



MONOGRÁFICO COLUMNA

[Artículo traducido] Consejos y trucos para el uso de cemento óseo en tornillos pediculares y en reemplazos de cuerpos vertebrales: una revisión de la literatura respaldada por dos informes de casos



V.J. Heck ^{a,b,*}, M. Rauschmann ^a, T. Prasse ^b, J.M. Vinas-Rios ^b y A. Slavici ^a

^a Center for Spinal Surgery, Sana Klinikum Offenbach, Offenbach, Alemania

^b Department of Orthopedics and Trauma Surgery, University of Cologne, Faculty of Medicine and University Hospital Cologne, Cologne, Alemania

Recibido el 25 de marzo de 2024; aceptado el 3 de julio de 2024

Disponible en Internet el 28 de septiembre de 2024

PALABRAS CLAVE

Cemento óseo;
Cirugía de columna;
Tornillos pediculares;
Cuerpo vertebral

Resumen

Antecedentes: La prevalencia de la osteoporosis está aumentando junto con el envejecimiento de la población mundial, lo que aumenta la demanda de cirugías de columna, incluidas aquellas que requieren el uso de cemento óseo para mejorar la estabilidad.

Objetivo: Este artículo profundiza la aplicación matizada de técnicas con cemento óseo en tornillos pediculares y reemplazos de cuerpos vertebrales (VBR), con el objetivo de optimizar los resultados quirúrgicos en columnas osteoporóticas.

Método: A partir de una revisión exhaustiva de la literatura según importantes estudios clínicos y biomecánicos, así como las experiencias clínicas de los autores, dilucidamos estrategias para mitigar las complicaciones y mejorar la eficacia quirúrgica.

Resultados: El uso de cemento óseo ha mostrado ser prometedor en el tratamiento de las fracturas vertebrales y en la fijación de tornillos pediculares dentro de las vértebras osteoporóticas. La llegada del cemento óseo de polimetilmetacrilato (PMMA) marca un avance fundamental en la cirugía de la columna. Se destacan medidas intraoperatorias como la elección entre preinyectar el cemento óseo y utilizar tornillos canulados o fenestrados, enfatizando la importancia de controlar la viscosidad del cemento para prevenir fugas y embolias. A través de dos informes de casos, demostramos la aplicación práctica de la cementación de la base del cuerpo vertebral después de VBR.

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: vincent.heck@uk-koeln.de (V.J. Heck).

Conclusión: Si bien, el uso de cemento óseo plantea ciertos riesgos, su aplicación juiciosa es respaldada por directrices basadas en evidencia y experiencia quirúrgica, pudiendo mejorar sustancialmente la estabilidad de las estructuras espinales en pacientes osteoporóticos. Esto permite una reducción en la longitud de la instrumentación al mejorar la estabilidad biomecánica con respecto a las fuerzas de tracción, flexión y rotación. Además, se puede potenciar significativamente su uso en conjunto con fusiones espinales después de cementar la base del cuerpo vertebral (VBF). Las investigaciones futuras, en particular sobre el PMMA impregnado de antibióticos, pueden ampliar aún más su utilidad y optimizar su perfil de seguridad.

© 2024 Publicado por Elsevier España, S.L.U. en nombre de SECOT. Este es un artículo Open Access bajo la CC BY-NC-ND licencia (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

KEYWORDS

Augmentation;
Spine surgery;
Pedicle screw;
Vertebral body

Tips and tricks for using cement augmentation of pedicle screws and vertebral body replacements—A literature review supported by two case reports

Abstract

Background: The prevalence of osteoporosis is escalating alongside an aging global population, increasing the demand for spinal surgeries, including those necessitating cement augmentation for enhanced construct stability.

Objective: This article delves into the nuanced application of cement augmentation techniques for pedicle screws and vertebral body replacements (VBR), aimed at optimizing surgical outcomes in osteoporotic spines.

Method: Drawing from a comprehensive literature review according to important clinical and biomechanical studies and the authors' clinical experiences, we elucidate strategies to mitigate complications and improve surgical efficacy.

Results: Cement augmentation has shown promise in managing vertebral fractures and in securing pedicle screws within osteoporotic vertebrae, with the advent of polymethylmethacrylate (PMMA) bone cement marking a pivotal advancement in spinal surgery. We highlight intraoperative measures like the choice between pre-injecting cement and utilizing cannulated or fenestrated screws, emphasizing the importance of controlling cement viscosity to prevent leakage and embolism. Through two case reports, we demonstrate the practical application of endplate cementation following VBR.

Conclusion: While the use of cement augmentation poses certain risks, its judicious application—supported by evidence-based guidelines and surgical expertise—can substantially enhance the stability of spinal constructs in osteoporotic patients. This allows a reduction in instrumentation length by enhancing biomechanical stability concerning pullout, bending, and rotational forces. Furthermore, the incidence of endplate sintering following VBF can be significantly reduced. Future research, particularly on antibiotic-loaded PMMA, may further expand its utility and optimize its safety profile.

