación de la columna mediante discectomía y corpectomía (por ejemplo, un procedimiento de relajación); segundo, colocación del injerto óseo ventral.<sup>6</sup> Si la compresión espinal es el modo de aplicación deseado, puede ser conveniente colocar primero el puntal de injerto óseo intervertebral (Fig. 12.2).

Los injertos óseos difieren significativamente con respecto a su integridad.<sup>7</sup> Esto guarda relación con la fuente del injerto, autoinjerto versus aloinjerto, técnicas de preparación del aloinjerto, y así sucesivamente. Mientras mayor sea la relación del hueso cortical con respecto al hueso esponjoso, mayor será la capacidad de soporte de carga axial (y menor el potencial para fusión del implante). Mientras mayor sea el área de superficie de contacto, mayor será la resistencia al pistoneo.

En general, el procesamiento del aloinjerto afecta de manera adversa la integridad del injerto. Sin embargo, la esterilización con óxido de etileno no afecta la fortaleza de compresión. El hueso que es congelado y luego descongelado es superior al hueso liofilizado para la resistencia a la torsión e inclinación. Cabe mencionar que la rehidratación lenta con solución salina mejora las características biomecánicas del hueso liofilizado.

### 12.2 Fusión espinal ventral

Debe pensarse con cuidado la selección de la localización específica para la colocación del injerto óseo ventral, particularmente en el plano sagital. La localización del injerto óseo intervertebral afecta en forma significativa la eficacia biomecánica del constructo. En general, para la optimización de la capacidad



**Fig. 12.2** En la mayoría de las situaciones de injertos intervertebrales ventrales, el orden apropiado de los componentes del procedimiento es el siguiente: (A, B) primero, descompresión del elemento neural y alineación espinal; (C) segundo, estabilización espinal; y (D) tercero, colocación del injerto óseo. Una excepción obvia es la situación en la cual es obligatorio colocar el injerto óseo antes de asegurar el constructo de instrumentación. De hecho, esta técnica puede usarse para tomar ventaja en situaciones en las cuales la dinámica de la reconstrucción espinal puede realizarse mediante la aplicación intraoperatoria de fuerzas de aumento de la curación ósea. En esta situación, puede realizarse primero la descompresión. (E) Luego, los segmentos patológicos pueden ser distraídos por el implante (flechas) y se puede insertar el injerto óseo. (F) Finalmente, el constructo puede comprimirse sobre el injerto óseo (flechas). Esto permite la distribución de la carga entre las estructuras óseas intervertebrales ventrales y el constructo de instrumentación dorsal.



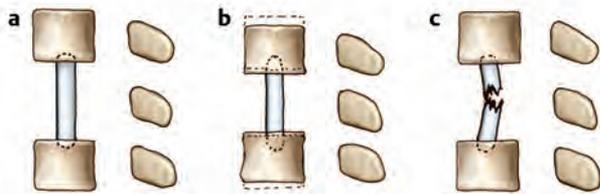
**Fig. 12.4** La extensión de la penetración de un puntal intervertebral es inversamente proporcional a su área transversal de contacto con la placa terminal del cuerpo vertebral. (A) Note que el puntal más delgado (menos sustancial) ha penetrado (pistoneado) más lejos que el puntal más sustancial. (B) Una muesca pobremente ajustada (equivalente) al injerto óseo aumenta la probabilidad de que persista un espacio (C) entre el injerto óseo y la muesca (área sombreada) o que ocurra un pistoneo (D).

**Fig. 12.3 (A)** El eje neutral (área sombreada) de la columna es la región en donde puede esperarse que el soporte normal del peso ocasione una distracción o compresión mínima. Por lo tanto, los injertos óseos intervertebrales deben colocarse de manera óptima dentro o ligeramente ventrales a esta región, en particular si la estabilidad dorsal no es adecuada. (B) Si la estabilidad dorsal es adecuada, puede ser óptima una localización más ventral. Esto permite la distribución de la carga axial entre el puntal ventral y los elementos espinales dorsales intactos.

de resistencia de la carga axial y el soporte del torso, la localización óptima para la colocación del injerto óseo intervertebral es la proximidad del IAR en el plano sagital. Esta casi siempre es también la localización del eje neutral (en particular si la estabilidad del elemento espinal dorsal es deficiente). El eje neutral es aquella región de la columna en donde la flexión y la extensión no desplazan en forma significativa los puntos localizados dentro de los límites del eje (ver capítulo 7). Usualmente, está localizado en la unión de las columnas anterior y media de Denis.<sup>8</sup> Si la estabilidad del elemento espinal dorsal es adecuada,

puede ser óptima una localización ligeramente más ventral para la colocación del injerto óseo intervertebral (ver capítulo 7 y Fig. 12.3). En esta situación, las cargas axiales pueden distribuirse de manera más efectiva entre el injerto de puntal y las estructuras existentes del elemento dorsal.<sup>9,10</sup> En general, la colocación de puntales intervertebrales ventrales en la región de la columna anterior facilita el reparto de la carga como se describió, y previene la deformación cifótica. Además, la corteza ventral puede soportar de manera más efectiva las cargas axiales en comparación con la columna media.<sup>11</sup>

La colocación de una fusión intervertebral ventral puede proporcionar un incremento sustancial en la capacidad de resistencia de carga axial.<sup>2</sup> El puntal óseo en sí mismo, y los sitios de fijación a los cuerpos vertebrales (sitios de agarre) deben ser fuertes para ofrecer dicho soporte. La fortaleza necesaria puede ser escasa, por ejemplo, cuando se utiliza hueso de cresta ilíaca delgada, de costilla, o hueso morcelizado como el sustrato de injerto. Aún así,

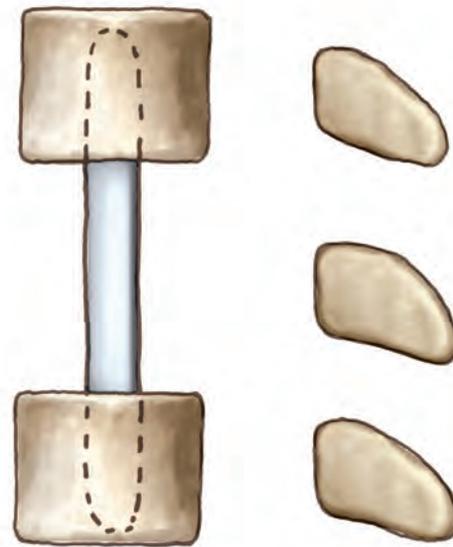


**Fig. 12.5** No puede dejar de enfatizarse la importancia de equiparar la integridad del lecho del injerto óseo (el cuerpo vertebral) con el injerto óseo en las fusiones intervertebrales ventrales. (A, B) Si se utiliza un injerto óseo que es más denso que el cuerpo vertebral, la tendencia del injerto a “cortar” su camino a través del cuerpo vertebral (pistoneo) es significativa. (C) Por el contrario, si el injerto óseo es menos denso y más débil que el cuerpo vertebral, puede fallar. Por lo tanto, es óptimo utilizar un injerto óseo cuya densidad, integridad y módulo de elasticidad sean similares a los del cuerpo vertebral. No debe ser el eslabón más débil ni el más fuerte en el “sistema de cadena de estabilidad”.

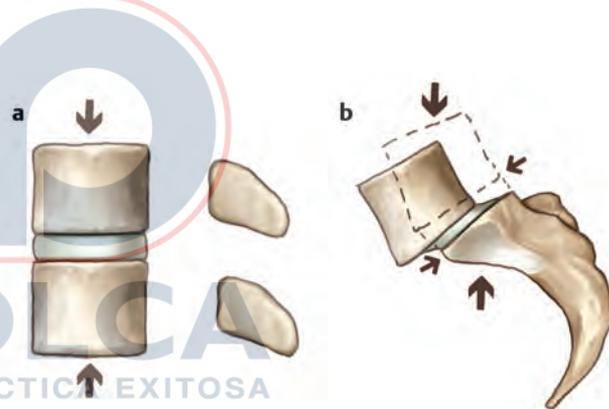
masas de fusión más fuertes como el peroné pueden penetrar (más de lo deseado) a través de los sitios de agarre receptores en los cuerpos vertebrales rostrales y caudales, parecido al modo en que un palillo puede penetrar una pieza de espuma de poliestireno expandido. Por esta razón sola, deben considerarse con cuidado los cajetines, la cerámica e incluso la hidroxapatita, en particular para una columna osteoporótica. La resistencia de un puntal intervertebral a la penetración del cuerpo vertebral (subsistencia) es proporcional al área transversal de las interfaces puntal-cuerpo vertebral (Fig. 12.4a) y a los estreses en las interfaces (Fig. 12.4b-d). Un injerto óseo que sea de menor integridad que los cuerpos vertebrales puede fallar. En consecuencia, siempre y cuando no haya circunstancias extenuantes, la consistencia e integridad del injerto óseo deben ser similares al hueso de los cuerpos vertebrales que lo aceptan (Fig. 12.5). Una excepción a esto puede ser el caso en que las placas terminales de los cuerpos vertebrales mismos pueden usarse para soporte de resistencia a carga axial (Fig. 12.6).

El efecto estabilizador agudo de un injerto óseo intervertebral depende parcialmente, entre muchos otros factores, del ángulo que forma el interespacio discal con el plano horizontal cuando el paciente se encuentra en posición vertical. Si el ángulo es de cero (es decir, si el interespacio es paralelo al piso cuando el paciente se encuentra de pie), las cargas axiales no producirán fuerzas de cizallamiento al nivel de la fusión (vértebra estable). Si, por otra parte, el interespacio discal y el sitio de fusión están orientados más verticalmente (como en la columna lumbar, en particular en la unión lumbosacra), se agrega una fuerza de cizallamiento a la carga axial (Fig. 12.7). La carga axial promueve la curación del hueso; las fuerzas de cizallamiento lo alteran. Esto puede explicar, en parte, las fallas de fusión no tan infrecuentes observadas con la técnica de fusión intervertebral lumbar posterior (PLIF por sus siglas en inglés) sin suplementación con estabilización dorsal, en particular en la región lumbar baja y lumbosacra.<sup>12</sup> Cabe notar que las discectomías cervicales ventrales con y sin fusión tienen resultados clínicos similares,<sup>13</sup> lo que disminuye la significancia y relevancia de la adquisición de la fusión —al menos teóricamente.

