

Análisis de esfuerzos residuales en el proceso de engargolado utilizando el Ruido Magnético de Barkhausen

Analysis of residual stresses in the Roll Hemming Process using the Barkhausen Magnetic Noise

Recibido: 26 de septiembre del 2016

Aceptado: 26 de septiembre del 2017

Publicado: 15 de marzo del 2018

Cómo citar:

Limon Leyva, P. A., Aguilera Gómez, E., Plascencia Mora, H., Ledesma Orozco, R., Balvantín García, A. de J., & Diosdado de la Peña, J. A. (2018). Análisis de Esfuerzos Residuales en el Proceso de Engargolado Utilizando el Ruido Magnético de Barkhausen. *Acta Universitaria*, 28(1), 57-63. doi: 10.15174/au.2018.1627

Pablo Alberto Limon Leyva^{*o}, Eduardo Aguilera Gómez*, Héctor Plascencia Mora*, Elías Rigoberto Ledesma Orozco*, Antonio de Jesús Balvantín García*, José Angel Diosdado De la Peña*

* División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato, Carretera Salamanca-Valle de Santiago km 3.5 +1.8 km, Comunidad de Palo Blanco, Salamanca, Guanajuato, México, Código Postal 36885. Tel.: (464) 647 9940 ext. 2363. Correo electrónico: pa.limonleyva@ugto.mx

^o Autor de correspondencia.

Palabras Clave:

Engargolado por rodillo conducido; Ruido Magnético de Barkhausen; esfuerzos residuales.

Keywords:

Roll Hemming; Magnetic Barkhausen Noise; residual stresses.

RESUMEN

El engargolado es un proceso de manufactura que consiste en doblar una lámina metálica sobre si misma o sobre otra. En este trabajo, se implementó el Ruido Magnético de Barkhausen (RMB) para identificar los esfuerzos residuales y su variación durante el proceso de engargolado por rodillo conducido. Inicialmente se detalla el proceso de inspección sobre especímenes de acero ASTM A36 engargolados. Para el estudio, se seleccionó el sensor S6519 para realizar mediciones en 5 puntos del borde de las piezas, obteniendo valores promedio de intensidad de RMB para cada etapa de engargolado. Se incluye una discusión de las variaciones identificadas en los resultados. Finalmente, se presenta un análisis de la ausencia o presencia de los esfuerzos residuales sobre la pieza y su efecto sobre el comportamiento magnético del material. Los resultados obtenidos permiten determinar la factibilidad de implementar el RMB para la inspección de piezas engargoladas en líneas de producción.

ABSTRACT

Hemming is a manufacturing process, consisting on folding a sheet metal onto itself or another sheet metal. In this work, Magnetic Barkhausen Noise (MBN) was implemented for the identification of residual stresses and their variations through the stages of Roll Hemming process. Initially, the inspection process over hemmed ASTM A36 specimens is detailed. For this study, a S6519 probe was selected to perform measurements at 5 different regions on the specimens' edges, obtaining average values of intensity of MBN for each stage of Roll Hemming process. The variation of the obtained results was identified and discussed. Finally, the analysis of the absence or presence of residual stresses and their effect on the magnetic behavior of the material is presented. Obtained results allow us to determine the feasibility of MBN implementation for the inspection of hemmed parts in production lines.

INTRODUCCIÓN

Hoy en día, los materiales ferromagnéticos son ampliamente utilizados en diferentes industrias, tales como la automotriz, petrolera, ferroviaria, aviación, entre otras. Lo anterior, debido a las características mecánicas que presentan estos materiales durante su deformación elástica y plástica. Sin embargo, la satisfacción de los actuales estándares de calidad y desempeño de los productos requieren el desarrollo de nuevos materiales y procesos. La caracterización de las propiedades de estos nuevos materiales es vital para los procesos de manufactura.

Comúnmente, la falla de los materiales se debe a las condiciones de carga a las cuales están sometidos. Por lo que la determinación de la vida útil de un elemento, bajo sus condiciones de trabajo, es de gran relevancia.

La concentración de esfuerzos y la fatiga en los materiales son dos de las principales razones de falla en productos manufacturados (Mott, 2006; Webster & Ezeilo, 2001). Sin embargo, predecir y evaluar dichos esfuerzos residuales en los componentes mecánicos durante su operación es altamente complicado. Debido a esto, en muchos procesos de manufactura es necesario determinar estos esfuerzos antes y después de obtener la pieza terminada (Farrar & Worken, 2007).

