



Evaluation of Methods to Calculate Dynamic Load Coefficients

ORIGINAL ARTICLE | ARTÍCULO ORIGINAL

Evaluación de métodos para el cálculo de coeficientes de cargas dinámicas

MSc. Raudel Flores-Moreno^{*}, Dr. Gilberto de Jesús López-Canteñes¹, Dr.Cs. Arturo Martínez -Rodríguez¹¹, Dr. Eugenio Romantchik-Kriuchkova¹, MSc. Geisy Hernández-Cuello¹¹

¹ Universidad Autónoma Chapingo (UACH), Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola (DIMA), Texcoco, Chapingo, Estado de México, México.

¹¹ Universidad Agraria de La Habana (UNAH), Centro de Mecanización Agropecuaria (CEMA), San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba.

ABSTRACT. Dynamic forces and impact loads usually act on agricultural machines, causing breakages or failures. That is due to the nature of the impact loads, which are of short duration and decrease the capacity of the material of absorbing the deformation energy. The calculation methods that allow obtaining dynamic load coefficients require complex operations. In the present investigation, three methodologies for obtaining dynamic load coefficients were evaluated and compared: analytical method (MA), numerical simulation by the finite element method (MEF) and experimental method (Mexp). The coefficients of dynamic loads obtained from the MEF reached a relative difference that oscillated between 3.479 and 5.112%, based on the experimental results. For the analytical method, compared to the experimental results, a relative difference between 21.820 and 27.201% was reached, which is higher than that obtained by the numerical simulation method.

Keywords: Finite elements; dynamic efforts; Impact loads; border conditions.

RESUMEN. En las máquinas agrícolas, por lo general actúan fuerzas dinámicas, en particular cargas de impacto, lo que provoca roturas o fallas frecuentes. Esto se debe al carácter impulsivo de estos tipos de cargas, las cuales presentan corta duración en el tiempo, disminuyendo la capacidad de las estructuras y piezas para absorber la energía de deformación. Los métodos de cálculo que permiten obtener los coeficientes de cargas dinámicas, requieren operaciones complejas. En la presente investigación se evalúan y comparan tres metodologías para la obtención de coeficientes de cargas dinámicas: el método analítico tradicional, la simulación numérica basada en el análisis por elementos finitos y el método experimental. Tomando los resultados obtenidos experimentalmente como base comparativa, se obtuvo que los coeficientes de cargas dinámicas obtenidos por el método analítico alcanzaron diferencias relativas al método experimental del orden de 21.82 y 27.20 %, mientras que los resultados obtenidos empleando el método de los elementos finitos alcanzaron una diferencia relativa mucho menor, la cual osciló entre 3.48 y 5.11%, demostrando este método una alta aproximación a la determinación experimental.

Palabras clave: Elementos finitos; esfuerzos dinámicos; Cargas de impacto; condiciones de frontera.

INTRODUCTION

Precise and scientifically justified calculations of dynamic load coefficients guarantee efficient designs and a considerable saving of materials in the manufacture of prototypes.

INTRODUCCIÓN

Poder contar con cálculos precisos y científicamente justificados de coeficientes de cargas dinámicas garantiza diseños eficientes y un ahorro considerable de materiales en la fabricación de prototipos.

*Author for correspondence: Raudel Flores Moreno: e-mail: raudelfm2014@hotmail.com

Received: 12/12/2018.

Approved: 02/09/2019.

The determination of the stresses caused by the dynamic loads is complex depending on factors such as contact area in the impact and the variation process of the contact forces as a function of time. In this sense, most dynamic cases are quantified experimentally and for simple calculations, equivalent static charges are used. The determination of the coefficients of dynamic loads in structures subjected to impact actions, using analytical methods, represents a challenge due to their high complexity.

The method of finite elements, as a numerical method of computer-assisted discretization, is an alternative way to the analytical method of continuous medium analysis, which facilitates the solution of complex engineering problems, being considered a tool of undoubted practical value and great application worldwide. There are important results derived from the use of this method, among them the ones reported by Martínez *et al.* (2007); Liu *et al.* (2013) and Untaroiu *et al.* (2013). Also, those referred by Vavalle *et al.* (2013); Feng & Aymerich (2014); Nadal *et al.* (2014); Zhanbiao *et al.* (2014); Singh & Singh (2015); Zhao *et al.* (2015); Kong *et al.* (2016); Xiaofei *et al.* (2016) and Castro & Güiza (2017)

The objective of this work was to evaluate and compare three methodologies for determining dynamic load coefficients: the traditional analytical method (MA), the numerical simulation based on the finite element analysis (MEF) and the experimental method (Mexp), taking this last as a comparison and validation pattern of the theoretical methods.

METHODS

A multifactorial type design was used, using two factors as independent variables that correspond to the height and the impact load, with ten and three levels, respectively. The impact height levels were from 0 to 1 m with intervals of 0.1 m and the load levels were 25; 400 and 800 N.

For the three methods analyzed, the coefficient of dynamic loads was determined starting from the determination of the static deflection produced on a mechanical system taken as an object of study under the action of static charges with a magnitude equal to the weight of a body that impacts since a certain height. Once the maximum static deflections of the system under study were determined, the coefficient of dynamic loads was determined using the expression according to Pisarenko and Yakovlev (1979):

$$kd = 1 + \sqrt{1 + \frac{2H}{\delta_{est}}} \quad (1)$$

where:

kd: Coefficient of dynamic loads;

δ_{est} : Deflection or maximum static arrow, which also depends on the solicitation scheme and the support conditions;

H: Height of fall of the body that impacts on the system under study.

In this work, the static deflection of the system under study was determined by the three mentioned methods: the traditional analytical method of the mechanics of materials; the method of finite elements and the experimental method.

La determinación de los esfuerzos originados por las cargas dinámicas resulta compleja, dependiendo de factores tales como la zona de contacto en el impacto y el proceso de variación, en función del tiempo, de las fuerzas de contacto. En este sentido, la mayoría de los casos dinámicos se tratan de cuantificar en forma experimental y para que los cálculos resulten sencillos se utilizan cargas estáticas equivalentes. La determinación de los coeficientes de cargas dinámicas en estructuras sometidas a acciones de impacto, empleando métodos analíticos, representan un reto por su alta complejidad.

El método de los elementos finitos, como método numérico de discretización asistido por computadora, constituye una vía alternativa al método analítico de análisis del medio continuo, que facilita la solución de problemas complejos de ingeniería, siendo considerado una herramienta de indudable valor práctico y de gran aplicación a nivel mundial. Existen resultados importantes derivados del empleo de este método, entre los cuales se encuentran: Martínez *et al.* (2007); Liu *et al.* (2013); Untaroiu *et al.* (2013); Vavalle *et al.* (2013); Feng y Aymerich (2014); Nadal *et al.* (2014); Zhanbiao *et al.* (2014); Singh y Singh (2015); Zhao *et al.* (2015); Kong *et al.* (2016); Xiaofei *et al.* (2016); Castro y Güiza (2017).

