

TRACTORES Y MÁQUINAS AGRÍCOLAS
TRACTORS AND AGRICULTURAL MACHINES

Análisis de neumático por elementos finitos con vistas a la determinación de coeficientes de cargas dinámicas en estructuras de máquinas agrícolas

Analysis the tires for finite element to determination coefficient of dynamics loads in structures of agricultural machines

Raudel Flores Moreno¹; Arturo Martínez Rodríguez²; Gelasio Valerio Pacheco Sánchez³; Vladimir Lenin Reyes de la Cruz³; Alberto Iraldo Dávila García⁴

RESUMEN. Las complejidades asociadas al cálculo con exactitud de coeficientes de cargas dinámicas en estructuras de máquinas agrícolas sometidas a cargas de impacto, traen aparejadas otras dificultades relacionadas con el sobredimensionado de las piezas, lo cual da lugar a exceso de peso y gastos adicionales. En el caso de las máquinas agrícolas es de vital importancia el estudio de los sistemas de amortiguación, ya que éstos son capaces de absorber parte de las cargas de impacto disminuyendo las afectaciones que éstas provocan en las estructuras. En el presente trabajo se abordan métodos de cálculo mediante modelación con herramientas de diseño asistido por computadora y análisis por elementos finitos con vistas a conocer la influencia de la presencia de neumáticos en la disminución de los coeficientes de cargas dinámicas que se introducen durante el cálculo de estructuras de máquinas agrícolas sometidas a cargas de impacto. Como resultado de la simulación y evaluación del modelo para un caso concreto, se obtuvo que un neumático típico de maquinas agrícolas (7.50-20-6) con una presión de inflado de 3,10 kg/cm² fue capaz de reducir en un 17,54 % los coeficientes de cargas dinámicas a aplicar durante el cálculo de resistencia del puente trasero de un remolque agrícola típico de 4 t, suponiendo un impacto provocado por una altura de caída de solo 5 cm.

Palabras clave: impacto, elementos finitos, neumáticos

ABSTRACT. The complexities associated to the calculation with accuracy of dynamic loads coefficients in structures of agricultural machines subjected to impact loads, bring harnessed other difficulties related with over-sized of the pieces, that causes overweight and additional expenses. In the case of the agricultural machines it is of vital importance the study of damping systems, which absorb part of the impact loads diminishing the affectations in those structures. Presently work calculation methods are approached by means of computer aid design tools and finite element analysis with a view to knowing the influence of the presence of tires in the decrease of the coefficients of dynamic loads during the calculation of structures of agricultural machines subjected to impact loads. As a result of the simulation and evaluation of the model for a concrete case, it was obtained that a typical agricultural tire (7.50-20-6) with interior pressure of 3,10 kg/cm² was able to reduce in 17,54% the coefficients of dynamic loads to apply during the calculation of resistance of the back bridge of a typical agricultural tow of 4 t, supposing an impact caused by a relatively small impact caused by a 5 cm height fall.

Keywords: impact, FEA, tires.

Recibido 04/04/09, aprobado 21/07/10, trabajo 48/10, investigación.

¹ Ing., Adiestrado, Universidad Agraria de La Habana (UNAH). Centro de Mecanización Agropecuaria, Apto. Postal: 18-19, San José de las Lajas, La Habana, Cuba, CP:32 700, E-✉: raudelfm@isch.edu.cu

² Dr.Cs., Inv.Tit., Centro de Mecanización Agropecuaria de la UNAH

³ Estudiante, Universidad Autónoma Chapingo. México, Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola (DIMA).

⁴ Ing. Egresado, Facultad de Ciencias Técnicas de la UNAH.

INTRODUCCIÓN

Las exigentes condiciones de los terrenos y características pesadas de los suelos, hacen habitual en la agricultura cubana los ejemplos de máquinas e implementos, tanto de fabricación nacional como de importación, que sufren deformaciones en su estructura o roturas frecuentes en sus órganos de trabajo.

La determinación de coeficientes de cargas dinámicas que posibiliten obtener, con un grado de exactitud aceptable, los estados tensionales y deformacionales en piezas y estructuras sometidas a cargas de impacto, presenta un alto nivel de dificultad, sobre todo cuando los elementos sometidos a la acción de dichas cargas presentan una configuración que no sea simple, siendo necesario implementar otros métodos que simplifiquen el cálculo y permitan abordar casos no contemplados como típicos.