La implementación de los ensayos mecánicos tradicionales, como lo son las pruebas de tensión, compresión y fatiga, para el control de calidad de piezas manufacturadas se dificulta debido al alto costo de inversión en herramientas y equipos de prueba, así como al desperdicio de material. Adicionalmente, al ser pruebas destructivas no es posible su aplicación a la totalidad de las piezas fabricadas. Por lo tanto, este tipo de pruebas se realizan sobre probetas normalizadas, fabricadas con el mismo material de los componentes.

Recientemente, el estudio de diferentes alternativas para la inspección de piezas manufacturadas ha sido reportado en la literatura. Entre dichas alternativas, las pruebas no destructivas se han propuesto como técnicas para el monitoreo estructural de piezas mecánicas. La difracción de rayos X, las corrientes de Eddy, el ultrasonido y el Ruido Magnético de Barkhausen (RMB), son métodos no destructivos que poseen excelentes capacidades para la caracterización de concentraciones de esfuerzos en los materiales (Rossini, Dassisti, Benyounis & Olabi, 2012).

El presente trabajo se enfoca en la detección de esfuerzos residuales en láminas metálicas sometidas al proceso de engargolado por rodillo conducido. El engargolado es un proceso de deformación plástica que consiste en doblar el extremo de un panel exterior (ceja) sobre sí mismo o

sobre otra lámina (panel interior). Actualmente, este proceso de manufactura es sumamente utilizado en el área automotriz, donde se implementa principalmente en el ensamblaje de cierres de carrocerías: cofres, puertas, entre otras (Cacique, Capilla, Aguilera, Arroyo & Orozco, 2013; Lin, Zhou, Wang, Huang & Wang, 2014; Sigvant & Mattias-sion, 2005).

El estudio de los diferentes métodos para el engargolado de materiales ha sido ampliamente reportado en la literatura (Burchitz, Fritsche, Grundmann & Hillmann, 2011; Hönle & Liewald, 2014; Hu, Zhao, Huang, Li & Lin, 2012; Jonkers, 2006; Lin, Wang & Zhou, 2014; Neugebauer, Drossel, Rössinger, Eckert & Hecht, 2014). Sin embargo, la determinación de esfuerzos residuales sobre las piezas engargoladas es aún un tema poco explorado por la comunidad científica del área de ingeniería mecánica.

En este trabajo, se propone la implementación del método de RMB para la detección de esfuerzos residuales en láminas de acero ASTM A36 engargoladas. Adicionalmente, se analiza el efecto de múltiples condiciones de doblado en el comportamiento magnético del material.

MATERIALES Y MÉTODOS

Método de Ruido Magnético de Barkhausen

Existen diversas condiciones de manufactura y operación tales como fatiga, esfuerzos residuales, tratamientos térmicos, entre otros, que pueden inducir la falla en los materiales y estructuras. Por lo cual, la evaluación experimental de estas condiciones es crítica. Los esfuerzos residuales son uno de los factores que más impactan sobre la vida útil de los componentes mecánicos. En la actualidad, diferentes métodos han sido propuestos para medir dichos esfuerzos con el fin de alcanzar un monitoreo estructural de las piezas (Kandil, Lord, Fry & Grant, 2001; Keil, 1992; Macherauch & Kloos, 1987; Sobolevski, 2007).

El uso de técnicas de evaluación no destructivas ha sido estudiado por sus capacidades de detectar esfuerzos residuales sin generar daños sobre la pieza (Karabutov *et al.*, 2008; Kudryavtsev, Kleiman, Gushcha, Smilenco & Brodovsky, 2004; Rabung, Altpeter, Dobmann & Szielasko, 2012; Stewart, Stevens & Kaiser, 2004; Yelbay, Cam & Gür, 2010). El método de RMB es de particular interés debido a que puede detectar esfuerzos residuales superficiales y algunas características microestructurales de los materiales (Rabung *et al.*, 2012). Esta técnica es aplicable únicamente sobre materiales ferromagnéticos, teniendo una gran sensibilidad al esfuerzo, tamaño de grano, composición, dureza y microestructura de la pieza (Lu, 1996; Totten,

Howes & Inove, 2005). Stewart *et al.* (2004) propuso el uso del RMB para la detección de esfuerzos residuales en placas de acero soldadas. Los resultados en (Stewart *et al.*, 2004) muestran una variación significativa de la cantidad de ruido magnético en el área de la soldadura, relacionando esta variación con la concentración de esfuerzos.

