

EVALUACIÓN ESTRUCTURAL Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE UNA PIEZA MAQUINADA EN UNA ETAPA COMO SUSTITUTO DE UN COMPONENTE ENSAMBLADO PARA UN AVIÓN COMERCIAL UTILIZANDO MEF Y EXTENSOMETRÍA

Ismael Mendoza Muñoz

Universidad Autónoma de Baja California
ismael.mendoza@uabc.edu.mx

Víctor Nuño Moreno

Universidad Autónoma de Baja California
vnuno@uabc.edu.mx

Luis Omar Moreno Ahedo

Universidad Autónoma de Baja California
luis.omar.moreno.ahedo@uabc.edu.mx

Karla Isabel Velázquez Victorica

Universidad Autónoma de Baja California
isabel.velazquez@uabc.edu.mx

Aida López Guerrero

Universidad Autónoma de Baja California
aida.lopez@uabc.edu.mx

Luz del Consuelo Olivares Fong

Universidad Autónoma de Baja California
luz.olivares@uabc.edu.mx

Resumen

Algunas piezas fabricadas en el rubro aeroespacial requieren de operaciones de ensamble para formar una nueva entidad. Se espera que en las zonas donde la unión se lleva a cabo, esté presente una concentración de esfuerzos, lo que lleva

a aumentar las posibilidades de presencia fallo estructural generado por las condiciones en las que la pieza montada está en funcionamiento. En este estudio se realizó una evaluación estructural a flexión entre un componente estructural ensamblado y una pieza maquinada en una etapa con las mismas características geométricas, siendo la propuesta para sustituir al componente ensamblado. Para verificar las propiedades mecánicas se utilizaron galgas extensométricas uniaxiales en conjunto con el método de los elementos finitos. Con los datos obtenidos en galgas, se realizó un análisis de varianza para evaluar si existe alguna diferencia significativa entre las medias muestrales. Se observa que el valor de $P=0.236$ es mayor al valor de $\alpha=0.05$, por lo que se afirma con un 95% de confianza que no existe diferencia significativa entre las medias muestrales de las deformaciones entre los tratamientos de pieza unitaria y pieza ensamblada. Lo anterior sugiere que ambos componentes funcionan igual bajo la condición de flexión.

Palabra(s) Clave(s): ANOVA, Diseño Mecánico, Extensometría, Galgas Uniaxiales.

1. Introducción

En la industria maquiladora, los procesos de manufactura son de interés para los departamentos de ingeniería debido a que sostienen entre sus principales objetivos la reducción de costos a través de la reducción de tiempo estándar. Para alcanzar esta meta, se ha vuelto una práctica común los rediseños de componentes a fin de reducir el número de ensambles. Un caso específico se presentó en una empresa local del sector aeroespacial en Mexicali por parte de la gerencia de manufactura, la cual requirió realizar una estimación estructural a fin de ver la factibilidad de reemplazar un componente ensamblado para uno de sus aviones comerciales por una pieza maquinada en una etapa con las mismas características geométricas. Para lo anterior, la empresa proporcionó información sobre el diseño (dimensiones, tolerancias, materiales, etc.), así como de los procedimientos de manufactura.

La pieza de análisis es un componente estructural ensamblado situado en la sección del cuerpo, más cercana a la cola entre los motores del avión privado, la cual ha sido modificada por políticas de confidencialidad de la empresa. La figura 1 muestra en modelo de análisis con su modificación para divulgación. Este componente ensamblado está formado por tres piezas con la misma aleación de aluminio. Dos elementos de refuerzo lateral se ensamblan por medio de remaches a una parte principal.