© 2024 Published by Elsevier España, S.L.U. on behalf of SECOT. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Introducción

La osteoporosis es la enfermedad ósea más prevalente a nivel mundial, y constituye una preocupación creciente en la cirugía de columna, contribuyendo a la complejidad de las intervenciones quirúrgicas y afectando a los resultados del paciente^{1,2}. A medida que vaya envejeciendo la población global, se prevé un aumento aún mayor de la incidencia de osteoporosis y, por tanto, su impacto en la salud espinal y los sistemas sanitarios se está convirtiendo en una cuestión cada vez más pertinente^{1,3}. Esta enfermedad esquelética sistemática se caracteriza por la reducción de la densidad y la degradación de la microarquitectura óseas, lo cual incrementa considerablemente el riesgo de fractura⁴. Además, la reducción de la calidad del hueso complica el tratamiento de los procedimientos de fijación y fusión de la columna, y en

particular en el contexto de la fuerza de fijación mediante tornillos pediculares y del éxito del reemplazo de cuerpos vertebrales (VBR)⁵. La debilidad inherente del hueso osteoporótico compromete la eficacia de las técnicas de fijación convencionales, que necesitan enfoques innovadores para mejorar la estabilidad y garantizar la recuperación exitosa del paciente⁶.

Las técnicas de cementación han mostrado resultados prometedores en el tratamiento de las columnas osteoporóticas, facilitando el manejo de las fracturas vertebrales mediante vertebroplastia o cifoplastia, y mejorando la estabilidad, principalmente en la implantación de tornillos pediculares dentro de las vértebras osteoporóticas^{7,8}. Por tanto, dichos procedimientos han ido ganado popularidad a lo largo de las últimas tres décadas, generando un número creciente de procedimientos de cementación en la ciru-

gía de columna⁹. Sin embargo, la utilización de cemento óseo sigue siendo una cuestión de debate creciente entre los cirujanos de columna, debido a las complicaciones graves asociadas. El incremento de la rigidez incrementa el riesgo de fracturas del segmento adyacente, dificultándose aún más el tratamiento de las infecciones potenciales de la herida profunda. El riesgo más común implica las fugas de cemento, con incidencias reportadas de hasta el 90% en cuanto al uso de tornillos pediculares, que son mayormente asintomáticas^{10,11}. Sin embargo, en casos raros, dichas fugas pueden causar embolia de la arteria pulmonar fatal o, de producirse la fuga en el canal espinal, lesión de las estructuras neuronales, que derivan potencialmente en parálisis^{12,13}. Por tanto, el uso de técnicas de cementación debe enfocarse con cautela, para mejorar en última instancia el cuidado del paciente en el contexto del arduo incremento de los pacientes que requieren cirugía espinal, a causa de la osteoporosis que padecen.

El objetivo de este estudio es compartir una compilación amplia de consejos y trucos para el uso de cemento óseo en tornillos pediculares y VBR, recabados de nuestra experiencia clínica y de estudios biomecánicos y clínicos, subrayando las estrategias matizadas que pueden reducir la tasa de complicaciones, y optimizar así el resultado quirúrgico tras los procedimientos que utilizan cemento óseo en pacientes con columna osteoporótica.

Métodos

Realizamos una revisión amplia de la literatura relevante para agregar y analizar los estudios biomecánicos y clínicos existentes sobre la aplicación de fijación vertebral con cemento para pacientes osteoporóticos. El objetivo de nuestra búsqueda fue englobar los artículos de investigación publicados en inglés, alemán o español en revistas revisadas por pares sin ninguna restricción temporal. Además, revisamos las guías y revisiones sistemáticas relacionadas con el uso de cemento para extraer recomendaciones adicionales. Dichos hallazgos se presentan para (1) uso de cemento en tornillos pediculares y (2) uso de cemento en VBR, incrementándose con las experiencias clínicas propias de los autores.

Para llenar el hueco de una manera efectiva entre el conocimiento teórico y la aplicación práctica, seleccionamos dos informes de casos de nuestra base de datos institucional, que ilustran el uso de cemento en procedimientos de VBR. Dichos casos fueron elegidos específicamente debido a su capacidad de ilustrar la aplicación, beneficios, dificultades y resultados de dichas técnicas en diferentes escenarios de pacientes.

Uso de cemento en tornillos pediculares

Selección de pacientes

Los pacientes osteoporóticos tienen riesgo incrementado de aflojamiento de los tornillos y de tracción axial, siendo este riesgo aún mayor en las zonas de transición⁶. Para mejorar la estabilidad, los cirujanos pueden elegir entre la fijación del segmento largo, el uso de diámetros más grandes de los tornillos, o la utilización de cemento en los tornillos pediculares. Sin embargo, dada la multimorbilidad