El efecto de Barkhausen es un fenómeno micro-magnético observado en materiales que se componen de regiones llamadas dominios magnéticos. Los dominios magnéticos están separados por las llamadas paredes de dominio. Mientras un material ferromagnético es magnetizado y desmagnetizado, el campo magnético aplicado provoca cambios en los dominios magnéticos. En este proceso de magnetización y desmagnetización se presenta una histéresis de manera natural. El efecto Barkhausen se produce durante dicha histéresis, caracterizado por cambios discretos en la magnetización del material por efecto del campo magnético aplicado (Thomas, Mohan, Kendrish & Fix, 2009).

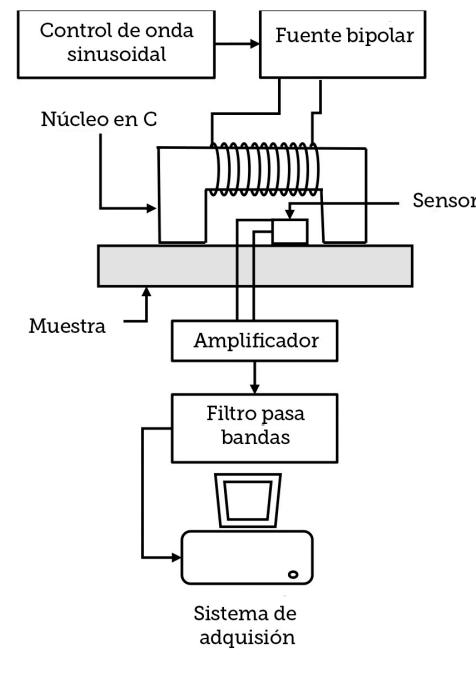
Comúnmente los dominios magnéticos están aleatoriamente orientados en el material, generando una condición de nulidad magnética. Cuando un campo magnético externo H es aplicado, el material es magnetizado provocando un movimiento en las paredes del dominio. Dichos movimientos, alinean los vectores de magnetización a lo largo de la dirección del campo aplicado H , provocando la saturación (Rossini *et al.*, 2012).

El RMB puede ser detectado por medio de una bobina inductiva posicionada cerca de la pieza magnetizada. Una señal tipo ruido se puede observar en el material por los pulsos eléctricos generados debido al movimiento de los dominios magnéticos. Dicha señal es conocida como Ruido Magnético de Barkhausen. Los límites de grano, discontinuidades, cambios de fase, impurezas, esfuerzos residuales, entre otras condiciones del material, afectan los movimientos de los dominios magnéticos y, por lo tanto, al Ruido Magnético de Barkhausen (Rossini *et al.*, 2012).

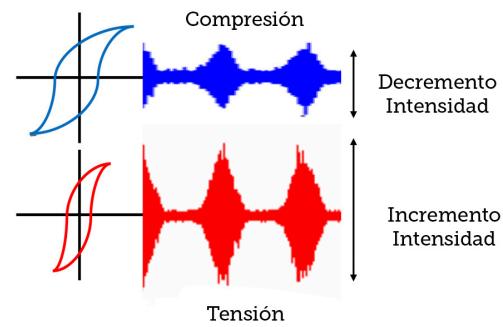
La medición del RMB, generalmente, se lleva a cabo con sensores micro-magnéticos. Estos sensores consisten en un núcleo en forma de C, el cual es excitado por medio de una bobina con una fuente de alimentación bipolar. Adicionalmente, el RMB es detectado por una segunda bobina de aire y la intensidad del campo tangencial se mide mediante un sensor de efecto Hall, figura 1a.

Por la orientación de los polos, un campo magnético alterno es generado en el material, haciendo posible la detección del esfuerzo correspondiente. El RMB es sensible a los cambios de esfuerzo aplicado sobre el material. Las interacciones de las propiedades tanto elásticas como magnéticas, se conocen como interacción magneto-elástica.

