

Análisis de deformaciones en un dispositivo electromecánico para medición de fuerzas del proceso de soldadura por fricción-agitación realizado en fresadora universal

Strain analysis of an electromechanical device for force measurement in friction stir welding developed in a universal milling machine

Eric Ocampo Battle¹, Jorge Arrieta Romero², Jonathan Fábregas Villegas³, Jennifer Villa Dominguez⁴, Franz J. Quesada Tatis⁵, Jimmy Unfried-Silgado⁶

^{1,2} Ingeniero Mecánico. ³ Magíster en Ingeniería Mecánica. Profesor Catedrático.

⁴ Ingeniero Mecánico, Estudiante de Maestría en Ingeniería Mecánica. Profesor Catedrático.

⁵ Magíster en Materiales y Procesos. Profesor Tiempo Completo de la Universidad Autónoma del Caribe.

⁶ Doctor en Ingeniería Mecánica. Docente Investigador del Programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad Autónoma del Caribe, Barranquilla-Colombia.

^{1,2,3,4,5,6} Universidad Autónoma del Caribe. Grupo de Investigación en Materiales, Procesos y Tecnologías de Fabricación – IMTEF. Barranquilla-Colombia.

Email: jimy.unfried@uac.edu.co

Recibido 10/05/2016,
Aceptado 02/06/2016

Cite this article as: E. Ocampo, J. Arrieta, J. Fábregas, J. Villa, F. Quesada, J. Unfried-Silgado, "Strain analysis of an electromechanical device for force measurement in friction stir welding developed in a universal milling machine", *Prospect*, Vol 14, N° 2, 36-44, 2016.

RESUMEN

En este trabajo fue desarrollado el análisis del comportamiento de las deformaciones de un dispositivo electromecánico de medición de fuerzas axiales y horizontales durante el proceso de soldadura por fricción-agitación (SFA). Se detalla la metodología del diseño mecánico del dispositivo y su fabricación. Se realizó simulación computacional de las deformaciones y los esfuerzos involucrados durante la operación usando técnicas de elementos finitos con el programa ANSYS®, cuyos resultados fueron comparados con el desempeño real del dispositivo durante la soldadura de una placa de aluminio comercialmente puro. Los resultados mostraron que el intervalo de valores de las deformaciones unitarias simuladas está entre $3,19 \times 10^{-10}$ y $3,34 \times 10^{-3}$ mm.mm⁻¹, intervalo que tuvo una diferencia menor al 10% con los valores reales medidos.

Estos valores sirvieron para validar la posición y precisión de los sensores de deformación (galgas extensiométricas), los cuales son usados para realizar la medida de fuerzas en los sentidos horizontal y vertical durante el proceso SFA.

Palabras clave: Soldadura Fricción-Agitación (SFA); Galgas extensiométricas; Análisis por elementos finitos; Deformaciones; Fresadora; Aleaciones de aluminio.

ABSTRACT

In this work was analyzed the behavior of strain in an electromechanical device for measuring axial and horizontal forces during friction stir welding (FSW) process. It was described the methodology of mechanical design of the measurement device and its manufacturing. Computer simulation using finite element analysis with ANSYS® program was used to calculate the strain and stresses involved during operation. Obtained results were compared with the experimental performance of the device during the welding of a commercially pure aluminum plate. The results showed that the range of simulated strain values was between 3.19×10^{-10} and 3.34×10^{-3} mm.mm⁻¹, which had a difference 10% less compared to actual values measured. Obtained values were used to validate the accuracy and the position of strain sensors (strain gages), which were used for measurement of forces in the horizontal and vertical directions of SFA process.

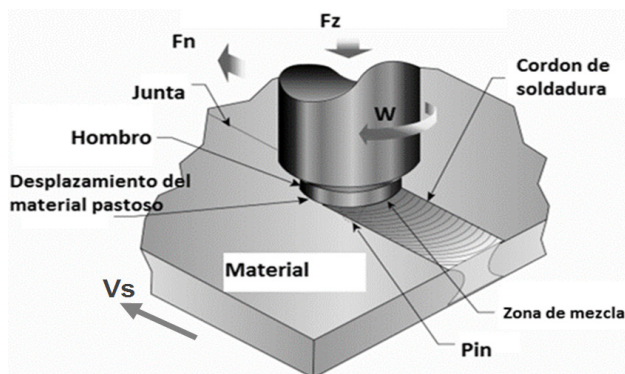
Key words: Friction Stir Welding (FSW); Strain gauges; Finite elements analysis; Milling machine; Aluminum alloys.

