

Redacción

M. Blauth, Innsbruck

Ilustraciones

R. Himmelhan, Heidelberg

Tratamiento de fracturas vertebrales osteoporóticas mediante instrumentalización suplementada con cemento

Introducción

El proceso de crecimiento demográfico conlleva un progresivo envejecimiento de la población, que tiene como consecuencia un aumento de la incidencia de fracturas osteoporóticas², siendo la más frecuente la fractura osteoporótica de columna vertebral. Se calcula que en EE. UU. y Europa se tratan cada año aproximadamente 1,7 millones de fracturas vertebrales osteoporóticas²³. En la mayoría de los casos estas fracturas se pueden tratar de modo conservador. La suplementación percutánea con cemento del cuerpo vertebral es una excelente opción terapéutica mínimamente invasiva en aquellos casos en los que el paciente presenta dolores resistentes a la terapia o compresión del cuerpo vertebral, o desarrolla una deformidad cifótica^{13,22}.

En determinados casos, sin embargo, no resulta suficiente la suplementación por vía percutánea de una fractura vertebral osteoporótica. La afectación de la pared posterior en el caso de una fractura por compresión (del tipo A3 según Magerl) supone, como mínimo, una contraindicación relativa a la técnica de la cifoplastia debido al mayor riesgo de extravasación de cemento hacia el canal espinal²³. La estabilización lateral también se recomienda cuando el cuerpo vertebral presenta una compresión muy marcada¹⁶. Otra indicación para la estabilización dorsal es la presencia de antiguas fracturas vertebrales osteoporóticas con cifosis postraumática, que no se consiguieron lordosar suficientemente mediante reposo o medidas percutáneas. En cualquier caso, el tratamiento de una

fractura de columna vertebral dentro del marco de una lesión por distracción o por rotación (tipo B y C según Magerl) requiere una estabilización dorsal.

El procedimiento estándar para la estabilización dorsal en la columna toracolumbar se basa en la colocación de tornillos pediculares y barras a modo de fijadores internos. En una columna vertebral con calidad ósea normal, es el anclaje de los tornillos en el hueso cortical del pedículo el responsable principal de la sujeción de los mismos con el 60% de la carga de rotura máxima en sentido axial y el 80% en sentido craneo-caudal¹². El anclaje de los tornillos pediculares en el hueso esponjoso del cuerpo vertebral sano tiene menos relevancia. En una columna vertebral osteoporótica, sin embargo, la sujeción de los tornillos en el pedículo se puede reducir hasta un 50%². Ello aumenta el riesgo de aflojamiento de los tornillos y de pérdida de corrección postoperatoria (■ **fig. 1**).

La pérdida de sujeción de los tornillos en el hueso osteoporótico se debe a una mayor porosidad de la sustancia compacta en la zona del pedículo, así como a la rarefacción de la estructura ósea esponjosa. De ello resulta la reducción de la superficie de contacto entre tornillo y hueso. La superficie de contacto entre el hueso y el implante se puede aumentar usando tornillos pediculares de la mayor longitud y diámetro posibles. La aplicación de tornillos pediculares suplementados con cemento en la columna sirve, además, para aumentar esta superficie de contacto. En varios estudios biomecánicos se observó una mejor sujeción de los tornillos pedicu-

lares después de la suplementación con cemento tanto en relación con la carga cíclica como respecto a la carga de rotura máxima^{2,5,9,10,20,21}. Estudios clínicos mostraron una disminución de la tasa de aflojamiento de los tornillos después de la suplementación con cemento^{10,19}. La suplementación con cemento con tornillos pediculares se puede realizar básicamente con todos los sistemas de tornillos pediculares. Sin embargo, la utilización de tornillos pediculares con perforación central facilita la aplicación de cemento y reduce el tiempo de intervención.

Principio y objetivo de la intervención

Reconstrucción de los ejes correctos de la columna vertebral y movilización rápida y poco dolorosa después de fracturas de columna vertebral osteoporótica mediante instrumentación dorsal con tornillos pediculares suplementados con cemento.

Ventajas

- Mejor fijación de los tornillos pediculares en el hueso osteoporótico.
- La reposición de desviaciones cifóticas a través de un fijador interno es más efectiva que mediante vertebroplastia o cifoplastia.
- Es posible el uso de instrumentos cortos gracias a la mejor fijación de los tornillos en el hueso osteoporótico.
- Se puede combinar con otras fases quirúrgicas, como la descompresión

