

PCD en la columna lumbar: ¿Existe un volumen de inyección óptimo?

PCD in the lumbar spine: Is there an optimal injection volume?

Doctorando:

Lucas Basiuk

<https://orcid.org/0000-0001-9003-3786>

Centro de Investigación en Mecánica Experimental y Computacional (CIMEC), Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad Regional La Plata, Universidad Tecnológica Nacional – Argentina.

Instituto de Física de Líquidos y Sistemas Biológicos (IFLySiB), Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de La Plata – Argentina.

lbasiuk@frlp.utn.edu.ar

Director:

C. Manuel Carlevaro

Codirector:

Ramiro M. Irastorza

Resumen

La discoplastia con cemento es una técnica quirúrgica mínimamente invasiva empleada para tratar el dolor lumbar mediante la estabilización de los segmentos vertebrales a través de la inyección de polimetilmetacrilato (PMMA) en el disco intervertebral (DIV). Uno de los principales desafíos consiste en determinar si existe un volumen óptimo de cemento inyectado. En este sentido, solo un número limitado de estudios ha investigado el efecto de distintos volúmenes de cemento sobre la estabilidad espinal. Este trabajo presenta resultados preliminares a partir de simulaciones realizadas mediante un modelo de elementos finitos previamente validado de la columna lumbar (L1-L5), en el cual se varió el volumen de PMMA inyectado en el disco L4-L5. Se generaron siete modelos según la cantidad de cemento que ocupa el espacio discal, y se compararon los rangos de movimiento (ROM) resultantes con los de una columna sana y los de una columna completamente degenerada (sin núcleo pulposo). Estas dos condiciones de carga se consideraron los movimientos más relevantes y esenciales durante el período postoperatorio. Los hallazgos preliminares buscan contribuir al desarrollo de estrategias de discoplastia con cemento más efectivas y a establecer criterios para identificar un volumen óptimo de cemento.

Palabras clave : Discoplastia con cemento; Análisis por elementos finitos; Biomecánica

Abstract

Cement discoplasty is a minimally invasive surgical technique used to treat low back pain by stabilizing spinal segments through the injection of polymethylmethacrylate (PMMA) into the intervertebral disc (IVD). One of the main challenges is determining whether an optimal volume of injected cement exists. In this regard, only a limited number of studies have investigated the effect of different cement volumes on spinal stability. This work presents preliminary results from simulations performed using a previously validated finite element model of the lumbar spine (L1–L5), in which the volume of PMMA injected into the L4–L5 disc was varied. Seven models were generated according to the amount of cement occupying the disc space, and the resulting ranges of motion (ROM) were compared with those of both a healthy spine and a fully degenerated spine (without nucleus pulposus). These two loading conditions were considered the most relevant and essential movements during the postoperative period. The preliminary findings aim to contribute to the development of more effective cement discoplasty strategies and to establish criteria for identifying an optimal cement volume.

Keywords: Cement discoplasty; Finite element analysis; Biomechanics

Introducción

El dolor lumbar degenerativo es uno de los motivos de consulta médica más frecuentes. Una de sus causas principales es la degeneración del disco intervertebral (DIV), un proceso que altera progresivamente la anatomía y la función mecánica de la columna lumbar. En consecuencia, pueden ocurrir diversos cambios patológicos, como la reducción de la altura del

disco, la pérdida de estabilidad segmentaria y la compresión de estructuras neurales, todos los cuales contribuyen a la aparición y persistencia del dolor (Kirnaz et al., 2021).

En pacientes de edad avanzada o con alto riesgo quirúrgico, los tratamientos convencionales pueden ser menos adecuados debido a la mayor probabilidad de complicaciones. En este contexto, la discoplastia percutánea con cemento (PCD, por sus siglas en inglés) ha surgido como una alternativa mínimamente invasiva para el tratamiento de discos degenerados que presentan el fenómeno de vacío.

La técnica consiste en inyectar cemento óseo de polimetilmetacrilato (PMMA) en el espacio discal con el objetivo de restaurar parcialmente la altura del disco, mejorar la estabilidad mecánica del segmento afectado y aliviar el dolor (Varga et al., 2015).