Las cirugías de fusión intervertebral, que incluyen las técnicas PLIF y de fusión intervertebral lumbar transforaminal (TLIF por sus siglas en inglés) pueden tomar ventaja del fenómeno de distracción en paralelogramo. Este fenómeno se basa en la

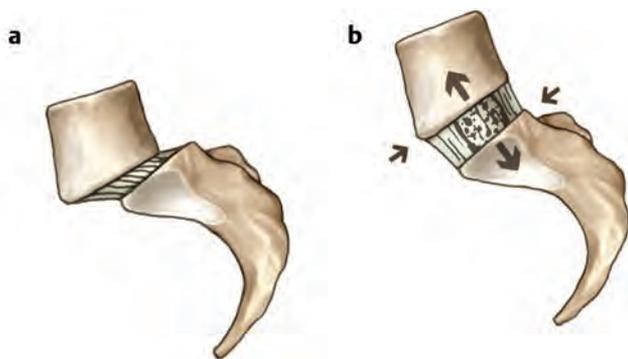


**Fig. 12.6** El cuerpo vertebral en sí mismo puede usarse para soportar cargas axiales aplicadas cuando se usan injertos óseos intervertebrales ventrales. Si el hueso medular del injerto óseo es demasiado débil como para resistir las cargas axiales aplicadas, el injerto en sí mismo puede colocarse en o cerca de las placas terminales del cuerpo vertebral, como se muestra. La placa terminal proporciona una resistencia al colapso de la columna vertebral que no puede otorgar el hueso medular suave del cuerpo vertebral.



**Fig. 12.7** (A) El cuerpo vertebral y el interespacio discal son las estructuras que aceptan más comúnmente las cargas axiales (*flechas*) cuando el torso asume la posición erecta. (B) La columna lumbar baja, en particular la unión lumbosacra, es propensa a deformación traslativa (*flechas pequeñas*) al soportar cargas axiales (*flechas grandes*) debido a la orientación de los interespacios discales en esta región, como se muestra aquí. Esto coloca un estrés de cizallamiento a nivel del interespacio discal. Las flechas verticales representan las cargas axiales aplicadas; las flechas oblicuas representan las fuerzas de cizallamiento resultantes.

fortaleza inherente del complejo fibroligamentoso que rodea al cuerpo vertebral y que conecta una vértebra a su vecina —es decir, el anillo fibroso y los ligamentos ventral y dorsal. Por su naturaleza, la espondilolistesis produce una distorsión similar a un paralelogramo de estas estructuras y los cuerpos vertebrales adyacentes (Fig. 12.8a). Esto se acompaña por un estiramiento del complejo fibroligamentoso que rodea al cuerpo vertebral o, más probablemente, por una pérdida compensatoria asociada de la altura del interespacio discal. Al tomar ventaja de la integridad del complejo fibroligamentoso, el cirujano puede distraer la columna, y reducir de este modo la deformación traslativa en el plano sagital. Luego puede usarse un injerto óseo u otras



**Fig. 12.8** Si el anillo fibroso y los ligamentos longitudinales anterior y posterior proporcionan de manera colectiva una integridad suficiente a la columna, puede tomarse ventaja del fenómeno de distracción en paralelogramo. (A) La deformidad traslativa de la columna, con pérdida de la integridad ósea, puede corregirse mediante distracción simple de la columna. Note que la lasitud de los ligamentos permite la aparición de la deformidad traslativa. Esta lasitud se origina parcialmente de una pérdida de altura del interespacio discal. (B) La distracción simple del interespacio discal (*flechas grandes*) y el mantenimiento de la distracción con un espaciador de injerto óseo permite que los ligamentos inmovilicen la columna para reducir la deformidad traslativa (*flechas pequeñas*).

alternativas de puntal/cajetín intervertebral para mantener esta alineación de los cuerpos vertebrales, al actuar como un espaciador hasta que tenga lugar la unión corporal (Fig. 12.8b).

La confección subóptima de la muesca y el “ajuste” insuficiente del puntal/cajetín intervertebral son quizás los errores prevenibles más comunes que llevan a falla de injerto óseo intervertebral ventral. La muesca debe cortarse con profundidad suficiente, y el injerto óseo debe ajustar ceñidamente en la muesca de forma tal que sea improbable un desprendimiento (ver Fig. 12.6).

El uso de un injerto de puntal peroneo para el injerto intervertebral puede tener la ventaja de proporcionar una longitud suficiente para fusiones largas en casos seleccionados. Sin embargo, el cirujano debe reconocer que el peroné tiene una relación mucho mayor de hueso cortical con respecto al esponjoso en comparación con el cuerpo vertebral; de este modo, puede presentarse la complicación antes mencionada de telescopaje. A su vez, esto puede producir colapso o recorte del injerto. La colocación del injerto cerca de la placa terminal, para soporte adicional de la carga axial, puede ayudar a prevenir dichas complicaciones (ver Fig. 12.6). Note que la curación de la fusión en esta circunstancia puede ser menos vigorosa debido a la menor área de contacto entre el injerto y el cuerpo vertebral. El origen del injerto (por ejemplo, aloinjerto versus autoinjerto) también juega un papel en el proceso de determinación de la estrategia.<sup>14-19</sup> Obviamente, otros factores también juegan un papel.<sup>20-28</sup> Muchos de ellos pertenecen a la integridad ósea.<sup>29</sup>

### 12.3 Fusión espinal dorsal

Las fusiones espinales dorsales no están bien situadas mecánicamente para resistir cargas axiales —es decir, no proporcionan un soporte axial agudo sustancial para la columna. Además, puesto que no soportan cargas axiales significativas, puede esperarse que involucionen con el paso del tiempo.<sup>30</sup> Las fusiones espinales dorsales pueden proporcionar un soporte agudo de la

columna solo si se aseguran en cierta forma a la misma, como en los procedimientos de alambrado dorsal y fusión. Estos se usan con mayor frecuencia en la región cervical.<sup>31</sup> No obstante, dichas cirugías de fusión no son prácticas en la región lumbar debido al tamaño de los segmentos espinales y a los estreses obligatorios colocados en la columna en esa región.

Las fuerzas que realzan la curación ósea participan en forma significativa en el proceso de fusión. Ellas explican la diferencia entre las tasas de fusión de las fusiones intervertebrales ventrales y las fusiones dorsales que no soportan peso (siendo la fusión significativamente más rápida en la primera que en la última). Esto es así debido a la capacidad de las fuerzas que realzan la curación ósea (compresión) de estimular la fusión intervertebral.<sup>4</sup> Las fusiones dorsales no están expuestas a estos estreses de compresión que realzan la curación ósea, y las estrategias de contención de autoinjerto no parecen ayudar.<sup>32</sup> Por lo tanto, las tasas de curación y fusión están algo disminuidas. De hecho, el volumen de la fusión ósea dorsal (que no soporta peso y, en consecuencia, no está expuesta a estreses de realce de la curación ósea) disminuye con el tiempo (>50% en 18 meses). Esto tampoco es afectado por la instrumentación espinal o por la patología. También cabe resaltar que mientras mayor sea el volumen del injerto óseo inicial, mayor será la masa de fusión a los 18 meses luego de la operación.<sup>30</sup> La fuente del injerto óseo también afecta el éxito de la fusión.<sup>33</sup>

Si una carga axial es soportada por una columna con una fusión dorsal acompañante, la masa de fusión ósea en sí misma no soporta una carga. De hecho, la masa de fusión usualmente es colocada bajo cierta tensión (distracción) durante el soporte de una carga axial.

Las masas de fusión dorsal pueden ser difíciles de evaluar radiográficamente. Las estrategias imagenológicas creativas pueden proporcionar cierta asistencia.<sup>15</sup>

### 12.4 Fusión de la columna inmadura

Se ha observado que la fusión de la columna inmadura se asocia con un crecimiento asimétrico de la misma. El término *fenómeno del cigüeñal* describe la progresión continuada de la escoliosis luego de una fusión dorsal. Este fenómeno se debe al crecimiento ventral continuo de la columna. Algunos creen que un cartílago trirradiado abierto predice la aparición de este fenómeno posoperatoriamente. Sin embargo, parece que la observación simultánea de un cartílago trirradiado abierto y la realización de la cirugía antes o durante la velocidad pico de crecimiento de la estatura es un fuerte predictor de este fenómeno. De hecho, la cirugía tardía es un predictor negativo fuerte.<sup>34,35</sup>

### 12.5 Pseudoartrosis

La pseudoartrosis a menudo es difícil de diagnosticar. Se han utilizado varias técnicas para establecer la presencia o ausencia de pseudoartrosis.<sup>36-53</sup> La tomografía computarizada quizás es la más exacta.<sup>54</sup> No obstante, en casos difíciles debe usarse liberalmente la prudencia en la toma de decisiones y el juicio clínico. El resultado de la fusión es, similarmente, difícil de cuantificar y evaluar. Parecería prudente el desarrollo de herramientas de evaluación de resultados y modelos para la evaluación objetiva. Blount et al., desarrollaron y validaron dicho modelo.<sup>55</sup> Finalmente, el tratamiento de la pseudoartrosis sintomática presen-

ta retos únicos, que pueden superarse al aplicar la cirugía más apropiada para cada circunstancia clínica dada.<sup>56</sup>