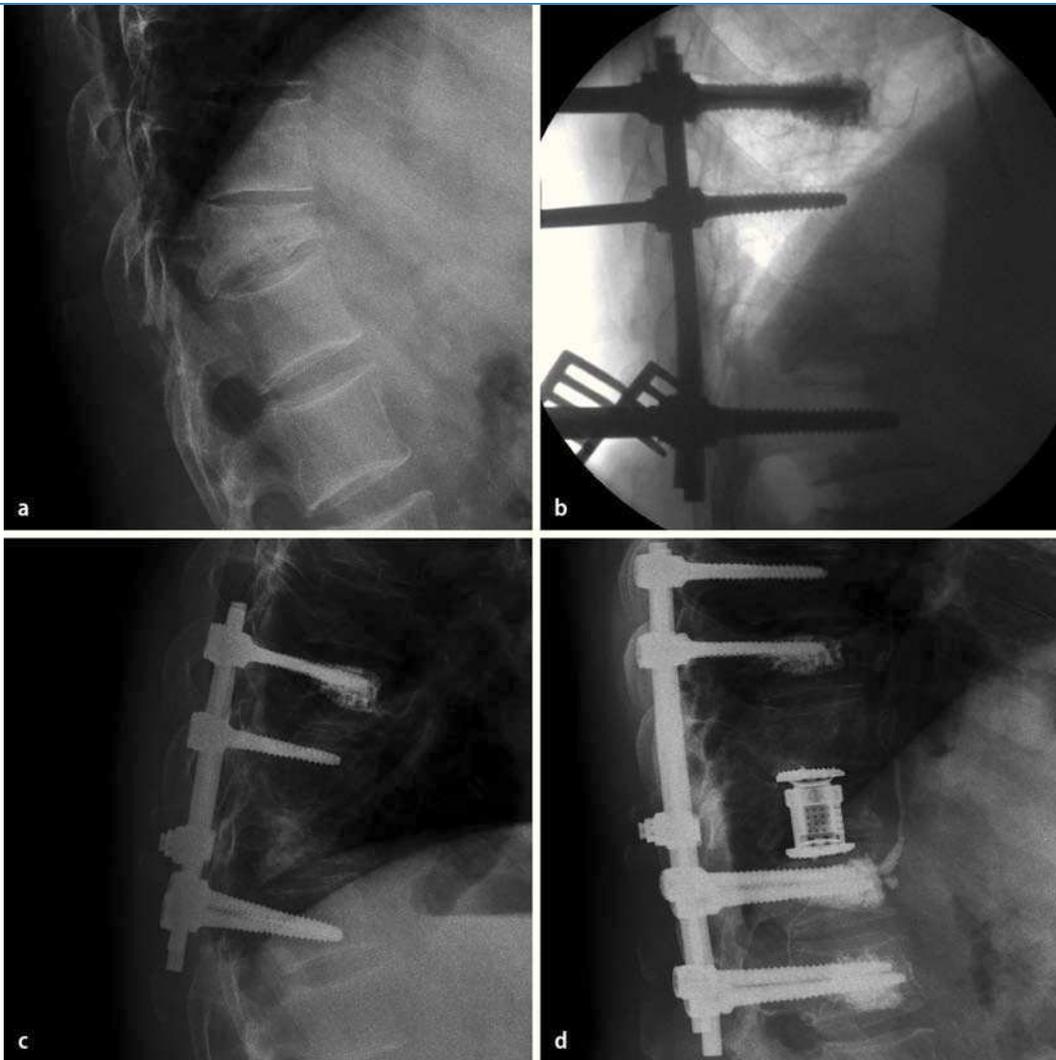


Fig. 1 ◀ **a** Paciente de 55 años con una cifosis post-traumática después de una lesión del tipo A de la vértebra T11 tratada de modo conservador. Existe presencia de osteoporosis (escala T: -3,7). **b** Imagen intraoperatoria después de la corrección de la posición mediante instrumentación dorsal T9-T12. Alineación favorable. Solo se cementaron los tornillos en el cuerpo vertebral de la T9 debido a una mala fijación intraoperatoria. No existe soporte ventral. **c** Pérdida de corrección postoperatoria con seccionamiento de los tornillos pediculares no cementados en la vértebra T12. **d** Revisión con prolongación de la instrumentación, cementación de los tornillos pediculares caudales y soporte ventral adicional. Extravasación de cemento hacia las venas paravertebrales.

del canal espinal y de las raíces nerviosas o una fusión biológica dorsal.

- Se puede combinar con la cifoplastia o la vertebroplastia del cuerpo vertebral fracturado y de los cuerpos vertebrales adyacentes.
- Se pueden utilizar diferentes sistemas de tornillos pediculares tanto con perforación central de los tornillos como sin esta.
- La extracción de los tornillos pediculares cementados no supone ningún problema^{4,8}.

Desventajas

- Mayor tiempo de intervención con mayor pérdida de sangre en comparación con la cifoplastia o vertebroplastia.

- Prolongación del tiempo de intervención por la aplicación del cemento.
- Fuga de cemento hacia los vasos paravertebrales.

Indicaciones

- Fracturas de columna vertebral torácica y lumbar en caso de estructura ósea osteoporótica, que requieren de instrumentación dorsal para su estabilización. En concreto, se trata de:
 - Fracturas por compresión del tipo A3 según Magerl.
 - Fracturas del cuerpo vertebral osteoporótico mal curadas con desviación cifótica que no se consiguieron lordosar suficientemente mediante reposo o medidas percutáneas.

- Intervenciones de revisión debido a un aflojamiento postoperatorio de los tornillos y/o a una pérdida de corrección.
- Fracturas del cuerpo vertebral dentro del marco de lesiones por distracción y rotación (tipo B y C según Magerl).

Contraindicaciones

- Fracturas vertebrales osteoporóticas, que se pueden tratar de modo conservador o mediante inyección percutánea de cemento óseo.
- Fijación suficiente de los tornillos pediculares en caso de calidad ósea buena.

D. Krappinger · T.J. Kastenberger · R. Schmid

Tratamiento de fracturas vertebrales osteoporóticas mediante instrumentalización suplementada con cemento

Resumen

Objetivo de la operación. Reposición y estabilización de fracturas vertebrales osteoporóticas mediante instrumentalización dorsal corta. Mejora de la sujeción de los tornillos en el hueso osteoporótico mediante el refuerzo de los tornillos pediculares con cemento para evitar una pérdida de corrección postoperatoria. Movilización postoperatoria rápida e indolora sin más inmovilización externa.