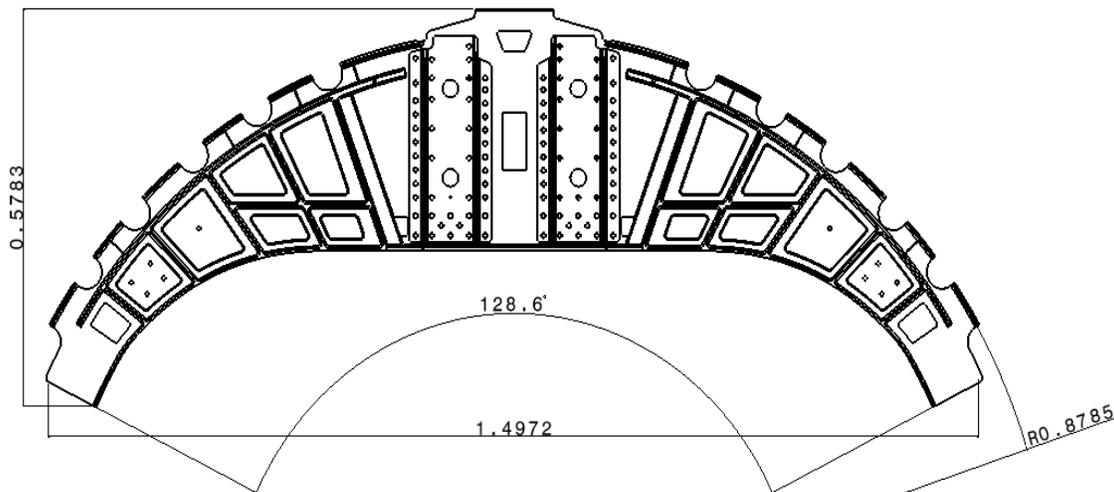


Figura 1 Pieza estructural ensamblada modificada para avión comercial (unidad: metros).

El proceso de fabricación consta de la instalación parte principal en una fixtura donde después las partes de refuerzo lateral se ensamblan cada una por 46 remaches de 0.125 pulg de diámetro. Al final, cinco agujeros fueron perforados en el cuerpo de cada parte secundaria, de un diámetro de aproximadamente 0.5 pulg. Basado en los comentarios del personal de fabricación, es una práctica común el re-trabajo de la pieza en la fase de perforación. Este proceso de re-trabajo consiste en colocar un material de injerto.

Se espera que al sustituir el componente estructural ensamblado por una pieza escasa de ensambles (maquinada en una etapa), muestre un mejor comportamiento estructural. Adicionalmente, se simplificará el proceso, y por consiguiente, los tiempos estándar disminuirán.

En este estudio, el modelo ensamblado se simplificó solo a dos filas de 3 remaches por parte secundaria, teniendo el componente ensamblado un total de 12 remaches.

Adicionalmente, se utilizaron galgas extensométricas uniaxiales así como el método de los elementos finitos (MEF) utilizando el software ANSYS.

Se desconocen las condiciones de operación del componente estructural ensamblado, pero al considerar la ubicación de la pieza aeroespacial, se observa que está cercana de las turbinas como de sus refuerzos de sujeción y, debido a la propulsión generada, pudiera ser un punto de flexión importante, ya que podría ser el punto de origen de la flexión local que se presenta por la interacción de todo el fuselaje, considerando vital esta prueba para análisis.

2. Desarrollo

El método del elemento finito se emplea de manera masiva en el análisis estático y dinámico de sistemas estructurales [1]. Mediante la simulación numérica, en particular mediante el método de los elementos finitos podemos evaluar los diferentes parámetros y condiciones, sin necesidad de hacer un gran número de ensayos, algo que para las aplicaciones industriales es muy importante [2].

Para realizar el análisis numérico en ANSYS, se establecieron las condiciones convenientes para analizar la pieza a flexión. Los parámetros para esta prueba constan de la aplicación de una carga puntual de 9.32Lbf en uno de los extremos de la pieza y el empotramiento de la misma en el opuesto. La distribución de esfuerzos y deformaciones unitarias para cada caso (componente ensamblado y pieza propuesta maquinada en una etapa) se presentan en la figura 2. Para ésta evaluación estructural, se toma la distribución de la deformación unitaria como referencia para realizar una comparación y validación de la prueba estructural física, ya que los resultados obtenidos de las galgas extensométricas uniaxiales son deformaciones unitarias en strain (ϵ).

