

# Análisis estructural mediante simulación IAO en una estructura de carga y su validación<sup>1</sup>

---

Artículo de Investigación - Fecha de recepción: 18 de agosto de 2012 - Fecha de aceptación: 20 de septiembre de 2012

Wilmer Velilla

Ingeniero Mecánico, Magíster en Ingeniería Mecánica, Universidad Antonio Nariño. Barranquilla, Colombia, wilmer.velilla@uan.edu.co

Ricardo Mendoza

Ingeniero Mecánico, Magíster en Ingeniería Mecánica, Universidad Antonio Nariño. Barranquilla, Colombia, rmendoza@uan.edu.co

Gonzalo Triana

Ingeniero Mecánico. Barranquilla, Colombia, g.e.t.a@hotmail.com

## RESUMEN

Actualmente es necesario reducir los tiempos de verificación de componentes. Una empresa en particular desea certificarse en seguridad industrial y requiere verificar los diseños de sus estructuras civiles, pero cuenta con ochenta estructuras en total. La empresa manifiesta que desarrollar los modelos matemáticos para cada una de estas estructuras demanda mucho tiempo, pero se estima que los tiempos en simulación son menores. La inversión necesaria para la adquisición de software de elementos finitos es alta, por lo que la empresa desea hacer previamente un análisis de elementos finitos frente a un análisis matemático. En este sentido, se hizo el modelo de una de las estructuras en SolidWorks, posteriormente se desarrolló una simulación del comportamiento de los esfuerzos en el software ANSYS y finalmente se hicieron los cálculos matemáticos, para comparar los resultados de ambos análisis, encontrando que la diferencia porcentual entre ambos resultados era del 11,5%.

## Palabras clave

Diseño conceptual, simulación, método de elementos finitos, carga estática, estructuras, DAO/IAO.

---

1. Artículo derivado del proyecto de investigación titulado: *Metodología para el análisis de estructuras de cargas y su validación computacional*. Universidad Antonio Nariño.

## *Structural analysis and validation of lifting structures using CAE techniques*

### **ABSTRACT**

Nowadays, industries need to reduce the time used to verify their components. A company in particular, wanted to have its industrial security standards qualified, so it needed to have their eighty civil structures certified. In order to achieve this, they required to verify their structures' design. This industry knows that it takes a lot of time to calculate the security factor —SF— in all the structures; however, time can be reduced with simulations. The cost of finite element analysis software is expensive, for this reason, the company wanted to evaluate the results of the mathematical model against those of the simulation. One model was created in SolidWorks and for the simulations of the loads, ANSYS software was used. Simulation's results were compared to the mathematical results. The perceptual difference was 11,5%.

### **Keywords**

Conceptual design, simulation, finite element method, static load, structure, computer-aided engineering CAE, computer-aided design CAD.

## INTRODUCCIÓN

Las empresas del sector industrial en Colombia necesitan certificarse en seguridad industrial, para lo cual requieren tener informes detallados de diseño, sustentando los factores de seguridad para estructuras de trabajo en altura [1]. Entre los componentes de estas estructuras se encuentran las orejas de izaje, cuyo factor de seguridad está sujeto a cálculos específicos que garantizan su confiabilidad para soportar su configuración de trabajo [2]. También se encuentran los ganchos, los que en presencia de deformaciones, rajaduras u otros daños se vuelven riesgosos [3].

El comportamiento de las estructuras frente a cargas externas se puede representar mediante ecuaciones diferenciales, que pueden ser solucionadas a través de diferencias finitas y método de elementos finitos (MEF) [4], [5]. El MEF se ha desarrollado para diferentes aplicaciones de estructuras sujetas a cargas por flexión [6], [7]. Este método se apoya en software computacionales, tales como el caso de ANSYS [8].

Estos métodos tienen un margen de error dado que existen consideraciones que no pueden ser simuladas en los entornos virtuales, por esta razón el software ANSYS plantea en sus simulaciones un error permisible del 20%.

Las empresas en la costa Caribe hoy en día están un poco exceptivas a los resultados de estas simulaciones; en este sentido, con los resultados de este estudio se pretende que las empresas conozcan la viabilidad de realizar simulaciones computacionales de estructuras y tengan fundamentos para se-

leccionar las herramientas DAO/IAO para certificar sus estructuras.

Este estudio presenta el planteamiento de las ecuaciones del sistema de fuerzas, los esfuerzos generados y la teoría de falla aplicada, en conjunto con el modelado del sistema en SolidWorks y la simulación usando elementos finitos en el software ANSYS.

