

## Acta Ortopédica Mexicana

Volumen **18**  
Volume

Número **4**  
Number




Julio-Agosto **2004**  
July-August

*Artículo:*




Análisis de esfuerzos de compresión en la columna con lesión del disco intervertebral: Estudio numérico-experimental en espécimen porcino

Derechos reservados, Copyright © 2004:  
Sociedad Mexicana de Ortopedia, AC

**Otras secciones de  
este sitio:**

-  [Índice de este número](#)
-  [Más revistas](#)
-  [Búsqueda](#)

***Others sections in  
this web site:***

-  [Contents of this number](#)
-  [More journals](#)
-  [Search](#)

Artículo original

## Análisis de esfuerzos de compresión en la columna con lesión del disco intervertebral: Estudio numérico-experimental en espécimen porcino

Manuel F. Carbajal Romero,\* Jesús J. Nieto Miranda,\*\* Ricardo G. Rodríguez Cañizo,\*\*\* Manuel Dufoo Olvera,\*\*\*\* Luis H. Hernández Gómez,\* Guillermo Urriolagoitia Calderón,\* Arturo Minor Martínez\*\*

Instituto Politécnico Nacional

**RESUMEN.** En este artículo se presenta un estudio que consiste en determinar cuál es la distribución de esfuerzos producida en un espécimen sano cuando se le aplica carga, y compararla con especímenes que sufren daño en los diferentes cuadrantes del disco intervertebral. De esta manera, se puede establecer en qué grado contribuye el disco intervertebral a la transmisión y distribución de carga. El estudio se realizó de manera numérico-experimental con la finalidad de validar los resultados obtenidos. La parte experimental se realizó por medio de la técnica fotoelástica de reflexión, mientras que la parte numérica se realizó empleando el paquete de elementos finitos ANSYS en su versión 7.0.

**Palabras clave:** columna, disco intervertebral, fracturas, análisis del elemento finito.

**SUMMARY.** The intention is to determine by means of photoelasticity and Numerical Methods, as it is the distribution of stress produced in a healthy specimen when load is applied to him, and to compare it with specimens that suffer damaged in all different quadrants from the vertebral disc. This way, it is possible to be established in which degree contributes the vertebral disc in the transmission and distribution of load. This study was made with numerical-experimental analysis, with the purpose of validating the obtained results. The experimental part was made by means of the reflection photoelastic technique of, whereas the numerical part was made using the package of finite elements ANSYS (version 7.0).

**Key words:** spine, intervertebral disk, fractures, finite element analysis.

### Introducción

Una de las funciones principales de la columna vertebral es el soporte, absorción y transmisión de las fuerzas externas a las que se encuentra sometida en todo momento; si no llegara a cumplir con alguna de sus tareas, los impactos recibidos de dichas cargas pueden llegar a causar distorsiones o daños catastróficos en ella, como suele ser por ejemplo la fractura de vértebra o de disco intervertebral, causado principalmente por una mala distribución de esfuerzos en los elementos que la componen.

Varios estudios se han realizado para evaluar y cuantificar la distribución de esfuerzos sobre la columna vertebral, ya sea por métodos experimentales o modelos computacionales. Entre estos estudios se encuentran los realizados al disco intervertebral por diversas técnicas,<sup>1,11,14,15,17</sup> donde se establece la función mecánica del mismo<sup>2,7-9,16</sup> y en algunos casos es determinada la distribución y comportamiento de los esfuerzos de compresión en

\* Sección de Estudios de Postgrado e Investigación (SEPI), Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME) Unidad Zacaten-co, IPN.

\*\* Sección de Bioelectrónica, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN (CINVESTAV).

\*\*\* Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME) Unidad Culhuacán, IPN.

\*\*\*\* Hospital General de la Villa. Secretaría de Salud (SSA).

Dirección para correspondencia:

Manuel F. Carbajal Romero. Sección de Estudios de Postgrado (SEPI), Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME), Instituto Politécnico Nacional (IPN), Unidad Profesional "Adolfo López Mateos". Av. IPN S/N Edificio 5 2º piso; Col. Lindavista, 07738, México DF.