de los pacientes mayores, el menor tamaño de los diámetros, especialmente en fracturas de la columna torácica o toracolumbar, así como la necesidad de corrección de la deformidad, puede combinarse de manera efectiva el uso de cemento con técnicas mínimamente invasivas tales como la fijación percutánea del segmento corto (para minimizar la hemorragia y el daño del tejido blando), la estabilización dinámica mediante vástagos PEEK y la descompresión sin fusión anterior, así como el uso de tornillos pediculares de pequeño diámetro^{14,15}. Para justificar los episodios adversos graves potenciales, deberá tomarse la decisión de utilizar cemento óseo sobre la base de criterios indicativos claros (**tabla 1**). Por tanto, el uso de cemento está normalmente recomendado en casos de osteoporosis grave con una puntuación *T* inferior a -3 con arreglo a la medida con Dual-Energy X-ray Absorptiometry (DEXA)^{16,17}. Aunque la medida con DEXA se considera comúnmente la técnica de referencia para el diagnóstico de la osteoporosis, deberá considerarse también el uso de cemento en casos en que la densidad ósea sea inferior a 120 HU en la prueba de TC^{4,18-21}. Según nuestra experiencia, la cementación de huesos con densidad inferior a 80 HU ofrece una ventaja clínicamente relevante, pudiendo realizarse de manera estándar. Por tal motivo, la TC de la fractura y sus niveles adyacentes está justificada en muchos casos, incluso en pacientes más jóvenes, y en especial en mujeres posmenopáusicas. Esto es particularmente pertinente, ya que raramente se dispone de medidas preoperatorias obtenidas por DEXA. Además, nuestra experiencia ha reflejado que es también efectivo utilizar cemento en caso de encontrar un torque de inserción bajo durante la colocación del tornillo. Por dicho motivo, deberá tomarse la decisión a nivel preoperatorio sobre el tipo de tornillo adecuado, y en especial cuando existe sospecha de reducción de la calidad ósea. De precisarse revisión de los tornillos pediculares cementados, también podrán implantarse tornillos de revisión utilizando cemento, ya que esto mejora la fuerza de tracción axial del tornillo de revisión, en comparación con los tornillos sin cemento. Aunque algunos estudios han reportado resultados favorables tras el uso de cementación en casos de enfermedades espinales infecciosas, debido a la falta actual de evidencia científica, nosotros consideramos generalmente contraindicada la aplicación de cemento en el contexto de infecciones espinales. Sin embargo, el PMMA (antibiotic-loaded polymethylmethacrylate) presenta un área interesante para los proyectos de investigación futuros²².

Medidas intraoperatorias

El uso de cemento en los tornillos pediculares puede realizarse mediante dos métodos distintos: en primer lugar, preinyectando cemento óseo antes de la colocación del tornillo y, en segundo, utilizando tornillos canulados o fenestrados. Las pruebas biomecánicas han demostrado la superioridad de los tornillos canulados, lo cual les sitúa como técnica estándar²³⁻²⁵. Los autores defienden el uso de tornillos canulados –o fenestrados– en casos en que se anticipa el compromiso de la calidad ósea o cuando se planifica la reducción de una deformidad. Este enfoque permite tomar una decisión posterior a la inserción sobre si es necesario el uso de cemento. En caso de no requerirse el uso de

Tabla 1 Uso de cemento en tornillos pediculares

	«Trucos y consejos»
Selección de pacientes	<p>¿Cuándo debe considerarse el uso de cemento?</p> <ul style="list-style-type: none"> - Previsión de fijación de segmento corto o fusión - Uso de tornillos pediculares de pequeño diámetro - Previsión de reducción de fracturas o corrección de deformación - Revisión de tornillos pediculares cementados <p>Probabilidad de calidad de hueso osteoporótico</p> <ul style="list-style-type: none"> - Medida con DEXA: puntuación <i>T</i> inferior a -3 - Medida con TC: valor HU inferior a 120-80 - Experiencia del cirujano: torque de inserción bajo
Medidas intraoperatorias	<p>Inyección de cemento óseo de alta viscosidad: «tómese su tiempo»</p> <p>Lavado mediante chorro pulsado previo a la cementación</p> <p>Volumen por tornillo: columna lumbar 1 a 2 ml, columna torácica de 1 a 1,5 ml</p> <p>Fluoroscopia pulsada durante la inyección</p> <p>Volúmenes de cemento simétricos</p> <p>PEEP > 15 cmH₂O durante la inyección</p> <p>(Uso de cemento limitado en constructos del segmento largo, limitado a las dos vértebras finales)</p>

Generalidades. DEXA: absorciometría de rayos X de energía dual; HU: unidad Hounsfield; PEEP: presión positiva al final de la inspiración; TC: tomografía computarizada.

cemento –por ejemplo, cuando el torque de inserción y la retención del tornillo en el pedículo son satisfactorios– los tornillos canulados no presentan desventaja alguna con respecto a los tornillos no canulados estándar²⁶. Esta estrategia ayuda a evitar revisiones intraoperatorias innecesarias de los tornillos, que pudieran comprometer la estabilidad primaria. Además, al realizar una maniobra de recolocación en la vertebra instrumentada, las pruebas biomecánicas han reflejado que el uso de cemento en tornillos pediculares tras la misma logra una mayor estabilidad en comparación con el uso de cemento previo a la inserción²⁷.

El episodio adverso más común durante el uso de tornillos pediculares es la fuga del cemento. En numerosos estudios se ha identificado la viscosidad del cemento como un factor esencial que influye en el riesgo de fuga del mismo^{12,28-31}. Inyectar cemento de baja viscosidad incrementa considerablemente el riesgo de fuga incontrolada del cemento, incrementando en última instancia el riesgo de embolia pulmonar¹². Por tanto, deberá utilizarse el cemento tras el incremento de viscosidad. En la práctica clínica la viscosidad deseada se logra, como pronto, cuando el cemento, tras ser extruido a través de una jeringa, no gotea espontáneamente a causa de la gravedad, sino que mantiene en cambio una formación tubular³². Para concluir, deberá inyectarse el cemento en el último momento posible³³. Sin embargo, la inyección de cemento de alta viscosidad necesita mayores fuerzas de inyección, lo cual presenta un reto para los sistemas de inyección manual e incrementa el riesgo de embolia (por grasa)^{12,29}. La investigación *in vitro* e *in vivo* reciente indica que el lavado mediante chorro pulsado puede mitigar dichos riesgos, reduciendo la fuerza de inyección necesaria. Para realizar esto, se administra una solución de sodio a través de un pedículo, y se retira seguidamente con poco vacío desde el lado contralateral (*fig. 1*)³³⁻³⁵. Esta técnica puede realizarse durante la fase de polimerización del cemento



Figura 1 Ilustración ejemplar de lavado mediante chorro pulsado en una fijación dorsal percutánea bisegmentaria con uso de cemento: se descarga cloruro sódico al 0,9% a través del cuerpo vertebral utilizando una jeringa de 20 ml, con salida por el lado contralateral. Esto origina un lavado de la médula ósea intertrabecular vertebral, reduciendo la presión de inyección requerida. Además, se confirma la posición del tornillo previamente al uso de cemento.