Debido a esta interacción, la anisotropía magnética de los materiales provoca una reducción en la intensidad del RMB para esfuerzos de compresión y un incremento para esfuerzos de tensión, figura 1b.



a)



b)

Figura 1

Esquema de medición con RMB, a) sensor micro-magnético (Theiner & Höller, 1982); b) variación de la intensidad del ruido de Barkhausen.

Fuente: Elaboración propia.

El efecto de los esfuerzos sobre el RMB puede aplicarse a la determinación cualitativa del esfuerzo residual existente en la pieza estudiada. Por otro lado, aunado al efecto de la distribución de esfuerzos, la estructura metalográfica influye también sobre el RMB; la intensidad del RMB disminuye en materiales con microestructuras que se caracterizan por alta dureza (Lu, 1996).

El RMB se ve afectado también por las propiedades magnéticas del material como la permeabilidad, la coercitividad, la remanencia, las pérdidas por histéresis, por mencionar algunas. Por ejemplo, la profundidad de medición depende de la permeabilidad del material. La forma más común de representar las propiedades magnéticas de un material ferromagnético es por medio de su curva de histéresis, como se muestra en la figura 2a.

La relevancia de la curva de histéresis radica en que, a través del análisis del RMB, se puede determinar si los resultados corresponden a un cambio microestructural o a la variación del estado de esfuerzos sobre una pieza. Si las curvas correspondientes a dos mediciones se intersectan en el eje horizontal en un valor cercano a cero, corresponde a una variación debida a esfuerzos mecánicos y, por lo tanto, la pieza presentará un esfuerzo residual (tensión o compresión). Por otro lado, una intersección en un valor diferente a cero, refleja un cambio en la microestructura del material (Theiner & Höller, 1982), figura 2b.

Descripción del Sistema Experimental

El sistema experimental, mostrado en la figura 3, consiste en una lámina de material ASTM A36 de $10 \text{ cm}^2 \times 12 \text{ cm}^2$ con un espesor de 0.8 mm (calibre 22) con un módulo de elasticidad de 200 GPa y resistencia a la cedencia de 280 MPa. Diversos especímenes con las mencionadas características se sometieron al proceso de engargolado en uno de sus extremos. El proceso se implementó en base al diagrama que se muestra en la figura 4.

Inicialmente se realiza el corte de las probetas que se van a utilizar en el análisis. Se realiza el proceso de doblado de ceja (90°) en el borde de la lámina. Posteriormente, se lleva a cabo el pre-engargolado a un ángulo de análisis pre-determinado (135°). Finalmente, se realiza el engargolado final, el cual consiste en generar un segundo doblez a 180°. Entre cada operación del proceso de engargolado se realizó la limpieza del espécimen y la medición correspondiente del RMB. Una limpieza exhaustiva de los especímenes es necesaria para llevar a cabo las mediciones de ruido de Barkhausen, esto con el fin de evitar errores y asegurar que el equipo está trabajando en las mejores condiciones.