## 12.6 Injertos óseos y sustitutos de hueso

El cirujano tiene múltiples opciones para la elección del sustrato de fusión ósea.<sup>57</sup> Las amplias categorías incluyen autoinjerto, aloinjerto y sustitutos óseos. Usualmente se considera que el autoinjerto se asocia con el porcentaje de éxito más elevado, particularmente cuando se usa en conjunción con dispositivos de fijación espinal apropiados,<sup>58</sup> aunque el uso de un cajetín sin material de injerto ha mostrado estar asociado también con éxito.<sup>59</sup> Esta observación muy ciertamente reta a la intuición con respecto a la adquisición de la fusión. Las complicaciones en el sitio de recolección del injerto óseo presentan un elemento disuasorio para el uso de un autoinjerto. A pesar de la creencia común, puede esperarse razonablemente una tasa relativamente baja de complicaciones a largo plazo asociadas con la recolección del autoinjerto.<sup>60</sup> Las modificaciones de la técnica estándar, el uso de sitios de recolección alternativos, y la conciencia de los detalles anatómicos únicos, pueden usarse para disminuir aún más las complicaciones en el sitio de recolección del injerto.<sup>61-63</sup> No obstante, se requiere un escrutinio cuidadoso de los resultados clínicos.<sup>64</sup> Cuando está presente, el manejo del dolor en el sitio donante puede constituir todo un reto. Muchas veces se requiere creatividad.<sup>65</sup>

El aloinjerto representa una alternativa atractiva, en particular en vista de la eliminación de la necesidad de recolección de injerto óseo.<sup>66</sup> Sin embargo, las tasas de fusión disminuyen. Cabe notar que existe un riesgo evidente de casi cero, asociado con el uso del aloinjerto de hueso en la cirugía espinal desde una perspectiva de transmisión de enfermedades.<sup>67</sup>

Los extensores de hueso, como el beta-tricalcio fosfato y el calcio sulfato, han mostrado tener cierta utilidad para la adquisición de la fusión.<sup>68-70</sup> No obstante, se debe considerar cuidadosamente el uso de extensores óseos y sopesar sus ventajas contra una tasa de fusión disminuida en comparación con el autoinjerto. Obviamente, si la recolección del autoinjerto no proporciona un volumen óseo adecuado, deben considerarse alternativas.

Las alternativas óseas estructurales, como la hidroxiapatita, han mostrado utilidad como espaciadores y puntales vertebrales. Pese a ello, la hidroxiapatita en particular está asociada con características de fortaleza subóptimas.<sup>71</sup> Esto debe ser tomado en consideración antes del uso clínico.

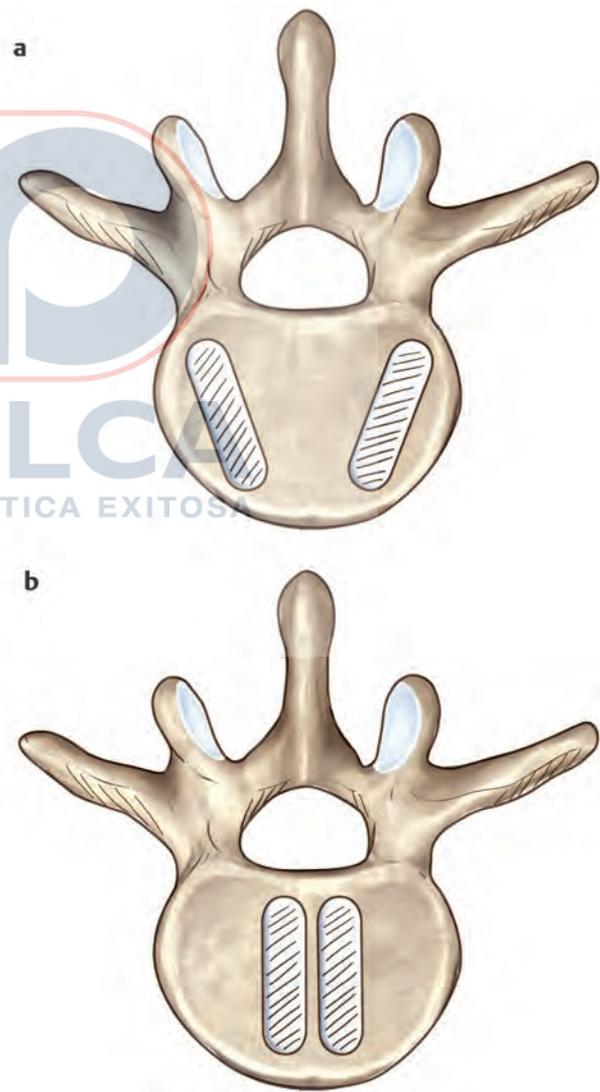
Las proteínas morfogenéticas óseas (BMP por sus siglas en inglés) deben considerarse como sustitutos óseos, o incluso como extensores de injerto óseo. La literatura presenta abundante información con respecto a las BMP para realce de la fusión. Se han desarrollado varias BMP, empleándose en el laboratorio y en arenas clínicas. La BMP-2 recombinante ha mostrado la mayor promesa,<sup>72-74</sup> al contrario de la BMP-7.<sup>75</sup> Se han sugerido u observado complicaciones asociadas con los portadores, la dosificación, el sobrecrecimiento óseo, la inflamación de tejidos blandos y el riesgo de cáncer.<sup>76,77</sup> Aunque el futuro con respecto a la aplicación clínica de las BMP aún parece brillar, su aplicación clínica de rutina está siendo cuestionada seriamente en la actualidad. La creatividad para el suministro de las BMP puede llevar a aplicaciones adicionales en los años por venir.<sup>78</sup> La investigación es continua.<sup>79,80</sup> Las alternativas de “suministro”

biológico molecular pueden jugar un papel clínicamente relevante en el futuro.<sup>81</sup>

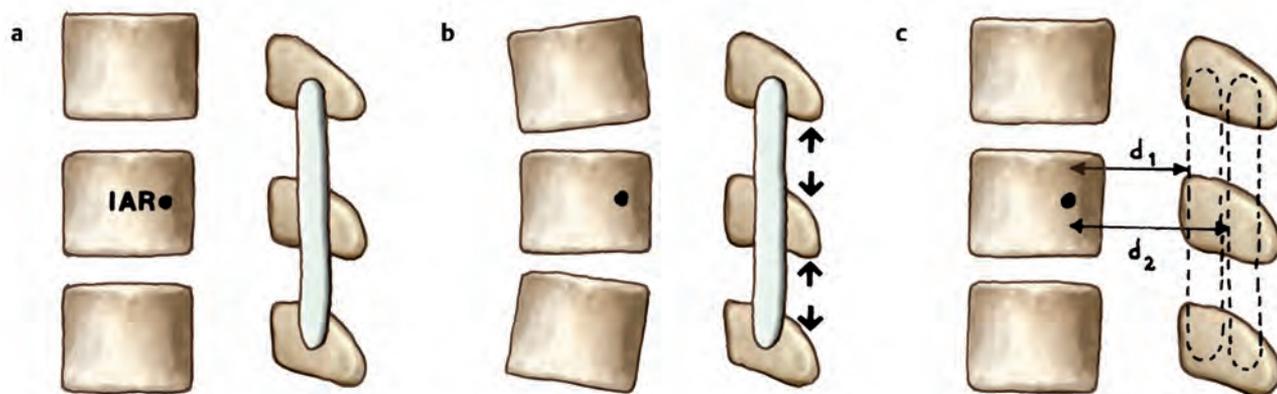
## 12.7 Hueso como instrumento espinal

¿Puede el hueso funcionar por sí solo como un instrumento espinal? ¿Cuándo puede ser suficiente la fusión ósea, y cuándo es necesario suplementarla con un implante espinal? Estas preguntas son particularmente susceptibles de consideración en esta era de contención de costos.

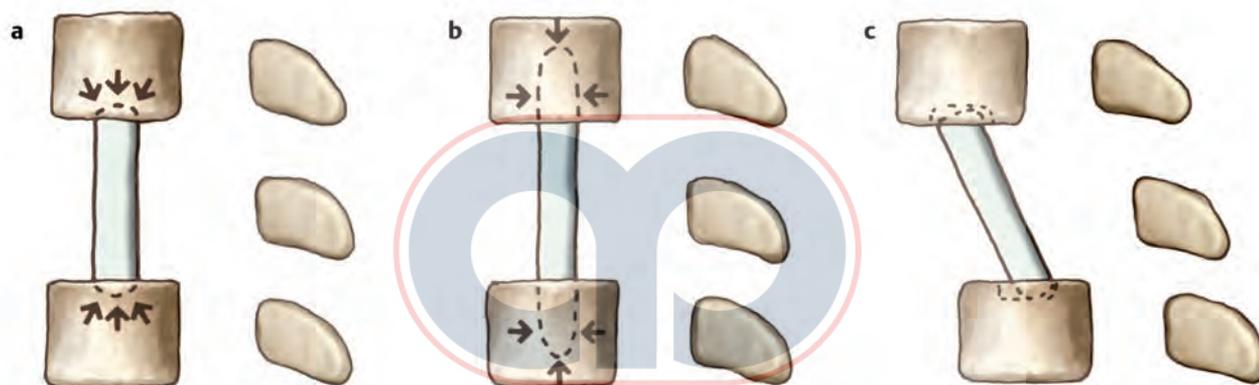
En efecto, el hueso puede funcionar como un instrumento espinal. Cloward ha documentado con claridad esto a lo largo de su carrera.<sup>82</sup> Las fusiones óseas pueden apoyar la columna y resistir en forma simultánea la deformación (ver Fig. 12.8). La capacidad para hacerlo en el período posoperatorio inmediato usualmente es unidireccional —es decir, los injertos óseos por sí mismos aplican fuerzas predominantemente unidireccionales a la columna. Estas fuerzas casi siempre son de naturaleza distractora (o, más apropiadamente, resistentes a la carga axial).



**Fig. 12.9** Si no puede lograrse un área de superficie significativa de contacto de la placa terminal, entonces (A) la colocación de un injerto/puntal/cajetín más periféricamente proporciona una mejor capacidad de soporte de carga axial y resistencia a la subsidencia que (B) la colocación de un injerto situado más centralmente.