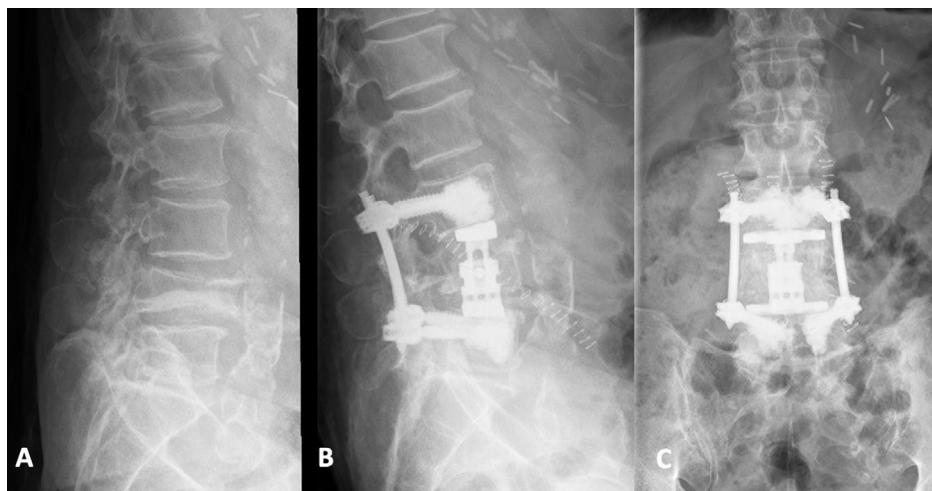


Figura 2 Reemplazo del cuerpo vertebral de L4. A) Fractura patológica en L4 debido a carcinoma bronquial metastásico. B) Rayos X laterales tras la fijación del segmento corto con tornillos pediculares cementados y VBR con cementación de la placa terminal. C) Plano anteroposterior.

PMMA –es decir, en el intervalo entre la colocación del tornillo y el inicio de la alta viscosidad del cemento– no extendiéndose significativamente el tiempo quirúrgico. Además, este procedimiento ayuda a garantizar la colocación precisa de los tornillos pediculares antes del comienzo de la cementación. En el momento de inyectarse el cemento, el cirujano deberá notificar al anestesiólogo que incremente la presión positiva al final de la exhalación (PEEP) a 15 cmH₂O, ya que ello puede reducir la incidencia de embolia venosa y pulmonar local³⁶.

Para reducir aún más el riesgo de embolia por cemento o grasa, el volumen máximo de cemento óseo no deberá exceder de 1 a 2 ml para una vértebra lumbar y de 1 a 1,5 ml para una vértebra torácica por tornillo pedicular. Los volúmenes más altos de cemento inyectado no guardan correlación con el incremento de la estabilidad, sino con un mayor riesgo de embolia pulmonar^{11,37-39}. Además, las pruebas biomecánicas sugieren que la aplicación simétrica de cemento contribuye a la mejora de la estabilidad⁴⁰. Para lograr esto, deberá cementarse ambos tornillos pediculares bien simultáneamente, o bien alternativamente. El uso de cemento en tornillos pediculares debe realizarse consistentemente bajo fluoroscopia pulsada lateral, para supervisar el proceso de inyección. Esto permite la identificación temprana de fugas potenciales de cemento hacia el sistema venoso, el canal espinal, o el espacio del disco. En los casos que requieran fijación del segmento largo, vistos a menudo en la cirugía de revisión o tumoral, el uso de cemento limitado a las dos vértebras de los extremos puede ayudar a reducir el tiempo quirúrgico y el riesgo de complicaciones^{10,41}.

Uso de cemento en reemplazos de cuerpos vertebrales

Mientras que el uso de cemento en tornillos pediculares dorsalemente implantados está ampliamente generalizado y se ha convertido en una parte estándar del repertorio del cirujano de columna, el uso de cemento en VBR desempeña actualmente un papel menor en la práctica clí-