E-mail: carbajal@maya.esimez.ipn.mx, jnietom@hotmail.com

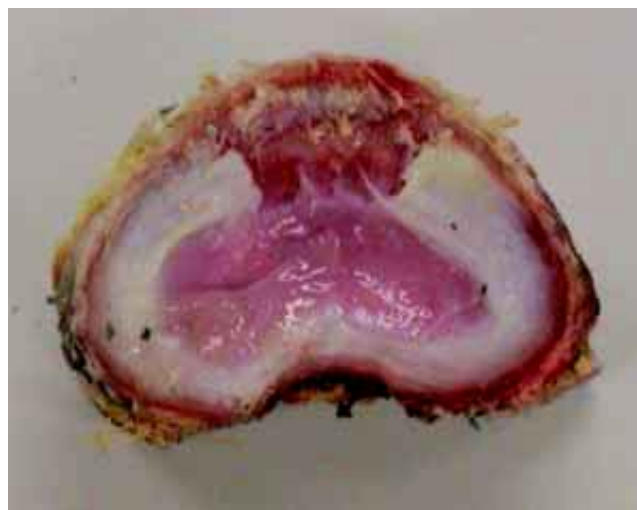
la columna vertebral. Entre estos estudios mencionamos el realizado por Michio Hongo<sup>10</sup> que realizó pruebas bajo ciclos de carga para medir la tensión y la compresión en vértebras torácicas y lumbares (intactas) para determinar la distribución de esfuerzos; marcó diferentes puntos en las vértebras y estableció las zonas donde existe la mayor concentración de esfuerzos, con la intención de predecir el inicio de una posible fractura y determinó que los esfuerzos se van incrementando conforme se aplica la fuerza. Choon-Kig<sup>13</sup> realizó un modelado por MEF para determinar el comportamiento del disco intervertebral (intacto) aplicando cargas en un intervalo de tiempo; entre los resultados obtenidos observó que la transmisión de esfuerzos hacia el disco se incrementa. Wang Jaw-Lin<sup>18</sup> analizó la integridad física del disco intervertebral por medio de estudios radiológicos, tratando de observar el disco y encontrar fracturas; sus resultados establecen que es posible observar el disco por medio de estudios radiológicos, pero no en todos los casos es probable determinar la existencia de daños y encuentra que los esfuerzos sobre los discos son mayores después de la fractura que los que se tenían antes de presentarse el daño. Hanspeter Frei<sup>6</sup> aplicó ciclos de carga sobre una sección de la columna vertebral L3-L4 y L4-L5 (intactas) y encontró que los esfuerzos de compresión sobre el disco intervertebral se incrementan al elevar la carga; al simular la degeneración de las vértebras por medio de nucleotomía los esfuerzos decrecen.

Se puede apreciar que estos estudios parten de vértebras y discos intervertebrales intactos, van aplicando fuerzas y en cuanto se genera una fisura o fractura analizan los resultados obtenidos. Pero ninguno de ellos investiga qué pasa después de que el disco se ha lesionado o fracturado, ni se indica tendencia alguna del comportamiento de los esfuerzos que se transmiten en el disco y en las vértebras.

El objetivo de este estudio es analizar el comportamiento de la columna vertebral con lesión de disco intervertebral cuando se encuentra sometida a fuerzas externas de compresión constantes, y analizar la distribución de esfuerzos de compresión que se tienen en ella, este estudio se realiza de forma numérica experimental en un espécimen porcino.

### Material y métodos

Los especímenes utilizados en este ensayo fueron los segmentos L2-L3-L4 de columna vertebral porcina de las que se eliminó la porción posterior de la vértebra (facetas, pedículos, apófisis) y se usó solamente el cuerpo vertebral y los discos intervertebrales. Para simular el daño en el disco se realizaron pequeñas incisiones en forma de ventana que abarcaron la cuarta parte del cuadrante correspondiente; la profundidad de las incisiones fueron tales que propiciaron daño en el anillo fibroso y en el núcleo pulposo. El disco que es dañado se localiza entre las vértebras L2 y L3 (*Figura 1*). Se recubrió con laca el cuerpo vertebral central para establecer de manera indirecta la



**Figura 1.** Disco intervertebral con daño anterior.



**Figura 2.** Especimen de prueba conformado con laca fotoelástica.

función del disco intervertebral en la transmisión de la carga cuando éste se encuentra intacto o dañado. En otras palabras, la distribución de esfuerzos observada en el cuerpo vertebral es proporcional a la condición del disco intervertebral, de esta manera cualquier alteración en su condición modifica el patrón de franjas observado (*Figura 2*).

