

Análisis del Diseño Conceptual de Soportes para Quemadores de Estufas Utilizando FEM (Simulación y Evaluación Experimental)

Diego Vázquez, Hugo Medellín, Antonio Cárdenas, Alonso de la Garza

Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ingeniería, Av. Manuel Nava No. 8, Zona Universitaria, 78290, San Luis Potosí, S.L.P., México.

E-mail: {hugoivanmc@uaslp.mx, jcardena@uaslp.mx, alonsod@uaslp.mx}

RESUMEN

Las técnicas avanzadas de análisis en ingeniería son herramientas modernas utilizadas por las compañías para mejorar el ciclo de diseño y la manufactura de productos nuevos y existentes. El método del elemento finito (FEM) ha llegado a ser una de las herramientas de diseño más utilizadas en el desarrollo de productos. Este trabajo presenta un caso de estudio relacionado a un cambio en el diseño de los soportes que sujetan los inyectores de gas en las estufas. El desempeño del nuevo diseño conceptual propuesto para el soporte de quemador fue evaluado y comparado con respecto a los quemadores existentes utilizando el FEM con el propósito de validar la factibilidad de realizar el cambio de diseño desde el punto de vista de rigidez mecánica. Los beneficios que ofrece el nuevo diseño del soporte son menor tiempo de producción y menor costo de fabricación. Se realizaron pruebas experimentales de los materiales usados en los soportes validando estos en simulaciones hechas con FEM. Los resultados de las simulaciones y ensayos experimentales se presentan y discuten en este trabajo. Finalmente, el desempeño del nuevo diseño y los diseños actuales de los soportes ante diversos casos de carga son comparados, los resultados obtenidos corroboran que el cambio de diseño es factible.

Palabras clave: Método del elemento finito, soportes, espécimen de prueba, carga de flexión, carga de torsión, carga combinada, optimización.

ABSTRACT

Advanced engineering techniques for analysis are modern tools used for companies to enhance the design and manufacturing cycles of new or existing products. Finite element method has become one of the most used tools in the design process of products. This paper presents a case of study regarding a design change of brackets that support the gas jet in stoves. Using the finite element method, the performance of the existing of brackets was compared with the performance of the new proposed brackets in order to evaluate the feasibility of performing the design change. The advantages of using the new design of brackets are shorter manufacturing times and costs. Experimental analysis of the materials used in the brackets and the validation of the finite element solutions were also performed. The results of the simulation and the experimental analysis are discussed and presented. Finally, the performance of the existing and the new brackets under several load cases are compared and the results suggest that the product design change is feasible.

Keywords: Finite element method, brackets, test specimen, bending load, torsional load, combined load, optimization.

1. INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente los procesos de diseño y manufactura han sido evaluados y optimizados a través de la experiencia y una serie de ensayos de prueba y error. Algunas veces un diseño es evaluado su vida de servicio con el propósito de identificar problemas o errores de diseño. Las desventajas de este método tradicional son los altos costos y grandes tiempos de evaluación que este requiere, además de la incertidumbre respecto al fenómeno físico que este implica. Afortunadamente, el rápido crecimiento de los sistemas de computación, ha conducido al uso de métodos matemáticos poderosos capaces de simular fenómenos físicos tales como el comportamiento de una pieza sujeta a cargas mecánicas. El propósito de la física es el entender la estructura de la naturaleza y explicar los fenómenos naturales. Existe un método preciso para representar las leyes de la física, y ese método es por medio de ecuaciones diferenciales. El método del elemento finito (FEM) es una de las técnicas numéricas más comunes para simular el comportamiento de fenómenos físicos. Debido a que el FEM esta basado en dividir el campo de análisis en un número finito de elementos muy pequeños, se pueden realizar análisis muy complicados. Hoy en día hay una gran variedad de software de FEM (por ejemplo: Ansys®, Comsol®, Nastran®, etc.) conocidos como software de ingeniería asistida por computadora (CAE). La metodología general para simular o analizar un componente en este tipo de software es crear un modelo 3D de la pieza, subdividir el modelo en pequeños elementos finitos, aplicar cargas y condiciones de frontera, y finalmente resolver el problema. Algunos trabajos de investigación que se han reportado y que utilizaron el FEM para realizar diseños nuevos o validar diseños existentes, muestran que el FEM es un método efectivo y de gran importancia en la ingeniería, [1]-[7].

