

Análisis mecánico-estructural de una grúa auxiliar para el traslado de pacientes con problemas de movilidad aplicando el método de extensometría y simulación FEM

Carlos Eduardo **Legorreta-Correa**

Instituto Politécnico Nacional
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Unidad Azcapotzalco.
Av. de Las Granjas 682, Azcapotzalco, Santa
Catarina, 02250 Ciudad de México, CP 07738.
MÉXICO.

correo electrónico (email):
carloslegorreta@live.com.mx

Recibido 14-04-2014, aceptado 30-09-2015.

Resumen

En este trabajo se presentan resultados de pruebas numéricas y experimentales, utilizando el método de extensometría efectuadas a una grúa auxiliar diseñada originalmente con la finalidad de facilitar el traslado de pacientes con problemas de movilidad dentro de hospitales. Las pruebas experimentales consistieron en simular el efecto de cargar completamente a una persona de hasta 200 kg (1962 N) de peso, esto sin considerar movimientos laterales en la horquilla en donde se engancha el arnés que precisamente realiza esta función. Se utilizaron discos de pesas de 15 y 20 kg, los cuales fueron colocadas de manera gradual a fin de tener diferentes estados de carga, con aumentos progresivos de 20 kg hasta llegar a 200 kg. En cada punto (estado de carga) se registraron las deformaciones en los puntos críticos de varios de los elementos que componen a la grúa, usando para ello galgas extensométricas (*strain gauges*) que previamente fueron instrumentadas en la grúa.

Para el caso de las pruebas numéricas se utilizó primeramente el software CAD de SolidWorks® 2014 para realizar el modelado y ensamble de los componentes de la grúa auxiliar. Posteriormente con ayuda del software CAE de ANSYS® Workbench 15.0 se hicieron simulaciones en el modelo de la

grúa considerando los pesos usados en las pruebas experimentales. Finalmente se presenta una comparación de los resultados obtenidos en ambas pruebas, numéricas y experimentales, mostrando e interpretando la variación.

Palabras clave: galgas extensométricas, extensometría, análisis estructural, simulación numérica, método del elemento finito (MEF).

Abstract

(Experimental and Numerical Validation of an Auxiliary Crane for the Transfer of Patients with Mobility Problems, Applying the Method of Extensometry and FEM Simulation)

In this paper results of numerical and experimental test are presented, using the method of extensometry applied to an auxiliary crane originally designed to facilitate the transfer of patients with mobility problems inside hospitals. The experimental tests consisted in to simulate the effect of carrying a person with a weight up to 200 kg (1962 N.), this without considering lateral movement in the fork where is engaged the harness that precisely performs this function. Discs weights of 15 and 20 kg were used, which were placed gradually in order to have different load conditions, with progressive increases of 20 kg up to 200 kg at each point (load condition) deformations were recorded in the critical points of the various elements that shape the crane, using for this strain gauges that were previously implemented in the crane. In the case of the numerical tests, the CAD software SolidWorks® 2014 was firstly used for modeling and assembling the components of the auxiliary crane. Later with the help of CAE software ANSYS® Workbench 15.0, simulations on the model of the crane were made considering the weights used in the experimental tests. Finally, a comparison of the results obtained in both tests, numerical and experimental are presented, showing the variation between them and interpreting the reason for this.

Key words: strain gauges, extensometry, structural analysis, numeric simulation, Finite Element Analysis (FEA).

1. Introducción

La necesidad de facilitar el manejo de pacientes con las limitaciones de movilidad, que provocan padecimientos como la paraplejía, tetraplejía y bariatría, ha llevado a los ingenieros mecánicos a trabajar en el campo de la biomecánica para diseñar y crear diferentes tipos de dispositivos o máquinas que faciliten el traslado de este tipo de personas.

La calidad de vida de un paciente con problema de movilidad la mayoría de las veces es menor que la de una persona clínicamente sana. Lo anterior se debe al hecho de tener que realizar cualquier actividad física sufriendo las complicaciones consecuentes de tener una lesión o cualquier otra anomalía que implique daño motriz en la persona en cuestión. La complejidad para que el individuo pueda moverse depende directamente de la complejidad de la lesión, lo cual repercute además en el nivel de independencia del paciente y en los recursos que requerirá para llevar una vida lo más normal posible.

En el documento que se presenta a continuación se reportan los resultados del análisis estructural realizado a la grúa auxiliar para el transporte de personas con problemas de movilidad, propiedad de la empresa "Acceso Sin Límites", utilizando simulación numérica mediante el software de elemento finito (FEM) ANSYS® Workbench 15.0 y aplicando también el método experimental de galgas extensométricas (extensometría), con el fin de determinar la carga máxima que podría soportar la máquina (grúa) además de hacer las observaciones y recomendaciones correspondientes en lo que se refiere al diseño y manufactura de la misma.

2. Desarrollo

2.1. Aplicación del método de extensometría

Las pruebas se realizaron colocando peso sobre la canasta (arnés) de la grúa, aumentándolo gradualmente de 20 en 20 kg hasta llegar a 200 kg. En el caso de las galgas se tomaron lecturas en cada momento de la prueba (0 kg, 20 kg, 40 kg, ..., 200 kg).