La evaluación de la condición física del disco intervertebral se realizó primeramente mediante la técnica experimental de fotoelasticidad reflectiva y para validar o refutar los resultados obtenidos se desarrolló un modelo matemático.

co 3D mediante elementos finitos. La técnica experimental utilizada para este estudio fue la fotoelasticidad reflectiva, el tipo de laca utilizada fue PL1 con un catalizador PLH1, el adhesivo reflejante utilizado es PC1 y el espesor de la laca fue de 1.5 mm con una superficie de 20 x 20 cm.

La máquina de ensayos utilizada fue una INSTRON con capacidad de una tonelada. Se aplicaron cargas constantes a cada uno de los especímenes de 150, 200 y 250<sup>8</sup> kg. Se analizaron cuatro especímenes de prueba que corresponden a los casos siguientes: 1: Disco intervertebral intacto, 2: Disco intervertebral con daño anterior, 3: Disco intervertebral con daño posterior, 4: Disco intervertebral con daño lateral derecho.

Se fotografió el patrón de franjas isocromáticas para determinar el valor de los esfuerzos generados en la vértebra (*Figura 3*).

Diversos modelados de la columna vertebral se desarrollaron por medio del método del elemento finito (FEM) para establecer el comportamiento de los esfuerzos que se generan cuando es sometida a cargas.<sup>3,13</sup> En este trabajo se modeló la geometría de las vértebras y discos intervertebrales porcinos que se emplearon en el análisis experimental. Éstos fueron seccionados y fotografiados, posteriormente

las fotografías fueron digitalizadas y reproducidas en CAD. Con las superficies definidas se generó la geometría volumétrica final en tres dimensiones. Los datos obtenidos se alimentaron al programa de elementos finitos.

El módulo de elasticidad y la relación de Poisson son las propiedades mecánicas utilizadas en el modelado. Los valores empleados para cada tipo de material orgánico<sup>4,5</sup> se muestran en la *tabla 1*, así como la cantidad de elementos generados por el programa (*Figura 4*).

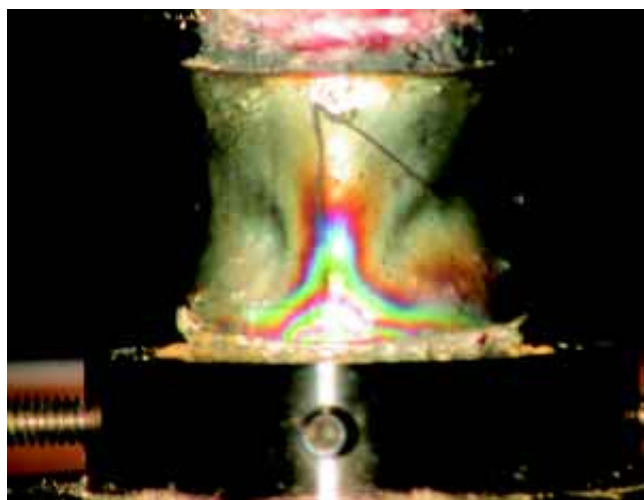
Se generaron seis modelos que representaron cada uno de los casos de estudio (intacta, anterior, posterior, lateral derecho, lateral izquierdo y superior). Cada modelo desarrollado constó de 45,000 elementos tipo solid 92 (tetraedros de 10 nodos cada uno), se resolvió usando el programa de MEF Ansys Research Versión 7.0 (Ansys Inc.).

Las corridas realizadas corresponden a los casos de estudio mencionados anteriormente con los mismos niveles de carga. La finalidad del análisis numérico es dar un panorama mucho más amplio de la distribución de esfuerzos generados en la zona de L3 ya que el modelo se puede rotar o mover en cualquier dirección de interés, situación que no siempre es posible hacer de manera experimental (*Figura 5*).