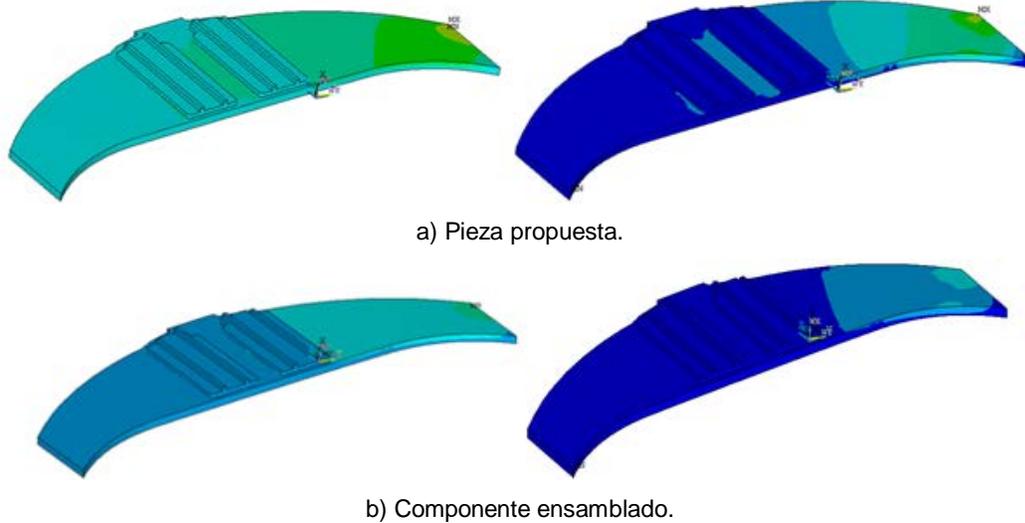


Figura 2 Distribución de esfuerzos (izq.) y deformaciones unitarias (der.) a Flexión.

Se aprecia en las imágenes pertenecientes al esfuerzo (izq.) en ambos escenarios, presentan una desemejanza evidente; la pieza propuesta presenta una distribución de esfuerzos gradual desde el empotramiento, hasta la zona donde se encuentra los cambios de sección debido a las piezas adjuntas, mostrando una interacción a lo largo del material y, en el caso del componente ensamblado, la distribución de esfuerzos no es tan evidente, sino tiende a ser más uniforme. Es importante indicar la ubicación y el valor de los esfuerzos máximos; donde para la pieza propuesta, se encuentra en el empotramiento (64.5 kpsi) y para la ensamblada, se muestran precisamente en la zona de la primera fila de remaches cercana al empotramiento (119 kpsi), por lo que se puede afirmar que al seguir esta tendencia, si se llegase a incrementar la carga, la pieza ensamblada fallaría justo en los elementos de sujeción debido a que los remaches actúan como elementos concentradores de esfuerzos. Al analizar las imágenes correspondientes a la deformación unitaria (der.), es evidente el rol de las piezas secundarias para los dos casos, presentando una tendencia similar a la obtenida en los resultados de esfuerzo (izq.). La deformación unitaria máxima, se ubica en el empotramiento (0.0272ε) para la pieza propuesta, y en la primera fila de remaches cercana al empotramiento (0.0135ε) para el componente ensamblado.

Para la prueba física de flexión, se maquinaron las partes (principal y secundarias) que conforman el componente ensamblado así como la pieza propuesta maquinada en una etapa utilizando aluminio 6061 T6. Los remaches a utilizar, son de 1/8" x 1/4" convencionales. La figura 3 muestra las piezas ya maquinadas.



Figura 3 Pieza propuesta maquinada y componente ensamblado base aluminio 6061 T6.