2.1.1. Materiales y herramientas utilizadas

- 18 galgas extensométricas marca Vishay MicroMeasurements® con una resistencia eléctrica de 120 Ω
- Tester marca Vishay Micro-Measurements®

- Puente de Wheatstone (Medidor de deformaciones lineales) marca Vishay Micro-Measurements®
- 30 m de cable calibre #26 de 7 polos
- Soldadura
- Cautín
- Pasta para soldar
- Pegamento para galgas Vishay Micro-Measurements®
- Catalizador marca Vishay Micro-Measurements®
- Desengrasante marca Vishay Micro-Measurements®
- Neutralizador marca Vishay Micro-Measurements®
- Gasas
- Escuadra o regla graduada
- Lápiz 2H
- Cinta Celofán marca Vishay Micro-Measurements® M-Bond 200
- Hoja de papel con eje de coordenadas referencial trazado sobre ella
- Vidrio de apoyo para el pegado de galgas
- Prensa tipo de uso en carpintería
- 2 Pesas de 500 g, 2 pesas de 200 g y 1 de 100 g
- Lija de grano #600, 1000 y 2000

2.1.2. Procedimiento de instrumentación

Primeramente se marcaron áreas de aproximadamente 1 x 1 cm en las zonas consideradas como críticas (donde se estima que se presente el mayor esfuerzo debido a la carga) en cada uno de los elementos que componen a la grúa. Estas áreas fueron delimitadas utilizando cinta mazquin. Para cada punto de estudio se tienen 2 áreas marcadas, una en la parte superior del elemento y otra en la parte inferior del mismo, debido a que, de acuerdo con las condiciones de trabajo de la grúa (flexión), se espera que el mayor esfuerzo a tensión en los elementos se encuentre precisamente en su parte media superior y el mayor esfuerzo a compresión en su parte media inferior.

Posteriormente, con la ayuda de removedor de pintura y lijas de distintos tipos, se procedió a limpiar y pulir las áreas marcadas, a fin de obtener un acabado tipo espejo, con la menor rugosidad superficial posible y la mayor claridad en la zona, necesaria para el correcto trazo de ejes de referencia y posterior colocación de las galgas.

Una vez listas las superficies de cada uno de los puntos de estudio, se procedió a trazar ejes de referencia auxiliares para la correcta alineación de la galga al momento de pegarla. Para marcar dichos ejes se utilizaron escuadras y lápices de punta 2H, teniendo en cuenta que no se debía hacer una presión



Fig. 1. Delimitación de las áreas o puntos críticos a estudiar en la grúa.

excesiva con el lápiz a fin de evitar la creación de concentradores de esfuerzos debido a las líneas dibujadas.



Fig. 2. Aplicación del removedor de pintura sobre las áreas en donde posteriormente se pegaron las galgas extensométricas.



Fig. 3. Zonas de interés del marco, libres de pintura y listas para ser marcadas con los ejes de referencia para pegar las galgas.

Pegado de las galgas. Para pegar las galgas se siguió al pie de la letra el procedimiento indicado por el proveedor Vishay Micro Measurements®, el cual nos indica que una vez que se tienen los ejes de referencia trazados en el área en donde se pega la galga, se procede a limpiar con desengrasante y neutralizador el lugar. Después se colocó catalizador en el lugar que ocuparía la galga en la pieza al ser pegada y se dejó secar por aproximadamente 30 segundos. Posterior a ello, se añadió una gota del pegamento especial sobre la galga y se

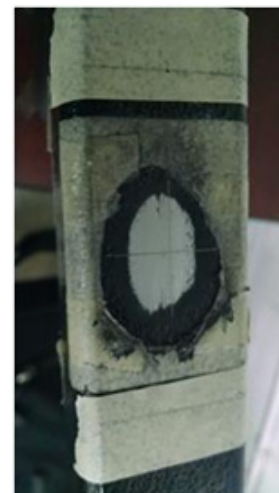


Fig. 4. Ejes de referencia marcados en una de las áreas que fue instrumentada con galga extensométrica.



Fig. 5. Galga pegada y alineada con los ejes de referencia trazados.

procedió a colocarla en el área en donde fue puesto el catalizador, teniendo extremo cuidado de no tocar la galga directamente con las manos, por lo mismo fue necesario el uso de guantes, pinzas y cinta celofán.

Al momento de pegar la galga y una vez que se tenía colocada en el punto deseado, el manual del proveedor indica que se debe hacer presión con el dedo pulgar apoyado sobre la cinta celofán que cubre la galga extensométrica durante aproximadamente 1 minuto para que la temperatura corporal ayude a que la adhesión con la superficie se diera mejor.

Se utilizaron dos tipos de galgas extensométricas (*strain gages*) marca MicroMeasurements. El primer tipo (tipo A) son modelo EA-06-120LZ-120/E de 120 ohms de resistencia y factor de gal-



Fig. 6. Imagen que muestra el procedimiento de hacer presión directamente con el dedo pulgar sobre la cinta celofán que cubre la galga recién pegada, a fin de ayudar en la adhesión de la misma con la superficie.