En este artículo se presenta un estudio para realizar la evaluación de factibilidad de un cambio en el diseño del soporte de quemadores de estufas. El objetivo es comparar el desempeño mecánico entre el diseño nuevo del soporte hecho de acero aluminizado y los diseños existentes del soporte hechos de aluminio. Esta comparación esta basada en evaluar el incremento o decremento de las propiedades mecánicas del nuevo diseño de acero aluminizado con respecto a los diseños existentes de aluminio. Se consideran diversos tipos de cargas mecánicas tales como: flexión, torsión, y combinadas. Para el análisis de los soportes bajo estas condiciones se utilizará el FEM con la ayuda del software Ansys®.

El resto del artículo esta organizado de la siguiente manera: Sección 2 presenta la descripción del problema, En la sección 3 se describe la validación experimental de las propiedades del material y de la simulación por FEM. La sección 4 presenta los resultados obtenidos en el análisis por FEM de los soportes. En la sección 5 se discuten los resultados obtenidos en estos análisis. Finalmente las conclusiones obtenidas de este trabajo se proporcionan en la sección 6.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El presente trabajo surge con la finalidad de realizar un cambio en el diseño y la manufactura de un componente que es parte de un producto final de una empresa fabricante de estufas. Este proyecto consiste principalmente en analizar el desempeño mecánico del soporte de los quemadores de las estufas por medio de FEM. La tolerancia a la excentricidad es 0.001 in, es decir el máximo desplazamiento del centro de la parte superior del soporte es 0.001 in, además, se requiere cambiar la geometría y el material del modelo original para reducir costos de producción, es decir, un cambio en el diseño del soporte. Adicionalmente, se pretende que el nuevo diseño de quemador propuesto remplace a los cuatro modelos actuales usados por esta empresa. Una de las principales razones por las que se pretende realizar el cambio de diseño

radica en las diferentes formas de fabricación que implican estos modelos. Los modelos actuales son fabricados mediante una fundición a alta presión de aluminio (aluminio A 413.0, de acuerdo a la norma Aluminum alloys NADCA A-3-2-03), mientras que el nuevo diseño o modelo se fabricaría por troquelado y el material considerado es lamina de acero aluminizado de acuerdo a la norma ASTM A 463/A 463M -02a. Esta diferencia en los métodos de fabricación entre los modelos actuales y el modelo propuesto conducirían a un ahorro significativo en los costos y en los tiempos de producción, además de que serían manufacturados por la misma empresa fabricante de estufas, ya que actualmente los soportes por fundición de aluminio se compran a un proveedor externo a dicha empresa. La Fig. 1 muestra los cuatro modelos actuales de los soportes de quemadores y su correspondiente número de parte (número asignado por la empresa), y la Fig. 2 muestra el nuevo diseño.

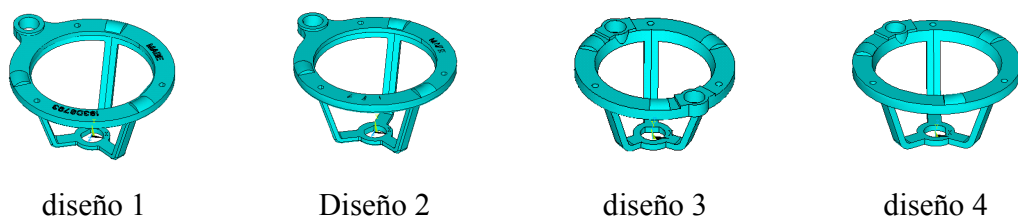


Fig. 1. Diseños originales de los soportes.

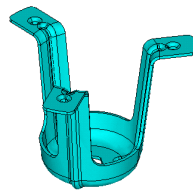


Fig. 2. Diseño nuevo del soporte.