Indicaciones. Fracturas por compresión del tipo A3 según Magerl. Fracturas vertebrales osteoporóticas mal curadas con deformidad cifótica, que no se pueden lordosar suficientemente mediante reposo o medidas percutáneas. Intervenciones de revisión debido a un aflojamiento de los tornillos postoperatorio. Fracturas de cuerpo vertebral dentro del marco de fracturas del tipo B y C según Magerl.

Contraindicaciones. Fracturas osteoporóticas que se pueden tratar de modo conservador o mediante vertebroplastia o cifoplastia (fracturas por compresión o por separación del tipo A1 y A2 según Magerl). Sujeción suficiente de los tornillos pediculares cuando la calidad ósea es buena.

Técnica quirúrgica. Insertar los tornillos pediculares del modo habitual. Si se utilizan tornillos pediculares perforados, la aplicación del cemento se realizará a través de la perforación central del tornillo bajo estrecho control por fluoroscopia. Si se utilizan tornillos pediculares sin perforación central, el cemento se introducirá en el cuerpo vertebral mediante cifoplastia y a continuación se insertarán los tornillos en el cemento todavía blando. Después de la solidificación del cemento se completará la instrumentalización. Reposición y doblado lordótico de las barras longitudinales correspondientes.

Tratamiento postoperatorio. Tratamiento postoperatorio funcional a partir del primer día postoperatorio. Evitar levantar objetos pesados y realizar actividades en posición agachada durante los primeros tres meses. Extracción del implante solo en caso de complicaciones que requieran una extracción, puesto que después de la intervención hay que contar con la posibilidad de una pérdida de corrección.

Resultados. Entre julio de 2008 y diciembre de 2009 se trató a diez pacientes con fracturas vertebrales osteoporóticas de la

columna torácica y lumbar con instrumentación cementada. La edad media era de 65,8 años (35-94 años).

Seis fracturas eran lesiones del tipo A (A1: 2 casos, A3: 4 casos) y cuatro fracturas eran del tipo B (B1: 1 caso, B2: 1 caso, B3: 2 casos). La indicación para la cementación se decidió en cuatro casos debido a la edad de los pacientes (> 80 años) y en dos casos por la presencia de osteoporosis (valor T < -2,5), por una mala colocación intraoperatoria de los tornillos, así como durante las intervenciones de revisión después del aflojamiento de los tornillos. En cinco pacientes la extravasación del cemento no tuvo consecuencias clínicas detectables. En un caso se produjo el aflojamiento de los tornillos pediculares cementados con una pérdida de corrección postoperatoria de 10°. No fue necesaria la extracción de ningún tornillo cementado en los primeros 24 meses.

Palabras clave

Osteoporosis. Fractura de cuerpo vertebral. Cifoplastia. Cementación. Tornillos óseos.

Información para el paciente

- Alternativas terapéuticas como terapia conservadora y procedimiento percutáneo.
- Riesgos quirúrgicos generales.
- Empeoramiento del estado neurológico hasta la paraplejía total.
- Mala posición y aflojamiento de los tornillos, en cuyo caso se hace necesaria una revisión quirúrgica.
- Extravasación de cemento fuera del cuerpo vertebral, por regla general sin repercusiones clínicas.
- Deformaciones cifóticas permanentes.
- Trastornos funcionales con dolores persistentes.
- Artrosis e inestabilidades secundarias en los segmentos adyacentes,

sobre todo en caso de uso de instrumentación a nivel de la unión toracolumbar y de la columna lumbar.

- Extracción del implante solo en caso de complicaciones.

Preparación de la intervención

- Diagnóstico por imágenes preoperatorio:
 - Radiografías en 2 planos.
 - Tomografía computarizada con reconstrucciones en 2D del segmento relevante de la columna vertebral para el estudio de la anatomía del pedículo.
 - En caso necesario, TRM para excluir fracturas ocultas en los cuerpos vertebrales adyacentes.

- Estado neurológico preoperatorio.
- Aclaración sobre la anestesia; en caso necesario, presentación del especialista en medicina interna y geriatría.

Instrumental e implantes

- Instrumental estándar para la cirugía de la columna vertebral.
- Sistema de tornillos pediculares sin perforación central o con tornillos perforados.
- Cemento óseo de PMMA, que permite una aplicación en estado de alta viscosidad (por ejemplo, KypH^X HV-RTM, Medtronic, Traumacem[®] V, Synthes).

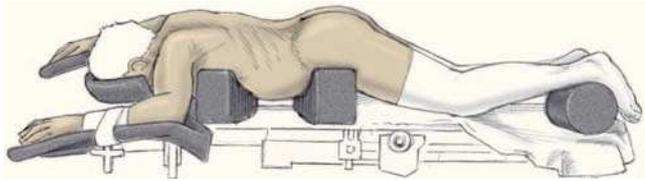


Fig. 2 ◀ Posicionamiento sobre cojines en forma de cuña.

- Instrumental adecuado para la aplicación controlada del cemento dentro del cuerpo vertebral con tornillos pediculares sin perforación central.

Anestesia y posición del paciente

- Anestesia por intubación con aplicación de la anestesia con el paciente tumbado en posición decúbito supino sobre la cama; a continuación, posicionamiento del paciente sobre la mesa de operaciones en posición de decúbito prono.
- La utilización de 4 cojines en forma de cuña (2 a la altura de las axilas y 2

a la de la cresta ilíaca) permite conseguir una reposición como mínimo parcial de la deformación cifótica a través de la lordosis resultante (◻ fig. 2). Los cojines permiten la libre respiración abdominal y reducen la presión arterial en la zona a operar, ya que facilitan el retorno venoso al corazón.