A medida que avanza la degeneración discal, la degradación del núcleo pulposo puede conducir a la formación de una cavidad de vacío dentro del disco, a menudo acompañada por la acumulación de gas (principalmente nitrógeno). Esta condición puede provocar una menor altura discal, mayor inestabilidad y una compresión más severa de las estructuras nerviosas espinales, causando tanto síntomas en los miembros inferiores como dolor lumbar (Camino Willhuber et al., 2020). Los estudios clínicos han demostrado que la PCD puede reducir significativamente tanto el dolor lumbar como el radicular, mostrando resultados favorables en el tratamiento de patologías lumbares degenerativas avanzadas (Camino Willhuber et al., 2020).

Los estudios clínicos han demostrado que la PCD reduce significativamente tanto la lumbalgia como el dolor en los miembros inferiores. (Camino Willhuber et al., 2020) trataron con éxito patologías lumbares degenerativas avanzadas mediante PCD. Su estudio reportó los resultados de 54 pacientes tratados exclusivamente con PCD, mostrando resultados clínicos positivos en términos de aumento de la altura del disco y ampliación del foramen neural. La presencia de PMMA dentro del espacio previamente ocupado por la cavidad de vacío modifica la respuesta biomecánica del segmento vertebral. Sin embargo, la magnitud de estos cambios depende de varios factores, incluidos el volumen de cemento inyectado y sus propiedades mecánicas. En consecuencia, surgen importantes interrogantes respecto a las consecuencias biomecánicas que el procedimiento pueda tener sobre los segmentos adyacentes y en los resultados clínicos a largo plazo.

En este contexto, los modelos numéricos basados en el método de elementos finitos proporcionan una herramienta valiosa para analizar el comportamiento de la columna lumbar bajo diferentes configuraciones de discoplastia. Dichos modelos permiten investigar variables mecánicas difíciles de evaluar experimentalmente y facilitan la evaluación controlada de la influencia de los parámetros asociados al procedimiento.

Por lo tanto, el objetivo de este estudio es investigar la influencia del volumen de PMMA inyectado en el disco L4–L5 sobre la respuesta biomecánica de la columna lumbar. Se empleó un modelo tridimensional de la columna lumbar completa (L1–L5) para evaluar los cambios en la movilidad y la rigidez espinal asociados con diferentes niveles de llenado discal. El modelo utilizado en este estudio corresponde al desarrollado por (Finley et al., 2018) (ver Fig. 1).

Desarrollo

Se realizó un estudio computacional basado en el método de los elementos finitos (MEF) para evaluar la respuesta biomecánica de la columna lumbar L1-L5 en función del volumen de PMMA inyectado en el disco intervertebral. Como base para este estudio, se utilizó el modelo tridimensional de columna lumbar desarrollado por (Finley et al., 2018) e implementado en FEBio Studio (Maas et al., 2012). El modelo incluye la geometría de los cuerpos vertebrales, los discos intervertebrales (DIV), las estructuras anatómicas relevantes y el sistema ligamentario, lo que permite reproducir el comportamiento mecánico de la columna lumbar.

A partir de esta geometría, se definieron dos condiciones de control. La primera correspondió a un modelo de referencia fisiológico (condición sana), que representa el comportamiento biomecánico de una columna lumbar no degenerada. La segunda correspondió a un modelo de referencia degenerado (condición no tratada), que representa un segmento L4-L5 sin núcleo pulposo y sin cemento.

Las propiedades de los materiales asignadas a los diferentes tejidos se adoptaron del modelo propuesto por (Finley et al., 2018). En dicho modelo, el hueso cortical y el trabecular se representan mediante formulaciones constitutivas elásticas lineales, mientras que el disco intervertebral se describe utilizando un modelo de material hiperelástico.