1. INTRODUCCIÓN

El proceso de Soldadura por Fricción-Agitación (SFA), es uno de los desarrollos más importantes que se ha dado en las últimas décadas en los procesos de unión. En este se obtienen juntas soldadas en estado sólido, actuando la fricción y agitación como fuentes de energía y método de unión [1]. Además de su bajo impacto al medio ambiente, bajo aporte térmico y alta eficiencia energética, éste presenta múltiples ventajas sobre los procesos tradicionales por fusión, tales como, ausencia de problemas por solidificación, capacidad de soldar materiales disímiles, bajos niveles de distorsión, juntas con excelente resistencia a la tracción y fatiga [1,2]. El proceso de soldadura por fricción agitación usa una herramienta no consumible que consta de dos partes importante, el hombro y un pin. Las placas a unir no requieren preparación especial previa y la junta se realiza cuando la herramienta girando a una determinada velocidad rotacional penetra la unión de las placas, actuando una fuerza axial (F_z), la cual es mantenida durante todo el proceso con posibilidad de control. Cuando el hombro toca la superficie de las placas, entonces se suministra una velocidad lineal o de soldadura (v_s) que hace avanzar la herramienta mientras gira, para conformar finalmente el cordón de soldadura en estado sólido, como se muestra en la figura 1 [3]. Actualmente este proceso se usa para la unión de aluminios y aleaciones de bajo punto de fusión de industrias como la automotriz, aeroespacial y naval [4].

Figura 1. Esquema mostrando los parámetros y partes del proceso de soldadura por SFA.

Figure 1. Sketch showing parameters and parts of FSW process.



El desarrollo de máquinas especializadas para aplicación del proceso SFA fue posterior a su invención [1]. No obstante, con el desarrollo del proceso, la implementación de nuevas geometrías de herramientas y el incremento de espesores y longitudes de soldadura, se hizo recurrente el uso de máquinas herramientas especializadas. Estas máquinas permiten un mejor

control durante el proceso ya que, durante la operación se desarrollan fuerzas relativamente altas, siendo una característica exigida a la máquina herramienta su alta la rigidez estructural [5]. De acuerdo a lo anterior, y por su principio de funcionamiento, la fresadora es la máquina herramienta más apropiada para ser acondicionada para llevar a cabo el proceso SFA [1, 2, 4].

El interés por la adaptación de fresadoras para realizar el proceso SFA y el uso de dispositivos para su caracterización es relativamente nuevo. Varios autores han trabajado al respecto de este tema, incluyendo el estudio de las fuerzas que intervienen durante su operación. Murillo [6] diseñó e implementó un dispositivo basado en galgas extensiométricas para medir fuerzas y así evaluar el proceso SFA en una fresadora universal *Cervinia* 2ST. En este trabajo el autor evaluó la influencia de la velocidad de avance y de rotación de la herramienta en las propiedades mecánicas de placas de aluminio AA6061-T6. Los resultados evidenciaron que la eficiencia de la junta aumentó con la velocidad de avance, manteniendo constante la velocidad de rotación, obteniendo eficiencias de 84%, mientras que las fuerzas experimentadas durante el proceso no variaron. Haciendo uso de un dispositivo basado en galgas extensiométricas, Velandia [7] estudió los efectos de la fuerza axial sobre la resistencia mecánica de juntas soldadas por fricción-agitación. En este trabajo fue observado que, al mantener constante la velocidad de rotación de la herramienta y variando tanto la velocidad de avance como la carga axial, existe una relación entre estas variables que determina la adecuada resistencia a la tracción de la junta. Al aumentar la velocidad de avance y la carga axial se aumenta la resistencia mecánica de la junta. Ulyses [8] desarrolló un modelo visco-plástico en tres dimensiones del proceso FSA, encontrando que la magnitud de la fuerza actuante sobre el pin aumenta con el incremento de la velocidad de la soldadura o velocidad translacional de la herramienta y disminuye con el incremento de la velocidad rotacional.

La determinación de fuerzas axial (F_z) y horizontal (F_N) es de suma importancia junto al torque durante el proceso de soldadura por fricción-agitación para determinar el consumo energético y de esta manera dimensionar tamaño de máquinas y motores, además de establecer ventajas o desventajas de la SFA frente a procesos convencionales. Por tal motivo, en este trabajo se desarrolla el análisis del comportamiento de las deformaciones de un dispositivo electromecánico de medición de fuerzas axiales y horizontales durante el proceso de soldadura por fricción-agitación (SFA), detallándose la metodología del diseño mecánico del dispositivo y su fabricación [9-12]. Se realizó simulación computacional de las deformaciones y los esfuerzos involucrados durante la operación usando técnicas de elementos finitos y se seleccionan con base en estos resultados las galgas extensiométricas

que, adecuadamente implementadas junto con las ecuaciones de deformación, suministrarán los valores de fuerzas en tiempo real del proceso SFA.

METODOLOGÍA

2.1. Diseño del dispositivo

Un flujograma del método utilizado para el desarrollo general de este trabajo se muestra en la figura 2. Para el diseño del dispositivo, se establecen los requerimientos con base en criterios técnicos, económicos, ambientales y ergonómicos. Posteriormente se realiza el diseño conceptual y las alternativas se evalúan mediante el método de análisis de valor, la ponderación de los criterios y se aplica el concepto de variable apareada. El diseño del dispositivo se lleva a cabo con la teoría de diseño para cargas estáticas del esfuerzo cortante máximo utilizando el software ANSYS® [10].