En el caso de acciones dinámicas de impacto los métodos menos rigurosos de determinación de coeficientes de cargas dinámicas, contemplan el cálculo de la energía potencial gravitatoria o de energía cinética del cuerpo que impacta, así como la energía de deformación del cuerpo impactado (Burr, 1995; Pisarenko, 1989).

Sin embargo, otros métodos más rigurosos, consideran además la energía cinética del cuerpo impactado, y tiene en cuenta el efecto de la masa de dicho cuerpo, lo cual ha sido demostrado que incide en los resultados finales del cálculo, excepto cuando la masa del elemento impactado es muy inferior a la del elemento que impacta (Martínez *et al.*, 2009).

Por lo general este tipo de determinación implica operaciones complejas, tales como hallar la ecuación de la curva elástica de la pieza o estructura y determinar la velocidad a partir de la derivada con respecto al tiempo de la deformación (Roark y Young, 1989). Este tipo de cálculo ha sido realizado para casos típicos (los más sencillos) de vigas sometidas a determinados tipos de solicitaciones, ofreciéndose en manuales y libros los factores de corrección que permiten determinar, para estos casos tipos, los coeficientes de cargas dinámicas.

Sin embargo, en los casos con algún grado de complejidad, o que sencillamente se diferencien de los casos típicos, se incrementa notablemente el nivel de dificultad en los cálculos analíticos.

En lo relacionado con la consideración y cálculo de coeficientes de cargas dinámicas durante el cálculo de elementos de máquinas agrícolas, solo se reporta en Cuba una investigación realizada por Goitizolo (2007), en la que aplica el método tradicional de Pisarenko (1989), durante el cálculo de un puente delantero de tractor al que se le incrementa la capacidad de paso.

Modernamente, el método de los elementos finitos ha venido empleándose con éxito no solo en el análisis de estructuras si no que también se han realizado estudios en neumáticos como importantes elementos amortiguadores, debido a que en la mayoría de los casos son los primeros en recibir los impactos, esto se debe a que todo el tiempo se encuentran en contacto con la superficie del suelo y en el caso particular de la maquinaria agrícola deben transitar por terrenos irregulares con la existencia de obstáculos físicos que inciden directamente sobre ellos.

Los primeros trabajos de aplicación del MEF donde se tienen en cuenta los neumáticos, se realizaron en el estudio de interacción neumático-suelo que se hicieron a finales de la década del 60 y principios del 70, estos fueron publicados por Perumpral (1969), Perumpral *et al.* (1971), Coleman y Perumpral (1974), Yong y Fattah (1976), Yong *et al.* (1978). Pero es importante destacar que en estos estudios no se representa la interacción neumático-suelo sólo se simula el efecto de una presión uniforme, distribuida sobre un área de contacto circular aplicada a una superficie rígida o deformable o en algunos casos como la acción de una rueda rígida.

Varios investigadores consideran que la más exacta aproximación del desempeño de un neumático fue hecha en el Instituto de Investigaciones del Automóvil, en la Universidad de las Fuerzas Armadas de Alemania, en Hamburgo, por Aubel (1994), con fines de estudios de traficabilidad. En este modelo se representa por separado el neumático y el suelo, los cuales interactúan durante la simulación. Sin embargo, el neumático es desarrollado por una banda más o menos elástica alrededor de una llanta, el efecto del neumático lleno de aire no se representa. Este modelo fue mejorado por Fervers (1999), llevando a una representación plana todas las partes componentes del neumático, simulando además, el efecto de la presión de inflado y la transmisión de fuerzas por la carcasa, entre la llanta y la banda de rodadura (Schmid, 1995; Shoop, 2001).

El comportamiento mecánico de los neumáticos ha sido modelado en computadora por diversos autores. Nackenhorst y Zieffle (2005), usan procedimientos numéricos que consideran los problemas de contacto entre los elementos, incluyendo materiales provistos de elasticidad.

Bolarinwa y Olatunbosun (2004), realizan la modelación de un neumático mediante elementos finitos, lo que les permite modelar el efecto de explosión del neumático cuando es inflado a presiones más allá de la máxima recomendada por el fabricante. Para el análisis emplean un modelo procesado mediante el programa ABACUS.

Kazuyuki Kabe y Masataka Koishi (2000), aplicaron el método por elementos finitos para el estudio de neumáticos, la mayoría de estos análisis fueron realizados de forma estática, debido a que los neumáticos constituyen una estructura demasiado complejo para su modelación debido a la cantidad de elementos que posee en su interior.