## Resultados

En la *tabla 2* se muestran los valores máximos y mínimos obtenidos para los esfuerzos de Von Mises en el modelo experimental, la cual muestra que los valores de los esfuerzos se incrementan al dañar cualquiera de las áreas de estudio; al compararlos con los obtenidos cuando el disco está intacto, se presentaron variaciones que llegaron a ser hasta de 83.43% de incremento cuando el daño se realiza en la parte anterior del disco bajo una carga de 150 kg, y el mínimo registrado de 27.42% con una carga de 250 kg cuando se lesiona la parte lateral derecha del disco.

Los valores obtenidos para los esfuerzos de compresión de Von Mises en el modelo matemático se indican en la *tabla 3*, y muestran que cuando el disco es dañado en cualquiera de sus áreas de estudio los valores se incrementaron; la variación más alta se obtuvo al dañar la parte posterior del disco (15.3 MPa) bajo una carga de 250 kg, y el menor incremento se registró al afectar la parte superior del disco (1.13 MPa) con una carga de 250 kg.



**Figura 3.** Especimen de prueba con daño anterior con carga a compresión de 150 kg, en donde se observa claramente el patrón de franjas isocromáticas generado.

**Tabla 1. Propiedades mecánicas de los materiales utilizados en el modelo numérico.**

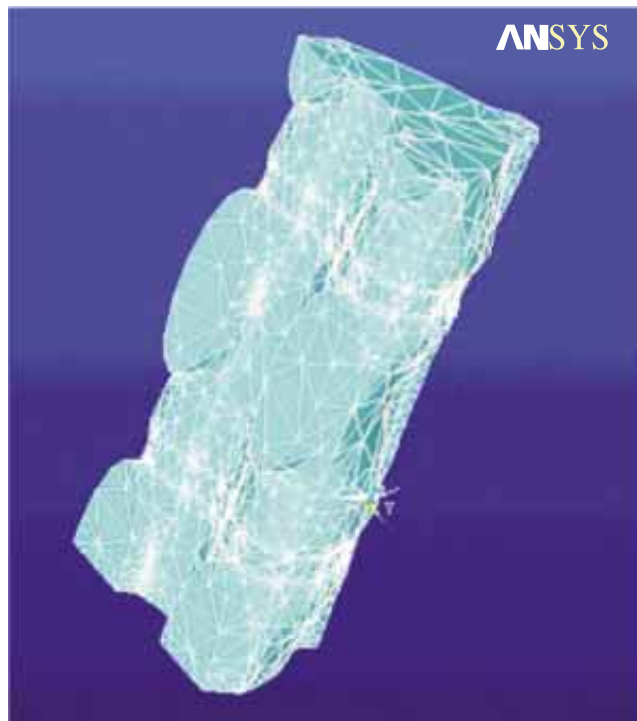
Material orgánico	Módulo de elasticidad (MPa)	Relación de Poisson	No. elementos
H. trabecular	0.1 (xyz)	0.3	23,371
H. cortical	17.0e3(z)		
Fibras	11.5e3 (xy)	0.33	4,630
	0.5 a 30°		
Núcleo pulp	150° plano xz	0.3	9,657
	.004 (xyz)	0.499	1,265
Placas T	0.5 (xyz)	0.4	7,588

## Discusión

La tendencia mostrada por los resultados obtenidos en el estudio experimental y en el modelo numérico desarrollado por elementos finitos coinciden, ya que en ambos los valores obtenidos se incrementan al dañar una parte del disco intervertebral con respecto al disco que no ha sufrido daño.