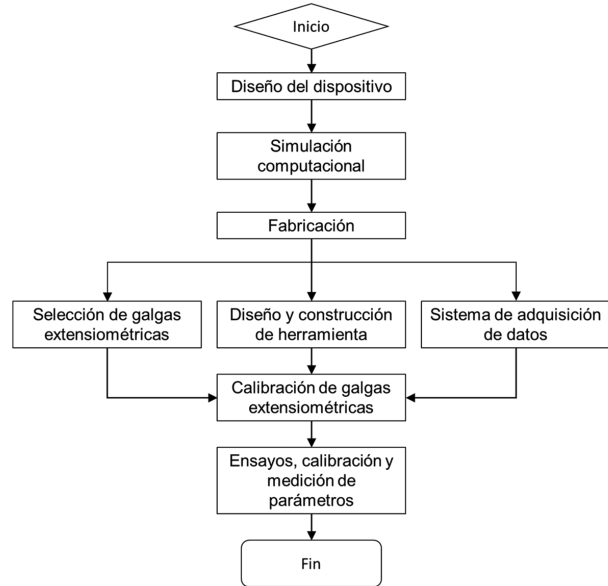
Para el análisis estático se parte de las fuerzas generadas por el proceso de soldadura. Se ha tenido en cuenta la fuerza normal (del hombro de la herramienta) FZ y la fuerza de arrastre (por el movimiento relativo herramienta-pieza a soldar) FN, con las cuales se elaboran los diagramas de cuerpo libre de los elementos que conforman el dispositivo. Mediante las condiciones de equilibrio estático se determinan las fuerzas que actúan sobre cada uno de los elementos del sistema, el valor de los momentos que actúan en los puntos donde se desean colocar las galgas extensiométricas. Con la información anterior se definen las ecuaciones de esfuerzos y deformaciones que gobiernan las deformaciones en el dispositivo en función de las cargas. La selección de los materiales para la construcción del dispositivo se apoya en el análisis de elementos finitos. El diseño final será establecido con las dimensiones del dispositivo, las cuales permitirán el cálculo de esfuerzos y del factor de seguridad.

2.2. Selección de galgas

Se seleccionarán las galgas extensiométricas del dispositivo en función de los intervalos de deformación admisibles. Los requerimientos serán establecidos, mediante el análisis de elementos finitos utilizando el software ANSYS® a través de la determinación de las máximas deformaciones que se dan en los puntos de aplicación de cargas. Para la toma de datos experimentales se utiliza un dispositivo de adquisición de datos inalámbrico National Instrument NI-cDAQ-9188, acoplado a las galgas extensiométricas [11]. Las condiciones o requerimientos a tener en cuenta para la selección de las galgas extensiométricas son la temperatura de trabajo, el grado y tipo de deformación a medir, así como el tipo de carga.

Figura 2. Flujograma para el desarrollo del proyecto caracterización del proceso de soldadura por SFA.

Figure 2. Flow chart of development of parameters characterization in FSW welding process.



2.3. Simulación por elementos finitos

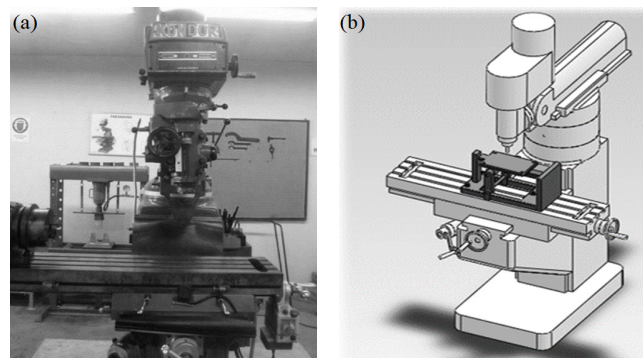
Por medio del software ANSYS® y utilizando la herramienta para análisis transitorio de estructuras se realizó la simulación por elementos finitos. Se ha usado un mallado volumétrico con elementos tetragonal y hexagonal para obtener parametrización eficiente de las variables de respuesta del sistema, utilizando un criterio de convergencia de 1E-4, el cual se establece para control de los residuales de la solución numérica.

2.4. Desarrollo de las soldaduras sobre el dispositivo

La máquina fresadora utilizada se muestra en la figura 3 y las características de la misma se detallan en la tabla 1.

Figura 3. Fresadora Universal. (a) Vista general. (b) localización del dispositivo en la fresadora.

Figure 3. Universal milling machine. (a) General set up. (b) Device location on milling machine.



Fuente: Autores.

Tabla 1. Características de la máquina fresadora.
Table 1. Parameters of universal milling machine.

Velocidad de Rotación Máxima	2600 RPM
Intervalo de Fuerza Vertical	20-50 kN
Giro de Cabezal Vertical	180°
Carrera Vertical de la Mesa	250mm
Carrera Transversal de la Mesa	310mm
Carrera Longitudinal de la Mesa	800mm
Potencia del Motor	3 HP
N° de Ranuras en T	3
Espacio en T	4,71cm
Longitud horizontal de la Mesa	126,8cm
Ancho horizontal de la Mesa	25,38cm

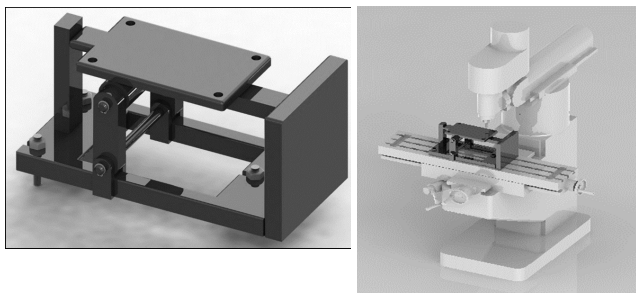
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Diseño del dispositivo