**Fig. 12.10** (A) De manera aguda, un injerto óseo dorsal no resiste bien las cargas axiales. (B) La flexión ocasiona distracción de todos los puntos dorsales al eje instantáneo de rotación. Esto ocasiona que el injerto óseo dorsal sea expuesto a fuerzas inhibitorias de la curación ósea (distractoras) (*flechas*). (C) Al madurar la fusión dorsal, el injerto puede resistir por sí mismo una deformación significativa por flexión si las capacidades de resistencia de carga axial son adecuadas. Esto se logra mediante la aplicación de un momento de fuerza resistente a la flexión. Mientras más largo sea el momento de fuerza, mayor será la capacidad para prevenir la deformación por flexión. Los momentos de fuerza cortos y largos están representados por  $d_1$  y  $d_2$ , respectivamente. IAR, eje instantáneo de rotación.



**Fig. 12.11** El injerto óseo intervertebral y sus sitios de aceptación deben confeccionarse con la intención de adquirir efectos deseados específicos. (A) Si los únicos estreses resistidos por un injerto óseo son axiales, el injerto óseo en sí mismo funciona solo en modo de distracción, o resistencia de carga axial. (B) La creación de muescas profundas en los cuerpos vertebrales puede proporcionar un componente resistente a traslación para el constructo (aunque pobremente) si la integridad del cuerpo vertebral y el injerto óseo es adecuada, si las muescas son profundas, y si el injerto óseo y las muescas son confeccionados en forma meticulosa. De este modo, se limita un poco la traslación. (C) Si la muesca no se construye de esta manera, es más probable una deformación traslativa. Las flechas muestran las fuerzas aplicadas a los extremos de los puntales en (A) y (B).

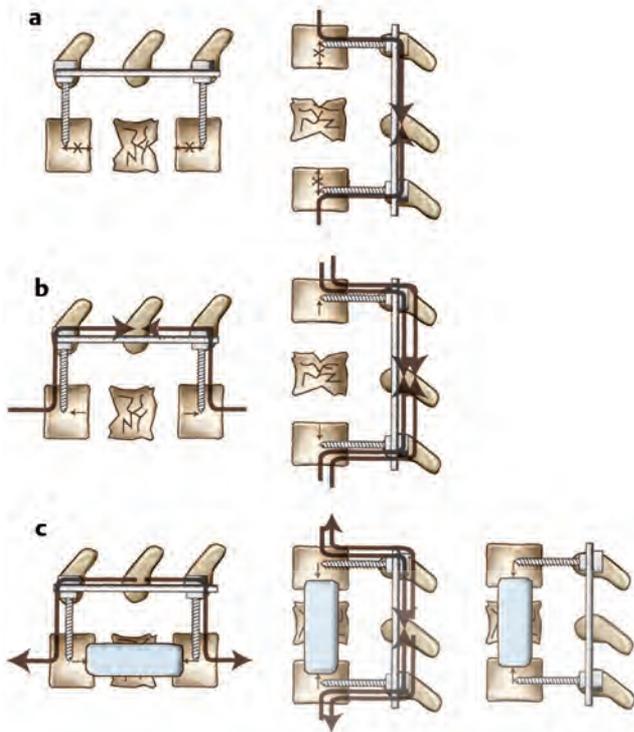
Este proceso, por medio del cual un puntal óseo intervertebral funciona como el único implante espinal, es obviamente realzado por la integridad ligamentosa intacta. Un injerto óseo colocado en el plano entre dos cuerpos vertebrales funciona como un refuerzo que soporta la columna en la carga axial (ver Fig. 12.3 y Fig. 12.6). Como se notó con anterioridad, este refuerzo tiene su mayor efectividad cuando se coloca el injerto óseo. Un ejemplo clínico de una situación en que el injerto óseo puede efectivamente “hacerlo todo” es la discectomía cervical anterior con fusión intervertebral.

La localización del injerto óseo con respecto al IAR (es decir, el eje neutral) es de gran importancia. Mientras más cerca esté el injerto óseo al IAR, mayor será la capacidad de resistencia de carga axial desde una perspectiva teórica. Los injertos óseos colocados en la región intervertebral resisten bien las cargas axiales, mientras que los injertos óseos colocados en la región de los elementos dorsales resisten pobremente las cargas axiales.

Es de importancia extraordinaria que haya un área de superficie de contacto grande del implante con la placa terminal.

También es importante la localización del implante con respecto a la placa terminal. El contacto lateral o periférico de la placa terminal con el puntal/implante intervertebral se asocia con mayor soporte de carga axial y capacidad de resistencia a la subsidencia que el contacto con un puntal colocado a nivel central. Esto simplemente es una manifestación del efecto de límite (Fig. 12.9). Es probable que esto explique el por qué la TLIF ha mostrado asociarse con menos complicaciones y mejores tasas de fusión que los abordajes tipo PLIF o ALIF. Estas dos últimas técnicas por lo general implican la colocación de puntales más centrales que con la técnica TLIF (ver capítulo 23).

Empero, una vez que un injerto óseo dorsal se ha fusionado con solidez, resiste bien la flexión (Fig. 12.10). Debe tomarse en consideración su superioridad en este aspecto sobre un injerto intervertebral ventral. De hecho, mientras más dorsal al IAR (o al eje neutral) se coloque un injerto óseo intervertebral, más largo será el brazo de palanca a través del cual funciona (ver capítulo 7 y Fig. 12.10).



**Fig. 12.12** Los cambios en la posición alteran la carga soportada por un implante. (A) El manejo de una fractura toracolumbar proporciona un paradigma excelente para ilustrar esto. Si esta fractura es tratada con un implante colocado en modo neutral (carga quirúrgica cero; izquierda, flechas horizontales con X) y se asume una postura erecta (derecha), la carga axial aplicada al implante es aproximadamente igual al peso del torso posicionado por encima del implante. En este caso, toda la carga es transferida a través del implante (derecha, flechas sólidas curvas largas). Puesto que la carga total pasa a través del implante, el cuerpo vertebral fracturado es protegido de los estreses axiales. (B) Si este implante fuese a ser colocado en modo de distracción (izquierda, flechas cortas), el implante estaría cargado en distracción, y resiste de este modo la compresión (izquierda, flechas sólidas curvas largas). Cuando se asume una postura erecta, el implante soporta una carga adicional, la carga quirúrgica (derecha). Por lo tanto, el implante soporta la carga quirúrgica más la carga asociada con el peso del torso por encima del implante (derecha, flechas sólidas curvas largas). La carga soportada por el cuerpo vertebral lesionado es despreciable. (C) Si el implante fuese colocado en compresión (flechas cortas) luego de la colocación de una fusión intervertebral (puntal, carga quirúrgica negativa; izquierda, flechas sólidas curvas largas), la adopción de la postura erecta haría que el implante soportara una carga axial menor que el peso del torso posicionado por encima del mismo. De este modo, el implante comparte la carga con el puntal intervertebral, el cual está cargado en compresión (centro, flechas cortas). De hecho, si la carga quirúrgica negativa es igual al peso del torso posicionado por encima del implante, la carga soportada por el implante durante la adopción de una postura erecta es de cero (media y derecha) —es decir, la carga quirúrgica es igual y de dirección opuesta al peso del torso posicionado por encima del implante (media, flechas sólidas curvas largas). De este modo, pueden contrarrestarse mutuamente. En consecuencia, el tornillo pedicular del implante está descargado (es decir, no se aplican cargas axiales al implante). Sin embargo, el injerto óseo sí está cargado (carga quirúrgica; derecha, flechas cortas).

A menos que se conforme un injerto óseo intervertebral ventral y su sitio de aceptación, con la intención de adquirir efectos deseados específicos, los únicos estreses resistidos por un injerto óseo son axiales; de este modo, el injerto óseo en sí mismo funciona solo en modo de distracción, o de resistencia de carga axial (Fig. 12.11a). La creación de una muesca profunda en el cuerpo vertebral puede proporcionar un constructo resistente a traslación si el cuerpo vertebral y el injerto óseo tienen

una integridad adecuada, si la muesca es profunda y si el injerto óseo y la muesca son confeccionados de manera meticulosa (Fig. 12.11b). Este constructo, aunque es relativamente débil en el mejor de los casos, proporciona un constructo terminal de inclinación en tres puntos (ver capítulo 17). Como implante independiente, los puntales intervertebrales ventrales resisten pobremente la traslación (Fig. 12.11c).

## 12.8 Soporte y distribución de carga

Los conceptos de soporte y distribución de carga deben ser tomados en consideración siempre que se utilice un implante espinal. Esto no puede ser más evidente que en las fracturas toracolumbares tratadas con fijación de segmento corto (tornillo pedicular) con o sin una fusión intervertebral. En el sentido más estricto, no existen implantes neutrales. Esto ya ha sido enfatizado. Cuando el peso es soportado por el torso, un implante espinal es expuesto a una miríada de fuerzas (soporte de carga). Esto ocurre de manera inevitable, incluso en casos en que se coloca inicialmente un implante de un modo neutral (Fig. 12.12).

Puede ser instructivo considerar una situación hipotética que enfatice los conceptos de soporte y distribución de carga. Para propósitos de la discusión, es relevante considerar cargas axiales y aplicaciones de fuerzas aisladas. Sin embargo, la situación clínica a menudo es muy diferente, con la miríada de fuerzas aplicadas por el torso al implante (y por el implante al torso). No obstante, el soporte de una carga por el torso durante la adopción de la postura erecta hace que el implante espinal absorba al menos una porción de la carga axial. Los conceptos más relevantes con respecto al soporte y distribución de carga son bien ilustrados por una fractura de L1 que es tratada con fijación con tornillos pediculares de segmento corto dorsal, con o sin un puntal intervertebral ventral. Si el implante es colocado en un modo neutral (sin distracción o compresión, sin soporte de carga quirúrgica) y sin un puntal intervertebral, la carga axial soportada por el implante cambia de cero (la carga soportada por el implante al momento de la cirugía) hasta aproximadamente el peso del torso colocado por encima del implante luego de la adopción de la postura erecta (Fig. 12.12a). Esto puede o no hacer que el implante falle, en la interfaz tornillo-hueso o mediante una fractura del tornillo. El implante soporta una carga significativa, aunque la comparte mínimamente con las estructuras ventrales.

