





FEM análisis de esfuerzos residuales acero inoxidable 316L MA con LSP

FEM analysis of residual stresses in 316L MA stainless steel with LSP

-  **Vielka Estibalis Cabrera Cuevas** es estudiante de doctorado del Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI) (vecabrera@posgrado.cidesi.edu.mx), Maestra en ciencia y tecnología en diseño y desarrollo de sistemas mecánicos.
-  **Carlos Rubio González** es director del Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI) (crubio@cidosi.edu.mx) (<https://orcid.org/0000-0002-4447-3788>), Doctor.
-  **Christian Félix Martínez** es ingeniero de proyectos del Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI) (christian.felix@cidosi.edu.mx) (<https://orcid.org/0000-0002-5497-7322>), Doctor.
-  **Santiago Flores García** es profesor de la Universidad Tecnológica de Querétaro (UTEQ) (santiago.flores@uteq.edu.mx) (<https://orcid.org/0000-0003-2364-2201>), Maestro en Ciencias.

Resumen: En el presente estudio se analiza el efecto del láser shock procesing (LSP) sobre los esfuerzos residuales en probetas de acero inoxidable 316L fabricadas por el proceso de manufactura aditiva láser cladding (LC). Para la fabricación de las probetas, se empleó onda continua (CW), para evaluar el efecto entre condiciones, ya que en el proceso se pueden alcanzar tasas de enfriamiento de 10 4 K/s. Aunque el proceso LC ofrece varias ventajas, el calor aportado durante el proceso puede generar esfuerzos residuales que afecten el comportamiento mecánico, principalmente la vida a la fatiga. El objetivo es analizar y comparar el efecto del LSP para las probetas onda continua CW con respecto a la simulación del software abaqus. De lo anterior, a las probetas, se les aplicó el tratamiento superficial LSP para reducir los esfuerzos residuales a tensión y mejorar el comportamiento mecánico. Se obtuvo -750 MPa esfuerzos de compresión con LSP en probetas físicas y en simulación abaqus aplicando 2500pul/cm² de densidad. En donde se infiere es en los parámetros de ajuste de modelo Johnson Cook que se reporta en la literatura para la simulación en abaqus para acero inoxidable 316L MA da un resultado de -350MPa en estado de relajación de esfuerzos simulado con LSP, esfuerzos de compresión favorables.

Palabras clave: MA) manufactura aditiva, (LC) láser cladding, esfuerzos residuales, (CW) onda continua, (FEM) elemento finito, Abaqus.

Cómo citar: Cabrera-Cuevas, V.E., Rubio-González, C., Flores-García, S. y Félix-Martínez, C. (2024). FEM análisis de esfuerzos residuales acero inoxidable 316L MA con LSP. *Tecnología, Ciencia y Estudios Organizacionales*, 6(12), pp. 59-67. <https://doi.org/10.56913/teceo.6.12.59-67>

Recepción: 30-09-2024
Aprobación: 23-10-2024

Abstract: In the present study, the effect of laser shock processing (LSP) on residual stresses in 316L stainless steel specimens manufactured by the laser cladding (LC) additive manufacturing process is analyzed. Continuous wave (CW) was used for the fabrication of the specimens to evaluate the effect under different conditions, as the process can achieve cooling rates of 10^4 K/s. Although the LC process offers several advantages, the heat input during the process can generate residual stresses that affect mechanical behavior, primarily fatigue life. The objective is to analyze and compare the effect of LSP on the CW specimens concerning the simulation in Abaqus software. To this end, LSP surface treatment was applied to the specimens to reduce tensile residual stresses and improve mechanical performance. Compression stresses of -750 MPa were obtained with LSP in physical specimens and in Abaqus simulations by applying a density of 2500 pulses/cm². It is inferred that the model parameters of Johnson-Cook reported in the literature for the simulation in Abaqus for 316L stainless steel yield a result of -350 MPa in the simulated stress relaxation state with LSP, showing favorable compression stresses.

Keywords: (MA) Additive Manufacturing, (LC) Laser Cladding, Residual Stresses, (CW) Continuous Wave, (FEM) Finite Element Method, Abaqus.

Introducción

El proceso de manufactura aditiva en laser cladding se utiliza para adherir metalúrgicamente al material a base de un producto polvo metálico. Se utiliza para producir revestimientos metalúrgicamente bien adheridos de mayor calidad y reducción de tiempo. Las principales aplicaciones del revestimiento por láser es la repartición y reacondicionamiento de componentes de alto valor, como herramientas, álabes de turbina, piezas de turbina de gas y motores de combustión interna (ASTM-F3413, 2022).