El presente trabajo está dirigido a determinar, a partir de métodos basados en el empleo de herramientas de diseño asistido por computadora, en particular el método de los elementos finitos, el efecto de un neumático agrícola como elemento amortiguador en estructuras de máquinas agrícolas sometidas a cargas de impacto.

MATERIALES Y MÉTODOS

Método empleado para la determinación de los coeficientes de cargas dinámicas

En un estudio realizado por Martínez *et al.* (2009), se abordó la comparación de los resultados de los cálculos efectuados

por dos métodos tradicionales de cálculo de coeficientes de cargas dinámicas, de manera de poder valorar el error en la exactitud de los cálculos que implica el no considerar la masa del cuerpo impactado y poder determinar si existe diferencia o no en el empleo de un método con respecto a otro.

Según dicho estudio se determinó que para valores de la masa impactada inferiores al de la masa del objeto que impacta, la diferencia entre los coeficientes de cargas dinámicas calculados por ambos métodos no es significativa y que esa

diferencia aumenta cuando se incrementa la masa del cuerpo impactado, resultando hasta un 60% mayor el coeficiente calculado por el método simplificado cuando la masa del elemento golpeado es 10 veces superior a la del cuerpo que impacta.

En la Tabla 1 se muestra los datos de las masas del cuerpo impactado (neumático 7.50-20-6), y la del cuerpo que impacta (remolque agrícola de 4t de capacidad de carga), objetos de estudio en el presente trabajo.

TABLA 1. Masa de los objetos de estudio

Masa del remolque agrícola de 4 t distribuido homogéneamente para cada lado, kg	Masa del neumático, kg	Capacidad de carga que soporta el neumático a una máxima presión de inflado, kg
2 000	110,08	1 000

Analizando estos datos, puede determinarse que el neumático agrícola, que se considera el objeto impactado con respecto al cuerpo que impacta (remolque agrícola), poseen una relación masa impactada/masa que impacta de 1/9, siendo factible aplicar el método tradicional más sencillo (Pisarenko, 1989) para la determinación de los coeficientes de cargas dinámicas (kd), el cual no tiene en cuenta la masa del cuerpo impactado. Este método parte del planteamiento de que la energía potencial del cuerpo que impacta se convierte en energía potencial elástica que acumula el cuerpo impactado durante la deformación, determinándose las tensiones dinámicas máximas ($\sigma_{d\max}$) durante la flexión provocada por el impacto por medio de la expresión:

$$\sigma_{d\max} = kd \cdot \sigma_{est\max} \tag{1}$$

donde:

σ_{est} - tensión estática;

kd - coeficiente de cargas dinámicas (Pisarenko, 1989).

El método tradicional más sencillo está dado por la expresión:

$$kd = 1 + \sqrt{1 + \frac{2H}{\delta_{est}}} \tag{2}$$

donde: δ_{est} -es la flecha máxima de la viga (cuerpo impactado) bajo la carga estática ($m \cdot g$).

El cálculo de las tensiones y deformaciones estáticas en el elemento de amortiguación objeto de estudio, requeridos para la determinación de los coeficientes de cargas dinámicas, se efectuó a partir de la modelación digitalizada de dichos elementos empleando herramientas de diseño asistido por computadora (CAD).

Para la determinación del coeficiente de cargas dinámicas, el valor obtenido de deformación máxima (flecha estática) mediante el análisis por elementos finitos se sustituye en la expresión 2 (Pisarenko, 1989), para cuya evaluación se elaboró un software en soporte Mathcad 2000 Professional. Este software posibilita variar los valores de los diferentes datos de entrada, ofreciendo los resultados, tanto en forma tabulada, como gráfica.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se obtuvo como resultado un modelo digitalizado del neumático de máquinas agrícolas objeto de estudio (7.50-20-6), que posee como dimensiones generales un diámetro exterior D , un diámetro interior d y con un ancho a , como se muestra en la Figura 1.