Una de las principales aplicaciones de esta aleación, gracias a su elevada resistencia a la tracción y a su excelente maquinabilidad y apariencia, se utiliza en la industria militar para la fabricación de soportes de culatas de fusil, en la industria del plástico para moldes prototipos o para inyección, soplado e inyección y en general para portamoldes y portatroqueles, entre otros usos. Entre otras ventajas se encuentran su excelente conductividad, baja densidad, nula toxicidad y que no produce chispa y excelente resistencia a la corrosión [3].

Cada modelo se empotró de un extremo en un banco de pruebas, dejando las partes secundarias orientadas hacia arriba y la zona libre hacia abajo, siguiendo las condiciones establecidas en el análisis por el MEF. El empotramiento de los modelos fue totalmente soportado en la mordaza del banco de pruebas y sujetado con 2 tornillos de ajuste. Se utilizaron galgas extensométricas uniaxiales Vishay EA-06-250 AF-120 las cuales se conectaron al equipo PXI de National Instruments. Para la conexión de las galgas, se utilizó un cuarto de puente de

Wheatstone. La figura 4 muestra uno de los modelos de estudio con la galga ya instalada.

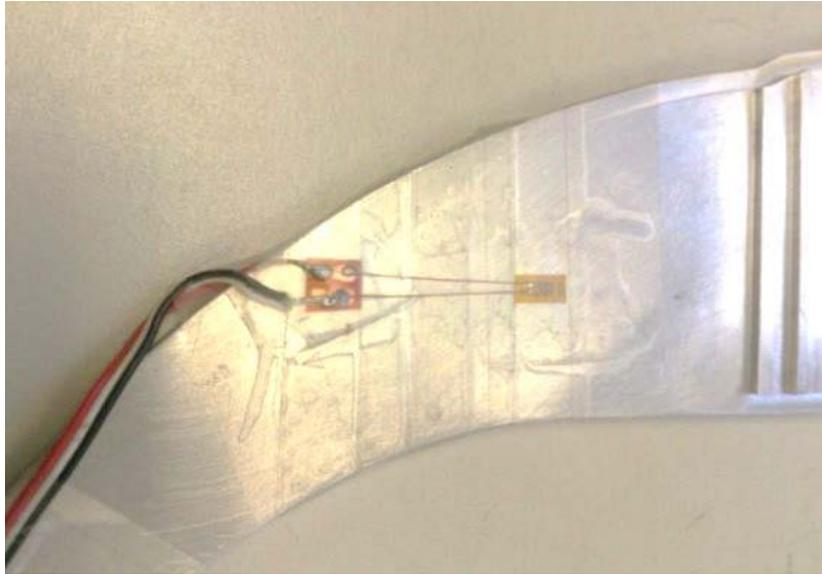


Figura 4 Galga extensométrica uniaxial en pieza propuesta.

Las galgas extensométricas son básicamente una resistencia eléctrica. El parámetro variable y sujeto a medida es la resistencia de dicha galga. Esta variación de resistencia depende de la deformación que sufre la galga. Se parte de la hipótesis inicial de que el sensor experimenta las mismas deformaciones que la superficie sobre la cual está pegada [4].

Un puente de Wheatstone es un circuito con cuatro resistencias montadas como en la figura 5, en el caso de las cuatro resistencias fueran iguales a la tensión de salida será nula. Si se produjera una variación de la resistencia de una de las resistencias, por ejemplo R_1 (podría ser el caso de una galga extensométrica colocada sobre un elemento estructural solicitado), el voltímetro registraría un movimiento de su aguja en uno u otro sentido según se aumente o disminuya ésta, lo cual es precisamente lo que se requiere.

La figura 6 muestra un circuito de cuarto de puente (porque utiliza como elemento activo una de las cuatro resistencias, en el que R_1 representa a la galga. Nótese que hay 3 cables, 2 de ellos comunes a una terminal y conectados al punto C de conexión con la rama AC y al voltímetro; el otro se conecta en A; es recomendable

hacerlo así a fin de que la resistencia eléctrica del cable conductor no se registre como variación de R_1 , sobre todo cuando existe un cableado largo [5].