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar y comparar tres metodologías de determinación de coeficientes de cargas dinámicas: el método analítico tradicional (MA), la simulación numérica basada en el análisis por elementos finitos (MEF) y el método experimental (Mexp), tomándose este último como patrón de comparación y validación de los métodos teóricos.

MÉTODOS

Se empleó un diseño tipo multifactorial, utilizando 2 factores como variables independientes que corresponden a la altura y la carga de impacto, con diez y tres niveles, respectivamente. Los niveles de cargas fueron 25; 400 y 800 N y para la altura de impacto desde 0 hasta 1 m con intervalos de 0.1 m.

Para los tres métodos analizados, el coeficiente de cargas dinámicas se determinó partiendo de la determinación de la deflexión estática producida sobre un sistema mecánico tomado como objeto de estudio bajo la acción de cargas estáticas con una magnitud igual al peso de un cuerpo que impacta a una determinada altura. Una vez determinadas las deflexiones estáticas máximas del sistema objeto de estudio, el coeficiente de cargas dinámicas se determinó empleando la expresión según Pisarenko y Yakovlev (1979):

$$kd = 1 + \sqrt{1 + \frac{2H}{\delta_{est}}} \quad (1)$$

donde:

kd: Coeficiente de cargas dinámicas;

δ_{est} : deflexión o flecha estática máxima, que depende también del esquema de sollicitación y las condiciones de apoyo;

H: altura de caída del cuerpo que impacta sobre el sistema objeto de estudio.

En este trabajo, la deflexión estática del sistema objeto de estudio fue determinada por los tres métodos mencionados: el método analítico tradicional de la mecánica de materiales; el método de los elementos finitos y el método experimental.

Description of the Mechanical System under Study

As a study object, a beam of square cross section (Table 1) was used in horizontal position and supported at its ends with a joint and a simple support, as shown in Figure 1. In the center of the beam, three levels of load Q (25, 400 and 800 N) were applied to provoke different levels of static deflections (δ). In Table 2, the mechanical properties of the material are shown.

Descripción del sistema mecánico objeto de estudio

Como objeto de estudio se empleó una viga de sección transversal cuadrada (Tabla 1) en posición horizontal y apoyada en sus extremos con una articulación y un simple apoyo, como se muestra en la Figura 1. En el centro de la viga se aplicaban tres niveles de carga Q (25, 400 y 800 N) con vistas a provocar diferentes niveles de deflexiones estáticas (δ). En la Tabla 2 se muestran las propiedades mecánicas del material.

TABLE 1. Description of the system under study
TABLA 1. Descripción del sistema en estudio

Cross section	Side, mm	Mass, kg	Moment of inertia, m^4	Length, mm	Acting load, N
Square	39.09	12	$1.95 \cdot 10^{-7}$	1000	From 25 to 800 at the interval of 25

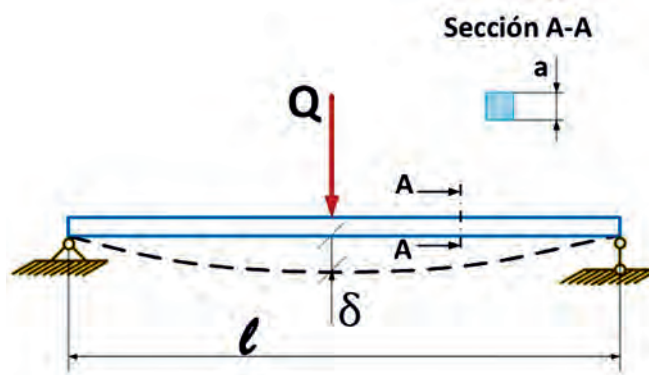


FIGURE 1. Descriptive scheme of the system under study.
FIGURA 1. Esquema descriptivo del sistema objeto de estudio.

TABLE 2. Physical mechanical properties of the beam material
TABLA 2. Propiedades físico mecánicas del material de la viga

Description	Value
Modulus of elasticity	200 000 MPa
Poissoncoefficient	0.29
Density of mass	7900 kgm^{-3}
Limittraction	420.507 MPa
ElasticLimit	351.561 MPa

Source: Warrendale (2001)

Determination of Static Deflections by the Traditional Analytical Method

For the case under study, consisting of a horizontal beam simply supported when the application of the load is made in the center of the beam and the maximum static arrow is given by the expression:

$$\delta_{est} = \frac{Ql^3}{48EJ}, [m] \quad (2)$$

where:

$Q = mg$: weight of the impacting element, kg ms^{-2}

l : length of the beam, m

E - modulus of elasticity of the beam material

J - moment of inertia of the section of the beam

Determinación de las deflexiones estáticas por el método analítico tradicional

Para el caso objeto de estudio, consistente en una viga horizontal simplemente apoyada y cuando la aplicación de la carga se efectúa en el centro de la viga, la flecha estática máxima está dada por la expresión:

$$\delta_{est} = \frac{Ql^3}{48EJ}, [m] \quad (2)$$

donde:

$Q = mg$: peso del elemento que impacta, kg ms^{-2} ;

l : longitud de la viga, m;

E - **módulo de elasticidad del material de la viga;**

J - momento de inercia de la sección de la viga.

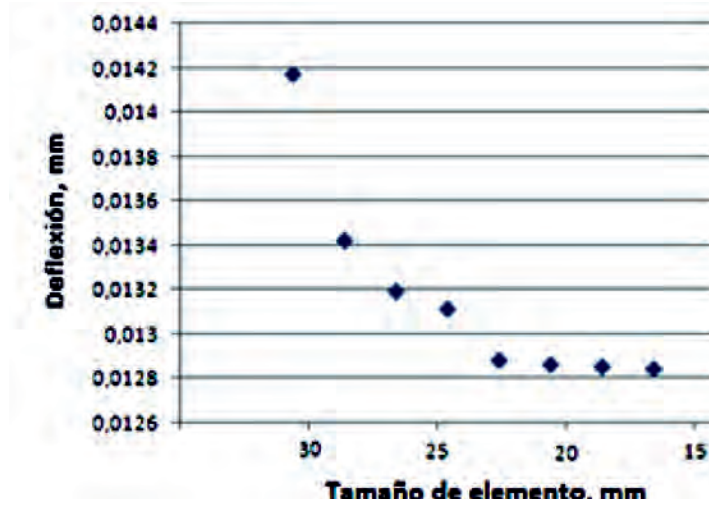


FIGURE 2. Convergence analysis to determine the characteristics of the mesh.
 FIGURA 2. Análisis de convergencia para determinar las características de la malla.