Si el implante es colocado en modo de distracción al momento de la cirugía, y similarmente sin un puntal intervertebral, la carga axial soportada por el implante cuando el paciente asume la postura erecta es la suma de la carga soportada al momento de la cirugía (soporte de carga quirúrgica) y el peso del torso por encima del implante (Fig. 12.12b). Esta carga casi ciertamente se asocia con una probabilidad significativa de falla, ya sea en la interfaz tornillo-hueso o mediante una fractura del tornillo mismo. La carga es soportada únicamente por el implante (que soporta toda la carga). En esta situación no hay distribución de la carga. Esto quizás contribuye a la demostración reciente de la falta de éxito (en comparación con la fusión no instrumentada) de las fusiones lumbares dorsolaterales instrumentadas.<sup>83</sup>

La colocación de un implante en modo de compresión al momento de la cirugía altera de manera considerable las fuerzas. En la situación hipotética en que solo se consideran las cargas

axiales, la colocación de un implante en modo de compresión luego de la realización de una corpectomía y la colocación de un puntal intervertebral produce un soporte negativo de la carga quirúrgica. Si una carga axial es soportada subsecuentemente durante la adopción de la postura erecta, la carga de compresión quirúrgica es disminuida en forma efectiva, y la carga neta se aproxima a cero (Fig. 12.12c). De este modo, un implante espinal colocado en modo de compresión puede compartir las cargas aplicadas por el peso del torso por encima de la fractura, al permitir que parte de la carga axial sea soportada por el eje espinal existente o por un puntal intervertebral.

Además de la ventaja de distribución de carga que otorga la compresión, esta última también proporciona estreses que realzan la curación ósea. Los injertos bajo compresión curan mejor y más rápido que aquellos bajo tensión. Esta es una aplicación de la ley de Wolff. Wolff publicó su *Das Gesetz der Transformation der Knochen* (“La ley de transformación del hueso”) en 1892.<sup>84</sup> Él explicó la adaptación funcional del tejido óseo —es decir, que cada cambio en la función de un hueso va seguido por ciertos cambios definidos en su arquitectura interna y conformación externa de acuerdo con leyes matemáticas.<sup>85</sup> Este efecto también posee una conexión electrofisiológica.<sup>86</sup>

## 12.9 Complementos para la fusión

### 12.9.1 Curación ósea

La curación ósea luego de la cirugía es afectada por varios medicamentos e intervenciones. Dichos efectos pueden ser adversos o beneficiosos. Varios agentes, fármacos e intervenciones afectan la fusión ósea y el proceso de curación, predominantemente durante la fase inflamatoria de la curación (1 a 3 semanas). Los factores que interfieren con la revascularización durante la fase inflamatoria incluyen los agentes antiinflamatorios, los esteroides, la radioterapia, muchos agentes quimioterapéuticos, y el consumo de tabaco, entre otros. Por lo general se cree que, luego de la culminación exitosa de la fase inflamatoria, la exposición a estos agentes e intervenciones afecta de manera sustancial al resto del proceso de fusión ósea. No obstante, esto ha sido puesto en tela de juicio por la observación de que los fármacos antiinflamatorios no esteroideos (NSAID por sus siglas en inglés) parecen tener un efecto inhibitorio durante todo el proceso de fusión. Es probable que mientras más tarde se instituyan los NSAID luego de la fusión quirúrgica (al menos hasta 4 semanas), menor será la inhibición de la fusión.<sup>87</sup>

La tasa de fusión es aumentada por el empleo de dispositivos de fijación en la mayoría de las circunstancias clínicas.<sup>88</sup> Pese a ello, esto no es una verdad universal, particularmente si el implante impide que las superficies de fusión “vean” fuerzas de realce de la curación ósea (al estilo de Wolff).<sup>84</sup> Esto se llama *protección del estrés*. Se enfatiza que los dispositivos de fijación reducen, pero no eliminan, la probabilidad de pseudoartrosis.<sup>88</sup>

### 12.9.2 Manejo de la osteoporosis

Aunque no se ha mostrado que el manejo médico de la osteoporosis sea inequívocamente efectivo para el éxito de la fusión, la disminución en la incidencia de las fracturas osteoporóticas patológicas por compresión y el probable efecto positivo sobre la tasa de fusión y la integridad de la misma, asociado con la tera-

pia complementaria, requiere la consideración continua y cada vez mayor del manejo médico como un complemento clínico viable. En la tabla 12.1 se presentan los datos de soporte.

La fortaleza del cuerpo vertebral frente a la flexión es mucho menor que la fortaleza frente a la compresión.<sup>89</sup> Esto tiene implicaciones en el manejo y prevención de la osteoporosis. En consecuencia, la densidad ósea ventral del cuerpo vertebral parece ser mucho más importante que la densidad ósea vertebral media o dorsal.

### 12.9.3 Estimulación eléctrica

Debido a que Yasuda et al., demostraron efectos positivos de la estimulación directa con corriente sobre la curación ósea en la década de los cincuenta, se desarrolló un interés significativo tanto en la investigación como en la arena clínica.<sup>86,90-99</sup> Pueden emplearse varias estrategias para la estimulación eléctrica.<sup>100,101</sup> Empero, parece que la estimulación directa con corriente mejora las tasas de fusión ósea en escenarios tanto de soporte de peso ventral como de recubrimiento dorsal.<sup>102,103</sup> La transmisión cutánea de campos electromagnéticos pulsados ha mostrado eficacia clínica para la fusión ventral, pero no para la dorsal.<sup>23</sup> También se han empleado otras estrategias de estimulación de injerto.<sup>104</sup>

### 12.9.4 Integración ósea

Las sustancias inertes que se unen al hueso distribuyen las cargas de manera más uniforme y proporcionan mayor integridad estructural. Dichas sustancias están actualmente en estudio.<sup>105,106</sup> En el capítulo 32 se realiza una discusión más profunda de este tema.

## 12.10 Cambios degenerativos del final de la fusión

La adquisición de una fusión espinal ósea aumenta el movimiento y el estrés en secciones de movimiento adyacentes. Esto puede acelerar los cambios degenerativos y disminuir la incidencia de adquisición subsecuente de fusión, si se realiza este procedimiento.<sup>107,108</sup> Los cambios degenerativos son acentuados por la deformidad. La carga excéntrica resultante de los discos adyacentes aumenta excesivamente la presión intradiscal y acelera los cambios degenerativos (Fig. 12.13). Si no hay deformidad y se mantiene el balance sagital, se disminuye la incidencia de cambios degenerativos del final de la fusión.<sup>109</sup> Este tema se aborda de manera específica en el capítulo 31.

## Referencias

- [1] Bailey RW, Badgley CE. Stabilization of the cervical spine by anterior fusion. *J Bone Joint Surg Am* 1960; 42-A: 565-594
- [2] Benzel EC. Biomechanics of lumbar and lumbosacral spine fracture. In: Rea GL, Miller CA, eds. *Spinal Trauma. Current Evaluation and Management*. Park Ridge, IL: American Association of Neurological Surgeons; 1993:65-195
- [3] Bohlman HH, Eismont FJ. Surgical techniques of anterior decompression and fusion for spinal cord injuries. *Clin Orthop Relat Res* 1981; 154: 57-67
- [4] Egger EL, Gottsauner-Wolf F, Palmer J, Aro HT, Chao EY. Effects of axial dynamization on bone healing. *J Trauma* 1993; 34: 185-192
- [5] Stauffer ES, Kelly EG. Fracture-dislocations of the cervical spine. Instability and recurrent deformity following treatment by anterior interbody fusion. *J Bone Joint Surg Am* 1977; 59: 45-48