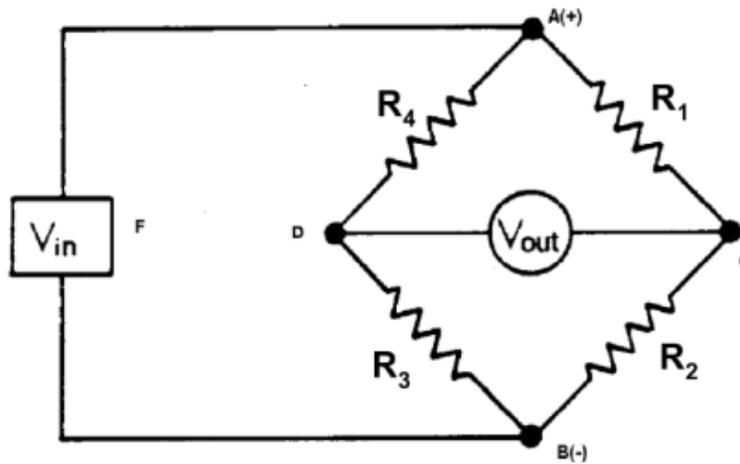


Figura 5 Puente de Wheatstone [5].

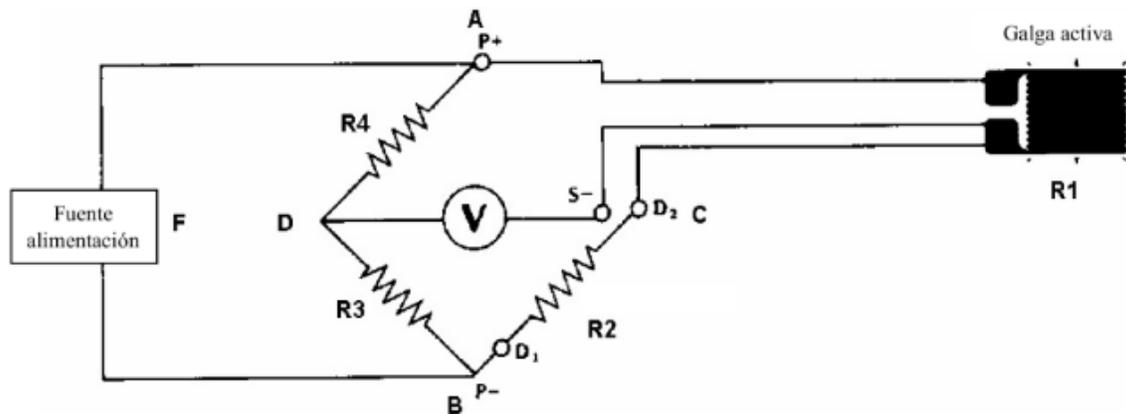


Figura 6 Puente de Wheatstone [5].

Una vez ya instaladas las galgas extensométricas uniaxiales en la misma ubicación para ambos modelos, se siguió con ingresar los parámetros en el software LabView. Del programa se tomaron 50 muestras para cada caso.

Con los datos anteriores, se propuso realizar una prueba de hipótesis a fin de determinar si existe una diferencia significativa entre ambos escenarios, proponiendo como hipótesis nula y alternativa, ecuaciones 1 y 2, respectivamente.

$$H_0: \mu_{unit} = \mu_{ens} \quad (1)$$

$$H_1: \mu_{unit} \neq \mu_{ens} \quad (2)$$

Las pruebas de hipótesis o de significación son un procedimiento del análisis de datos muy utilizados en las aplicaciones de la estadística. El procedimiento usual para su aplicación consiste en obtener un valor p, definido como la probabilidad del valor observado y valores más extremos que él en la dirección de rechazar H0 y compararlo con un nivel de significación o valor α , que generalmente se fija como 0.05. De esta forma se toma la decisión correspondiente [6].

3. Resultados

Las medidas estadísticas de dispersión de los datos obtenidos en las galgas extensométricas para la pieza propuesta (unitaria) como del componente ensamblado se presentan en la tabla 1.