Application of the Method of the Finite Elements (MEF)

The quality of the analysis for finite elements was guaranteed making a convergence study to define the size of appropriate element.

From the element size, the rest of the properties of the mesh are established (Table 3). In Figure 3, a 3D view of the model of the beam with the resulting meshing and boundary conditions is shown, where the restrictions (green arrows) and the statically applied load (red arrows) are represented.

Aplicación del Método de los Elementos Finitos (MEF)

La calidad del análisis por elementos finitos se garantizó efectuando un estudio de convergencia para definir el tamaño de elemento apropiado. La Figura 2, muestra la gráfica de deflexión contra tamaño de elemento apreciándose la estabilidad de los resultados a partir de un tamaño de elemento de 22.5 mm, siendo mucho más estable en 20 mm, por lo que este último fue el valor establecido para generar el mallado.

A partir del tamaño de elemento se establecen el resto de las propiedades de la malla (Tabla 3). En la Figura 3, se representa una vista en 3D del modelo de la viga con el mallado resultante y las condiciones de frontera, donde se aprecia las restricciones (flechas de color verde) y la carga aplicada estáticamente (flechas de color rojo).

TABLE 3. Characteristics of the mesh used in the analysis
 TABLA 3. Características de la malla empleada en el análisis

Parameters	Mesh	Quality	Tolerance	Number of nodes	Number of elements	Size of elements
Description	Solid, Standard	High	0.05 mm	4,340	2,342	20 mm

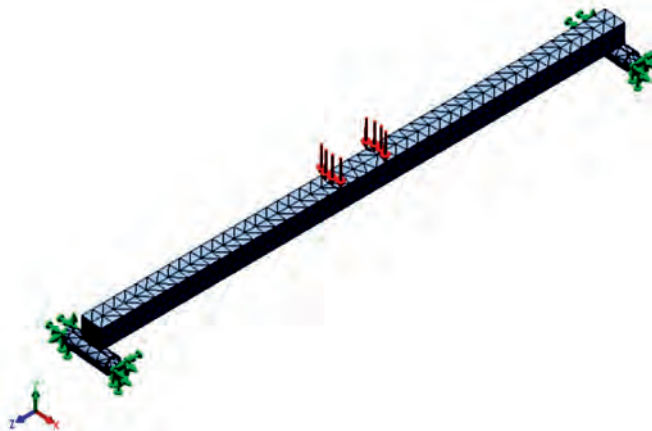


FIGURE 3. 3D model of the beam with the representation of the boundary conditions.
 FIGURA 3. Modelo 3D de la viga con la representación de las condiciones de frontera.

Description of the Experimental Method Used

The experimental determination of the static deformations that allowed determining the coefficients of dynamic loads of the system studied, under different dynamic loads, was carried out by means of electrical extensometry techniques.

On the underside of the center of the beam studied, strain gauges were placed (Figure 4) configured in a quarter of Wheatstone bridge, with the aim of obtaining voltage signals proportional to the unitary deformation (considering the deformations within the elastic limit of the material), produced by static charges of different magnitude. The static charges were obtained by placing weights of 25 N; 400 N and 800 N in the center of the beam and recording the output voltage (e_{est}) of the measurement system. In a similar way, the output voltage (e_{din}) produced by the same applied loads was recorded, dropping the same weights from different heights between 0.1 and 1 m to the center of the beam. For each treatment, three repetitions were made. The quotient of the voltages obtained, for each of the loads and heights applied, allowed obtaining the coefficient of dynamic loads in each case, applying the expression:

$$k_d = \frac{e_{din}}{e_{est}} = \frac{\epsilon_{din}}{\epsilon_{est}} = \frac{\sigma_{din}}{\sigma_{est}} \quad (3)$$

where

e_{est}: is the voltage registered under the action of the loads applied in static form;

e_{din}: is the maximum voltage under the action of the loads applied dynamically (when dropping the weights from different heights);

ε_{est} and ε_{din}: are the unit deformations corresponding to the static and dynamic loads, respectively;

σ_{est} and σ_{din}: are normal stresses corresponding to static and dynamic loads, respectively.

Descripción del método experimental empleado

La determinación experimental de las deformaciones estáticas que permitían determinar los coeficientes de cargas dinámicas del sistema objeto de estudio bajo diferentes cargas dinámicas se efectuó mediante técnicas de extensometría eléctrica.

En la cara inferior del centro de la viga objeto de estudio se colocaron galgas extensométricas (Figura 4) configuradas en un cuarto de puente de Wheatstone, con el objetivo de obtener señales de voltaje proporcionales a la deformación unitaria (considerando las deformaciones dentro del límite elástico del material), producidas por cargas estáticas de diferente magnitud. Las cargas estáticas se obtenían colocando pesos de 25 N; 400 N y 800 N en el centro de la viga y registrando el voltaje de salida (e_{est}) del sistema de medición. De forma similar se registraba el voltaje de salida (e_{din}) producido por las mismas cargas aplicadas dejando caer al centro de la viga los mismos pesos desde diferentes alturas, entre 0.1 y 1 m. Para cada uno de los tratamientos se efectuaron tres repeticiones. El cociente de los voltajes obtenidos, para cada una de las cargas y alturas aplicadas, permitía obtener el coeficiente de cargas dinámicas en cada caso, aplicando la expresión:

$$k_d = \frac{e_{din}}{e_{est}} = \frac{\epsilon_{din}}{\epsilon_{est}} = \frac{\sigma_{din}}{\sigma_{est}} \quad (3)$$

donde:

e_{est}: es el voltaje registrado bajo la acción de las cargas aplicadas en forma estática;

e_{din}: es el voltaje máximo bajo la acción de las cargas aplicadas en forma dinámica (al dejar caer los pesos desde diferentes alturas);

ε_{est} y ε_{din}: son las deformaciones unitarias correspondientes a las cargas estáticas y dinámicas, respectivamente;

σ_{est} y σ_{din}: son esfuerzos normales correspondientes a las cargas estáticas y dinámicas, respectivamente.

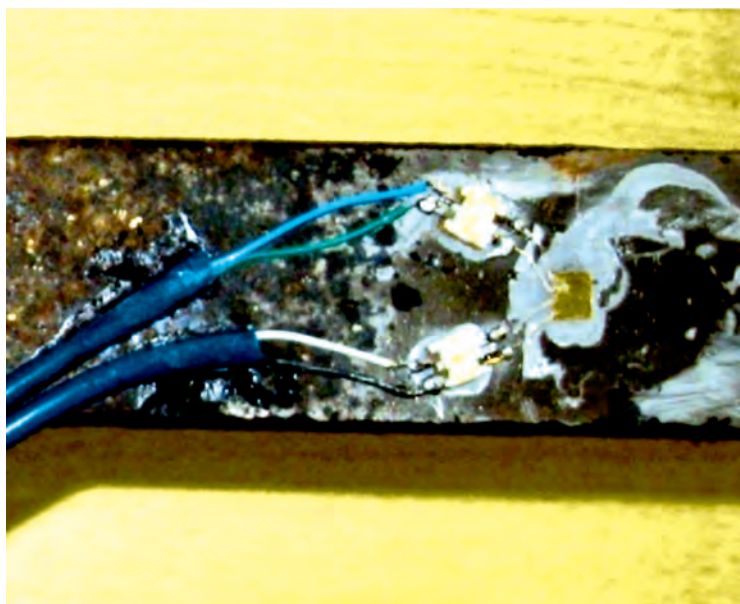


FIGURE 4. Strain gauges stuck on the underside of the beam.
 FIGURA 4. Galgas extensométricas pegadas en la cara inferior de la viga.