Tabla 12.1 Osteoporosis: manejo médico

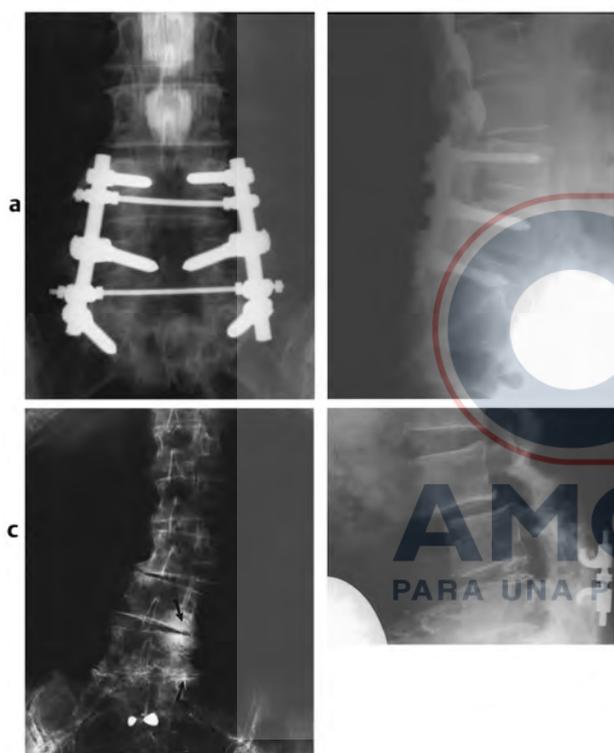
	Bifosfonatos (por ejemplo, alendronato)	Calcitonina – salmón	Estrógeno y progesterona	Raloxifeno	Hormona paratiroidea (por ejemplo, teriparatide)
Indicaciones relacionadas con la osteoporosis	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prevención y tratamiento de la osteoporosis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tratamiento de la osteoporosis (prevención de la pérdida progresiva de masa ósea)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prevención y tratamiento de la osteoporosis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prevención de la osteoporosis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prevención y tratamiento de la osteoporosis</li> </ul>
Lugar en la terapia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mujeres posmenopáusicas que no son capaces de tomar estrógenos debido a efectos colaterales o riesgo de cáncer de mama</li> <li>Y</li> <li>• que no tienen enfermedad gastrointestinal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mujeres posmenopáusicas que no son capaces de tomar estrógenos debido a efectos colaterales o riesgo de cáncer de mama</li> <li>Y</li> <li>• que tienen más de 5 años de menopausia</li> <li>• Dolor óseo asociado con osteoporosis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fármaco de elección en mujeres posmenopáusicas que son capaces de tolerar estrógenos</li> <li>Y</li> <li>• que son por lo demás sanas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mujeres posmenopáusicas que no son capaces de tomar estrógenos debido a efectos colaterales o riesgo de cáncer de mama</li> <li>Y</li> <li>• que no tienen síntomas menopáusicos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mujeres posmenopáusicas que no son capaces de tomar estrógenos debido a efectos colaterales o riesgo de cáncer de mama</li> <li>Y</li> <li>• que no tienen síntomas menopáusicos</li> <li>• Otras con riesgo elevado de fractura</li> </ul>
Pérdida ósea	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fractura vertebral: reducción del 49% del riesgo sin historia de fractura vertebral</li> <li>• Fractura vertebral: reducción del 47% del riesgo con fractura vertebral previa</li> <li>• Fractura de cadera: reducción del 56% del riesgo sin historia de fractura vertebral</li> <li>• Fractura de cadera: reducción del 51% del riesgo con fractura vertebral previa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fractura vertebral: reducción del 36% en la incidencia de nuevas fracturas en mujeres con osteoporosis establecida</li> <li>• Las fracturas de cadera, muñeca y otros tipos no tienen riesgos conocidos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fractura vertebral: reducción del 50-80% del riesgo</li> <li>• Fractura de cadera y muñeca: reducción del 60% en la incidencia en aquellas cuya terapia de estrógenos se inició pocos años después de la menopausia</li> <li>• Densidad ósea de cadera y columna: incremento del 1,7 y 5%, respectivamente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fractura vertebral: reducción del 52% del riesgo sin historia de fractura vertebral</li> <li>• Fractura vertebral: reducción del 38% del riesgo con fractura vertebral previa</li> <li>• Las fracturas de cadera, muñeca y otros tipos no tienen riesgos conocidos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fractura vertebral: reducción del 60% del riesgo sin historia de fractura vertebral</li> </ul>
Enfermedad cardíaca	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Corazón: sin efecto conocido</li> <li>• LDL: sin efecto conocido</li> <li>• Coagulación sanguínea: sin efecto conocido</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sin efecto conocido</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumento del riesgo de enfermedad cardíaca en mujeres posmenopáusicas con enfermedad coronaria establecida en el primer año</li> <li>• LDL disminuida en un 11%</li> <li>• HDL aumentada en un 10%</li> <li>• Los triglicéridos elevados deben tratarse por vía transdérmica (menos efectos)</li> <li>• La presencia de un coágulo sanguíneo activo es una contraindicación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Altera favorablemente lo siguiente:</li> <li>• Disminuye: LDL-C, fibrinógeno, lipoproteína (a)</li> <li>• Aumenta: HDL2-C</li> <li>• Sin efectos sobre los triglicéridos</li> <li>• Efectos favorables asociados con protección contra la enfermedad CV no determinados</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sin efecto conocido</li> </ul>
Síntomas menopáusicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No causa ni tiene efectos sobre lo siguiente:</li> <li>• Calorones</li> <li>• Sudoración nocturna</li> <li>• Sequedad y atrofia vaginal</li> <li>• Relaciones sexuales dolorosas</li> <li>• Sangrado vaginal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No causa ni tienen efectos sobre lo siguiente:</li> <li>• Calorones</li> <li>• Sudoración nocturna</li> <li>• Sequedad y atrofia vaginal</li> <li>• Relaciones sexuales dolorosas</li> <li>• Cambios de humor</li> <li>• Sangrado vaginal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mejora lo siguiente:</li> <li>• Calorones</li> <li>• Sudoración nocturna</li> <li>• Sequedad y atrofia vaginal</li> <li>• Relaciones sexuales dolorosas</li> <li>• Cambios de humor</li> <li>• Sangrado vaginal periódico</li> <li>• Puede ocasionar sangrado y manchado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No causa ni tienen efectos sobre lo siguiente:</li> <li>• Sequedad y atrofia vaginal</li> <li>• Relaciones sexuales dolorosas</li> <li>• Cambios de humor</li> <li>• Sangrado vaginal</li> <li>• Puede ocasionar o empeorar los calorones</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No causa ni tienen efectos sobre lo siguiente:</li> <li>• Sequedad y atrofia vaginal</li> <li>• Relaciones sexuales dolorosas</li> <li>• Cambios de humor</li> <li>• Sangrado vaginal</li> <li>• Puede ocasionar o empeorar los calorones</li> </ul>
Mama	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sin efectos sobre la sensibilidad mamaria</li> <li>• Sin efectos sobre el riesgo de cáncer de mama</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sin efectos sobre la sensibilidad mamaria</li> <li>• Sin efectos sobre el riesgo de cáncer de mama</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Puede ocasionar sensibilidad mamaria</li> <li>• El uso a largo plazo (10-20 años) puede aumentar el riesgo de cáncer de mama en 4 a 5 de cada 100 mujeres</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sin efectos sobre la sensibilidad mamaria</li> <li>• Datos preliminares: reducción del 70% en el riesgo de cáncer de mama invasivo en comparación con el placebo</li> <li>• No se observó aumento del riesgo de cáncer de mama en estudios que duraron hasta 39 meses</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sin efectos</li> </ul>

Tabla 12.2 Continuación

	Bifosfonatos (por ejemplo, alendronato)	Calcitonina – salmón	Estrógeno y progesterona	Raloxifeno	Hormona paratiroidea (por ejemplo, teriparatide)
Otros	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deben tomarse con el estómago vacío y un vaso lleno de agua</li> <li>• Debe evitarse acostarse o inclinarse por 30 minutos luego de tomado para evitar la irritación esofágica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formulación alternativa para mujeres que se encuentran en NPO</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estudios en curso para lo siguiente:</li> <li>• Mejoras en el tono cutáneo (menos arrugas)</li> <li>• Prevención de la enfermedad de Alzheimer</li> <li>• Reducción del riesgo de cáncer de colon</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Puede ocasionar calambres en las piernas</li> <li>• Sin efectos sobre el endometrio, aunque puede reducir el riesgo de cáncer de endometrial</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Efectos colaterales: náuseas, calambres en las piernas, mareos, aumento del riesgo de osteosarcoma en ratas</li> </ul>

Abreviaturas: CV, cardiovascular; HDL2-C, subfracción 2 del colesterol de lipoproteínas de alta densidad; LDL-C, colesterol de lipoproteínas de baja densidad; NPO, nil per os (nada por boca).

Fuente: información suministrada, en parte, por Eli Lilly y Compañía.



**Fig. 12.13** La fusión puede producir cambios degenerativos significativos en sus extremos. Se muestra un caso en que hubo una hipertrofia ligamentosa y protrusión discal por encima de los niveles de la fusión en (A) un mielograma anteroposterior y (B) uno lateral. (C) Una deformidad segmentaria focal produce una carga excéntrica de los discos intervertebrales, como se observa en el lado cóncavo de una curva escoliótica. Note la esclerosis y la formación de osteofitos (flechas). La carga excéntrica, ocasionada por la aplicación de un momento de inclinación, produce cambios degenerativos acelerados. (D) La fusión en una configuración anormal (por ejemplo, pérdida de la lordosis) acelera este proceso, que incluye la propensión a una deformación angular o traslativa. En este caso, hay una disrupción del balance sagital.