Fig. 7. Retiro de la cinta celofán de una de las galgas pegadas.

ga de 2.08 y el segundo tipo (tipo B) son modelo EF-06-120LZ-120/E de 120 ohms de resistencia y factor de galga de 2.14.

Retiro de la cinta celofán. Después de dejar secar el pegamento con el que fueron pegadas las galgas a la grúa, aproximadamente una hora, se procedió a retirar la cinta celofán que las protegía, teniendo mucho cuidado de no hacerlo de manera que se pudieran inducir esfuerzos residuales en la galga o despegarla parcial o totalmente. La técnica correcta indica que se debe hacer lentamente y procurando que el dedo que sostiene el extremo de la cinta celofán describa una trayectoria paralela y lo más cercana posible a la longitud de la galga extensométrica.

Soldado de los alambres conductores a las galgas. Antes de soldar los alambres conductores a las terminales de las galgas, se estañaron sus puntas para tener mayor precisión al momento de llevarlos a la galga.

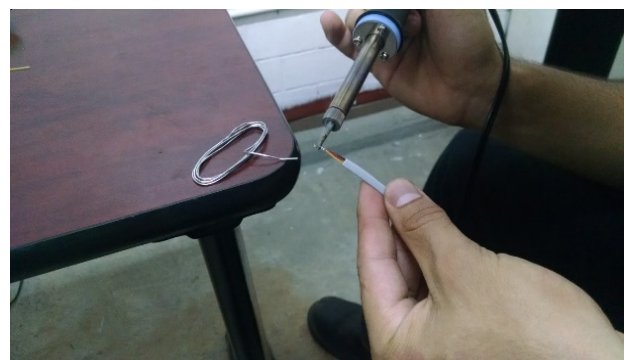


Fig. 8. Estañado de las puntas de los alambres conductores que posteriormente serían soldadas a las galgas extensométricas.



Fig. 9. Soldado de los alambres conductores a una de las galgas.

Ya con las puntas estañadas de los alambres conductores, se procedió a soldarlos en los terminales de la galga, considerando la configuración indicada en el manual de instrumentación de Vishay Micro Measurements®, que indica que dos de los alambres deben de soldarse juntos (trenzados) en una de las terminales de la galga y la otra punta (alambre) se suelda solo en la otra terminal. Otra consideración importante fue la de no tocar las terminales de la galga directamente con el cautín al momento de soldar, porque se corre riesgo alto de quemar el circuito de la misma.

Para comprobar que los cables conductores estuvieran correctamente soldados a las terminales de la galga extensométrica se utilizó el Gage Installation Tester marca Vishay Micro Measurements®, sabiendo que para que esto fuera así, la resistencia medida por el aparato debía ser de 120 ohms precisamente.



Fig. 10. Procedimiento para comprobar un correcto soldado de los alambres conductores en la galga.



Fig. 11. Imágenes de la grúa completamente instrumentada con galgas extensométricas listas para ser utilizadas en las pruebas.

La instrumentación de galgas extensométricas fue realizada en los puntos críticos de cada elemento, considerando que todos ellos se encuentran a flexión debido al funcionamiento de la grúa, es evidente que la mayor deformación se tiene en los puntos medios, específicamente en los extremos superior



Fig. 12. Pesas utilizadas para la realización de las pruebas en la grúa.



Fig. 13. Imagen de la grúa cargando 36 kg.

e inferior de cada componente, es ahí en donde se colocaron las galgas. Para la medición de las deformaciones unitarias con las galgas se usó un puente de Wineston de 4 canales marca Vishay-MicroMeasurements® y se consideró dependiendo el tipo de galga (se usaron 2 tipos: A y B) un factor de galga de 2.08 y 2.14, el cual fue introducido en el puente de Wineston previo a la realización de las pruebas.

2.2. Simulación numérica en ANSYS® Workbench 15.0

El modelado de los componentes de la grúa y su correspondiente ensamble se realizó utilizando el software de CAD SolidWorks® 2014.

Para la simulación, el archivo del ensamble final se exportó hacia la plataforma CAE de ANSYS® Workbench 15.0 para

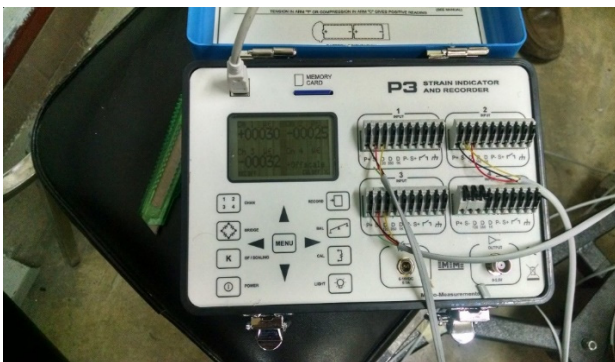


Fig. 14. Medidor de deformaciones (Puente de Wineston) Modelo P3 Marca Vishay Micro Measurements®, utilizado durante las pruebas realizadas a la grúa.