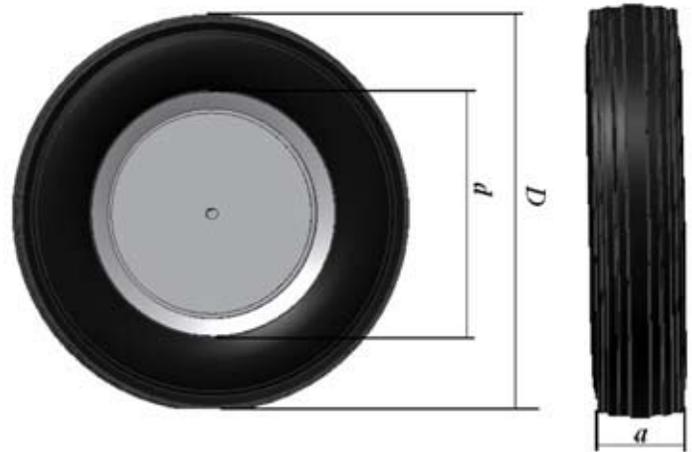


FIGURA 1. Objeto de estudio digitalizado con herramientas CAD-3D.

La presión de inflado determina la carga que puede soportar el neumático objeto de estudio (7.50-20-6), según los datos que se muestran en la Tabla 2, tomados del catálogo de la empresa de fabricación de neumáticos **Poligom** de San José de las Lajas, La Habana. Como se aprecia, a la máxima presión de inflado (3,10 kg/cm²) el neumático es capaz de soportar cargas cercanas a los 1 000 kg.

En la Tabla 3 se muestran las dimensiones generales del neumático, así como los parámetros de entrada empleados para la carga aplicada durante el análisis por elementos finitos.

Las restricciones de frontera se aplicaron en la zona de contacto del neumático con el suelo, el cual se asumió con rigidez similar a la del asfalto.

En la Tabla 4 se muestran las características de la malla utilizada en el modelo de elementos finitos.

TABLA 2. Capacidad de carga del neumático de acuerdo a la presión de inflado

Presión de inflado, kg/cm ²	Cap. de Carga, kg
1, 69	582
1, 97	650
2, 25	709
2, 53	768
2, 82	823
3, 10	905

TABLA 3. Parámetros de entrada empleados para el análisis por elementos finitos durante la aplicación estática de la carga

Diámetro exterior (mm)	Diámetro interior (mm)	Ancho del neumático (mm)	Carga aplicada (N)	Presión aplicada (kgf/cm ²)
945	545	152	10 000	3,10

TABLA 4. Característica de la malla

Elemento	Tipo de malla	Tipo de enmallado	Calidad de la malla	Tamaño del elemento (m)	Tolerancia (m)	Nodos	Elementos
Neumático delantero de tractor	Malla sólida	Estándar	Alto	0,030495	0,0015247	8 181	29 493

En la Figura 2 se muestra el mallado realizado para el análisis, así como los lugares de aplicación de las cargas y la presión en el interior del neumático (color rojo), y las restricciones (color verde). El nivel de carga aplicado fue de 10 000 N correspondiente con la capacidad de presión de aire suministrado al neumático (3, 10 kg/cm²).