The signals coming from the strain gauges (of the order of the mV), were processed in a dynamic amplifier, model KYOWA-YA-520 with amplification modules of type DPM-602B, being amplified up to voltage levels between $\pm 5V$.

The analog signal coming from the amplifier (Figure 5) was digitalized in an analog-digital converter model NATIONAL INSTRUMENTS - NI USB-4431 and introduced at a rate of 100 samples per second in a laptop computer for further statistical processing.

Las señales provenientes de las galgas extensométricas (del orden de los mV), eran procesadas en un amplificador dinámico, modelo KYOWA-YA-520 con módulos de amplificación del tipo DPM-602B, siendo amplificadas hasta niveles de voltaje entre $\pm 5V$.

La señal analógica proveniente del amplificador (Figura 5) era digitalizada en un convertidor análogo-digital modelo NATIONAL INSTRUMENTS - NI USB-4431 e introducida a razón de 100 muestras por segundo en una computadora portátil para su posterior procesamiento estadístico.

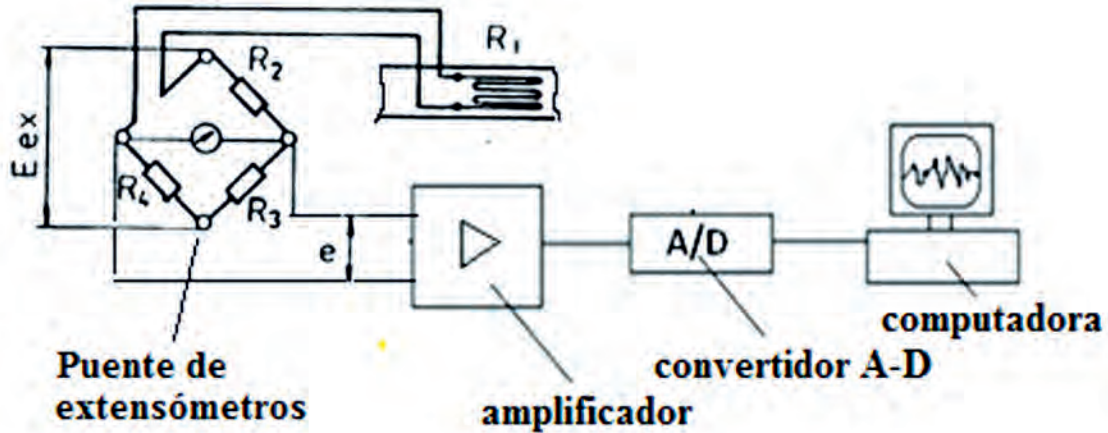


FIGURE 5 Diagram of the instrumentation used during the registration of the signals proportional to the deformation of the beam.
 FIGURA 5 Esquema de la instrumentación empleada durante el registro de las señales proporcionales a la deformación de la viga.

RESULTS AND DISCUSSION

Figure 6 shows one of the outputs of the static analysis by the MEF to determine the unit deformation of the beam under study. When the beam is subjected to 800 N static load, it is observed that the value of the unit strain is $86.976 \mu\text{strain}$, while the result of the stress for that same load value is shown in Figure 7, where it reached a value of 17.3952 MPa.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 6 muestra una de las salidas del análisis estático mediante el MEF para determinar la deformación unitaria de la viga objeto de estudio. Cuando la viga es sometida a 800 N de carga estática, se observa que el valor de la deformación unitaria es de $86.976 \mu\text{strain}$, mientras que el resultado del esfuerzo para ese mismo valor de carga se aprecia en la Figura 7, donde alcanzó un valor de 17.3952 MPa.

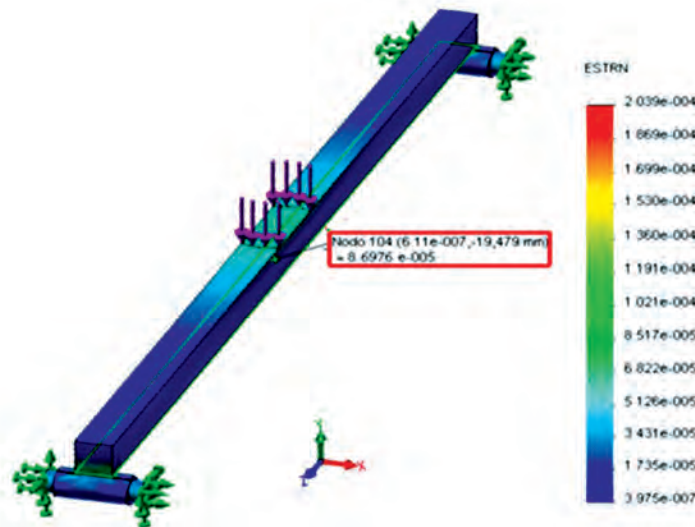


FIGURE 6. Deformations in the center of the beam under the action of a static load of 800 N.
 FIGURA 6. Deformaciones en el centro de la viga bajo la acción de una carga estática de 800 N.

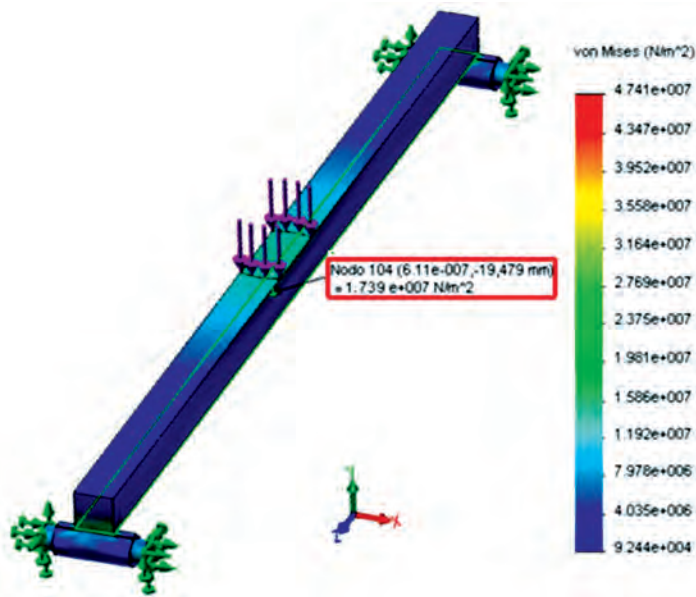


FIGURE 7. Stress in the center of the beam under the action of a static load of 800 N.
 FIGURA 7. Esfuerzo en el centro de la viga bajo la acción de una carga estática de 800 N.