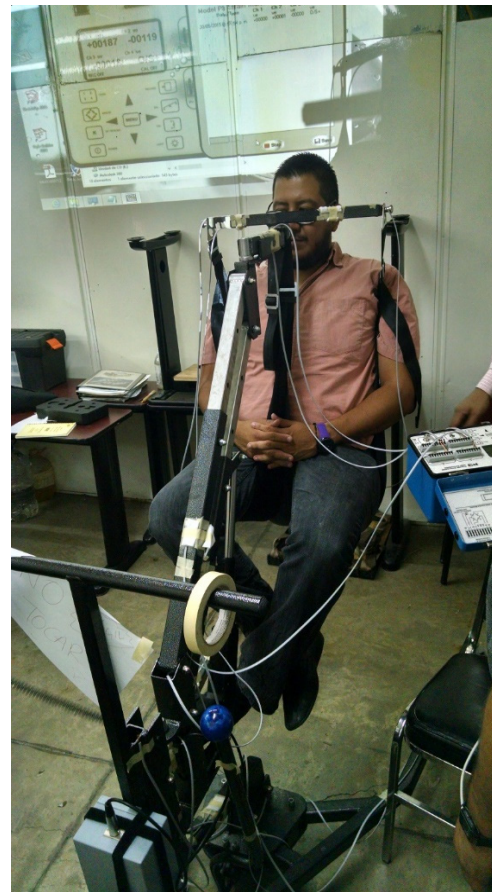


Fig. 15. Prueba de la grúa en donde se muestra el brazo telescópico completamente extendido y en posición máxima, utilizando a una persona de alrededor de 120 kg.

realizar ahí las correspondientes análisis, a fin de obtener los valores máximos de desplazamientos para cada valor de carga aplicada (intervalos de 20 kg: 0, 20, 40, 60, ..., 200).

En la sección inferior de la grúa, la cual incluye a partir del pedestal de la misma y continúa hasta las patas, fueron colocados en los puntos de apoyo del marco de carga los valores de las fuerzas y los momentos transmitidos desde la sección superior. Para el caso de 200 de carga en los botones laterales de la horquilla, la fuerza en el punto *E* es de 1073 N y en el punto *F* de 889 N.

Para el caso de 200 de carga en los botones laterales de la horquilla, la fuerza en el punto *E* es de 1073 N y en el punto *F* de 889 N.

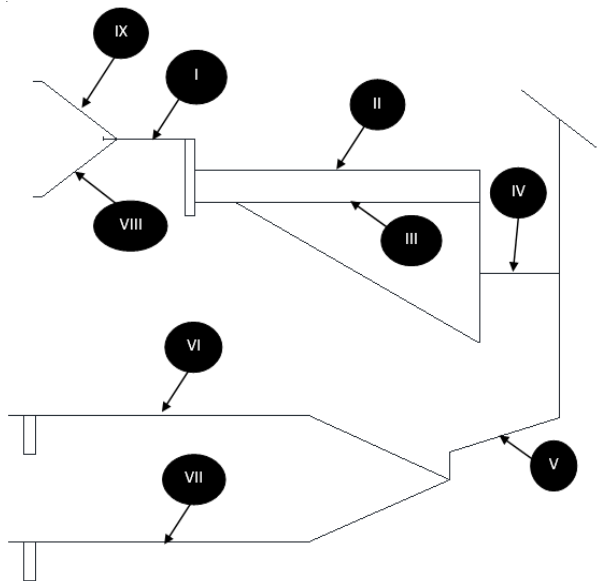


Fig. 16. Identificación de puntos en donde fueron pegadas galgas a fin de conocer las microdeformaciones en esas zonas (zonas críticas).

Tabla 1. Ubicación y nomenclatura de las galgas instrumentadas en la grúa.

GALGA	UBICACIÓN
1	VI SUPERIOR
1a	VI INFERIOR
2	VII SUPERIOR
2a	VII INFERIOR
5	IV SUPERIOR
6	IV INFERIOR
7	V SUPERIOR
8	V INFERIOR
A	II SUPERIOR
B	II INFERIOR
C	III SUPERIOR
D	III INFERIOR
E	I SUPERIOR
F	I INFERIOR
G	IX SUPERIOR
H	IX INFERIOR
I	VIII SUPERIOR
J	VIII INFERIOR



Fig. 17. Ensamble final de la grúa en SolidWorks® 2014.

Tabla 2. Valores de las fuerzas (N) en los puntos A y B, al cargar la grúa con diferentes magnitudes de masa (kg).

	SECCIÓN SUPERIOR	
	A	B
200.0	981.0	981.0
20.0	98.1	98.1
40.0	196.2	196.2
60.0	294.3	294.3
80.0	392.4	392.4
100.0	490.5	490.5
120.0	588.6	588.6
140.0	686.7	686.7
160.0	784.8	784.8
180.0	882.9	882.9

Tabla 3. Valores de las fuerzas (N) y momentos (Nm) en los puntos E y F, al cargar la grúa con diferentes pesos.