En el modelo experimental se obtiene el menor incremento de 27.42% al aplicar una carga de 250 kg al lesio-

nar la cara lateral derecha del disco intervertebral, y un incremento máximo de 83.46% cuando se aplica una carga de 150 kg al lesionar la cara anterior. Pero hay que observar que los resultados obtenidos muestran una relación directamente proporcional entre la carga aplicada y los valores de los esfuerzos obtenidos, por lo tanto, al incrementar la fuerza aplicada los esfuerzos aumentan, en otras palabras, los valores máximos de los esfuerzos se obtienen cuando se aplica la carga máxima de 250 kg. Hay que notar que cuando se aplica la carga mínima utilizada de 150 kg se obtienen los valores mínimos para los esfuerzos de compresión, pero también se tienen los máximos incrementos porcentuales y viceversa, o sea, al aplicar la máxima carga de 250 kg, se obtienen los máximos valores para



**Figura 4.** Modelo creado en ANSYS.



**Figura 5.** Corrida ANSYS que simula el daño anterior en el disco vertebral.

**Tabla 2. Resultados experimentales obtenidos por medio de fotoelasticidad.**

Carga (kg)	Intacta	Esfuerzo obtenido (MPa)		
		Anterior	Posterior	Derecha
150	26.6	48.8	40.7	38.3
200	29.6	50.5	48.8	43.2
250	38.3	59.5	50.5	48.8

**Tabla 3. Resultados obtenidos por el MEF (mediante Ansys).**

Carga (kg)	Intacta	Anterior	Esfuerzo obtenido (MPa)			Superior
			Posterior	Derecha	Izquierda	
150	0.303	1.80	9.19	2.63	5.88	1.13
200	0.304	2.40	12.2	2.52	7.83	1.50
250	0.510	3.00	15.3	4.36	9.80	1.88



los esfuerzos y los mínimos incrementos porcentuales, esto tiene su explicación desde el punto de vista biomecánico, y se debe a la pérdida o disminución de las propiedades biomecánicas, ya que los elementos que componen la columna vertebral van perdiendo su capacidad de recuperación, debido al daño físico que ha sufrido y a las condiciones a que se encuentra sometida.

Similares tendencias obtenemos en nuestro modelo numérico desarrollado por elementos finitos; al igual que en el modelo experimental, observamos que los mínimos valores de los esfuerzos se obtienen cuando se aplica la carga de 150 kg y los máximos valores cuando se aplica la fuerza de 250 kg. Al dañar la parte anterior o posterior del disco intervertebral, es cuando se obtienen los valores de esfuerzos de compresión más altos, por lo tanto, ésta es la zona más crítica en nuestro análisis y son las zonas más sensibles a sufrir o incrementar una fractura existente, debido a las cargas que soporta.

Estos resultados obtenidos para los esfuerzos de compresión coinciden con los obtenidos por Hongo,<sup>10</sup> Choon-Ki,<sup>13</sup> Wang Jam-Lin<sup>18</sup> y Hansper Frei<sup>6</sup> y confirman lo encontrado por Kirkaldy-Willis,<sup>12</sup> que menciona que cuando existe una degeneración o fractura del disco intervertebral, se debe a exceso de esfuerzos; ésta es la tendencia encontrada en este estudio, donde el incremento de los esfuerzos varía dependiendo del área afectada del disco.

Esto indica que el disco intervertebral deja de hacer su función de disipador de energía cuando se encuentra dañado, pero no deja de cumplir su función de distribuidor de esfuerzos, sólo que al existir el daño, los niveles de esfuerzo distribuidos a lo largo del cuerpo vertebral indudablemente se ven incrementados.

La explicación del aumento de esfuerzos en el cuerpo vertebral central radica en el concepto mismo de esfuerzo desde su concepción física. Se sabe que el esfuerzo es la respuesta interna del material ante sollicitaciones externas y se mide por medio de la fuerza presente en un elemento por unidad de área, en el caso del disco intervertebral intacto el área que se tiene para soportar la carga es máxima, de esta manera tiene mayor capacidad de absorber una gran cantidad de energía que recibe y de distribuir de una manera determinada el esfuerzo al cuerpo vertebral siguiente. Ahora bien, cuando a esa área se le sustrae una porción considerable, el patrón de esfuerzos se ve modificado de manera sustancial, por lo tanto, los resultados obtenidos muestran que cualquier daño en el disco intervertebral, sea anterior, posterior, izquierdo, derecho o superior, incrementa de manera considerable los esfuerzos localizados en el cuerpo vertebral central.

## Conclusiones

Cuando se fractura algún área del disco intervertebral, los esfuerzos de compresión mantienen su tendencia a incrementarse después de ésta, debido a las cargas constantes que soporta.