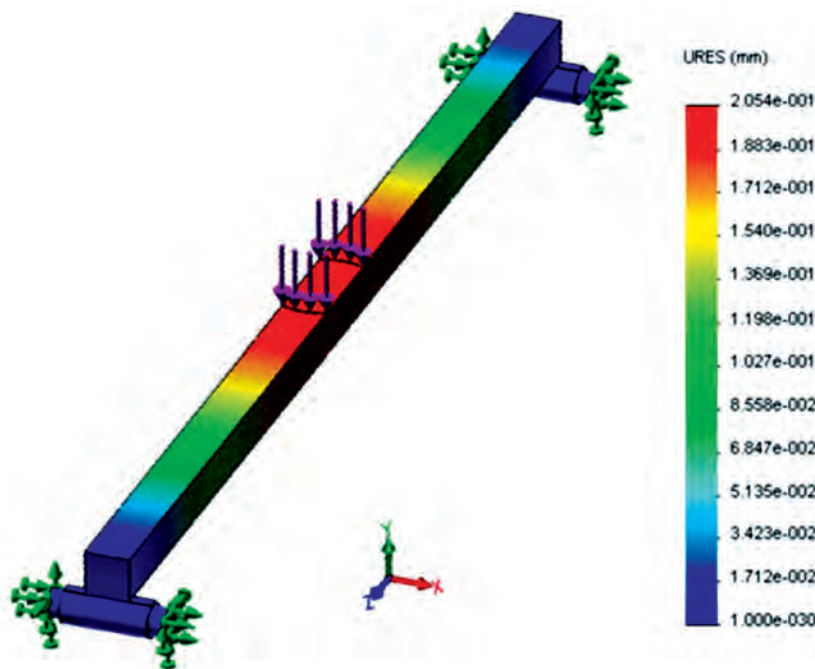


FIGURE 8. Deflection of the beam in the vertical direction for a static load of 800 N by analysis with the finite element method.
 FIGURA 8. Deflexión de la viga en la dirección vertical para una carga estática de 800 N mediante análisis por el método de los elementos finitos.

Experimental Evaluation of the Numerical Simulation

Figure 9 shows two graphs with the cumulative distribution of the deformations predicted with the model analyzed by the MEF and the experimental results. The data obtained showed that the maximum distance between the accumulated distributions of the two samples is $0.03125 \mu\text{strain}$, where the approximate p-value obtained is greater than 0.05, so there is no statistically significant difference between the two distributions for a confidence level of 95%. It was

La Figura8 muestra la deflexión estática de la viga en la dirección del eje Y, donde la deflexión máxima de la viga coincide con la flecha estática y este valor es tomado directamente de la escala, siendo igual a 0.2054 mm.

Evaluación experimental de la simulación numérica

LaFigura 9muestra dos gráficascon la distribución acumulada de las deformaciones predichas por el modelo analizado mediante el MEF y los resultados experimentales. Los datos obtenidosarrojaron que la distancia máxima entre las distribu-

observed that the data obtained for the stresses predicted with the model analyzed by MEF and those calculated from experimental tests coincide with the results obtained for the deformation, this is because the stresses are calculated from the deformations using the law of Hooke.

ciones acumuladas de las dos muestras es de $0.03125 \mu\text{strain}$, donde el p-valor aproximado obtenido es mayor a 0.05, por lo que no existe diferencia estadísticamente significativa entre las dos distribuciones para un nivel de confianza del 95 %. Se observó que los datos obtenidos para los esfuerzos predichos por el modelo analizado mediante MEF y los calculados a partir de pruebas experimentales coinciden con los resultados obtenidos para la deformación, esto se debe a que los esfuerzos están calculados a partir de las deformaciones usando la ley de Hooke.

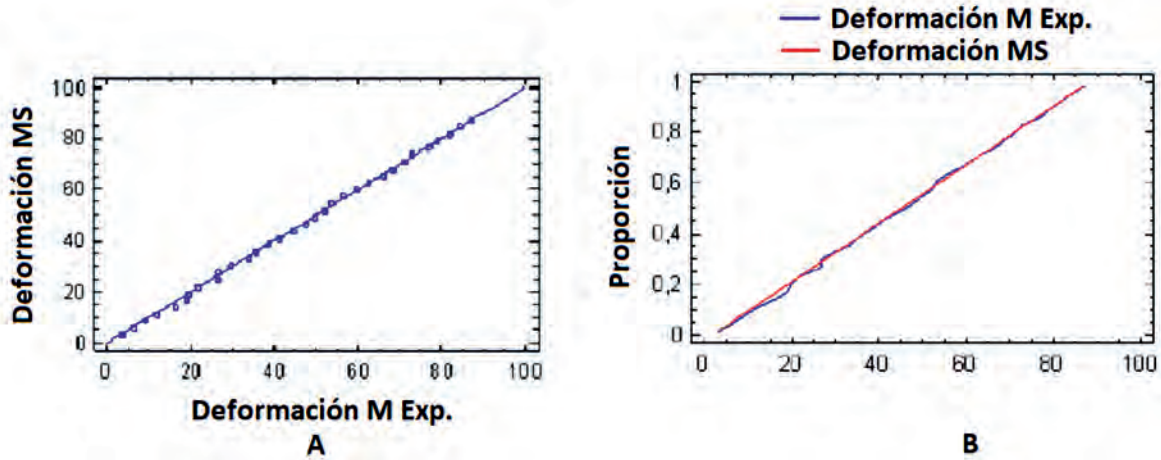


FIGURE 9. Accumulated distribution (A) and distribution function (B) between the deformations predicted by the simulation and those obtained experimentally.
 FIGURA 9. Distribución acumulada (A) y función de distribución (B) entre las deformaciones predichas por la simulación y las obtenidas experimentales.

Figure 10 shows the cumulative distribution graph to compare the deflections predicted with the model analyzed by MEF and the experimental results, which shows that the maximum distances between the accumulated distributions of the two samples are of 0.09375 mm. For the behavior of the predicted and experimental deflection values, an approximate p-value of 0.998965 was obtained. Since it is greater than 0.05, there is no statistically significant difference between the two distributions for a 95% confidence level.