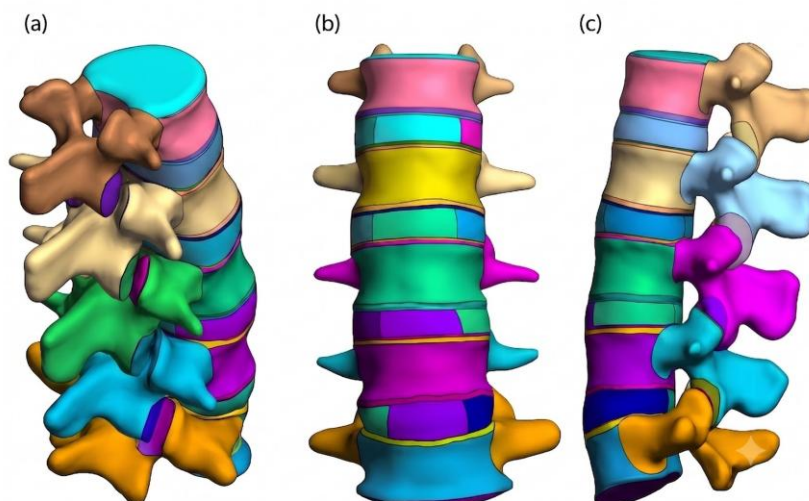


Figura 1. Modelo tridimensional de elementos finitos de la columna lumbar humana completa (L1–L5) utilizado como marco de referencia base. Vista isométrica/posterolateral (a), vista anterior (b) y vista lateral (c). Adaptado del marco validado desarrollado por (Finley et al., 2018).

En el presente estudio se mantuvieron las mismas formulaciones constitutivas. Adicionalmente, se incorporó el PMMA, modelado como un material elástico lineal isótropo con un módulo de Young de aproximadamente entre 1700 y 3000 MPa y un coeficiente de Poisson de 0.3, valores consistentes con los reportados para cementos óseos de PMMA utilizados en procedimientos de aumento vertebral y discoplastia con cemento (Cavka et al., 2023 y Lewin et al., 2022).

La discoplastia con cemento se modeló en el nivel L4-L5 mediante la introducción de un volumen de PMMA en el espacio del disco intervertebral (ver Fig. 2). Para evaluar la influencia del volumen de cemento inyectado, se generaron seis condiciones de llenado correspondientes al 25%, 40%, 60%, 70%, 80% y 100% del espacio discal disponible. En todos los casos, la ubicación geométrica del cemento dentro del disco se mantuvo constante.

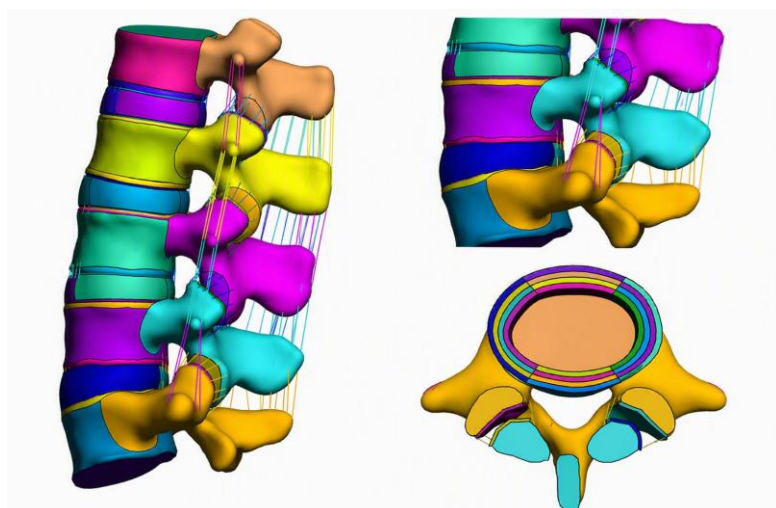


Figura 2. Detalle anatómico. Vista lateral completa del modelo L1–L5 (izquierda), vista en primer plano de la región posterior y del disco L4–L5 (arriba a la derecha), y vista en sección transversal (axial) del disco L4–L5 que muestra las bandas del anillo fibroso y el núcleo (abajo a la derecha).

Se asumió una unión perfecta entre el volumen de PMMA y los tejidos circundantes, omitiendo cualquier fenómeno de deslizamiento o separación en la interfaz. Esta simplificación permite centrar el análisis en la influencia del volumen de cemento sobre la estabilidad mecánica del segmento tratado.

Las condiciones de contorno y de carga se definieron de acuerdo con la metodología propuesta por (Finley et al., 2018).

Se llevó a cabo un análisis no lineal cuasiestático con carga incremental para evitar efectos dinámicos e inerciales durante las simulaciones numéricas.

Se restringieron por completo todos los grados de libertad de la superficie inferior del cuerpo vertebral de L5. Se aplicó un momento puro en la superficie superior de L1 para simular los movimientos fisiológicos primarios de la columna lumbar en condiciones estáticas: flexión, extensión, inclinación lateral y rotación axial.