nica de muchos cirujanos. En 2010, Geiger et al. describieron por vez primera la viabilidad del uso de cemento para VBR en un estudio clínico que incluyó a 20 pacientes, con seguimiento clínico y radiológico a lo largo de dos años⁴². El objetivo del grupo de estudio fue prevenir o reducir la probabilidad de colapso en los casos de VBR con calidad ósea reducida. Para realizar esta técnica, se sitúa al paciente en decúbito lateral tras la fijación dorsal. Para acceder a las fracturas del cuerpo vertebral por encima de la segunda vértebra lumbar, a menudo se realiza un abordaje transpleural combinado con separación diafragmática. Para las fracturas del cuerpo vertebral que comprometen la segunda vértebra lumbar o más abajo, se realiza un abordaje extraperitoneal miniabierto, y un VBR estándar. Al preparar el VBR deberá prestarse cuidado a la preservación del hueso subcondral de las placas terminales adyacentes. Tras la implantación exitosa de la jaula, puede colocarse una aguja de vertebraloplastia de calibre 10 medio centímetro por encima de la placa terminal de la vértebra inferior, y medio centímetro bajo la placa terminal de la vértebra superior, a través del abordaje ya abierto, bajo visión directa del cirujano. Seguidamente se utiliza cemento mediante fluoroscopia lateral pulsada. Más allá de esta descripción inicial, solo se han publicado una serie de estudios. Sin embargo, las investigaciones biomecánicas sugieren que el uso de cemento incrementa considerablemente la estabilidad^{43,44}. Con arreglo a Ullrich et al. el uso de placas terminales de PMMA deberá realizarse cuando el valor HU óseo sea inferior a 180⁴⁵.

A modo de ejemplo, elegimos la técnica descrita para un paciente de 81 años que acudió a nuestra clínica con fractura patológica en L4 debido a carcinoma bronquial metastásico (fig. 2). Tras la radioterapia se produjo una compresión e inestabilidad progresivas del cuerpo vertebral como resultado de la necrosis vertebral inducida por la radiación. Debido a la estenosis sintomática del canal espinal concomitante con ciática lumbar derecha a causa de estenosis del receso lateral neuroforaminal y lateral, se realizó espondilodesis percutánea dorsal de L3 a L5 con tornillos pediculares cementados, junto con hemilaminectomía

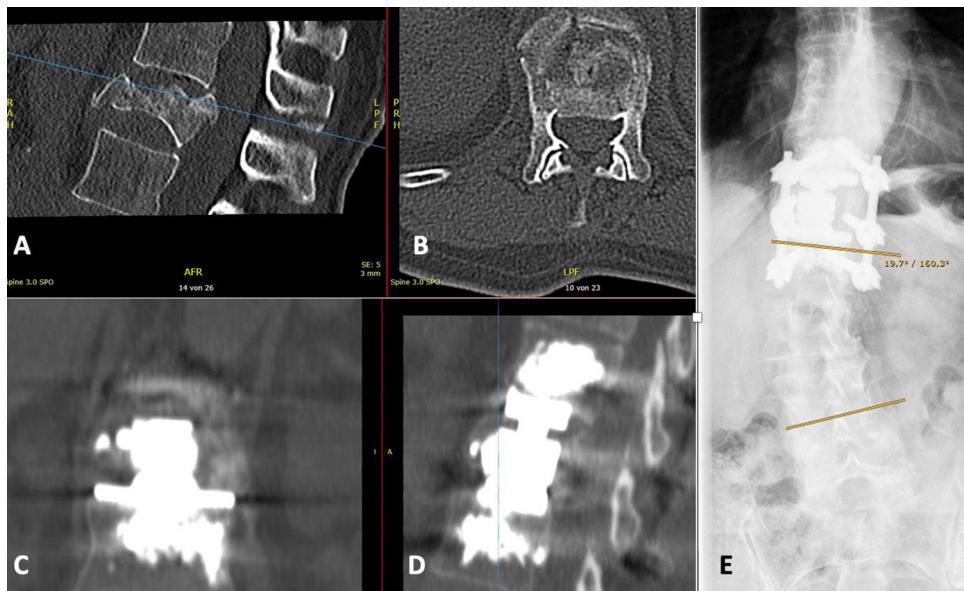


Figura 3 Fractura traumática en T12. A/B) TC preoperatoria. C/D) TC postoperatoria tras fijación del segmento corto con tornillos pediculares cementados y VBR con cementación de la placa terminal. E) Rayos X en bipedestación (plano coronal) durante el último seguimiento. La escoliosis lumbar permaneció constante. La paciente fue plenamente funcional, sin limitaciones de la vida diaria transcurridos cinco años postoperatorios.

dorsal de la cuarta vértebra lumbar con facetectomía y descompresión de las raíces nerviosas de L4 y L5 derechas. Posteriormente, tras recolocar al paciente, se realizó VBR (Obelisk, Ulrich Medical) con cementación de las placas terminales bajo visión directa, según lo descrito previamente⁴². Transcurridos diez días postoperatorios, el paciente recibió el alta para tratamiento ambulatorio. Las revisiones de seguimiento reflejaron un resultado satisfactorio.

Otro caso implicó a una paciente de 71 años que acudió tras caerse de un caballo, sosteniendo una fractura traumática de T12 (fig. 3). Las radiografías revelaron escoliosis lumbar degenerativa (ángulo de Cobb de 19°). A pesar de tener una puntuación T de -1,9, optamos por fijar el segmento corto con cemento para esta paciente móvil y activa, y debido a los traumatismos axiales recurrentes a causa de la equitación, decidimos realizar la cementación adicional de las placas terminales. El procedimiento se realizó en dos etapas, sin complicaciones. Transcurrido un año postoperatorio, la paciente reportó ser capaz de montar a caballo sin restricciones y, a pesar de la fusión del segmento corto en la unión toracolumbar, el seguimiento más reciente transcurridos cinco años reflejó un resultado clínico y radiológico satisfactorio, sin problema alguno.