- [6] Benzel EC, Larson SJ. Operative stabilization of the posttraumatic thoracic and lumbar spine: a comparative analysis of the Harrington distraction rod and the modified Weiss spring. *Neurosurgery* 1986; 19: 378–385
- [7] Mirovsky Y, Neuwirth MG. Comparison between the outer table and intra-cortical methods of obtaining autogenous bone graft from the iliac crest. *Spine* 2000; 25: 1722–1725
- [8] Denis F. The three column spine and its significance in the classification of acute thoracolumbar spinal injuries. *Spine* 1983; 8: 817–831
- [9] White AA, Panjabi MM. *Clinical Biomechanics of the Spine*. 2nd ed. Philadelphia, PA: J. B. Lippincott; 1990
- [10] White AA, Panjabi MM, Thomas CL. The clinical biomechanics of kyphotic deformities. *Clin Orthop Relat Res* 1977; 128: 8–17
- [11] Wang JC, Yuan H, Zou D, Yoo J. A biomechanical evaluation of graft loading characteristics for anterior cervical discectomy. Paper No. 43 presented at: 25th Annual Meeting of the Cervical Spine Research Society; Rancho Mirage, CA; December 4–6, 1997
- [12] Feighan JE, Stevenson S, Emery SE. Biologic and biomechanic evaluation of posterior lumbar fusion in the rabbit. The effect of fixation rigidity. *Spine* 1995; 20: 1561–1567
- [13] Thorell WL, Cooper J, Hellbusch L, Leibrock L. The long-term clinical outcome of patients undergoing anterior cervical discectomy with and without inter-vertebral bone graft placement. *Neurosurgery* 1998; 43: 268–273, discussion 273–274
- [14] Buttermann GR, Glazer PA, Hu SS, Bradford DS. Revision of failed lumbar fusions. A comparison of anterior autograft and allograft. *Spine* 1997; 22: 2748–2755
- [15] Chen D, Kummer FJ, Spivak JM. Optimal selection and preparation of fresh frozen corticocancellous allografts for anterior interbody lumbar spinal fusion. *J Spinal Disord* 1997; 10: 532–536
- [16] Ebraheim NA, Yang H, Lu J, Biyani A, Yeasting RA. Anterior iliac crest bone graft. Anatomic considerations. *Spine* 1997; 22: 847–849
- [17] Kim P, Wakai S, Matsuo S, Moriyama T, Kirino T. Bisegmental cervical inter-body fusion using hydroxyapatite implants: surgical results and long-term observation in 70 cases. *J Neurosurg* 1998; 88: 21–27
- [18] Robertson SC, Menezes AH. Occipital calvarial bone graft in posterior occipitocervical fusion. *Spine* 1998; 23: 249–254, discussion 254–255
- [19] Schnee CL, Freese A, Weil RJ, Marcotte PJ. Analysis of harvest morbidity and radiographic outcome using autograft for anterior cervical fusion. *Spine* 1997; 22: 2222–2227
- [20] Bush TL The Writing Group for the PEPI. Effects of hormone therapy on bone mineral density: results from the postmenopausal estrogen/progestin interventions (PEPI) trial. *JAMA* 1996; 276: 1389–1396
- [21] Glassman SD, Rose SM, Dimar JR, Puno RM, Campbell MJ, Johnson JR. The effect of postoperative nonsteroidal anti-inflammatory drug administration on spinal fusion. *Spine* 1998; 23: 834–838
- [22] Hadley MN, Reddy SV. Smoking and the human vertebral column: a review of the impact of cigarette use on vertebral bone metabolism and spinal fusion. *Neurosurgery* 1997; 41: 116–124
- [23] Kahanovitz N. Spine update. The use of adjunctive electrical stimulation to enhance the healing of spine fusions. *Spine* 1996; 21: 2523–2525
- [24] Mermelstein LE, McLain RF, Yerby SA. Reinforcement of thoracolumbar burst fractures with calcium phosphate cement. A biomechanical study. *Spine* 1998; 23: 664–670, discussion 670–671

- [25] Morone MA, Boden SD. Experimental posterolateral lumbar spinal fusion with a demineralized bone matrix gel. *Spine* 1998; 23: 159–167
- [26] Oda K, Shibayama Y, Abe M, Onomura T. Morphogenesis of vertebral deformities in involutional osteoporosis. Age-related, three-dimensional trabecular structure. *Spine* 1998; 23: 1050–1055, discussion 1056
- [27] Silcox DH, Boden SD, Schimandle JH, Johnson P, Whitesides TE, Hutton WC. Reversing the inhibitory effect of nicotine on spinal fusion using an osteoinductive protein extract. *Spine* 1998; 23: 291–296, discussion 297
- [28] Wittenberg RH, Shea M, Swartz DE, Lee KS, White AA, Hayes WC. Importance of bone mineral density in instrumented spine fusions. *Spine* 1991; 16: 647–652
- [29] Smit TH, Odgaard A, Schneider E. Structure and function of vertebral trabecular bone. *Spine* 1997; 22: 2823–2833
- [30] Benzel EC, Kesterson L. Posterior cervical interspinous compression wiring and fusion for mid to low cervical spinal injuries. *J Neurosurg* 1989; 70: 893–899
- [31] Rao RD, Bagaria V, Gourab K, Haworth ST, Shidham VB, Cooley BC. Autograft containment in posterolateral spine fusion. *Spine J* 2008; 8: 563–569
- [32] Kim K-W, Ha KY, Moon M-S, Kim Y-S, Kwon SY, Woo Y-K. Volumetric change of the graft bone after intertransverse fusion. *Spine* 1999; 24: 428–433
- [33] Sawin PD, Traynelis VC, Menezes AH. A comparative analysis of fusion rates and donor-site morbidity for autogeneic rib and iliac crest bone grafts in posterior cervical fusions. *J Neurosurg* 1998; 88: 255–265
- [34] Hamill CL, Bridwell KH, Lenke LG, Chapman MP, Baldus C, Blanke K. Posterior arthrodesis in the skeletally immature patient. Assessing the risk for crank-shaft: is an open triradiate cartilage the answer? *Spine* 1997; 22: 1343–1351
- [35] Sanders JO, Little DG, Richards BS. Prediction of the crankshaft phenomenon by peak height velocity. *Spine* 1997; 22: 1352–1356, discussion 1356–1357
- [36] Albert TJ, Pinto M, Smith MD, Balderston RA, Cotler JM, Park CH. Accuracy of SPECT scanning in diagnosing pseudoarthrosis: a prospective study. *J Spinal Disord* 1998; 11: 197–199
- [37] Brantigan JW. Pseudoarthrosis rate after allograft posterior lumbar interbody fusion with pedicle screw and plate fixation. *Spine* 1994; 19: 1271–1279, discussion 1280
- [38] Carpenter CT, Dietz JW, Leung KY, Hanscom DA, Wagner TA. Repair of a pseudoarthrosis of the lumbar spine. A functional outcome study. *J Bone Joint Surg Am* 1996; 78: 712–720
- [39] Chafetz N, Cann CE, Morris JM, Steinbach LS, Goldberg HI, Ax L. Pseudoarthrosis following lumbar fusion: detection by direct coronal CT scanning. *Radiology* 1987; 162: 803–805
- [40] Dawson EG, Clader TJ, Bassett LW. A comparison of different methods used to diagnose pseudoarthrosis following posterior spinal fusion for scoliosis. *J Bone Joint Surg Am* 1985; 67: 1153–1159
- [41] Ebraheim NA, Xu R. Assessment of lumbosacral fusion mass by angled radiography. Technical notes. *Spine* 1998; 23: 842–843
- [42] Even-Sapir E, Martin RH, Mitchell MJ, Iles SE, Barnes DC, Clark AJM. Assessment of painful late effects of lumbar spinal fusion with SPECT. *J Nucl Med* 1994; 35: 416–422
- [43] Hannon KM, Wetta WJ. Failure of technetium bone scanning to detect pseudoarthroses in spinal fusion for scoliosis. *Clin Orthop Relat Res* 1977; 123: 42–44
- [44] Heggeness MH, Esses SI, Mody DR. A histologic study of lumbar pseudoarthrosis. *Spine* 1993; 18: 1016–1020
- [45] Jacobsen JA, Starok M, Pathria MN, Garfin SR. Pseudoarthroses. *Spine* 1993; 18: 1016–1020
- [46] Lang P, Chafetz N, Genant HK, Morris JM. Lumbar spinal fusion. Assessment of functional stability with magnetic resonance imaging. *Spine* 1990; 15: 581–588
- [47] Lang P, Genant HK, Chafetz N, Steiger P, Morris JM. Three-dimensional computed tomography and multiplanar reformations in the assessment of pseudoarthrosis in posterior lumbar fusion patients. *Spine* 1988; 13: 69–75
- [48] Miyata S, Kambara K. Bone union after lumbar posterolateral fusion: comparative evaluation by x-ray and CT [in Japanese] *Nippon Seikeigeka Gakkai Zasshi* 1994; 68: 1023–1032
- [49] Morris J, Chafetz N, Baumrind S, Genant H, Korn EL. Stereophotogrammetry of the lumbar spine. A technique for the detection of pseudoarthrosis. *Spine* 1985; 10: 368–375
- [50] Pearcy M, Burroughs S. Assessment of bony union after interbody fusion of the lumbar spine using a biplanar radiographic technique. *J Bone Joint Surg Br* 1982; 64: 228–232
- [51] Roy-Camille R, Lelièvre JF. Pseudoarthrosis of the dorso-lumbar vertebrae [in French] *Rev Chir Orthop Appar Mot* 1975; 61: 249–257
- [52] Siambanes D, Mather S. Comparison of plain radiographs and CT scans in instrumented posterior lumbar interbody fusion. *Orthopedics* 1998; 21: 165–167
- [53] Ploumis A, Pinto MR, Schellhas KP. Disc space injection with marcaine as a method to evaluate painful nonunion of an interbody fusion device: a case report. *Spine J* 2007; 7: 74–78
- [54] Epstein NE, Silvergleide RS, Black K. Computed tomography validating bony ingrowth into fibula strut allograft: a criterion for fusion. *Spine J* 2002; 2: 129–133
- [55] Blount KJ, Krompinger WJ, Maljanian R, Browner BD. Moving toward a standard for spinal fusion outcomes assessment. *J Spinal Disord Tech* 2002; 15: 16–23
- [56] Carreon L, Glassman SD, Campbell MJ. Treatment of anterior cervical pseudoarthrosis: posterior fusion versus anterior revision. *Spine J* 2006; 6: 154–156
- [57] Whang PG, Wang JC. Bone graft substitutes for spinal fusion. *Spine J* 2003; 3: 155–165
- [58] Balabhadra RSV, Kim DH, Zhang HY. Anterior cervical fusion using dense cancellous allografts and dynamic plating. *Neurosurgery* 2004; 54: 1405–1411, discussion 1411–1412
- [59] Schils F, Rilliet B, Payer M. Implantation of an empty carbon fiber cage or a tricortical iliac crest autograft after cervical discectomy for single-level disc herniation: a prospective comparative study. *J Neurosurg Spine* 2006; 4: 292–299
- [60] Robertson PA, Wray AC. Natural history of posterior iliac crest bone graft donation for spinal surgery: a prospective analysis of morbidity. *Spine* 2001; 26: 1473–1476
- [61] Behairy YM, Al-Sebai W. A modified technique for harvesting full-thickness iliac crest bone graft. *Spine* 2001; 26: 695–697
- [62] Tubbs RS, Levin MR, Loukas M, Potts EA, Cohen-Gadol AA. Anatomy and landmarks for the superior and middle cluneal nerves: application to posterior iliac crest harvest and entrapment syndromes. *J Neurosurg Spine* 2010; 13: 356–359
- [63] Peelle MW, Rawlins BA, Frelinghuysen P. A novel source of cancellous auto-graft for ACDF surgery: the manubrium. *J Spinal Disord Tech* 2007; 20: 36–41
- [64] Heary RF, Schlenk RP, Sacchieri TA, Barone D, Brotea C. Persistent iliac crest donor site pain: independent outcome assessment. *Neurosurgery* 2002; 50: 510–516, discussion 516–517
- [65] Wang MY, Levi ADO, Shah S, Green BA. Polylactic acid mesh reconstruction of the anterior iliac crest after bone harvesting reduces early postoperative pain after anterior cervical fusion surgery. *Neurosurgery* 2002; 51: 413–416, discussion 416
- [66] Gibson S, McLeod I, Wardlaw D, Urbaniak S. Allograft versus autograft in instrumented posterolateral lumbar spine fusion: a randomized controlled trial. *Spine* 2002; 27: 1599–1603
- [67] Mroz TE, Joyce MJ, Lieberman IH, Steinmetz MP, Benzel EC, Wang JC. The use of allograft bone in spine surgery: is it safe? *Spine J* 2009; 9: 303–308
- [68] Thalgot JS, Giuffre JM, Fritts K, Timlin M, Klezl Z. Instrumented posterolateral lumbar fusion using coralline hydroxyapatite with or without demineralized bone matrix, as an adjunct to autologous bone. *Spine J* 2001; 1: 131–137
- [69] Ohyama T, Kubo Y, Iwata H, Taki W. Beta-tricalcium phosphate as a substitute for autograft in interbody fusion cages in the canine lumbar spine. *J Neurosurg* 2002; 97 Suppl: 350–354
- [70] Glazer PA, Spencer UM, Alkalay RN, Schwardt J. In vivo evaluation of calcium sulfate as a bone graft substitute for lumbar spinal fusion. *Spine J* 2001; 1: 395–401
- [71] Ito M, Abumi K, Shono Y, Kotani Y, Minami A, Kaneda K. Complications related to hydroxyapatite vertebral spacer in anterior cervical spine surgery. *Spine* 2002; 27: 428–431
- [72] Agarwal R, Williams K, Umscheid CA, Welch WC. Osteoinductive bone graft substitutes for lumbar fusion: a systematic review. *J Neurosurg Spine* 2009; 11: 729–740
- [73] Haid RW, Branch CL, Alexander JT, Burkus JK. Posterior lumbar interbody fusion using recombinant human bone morphogenetic protein type 2 with cylindrical interbody cages. *Spine J* 2004; 4: 527–538, discussion 538–539
- [74] Boden SD, Kang J, Sandhu H, Heller JG. Use of recombinant human bone morphogenetic protein-2 to achieve posterolateral lumbar spine fusion in humans: a prospective, randomized clinical pilot trial. 2002 Volvo