En la Figura 10 se observa el gráfico de distribución acumulada para comparar las deflexiones predichas por el modelo analizado mediante MEF y los resultados experimentales, donde se aprecia que las distancias máximas entre las distribuciones acumuladas de las dos muestras son de 0.09375 mm. Para el comportamiento de los valores de deflexión predicha y experimental se obtuvo un p-valor aproximado de 0.998965, como es mayor que 0.05, no existe diferencia estadísticamente significativa entre las dos distribuciones para un nivel de confianza del 95 %.

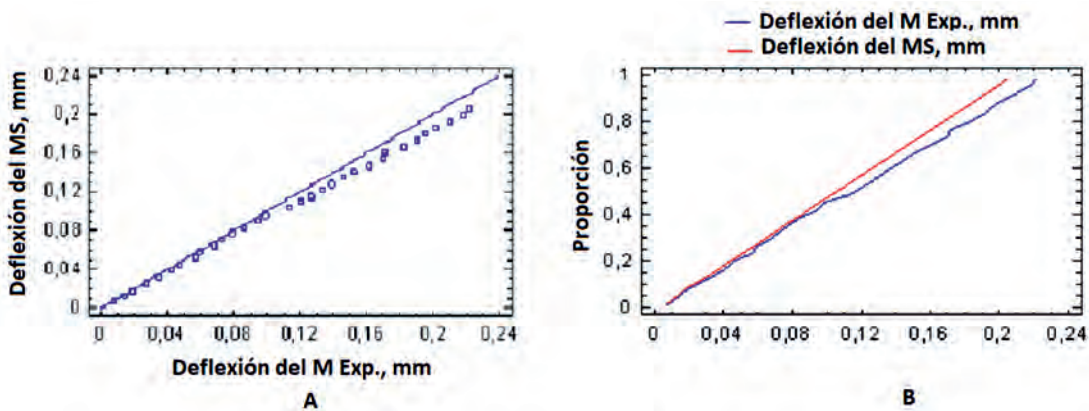


FIGURE 10. Accumulated distribution (A) and distribution function (B) between deflections predicted by the simulation and those obtained experimentally.
 FIGURA 10. Distribución acumulada (A) y función de distribución (B) entre las deflexiones predichas por la simulación y las obtenidas experimentales.

Result of the Coefficients of Dynamic Loads by the Three Methods Studied

Table 4 shows the results of the determination of the dynamic load coefficients by the different methods studied and the

Resultado de los coeficientes de cargas dinámicas por los tres métodos estudiados

En la Tabla 4, se muestran los resultados de la determinación de los coeficientes de cargas dinámicas por los diferentes

relative difference between the methods and the experimental results. It can be seen that the relative difference of the MEF ranged between 3.479 and 5.112%, being substantially lower than the values obtained by the analytical method (MA), which ranged from 21.820 to 27.201%.

The dynamic load coefficients reached values of 391.203 for the analytical case (MA), of 501.001 for the experimental case and a value of 528.047 for when the dynamic load coefficients were calculated from the data obtained via numerical simulation by the method of the finite elements (MEF), with a load of 25 N. The highest values of the coefficients of dynamic loads in the three calculation methods were recorded for the highest height studied (1 m) and with the lowest of the loads applied (25 N). For the same impact height it was determined that the highest values of dynamic load coefficients were recorded for the lower mass impact loads (25 N). At the same impact height, the lowest dynamic load coefficients were obtained while the impact load was greater. The case that the highest coefficient values of dynamic loads were recorded for the lower load is because the increase in the mass of the hitting element causes greater deflections, therefore, the coefficient of dynamic loads decreases, due to its inversely proportional relationship.

métodos estudiados y la diferencia relativa existente entre los métodos y los resultados experimentales. Se aprecia que la diferencia relativa del MEF oscila entre 3.479 y 5.112 %, siendo sustancialmente inferiores a los valores obtenidos para el método analítico (MA) que van desde 21.820 hasta 27.201 %.

Los coeficientes de carga dinámica alcanzaron valores de 391.203 para el caso analítico (MA), de 501.001 para el caso experimental y un valor de 528.047 para cuando se calculan los coeficientes de cargas dinámicas a partir de los datos obtenidos de la simulación numérica por el método de los elementos finitos (MEF), con una carga de 25 N. Los mayores valores de los coeficientes de cargas dinámicas en los tres métodos de cálculo se registraron para la mayor altura estudiada (1 m) y con la menor de las cargas aplicadas (25 N). Para una misma altura de impacto se determinó que los valores más altos de coeficientes de cargas dinámicas se registran para las cargas de impacto de menor masa (25 N). A una misma altura de impacto se obtienen los coeficientes de cargas dinámicas más bajos mientras mayor es la carga que impacta. El caso de que los mayores valores de coeficiente de cargas dinámicas se registren para la menor carga se debe a que el aumento de la masa del elemento que golpea provoca mayores deflexiones por lo que disminuye el coeficiente de cargas dinámicas, debido a su relación inversamente proporcional.

TABLE 4. Relative differences of the dynamic load coefficients by both methods
TABLA 4. Diferencias relativas de los coeficientes de cargas dinámicas por ambos métodos

Impact height; m	Impact load; N	Coefficients of dynamic loads			Relative difference	
		(MA)	(M Exp.)	(MEF)	MA-MExp; %	MEF- MExp; %
0.1	25	124.397	159.117	167.62	21.820	5.344
	400	31.864	42.897	45.141	25.720	5.231
	800	23	31.099	32.22	26.043	3.605
0.2	25	175.51	224.61	236.704	21.860	5.384
	400	44.637	60.243	63.417	25.905	5.269
	800	32	43.555	45.141	26.530	3.641
0.3	25	214.725	274.863	289.677	21.879	5.390
	400	54.44	73.555	77.441	25.987	5.283
	800	38.794	53.115	55.057	26.962	3.656
0.4	25	247.787	317.229	334.335	21.890	5.392
	400	62.704	84.777	89.265	26.037	5.294
	800	44.637	61.174	63.417	27.033	3.667
0.5	25	276.916	354.555	373.679	21.898	5.394
	400	69.986	94.664	99.682	26.069	5.301
	800	49.785	68.275	70.782	27.082	3.672
0.6	25	303.251	388.3	409.25	21.903	5.395
	400	76.569	103.603	109.1	26.094	5.306
	800	54.44	74.694	77.441	27.116	3.678
0.7	25	327.468	419.331	441.96	21.907	5.396
	400	82.623	111.823	117.76	26.113	5.309
	800	58.72	80.598	83.565	27.145	3.681
0.8	25	350.009	448.215	472.406	21.910	5.397
	400	88.258	119.474	125.821	26.128	5.312
	800	62.704	86.093	89.265	27.167	3.684
0.9	25	371.468	475.343	501.001	21.853	5.398
	400	93.55	126.66	133.393	26.141	5.316
	800	66.446	91.254	94.618	27.186	3.686

Impact height; m	Impact load; N	Coefficients of dynamic loads			Relative difference	
		(MA)	(M Exp.)	(MEF)	MA-MExp; %	MEF- MExp; %
1	25	391.203	501.001	528.047	21.916	5.398
	400	98.556	133.457	140.554	26.151	5.318
	800	69.986	96.136	99.682	27.201	3.689

Figure 11 shows the behavior of the dynamic load coefficients by the three methods studied for an impact load of 400 N. The range of impact heights was from 0.2 to 1 m. It is observed that the behavior curve obtained by the MEF was the closest to that obtained by MExp. The results obtained by numerical simulation (MEF), gave better results and this is due to the advantage that the finite elements method offers before the analytical methods, which allows simulating the system more realistically, taking into account a greater number of factors during the simulation. The analytical processes are simplified and they are of great practical value to design innumerable systems, but they do not allow knowing the details of the structural behavior under real actions.