Conclusión

En medio del cambio demográfico hacia el envejecimiento de la población global, no solo existe la exigencia del incremento previsto de los procedimientos espinales en general, sino que también existe un aumento anticipado del número de intervenciones de columna que requieren el uso de cemento dada la incidencia creciente de las fracturas espinales osteoporóticas. Aunque el uso de cemento puede parecer inicialmente desalentador a los cirujanos jóvenes, debido a las complicaciones potencialmente gra-

ves, la prolongación del tiempo quirúrgico, y las técnicas más exigentes, con frecuencia la decisión sobre su uso resulta beneficiosa a largo plazo. Con una selección de los pacientes cuidadosa, y la adherencia a las experiencias acumuladas durante las últimas décadas, el uso de cemento en los tornillos pediculares es por lo general un procedimiento normalmente factible y seguro, que reduce considerablemente la necesidad de cirugías de revisión por fracaso del implante. Además, el uso de cemento en las placas terminales proporciona un método efectivo para VBR, impidiendo el colapso del constructo rígido, incluso en los abordajes dorsoventrales del segmento corto. La investigación futura, como en el caso de los PMMA con carga antibiótica, puede ampliar aún más su utilidad y perfil de seguridad, especialmente para los pacientes de alto riesgo tales como aquellos que necesitan fijación espinal debido a cirugías tumorales o de revisión.

Nivel de evidencia

Nivel de evidencia III.

Responsabilidades éticas

Todos los procedimientos realizados en los estudios con participantes humanos se ajustaron a los estándares éticos del comité de investigación institucional y/o nacional y a la declaración de Helsinki de 1964 y sus últimas modificaciones, o estándares éticos comparables.

Financiación

La presente investigación no ha recibido financiación alguna.

Consentimiento informado

Se obtuvo consentimiento informado de todos los participantes individuales incluidos en el estudio.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Bibliografía