La metodología propuesta consiste en analizar el comportamiento de los soportes aplicando diversas cargas mecánicas (flexión, torsión y combinación de ambas) a cada uno de los modelos y comparar los resultados de cada modelo analizando su comportamiento. Para ello se simularán todas las condiciones mencionadas usando como herramienta principal el software de elemento finito ANSYS®. Así mismo se considera realizar ensayos de materiales para validar las simulaciones realizadas y para obtener las propiedades mecánicas de los materiales considerados en este caso de estudio.

2. ANÁLISIS EXPERIMENTAL Y VALIDACIÓN FEM

Uno de las dificultades que se encontró en este proyecto fue el no encontrar reportados en la literatura especializada el módulo de elasticidad de los materiales utilizados en la fabricación de los soportes: aluminio A413 (Aluminum alloys NADCA A-3-2-03) y acero aluminizado (ASTM A 463/A 463M -02a). Para obtener las propiedades de estos materiales, se fabricaron probetas de acuerdo al estándar técnico ASTM. Dichas probetas fueron fabricadas con los materiales originales de los cuales están hechos los soportes y posteriormente fueron ensayadas a tensión en una máquina universal. La Fig. 3 muestra los dos tipos de probetas fabricadas para las pruebas en la máquina universal. El objetivo principal de estas pruebas fue determinar el módulo de elasticidad de cada uno de los materiales, para posteriormente con este módulo realizar las

simulaciones por elemento finito y así poder comparar la simulación con las pruebas experimentales hechas a los prototipos y realizar una validación fidedigna. La Fig. 4 muestra las probetas durante su ensayo a la tensión en la máquina universal.



Fig. 3. Probetas utilizadas para las pruebas de compresión: a) probeta circular estándar de aluminio, b) probeta rectangular estándar de acero aluminizado.



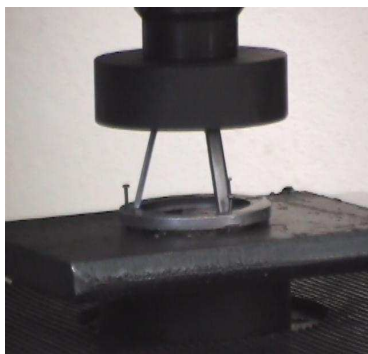
Fig. 4. Probetas durante las pruebas de tensión.

La máquina universal utilizada para las pruebas fue una Shimadzu AGI 100 KNI ubicada en el CIM de la UASLP. Los resultados obtenidos de los ensayos a tensión tanto para las especímenes de acero aluminizado como a los especímenes de aluminio se presentan en la Tabla 1. Comparando estos resultados con los valores indicados en los estándares, se observa que para el caso del acero aluminizado los resultados están de acuerdo con la literatura y por tal motivo el módulo de elasticidad obtenido a partir de la prueba de ensayo fue el utilizado en la simulación FEM. Por otro lado, en el caso del aluminio los resultados obtenidos difieren considerablemente de los valores reportados en la literatura. Una de las razones por las que se considera la existencia de esta diferencia es el hecho de que la probeta utilizada fue fabricada por medio de una fundición por gravedad, mientras que el soporte se fabrica por medio de una fundición en dado a alta presión. Esta diferencia en la fabricación de la probeta y el soporte implica una diferencia en la estructura granular del material (por ejemplo, porosidades) de la probeta y el soporte.

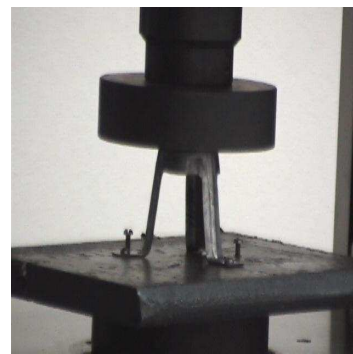
ACERO ALUMINIZADO	Módulo de elasticidad (1×10^6 lb/pulg ²)	Esfuerzo a la cedencia (1×10^3 lb/pulg ²)	Resistencia a la tensión (1×10^3 lb/pulg ²)
Experimental	7.5	41	56
Especificación del estándar	6.6	43	45
ALUMINIO	Módulo de elasticidad (1×10^6 lb/pulg ²)	Esfuerzo a la cedencia (1×10^3 lb/pulg ²)	Resistencia a la tensión (1×10^3 lb/pulg ²)
Experimental	0.473	7.4	17
Especificación del estándar	6.65	40	42

Tabla 1. Resultados obtenidos de las pruebas hechas a las probetas en la máquina universal.