- Control de la posición y, en caso necesario, corrección con el fluoroscopio en proyección AP y lateral antes del lavado estéril y de cubrir al paciente. El fluoroscopio se puede dejar en posición lateral y se puede cubrir de modo estéril.

Técnicas quirúrgicas

(◻ Figs. 3-7)



Fig. 3 ▲ Apertura de la sustancia compacta del pedículo y preparación del mismo. Cuando la estructura ósea es osteoporótica se recomienda la utilización de un punzón de apertura pedicular (izquierda) y de una lezna pedicular (derecha). En comparación con las agujas de Kirschner, ofrecen una mayor información táctil, que permite reducir el riesgo de perforaciones en la pared pedicular. En huesos osteoporóticos se desaconseja el uso de brocas. El medidor de profundidad permite determinar la longitud del tornillo y, al mismo tiempo, palpar el canal del tornillo en relación con posibles perforaciones. Para obtener la mejor sujeción posible del tornillo en el hueso osteoporótico se deberían insertar tornillos del mayor diámetro y longitud posibles. En la región de la columna torácica resultan apropiados los tornillos con un diámetro de 5-6 mm, y en la región de la columna lumbar se pueden utilizar, por regla general, tornillos con un diámetro de 6-8 mm. El análisis del TAC preoperatorio ofrece, por norma general, un buen punto de partida para determinar las dimensiones de los tornillos.

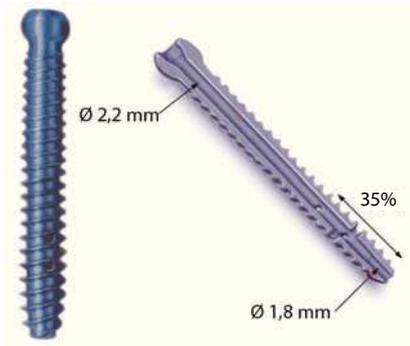


Fig. 4 ▲ Tornillo pedicular con perforación central (USS II Poly Perforated®, Synthes). Las dimensiones exteriores son las mismas que las del tornillo pedicular sin perforación central (USS II Polyaxial®, Synthes). El tornillo tiene en su parte posterior un diámetro de núcleo grande con poca profundidad de rosca para su óptima sujeción en el hueso cortical del pedículo. En la parte anterior el diámetro de núcleo se estrecha mientras que aumenta la profundidad de rosca para una sujeción óptima en el hueso esponjoso del cuerpo vertebral (DualCore-Design). La perforación central de los tornillos mide en la parte posterior 2,2 mm de diámetro y se estrecha en la parte anterior a 1,8 mm. En el tercio anterior se encuentran en total 6 orificios en disposición radial para la inyección del cemento dentro del cuerpo vertebral. En el caso en que se elijan tornillos de longitud suficientemente larga se asegurará que todos los orificios laterales se encuentran dentro de la zona del cuerpo vertebral y no de la zona del pedículo. Mediante el estrechamiento de la perforación central y el correspondiente aumento a la resistencia de flujo se garantiza que solo una pequeña parte del cemento salga por la punta del tornillo y que la mayor parte del cemento se distribuya por la parte anterior del mismo.



Fig. 5 ▲ Preparación del cemento. Se utilizará un cemento de PMMA (por ejemplo, KyphX® HV-RTM, Medtronic; Traumacem® V+, Synthes). La preparación se lleva a cabo siguiendo las instrucciones del fabricante. El cemento se debería introducir en estado de alta viscosidad. La determinación de la viscosidad del cemento se realizará clínicamente. La viscosidad correcta se alcanza cuando el cemento no gotea espontáneamente debido a la fuerza de la gravedad en el momento de ser inyectado con una jeringa, sino que forma una estructura tubular («método espagueti»²). La viscosidad se corresponde aproximadamente a la viscosidad que se pretende alcanzar en la cifoplastia.