Tabla 1 Medidas de dispersión de datos obtenidos en galgas para ambas piezas.

Pieza	N	Media (ϵ)	Desv. Est.
Propuesta	50	0.00005760	0.00001966
Ensamblada	50	0.00006264	0.00002252

La prueba de hipótesis entre la pieza propuesta (unitaria) y el componente ensamblado se realizó a través de un análisis de varianza con un intervalo de confianza del 95% se presenta en la tabla 2.

Tabla 2 ANOVA Unidireccional: Pieza ensamblada y pieza unitaria.

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Factor	1	0.0000000	0.0000000	1.42	0.236
Error	98	0.0000000	0.0000000		
Total	99	0.0000000			

Las figuras 7 y 8 muestran la gráfica de valores individuales así como la gráfica de caja de los datos obtenidos en las galgas para cada caso.

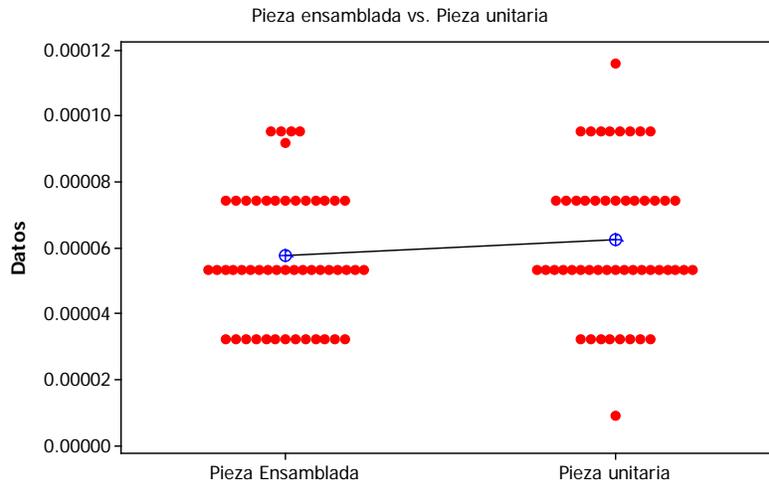


Figura 7 Gráfica de valores individuales de datos obtenidos en galgas.

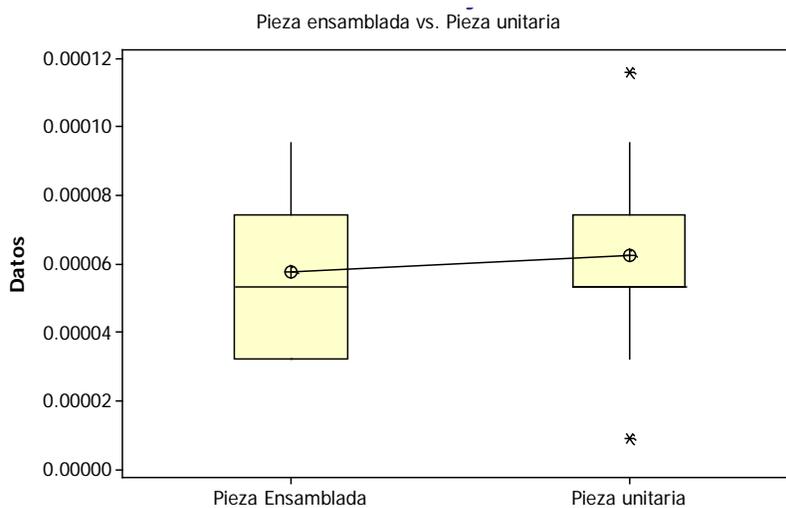


Figura 8 Gráfica de caja de datos obtenidos en galgas.

Los resultados obtenidos en el análisis numérico con el MEF utilizando ANSYS se obtuvieron al identificar el nodo que corresponde con la ubicación de la galga extensométrica, a fin de comparar y validar los resultados obtenidos en las galgas para ambas piezas. La tabla 3 muestra los resultados antes mencionados así como la ubicación dentro del modelo finito.