Una vez obtenidas las propiedades de los materiales, en particular el módulo de elasticidad, el siguiente paso fue realizar las pruebas de los soportes en la máquina universal y compararla con su correspondiente simulación hecha por FEM. Dichas pruebas fueron únicamente de compresión debido a la geometría de los soportes y de las mordazas de la máquina universal. Las pruebas de compresión realizadas a los soportes consistieron en sujetar los quemadores en una placa de acero aluminizado en su parte inferior y por la parte de arriba por medio de una mordaza plana, comprimir el soporte. Las pruebas a compresión de los quemadores se pueden observar en la Fig. 5. La Tabla 2 muestra los resultados obtenidos de las pruebas realizadas en la máquina universal y su correspondiente simulación por FEM.



(a) aluminio



(b) acero aluminizado

Fig. 5. Soportes de quemadores durante las pruebas de compresión en la máquina universal.

ACERO ALUMINIZADO	Carga (lb)	Esfuerzo (lb/pulg ²)	Desplazamiento (milésimas de pulgada)	Diferencia - error desplazamientos (%)
Experimental	200	-	5.639	7.9
Simulación FEM	200	29639	6.086	
ALUMINIO				
Experimental	600	-	43.8	
Simulación FEM	600	28770	49.3	12.5

Tabla 2. Resultados obtenidos de las pruebas de compresión a los quemadores.

De los resultados obtenidos a partir de las pruebas experimentales y de la simulación por FEM se observa un error del 12.5% para el aluminio y un error del 7.9% para el acero aluminizado. Estas diferencias entre la simulación por FEM y la prueba experimental real, se pueden atribuir a efectos en los resultados de la fricción entre las mordazas y el espécimen y a discrepancias entre el modelo geométrico y el soporte fabricado, pero aún así se considera que el error de comparación es aceptable y por lo tanto la simulación por FEM es válida.

3. ANALISIS POR FEM

3.1. Análisis a la flexión

En las simulaciones por FEM entre las principales consideraciones a tomar en cuenta son los grados de libertad y la modelación de las condiciones de frontera a las cuales está sujeta la pieza. En el caso del análisis a la flexión estas consideraciones fueron:

- La base del soporte fue fijada en todas direcciones (x, y, z) para impedir cualquier desplazamiento en la base del soporte con el fin de obtener una simulación más real. La Fig. 6 muestra con los triángulos verdes esta restricción.

- La carga de flexión fue aplicada en la parte superior o contraria a la base del soporte, como se muestra en la Fig. 6.
- La carga de flexión se fue incrementando gradualmente.

Cabe hacer mención que en las simulaciones por FEM realizadas a los soportes, el soporte de aluminio correspondiente al diseño 1 (Fig. 1) es el que tiene el mayor espesor, en comparación con los otros tres modelos de aluminio, y por lo tanto este soporte es el más rígido y por consiguiente uno de los críticos a ser evaluado en la comparativa con el modelo de acero aluminizado (Fig. 2).

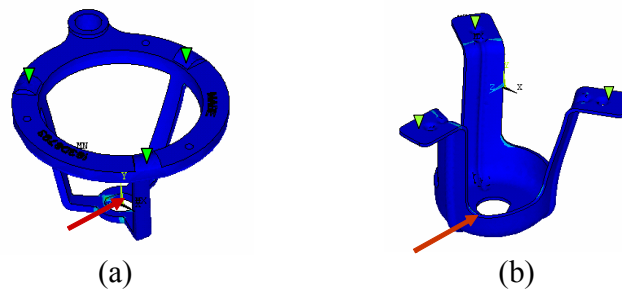


Fig. 6. Grados de libertad y cargas aplicadas a los soportes: a) modelo actual de aluminio, b) modelo propuesto de acero aluminizado.