La mesa de la fresadora soporta cargas de la herramienta en la dirección axial z debido a la presión ejercida por el hombro, en x debido al arrastre del metal por parte del pin en la dirección de la soldadura y se genera un momento de torsión alrededor del eje z por la fricción de rotación entre el hombro y la junta. Los requerimientos de diseño del dispositivo son los siguientes: (I) Costos. Bajos costos de inversión, materiales económicos y fabricación económica. (II) Diseño. Fácil de fabricar, soportar cargas del proceso y permitir medir las deformaciones. (III) Metodología. Portable, liviano y fácil de instalar. (IV) Medio Ambiente. No producir daño al medio ambiente y componentes reutilizables. De acuerdo con los resultados de un trabajo previo [12], para el diseño conceptual, se generaron dos alternativas, las cuales se evaluaron teniendo en cuenta los criterios de costo, logística, diseño y medio ambiente. En la tabla 2 se muestra la evaluación de las alternativas y en la figura 4 el esquema del sistema seleccionado.

Figura 4. Diseño conceptual del sistema de medición y su disposición en la fresadora [12].

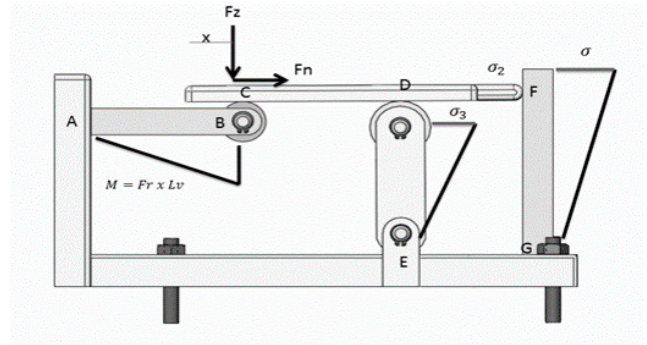
Figure 4. Conceptual design of measuring system and location in the universal milling machine [12].



3.2 Análisis estático

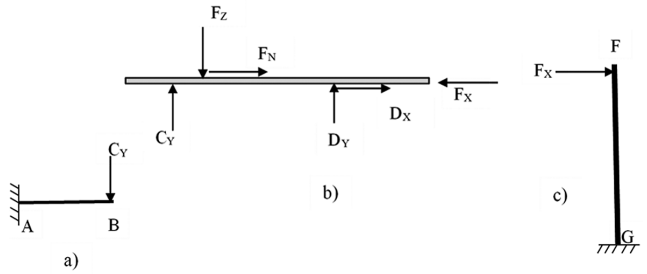
En la figura 5 se muestra una vista general del dispositivo, cuyos elementos principales son: viga horizontal AB, viga vertical FG y lámina soporte C-D-F. Para el diseño del dispositivo se consideran las fuerzas F_z y F_N de 7000 N y 4900 N, respectivamente, los cuales corresponden a valores promedio durante la soldadura de placas de aluminio comercialmente puro de 6mm de espesor [11].

Figura 5. Fuerzas sobre el dispositivo de medición. [12].
Figure 5. Forces in the measuring system [12].



En la figura 6 se muestra el diagrama de cuerpo libre para cada uno de los elementos principales.

Figura 6. Diagramas de cuerpo libre.
Figure 6. Free body diagrams.



El cálculo de los momentos flectores M_{fl} para la viga horizontal AB y la viga vertical FG, de acuerdo a los diagramas de cuerpo libre, se expresa en las ecuaciones (1) y (2), respectivamente.

$$M_{fl} = C_y \times x_1 \quad (1)$$

$$M_{fl} = F_x \times x_2 \quad (2)$$

Donde x_1 y x_2 representan la distancia medida desde el punto de aplicación de la carga C_y y F_x , hasta el punto de ubicación de la galga, respectivamente. De acuerdo al diagrama de cuerpo libre, la relación entre las cargas C_y y F_z está dada por la ecuación (3).

$$C_y = F_z \times \frac{(CD - x)}{CD} \quad (3)$$

Tabla 2. Evaluación de alternativas.
Table 2. Evaluation of alternatives.

Criterios		Ponderación Apreciación	Alternativa 1		Alternativa 2	
			Calificación	Apreciación	Calificación	
Costos	Bajo costo inversión	0,2	3	0,6	4	0,8
	Materiales económicos	0,14	3	0,42	3	0,42
	Mano obra económica	0,07	3	0,21	3	0,21
Diseño	Soportar fuerzas generadas	0,14	4	0,56	3	0,42
	Registrar deformaciones	0,09	4	0,36	3	0,27
	Fácil de fabricar	0,04	4	0,16	3	0,12
Metodología	Liviano	0,1	5	0,5	4	0,4
	Portable	0,06	5	0,3	3	0,18
	Fácil de instalar	0,03	4	0,12	4	0,12
Medio Ambiente	No producir daños al medio ambiente	0,08	5	0,4	3	0,24
	Componentes reutilizables	0,04	4	0,16	3	0,12
Calificación			3,79		3,3	

