

# REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE DEL EFECTO DE PROCESOS DE FABRICACIÓN SOBRE ESFUERZOS EN COMPONENTES DE ALUMINIO

***Sara Inés Reséndiz Juárez***

Instituto Tecnológico de Celaya  
*ines.resendiz.03@gmail.com*

***Ramón Rodríguez Castro***

Instituto Tecnológico de Celaya  
*ramon.rodriguez@itcelaya.edu.mx*

***Erik López Vargas***

Instituto Tecnológico de Celaya  
*erik.lopez@itcelaya.edu.mx*

***Oscar Fernando Valdés García***

Kolbenschmidt de México  
*oscarFernando.Valdes@mx.kspg.com*

***Luís Alejandro Alcaraz Caracheo***

Instituto Tecnológico de Celaya  
*alejandro.alcaraz@itcelaya.edu.mx*

## **Resumen**

Conocer el efecto de los parámetros de maquinado y soldadura sobre los esfuerzos residuales en diferentes componentes de aleaciones de aluminio, realizando una revisión de la literatura de las técnicas de evaluación de los esfuerzos residuales reportadas en artículos científicos y tesis de posgrado. Con el fin de seleccionar una de estas técnicas para evaluar los esfuerzos residuales en un pistón automotriz de aleación de aluminio-silicio.

**Palabra(s) Clave(s):** agujero ciego, esfuerzos residuales, indentación colineal, método de elementos finitos (MEF), rayos-X.

## **1. Introducción**

Los esfuerzos residuales son definidos como fuerzas internas que se encuentran presentes en un material, son esfuerzos de tensión y compresión en estado de equilibrio sin la aplicación de fuerzas externas [1].

Los esfuerzos residuales, en su mayoría, aparecen en los procesos de manufactura, como fundición, rectificado, soldadura, doblado, mecanizado, forja de barras, tratamientos térmicos etc. [2], estos procesos transforman el material así como sus propiedades. También los esfuerzos residuales pueden aparecer en el material cuando este se encuentra en funcionamiento y llega a ser reparado o alterado [3].

Las exigencias que día con día se generan por parte de los consumidores en la industria automotriz, desencadena un mayor reto en este sector, ya que con ello la demanda de cada uno de los componentes automotrices debe cumplir con altos estándares de calidad, producidos en menor tiempo [4] y sobre todo garantizar la seguridad de cada componente. Los procesos de manufactura de estos elementos son operaciones claves para cumplir con los requisitos antes mencionados, siendo el proceso de maquinado en principal estudiado en esta investigación. El avance en la tecnología de dicho proceso ha ido evolucionando, donde se ha aumentado la velocidad de maquinado, se disminuyen los tiempos de trabajo y se mejora el acabado del material [4].

La importancia del proceso del maquinado en la fabricación de los componentes automotrices radica en la generación de esfuerzos residuales, los cuales podrían afectar de manera positiva o negativa dichos componentes, dependiendo también de los parámetros de mecanizado principalmente la velocidad de corte, la profundidad de corte y el avance.

El estudio de los esfuerzos residuales se debe principalmente que estos afectan de manera significativa las propiedades mecánicas del material [5], dureza, tensión, tenacidad a la fractura, resistencia etc. afectando la integridad del elemento así como su desempeño.

Las condiciones que presentan los materiales en estudio, como lo son sus dimensiones, su peso, el material con el cual fue elaborado, las velocidades de

ensayo requeridas, los costos que genera el ensayo, el equipo con el que se cuenta y si el ensayo puede ser destructivo o no [5], son puntos de partida para nuevas investigaciones, y el desarrollo de nueva tecnología al igual que nuevas técnicas de análisis.

## **2. Principales técnicas de evaluación**

### **Rayos X**

La técnica de los Rayos- X se basa en la medición de los macro y micro esfuerzos, siendo una técnica no destructiva [5]. Esto se logra cuando la muestra en estudio es colocada en un difractómetro y entra en contacto con Rayos-X, los cuales a su vez tienen efecto sobre la red cristalina del material y como consecuencia se presenta variación en la difracción [6].

Esta metodología fue realizada en [6] para obtener las tensiones residuales en un componente de acero el cual fue mecanizado bajo la operación de torneado y rectificado. Los estudios arrojan un comportamiento de tracción en la parte superficial del material por parte del torneado y a compresión por el rectificado, en cambio las tensiones internas muestran una ligera tracción por el rectificado y compresión por el proceso de torneado.

En [7] los materiales en estudio son aceros inoxidable y aceros de herramientas, ambos sometidos a torneado o rectificado, se logra determinar que el comportamiento al interior del material son tensiones con mayor compresión en el torneado comparadas a las producidas por la operación de rectificado.