Se trabajó con el mallado más pequeño posible que permitió el software, esto debido a la geometría compleja de los modelos y al recurso computacional en el que se desarrollaron las pruebas, una PC Pentium 4 a 1.73 GHz. y 2 Gigas en RAM . Lo anterior con la finalidad de que los resultados fueran lo más preciso posibles y convergieran lo más posible. Dichos mallados fueron realizados de manera libre. La malla creada para las soportes se muestra en la Fig. 7.

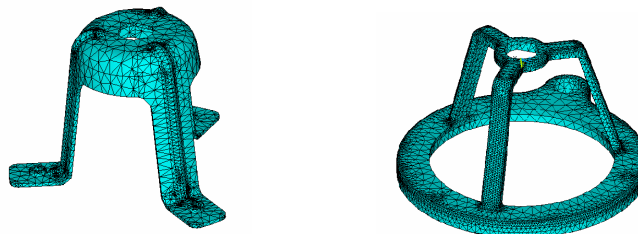


Fig. 7. Mallado de los modelos de soportes.

De los resultados obtenidos, se seleccionó como parámetros críticos el esfuerzo máximo de Von Mises en el soporte y el desplazamiento máximo resultante. Para el caso del análisis a la flexión de los soportes, la Tabla 3 muestra los valores de los esfuerzos y desplazamientos obtenidos del análisis a la flexión de los soportes.

Carga (lb)	Acero (pulg)	Desplazamientos			
		Diseño 1 (pulg)	Diseño 2 (pulg)	Diseño 3 (pulg)	Diseño 4 (pulg)
5	1.50E-03	1.758 E-03	1.243 E-03	1.404 E-03	1.525 E-03
15	4.57E-03	5.27E-03	3.73E-03	4.21E-03	4.58E-03

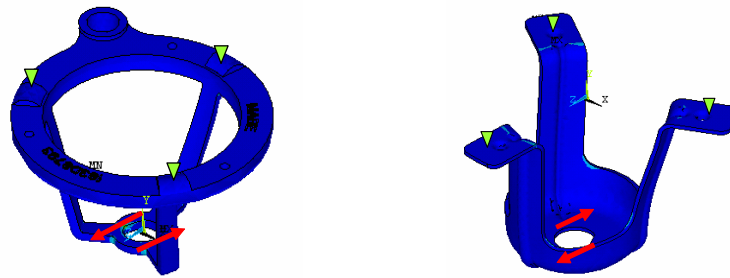
Esfuerzos					
Carga (lb)	Acero (lb/pulg ²)	Diseño 1 (lb/pulg ²)	Diseño 2 (lb/pulg ²)	Diseño 3 (lb/pulg ²)	Diseño 4 (lb/pulg ²)
5	9064	3289	2259	11012	2404
15	28445	9867	6777	33037	7212

Tabla 3.- Desplazamientos y esfuerzos obtenidos del análisis a flexión de los soportes.

3.2. Análisis a la torsión

En el análisis a la torsión por medio de elemento finito las consideraciones realizadas fueron:

- La base del soporte fue sujeta como se muestra en la Fig. 8, indicado con triángulos verdes la manera en como fue fijada.
- Un par de torsión se aplica en el extremo superior de los soportes mediante dos cargas paralelas y en sentido opuesto separadas cierta distancia y se ejemplifican mediante las flechas rojas que se muestran en la Fig. 8.
- El par de torsión se incrementó gradualmente.



a) modelo actual,

b) modelo propuesto.

Fig. 8. Condiciones aplicadas para el caso de la torsión:

Los resultados obtenidos del análisis a torsión se muestran en la Tabla 4. En esta tabla se presentan los valores de los esfuerzos máximos de Von Mises y los desplazamientos máximos obtenidos.

Desplazamientos					
Carga/torque (lb)/(lb-pulg)	Acero (pulg)	Diseño 1 (pulg)	Diseño 2 (pulg)	Diseño 3 (pulg)	Diseño 4 (pulg)
5 / 0.7	2.67E-04	5.67E-04	4.68E-04	5.78E-04	8.90E-04
15 / 2	0.811E-03	2.09E-03	2.63E-03	1.19E-03	2.05E-03

Esfuerzos					
Carga/torque (lb)/(lb-pulg)	Acero (lb/pulg ²)	Diseño 1 (lb/pulg ²)	Diseño 2 (lb/pulg ²)	Diseño 3 (lb/pulg ²)	Diseño 4 (lb/pulg ²)
5 / 0.7	3448	3480	2508	1975	6584
15 / 2	10343	23380	7563	5755	9754

Tabla 4. Desplazamientos y esfuerzos obtenidos del análisis a torsión de los soportes.