Coinciding with the results obtained, Aparicio & Casas (1987) point out that in the interpretation of the results of tests of impact loads, it is important to know aspects that are not considered in the analytical studies. It is also vital to know the details of the phenomenon when they take into account the deflection of automobile structures to see their impact on the comfort and safety of passengers (Álvarez *et al.*, 1983). On the other hand, Beltrán and Cerrolaza (1989), state that it is necessary to resort to more sophisticated calculation models that allow reproducing more accurately the real behavior of different systems.

En la Figura 11 se representa el comportamiento de los coeficientes de cargas dinámicas por los tres métodos estudiados para una carga de impacto de 400 N, el rango de alturas de impacto va desde 0.2 hasta 1 m. Se observa que la curva de comportamiento obtenida mediante el MEF es la que más se acerca a la obtenida por MExp. Los resultados obtenidos mediante la simulación numérica (MEF), brindaron mejores resultados y esto se debe a la ventaja que brinda el método de los elementos finitos ante los métodos analíticos, permitiendo simular el sistema de forma más realista, teniendo en cuenta un mayor número de factores durante la simulación. Los procesos analíticos son simplificados y no dejan de ser de mucho valor práctico para el diseño de innumerables sistemas, pero tienen el inconveniente de no permitir conocer a detalle el comportamiento estructural bajo acciones reales.

Coincidiendo con los resultados obtenidos, Aparicio y Casas (1987) señalan que en la interpretación de los resultados de pruebas de cargas de impacto, es importante conocer aspectos que no se consideran en los estudios analíticos, además resulta vital conocer los detalles del fenómeno cuando se tienen en cuenta la deflexión de estructuras de automóviles para ver su repercusión en el confort y la seguridad de los pasajeros (Álvarez *et al.*, 1983). Por su parte Beltrán y Cerrolaza (1989), plantean que se hace necesario recurrir a modelos de cálculo más sofisticados que permitan reproducir con más fidelidad el comportamiento real de diferentes sistemas.

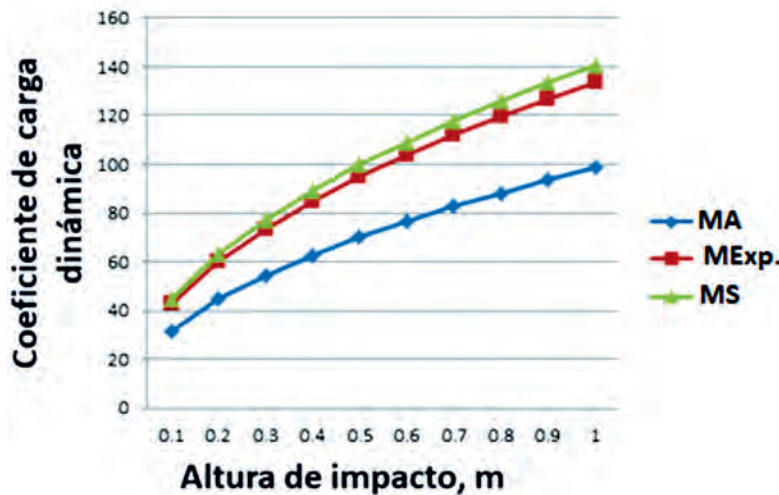


FIGURE 11. Behavior of dynamic load coefficients for a load of 400 N.
 FIGURA 11. Comportamiento de los coeficientes de cargas dinámicas para una carga de 400 N.

CONCLUSIONS

- The numerical simulation compared with experimental data for deformations and stresses reached a p-value greater than 0.05, so there was no statistically significant difference between the two distributions for a confidence level of 95%.

CONCLUSIONES

- La simulación numérica comparada con datos experimentales para las deformaciones y los esfuerzos alcanzó un p-valor mayor a 0.05, por lo que no existe diferencia estadísticamente significativa entre las dos distribuciones para un nivel de confianza del 95%.

- For the deflections predicted through the model analyzed by MEF and the experimental results, an approximate p-value of 0.99 was reached, so there was no statistically significant difference between the two distributions.
- The relative difference between the coefficients of dynamic loads by experimental method (MExp.) and by numerical simulation (MEF) ranged between 3.479 and 5.122%, being substantially lower than the values obtained by the analytical method (MA), which reached values from 21.820 to 27.201%.
- Para las deflexiones predichas por el modelo analizado mediante MEF y los resultados experimentales se alcanzó un p-valor aproximado de 0.99, por lo que no existe diferencia estadísticamente significativa entre las dos distribuciones.
- La diferencia relativa existente entre los coeficientes de cargas dinámicas por método experimental (MExp.) y por simulación numérica (MEF) oscila entre 3.479 y 5.122%, siendo sustancialmente inferiores a los valores obtenidos para el método analítico (MA), que alcanzó valores desde 21.820 hasta 27.201%.