Donde x es la distancia medida desde el punto C al punto de aplicación de F_z . Si se considera muy pequeña la deformación en DE, entonces la aproximación de la ecuación (4), es cierta y se considera la reacción en D_x nula.

$$F_x = F_N \quad (4)$$

Sustituyendo las ecuaciones (3) y (4) en las ecuaciones (1) y (2), se obtienen las expresiones (5) y (6), de los momentos flectores M_{fl} para las vigas AB y FG, respectivamente.

$$M_{fl} = (F_z \times \frac{(CD - x)}{CD}) \times x_1 \quad (5)$$

$$M_{fl} = F_N \times x_2 \quad (6)$$

El esfuerzo de flexión para las vigas AB y FG está dado por las expresiones (7) y (8), respectivamente.

$$\sigma_{fl} = [(F_z \times \frac{(CD - x)}{CD}) \times x_1] \times (\frac{y}{I}) \quad (7)$$

$$\sigma_{fl} = [(F_N \times x_2) \times (\frac{y}{I})] \quad (8)$$

De acuerdo con la expresión de la ley de Hook (9) Donde, ε , es la deformación unitaria del material y E es el Módulo de Young, y sustituyendo esta expresión en las ecuaciones (7) y (8), se obtienen las expresiones (10) y (11) de la deformación para las vigas AB y FG, respectivamente.

$$\sigma = \varepsilon \times E \quad (9)$$

$$\varepsilon = [(F_z \times \frac{(CD - x)}{CD}) \times x_1] \times (\frac{y}{I \times E}) \quad (10)$$

$$\varepsilon = [(F_N \times x_2) \times (\frac{y}{I \times E})] \quad (11)$$

3.3 Simulación por elementos finitos

El diseño conceptual del sistema de dispositivo de cargas mostrado en la figura 4, fue ensamblado en lenguaje CAD. Para la simulación por elementos finitos se fijaron las condiciones de frontera mostradas en la figura 7, las cuales fueron usadas para la comparación numérica experimental de los parámetros de deformación unitaria suponiendo la aplicación de una carga que varía en el tiempo con valores entre 0 hasta

15000 N. Se ha impuesto una carga máxima de 15kN en la placa que sostiene a las placas de soldaduras (señalado como C), se ha dejado bajo la acción de la gravedad los brazos sostenedores de la placa antes mencionadas (señalado como B) y se ha establecido como empotrado o fijo todo el soporte que contienen las vigas analizadas (señalado como A).

El mallado volumétrico del sistema se muestra en la figura 8. Se realizaron simulaciones variando el número de elementos y nodos en el mallado volumétrico garantizando en cada mallado un tamaño de elementos eficientes para la realización de independencia de mallado y de salto de tiempo. Como se muestran en las figuras 9 y 10 de calidad de mallado e independencia de malla, respectivamente.

Figura 7. Condiciones de fronteras impuestas para el análisis del dispositivo.

Figure 7. Imposed boundary conditions for device analysis.

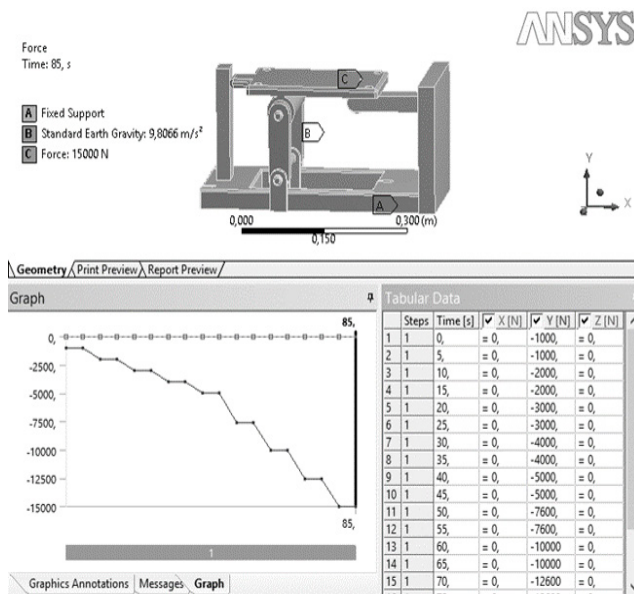


Figura 8. Mallado volumétrico del sistema.

Figure 8. Meshing volumetric system.

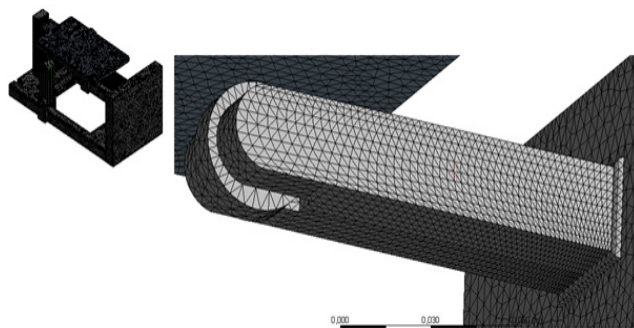
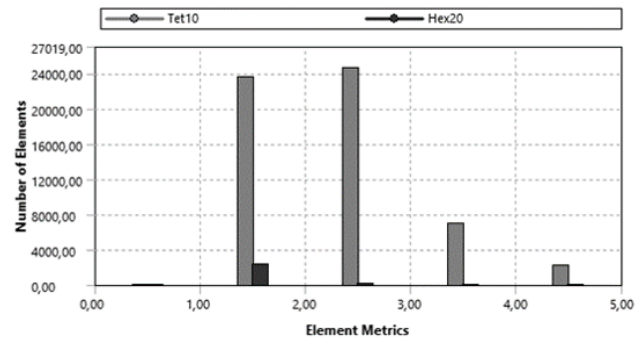


Figura 9. Calidad de mallado.