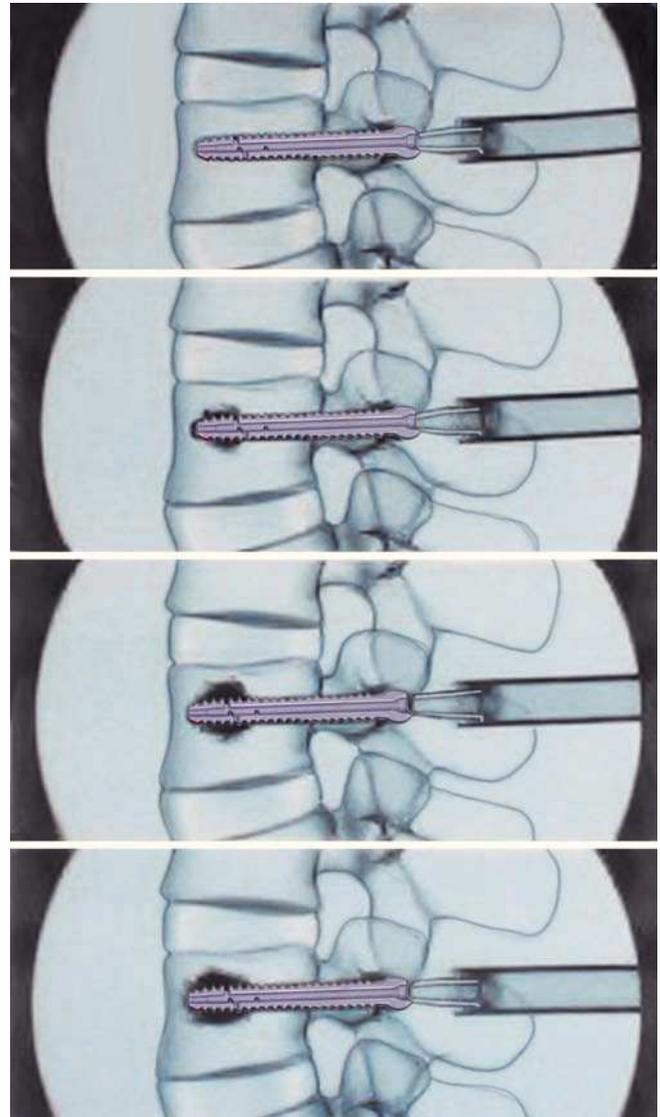


Fig. 6 ▲ Introducción del cemento. Si se utilizan tornillos pediculares sin perforación central, primero se extraerá el tornillo. A continuación, el cemento se puede inyectar en el cuerpo vertebral con ayuda de la instrumentación adecuada a la técnica de la cifoplastia a través de la canalización del tornillo. El cemento se aplicará bajo estricto control por fluoroscopia. El control por fluoroscopia en proyección lateral permite detectar a tiempo cualquier fuga hacia los vasos prevertebrales, los ligamentos adyacentes y el canal espinal. En caso necesario, se puede usar simultáneamente un segundo fluoroscopia en proyección AP. No se recomienda el cambio de posición del fluoroscopia entre proyección lateral y proyección AP porque requiere una mayor inversión de tiempo. Por regla general, suelen ser suficientes 2-3 ml de cemento. El uso de mayores cantidades de cemento aumenta el riesgo de extravasación, pero no mejora la sujeción del tornillo, por lo que no resulta eficaz². Si con el fluoroscopia se observa una fuga de cemento, se suspenderá una segunda aplicación del mismo. A continuación, el tornillo se volverá a introducir por la misma canalización. Este proceso se deberá realizar antes de la solidificación del cemento bajo cierta presión de tiempo. Como alternativa, se puede utilizar un alambre Kirschner en lugar de un tornillo para ensanchar el canal preparado con el punzón y aplicar el cemento a través del canal ensanchado. A continuación, se insertará el tornillo pedicular en el cuerpo vertebral cementado. En caso de utilizar tornillos pedicularizados con perforación central, el cemento se puede inyectar con jeringas comerciales y aplicar con adaptadores especiales para la cabeza del tornillo.

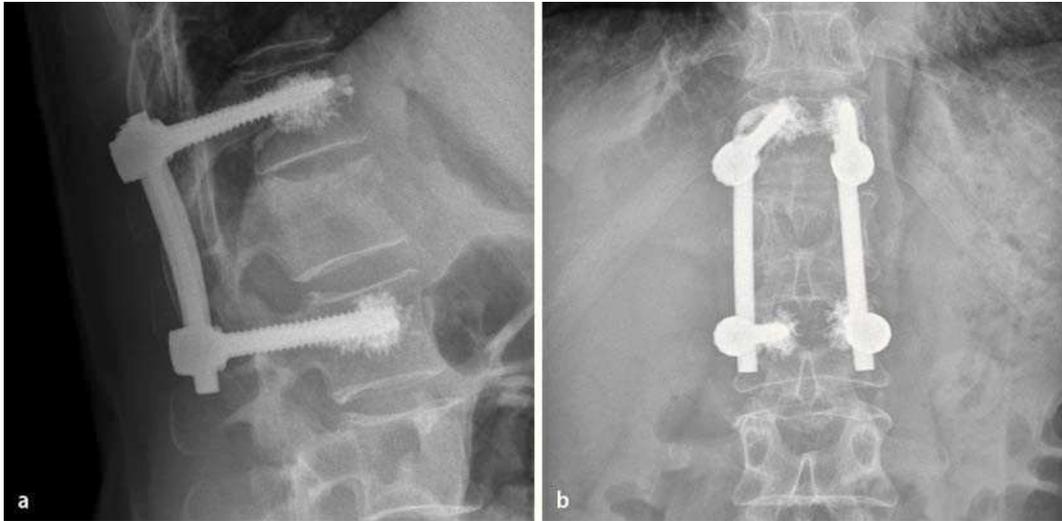


Fig. 7 ▲ Una vez solidificado el cemento, se completará el montaje del fijador interno según el tipo de implantes utilizado. La reposición de la deformación cifótica se puede controlar mediante el doblado en arco lordótico de las barras. Sin embargo, si el arco es demasiado lordótico, aumenta el esfuerzo mecánico sobre los tornillos pediculares y, consecuentemente, el riesgo de aflojamiento de los mismos, especialmente en el caso de que no exista apoyo suficiente en la zona de la columna anterior. La cementación del cuerpo vertebral fracturado, así como el acortamiento de la columna dorsal a través del fijador interno, puede mejorar el soporte ventral. a Vista lateral. b Vista AP.