1. Hernlund E, Svedbom A, Ivergard M, Compston J, Cooper C, Stenmark J, et al. Osteoporosis in the European Union: medical management, epidemiology and economic burden. A report prepared in collaboration with the International Osteoporosis Foundation (IOF) and the European Federation of Pharmaceutical Industry Associations (EFPIA). *Arch Osteoporos.* 2013;8:136, <http://dx.doi.org/10.1007/s11657-013-0136-1>.
2. Oguri M, Nishida K, Park H, Rossi A. Systematic literature review and meta-analysis on the clinical outcomes of spine surgeries in patients with concurrent osteoporosis. *Spine Surg Relat Res.* 2023;7:200–10, <http://dx.doi.org/10.22603/ssrr.2022-0198>.
3. Williams SA, Daigle SG, Weiss R, Wang Y, Arora T, Curtis JR. Economic burden of osteoporosis-related fractures in the US medicare population. *Ann Pharmacother.* 2021;55:821–9, <http://dx.doi.org/10.1177/1060028020970518>.
4. Kanis JA, Melton LJ3rd, Christiansen C, Johnston CC, Khaltaev N. The diagnosis of osteoporosis. *J Bone Miner Res.* 1994;9:1137–41, <http://dx.doi.org/10.1002/jbmr.5650090802>.
5. Akinturk N, Zileli M, Yaman O. Complications of adult spinal deformity surgery: a literature review. *J Craniovertebr Junct Spine.* 2022;13:17–26, http://dx.doi.org/10.4103/jcvjs.jcvjs_159_21.
6. Rometsch E, Spruit M, Zigler JE, Menon VK, Ouellet JA, Mazel C, et al. Screw-related complications after instrumentation of the osteoporotic spine: a systematic literature review with meta-analysis. *Global Spine J.* 2020;10:69–88, <http://dx.doi.org/10.1177/2192568218818164>.
7. Song Z, Zhou Q, Jin X, Zhang J. Cement-augmented pedicle screw for thoracolumbar degenerative diseases with osteoporosis: a systematic review and meta-analysis. *J Orthop Surg Res.* 2023;18:631, <http://dx.doi.org/10.1186/s13018-023-04077-w>.
8. Tai CL, Tsai TT, Lai PL, Chen YL, Liu MY, Chen LH. A biomechanical comparison of expansive pedicle screws for severe osteoporosis: the effects of screw design and cement augmentation. *PLOS ONE.* 2015;10:e0146294, <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0146294>.
9. Lad SP, Patil CG, Lad EM, Hayden MG, Boakye M. National trends in vertebral augmentation procedures for the treatment of vertebral compression fractures. *Surg Neurol.* 2009;71:580–4, <http://dx.doi.org/10.1016/j.surneu.2008.02.043>, discussion 584–5.
10. Guo HZ, Tang YC, Guo DQ, Zhang SC, Li YX, Mo GY, et al. The cement leakage in cement-augmented pedicle screw instrumentation in degenerative lumbosacral diseases: a retrospective analysis of 202 cases and 950 augmented pedicle screws. *Eur Spine J.* 2019;28:1661–9, <http://dx.doi.org/10.1007/s00586-019-05985-4>.
11. Mueller JU, Baldauf J, Marx S, Kirsch M, Schroeder HW, Pillich DT. Cement leakage in pedicle screw augmentation: a prospective analysis of 98 patients and 474 augmented pedicle screws. *J Neurosurg Spine.* 2016;25:103–9, <http://dx.doi.org/10.3171/2015.10.SPINE15511>.
12. Morimoto T, Kobayashi T, Hirata H, Tsukamoto M, Yoshihara T, Toda Y, et al. Cardiopulmonary cement embolism following cement-augmented pedicle screw fixation: a narrative review. *Medicina (Kaunas).* 2023;59, <http://dx.doi.org/10.3390/medicina59020407>.
13. Yu W, Liang D, Yao Z, Zhang H, Zhong Y, Tang Y, et al. The potential impact of basivertebral foramen morphology and pedicle screw placement on epidural cement leakage with cement-augmented fenestrated pedicle screw fixation: a multicenter retrospective study of 282 patients and 1404 augmented screws. *Neurosurgery.* 2023;93:66–74, <http://dx.doi.org/10.1227/neu.0000000000002373>.
14. Li C, Liu L, Shi JY, Yan KZ, Shen WZ, Yang ZR. Clinical and biomechanical researches of polyetheretherketone (PEEK) rods for semi-rigid lumbar fusion: a systematic review. *Neurosurg Rev.* 2018;41:375–89, <http://dx.doi.org/10.1007/s10143-016-0763-2>.
15. Barzilai O, McLaughlin L, Lis E, Reiner AS, Bilsky MH, Laufer I. Utility of cement augmentation via percutaneous fenestrated pedicle screws for stabilization of cancer-related spinal instability. *Oper Neurosurg (Hagerstown).* 2019;16:593–9, <http://dx.doi.org/10.1093/ons/opy186>.
16. Schnake KJ, Scheyerer MJ, Spiegel UJA, Perl M, Ullrich BW, Grüninger S, et al. Minimally invasive stabilization of thoracolumbar osteoporotic fractures. *Unfallchirurg.* 2020;123:764–73, <http://dx.doi.org/10.1007/s00113-020-00835-1>.
17. Lee HM, Park SY, Lee SH, Suh SW, Hong JY. Comparative analysis of clinical outcomes in patients with osteoporotic vertebral compression fractures (OVCFs): conservative treatment versus balloon kyphoplasty. *Spine J.* 2012;12:998–1005, <http://dx.doi.org/10.1016/j.spinee.2012.08.024>.
18. Organization WH. Assessment of fracture risk and its application to screening for postmenopausal osteoporosis: report of a WHO study group [meeting held in Rome from 22 to 25 June 1992]. World Health Organization; 1994.
19. Schreiber JJ, Anderson PA, Rosas HG, Buchholz AL, Au AG. Hounsfield units for assessing bone mineral density and strength: a tool for osteoporosis management. *J Bone Joint Surg Am.* 2011;93:1057–63, <http://dx.doi.org/10.2106/JBJS.J.00160>.
20. Roux C, Briot K. Current role for bone absorptiometry. *Joint Bone Spine.* 2017;84:35–7, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jbspin.2016.02.032>.
21. Scheyerer MJ, Ullrich B, Osterhoff G, Spiegel UA, Schnake KJ. Arbeitsgruppe osteoporotische frakturen der sektion wirbelsäule der deutschen gesellschaft für orthopädie und u [Hounsfield units as a measure of bone density-applications in spine surgery]. *Unfallchirurg.* 2019;122:654–61, <http://dx.doi.org/10.1007/s00113-019-0658-0>. Hounsfield units“ als Mass für die Knochendichte – Anwendungsmöglichkeiten in der Wirbelsaulenchirurgie.
22. Deml MC, Cattaneo EN, Bigdon SF, Sebald HJ, Hoppe S, Heini P, et al. PMMA-cement-PLIF is safe and effective as a single-stage posterior procedure in treating pyogenic erosive lumbar spondylodiscitis – a single-center retrospective study of 73 cases. *Bioengineering (Basel).* 2022;9, <http://dx.doi.org/10.3390/bioengineering9020073>.
23. Chen LH, Tai CL, Lee DM, Lai PL, Lee YC, Niu CC, et al. Pullout strength of pedicle screws with cement augmentation in severe osteoporosis: a comparative study between cannulated screws with cement injection and solid screws with cement pre-filling. *BMC Musculoskelet Disord.* 2011;12:33, <http://dx.doi.org/10.1186/1471-2474-12-33>.
24. Schömig F, Müllner M, Pumberger M. Komplikationsmanagement im rahmen von zementaugmentation an der wirbelsäule. *Die Wirbelsäule.* 2023;7:221–6.
25. Charles YP, Pelletier H, Hydier P, Schuller S, Garnon J, Sauleau EA, et al. Pullout characteristics of percutaneous pedicle screws with different cement augmentation methods in elderly spines: an in vitro biomechanical