3.3. Análisis combinado (flexión y torsión)

En el análisis para el caso de una carga de flexión y torsión (carga combinada), las consideraciones realizadas fueron:

- La base del soporte se sujetó como se indica con los triángulos verdes en la Fig. 9.
- Se aplicaron las cargas a flexión y torsión como se muestra en la Fig. 9.
- El par de torsión se fue incrementando gradualmente.
- La carga de flexión se fue incrementando gradualmente.

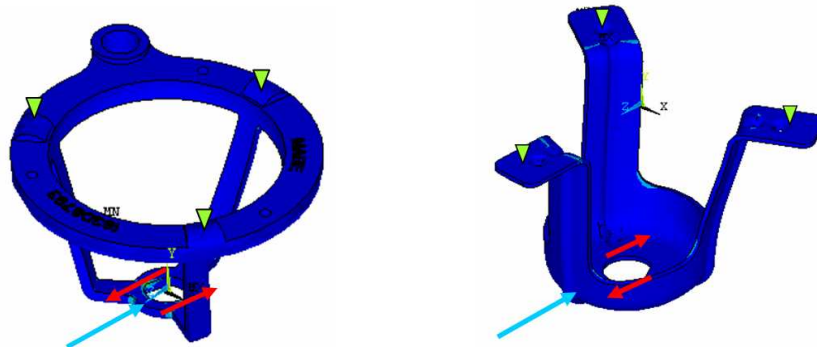


Fig. 9. Condiciones de frontera aplicadas para el caso de carga combinada.

Los resultados obtenidos en el análisis de carga combinada se presentan en la Tabla 5. En esta tabla se presentan los esfuerzos y desplazamientos máximos obtenidos para cada uno de los soportes de quemadores. La Fig. 10 muestra los desplazamientos en los soportes, mientras que la Fig. 11 muestra los esfuerzos de von Mises de los soportes. En estas figuras se señala mediante un círculo la localización de los desplazamientos y esfuerzos máximos.

Desplazamientos					
Carga/torque (lb)/(lb-pulg)	Acero (pulg)	Diseño 1 (pulg)	Diseño 2 (pulg)	Diseño 3 (pulg)	Diseño 4 (pulg)
5 / 0.7	1.72E-03	1.31E-03	1.54E-03	1.40E-03	1.63E-03
15 / 2	5.14E-03	6.13E-03	4.51E-03	4.64E-03	4.89E-03
Esfuerzos					
Carga/torque (lb)/(lb-in)	Acero (lb/pulg ²)	Diseño 1 (lb/pulg ²)	Diseño 2 (lb/pulg ²)	Diseño 3 (lb/pulg ²)	Diseño 4 (lb/pulg ²)
5 / 0.7	8435	3508	3780	3918	4017
15 / 2	25429	14840	11103	13756	12053

Tabla 5. Esfuerzos y desplazamientos para el caso de carga combinada.

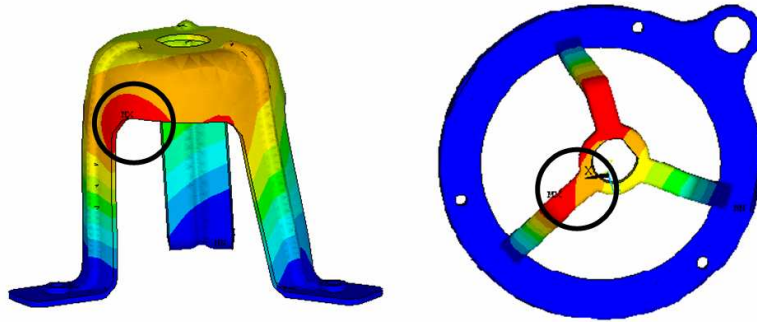


Fig. 10. Gráfica de desplazamientos en los soportes para el caso de carga combinada.