	SECCIÓN INFERIOR			
	E	F	MOMENTO E	MOMENTO F
200.0	1073.0	889.0	1361.1	1127.7
20.0	107.3	88.9	136.1	112.8
40.0	214.6	177.8	272.2	225.5
60.0	321.9	266.7	408.4	338.3
80.0	429.2	355.6	544.4	451.1
100.0	536.5	444.5	680.6	563.9
120.0	644.1	533.6	817.0	676.9
140.0	751.1	622.3	952.8	789.4
160.0	858.4	711.2	1088.9	902.2
180.0	965.8	800.2	1225.1	1015.0

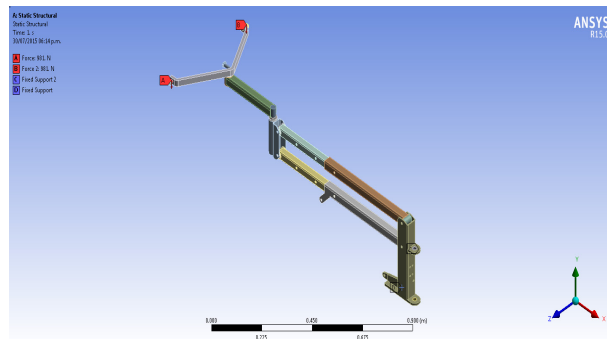


Fig. 18. Apoyos, fuerzas y momentos aplicados a la sección superior de la grúa.

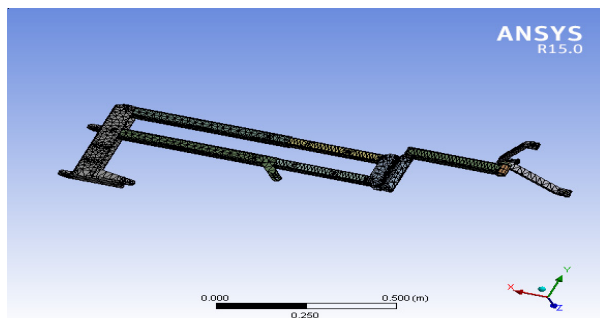


Fig. 19. Mallado de la sección superior de la grúa.

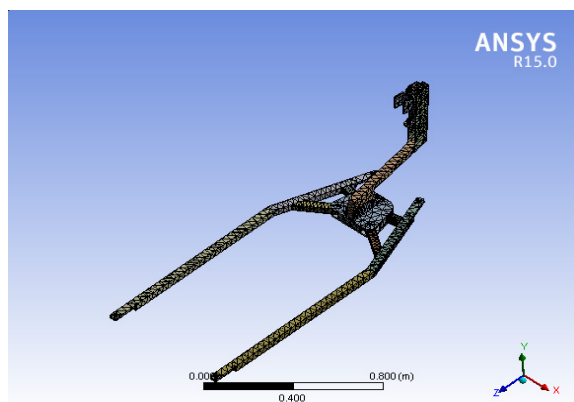


Fig. 20. Mallado de la sección inferior de la grúa.

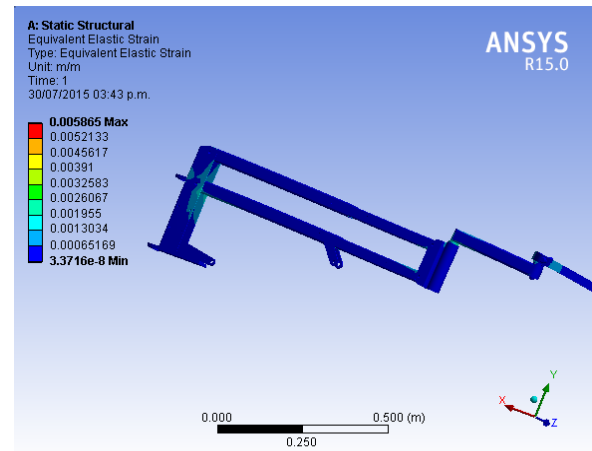


Fig. 21. Deformación (*Equivalent Elastic Strain*) en la sección superior de la grúa al cargarla con una masa de 200 kg.

Durante el mallado se obtuvo una malla en la sección superior de 56207 nodos y 26182 elementos, mientras que en la sección inferior 24282 nodos y 9847 elementos.

Para la simulación y posterior obtención de las deformaciones (*Equivalent Elastic Strain*) en los puntos críticos de los componentes de la grúa, se usaron los valores de las cargas y momentos aplicados en los puntos *A*, *B*, *E* y *F*, indicados en las tablas 2 y 3.

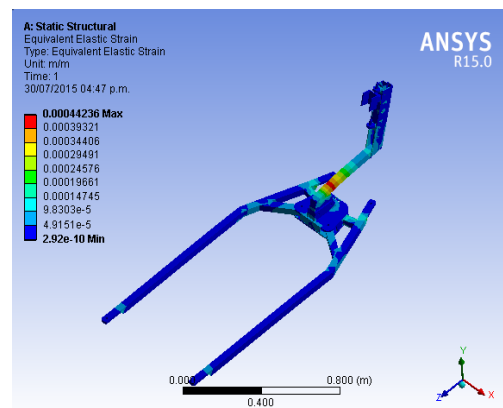


Fig. 22. Deformación (*Equivalent Elastic Strain*) en la sección superior de la grúa al cargarla con una masa de 200 kg.