- study. *Orthop Traumatol Surg Res*. May 2015;101:369–74, <http://dx.doi.org/10.1016/j.otsr.201501.005>.
26. Christodoulou E, Chinthakunta S, Reddy D, Khalil S, Apostolou T, Drees P, et al. Axial pullout strength comparison of different screw designs: fenestrated screw, dual outer diameter screw and standard pedicle screw. *Scoliosis*. 2015;10:15, <http://dx.doi.org/10.1186/s13013-015-0039-6>.
 27. Schmoelz W, Heinrichs CH, Schmidt S, Piñera AR, Tome-Bermejo F, Duart JM, et al. Timing of PMMA cement application for pedicle screw augmentation affects screw anchorage. *Eur Spine J*. 2017;26:2883–90, <http://dx.doi.org/10.1007/s00586-017-5053-3>.
 28. Bohner M, Gasser B, Baroud G, Heini P. Theoretical and experimental model to describe the injection of a polymethylmethacrylate cement into a porous structure. *Biomaterials*. 2003;24:2721–30, [http://dx.doi.org/10.1016/s0142-9612\(03\)00086-3](http://dx.doi.org/10.1016/s0142-9612(03)00086-3).
 29. Baroud G, Bohner M, Heini P, Steffen T. Injection biomechanics of bone cements used in vertebroplasty. *Biomed Mater Eng*. 2004;14:487–504.
 30. Wang Q, Sun C, Zhang L, Wang L, Ji Q, Min N, et al. High-versus low-viscosity cement vertebroplasty and kyphoplasty for osteoporotic vertebral compression fracture: a meta-analysis. *Eur Spine J*. 2022;31:1122–30, <http://dx.doi.org/10.1007/s00586-022-07150-w>.
 31. Baroud G, Crookshank M, Bohner M. High-viscosity cement significantly enhances uniformity of cement filling in vertebroplasty: an experimental model and study on cement leakage. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2006;31:2562–8, <http://dx.doi.org/10.1097/01.brs.0000240695.58651.62>.
 32. Krappinger D, Kastenberger TJ, Schmid R. Augmented posterior instrumentation for the treatment of osteoporotic vertebral body fractures. *Oper Orthop Traumatol*. 2012;24:4–12, <http://dx.doi.org/10.1007/s00064-011-0098-7>. Die Behandlung osteoporotischer Wirbelkörperfrakturen mit augmentierter Instrumentation.
 33. Boger A, Benneker LM, Krebs J, Boner V, Heini PF, Gisep A. The effect of pulsed jet lavage in vertebroplasty on injection forces of PMMA bone cement: an animal study. *Eur Spine J*. 2009;18:1957–62, <http://dx.doi.org/10.1007/s00586-009-1079-5>.
 34. Benneker LM, Heini PF, Suhm N, Gisep A. The effect of pulsed jet lavage in vertebroplasty on injection forces of polymethylmethacrylate bone cement, material distribution, and potential fat embolism: a cadaver study. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2008;33:E906–10, <http://dx.doi.org/10.1097/BRS.0b013e318183bb6d>.
 35. Benneker LM, Krebs J, Boner V, Boger A, Hoerstrup S, Heini PF, et al. Cardiovascular changes after PMMA vertebroplasty in sheep: the effect of bone marrow removal using pulsed jet-lavage. *Eur Spine J*. 2010;19:1913–20, <http://dx.doi.org/10.1007/s00586-010-1555-y>.
 36. El Saman A, Kelm A, Meier S, Sander AL, Eichler K, Marzi I, et al. Intraoperative PEEP-ventilation during PMMA-injection for augmented pedicle screws: improvement of leakage rate in spinal surgery. *Eur J Trauma Emerg Surg*. 2013;39:461–8.
 37. Pare PE, Chappuis JL, Rampersaud R, Agarwala AO, Perra JH, Erkan S, et al. Biomechanical evaluation of a novel fenestrated pedicle screw augmented with bone cement in osteoporotic spines. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2011;36:E1210–4, <http://dx.doi.org/10.1097/BRS.0b013e318205e3af>.
 38. Blattert T. Zementaugmentierte pedikelschrauben. *OP-JOURNAL*. 2017;33:4–10.
 39. Weiser L, Sellenschlo K, Puschel K, Morlock MM, Vienz L, Lehmann W, et al. Reduced cement volume does not affect screw stability in augmented pedicle screws. *Eur Spine J*. 2020;29:1297–303, <http://dx.doi.org/10.1007/s00586-020-06376-w>.
 40. Weber M, Lenz M, Egenolf P, Prescher A, Walter S, Heck VJ, et al. Increased stability due to symmetric cement volume in augmented pedicle screws? A biomechanical study. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater*. 2024;112:e35339, <http://dx.doi.org/10.1002/jbm.b.35339>.
 41. Spiegl UJA. Limitierte zementierung bei langstreckiger dorsaler versorgung. *Die Wirbelsäule*. 2023;7:227–31.
 42. Geiger F, Kafchitsas K, Rauschmann M. Anterior vertebroplasty of adjacent levels after vertebral body replacement. *Eur Spine J*. 2011;20:1385–92, <http://dx.doi.org/10.1007/s00586-011-1766-x>.
 43. Oberkircher L, Kruger A, Horth D, Hack J, Ruchholtz S, Fleegle C, et al. Anterior cement augmentation of adjacent levels after vertebral body replacement leads to superior stability of the corpectomy cage under cyclic loading – a biomechanical investigation. *Spine J*. 2018;18:525–31, <http://dx.doi.org/10.1016/j.spinee.2017.10.068>.
 44. Herren C, Quast K, Prescher A, Fischer H, Thüring J, Siewe J, et al. Influence of additional cement augmentation on end-plate stability in circumferential stabilisation of osteoporotic spine fractures. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. 2019;68:163–8, <http://dx.doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2019.06.008>.
 45. Ullrich BW, Schenk P, Spiegl UJ, Mendel T, Hofmann GO. Hounsfield units as predictor for cage subsidence and loss of reduction: following posterior-anterior stabilization in thoracolumbar spine fractures. *Eur Spine J*. 2018;27:3034–42, <http://dx.doi.org/10.1007/s00586-018-5792-9>.