La respuesta biomecánica de las diferentes configuraciones se evaluó y comparó en términos de rango de movimiento (ROM) con el fin de identificar tendencias asociadas a las variaciones en el volumen de cemento inyectado. En este estudio preliminar, solo se consideraron los movimientos de flexión y extensión. Estos modos de carga se seleccionaron por ser los más representativos de las actividades funcionales de la vida diaria realizadas por pacientes de edad avanzada sometidos a una discoplastia percutánea con cemento (PCD). Los valores obtenidos para cada configuración de llenado se compararon con los correspondientes a las condiciones de referencia sana y degenerada, lo que permitió cuantificar la influencia del volumen de PMMA en la movilidad de la columna lumbar.

Resultados

La Figura 3 ilustra la influencia del porcentaje de llenado de PMMA dentro de la región del núcleo del disco intervertebral sobre el rango de movimiento (ROM) del segmento lumbar L4–L5 durante la flexión y extensión. En general, las configuraciones de llenado parcial de entre el 25% y el 80% mantuvieron valores de ROM cercanos a los observados en la condición sana, mientras que el llenado completo resultó en una reducción sustancial de la movilidad del segmento.

En flexión, el modelo sano mostró un ROM de 17.4°, mientras que los modelos con porcentajes de llenado del 25%, 40%, 60% y 80% presentaron valores de entre 17.2° y 18.3°. Estas configuraciones mostraron desviaciones inferiores al 6% respecto a la condición sana, lo que indica un comportamiento biomecánico comparable al de un segmento lumbar fisiológico. Se observó una tendencia similar en extensión, con desviaciones de entre el 3.8% y el 6.9% en relación con el modelo sano.

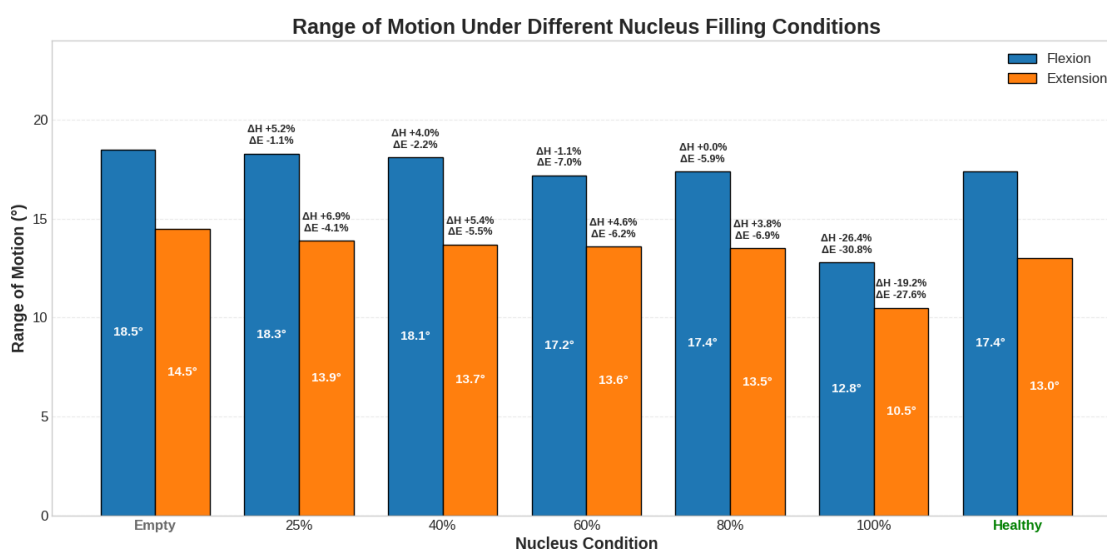


Figura 3. Comparación del rango de movimiento (ROM) en flexión y extensión bajo diferentes condiciones de llenado discal. Los porcentajes de llenado corresponden a distintos volúmenes de PMMA dentro del espacio discal. Las etiquetas ΔH y ΔE indican la diferencia porcentual en el ROM de cada configuración de llenado en relación con las condiciones de referencia Sana (Healthy) y Vacía (Empty), respectivamente. Los casos Sano y Vacío representan el disco intacto y la condición de disco con vacío utilizados como referencias basales.

La condición de disco vacío presentó la mayor movilidad, alcanzando 18.5° en flexión y 14.5° en extensión. Este aumento del ROM en comparación con la condición sana sugiere una pérdida de estabilidad mecánica asociada con la ausencia del soporte estructural que normalmente proporciona el núcleo pulposos.