Tabla 3 Deformación unitaria obtenida en el punto de análisis por medio del MEF.

Pieza	Nodo	ϵ
Propuesta	7897	0.0000584
Ensamblada	2622	0.0000517

4. Discusión

Si se analizan los datos mostrados en la tabla 1, podemos apreciar que existe una diferencia entre las medias de los datos obtenidos en las galgas para cada caso, pudiendo decir que la pieza propuesta presenta mayor deformación unitaria que la ensamblada sin embargo, sería una afirmación sin un completo sustento estadístico.

Tomando como referencia la tabla 2 se observa que el valor de $P=0.236$ es mayor al valor de $\alpha=0.05$, por lo que se acepta nuestra hipótesis nula, es decir, se afirma con un 95% de confianza que no existe diferencia significativa entre las medias muestrales de las deformaciones entre los tratamientos de pieza unitaria y pieza ensamblada. Por lo tanto se concluye que $\mu_{unit} = \mu_{ens}$.

En base a la gráfica de valores individuales (figura 7) se observa que la concentración de datos en ambos tratamientos (pieza ensamblada y pieza unitaria) se centra en los valores de 0.0000535 con un conteo de 19 datos en ambos casos. Lo anterior se refleja en que no existe mucha variación en la media de los tratamientos. Por otra parte la gráfica de caja (figura 8) nos muestra información relevante en relación a la distribución de los datos para cada uno de los tratamientos, por ejemplo, en ambos casos (pieza ensamblada vs pieza unitaria) se observa que en el tercer cuartil (75% de los datos) los datos se distribuyen en valores ≤ 0.0000744 , a diferencia del primer cuartil, en el caso de la pieza ensamblada el 25% de los datos se distribuyen en valores ≤ 0.0000326 , y para la pieza unitaria en valores ≤ 0.0000535 , sin embargo se observa que las medias de ambos tratamientos ($\mu_{unit} = \mu_{ens}$) tienen poca variación considerando valores de 0.000057604 y 0.000062642 respectivamente.

Finalmente, al comparar las medias obtenidas en los resultados de las galgas con los resultados obtenidos en el punto de análisis por el MEF (ver tabla 3), se puede apreciar que existe una diferencia mínima, manteniendo una ligera tendencia a que la pieza propuesta tenga mayor deformación unitaria que el componente ensamblado.

5. Conclusiones

En relación a la conversión de piezas ensambladas a una propuesta unitaria, se propuso con el fin de obtener un componente con mejores características estructurales (rigidez y estabilidad) las cuales se aprecian al analizar la deformación unitaria obtenida para las galgas extensométricas como los resultados obtenidos por el MEF. Podemos decir que los resultados no favorecen a la pieza propuesta con los datos obtenidos en ANSYS mostrados en la tabla 3, sin embargo, los datos obtenidos en galgas y analizados estadísticamente, muestran que no existe diferencia significativa entre las medias de ambos casos, sugiriendo que presentan la misma respuesta ante la carga aplicada. Estas conclusiones dejan una apertura para realizar un análisis más a fondo a fin de establecer una tendencia tajante para tomar la decisión de si es conveniente o no reemplazar la pieza ensamblada por la pieza propuesta. Una propuesta de ello es el realizar un diseño experimental más robusto, que incluya al menos 3 niveles de carga. También puede establecerse un mayado con 2 o más galgas extensométricas, a fin de tener más respuestas por nivel de carga. Otra alternativa, es el trabajar con un medio puente o puente completo de Wheatstone. Sin embargo, si consideramos además el factor de reducción de tiempo estándar, se puede afirmar que el beneficio existe con la pieza propuesta, dando más empuje a ser candidata para cambio de ingeniería.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] W. Vélez, D. Gómez, P. Thomson, "Ajuste de modelos de elementos finitos". *Dyna*. Vol. 76. Núm. 158. Junio 2009. Pp. 177-189.
- [2] W. Bullón, J. Acosta, R. Franco, Q. Valverde, "Simulación de un proceso de soldadura mediante un modelo termo-mecánico considerando el efecto de esfuerzos residuales utilizando el método de los elementos finitos". *Memorias 8o Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica*. Cusco. Perú. 2007. Pp. 1-13.