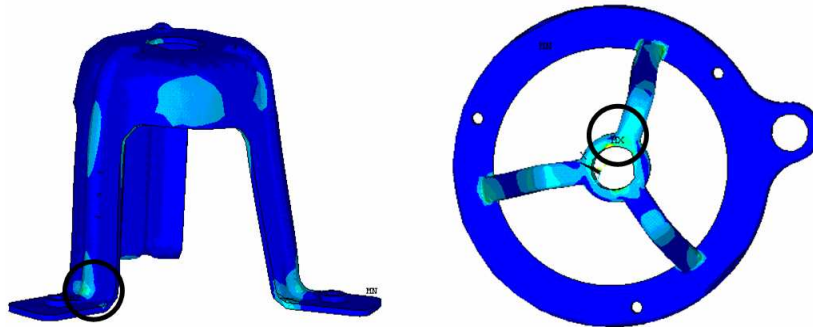


Fig. 11. Gráfica de esfuerzos en los soportes para el caso de carga combinada.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Análisis a la flexión

De los resultados obtenidos anteriormente se puede observar que en el caso de los desplazamientos, el modelo de acero aluminizado tiene menor desplazamiento que el modelo de aluminio identificado con el diseño 1 y diseño 4, mientras que tiene mayor desplazamiento que el diseño 2 y 3. Como ya se había mencionado anteriormente uno de los problemas de los quemadores es el de sobrepasar su excentricidad y en el caso de la flexión una fuerza aproximada de 117.3 lb hace que el modelo de acero aluminizado exceda su excentricidad en 0.010 pulg., y para el caso del diseño 1 la fuerza es cerca de 28.5 lb. En el caso de los esfuerzos, se observa que el modelo de acero aluminizado presenta un esfuerzo menor que el del diseño 3, pero mayor que los restantes diseños 1,2 y 4.

4.2. Análisis a la torsión

Analizando los resultados obtenidos para el caso de cargas de torsión, se observa que en el caso de los desplazamientos, el modelo de acero aluminizado fue el que resultó en el menor desplazamiento en comparación con los modelos de aluminio (diseños 1, 2, 3 y 4). Para el caso de los esfuerzos, se observa que el modelo de acero aluminizado tiene un esfuerzo menor que el diseño 1, pero mayor que los diseños 2, 3 y 4. El torque aproximado para exceder la tolerancia de excentricidad de 0.10 pulg. del soporte de acero aluminizado es 148.3 lb-pulg, y en el caso del diseño 1 es aproximadamente 14.86 lb-pulg.

4.3. Análisis con carga combinada

De los resultados del análisis a cargas combinadas se observa que el modelo de acero aluminizado tiene menor desplazamiento que el diseño 1, pero mayor desplazamiento que los

diseños restantes. Se puede también observar que no existe mucha diferencia entre los valores de estos desplazamientos, sin embargo si existe una gran diferencia en los esfuerzos, teniendo el acero aluminizado un valor mas alto que los diseños 1, 2, 3 y 4, lo cual significa que el modelo de acero aluminizado tiene un mayor esfuerzo cuando se somete a cargas combinadas, siendo este un caso mas real de las cargas a las que puede estar sometido durante su vida útil. Para el caso de cargas combinadas la carga aproximada de 162.43 lb (flexión 162.43 lb y torque de 36.1 lb-pulg.) hace que el modelo de acero aluminizado exceda la tolerancia de excentricidad de 0.010 pulg. y para el modelo de aluminio la carga combinada aproximada para exceder dicha excentricidad es alrededor de 23.03 lb (flexión 23.03 lb y torque 5.11 lb-pulg.).