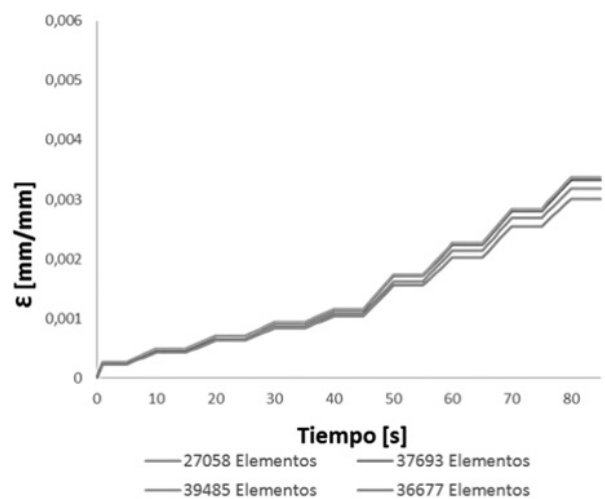
Figure 9. Meshing quality.



A partir de la figura 10, que muestra la representación en calidad de malla se puede observar que los tamaños de elementos implementados para la realización del mallado volumétrico se encuentran en los estándares de buena calidad, manteniendo la mayor cantidad de elementos en intervalos de 1,5 mm para las zonas de interés hasta un margen de 4,5 mm para las zonas externas.

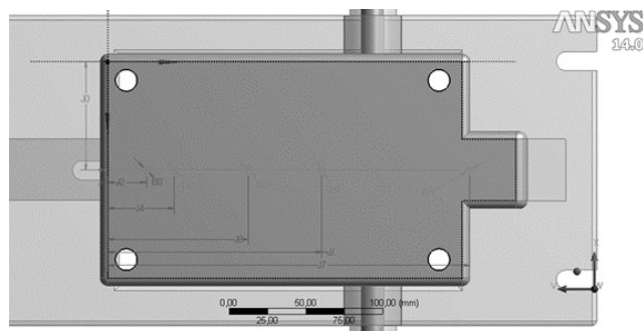
Figura 10. Independencia de mallado y de salto de tiempo.

Figure 10. Meshing Independence and break time.



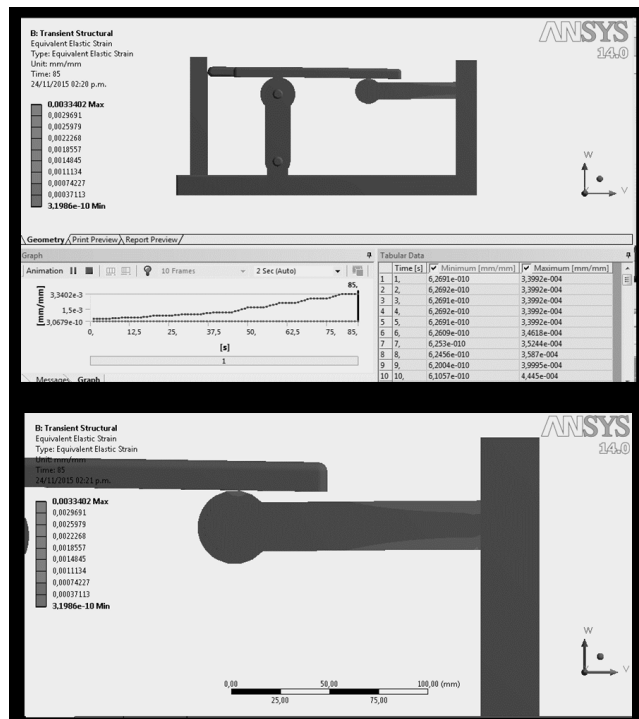
El análisis de la independencia de malla muestra que al realizar un mallado volumétrico utilizando 36677 elementos o superiores se produce suficiente calidad del mallado obteniéndose resultados confiables. Para efecto del análisis experimental de las reacciones en el dispositivo, se seleccionan cinco puntos de aplicación de la carga vertical FZ, mediante un experimento independiente a manera de calibración. Se usó una máquina de tracción en modo bypass para aplicar fuerza constante durante un tiempo determinado en cada punto seleccionado. Las posiciones de la evaluación de la deformación se muestran en la figura 11.

Figura 11. Puntos de aplicación de las cargas.
Figure 11. Point of application of forces.