3. Resultados

El planteamiento teórico se realizó analizando todos los elementos de la grúa bajo esfuerzos de flexión (tensión en su parte superior y compresión en su parte inferior):

$$\sigma = Mc/I$$

donde

$$M = Fd$$

M , momento de flexión generado; F , carga aplicada; d : brazo de palanca (para este caso se trata de la mitad de la longitud propia de cada elemento); c : distancia con respecto del centro de la fibra más alejada (para este caso se trata de la mitad de la dimensión del ancho de cada elemento); I : segundo momento de inercia de la sección transversal en cuestión: PTR 1.5" x 1.5" y $t = 3.18$ mm.

En la Tabla 4 se muestran los datos utilizados para determinar la deformación unitaria teórica (ϵ teórica).

3.1. Comparación de resultados teóricos, experimentales y numéricos

Enseguida se muestran imágenes en donde se indica la deformación unitaria en puntos críticos de la sección inferior de la grúa con pesos de 100 y 200 kg, respectivamente.

Ahora, para el caso de la deformación unitaria en puntos críticos de la sección superior de la grúa (grúa móvil) ante un peso de 200 kg, tenemos la siguiente imagen.

En la tabla que se muestra a continuación (Tabla 7), la lectura de la deformación unitaria obtenida mediante la simulación numérica (ϵ numérica) y la deformación unitaria obtenida mediante el uso de la técnica experimental de galgas extensométricas (ϵ galga).

Se observa que tomando como valores de referencia las ϵ teóricas, el porcentaje de error de las ϵ numéricas es mucho menor que el que se presenta en las ϵ galgas, teniendo en promedio 3.3% y 49.7%, respectivamente. Esto se puede deber a que a diferencia de una simulación numérica, las mediciones hechas con las galgas presentan dificultad en el control de los parámetros que influyen en la prueba, tales como:

- Humedad
- Temperatura
- Calibración de los instrumentos de medición
- Precisión en la preparación de las superficies, pegado y soldado de galgas

Tabla 4. Cálculo de la deformación unitaria teórica (ϵ teórica).

No. de galga	ϵ teórica	σ flexion	M	F	F	F real	F real	d	c	I	E
	m	Pa	Nm	Kgf	N	Kgf	N	m	m	m ⁴	Pa
1	8.484E-05	16968000	46.3168504	100	981	33.724	330.83	0.14	0.0191	5.2E-08	2.1E+11
	0.0001197	23940000	65.3480315	200	1962	47.581	466.77	0.14	0.0191	5.2E-08	2.1E+11
1A	0	0	0	0	0	0	0	0.14	0.0191	5.2E-08	2.1E+11
	0.0001092	21840000	59.615748	100	981	43.407	425.83	0.14	0.0191	5.2E-08	2.1E+11
	0.0001817	36330000	99.1685039	200	1962	72.207	708.35	0.14	0.0191	5.2E-08	2.1E+11
2	8.589E-05	17178000	46.8900787	100	981	34.142	334.93	0.14	0.0191	5.2E-08	2.1E+11
	0.0001176	23520000	64.2015748	200	1962	46.746	458.58	0.14	0.0191	5.2E-08	2.1E+11
2A	0	0	0	0	0	0	0	0.14	0.0191	5.2E-08	2.1E+11
	0.0001145	22890000	62.4818898	100	981	45.494	446.3	0.14	0.0191	5.2E-08	2.1E+11
	0.0001754	35070000	95.7291339	200	1962	69.702	683.78	0.14	0.0191	5.2E-08	2.1E+11
5	1.838E-05	3675000	10.0314961	100	981	7.3041	71.654	0.14	0.0191	5.2E-08	2.1E+11
	5.954E-05	11907000	32.5020472	200	1962	23.665	232.16	0.14	0.0191	5.2E-08	2.1E+11
6	1.103E-05	2205000	6.01889764	100	981	4.3825	42.992	0.14	0.0191	5.2E-08	2.1E+11
	3.276E-05	6552000	17.8847244	200	1962	13.022	127.75	0.14	0.0191	5.2E-08	2.1E+11
7	0.0009849	196980000	537.688189	100	981	391.5	3840.6	0.14	0.0191	5.2E-08	2.1E+11
	0.0019635	392700000	1071.93701	200	1962	780.5	7656.7	0.14	0.0191	5.2E-08	2.1E+11
8	0	0	0	0	0	0	0	0.14	0.0191	5.2E-08	2.1E+11
	0.0009755	195090000	532.529134	100	981	387.75	3803.8	0.14	0.0191	5.2E-08	2.1E+11
	0.0019425	388500000	1060.47244	200	1962	772.15	7574.8	0.14	0.0191	5.2E-08	2.1E+11
A	0	0	0	0	0	0	0	0.14	0.0191	5.2E-08	2.1E+11
	6.111E-05	12222840	33.3641827	200	1962	24.293	238.32	0.14	0.0191	5.2E-08	2.1E+11
B	0	0	0	0	0	0	0	0.14	0.0191	5.2E-08	2.1E+11
	6.479E-05	12958260	35.3716283	200	1962	25.755	252.65	0.14	0.0191	5.2E-08	2.1E+11
C	0	0	0	0	0	0	0	0.14	0.0191	5.2E-08	2.1E+11
	4.265E-05	8530200	23.2845354	200	1962	16.954	166.32	0.14	0.0191	5.2E-08	2.1E+11
D	0	0	0	0	0	0	0	0.14	0.0191	5.2E-08	2.1E+11
	8.015E-05	16029720	43.7556661	200	1962	31.859	312.54	0.14	0.0191	5.2E-08	2.1E+11
E	0	0	0	0	0	0	0	0.14	0.0191	5.2E-08	2.1E+11
	0.0002097	41937000	114.473701	200	1962	83.351	817.67	0.14	0.0191	5.2E-08	2.1E+11
F	0	0	0	0	0	0	0	0.14	0.0191	5.2E-08	2.1E+11
	0.000238	47604900	129.945134	200	1962	94.616	928.18	0.14	0.0191	5.2E-08	2.1E+11
G	0	0	0	0	0	0	0	0.12	0.0127	1.7E-08	2.1E+11
	0.0007137	142749250	194.936758	200	1962	141.94	1392.4	0.12	0.0127	1.7E-08	2.1E+11
H	0	0	0	0	0	0	0	0.12	0.0127	1.7E-08	2.1E+11
	0.0007297	145934250	199.286158	200	1962	145.1	1423.5	0.12	0.0127	1.7E-08	2.1E+11
I	0	0	0	0	0	0	0	0.12	0.0127	1.7E-08	2.1E+11
	0.000713	142607150	194.742708	200	1962	141.8	1391	0.12	0.0127	1.7E-08	2.1E+11
J	0	0	0	0	0	0	0	0.12	0.0127	1.7E-08	2.1E+11
	0.0007202	144033050	196.689901	200	1962	143.21	1404.9	0.12	0.0127	1.7E-08	2.1E+11