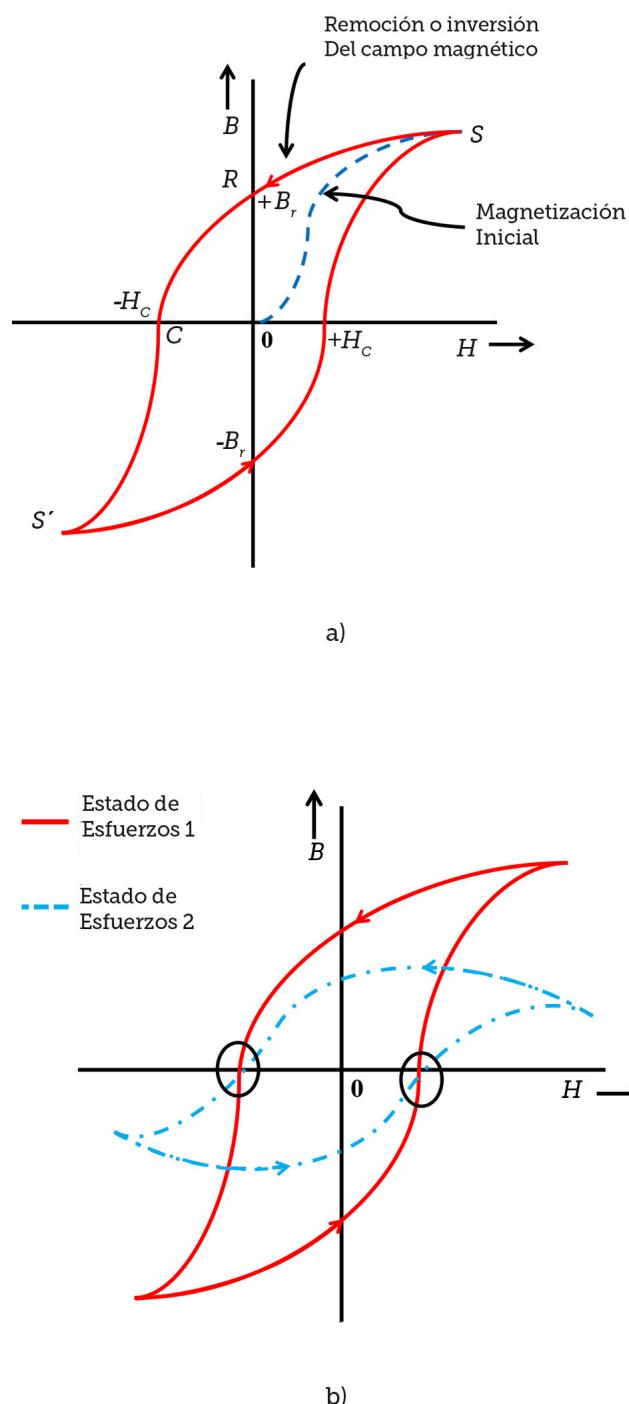


Figura 2

Curva de Histéresis para a) un estado de carga y b) dos estados de carga.
 Fuente: Elaboración propia.

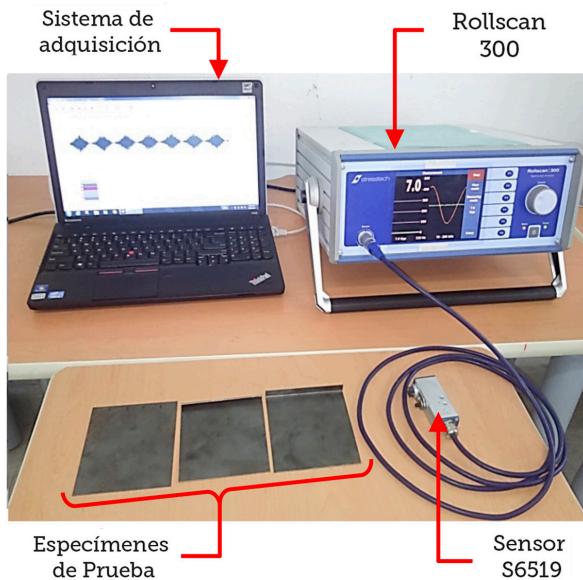


Figura 3

Sistema Experimental para la medición del RMB, en una lámina engargolada.
Fuente: Elaboración propia.

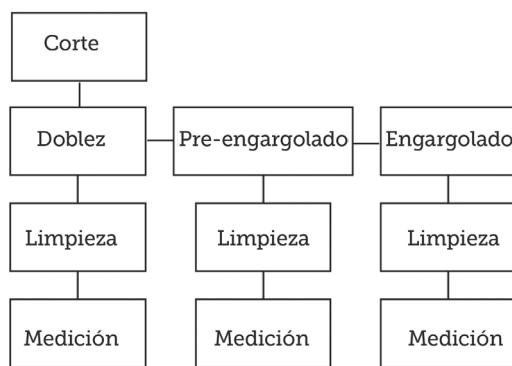


Figura 4

Diagrama del proceso de engargolado.
Fuente: Elaboración propia.

Las mediciones experimentales se realizaron utilizando el equipo Rollscan 300 StressTech®. Para realizar las pruebas se utilizó el sensor S6519. Los parámetros de voltaje y frecuencia utilizados fueron 7 V y 110 Hz, respectivamente. Para la adquisición de datos se utilizó una estación de trabajo con el software MicroScan®.