- Award in clinical studies. *Spine* 2002; 27: 2662–2673
- [75] Johnsson R, Ström, Ö, Mqvist B, Aspenberg P. Randomized radiostereometric study comparing osteogenic protein (BMP-7) and autograft bone in human noninstrumented posterolateral lumbar fusion: 2002 Volvo Award in clinical studies. *Spine* 2002; 27: 2654–2661
- [76] Martin GJ, Boden SD, Marone MA, Marone MA, Moskovitz PA. Posterolateral intertransverse process spinal arthrodesis with rhBMP-2 in a non-human primate: important lessons learned regarding dose, carrier, and safety. *J Spinal Disord* 1999; 12: 179–186
- [77] Lindley TE, Dahdaleh NS, Menezes AH, Abode-Iyamah KO. Complications associated with recombinant human bone morphogenetic protein use in pediatric craniocervical arthrodesis. *J Neurosurg Pediatr* 2011; 7: 468–474
- [78] Kandziora F, Bail H, Schmidmaier G et al. Bone morphogenetic protein-2 application by a poly(D,L-lactide)-coated interbody cage: in vivo results of a new carrier for growth factors. *J Neurosurg* 2002; 97 Suppl: 40–48
- [79] Boden SD, Martin GJ, Morone MA, Ugbo JL, Moskovitz PA. Posterolateral lumbar intertransverse process spine arthrodesis with recombinant human bone morphogenetic protein 2/hydroxyapatite-tricalcium after laminectomy in the nonhuman primate. *Spine* 1999; 24: (12): 1179–1185
- [80] Zdeblick TA, Ghanayem AJ, Rapoff AJ et al. Cervical interbody fusion cages. An animal model with and without bone morphogenetic protein. *Spine* 1998; 23: 758–765, discussion 766
- [81] Altman DA, Titus L, Hair GA, Boden SD. Molecular biology and spinal disorders. A survey for the clinician. *Spine* 1999; 24: 723–730
- [82] Cloward R. Bone as a spinal instrument. In: Benzel EC, ed. *Spinal Instrumentation*. Park Ridge, IL: American Association of Neurological Surgeons; 1994:85–210
- [83] France JC, Yaszemski MJ, Lauerman WC et al. A randomized prospective study of posterolateral lumbar fusion. Outcomes with and without pedicle screw instrumentation. *Spine* 1999; 24: 553–560
- [84] Wolff J. *Das Gesetz der Transformation der Knochen*. Berlin, Germany: Hirschwald Verlag; 1892
- [85] Trehanne RW. Review of Wolff's Law and its proposed means of operation. *Orthop Rev* 1981; 10: 35–47
- [86] Yasuda I, Noguchi K, Sata T. Dynamic callus and electric callus. *J Bone Joint Surg Am* 1955; 37: 1292–1293
- [87] Riew KD, Lewis SJ, Long J, Kuklo TR, Rhee J. Time-dependent inhibitory effects of NSAIDs on spinal fusion. Paper presented at: 29th Annual Meeting of the Cervical Spine Research Society; Monterey, CA; November 29–December 1, 2001
- [88] Wang JC, McDonough PW, Kanim LEA, Endow KK, Delamarter RB. Increased fusion rates with cervical plating for three-level anterior cervical discectomy and fusion. *Spine* 2001; 26: 643–646, discussion 646–647
- [89] Buckley JM, Kuo CC, Cheng LC et al. Relative strength of thoracic vertebrae in axial compression versus flexion. *Spine J* 2009; 9: 478–485
- [90] Fukada E, Yasuda I. On the piezoelectric effect of bone. *J Phys Soc Jpn* 1957; 12: 1158–1162
- [91] Yasuda I. Electrical callus and callus formation by electret. *Clin Orthop Relat Res* 1977; 124: 53–56
- [92] Yasuda I. The classic: Fundamental aspects of fracture treatment by Iwao Yasuda, reprinted from *J. Kyoto Med. Soc.*, 4:395–406, 1953. *Clin Orthop Relat Res* 1977; 124: 5–8
- [93] Dwyer AF, Wickham GG. Direct current stimulation in spinal fusion. *Med J Aust* 1974; 1: 73–75
- [94] Dwyer AF. The use of electrical current stimulation in spinal fusion. *Orthop Clin North Am* 1975; 6: 265–273
- [95] Kahanovitz N, Pashos CL. The role of implantable direct current stimulation in the critical pathway for lumbar spinal fusion. *J Case Manag* 1996; 2: 46–58
- [96] Kane WJ. Direct current electrical bone growth stimulation for spinal fusion. *Spine* 1988; 13: 363–365
- [97] Meril AJ. Direct current stimulation of allograft in anterior and posterior lumbar interbody fusions. *Spine* 1994; 19: 2393–2398
- [98] Rogozinski A, Rogozinski C. Efficacy of implanted bone growth stimulation in instrumented lumbosacral spinal fusion. *Spine* 1996; 21: 2479–2483
- [99] Tejano NA, Puno R, Ignacio JMF. The use of implantable direct current stimulation in multilevel spinal fusion without instrumentation. A prospective clinical and radiographic evaluation with long-term follow-up. *Spine* 1996; 21: 1904–1908
- [100] Kahanovitz N. Electrical stimulation of spinal fusion: a scientific and clinical update. *Spine J* 2002; 2: 145–150
- [101] DeJardin LM, Kahanovitz N, Arnoczky SP, Simon BJ. The effect of varied electrical current densities on lumbar spinal fusions in dogs. *Spine J* 2001; 1: 341–347
- [102] France JC, Santrock R, Norman T, McGrath B. The efficacy of DC stimulation on lumbar intertransverse fusion. Paper presented at: 14th Annual Meeting of the North American Spine Society; Chicago, IL: October 20–23, 1999:22–226
- [103] Toth JM, Seim HB, Schwardt JD, Humphrey WB, Wallskog JA, Turner AS. Direct current electrical stimulation increases the fusion rate of spinal fusion cages. *Spine* 2000; 25: 2580–2587
- [104] Oishi M, Onesti ST. Electrical bone graft stimulation for spinal fusion: a review. *Neurosurgery* 2000; 47: 1041–1055, discussion 1055–1056
- [105] Belkoff SM, Mathis JM, Erbe EM, Fenton DC. Biomechanical evaluation of a new bone cement for use in vertebroplasty. *Spine* 2000; 25: 1061–1064
- [106] Matsui H, Tatzaki S, Tsuji H. Ceramic vertebral body replacement for metastatic spine tumors. *J Spinal Disord* 1994; 7: 248–254
- [107] Hilibrand AS, Yoo JU, Carlson GD, Bohlman HH. The success of anterior cervical arthrodesis adjacent to a previous fusion. *Spine* 1997; 22: 1574–1579
- [108] Shono Y, Kaneda K, Abumi K, McAfee PC, Cunningham BW. Stability of posterior spinal instrumentation and its effects on adjacent motion segments in the lumbosacral spine. *Spine* 1998; 23: 1550–1558
- [109] Pérez-Grueso FS, Fernández-Baillo N, Arauz de Robles S, García Fernández A. The low lumbar spine below Cotrel-Dubouset instrumentation: long-term findings. *Spine* 2000; 25: 2333–2341