## METODOLOGÍA

Esta publicación abarca el análisis a carga estática de una estructura de carga de 7 toneladas implementada en una empresa; la información de los materiales de cada componente de la estructura fue suministrada por la empresa. El modelado se realizó en el software SolidWorks y la simulación en el software ANSYS. Los resultados de esfuerzo y factor de seguridad de la simulación fueron validados con los valores obtenidos en los cálculos matemáticos, mediante el cálculo del error porcentual.

## MODELO MATEMÁTICO

Los cálculos matemáticos y la simulación se desarrollaron sobre la estructura de carga presentada en la Fig. 1.

## Análisis estático y de resistencia

El componente estudiado inicialmente es la viga que soporta la carga; el diagrama de cuerpo libre de esta se presenta en la Fig. 2.

Los valores de las reacciones son:

$$* R_A = R_B = 54912.23 \text{ N}$$

$$* R_{AX} = R_{BX} = 42065.20 \text{ N}$$

$$* R_{AY} = R_{BY} = 35296.9 \text{ N}$$



Fig. 1 Modelo de la estructura que va a ser estudiada

Para este estado de cargas se presentan los diagramas de fuerza cortante y momento flector, en la Fig. 4.

Del diagrama de cuerpo libre (DCL) presentado en la Fig. 2 se analizaron los puntos G y E, que fueron considerados los puntos potenciales de falla en el componente, dado que en el punto G está el momento máximo y en el punto E está el cortante máximo combinado con un momento flector que no difiere significativamente con el momento máximo.

La sección transversal de la viga es la pre-

sentada en la Fig. 3 y las características de esta sección para usar en los cálculos matemáticos son las siguientes:

$$I = 6.483 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

$$\text{y } S = I/c = 8.51 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

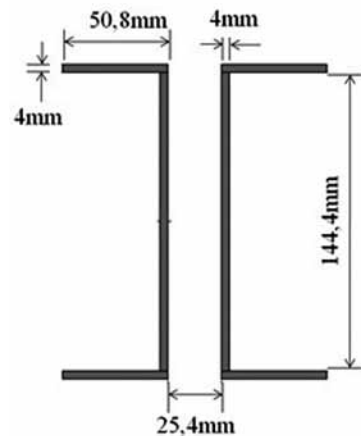


Fig. 3 Sección transversal de la viga de carga

### Selección y uso de las teorías de fallas

Debido a que el material es dúctil y esta estructura tiene un comportamiento estático, la teoría de falla que se debe utilizar es la de energía de distorsión máxima (Von Misses) [9], [10], por lo cual:

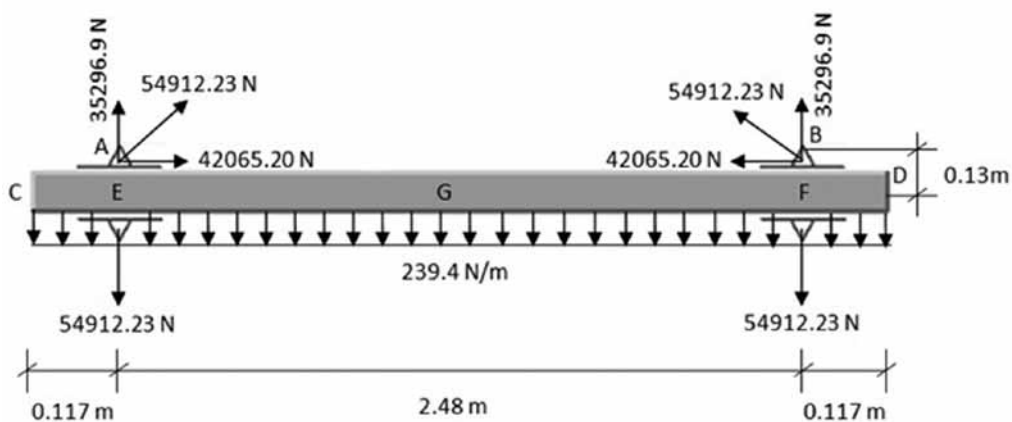


Fig. 2 DCL de la viga de carga

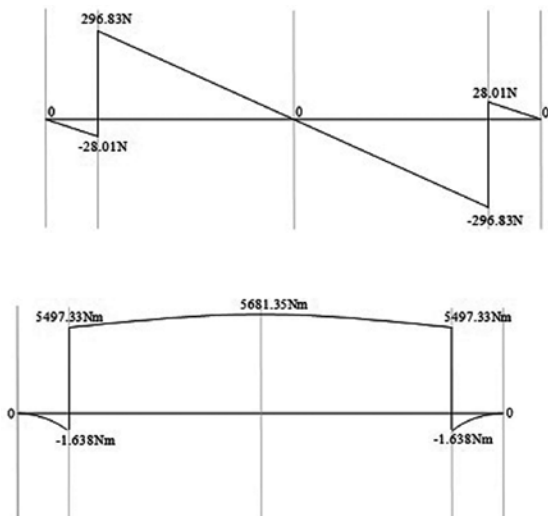


Fig. 4 Diagrama de fuerza cortante y momento flector

$$\sigma_G = \frac{Mc}{I} = 66.76 \text{ MPa}, \quad n = 3.74$$

$$\sigma_E = 64.6 \text{ MPa}, \quad \tau = \frac{V}{A} = 0.1508 \text{ MPa}$$

El esfuerzo equivalente de Von Mises queda de la siguiente forma:

$$\sigma_e = (\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2)^{\frac{1}{2}} = 64.6 \text{ MPa}, \quad n = 3.87$$

### Análisis del grillete

El grillete es fabricado en Acero ASTM-A36 y se presenta en la Fig. 5.

$$\tau = \frac{V}{A} = 27.26 \text{ MPa}, \quad n = \frac{S_{SY}}{\tau} \rightarrow n = 5.3$$

### Análisis de la punta del gancho (perfil curvo)

La distribución de la tensión en un miembro curvo se determina mediante las siguientes consideraciones:

- La sección transversal tiene un eje de simetría en un plano a lo largo de la longitud de la viga.

- Las secciones transversales planas permanecen planas después de la flexión.
- El módulo de elasticidad será el mismo en tensión como en compresión.

Por tanto, el eje neutro y el eje centroidal de una viga curva, a diferencia de los ejes de una viga recta, no son coincidentes, lo cual hace que el esfuerzo no varíe linealmente desde el eje neutro. La punta del gancho se presenta en la Fig. 6.

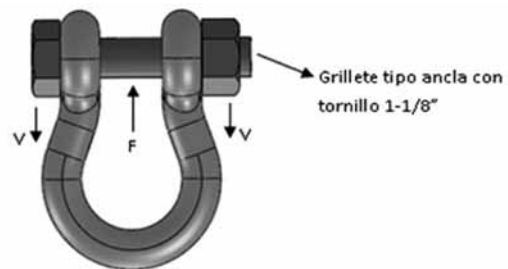


Fig. 5 Diagrama de fuerzas en el grillete

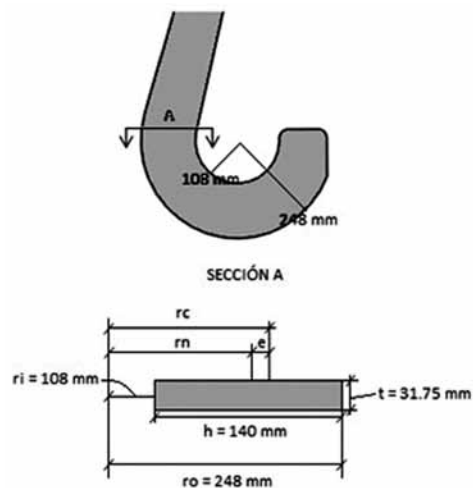


Fig. 6 Geometría de la punta del gancho

El análisis tanto en la parte interna del gancho como en la parte externa queda:

$$\sigma_{Ti} = \frac{F}{A} + \frac{MC_i}{Aer_i} = 87.84 \frac{N}{mm^2},$$

$$\sigma_{To} = \frac{F}{A} - \frac{MC_o}{Aer_o} = -38.24 \frac{N}{mm^2}$$

El factor de seguridad es:

$$n_i = \frac{S_y}{\sigma_{Ti}} \rightarrow n = 2.8, \quad n_o = \frac{S_y}{\sigma_{To}} \rightarrow n = 6.5$$

Por tanto, ni la parte interna ni la externa de la punta del gancho fallan. El gancho se presenta en la Fig. 6.

### Análisis de soldadura en el tensor

El DCL de este componente se presenta en la Fig. 7.