Las mediciones del ruido magnético de Barkhausen se llevaron a cabo en 5 zonas de interés sobre la ceja de cada

especímen utilizada: A, B, C, D y E (figura 5). Finalmente, un análisis comparativo se realizó entre las señales capturadas para las diferentes etapas del proceso de engargolado (corte, pre-engargolado y engargolado final). Una discusión de los resultados obtenidos se presenta en la siguiente sección.

RESULTADOS

La figura 3 muestra algunos de los especímenes de prueba sobre los que se realizaron los experimentos. Los resultados de las mediciones experimentales de RMB se muestran en la tabla 1. Aquí, las mediciones corresponden a las 5 diferentes zonas de los especímenes evaluadas para cubrir la totalidad del borde de la ceja. Los especímenes se doblaron a diferentes ángulos, desde 0° hasta 180°, con la finalidad de monitorear la variación del RMB durante el proceso típico de engargolado de lámina. Se observa que la medición de RMB en la lámina sin doblar, presenta diferentes resultados, se atribuye esto a los esfuerzos residuales de los procesos de manufactura previos, como el rolado en frío y el corte de la lámina.

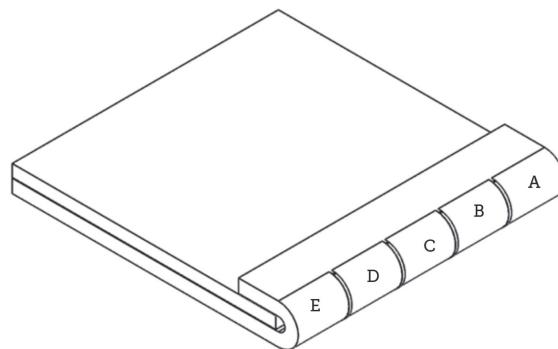


Figura 5

Regiones de interés para la medición del RMB.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1 Mediciones del RMB realizadas en la ceja de los especímenes.

Ángulo de doblado	Zona				
	A	B	C	D	E
0° (Sin Doblez)	202.2	203.8	204.7	197.7	195.3
90° (Doblez Inicial)	211.7	210.9	208.3	207.0	207.1
135° (Pre-Engargolado)	224.1	219.4	225.6	222.4	223.5
180° (Engargolado Final)	249.6	246.5	259.6	243.2	251.2

Fuente: Elaboración propia.

Un análisis del porcentaje de cambio del RMB, medido en cada zona, con respecto a la lámina sin doblez –la cual se toma como referencia– es presentado en la tabla 2. Se observa que la variación máxima de RMB se encuentra en la Zona E, para un valor de 180° en el doblez de la ceja. Este valor máximo en la variación de RMB representa la región con mayores esfuerzos residuales. Mientras que, la Zona C con un ángulo de doblez de 90°, representa la menor variación del RMB. Sin embargo, los resultados obtenidos muestran que todas las regiones inspeccionadas tienen una variación positiva, misma que representa un esfuerzo a tensión inducido por el doblez de la ceja.

En la figura 6, se muestran tanto los resultados de la medición del RMB (señal de alta frecuencia), como las gráficas de la magnetización del material (señal de baja frecuencia) para la zona de mayor variación. En esta figura se puede apreciar un incremento considerable en la magnitud de la señal del RMB, en la ceja doblada a 180°, con respecto a la lámina sin doblez.

Tabla 2 Porcentaje de desviación de RMB, respecto a la lámina sin doblez.

Ángulo de doblado	Zona				
	A	B	C	D	E
90°	4.70	3.48	1.76	4.70	6.04
135°	10.83	7.65	10.21	12.49	14.44
180°	23.44	20.95	26.82	23.01	28.62

Fuente: Elaboración propia.

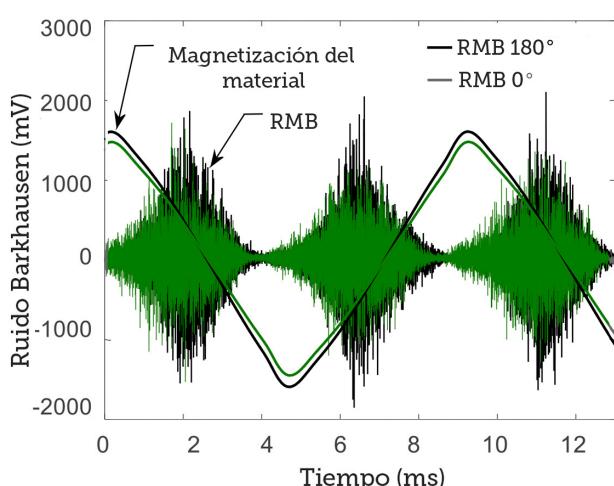


Figura 6

Variación del RMB 0° - 180°.