Cuando hay presencia de fractura aislada de un cuerpo vertebral, por regla general es suficiente con una instrumentación bisegmentaria en la zona de la columna lumbar y de la unión toracolumbar. En la sección de la columna torácica se incluyen en la instrumentación, por regla general, 2 cuerpos vertebrales cervicales y 2 caudales del segmento lesionado. En caso necesario se puede obtener una mayor estabilidad con la utilización de un cerclaje¹ y mediante una instrumentación más larga. El acceso y los principios fundamentales de la inserción de tornillos pediculares ya han sido descritos en la *Ortopedia quirúrgica y traumatología*¹⁴. En el presente trabajo no se abordan aquellos casos en los que se requieren fases quirúrgicas adicionales como, por ejemplo, la descompresión de estructuras neuronales, el soporte de la columna ventral o la fusión dorsal.

Tratamiento postoperatorio

- Movilización del paciente a partir del primer día postoperatorio.
- Control radiológico con el paciente de pie después de la movilización.
- Extracción de los puntos de sutura después de 14 días.
- Fisioterapia con refuerzo de la musculatura de la espalda.
- Evitar levantar objetos pesados y realizar actividades en posición agachada durante 3 meses.
- Extracción del implante solo en caso de complicaciones que requieran la extracción del metal.
- Embolización de cemento en el sistema pulmonar: en pacientes asintomáticos no se requiere intervención, en caso de embolismo pulmonar sintomático, realizar anticoagulación con heparina y antagonistas de vitamina K¹⁵ (■ fig. 8b).
- Aflojamiento de tornillos a pesar de la cementación: revisión con ampliación de la instrumentación hacia los segmentos adyacentes solo en caso de molestias.

Errores, riesgos y complicaciones

- Fuga de cemento hacia las partes blandas adyacentes: no requiere intervención; por regla general, sin repercusión clínica.
- Fuga de cemento hacia los vasos paravertebrales: no requiere intervención; por regla general, sin repercusión clínica (■ fig. 8a).
- Fuga de cemento hacia el disco intervertebral adyacente: sin intervención aguda, mayor riesgo limitado de fracturas de los cuerpos vertebrales vecinos a largo plazo^{7,18}.
- Fuga de cemento hacia el canal espinal¹⁷: extubación rápida y evaluación neurológica; en caso de déficits neurológicos, revisión inmediata junto con hemilaminectomía y extracción del cemento.

Resultados

(■ Figs. 8-11)

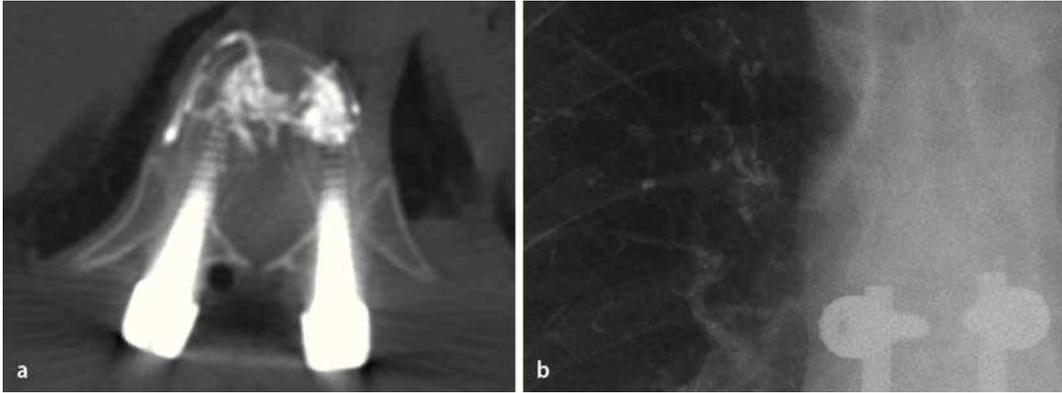


Fig. 8 ◀ **a** Fuga de cemento hacia los vasos paravertebrales. **b** Embolismo pulmonar por cemento sin repercusiones clínicas.

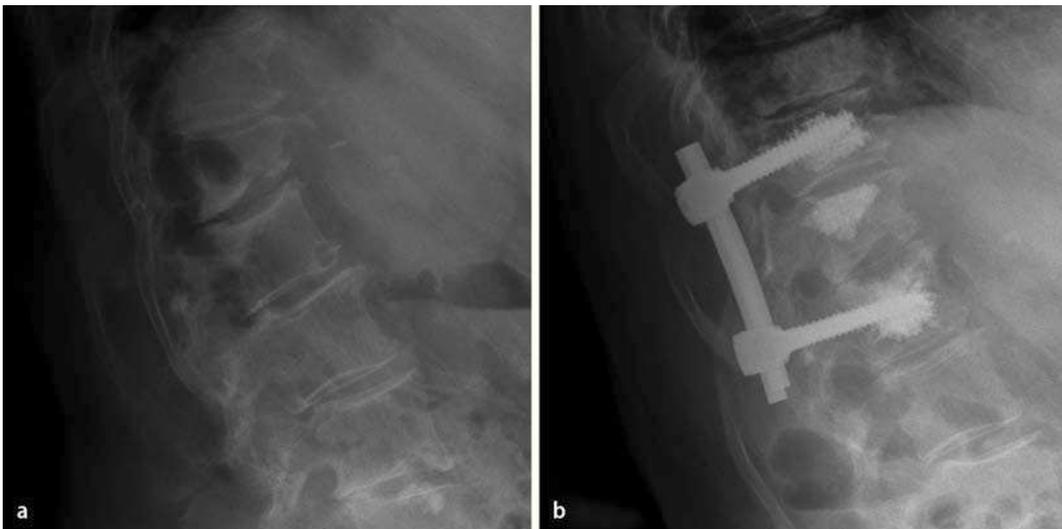


Fig. 9 ◀ **a** Paciente de 76 años con presencia de osteoporosis (valor $T = -3,2$). Fractura del cuerpo vertebral T12 con deformación cifótica de 4 meses de antigüedad después de terapia conservadora. Dolores persistentes. **b** Control durante 3 meses después de instrumentalización dorsal de T11-L1 con tornillos pediculares suplementados con cemento y cifoplastia de la vértebra T12. Sin pérdida de corrección postoperatoria. La paciente tiene movilidad y no sufre dolores.