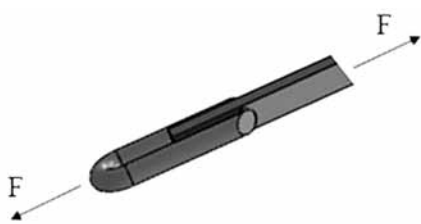


Fig. 7 Punta del tensor del sistema porta-rollos

$N$ (número de cordones de soldadura) = 4

$h_c$  (altura del cateto de la soldadura) = 8 mm

$L$ (longitud de la soldadura) = 110 mm

Para E60XX:  $S_y = 345 \text{ Mpa}$

El comportamiento de la soldadura en el tensor es a corte puro, por tanto queda:

$$\tau = \frac{F}{A} \rightarrow \tau = \frac{F}{0.707h_cLN} = 22.06 \text{ MPa}$$

$$n = \frac{S_{SY}}{\tau} \Rightarrow n = 9.02$$

### Análisis de soldadura oreja de la viga de carga

El diagrama de cuerpo libre de este componente se presenta en la Fig. 8. Los esfuerzos del lado izquierdo sujeto a cortante y de torsión:

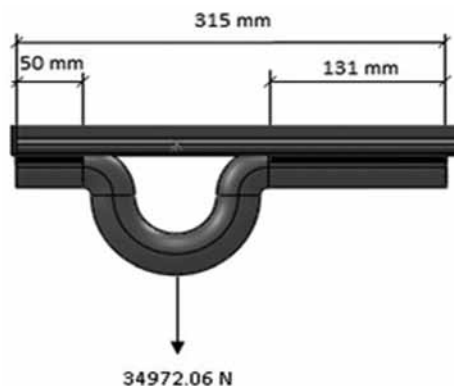


Fig. 8 Oreja de la viga de carga

$$\tau_v = \frac{F}{A} = 70.66 \text{ MPa}, \quad \tau_{xy} = \frac{Tr}{J} = 35.19 \text{ MPa}$$

Esfuerzo total del lado izquierdo:

$$\tau_T = 105.85 \text{ MPa}$$

$$n = \frac{S_{SY}}{\tau} \rightarrow S_{SY} = 0.577 * S_y$$

$$n = \frac{0.577 * 345 \text{ MPa}}{105.85 \text{ MPa}} \rightarrow n = 1.88$$

Esfuerzos del lado derecho, sujeto a cortante y torsión:

$$\tau_v = \frac{F}{A} = 26.97 \text{ MPa}, \quad \tau_{xy} = \frac{Tr}{J} = 6.99 \text{ MPa}$$

Esfuerzo total del lado derecho:

$$\tau_T = 33.96 \text{ MPa}$$

$$\rightarrow n = 5.86$$

### SIMULACIÓN DE LAS CARGAS EN ANSYS

Desarrollado el modelo en 3D del sistema de transporte, se procede a hacer el análisis mediante elementos finitos, implementando el software ANSYS. Para el modelado en ANSYS se tienen en cuenta las siguientes consideraciones:

- Tipo de análisis en ANSYS: Static Structural (ANSYS)

- Carga aplicada: 7000 Kg
- Material aplicado a cada parte: acero estructural A36, acero 1020
- Tipo de perfil y tornillos: grillete tipo ancla con tornillo 1-1/8", viga perfil C6 (6"x2"), tornillos de 5/8"x2" SAE grado 8.

Los resultados de la simulación se presentan en las Fig. 9 a 14.