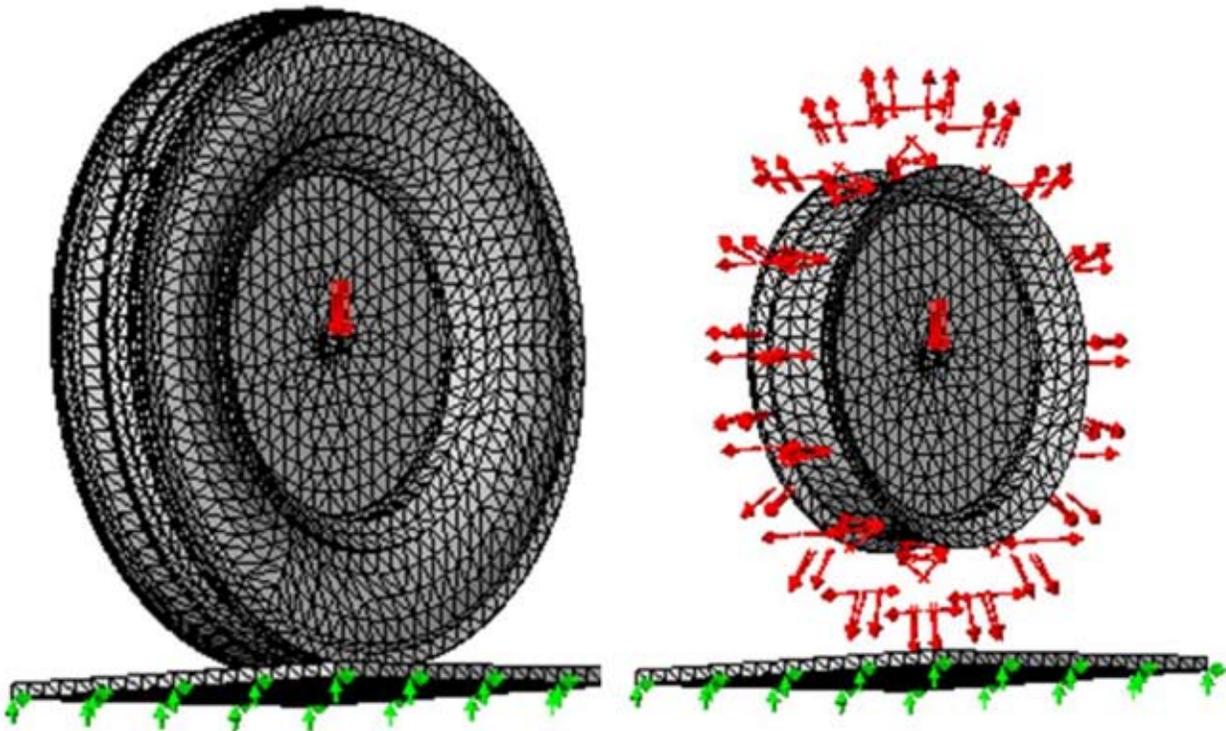


FIGURA 2. Mallado y aplicación de cargas, presión y restricciones durante el análisis por elementos finitos.

En la Figura 3 se muestra la distribución de tensiones equivalentes (Criterio de Von Mises) en el ensamble para una carga aplicada de 10 000 N, pudiendo apreciarse que las tensiones máximas no superan los 60 MPa.

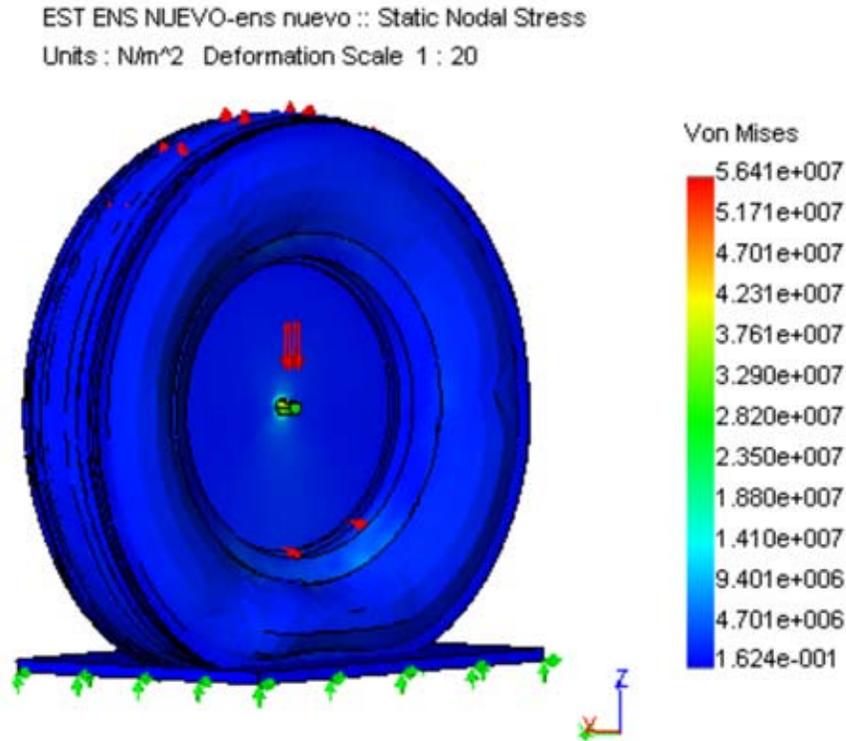


FIGURA 3. Distribución de las tensiones en el ensamble.

La Figura 4 muestra una vista isométrica de la deformación que sufre el ensamble bajo la carga aplicada en el eje Z. El valor de la deformación máxima correspondió a 0,284 cm, produciéndose un desplazamiento del eje del neumático de 0,255 cm como se aprecia en la figura.