Fuente: Elaboración propia.

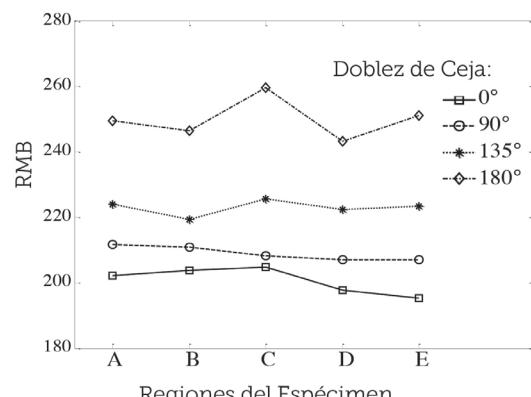


Figura 7

RMB en función del doblez de la ceja.

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, en la figura 7, se observa la evolución del RMB a medida que el doblez de la ceja se va incrementando. Los resultados de la figura 7 se obtienen directamente de las mediciones experimentales de RMB para cada etapa del engargolado. Dichas mediciones fueron realizadas en las 5 diferentes áreas de la probeta descritas en la figura 5. Como se mencionó previamente, esta variación indica que el proceso de engargolado induce esfuerzos de tensión sobre el borde externo de la ceja. Dichos esfuerzos se incrementaron en todas las regiones conforme se aumentó el ángulo de doblez. Las conclusiones de los resultados obtenidos se presentan en la siguiente sección.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en el presente trabajo muestran la factibilidad de la aplicación del RMB como un método de detección de esfuerzos residuales en piezas sometidas al proceso de engargolado.

La detección de esfuerzos residuales es de vital importancia en la determinación de la calidad del proceso de engargolado de lámina. En base a los resultados que arroja la técnica de RMB, es posible establecer una metodología que permita determinar la validez del proceso de engargolado. En caso de que los esfuerzos detectados sobrepasen el rango preestablecido, un rediseño de proceso puede ser determinado.

Cabe mencionar que el RMB solo determina las regiones que sufren un esfuerzo máximo, ya sea a tensión o compresión, en una pieza. Actualmente, no es posible establecer una relación directa entre el valor del RMB y la magnitud del esfuerzo residual existente. Debido a lo anterior, la implementación de otras técnicas, como el método de barreno ciego, es necesaria para la estimación del valor del

esfuerzo inducido. La medición de esfuerzos con el método de barreno ciego es una técnica destructiva que se aplica a un área extremadamente limitada. En función de lograr una rápida inspección de estructuras relativamente grandes, una técnica como el RMB puede ser de gran utilidad en la industria.

El RMB es una técnica de evaluación no destructiva de fácil automatización. Por lo anterior, es factible su implementación como método para la inspección en línea de piezas engorgoladas. Consecuentemente, la detección del esfuerzo residual inducido puede establecerse como un parámetro de aceptación o rechazo del producto terminado.

REFERENCIAS

Burchitz, I., Fritzsche, D., Grundmann, G., & Hillmann, M. (Agosto, 2011). Efficient planning and numerical analysis of industrial hemming processes. En Chung, K. *The 8th International Conference and Workshop on numerical simulation of 3D sheet metal forming processes*. Korea: American Institute of Physics.

Cacique, B. S., Capilla, G., Aguilera, N. I., Arroyo, R. B., & Orozco, M. H. (Septiembre, 2013). *Metodología para el análisis del proceso de engorgolado por rodillos en una probeta especializada*. Memorias del XIX Congreso Internacional Anual de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica, Pachuca, Hidalgo, México.

Farrar, C. R., & Worden, K. (2007). An introduction to structural health monitoring. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365(1851), 303-315.

Hönle, S., & Liewald, M. (2014). Experimental investigation of energy savings during table-top hemming of aluminum alloys. *Key Engineering Materials*, 611-612, 947-954. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.611-612.947

Hu, X., Zhao, Y., Huang, S., Li, S., & Lin, Z. (2012). Numerical analysis of the roller hemming process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 62(5-8), 543-550.