REFERENCES / REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ÁLVAREZ, R.; MOLINA, R.F.J.; DOBLARÉ, C.M.; ALARCÓN, E.: "Interacción dinámica vehículo-vía-estructura-cimiento en puentes de ferrocarril", En: *Anales de Ingeniería Mecánica*, Ed. Asociación Española de Ingeniería Mecánica; Universidad de Cantabria (Dpto. vol. 1, pp. 451-460, 1983, ISBN: 0212-5072.
- APARICIO, A.; CASAS, J.R.: "Resultados y conclusiones de las pruebas efectuadas en el paso superior de Alfonso X, en el Cinturón de Ronda de Barcelona: Una fuente de enseñanza", *Hormigón y acero*, 162: 33-141, 1987.
- BELTRÁN, F.; CERROLAZA, M.: "Análisis dinámico de estructuras sometidas a cargas no lineales", *Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería*, 5(4): 473-502, 1989, ISSN: 1886-158X.
- CASTRO, D.; GÜIZA, R.: *Análisis del efecto de una grieta en el comportamiento estructural de una biela usando FEA*, ser. Engineering Sciences [physics]/ Mechanics [physics.med-ph]/ Mechanics of the structures [physics.class-ph], Inst. Grupo de Investigación en Energía y Medioambiente (GIEMA). Universidad Industrial de Santander, Colombia, Colombia, 2017.
- FENG, D.; AYMERICH, F.: "Finite element modelling of damage induced by low-velocity impact on composite laminates", *Composite Structures*, 108: 161-171, 2014, ISSN: 0263-8223, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.09.004>.
- KONG, Y.S.; ABDULLAH, S.; OMAR, M.Z.; HARIS, S.M.: "Failure assessment of a leaf spring eye design under various load cases", *Engineering Failure Analysis*, 63: 146-159, 2016, ISSN: 1350-6307, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.02.017>.
- LIU, T.; FLECK, N.A.; WADLEY, H.N.G.; DESHPANDE, V.S.: "The impact of sand slugs against beams and plates: Coupled discrete particle/finite element simulations", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 61(8): 1798-1821, 2013, ISSN: 0022-5096, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2013.03.008>.
- MARTÍNEZ, R.A.; BOZA, M.Y.; LASTRA, M.D.; BARROSO, P.P.: "Análisis modal del sistema fruto-pedúnculo del Nim", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 16(3): 43-46, 2007, ISSN: 1010-2760, e-ISSN: 2071-0054.
- NADAL, E.; RÓDENAS, J.J.; SÁNCHEZ, O.E.M.; LÓPEZ, R.S.; MARTÍ, P.J.: "Sobre la utilización de códigos de elementos finitos basados en mallados cartesianos en optimización estructural", *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 30(3): 155-165, 2014, ISSN: 0213-1315, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2013.04.009>.
- PISARENKO, G.S.; YAKOVLEV, A.P.: *Manual de resistencia de materiales*, Ed. Mir Publishers, Primera ed., Moscú, Rusia. URSS, 1979.
- SINGH, N.K.; SINGH, K.K.: "Review on impact analysis of FRP composites validated by LS-DYNA", *Polymer Composites*, 36(10): 1786-1798, 2015, ISSN: 0272-8397, DOI: 10.1002/pc.23064.
- UNTAROIU, C.D.; YUE, N.; SHIN, J.: "A finite element model of the lower limb for simulating automotive impacts", *Annals of biomedical engineering*, 41(3): 513-526, 2013, ISSN: 0090-6964, DOI: 10.1007/s10439-012-0687-0.
- VAVALLE, N.A.; MORENO, D.P.; RHYNE, A.C.; STITZEL, J.D.; SCOTT, G.F.: "Lateral impact validation of a geometrically accurate full body finite element model for blunt injury prediction", *Annals of biomedical engineering*, 41(3): 497-512, 2013, ISSN: 0090-6964, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10439-012-0684-3>.
- WARRENDALE, P.A.: SAE Handbook. Society of Automotive Engineers, Warrendale P.A.: Metals Handbook. American Society for Metals. Materials Park. Ohio, USA., 2001.
- XIAOFEI, W.; YINGCHUN, S.H.; XIANDONG, L.; WANG, H.; JIEGONG, W.: "Simulation of biaxial wheel test and fatigue life estimation considering the influence of tire and wheel camber", *Advances in Engineering Software*, 92: 57-64, 2016, ISSN: 0965-9978, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2015.11.005>.
- ZHANBIAO, L.; DI CECCO, S.; ALTENHOF, W.; THOMAS, M.; BANTING, R.; HU, H.: "Stress and fatigue life analyses of a five-piece rim and the proposed optimization with a two-piece rim", *Journal of Terramechanics*, 52: 31-45, 2014, ISSN: 0022-4898, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2014.02.002>.
- ZHAO, Y.Q.; ZANG, L.G.; CHEN, Y.Q.; LI, B.; WANG, J.: "Non-pneumatic mechanical elastic wheel natural dynamic characteristics and influencing factors", *Journal of Central South University*, 22(5): 1707-1715, 2015, ISSN: 1005-9784, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11771-015-2689-1>.

Raudel Flores Moreno, Applicant to doctorate, Universidad Autónoma Chapingo (UACH), Programa de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola (DIMA, km 38.5 carr. México - Texcoco. CP 56230, Chapingo, Estado de México, México, e-mail: raudelfm2014@hotmail.com

Gilberto de Jesús López Canteñs, Docente, Universidad Autónoma Chapingo (UACH), Programa de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola (DIMA, km 38.5 carr. México - Texcoco. CP 56230, Chapingo, Estado de México, México, e-mail: alelopez10@hotmail.com

Arturo Martínez Rodríguez, Profesor e Investigador Titular, Universidad Agraria de La Habana (UNAH), Centro de Mecanización Agropecuaria (CEMA), San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba, C.P: 32700, e-mail: arturo@unah.edu.cu

Eugenio Romantchik Kriuchkova, Docente, Universidad Autónoma Chapingo (UACH), Programa de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola (DIMA, km 38.5 carr. México - Texcoco. CP 56230, Chapingo, Estado de México, México, e-mail: eugenio.romantchik@gmail.com

Geisy Hernández Cuello, Investigadora Auxiliar, Universidad Agraria de La Habana (UNAH), Centro de Mecanización Agropecuaria (CEMA), San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba, C.P: 32700, e-mail: geisyh@unah.edu.cu

The authors of this work declare no conflict of interests.

This item is under license Reconocimiento-NoComercial de Creative Commons 4.0 Internacional (CC BY-NC 4.0).

The mention of trademarks of specific equipment, instruments or materials is for identification purposes, there being no promotional commitment in relation to them, neither by the authors nor by the publisher.



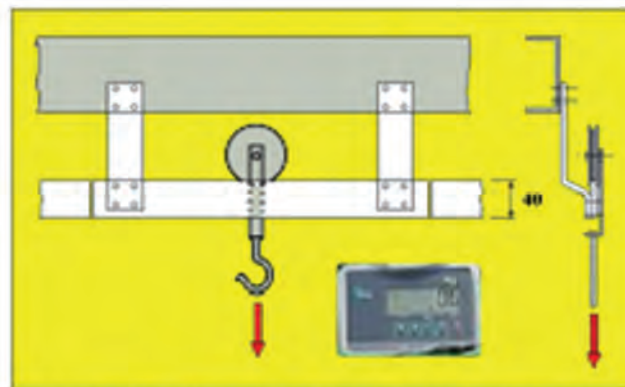
BÁSCULAS ELECTRÓNICAS PARA LA GANADERÍA Y OTROS USOS



**PESA PARA PRODUCTOS
CEMA-TED 150 P**



**PESA PARA ALMACEN
CEMA-TED 300 A**



PESA PARA LINEA DE MATADERO CEMA-TED 300 G