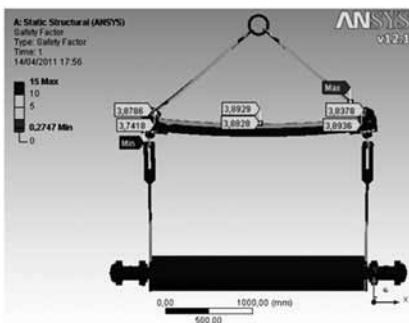


Fig. 9 Resultado de esfuerzos en el sistema completo

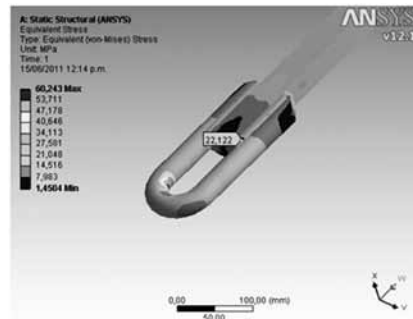


Fig. 12 Resultado de esfuerzos en el tensor

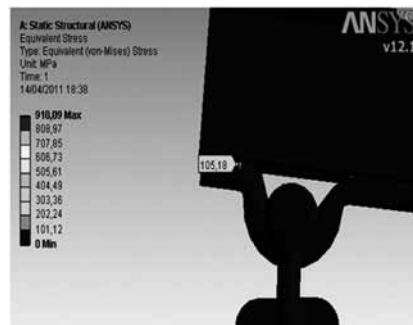


Fig. 13 Resultado en la oreja de la viga, lado izquierdo

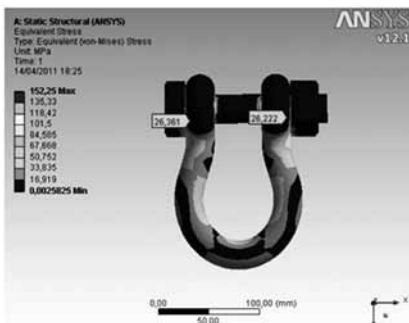


Fig. 10 Resultado de esfuerzos del grillete

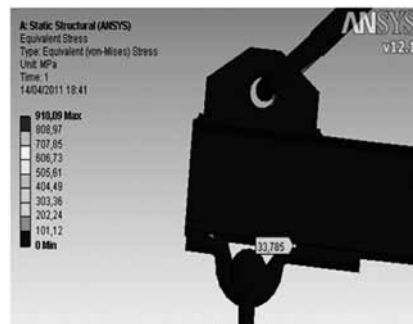


Fig. 14 Resultado en la oreja de la viga, lado derecho

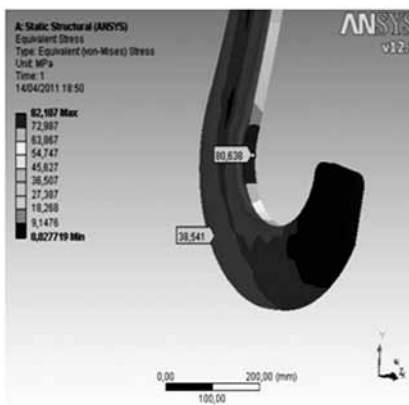


Fig. 11 Resultado de esfuerzos en el gancho

## COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Los resultados del modelo matemático y de la simulación se presentan en las Tablas I y II, comparando los resultados arrojados por ambos métodos.

El porcentaje de error existente entre los resultados del modelo y la simulación, viene dado por:

$$\% \text{ error} = \frac{\text{Valor}_{\text{modelo}} - \text{Valor}_{\text{simulacion}}}{\text{Valor}_{\text{modelo}}} \times 100$$

TABLA I  
RESULTADOS DE ESFUERZOS DEL MODELO MATEMÁTICO  
Y SIMULACIÓN

Parte analizada		Modelo matemático	Simulación en ANSYS
Sistema completo	Punto G	66.76 MPa	64.354 MPa
	Punto E	64.6 MPa	64.359 MPa
Grillete		27.26 MPa	26.29 MPa
Gancho	P. Int.	87.84 MPa	80.638 MPa
	P. Ext.	38.24 MPa	38.541 MPa
Soldadura en tensor		22.06 MPa	22.122 MPa
Oreja viga de carga L.I.		105.85 MPa	105.18 MPa
Oreja viga de carga L.D.		33.96 MPa	33.785 MPa

TABLA II  
RESULTADOS DEL FACTOR DE SEGURIDAD DEL MODELO  
MATEMÁTICO Y LA SIMULACIÓN

Parte analizada		Modelo matemático	Simulación en ANSYS
Sistema completo	Punto G	3.74	3.887
	Punto E	3.87	3.8102
Grillete		5.3	5.2961
Gancho	P. Int.	2.8	3.1244
	P. Ext.	6.5	6.0419
Soldadura en Tensor		9.02	9.7689
Oreja viga de carga L.I.		1.88	1.8351
Oreja viga de carga L.D.		5.86	5.7755

En las Tablas III y IV se presentan los valores del error porcentual en cada uno de los elementos analizados.