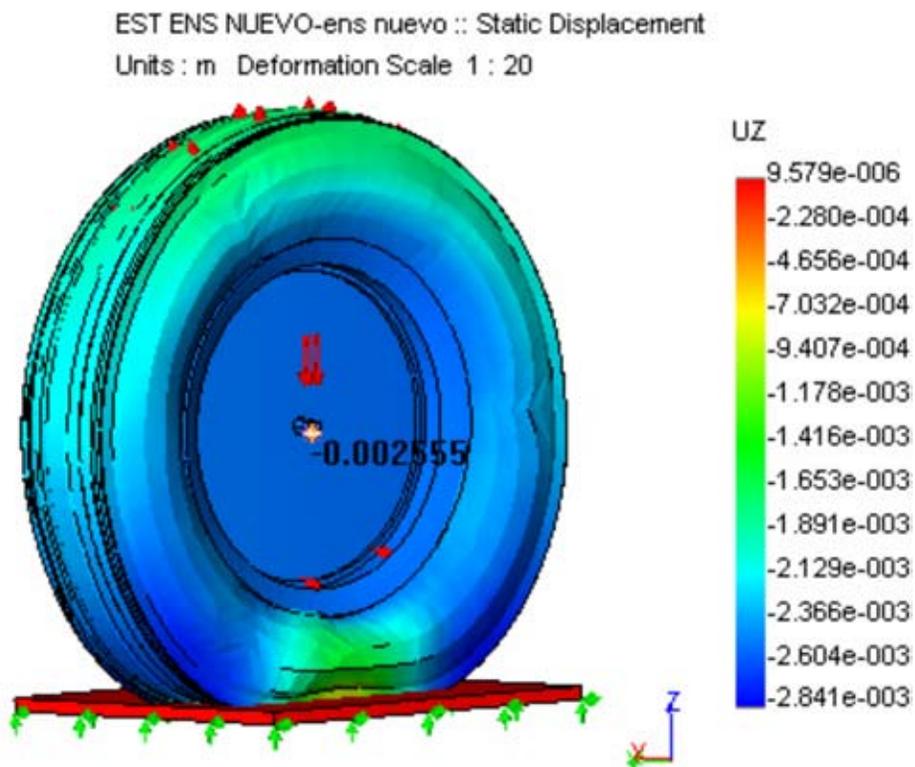


FIGURA 4. Distribución de los desplazamientos.

En la Tabla 5 se muestran los resultados de la determinación de tensiones y desplazamientos en el neumático típico de máquinas agrícolas, bajo la acción de cargas estáticas mediante análisis por elementos finitos.

TABLA 5. Resultados de tensiones y deformaciones

Tensiones máximas (MPa)	Tensiones mínimas (MPa)	Desplazamiento máxima (cm)	Desplazamiento mínima (cm)	Desplazamiento en el eje del neumático (cm)
56,41	4,70	0,28	0,12	0,25

En la Figura 5 se muestra la corrida del software para obtener el resultado del coeficiente de carga dinámica en el neumático de máquinas agrícolas. En la Figura se aprecia que para un rango evaluado ($H = 0..5$ cm) el coeficiente de cargas dinámicas k_d en el objeto de estudio (neumático típico de máquinas agrícolas), asume valores entre 2 y 7,336.

Multiplicando el coeficiente obtenido para cada altura del impacto, por la tensión o la deformación estática, entonces se determinan las tensiones o deformaciones en condiciones dinámicas.