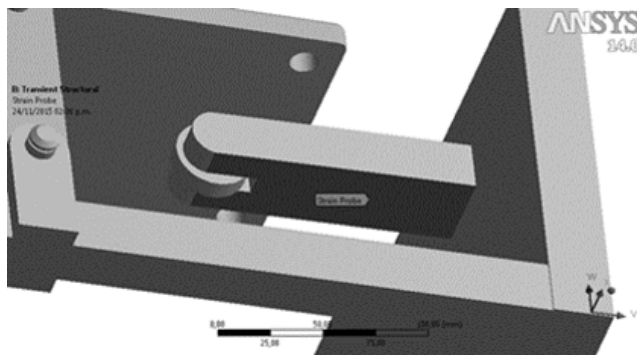
En la figura 12 se muestran las deformaciones unitarias para la viga AB. Para diferentes valores de fuerza vertical F_z se determinan las deformaciones, con lo cual se obtiene un gráfico del comportamiento de las deformaciones en función de la distancia y la fuerza, de tal manera que se obtienen valores de deformación mínima y máxima, datos que sirven de insumo para seleccionar el intervalo de trabajo de las galgas extensiométricas.

Figura 12. Análisis de deformaciones por elementos finitos.
Figure 12. Analysis of strains for finites elements.



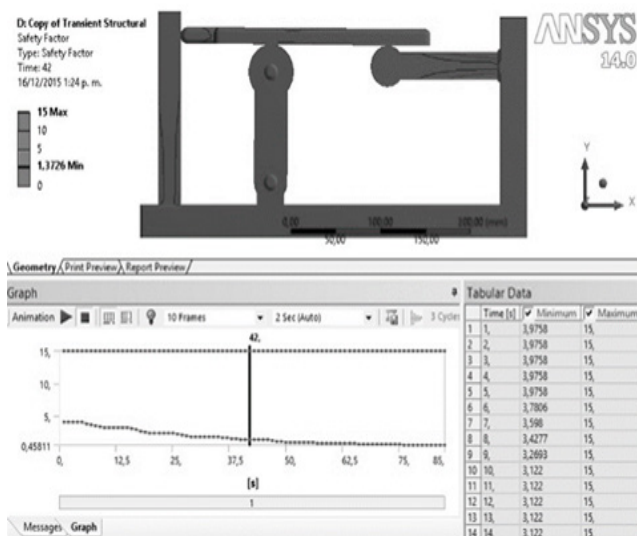
A partir de los datos anteriormente obtenidos, se ha establecido que la ubicación de la galga en el elemento AB será de 3,35 cm medido desde el empotramiento como se muestra en la figura 13. Similar resultado se ha obtenido para el elemento FG.

Figura 13. Ubicación de la galga en elemento AB.
Figure 13. Location of strain gauge in element AB.



Finalmente, en la figura 14 se muestra el cálculo del factor de seguridad para el dispositivo para la carga vertical F_z . De acuerdo con los resultados provenientes de la simulación por elementos finitos, se obtiene un factor de seguridad mínimo de 1,4 y máximo de 15, aproximadamente.

Figura 14. Cálculo del factor de seguridad por elementos finitos.
Figure 14. Calculation of safety factor for finites elements.



En la tabla 3 se resume de forma comparativa los resultados de las deformaciones obtenidas a partir de la simulación por elementos finitos (numérico), por mediciones experimentales con galgas durante la aplicación de cargas (experimental) y las calculadas por las ecuaciones (10) y (11) (teórico). A partir de los resultados obtenidos se observan que al aplicar valores de fuerza normal F_z entre 1000 N y 15600 N, se generan deformaciones entre $3,19 \times 10^{-10}$ y $3,34 \times 10^{-3}$ mm/mm. Con base en estos resultados se seleccionan los materiales de construcción y las galgas extensiométricas.

Tabla 3. Comparación de los datos de deformación experimentales, teóricos y simulados.
Table 3. Comparison among strain data obtained by experiment, simulation, and theory.

Carga vertical Fz [N]	Deformación - ϵ (mm/mm)		
	Simulado	Experimental	Teórico
1000	2,20E-04	2,00E-04	1,55E-04
2000	4,05E-04	3,50E-04	3,24E-04
3000	5,90E-04	5,10E-04	4,87E-04
4000	7,76E-04	6,80E-04	6,49E-04
5000	9,61E-04	8,50E-04	8,11E-04
7600	1,44E-03	1,30E-03	1,23E-03
10000	1,88E-03	1,65E-03	1,62E-03
12600	2,36E-03	2,07E-03	2,04E-03
15600	2,82E-03	2,68E-03	2,53E-03

3.4 Selección de materiales

Teniendo en cuenta los esfuerzos a que están sometidas cada una de las partes del dispositivo, las deformaciones y los factores de seguridad obtenidos por la simulación, se preseleccionaron tres materiales para la construcción del dispositivo, ellos son los aceros ASTM A36, AISI/SAE 1045 y AISI/SAE 4140. Los criterios que se tuvieron en cuenta fueron, la mayor resistencia mecánica posible, el más alto factor de seguridad, las cargas debidas a los momentos flectores y el menor costo posible. De acuerdo a lo anterior, para la lámina soporte se escogió el acero 1045 y para los soportes, horizontal y vertical, acero 4140, mientras que el cuerpo del dispositivo se escogió en acero ASTM A36.