Por el contrario, la condición de llenado al 100% mostró una marcada reducción de la movilidad en ambas direcciones

de carga. El ROM disminuyó a 12.8° en flexión y 10.5° en extensión, lo que corresponde a reducciones del 26.4% y 19.2%, respectivamente, en relación con la condición sana. Además, en comparación con la configuración de disco vacío, el ROM se redujo un 30.8% en flexión y un 27.6% en extensión.

La Figura 4 presenta las desviaciones porcentuales con respecto a la condición sana. Los resultados revelan una respuesta no lineal del segmento espinal al incremento del volumen de cemento. Mientras que los porcentajes de llenado parcial de entre el 25% y el 80% produjeron desviaciones relativamente pequeñas y estables, el llenado completo provocó una reducción abrupta de la movilidad. Estos hallazgos sugieren que los volúmenes moderados de llenado con PMMA pueden restaurar parcialmente la estabilidad segmentaria sin alterar sustancialmente el movimiento fisiológico, mientras que la ocupación completa del espacio nuclear puede inducir una rigidez excesiva y una pérdida significativa del rango de movimiento.

En conjunto, los resultados indican que los porcentajes de llenado cercanos al 80% proporcionaron la aproximación más cercana a la condición sana, al menos para flexión y extensión, lo que representa un rango biomecánicamente favorable para reproducir la movilidad fisiológica del segmento lumbar analizado.

Conclusiones

Los resultados obtenidos en este estudio indican que el volumen de PMMA inyectado en el disco intervertebral influye significativamente en la movilidad segmentaria lumbar. Mientras que la condición de disco vacío exhibió los valores más altos de rango de movimiento (ROM), lo que sugiere una pérdida de estabilidad mecánica, los modelos con porcentajes de llenado parcial de entre el 25% y el 80% mantuvieron valores de ROM cercanos a los observados en la condición sana.

El análisis de las desviaciones respecto al modelo de referencia fisiológico demostró que los porcentajes de llenado de entre el 60% y el 80% reprodujeron con mayor consistencia el comportamiento biomecánico del segmento sano, tanto en flexión como en extensión. Por el contrario, el llenado completo del espacio nuclear (100%) provocó una marcada reducción de la movilidad, con disminuciones de hasta el 26.4% en flexión y el 19.2% en extensión, lo que sugiere una rigidez excesiva del segmento espinal.

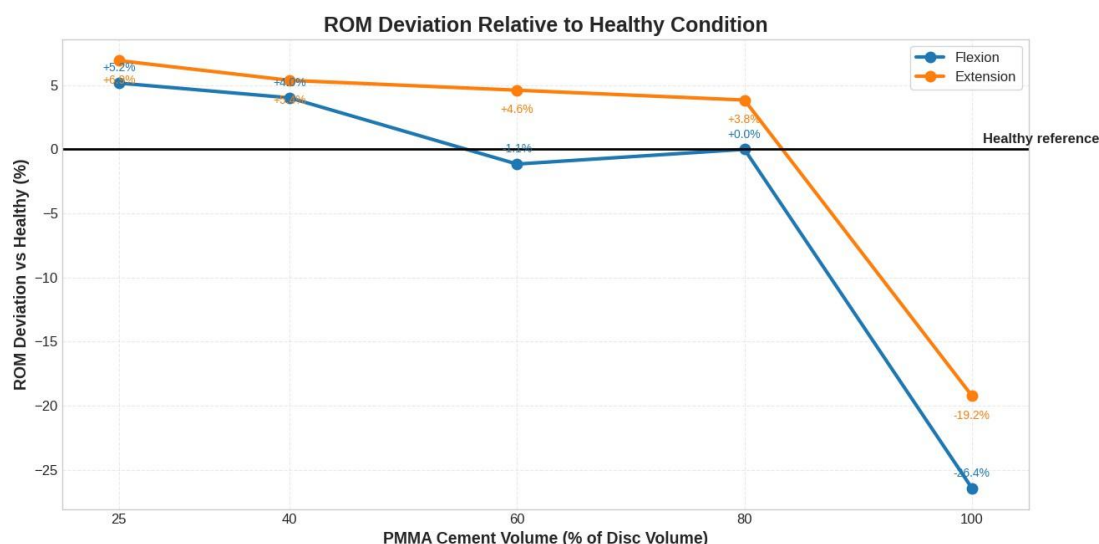


Figura 4. Desviación del ROM relativa a la condición sana en función del volumen de PMMA inyectado. Cada curva corresponde a una dirección de carga (flexión y extensión), mientras que la línea horizontal representa la referencia sana (0% de desviación). Ambas respuestas exhiben una disminución progresiva en el ROM con el aumento del volumen de cemento. La flexión se aproxima al valor sano aproximadamente al 80% de llenado y muestra la mayor reducción con el llenado completo (100%), mientras que la extensión se mantiene por encima de la referencia sana hasta el 80% de llenado y disminuye marcadamente solo en el volumen de cemento más alto.