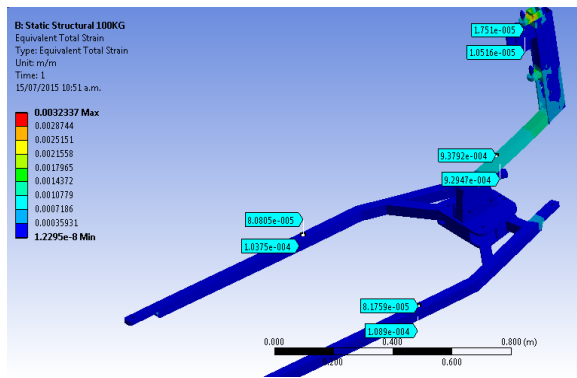


Fig. 23. Deformación unitaria de la plataforma ante una carga de 100 kg.

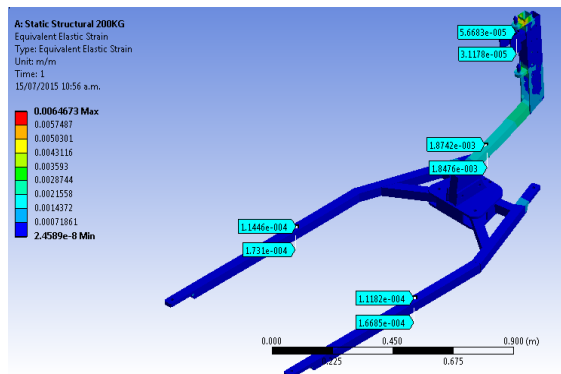


Fig. 24. Deformación unitaria de la plataforma ante una carga de 200 kg.

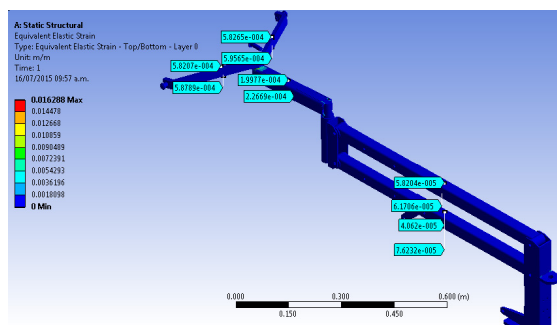


Fig. 25. Deformación unitaria de la grúa móvil ante una carga de 200 kg.

Tanto el análisis teórico y la simulación numérica se hicieron considerando condiciones ideales y controladas (iguales en todos los puntos).

Tabla 5. Datos de deformaciones obtenidos mediante simulación a 100 y 200 kg en la sección inferior de la grúa.

GALGA	100 kg	200 kg
1	8.08E-05	1.14E-04
1a	1.04E-04	1.73E-04
2	8.18E-05	1.12E-04
2a	1.09E-04	1.67E-04
5	1.75E-05	5.67E-05
6	1.05E-05	3.12E-05
7	9.38E-04	1.87E-03
8	9.29E-04	1.85E-03

Tabla 6. Datos de deformaciones obtenidos mediante simulación a 200 kg en la sección superior de la grúa.