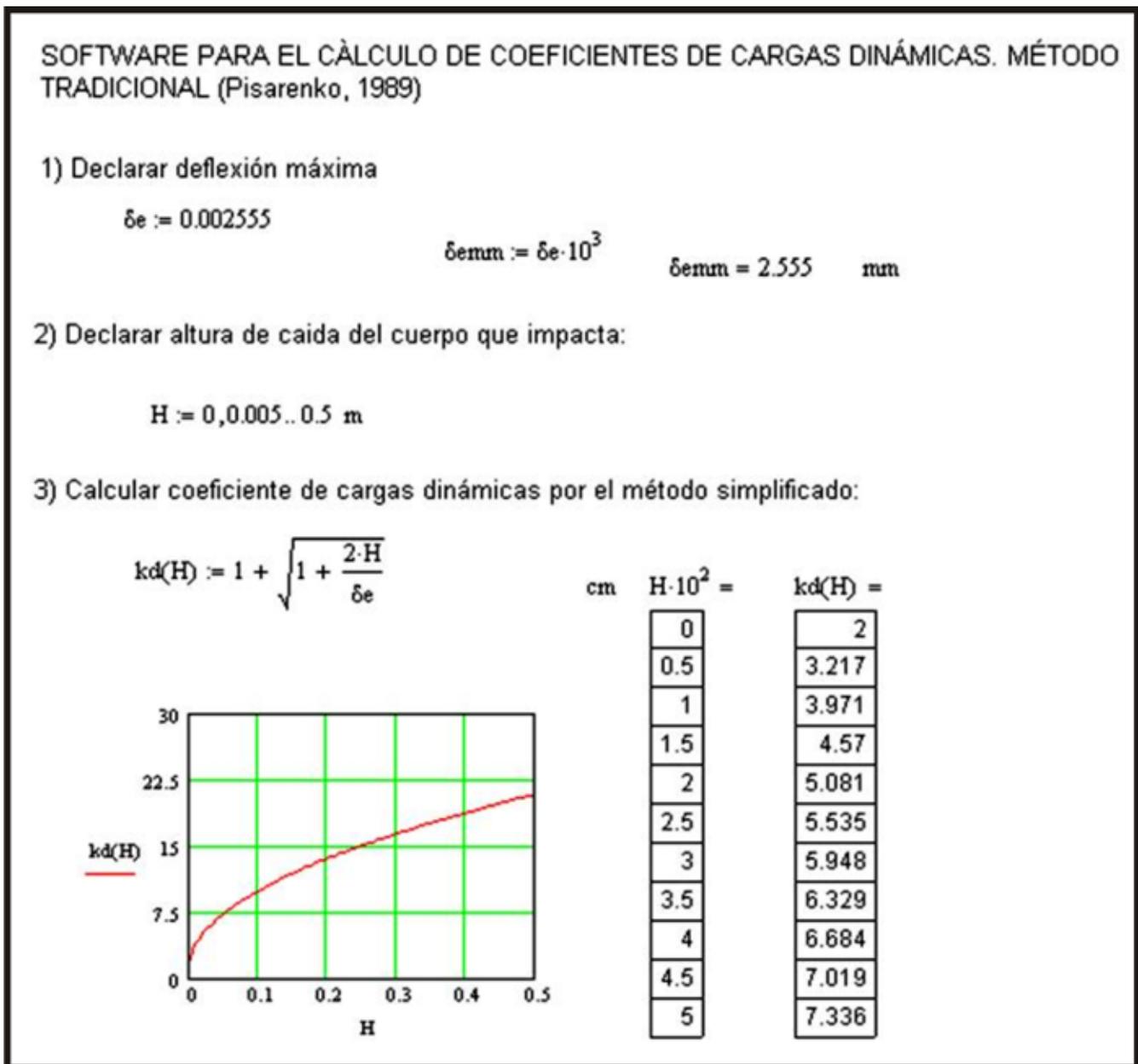


FIGURA 5. Resultados del cálculo de coeficientes de cargas dinámicas por métodos tradicionales para neumático típico de máquinas agrícolas.

En un estudio anterior de Flores (2009), se determinó para la misma estructura sin estar soportada por neumáticos, una deflexión estática máxima del eje de 3,99 mm, alcanzando el coeficiente de cargas dinámicas para una altura de impacto de 5 cm un valor de 6,1. Añadiendo a esta deflexión (3.99 mm), la provocada en el punto de apoyo del eje producto de la acción amortiguadora del neumático (2.5 mm) se obtiene una deflexión estática total de 6,54 mm, para la cual el coeficiente de cargas dinámicas se reduce a 5,036, lo que representa una disminución de un 17,5% en dicho coeficiente.

Se determinó, para la misma estructura sin estar soportada por neumáticos, una deflexión estática máxima del eje de 3,99 mm, alcanzando el coeficiente de cargas dinámicas para una altura de impacto de 5 cm un valor de 6,1. Añadiendo a esta deflexión (3.99 mm), la provocada en el punto de apoyo del eje producto de la acción amortiguadora del neumático (2.5 mm) se

obtiene una deflexión estática total de 6,54 mm, para la cual el coeficiente de cargas dinámicas se reduce a 5,036, lo que representa una disminución de un 17,5% en dicho coeficiente.