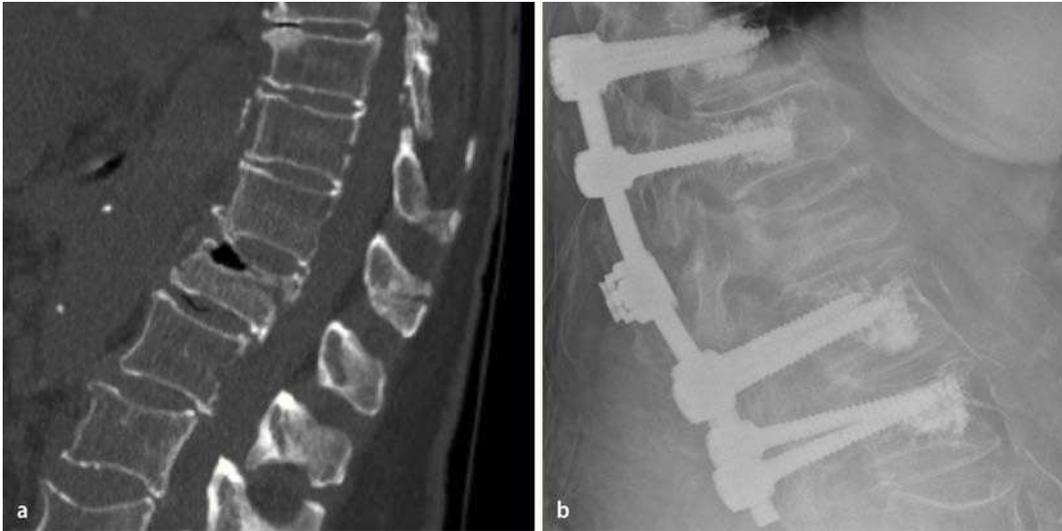


Fig. 10 ▲ **a** Paciente de 94 años con deambulación autónoma antes de una caída doméstica. La paciente se presenta en la consulta 3 semanas después de la caída con dolores en aumento en la zona de unión toracolumbar. En el fluoroscopio se observa una fractura de la vértebra T12 con fractura horizontal del proceso espinoso (tipo B2 según Magerl). Fenómeno de vacío en el segmento T11-T12 que manifiesta una inestabilidad elástica. **b** Suplementación con cemento de los tornillos pediculares debido a la edad de la paciente, instrumentación más larga de T10 a L2 y utilización de un cerclaje. Proceso posterior sin complicaciones



Fig. 11 ▲ Paciente de 83 años. Fractura por compresión incompleta del cuerpo vertebral L1. **a** Suplementación con cemento de los tornillos pediculares debido a la edad de la paciente. Control postoperatorio después de instrumentación bisegmentaria T12-L2. Alineación favorable en la zona de la unión toracolumbar. Sin cementación del cuerpo vertebral fracturado. **b** Control después de 6 semanas. Aflojamiento de los tornillos pediculares craneales con penetración en el espacio del disco intervertebral. Compresión del cuerpo vertebral fracturado. Nueva cifoplastia de 10°. **c** Control por fluoroscopio 3 meses después. No se requieren cifoplastias posteriores. Debido a la escasa sintomatología, no se requiere revisión quirúrgica. Con la suplementación con cemento del cuerpo vertebral fracturado y la consecuente mejora de la carga de compresión de la columna anterior se hubiera podido reducir el esfuerzo mecánico de la unión cemento-tornillos.

Durante los años 2008-2009 se trató a diez pacientes con fracturas vertebrales osteoporóticas de la columna torácica y lumbar con instrumentación suplementada con cemento. Siete de los pacientes eran mujeres, y tres, hombres. La edad media era de 65,8 años (35-94 años). Seis fracturas eran lesiones del tipo A (4 A3 y

2 A1) y cuatro fracturas eran del tipo B (1 B1, 1 B2, 2 B3). Ocho fracturas estaban situadas en la zona de unión toracolumbar (T11-L2), una fractura en la columna torácica y otra en la columna lumbar. La indicación para la cementación se decidió en cuatro casos debido a la edad de los pacientes (> 80 años) y

en dos casos por la presencia de osteoporosis (valor $T < -2,5$), por una mala colocación intraoperatoria de los tornillos, así como durante las intervenciones de revisión después del aflojamiento de los tornillos. En total, se reforzaron 62 tornillos con cemento. En tres casos se pudo observar una fuga de cemento

hacia los vasos paravertebrales mediante radiografía simple (■ fig. 8a). En un caso surgió un embolismo pulmonar por cemento, que no tuvo consecuencias clínicas (■ fig. 8b). El primer día postoperatorio se inició la movilización postoperatoria con carga completa sin inmovilización externa y sin dificultad alguna para los pacientes. En un caso apareció un aflojamiento de los tornillos pediculares cementados con una segunda cifoplastia postoperatoria de 10° (■ fig. 11). En este caso no se realizó revisión quirúrgica alguna debido a la poca sintomatología del paciente. Por lo demás, no apareció ningún tipo de complicación quirúrgica. No fue necesaria la extracción de ningún tornillo cementado durante los primeros 24 meses.