En general, se puede observar que el nuevo diseño del soporte tiene un desempeño mecánico similar al diseño actual. Por ello se puede concluir que el diseño nuevo es viable de remplazar los cuatro diseños actualmente en uso; esto permitirá una reducción en materiales, peso, costos y tiempo de producción así como eventuales falla del soporte. Aunque el soporte de acero aluminizado presenta mayores esfuerzos, estos no son relevantes ya que el acero aluminizado (ASTM A 463/A) presenta una mayor capacidad de carga antes de llegar a la cedencia que la que presenta el aluminio A-413.0. Es importante mencionar que el propósito de este trabajo es evaluar el desempeño de los soportes para validar el cambio del diseño del soporte. La optimización de la geometría del nuevo soporte se tiene considerada como trabajo a futuro.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta un caso de validación comparativa de una geometría nueva para un soporte de un inyector de gas para quemadores de estufa. El diseño nuevo presenta beneficios de menor tiempo de producción, menor costo de fabricación, de materiales, de peso así como de estandarización del producto (cuatro diferentes diseños se reemplazaron por solamente un diseño).

Para realizar la validación del modelo fue necesario obtener por ensayo a tensión las propiedades mecánicas de los materiales; de los resultados obtenidos se encuentra que estos son acordes a las reportadas en la literatura especializada. Utilizando estos datos del material se realiza una comparativa entre los valores de desplazamientos obtenidos por FEM y los desplazamientos obtenidos experimentalmente ante cargas a compresión para los diferentes soportes. Los resultados obtenidos en las pruebas experimentales para el nuevo modelo fueron menores a los resultados de las simulaciones por FEM en un 7.9%.

A través de los resultados de la simulación FEM para casos de cargas combinadas se encuentra que el nuevo soporte fabricado de acero aluminizado presenta desplazamientos similares a los desplazamientos presentados por los soportes de aluminio; también se encuentra que el nuevo modelo de acero aluminizado presenta mayores esfuerzos que los modelos de aluminio, lo cual no se considera significativo ya que el acero aluminizado tiene un esfuerzo de cedencia del doble del aluminio.

Se concluye que el nuevo modelo del soporte de acero aluminizado presenta rigidez mecánica similar a los modelos fabricados por inyección de aluminio y por lo tanto se recomienda la sustitución de los soportes de aluminio por el nuevo modelo.

Como trabajo futuro se contempla la optimización del diseño nuevo de los soportes tomando en cuenta valores de cargas reales del ciclo de ensamble y de trabajo de las estufas. Para ello se considerarán la obtención de los valores de cargas físicas reales aplicadas al soporte para así poder llevar a cabo una fidedigna optimización del modelo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo del Fondo de Apoyo para la Investigación (FAI) de la UASLP por el apoyo otorgado al proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Jeff Thielman, Ping Ge, A Comparative Study of Optimal Design for an Inkjet Printer Tube With and Without Performance Variations, Proceedings of DETC'04 ASME 2004 Conference, Salt Lake City, Utah, USA.
- [2] Viktor Lévárđy, Markus Hoppe, Tyson R. Browning, Adaptive Test Process—An Integrated Modeling Approach for Test and Design Activities in the Product Development Process, Proceedings of DETC'04 ASME 2004 Conference, Salt Lake City, Utah, USA.
- [3] Jing Zeng, Jian Qing He, Design Analysis and Test of High Speed Railway Passenger Car Bogie with Semi-active Suspensions, Proceedings of DETC'04 ASME 2004 Conference, Salt Lake City, Utah, USA.
- [4] Daniel A. McAdams, Clive L. Dym, Modeling and Information in the Design Process, Proceedings of DETC'04 ASME 2004 Conference, Salt Lake City, Utah, USA.
- [5] Buholzer, Brendan A., and Shukla, Amit, Design and Analysis of Snap-Through Response in Hypersonic Aircraft Structures, Proceedings of the COMSOL Conference 2007, Boston.
- [6] N. Bianco, O. Manca , S. Nardini and S. Tamburrino, Transient heat conduction in solids irradiated by a moving heat source, Proceedings of the COMSOL Users Conference 2006 Milan, Italy.
- [7] Jeffrey W. Herrmann, Joyce Cooper, Satyandra K. Gupta, Caroline C. Hayes, Kosuke Ishii, David Kazmer, Peter A. Sandborn, William H. Wood, New Directions in Design for Manufacturing, Proceedings of DETC'04 ASME 2004 Conference, Salt Lake City, Utah, USA.