En [8] se realiza un estudio del maquinado de cuatro coronas escalonadas y concéntricas por ambas caras, en la cual para su fabricación se emplearon herramientas de corte nuevas y herramientas de corte en su fin de vida, además de la variación de los parámetros de velocidad de corte, avance y profundidad.

### **Indentas colineales**

Otro de los métodos empleados en [9] es la técnica de las indentas colineales, la cual está basada en la medición de la distancia entre indentas colineales antes y después de la introducción de un tratamiento térmico. Para esta investigación se

realizaron ensayos de fresado frontal en aleaciones de aluminio, modificando los parámetros de velocidad de corte en un orden de magnitud. Concluyendo que dicha técnica puede determinar tensiones residuales pequeñas y que el cambio de la velocidad de corte no modifica substancialmente las distribuciones de tensiones residuales en los ensayos.

En [10] se llevó a cabo el fresado de una aleación de aluminio a velocidades altas, medias y bajas. El estudio de los esfuerzos residuales fue bajo la técnica de la micro-indentas, donde se concluyó que en las zonas de corte, prevalecen las componentes normales a compresión. En cambio se realizó por parte de [11] el estudio del fresado a altas velocidades de aleaciones de aluminio, los resultados de las tensiones obtenidas muestran influencia de las componentes ortogonales de la velocidad de corte.

La evaluación por este método también se realizó en [12] en dos probetas compuestas de aleaciones de aluminio mecanizadas a altas velocidades, resultando diferente sus estados de tensión residual resultantes, además se obtuvieron correlaciones entre las tensiones normales y la profundidad de corte.

El proceso de fabricación de una aleación de acero, durante el proceso de laminación también fue analizada bajo este método en [13], los resultados obtenidos de las tensiones normales fueron mayores que las tangenciales, además de presentarse a compresión.

## **El método de elementos finitos**

El avance en la tecnología ha permitido desarrollar modelos para la evaluación de las tensiones residuales, en [14] se hace mención de que algunos de estos programas aun cuentan con algunas limitantes como parámetros de entrada y validación. Sin embargo se muestran como nuevas alternativas comparadas a las metodologías convencionales antes mencionadas debido a su accesibilidad en cuanto al costo y a los tiempos de evaluación.

Uno de estos ejemplos es mostrado en [1], donde a través de este método y con ayuda del software ANSYS se evalúa un cilindro sometido a presión interna, donde se pudo determinar que los esfuerzos residuales daban paso a deformaciones

dentro de los elementos mecánicos excediendo su límite de cedencia. Las investigaciones realizadas por [14] también se hace uso del modelo de elemento finito para un elemento torneado proveniente de una aleación de titanio, desarrollando un modelo de predicción con el software DEFORM 3D.

Por su parte [15] realizó el análisis de tensiones residuales en una estructura de un autobús, realizando mediante perforaciones la liberación de tensiones, calculando los esfuerzos residuales tanto analítica como experimentalmente y comparando los resultados con una simulación mediante el software ANSYS.

### **Método del agujero ciego**

El método del agujero ciego es empleado en [17], donde se analiza una probeta de fatiga compuesta de aleación base níquel, cuadros de bicicleta y uniones circunferenciales entre tubos, siendo todos materiales en servicio.

Los esfuerzos ejercidos por soldadura por fricción, y soldadura mediante arco eléctrico son estudiados en [12], donde se comparan estas técnicas resultando que la soldadura por fricción tienen un contenido menor de esfuerzos residuales que la soldadura por arco eléctrico.

Otro caso de estudio es presentado por [18] donde describe el uso del método del agujero ciego para determinar los esfuerzos que la soldadura helicoidal ejerce en tubos de acero, se determina que los esfuerzos a compresión encontrados en el tubo le ayudan en las condiciones de trabajo.

### **3. Comparación y selección de metodología**

Para poder seleccionar una de las metodologías descritas anteriormente, se debe realizar una evaluación, esto se logra con una suma ponderada de cada uno de los criterios de selección, donde cada criterio es tomado como referencia para ser comparado con los otros, se le otorga una calificación donde el número 9 representa un alto valor de referencia, seguido del número 6 mostrando un medio valor de referencia, por último el número 3 para valores bajos. A continuación se muestra la tabla 1, donde se realiza la evaluación de las alternativas, mostrándose

el peso que recibe el criterio de selección, la calificación asignada (Calif) y la evaluación ponderada (Ev.pond).

Tabla 1 Evaluación de las alternativas.