En conjunto, estos hallazgos sugieren que volúmenes moderados de llenado con PMMA pueden restaurar parcialmente la estabilidad segmentaria mientras preservan la movilidad fisiológica. Desde una perspectiva clínica, el objetivo principal del cirujano es estabilizar el segmento lumbar y recuperar la separación entre las vértebras más afectadas, reduciendo el dolor y eliminando la inestabilidad segmentaria. Bajo esta premisa, el propósito del presente estudio es identificar el volumen de

cemento capaz de proporcionar un grado de rigidez controlado o fisiológico, optimizando la respuesta biomecánica del segmento tratado y contribuyendo a la mejora de los procedimientos de discoplastia con cemento.

Para comprender mejor cómo la discoplastia percutánea con cemento (PCD) afecta la biomecánica espinal y cuantificar todo el potencial de la técnica, se requieren más estudios basados en modelos de discoplastia. Aunque los resultados presentados aquí son preliminares y están sujetos a diversas limitaciones, los modelos desarrollados ofrecen un marco útil para realizar análisis computacionales adicionales y caracterizar geométricamente los escenarios simulados.

Utilización de IA generativa / herramientas IA

Declaro la utilización de la herramienta IA Google Gemini para su uso en la optimización visual, mejora de nitidez y ajuste de presentación de figuras generadas por el autor a partir del modelo de columna lumbar de Finley et al. Confirmando que luego de la utilización, los contenidos obtenidos fueron revisados, constatados y editados, asumiendo plena responsabilidad por el contenido presentado en el presente trabajo.

Referencias

- Camino Willhuber, G., Kido, G., Pereira Duarte, M., Estefan, M., Bendersky, M., Bassani, J., Petracchi, M., Gruenberg, M., & Sola, C. (2020). Percutaneous cement discoplasty for the treatment of advanced degenerative disc conditions: A case series analysis. *Global Spine Journal*, 10(6), 729–734. <https://doi.org/10.1177/2192568219873885>
- Cavka, M., Delimar, D., Rezan, R., Zigman, T., Duric, K. S., Cimic, M., Domic-Cule, I., & Prutki, M. (2023). Complications of percutaneous vertebroplasty: A pictorial review. *Medicina*, 59(9), 1536. <https://doi.org/10.3390/medicina59091536>
- Finley, S. M., Brodke, S. D., Spina, N. T., DeDen, C. A., & Ellis, B. J. (2018). FEBio finite element models of the human lumbar spine. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 21(6), 444–452. <https://doi.org/10.1080/10255842.2018.1478967>
- Kirnaz, S., Capadona, C., Lintz, M., Kim, B., Yerden, R., Goldberg, J. L., Medary, B., Sommer, F., McGrath, L. B., Bonassar, L. J., & Härtl, R. (2021). Pathomechanism and biomechanics of degenerative disc disease: Features of healthy and degenerated discs. *International Journal of Spine Surgery*, 15(s1), 10–25. <https://doi.org/10.14444/8052>
- Lewin, S., Försth, P., & Persson, C. (2022). Low-modulus PMMA has the potential to reduce stresses on endplates after cement discoplasty. *Journal of Functional Biomaterials*, 13(1), 18. <https://doi.org/10.3390/jfb13010018>
- Maas, S. A., Ellis, B. J., Ateshian, G. A., & Weiss, J. A. (2012). FEBio: Finite elements for biomechanics. *Journal of Biomechanical Engineering*, 134(1), 011005. <https://doi.org/10.1115/1.4005694>
- Varga, P. P., Jakab, G., Bors, I. B., Lazary, A., & Szövérfi, Z. (2015). Experiences with PMMA cement as a stand-alone intervertebral spacer: Percutaneous cement discoplasty in the case of vacuum phenomenon within lumbar intervertebral discs. *Der Orthopäde*, 44(Suppl 1), S1–S7. <https://doi.org/10.1007/s00132-014-3060-1>