TABLA III  
PORCENTAJE DE ERROR ESFUERZOS ENTRE MODELO  
MATEMÁTICO Y SIMULACIÓN

Parte analizada		Error (%)
Sistema completo	Punto G	3.60
	Punto E	0.37
Grillete		3.55
Gancho	P. Int.	8.19
	P. Ext.	0.79
Soldadura en tensor		0.28
Oreja viga de carga L.I.		0.63
Oreja viga de carga L.D.		0.52

TABLA IV  
PORCENTAJE DE ERROR DEL FACTOR DE SEGURIDAD ENTRE  
MODELO MATEMÁTICO Y SIMULACIÓN

Parte analizada		Error (%)
Sistema completo	Punto G	3.93
	Punto E	1.55
Grillete		0.07
Gancho	P. Int.	11.5
	P. Ext.	7.04
Soldadura en tensor		8.3
Oreja viga de carga L.I.		2.38
Oreja viga de carga L.D.		1.44

El porcentaje de error obtenido entre los resultados de la simulación y el modelo matemático para el esfuerzo está en el orden de 0.28% a 8.19% (valor de % máx. 12% de



acuerdo con la escala del software) y para el factor de seguridad está en el orden de 0.07% a 11.5% (valor de % máx. 20% de acuerdo con la escala del software), el cual es un error muy aceptable si se determina como consecuencia las variables que no se consideraron significativas como el peso de algunos elementos dentro de los que están el grillete, los pernos, las orejas de la viga de carga, el peso de los tensores en el modelo, durante el estudio del diseño.

## CONCLUSIONES

El manejo de una metodología adecuada para el desarrollo del proyecto de diseño garantiza la ejecución de una serie de pasos estratégicos, bajo un régimen organizacional y sistemático.

El modelo matemático y el modelo de simulación con software utilizado en el análisis del sistema porta-rollos, permite a la empresa tener resultados que enmarcan la estructura como segura para su uso.

Se observó que el porcentaje de error obtenido entre los resultados del modelo y la simulación del esfuerzo, se encuentran en el rango de 0.28% a 8.19% (valor de % máx. 12% de acuerdo con la escala del software) y para el factor de seguridad está en el rango de 0.07% a 11.5% (valor de % máx. 20% de acuerdo con la escala del software), por lo que el error es aceptable.

En el sistema transportador de rollos, tanto en el modelo matemático como en la simulación, se encontró un punto crítico (soldadura de menor dimensión de las orejas LI, LD) en el que se observa un área muy pequeña comprometida.

La buena sinergia entre la empresa y el grupo de investigación permitió el éxito de esta investigación.

Los resultados de este estudio incentivaron a la empresa a desarrollar el mismo análisis para todas sus estructuras.

## REFERENCIAS

- [1] J. Macchia, *Prevención de accidentes en las obras: conceptos y normativas sobre higiene y seguridad en la construcción*, 1a. ed, Buenos Aires: Nobuko, 2007.
- [2] J. Melo, *Seguridad en accesorios de elementos de izaje*. Universidad de Morón, 2009.
- [3] A. Miravete, E. Larrodé, L. Castejón y J. Cuartero, *Los transportes en la ingeniería industrial*, 1a. ed, España: Universidad de Zaragoza, editorial Reverté S. A., 1998.
- [4] D. Ochoa, J. Vivas y E. Santafé, "Uso del Método de Elementos Finitos (MEF) para la determinación de esfuerzos y deformaciones en un modelo de pozo". Universidad Industrial de Santander. *Revista Fuentes*. Volumen 7, No. 1 (2009).
- [5] Y. Skiba, *Métodos y esquemas numéricos: Un análisis computacional*, 1a. ed, México: Universidad Nacional Autónoma de México, 2005.
- [6] D. Del Valle, J. Torres, A. Samartin y V. Arroyo, "Una familia de elementos finitos clase c.1 aplicación a flexión de placas de Kirchhoff". Universidad de Cantabria Santander de España. *Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería*. Volumen 2, No 3 (1986).
- [7] D. Mehmet Özcan et al., "Experimental and finite element analysis on the steel

- fiber-reinforced concrete (SFRC) beams ultimate behavior”. Karadeniz Technical University. *Construction and Building Materials* 23, 2 (2009), pp., 1064-1077.
- [8] V. Manet, *The use of ANSYS to calculate the behaviour of sandwich structures*. École des Mines de Saint-Etienne, Material and Mechanical Department, 158, cours Fauriel, 42023 Saint-Etienne Cedex 2, France. 9 January 1998
- [9] R. L. Norton, *Diseño de maquinaria: Síntesis y análisis máquinas y mecanismos*. 3a. edición. México: McGraw-Hill Interamericana, 1992.
- [10] J. Shigley, *Diseño en ingeniería mecánica*, 6a. ed, EE.UU: McGraw-Hill, 2007.