- [3] A. Echavarría, G. A. Orrego, “Metalurgia básica de algunas aleaciones de aluminio extruidas o laminadas”. *Revista Colombiana de Materiales*. Núm. 2. 2012. Pp. 1-20.
- [4] B. Bellini, “Sensores de presión utilizados en las plataformas de fuerza aplicadas al estudio de la posturografía”. Universidad de la República. Núcleo de Ingeniería Biomédica. Facultades de Medicina e Ingeniería. 2009. Pp. 1-10.
- [5] E. Rincón, L. Castro Martínez, D. Iglesias Ibáñez, “Resistencia de materiales: determinación de tensiones y deformaciones”. 2006. Editorial Visión Libros. Madrid. Pp. 8-9.
- [6] P. A. Monterrey, “Caracterización de la distribución de los valores P de las pruebas paramétricas en poblaciones normales”. *Revista de Investigación Operacional*. Vol. 37. Núm. 1. 2016. Pp. 38-48.

7. Autores

Dr. Luis Omar Moreno Ahedo: es profesor investigador de tiempo completo de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California, obtuvo su grado de Maestría y Doctorado en el Departamento de Control Automático del CINVESTAV-IPN en Cd. De México. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores.

Ismael Mendoza Muñoz: es Ingeniero Mecánico con Maestría en Ciencias, ambos por la Universidad Autónoma de Baja California. Actualmente está llevando a cabo el programa de Doctorado en Ciencias por la UABC. Es profesor de tiempo completo en la Facultad de Ingeniería Mexicali de la UABC, asignado al programa educativo de Ingeniero Industrial, enfocado al área de Manufactura y Diseño.

Víctor Nuño Moreno: es Ingeniero Eléctrico Mecánico por la UABC Mexicali, con una especialidad en la enseñanza. Tiene una Maestría en Sistemas de Fabricación y Procesos por el CETYS Mexicali. Tiene segundo título de Maestría en Administración Industrial por CETYS Mexicali. Tiene un Doctorado en Ingeniería por la UABC Mexicali. Actualmente es profesor de tiempo completo en la UABC Mexicali.

Karla Velázquez Victorica: es Ingeniero Industrial con Maestría en Ingeniería y Doctorado en Ciencias, ambos por la Universidad Autónoma de Baja California. Actualmente es responsable del programa educativo de Ingeniero Industrial. Es profesora de tiempo completo en la Facultad de Ingeniería Mexicali de la UABC, asignado al programa educativo de Ingeniero Industrial, enfocada al área de Estadística y Optimización.

Aída López Guerrero: es Ingeniero Industrial con Maestría en Ciencias, ambos por la Universidad Autónoma de Baja California. Es profesora de tiempo completo en la facultad de Ingeniería Mexicali de la UABC, asignada al programa educativo de Ingeniero Industrial, enfocada al área de planeación, estadística y humanidades.

Luz del Consuelo Olivares Fong: es Ingeniero en Manufactura por el Centro de Enseñanza Técnica y Superior (CETYS Universidad, Mexicali/Centro Politécnico Superior, España); Maestro en Ingeniería con el proyecto Ecoeficiencia en las PYMES en Mexicali, B.C.: en el sector manufacturero” por el Instituto de Ingeniería, UABC. Actualmente cursa el programa de Doctorado en Proyectos de Ingeniería por la Universidad Internacional Iberoamericana. Desde 2006 es profesora de la Facultad de Ingeniería, siendo en 2014 su asignación como profesor de tiempo completo en la Universidad. Ha participado en proyectos de Innovación-Conacyt. Sus áreas de interés incluyen materiales de ingeniería, procesos de manufactura, desarrollo sustentable y comportamiento organizacional.