Correspondencia

D. Krappinger

Universitätsklinik für Unfallchirurgie und Sporttraumatologie, Medizinische Universität Innsbruck
Anichstr. 35, 6020 Innsbruck (Austria)
dietmar.krappinger@iuh.tirol.ac.at

Conflicto de intereses. El autor manifiesta que no existe ningún conflicto de intereses.

Bibliografía

- Bastian L, Knop C, Lange U et al (1999) Effect of a crosslink or cerclage on the mechanical stability of an internal fixator. *Orthopade* 28:714–722
- Becker S, Chavanne A, Spitaler R et al (2008) Assessment of different screw augmentation techniques and screw designs in osteoporotic spines. *Eur Spine J* 17:1462–1469
- Blauth M, Knop C, Bastian L (1998) Brust- und Lendenwirbelsäule. *Tscherne Unfallchirurgie – Wirbelsäule* Springer, S 241–372
- Bullmann V, Schmoelz W, Richter M et al (2010) Revision of cannulated and perforated cement-augmented pedicle screws: a biomechanical study in human cadavers. *Spine* 35:E932–939
- Burval DJ, McInain RF, Milks R et al (2007) Primary pedicle screw augmentation in osteoporotic lumbar vertebrae: biomechanical analysis of pedicle fixation strength. *Spine* 32:1077–1083
- Castro WH, Halm H, Jerosch J et al (1996) Accuracy of pedicle screw placement in lumbar vertebrae. *Spine (Phila Pa 1976)* 21:1320–1324
- Chen WJ, Kao YH, Yang SC et al (2010) Impact of cement leakage into disks on the development of adjacent vertebral compression fractures. *J Spinal Disord Tech* 23:35–39
- Cho W, Wu C, Zheng X et al (2010) Is it safe to back out pedicle screws after augmentation with polymethyl methacrylate or calcium phosphate cement? A biomechanical study. *J Spinal Disord Tech* 24(4):276–279
- Choma TJ, Frevert WF, Carson WI et al (2010) Biomechanical analysis of pedicle screws in osteoporotic bone with bioactive cement augmentation using simulated in vivo multicomponent loading. *Spine*
- Frankel BM, Jones T, Wang C (2007) Segmental polymethylmethacrylate-augmented pedicle screw fixation in patients with bone softening caused by osteoporosis and metastatic tumor involvement: a clinical evaluation. *Neurosurgery* 61:531–537, (discussion 537–538)
- George DC, Krag MH, Johnson CC et al (1991) Hole preparation techniques for transpedicle screws. Effect on pull-out strength from human cadaveric vertebrae. *Spine (Phila Pa 1976)* 16:181–184
- Hirano T, Hasegawa K, Takahashi HE et al (1997) Structural characteristics of the pedicle and its role in screw stability. *Spine (Phila Pa 1976)* 22:2504–2509, (discussion 2510)
- Kallmes DF, Comstock BA, Heagerty PJ et al (2009) A randomized trial of vertebroplasty for osteoporotic spinal fractures. *N Engl J Med* 361:569–579
- Knop C, Lange U, Reinhold M et al (2005) Vertebral body replacement with Synex in combined posteroanterior surgery for treatment of thoracolumbar injuries. *Oper Orthop Traumatol* 17:249–280
- Krueger A, Bliemel C, Zettl R et al (2009) Management of pulmonary cement embolism after percutaneous vertebroplasty and kyphoplasty: a systematic review of the literature. *Eur Spine J* 18:1257–1265
- Krüger A, Zettl R, Ziring E et al (2010) Kyphoplasty for the treatment of incomplete osteoporotic burst fractures. *Eur Spine J*:1–8
- Lee BJ, Lee SR, Yoo TY (2002) Paraplegia as a complication of percutaneous vertebroplasty with polymethylmethacrylate: a case report. *Spine (Phila Pa 1976)* 27:E419–422
- Lin EP, Ekholm S, Hiwatashi A et al (2004) Vertebroplasty: cement leakage into the disc increases the risk of new fracture of adjacent vertebral body. *AJNR Am J Neuroradiol* 25:175–180
- Moon BJ, Cho BY, Choi EY et al (2009) Polymethylmethacrylate-augmented screw fixation for stabilization of the osteoporotic spine: a three-year follow-up of 37 patients. *J Korean Neurosurg Soc* 46:305–311
- Renner SM, Lim T-H, Kim WJ et al (2004) Augmentation of pedicle screw fixation strength using an injectable calcium phosphate cement as a function of injection timing and method. *Spine* 29:E212–216
- Tan JS, Bailey CS, Dvorak MF et al (2007) Cement augmentation of vertebral screws enhances the interface strength between interbody device and vertebral body. *Spine* 32:334–341
- Wardlaw D, Cummings SR, Van Meirhaeghe J et al (2009) Efficacy and safety of balloon kyphoplasty compared with non-surgical care for vertebral compression fracture (FREE): a randomised controlled trial. *Lancet* 373:1016–1024
- Zou J, Mei X, Gan M et al (2010) Is kyphoplasty reliable for osteoporotic vertebral compression fracture with vertebral wall deficiency? *Injury* 41:360–364