3.5. Selección de galgas

De acuerdo con la figura 5, las galgas extensiométricas se ubican en las vigas AB y FG, sobre las superficies interna e inferior, respectivamente. Mediante estas galgas se miden las deformaciones axiales (y por lo tanto indirectamente las fuerzas) que sufren los soportes. Para la selección de las galgas se tuvieron en cuenta los siguientes criterios: la más alta temperatura de trabajo (hasta 100°C), el mayor intervalo de deformaciones ($1,0 \times 10^{-12}$ a $1,0 \times 10^{-2}$), medición de deformaciones uniaxiales, tipos de carga con comportamiento estático.

La galga para el elemento AB está ubicada a 3,35 cm del empotramiento con el soporte del dispositivo. Las galgas seleccionadas son de tipo constatan por tener una sensibilidad alta a la deformación (factor

de galga alto), sensibilidad a la temperatura baja y el coeficiente de expansión térmica medio. El soporte fue seleccionado de poliamida, por ser resistente y flexible, útil para soportar temperaturas entre -195°C a 175°C, permitiendo grandes deformaciones y se pueden utilizar en análisis estáticos o dinámicos. Teniendo en cuenta lo anterior, el valor de los porcentajes de error promedio experimental-teórico y el experimental-numérico son 7,27% y 5,06%, respectivamente.

4. CONCLUSIONES

- En este trabajo se ha desarrollado de manera exitosa una metodología teórico-experimental basada en elementos finitos para el estudio de las deformaciones en un dispositivo diseñado para la medición de fuerzas durante la soldadura por fricción-agitación.
- Para la aplicación de la metodología es necesario conocer detalles de diseño del dispositivo y de funcionamiento de la máquina que suministra las variables y los parámetros para el desarrollo de la soldadura por fricción-agitación.
- De acuerdo con los resultados obtenidos en este trabajo para el dispositivo de medición de fuerzas durante la soldadura por fricción-agitación, cuando la fuerza axial está en un intervalo entre 0 a 15kN se obtienen deformaciones unitarias en un intervalo entre un mínimo de $3,19 \times 10^{-10}$ y un máximo de $3,34 \times 10^{-3}$.
- Para medir estas deformaciones se han seleccionado galgas extensiométricas uniaxiales

del tipo Constantan®, con soporte de poliamida. El porcentaje de error promedio al comparar las medidas experimental-teórico y experimental- numérico fueron de 7,3% y 5,06%, respectivamente.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo desean agradecer a la Universidad Autónoma del Caribe por el apoyo financiero a través del proyecto interno CONV-I-004-P010. Además, agradecen el incondicional apoyo del ingeniero Saúl Pérez por su ayuda en la instalación de galgas extensiométricas.

REFERENCIAS

- [1] W.M. Thomas, E.D. Nicholas, J.C. Needham, M.G. Murch, P. Templemith, C.J. Dawes. Patent Application, No. 9125978.8, 1991.
- [2] R. Nandan, T. DebRoy, H.K.D.H Bhadeshia. "Recent advances in friction-stir welding – Process, weldment structure and properties", *Progress in Materials Science*, 53(6) 980–1023, 2008.
- [3] R.S. Mishra, Z.Y Ma. "Review: Friction Stir Welding and Processing", *Materials Science and Engineering*, 50 p. 1 – 78, 2005.
- [4] N. Scotchmer, K. Chan. "¿Qué hay de Nuevo para soldar aluminio en la industria automotriz?", *Welding Journal en español*, 5(2), 10-15, 2012
- [5] M. Singh-Sidhu, S. Singh-Chatha. "Friction Stir Welding – Process and its Variables: A Review", *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, V. 2, 12, p.275, 2012.
- [6] O. Murillo. "Desarrollo del proceso de soldadura FSW a partir de una maquina fresadora", Trabajo de grado, Universidad del Valle, 2008.
- [7] J. Velandia. "Determinación del efecto de la fuerza axial en la resistencia mecánica de soldadura por fricción agitación", Trabajo de grado, Universidad del Valle, 2009.
- [8] P. Ulysse, "Three-dimensional modeling of the friction stir welding process", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol.42, 2002, p.1549-1557.
- [9] Zimmer-Chevret, S., S., Langlois, L., Laye, J., Laye, J., Goussain, J-C., Bigot, R. "Influence of processing parameters on the tool and workpiece mechanical interaction during friction stir welding". *Int. j. Mater. Fom*, v.2, suppl 1, p. 299-302, 2009.
- [10] R. G. Budynass, J. K. Nisbett. *Diseño en Ingeniería Mecánica de Edward Shigley*. 8° ed, Ed. Mc Graw Hill. P. 211 – 213. 2010.
- [11] S. Pérez, I. Morales, C. Orozco, J. Posada, J. Unfried, "Medición de torque durante la soldadura por fricción agitación de Aluminio mediante un sistema de detección con transmisión en tiempo real", *Revista colombiana de Materiales*, N. 5, p. 244–249, 2013.
- [12] J. A. Arrieta, E. A. Ocampo, *Diseño de un sistema de medición de fuerzas axial y normal aplicado a un proceso de soldadura por fricción agitación*. Trabajo de grado, Universidad Autónoma del Caribe, 2012.