CONCLUSIONES

- El desplazamiento estático del tren trasero del remolque objeto de estudio, soportado por neumáticos típicos (7.50-20-6), obtenido mediante el análisis por elementos finitos, alcanzó 0,255 cm para una presión de inflado de 3,10 kg/cm².
- La presencia en el tren trasero del neumático típico objeto de estudio, con una presión de inflado de 3,10 kg/cm², fue capaz de reducir en un 17,5% el coeficiente de cargas dinámicas a aplicar durante el cálculo de la estructura del remolque agrícola objeto de estudio, para una altura de impacto relativamente pequeña de 50 mm.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AUBEL, T.H.: *Simulationsverfahren zur untersuchung der wechselwirkung zwischen reifen und nachgiebiger fahrbahn auf der basis der Finite Elemente Methode*, Tesis (en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas), Instituto de Ingeniería Automotriz de la Universidad de las Fuerzas Armadas, Hamburgo, 1994.
- BOLARINWA, E.O. and A OLATUNBOSUN: "Finite element simulation of the tyre burst test", Proc. Instn Mech. Engrs Part D: J. Automobile Engineering, Vol. 218, 2004.
- BURR A.H. and J.B.CHEATHAM. *Mechanical Analysis and Desing*, 2ª edición, cap. 14, Prentice hall: Englewood Cliffs, N.J. USA, 1995.
- COLEMAN, G.E. and J.V. PERUMPRAL: "The finite element analysis of soil compaction", *Transaction of ASAE*, 17: 856-860, 1974.
- FERVERS, W.: *Phänomene von luftreifen und Geländeböden—Untersuchungen mit FEM*. 210pp., (Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias), Universität der Bundeswehr Hamburg—Institut für kraftfahrwesen und kolbenmaschinen, Editorial Shaker Verlag, Hamburg, 1999.
- FLORES, R y A. MARTÍNEZ: "Análisis por elementos finitos de cargas de impacto. Estudio de caso de viga de tren de rodaje de remolque agrícola", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 18(4): 21-27, 2009.
- GOITIZOLO, R.; L. VILLA; E. ZAYAS; P.M. HERNÁNDEZ; J.G. NOA y H. HERNÁNDEZ: "Modificación del Alto Despeje del Tractor YUMZ 6M", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 16(4): 11-16, 2007.
- KAZUYUKI, K.; K. MASATAKA; R. YOKOHAMA; O. HIRATSUKA: *Tire cornering simulation using finite element analysis*. Computational Mechanics Lab. Research and Development Center, Co., 2-1, Kanagawa 254-8601, Japan, 2000.
- MARTÍNEZ, R. A.; R. FLORES y J. SAMÁ: "Influencia de la masa del cuerpo impactado sobre los coeficientes de cargas dinámicas calculados por métodos tradicionales", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 18(2): 22-26, 2009.
- NACKENHORST, U.; M. ZIEFLE: "Finite element modelling of rolling tires". *Universität Hannover, Institut für Baumechanik und Numerische Mechanik Allemagne*, 58(6):322-326, 2005.
- PERUMPRAL, J.V.: *The finite element method for predicting the stress distribution and soil deformation under tractive device*. Tesis (en opción al grado científico de Doctor en Ciencias). Purdue University, Lafayette, Indiana, 1969.
- PERUMPRAL, J.V.; J.B. LILJEDAHL; W.H. PERLOFF: "The finite element method for predicting the stress distribution and soil deformation under a tractive device". *Transaction of ASAE*, 14: 1184-1188, 1971.
- PISARENKO, G.S.: *Manual de Resistencia*, 2ª Reimpresión, Moscú, URSS, 1989.
- ROARK, R.J. and W.C. YOUNG: *Formulas for stress and Strain* 6ª Edición, McGraw-Hill: Nueva York, 1989.
- SCHMID, I.: "Interaction of vehicle and terrain results from 10 years research at IKK". *Journal of terramechanics*, 32(1): 3-26, 1995.
- SHOOP, A.S.: *Finite element modeling of tire terrain interaction*, US Army Corps of Engineers, erdc/crrel tr, 01-16, 2001.
- YONG, R.N.; E.A. FATTAH and R. BOOSINUK: "Prediction of wheel-soil interaction and performance using the finite element method", *Journal of Terramechanics*, 15(1):43-63, 1978.
- YONG, R.N. and E.A. FATTAH: "Prediction of wheel-soil interaction and performance using finite element method", *Journal of Terramechanics*, 13(4): 227-240, 1976.