Jonkers, B. (2006). *Simulation of the Robot Roller Hemming process*. Bunschoten: Universiteit Twente.

Kandil, F. A., Lord, J. D., Fry, A. T., & Grant, P. V. (2001). *A review of residual stress measurement methods. A Guide to Technique Selection*. Tewdington UK: National Psychology Laboratory.

Karabutov, A., Devichensky, A., Ivochkin, A., Lyamshev, M., Pelivanov, I., Rohadgi, U., & Subudhi, M. (2008). Laser ultrasonic diagnostics of residual stress. *Ultrasonics*, 48(6-7), 631-635.

Keil, S. (1992). Experimental determination of residual stresses with the ring-core method and an on-line measuring system. *Experimental Techniques*, 16(5), 17-24.

Kudryavtsev, Y., Kleiman, J., Gushcha, O., Smilenco, V., & Brodov, V. (Junio, 2004). *Ultrasonic technique and device for residual stress measurement*. X International 11 Congress and Exposition on Experimental and Applied Mechanics, Costa Mesa, California, Estados Unidos.

Lin, J. G., Wang, E. W., & Zhou, G. R. (2014). Hemming Process Simulation of Table-Top Hemming Machine. *Applied Mechanics and Materials*, 644, 2177-2180.

Lin, J. G., Zhou, G. R., Wang, J. Q., Huang, Y. W., & Wang, Q. H. (2014). FEA-Simulation of Automobile Sheet Metal Hemming Process. *Applied Mechanics and Materials*, 602-605, 86-89

Lu, J. (Ed.). (1996). *Handbook of measurement of residual stresses*. Georgia: Fairmont Press.

Macherauch, E., & Kloos, K. H. (1987). Origin, measurement and evaluation of residual stresses. *Residual Stresses in Science and Technology*, 1, 3-26.

Mott, R. L. (2006). *Diseño de elementos de máquinas*. México: Pearson Educación.

Neugebauer, R., Drossel, W. G., Rössinger, M., Eckert, A., & Hecht, B. (2014). Roller Hemming Simulation: State of the Art and Application Limits. *Key Engineering Materials*, 611-612, 1062-1070.

Rabung, M., Altpeter, I., Dobmann, G., & Szielasko, K. (2012). Micro-Magnetic Evaluation of Micro-Residual Stresses of the IInd and IIIrd Orders. *Welding in the World*, 56(5-6), 29-34.

Rossini, N. S., Dassisti, M., Benyounis, K. Y., & Olabi, A. G. (2012). Methods of measuring residual stresses in components. *Materials & Design*, 35, 572-588.

Sigvant, M., & Mattiasson, K. (Agosto, 2005). FE-Simulation Of Hemming In The Automotive Industry. *AIP Conference Proceedings*, 778(1). doi: 10.1063/1.2011300

Sobolevski, E. G. (2007). *Residual Stress Analysis of Components with Real Geometries Using the Incremental Hole Drilling Technique and a Differential Evaluation Method*. Germany: Kassel university press GmbH.

Stewart, D. M., Stevens, K. J., & Kaiser, A. B. (2004). Magnetic Barkhausen noise analysis of stress in steel. *Current Applied Physics*, 4(2), 308-311.

Theiner, W., Höller, P. (1982). *Magnetic methods for stress detection*. HTM Supplement "residual stress and load voltages" (p.156-163). Muenchen: Hanser.

Thomas, J., Mohan, J., Kendrish, S., & Fix, R. M. (2009). Advanced Techniques for the Measure of Microstructure and Residual Stress in Components Subject to Rolling Fatigue. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, 2(1), 206-210.

Totten, G., Howes, M., & Inoue, T. (2005). *Handbook on residual stress*. ASM International, Materials Park: Ohio, USA

Webster, G. A., & Ezeilo, A. N. (2001). Residual stress distributions and their influence on fatigue lifetimes. *International Journal of Fatigue*, 23(2001), S375-S383.

Yelbay, H. I., Cam, I., & Gür, C. H. (2010). Non-destructive determination of residual stress state in steel weldments by Magnetic Barkhausen Noise technique. *NDT & E International*, 43(1), 29-33.