GALGA	200 kg
A	5.820E-05
B	6.171E-05
C	4.062E-05
D	7.633E-05
E	1.997E-04
F	2.267E-04
G	5.827E-04
H	5.957E-04
I	5.821E-04
J	5.879E-04

4. Conclusiones

Durante la aplicación del método de medición de deformación (extensometría), descrito en este trabajo, se presentaron diversas dificultades al tener realizar las mediciones en repetidas ocasiones, es decir, hacer varias veces la prueba (carga y descarga de la grúa) ya que algunas galgas ofrecían incoherentes con respecto a las calculadas. Una de las causas podría ser la realización de las pruebas bajo un ambiente de temperatura y humedad no controladas. Más allá de las dificultades mencionadas, se concluye, con los datos de las pruebas experimentales aplicadas y las simulaciones numéricas hechas, que la grúa estructuralmente cumple con lo necesario para desempeñar sin problema su función de trasladar pesos no mayores a 200 kg.

Tabla 7. Comparación de valores de deformaciones unitarias (ϵ).

No. De Galga	ϵ teorica	ϵ galga	ϵ numerica	% error galga	% error numérica
1	0	0.000001	0	0	0
	0.00008484	0.000076	0.0000808	10.41961339	4.761904762
	0.0001197	0.000163	0.000114	36.17376775	4.761904762
1A	0	0	0	0	0
	0.0001092	0.000158	0.000104	44.68864469	4.761904762
	0.00018165	0.000396	0.000173	118.0016515	4.761904762
2	0	0	0	0	0
	0.00008589	-0.000112	0.0000818	230.399348	4.761904762
	0.0001176	-0.000172	0.000112	246.2585034	4.761904762
2A	0	0.000001	0	0	0
	0.00011445	0.000288	0.000109	151.63827	4.761904762
	0.00017535	0.000198	0.000167	12.9170231	4.761904762
5	0	0	0	0	0
	0.000018375	0.000009	0.0000175	51.02040816	4.761904762
	0.000059535	0.000012	0.0000567	79.84378937	4.761904762
6	0	-0.000001	0	0	0
	0.000011025	-0.000004	0.0000105	136.2811791	4.761904762
	0.00003276	-0.000004	0.0000312	112.2100122	4.761904762
7	0	-0.000001	0	0	0
	0.0009849	-0.000825	0.000938	183.7648492	4.761904762
	0.0019635	-0.001674	0.00187	185.2559206	4.761904762
8	0	-0.000001	0	0	0
	0.00097545	0.000796	0.000929	18.39663745	4.761904762
	0.0019425	0.001564	0.00185	19.48519949	4.761904762
A	0	0	0	0	0
	---	0.000026	---	---	---
	6.11142E-05	0.000058	5.8204E-05	5.095706072	4.761904762
B	0	0	0	0	0
	---	0.000026	---	---	---
	6.47913E-05	0.000053	6.1706E-05	18.19889399	4.761904762
C	0	0	0	0	0
	---	0.000055	---	---	---
	0.000042651	0.000115	0.00004062	169.6302549	4.761904762
D	0	0	0	0	0
	---	-0.000039	---	---	---
	8.01486E-05	-0.000078	7.6332E-05	197.3192295	4.761904762
E	0	0	0	0	0
	---	0.000088	---	---	---
	0.000209685	0.000186	0.0001997	11.2955147	4.761904762
F	0	0	0	0	0
	---	-0.000189	---	---	---
	0.000238025	-0.000386	0.00022669	262.1681802	4.761904762
G	0	0.000001	0	0	0
	---	0.000266	---	---	---
	0.000713746	0.000527	0.00058265	26.16423554	18.36734694
H	0	0	0	0	0
	---	-0.000256	---	---	---
	0.000729671	-0.00052	0.00059565	171.2649704	18.36734694
I	0	0	0	0	0
	---	0.000304	---	---	---
	0.000713036	0.000591	0.00058207	17.11495532	18.36734694
J	0	0.000001	0	0	0
	---	-0.000268	---	---	---
	0.000720165	-0.000499	0.00058789	169.2896526	18.36734694
PROMEDIO				49.70919279	3.300579491

Referencias

- [1] Henenyi, M., *Handbook of Experimental Stress Analysis*, J. Wiley, USA, 1950, pp. 85-93.
- [2] Bahena-Salgado, Y., *Calidad de vida de los pacientes con paraplejia secundaria por lesión vertebral traumática*, Medigraphic ARTEMISA, México, 1998, pp. 17-48.
- [3] Hurtado, P., *Incidencia y etiología de las lesiones vertebrales traumáticas en el Servicio de Cirugía de Columna del Hospital de Traumatología y Ortopedia Lomas Verdes*, Tesis de Posgrado, México, 2003, pp. 26-65.
- [4] Rudy, T., Psychosocial predictors of physical performance in disabled individuals with chronic pain, *Clinical Journal of Pain*, USA, 2003, pp. 18-30.
- [5] Aguilar, B., *Integración de la terapia ocupacional en la fase aguda del lesionado medular*, Colegio Nacional de Educación Profesional Técnica, Tesis profesional, México, 1994, pp. 41-62.