Métodos	Rayos-X			Indentación Colineal		Método de elemento finito(MEF)		Agujero ciego	
	Peso	Calif	Ev.pond	Calif	Ev.pond	Calif	Ev.pond	Calif	Ev. pond
<b>Económico</b>	25%	3	75	6	150	3	75	9	225
<b>Facilidad</b>	10%	3	30	9	90	3	30	6	60
<b>Portátil</b>	5%	6	30	3	15	3	15	9	45
<b>Precisión</b>	30%	6	180	3	90	3	90	9	270
<b>Ambiente controlado</b>	10%	3	30	6	60	9	90	9	90
<b>Amplio rango de materiales</b>	20%	3	60	6	120	9	180	9	180
<b>Total</b>			<b>405</b>		<b>525</b>		<b>480</b>		<b>870</b>
<b>Lugar</b>			<b>4</b>		<b>2</b>		<b>3</b>		<b>1</b>

Debido a los resultados que la evaluación arroja, se ha elegido el método del agujero ciego como el método más conveniente para la evaluación de los esfuerzos del pistón, ya que puede ser aplicado en campo con ayuda de un equipo portátil, se pueden evaluar un amplio rango de materiales, es un método sencillo, preciso y económico, y no se necesita trabajar en un ambiente controlado.

#### 4. Método del agujero ciego

El método del agujero ciego tiene sus inicios en el año de 1930 por Mathar, el cual apoyándose con extensómetros mecánicos midió los desplazamientos que se generaron alrededor de un orificio circular perforado en una placa estresada [19]. Seguido de Soete y Vancrombrugge en el año de 1950, donde se encargaron de perfeccionar la técnica de medición de las galgas extensiométricas [20].

Por su parte Kelsey realizó investigaciones y publicó la variación de esfuerzos residuales con la profundidad usando el método de "hole drilling" en el año de 1956.

Surgiendo Rendler y Vigness en el año de 1966 con una nueva aplicación del método “hole drilling” para determinar los esfuerzos residuales, donde se menciona una metodología más sencilla y también proponen las dimensiones de las galgas extensiométricas [20]. En el año 2002 la ASTM define la normativa ASTM E-837 donde se establecen todas las indicaciones para cumplir con este método [18].

El método del agujero ciego consiste en medir los esfuerzos de relajación de las tensiones cuando la pieza ha sido perforada a través de sensores llamados “galgas extensiométricas”, siendo el método clasificado como semidestructivo porque el área perforada de la pieza es pequeña, mencionado en [5] que en su mayoría dicha área no afecta el funcionamiento de la pieza.

## **5. Descripción de la metodología**

La metodología empleada para el análisis mediante el agujero ciego es la siguiente:

- Se limpia y se lija perfectamente el material para eliminar residuos de grasas, polvo y todo tipo de agente que pudiera interferir tanto en la medición de los esfuerzos como en el pegado de la galga extensiométrica.
- Se realiza el pegado de la galga extensiométrica en el área donde se interesa conocer el esfuerzo residual.
- Se conectan las galgas a un indicador de deformación estática a través de una unidad de alimentación y balance [3].
- Se colocan en cero los indicadores de las galgas extensiométricas y se taladra un pequeño agujero en el centro de las galgas, este paso se logra con ayuda de una perforadora de precisión (figura 1), el agujero se realiza a una profundidad aproximadamente igual al diámetro del taladro [5].
- Se realizan las mediciones correspondientes después del corte y se calculan las tensiones residuales con ayuda de las mediciones tomadas antes del corte.



Figura 1 Perforado de precisión Modelo RS 200 (Fotografía: Fernando Soria).

## **6. Conclusiones**

Todas las metodologías descritas en estas investigaciones son buenas alternativas para determinar los esfuerzos residuales, sin embargo es de suma importancia elegir la metodología más conveniente, aquella que se adapte a todas las condiciones y características que el material en estudio presenta, para poder obtener resultados satisfactorios y confiables.

Para este caso en particular, y con ayuda de una evaluación ponderada, la metodología del agujero ciego fue la alternativa seleccionada, la cual se ajusta a las características que el material presenta. Con ello se pretende llevar a cabo la evaluación del pistón de aleación de aluminio bajo esta metodología, y con ello poder determinar los efectos de los parámetros de corte sobre el desempeño mecánico del pistón.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] C. D. Reséndiz Calderón. Evaluación del campo de esfuerzos residuales en cilindros sometidos a presión interna, aplicando el método de elemento finito, tesis de posgrado. 2011. Instituto politécnico nacional.
- [2] V, Ramos Gordillo. Análisis mediante simulación del efecto de las reparaciones en las tensiones residuales de soldeo. Tesis de licenciatura. 2013. Universidad politécnica de Cartagena.
- [3] J.A, Porro González. Optimización de campos de tensiones residuales en procesos de tratamiento superficial de materiales metálicos mediante ondas