El área anterior y la posterior del disco intervertebral, son las áreas que más esfuerzos de compresión soportan,

por lo tanto, son las más propensas a lesionarse por las fuerzas a que se encuentra sometida la columna vertebral.

## Agradecimientos

Al Laboratorio de Biomecánica del Centro Nacional de Rehabilitación (CNR) por las facilidades otorgadas para la realización de este trabajo.

## Bibliografía

1. Argoubi M, Shirazi-Adl A: poroelastic creep response analysis of a lumbar motion segment in compression. *J Biomech* 1996; (29)10: 1331-1339.
2. Brown T, Hanson RJ, Yorra AJ: Some mechanical test on the lumbosacral spine with particular reference to the intervertebral disc. *J Bone Joint Surg* 1957; 39A(5): 1135-1164.
3. Calisse J, Rohlmann A, Bergmann G: Estimation of trunk muscle forces using the finite element method and *in vivo* loads measured by telemeterized internal spinal fixation devices. *J Biomech* 1999; 32(7): 727-731.
4. Ebara SE, Iatridis JC, Setton LA, Foster LJ, Mow VC, Weinderaum M: Tensile Properties of nondegenerate human lumbar annulus fibrosus. *Spine* 1996; (21)4: 452-461.
5. Ford CM, Keaveny TM: The dependence of shear failure properties of trabecular bone on apparent density and trabecular orientation. *J Biomech* 1996; (29)10: 1309-1317.
6. Frei H, Oxland TR, Rathonyi GC, Nolte LP: The effect of nucleotomy on lumbar spine mechanics in compression and shear loading. *Spine* 2001; (26)19: 2080-2089.
7. Hirsch C, Nachemson A: New observation on the mechanical behavior of lumbar disc. *Acta Orthop Scand* 1954; 23(4): 254-183.
8. Hirsch C: The mechanical response in normal and degenerated lumbar disc. *J Bone Joint Surg* 1956; 38A: 242.
9. Hirsch C: The reaction of intervertebral disc to compression forces. *J Bone Joint Surg* 1955; 37A(6): 1188-1196.
10. Hongo M, Abe E, Shimada Y, Murai H, Ishikawa N, Sato K: Surface strain distribution on thoracic and lumbar vertebrae under axial compression. The role in burst fractures. *Spine* 1999; (24)12: 1197-1202.
11. Kaigle A, Ekstrom L, Holm S, Rostedt M, Hansson T: *In Vivo* dynamic stiffness of the porcine lumbar spine exposed to cyclic loading: influence of load and degeneration. *J Spinal Disorders* 1998; (11)1: 65-70.
12. Kirkaldy-Willis WH, Wedge JH, Yong-Hing K, Reilly J: Pathology and pathogenesis of lumbar spondylosis and stenosis. *Spine* 1978; 3(4): 319-328.
13. Lee CK, Kim YE, Lee CS, Hong YM, Jung JM, Goel VK: Impact response of the intervertebral disc in a finite element model. *Spine* 2000; 25(19): 2431-2439.
14. Liu XC, Fabry G, Labey L, Van den Bergh L, Van Audekercke R, Molenaers G, Moens P: A New Technique for the three-dimensional study of the spine *in vitro* and *in vivo* by using a motion-analysis system. *J Spinal Disorders* 1997; 10(4): 329-338.
15. Lu YM, Hutton WC, Gharpuray VM: The effect of fluid loss on the viscoelastic intervertebral disc in compression. *J Biomech Eng* 1998; 120(1): 48-54.
16. Markolf KL, Morris JM: The structural components of the intervertebral disc. A study of their contributions to the ability of the disc to withstand compressive forces. *J Bone Joint Surg* 1974; 56(4): 675-687.
17. Sharma M, Langrana NA, Rodríguez J: Modeling of facet articulation as a nonlinear moving contact problem: sensitivity study on lumbar facet response. *J Biomech Eng* 1998; 120(1): 118-125.
18. Wang JL, Panjabi MM, Kato Y, et al: Radiography cannot examine disc injuries secondary to burst fracture: quantitative discomanometry validation. *Spine* 2002; 27(3): 235-240.