- de choque generadas por láser. Tesis doctoral. 2010. Universidad politécnica de Madrid.
- [4] Y, Zamora Hernández. Y, Morales Tamayo. M, Lastre Aleaga. R, Beltrán Reyna. "Influencia de los recubrimientos de corte en el desgaste del flanco de insertos recubiertos durante el torneado del acero AISI 316L". Enfoque UTE, Volumen 6. Número 1. 2015. Páginas 13-24.
- [5] M. Monsalve. M. E, López. F. Vargas Galvis. "Técnicas utilizadas para la medición de esfuerzos residuales en películas delgadas depositadas por PVD". *Scientia et Technica*, Volumen 1. Número 36. 2007.
- [6] V. García Navas. I. Ferreres. J.A, Marañón. C. García Rosales. J. Gil Sevillano. "Tensiones residuales generadas en acero F-522 por distintos tipos de mecanizado". *Revista de metalurgia*. Volumen 41. Número 4. Páginas 266-279.
- [7] V. García. N. Ordas. M. L, Penalva. J. Fernández. K. Ostolaza. C. García Rosales K., García-Rosales. "Estudio mediante difracción de Rayos-X de las tensiones residuales generadas por diferentes tipos de mecanizado". *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, Volumen 43. Número 2. Páginas 251-254.
- [8] J. Díaz Álvarez. Análisis numérico y experimental del desgaste de herramienta e integridad superficial en los procesos de torneado de inconel 718. Tesis doctoral. 2013. Universidad Carlos III de Madrid.
- [9] F. V. Díaz. R. E. Bolmaro. E. F. Girini. H. Bianchini. "Determinación de tensiones residuales inducidas por maquinado". *Anales SAM/CONAMET*, 2007 Páginas 1581-1586.
- [10] F.V. Díaz. C.A. Mammana. A.P.M. Guidobono. "Evaluación de tensiones residuales inducidas por fresado de baja, media y alta velocidad en muestras de aleación de aluminio AA 7076-T6". Congreso internacional de metalurgia y materiales SAM-CONAMET/IBEROMAT/MATERIA. 2014.
- [11] F.V. Díaz. R.E. Bolmaro. C.A. Mammana. A. Guidobono. "Determinación de tensiones residuales inducidas por maquinado de alta velocidad usando un método de pares de indentas". CONAMET/SAM. 2008.

- [12] C. A. Mammana, F. V. Díaz. A. P. M. Guidobono. "Evaluación de Tensiones Residuales en muestras de aleaciones de aluminio mecanizadas a alta velocidad." X CONAMET/SAM.2010.
- [13] F. N. Rosso. A. C. Walker. "Estudio de Tensiones Residuales en Muestra de Aleación de Aluminio Aa 6082-T6 en Estado de Suministro". Jornada de investigadores tecnólogos. 2013.
- [14] I. Izeta Lizarralde. P. J. Arrazo Arriola. J. C. Outeiro. "Modelización y validación de las tensiones residuales inducidas por aleaciones de aeronáutica". Asociación española de ingeniería mecánica. 2012
- [15] V. Díaz. J. L. San Román. E. Olmeda. A. Gauchia. "determinación experimental de tensiones residuales en un autobús urbano". 2007.
- [16] I. Hernández Arriaga. J. Pérez Meneses. E. Aguilera Gómez. "Determinación de esfuerzos residuales en una estructura tipo I producidos por soldadura". Memorias del XIX congreso internacional anual de la SOMIM. 2013. Páginas 1022- 1032.
- [17] A. M. Irisarri. "Efecto de las tensiones residuales sobre las prestaciones de diversos componentes". In Anales de Mecánica de la Fractura. Volumen 23. 2006. Páginas 245-50.
- [18] G. Juárez Luna. A. G. Ayala Milian. M. Niño Lázaro. "determinación experimental de esfuerzos residuales en tubos de acero con soldadura helicoidal". Sociedad mexicana de ingeniería estructural. 2004.
- [19] I. MEJÍA. C. Maldonado. A. Belladonna. Ch. J. García. "Esfuerzos residuales generados en la soldadura de placas de acero inoxidable AISI 304 mediante el proceso SMAW". CONAMET/SAM. Volumen 2006. 2006, paginas. 1-7.
- [20] I. Velázquez Pérez. H. Plascencia Mora. "Medición de esfuerzos residuales por ruido de barkhausen y por barreno ciego". Verano de la investigación científica. Volumen 1. Número 2. 2015. Páginas 1618-1622.