Dado que la tecnología ha avanzado rápidamente en manufactura aditiva, es esencial para las empresas adaptarse a estas nuevas tendencias y técnicas; sin embargo, una desventaja del revestimiento por láser es que el elevado aporte de calor provoca esfuerzos residuales de tensión, una disminución de micro dureza y tendrá un efecto perjudicial sobre las propiedades mecánicas y la vida a la fatiga de los componentes. Por lo tanto, el LSP es la mejor opción como método de posprocesamiento para mejorar las propiedades mecánicas (Luo, 2016)

De modo que el LSP en la mejora de propiedades mecánicas de componentes obtenidos mediante manufactura aditiva laser cladding con onda continua (CW), evaluar la aplicabilidad del LSP para mejora en esfuerzos residuales favorables en el acero inoxidable 316L. Por consiguiente, se desarrolla la siguiente hipótesis: Mejorará los esfuerzos residuales con morfología superficial de las muestras de elementos de acero inoxidable 316L fabricados mediante manufactura aditiva (LC) laser cladding con el uso (CW), con tratamiento superficial con láser LSP, en comparación con piezas LC fabricadas con (CW) sin tratamiento y tendrá la misma respuesta la simulación del LSP en Abaqus.

Marco teórico

El origen de los esfuerzos residuales de tensión es debido a la naturaleza de capa por capa del proceso de manufactura aditiva, la pieza procesada pasa por una historia térmica altamente compleja que incluye la fusión, remoldeo y recalentamiento del material. Los esfuerzos residuales de tensión dados por el resultado de la fabricación aditiva pueden ser, altamente no uniformes, tanto espacialmente como en dirección en construcción (Svetlizky, 2021).

Así mismo, la manufactura aditiva tiene varios parámetros de proceso que pueden ayudar a la mejora de impresión de piezas, o diferentes métodos, lo cuales nos ayuda a medir la calidad de impresión del material depositado, como es en el caso de onda continua que se mantiene encendido el láser constantemente dado a la potencia establecida del láser (ASTM-F3413, 2022).

Incluso, es de suma importancia comprender adecuadamente la influencia conocer los parámetros de proceso en el perfil de esfuerzos residuales térmicos dados por el láser. A pesar de un gran número de investigaciones paramétricas sobre perfiles de esfuerzos de tensión, aún queda mucho por entender, espacialmente en acero inoxidable 316L (Waqar, 2021).

Aunque la manufactura aditiva revoluciona actualmente, la forma en que se fabrican las piezas, las limitaciones inherentes al proceso, como la acumulación de esfuerzos de tensión y el aumento de contenido de porosidad, pueden inducir una disminución de la vida útil a la fatiga por las piezas producidas, aunque en este trabajo se enfoca más en la reducción y mejora de esfuerzos residuales de tensión, para ofrecer unos de esfuerzos favorables al proceso laser cladding. Una alternativa a este proceso es el tratamiento superficial por láser (LSP) la cual es una tecnología novedosa de procesamiento superficial con la cual se inducen esfuerzos residuales de compresión que mejoran las propiedades mecánicas. El LSP es un proceso en el que se utiliza un láser de alta potencia que emite un rayo concentrado de luz, este rayo se enfoca a través de un lente para conseguir una alta densidad de energía en un punto específico, este láser va dirigido a un espacio confinado dado por el agua que está fluyendo sobre la pieza que recibirá la densidad de pulsos (Lu, 2020).

En cierto modo, el control de los esfuerzos residuales en los componentes mecánicos en fabricación de manufactura aditiva ha sido un gran desempeño. Para mitigar este problema, es de gran importancia seleccionar adecuadamente los parámetros del proceso, la influencia de la potencia láser y las estrategias de escaneo en la distribución de esfuerzos residuales en acero inoxidable 316L, en mejorar la calidad de impresión se han realizado simulaciones por elementos finitos y verificaciones experimentales utilizando los mismos parámetros de proceso y geometría de la pieza para asegurar que los resultados sean comparables y puedan aportar información sobre el desafío del problema y control de esfuerzos residuales (Bian, 2020).

Agregando a lo anterior, un modelo de elemento finito (FEM) se puede construir para predecir la distribución de esfuerzos residuales de muestras depositadas por láser en acero inoxidable 316L y como su estado cambia debido al efecto del LSP, estas propiedades mecánicas caracterizadas experimentalmente, se puede obtener una respuesta de comparativa con una simulación de elemento finito, en este estudio nos enfocaremos al modelo de construcción en software Abaqus (Lu, 2020).

Metodología y desarrollo experimental

El láser de deposición fue fabricado en el centro de investigación CIDESI, en el laboratorio de tecnología de laser cladding, los parámetros son: potencia de laser 1200W, velocidad de 5mm/seg, spot 2.86mm, alimentación 12g/min, función de trabajo al 80%. Las probetas son fabricadas con una dimensión de 5X5cm y una altura de 2.5cm. Se aplico LSP con una dimensión de 2.5x2.5cm y una densidad de 2500pul/cm². En el laboratorio de tecnología de laser CIDESI que cuenta con un láser pulsado Quantaray 290-10H Q-switched Nd:YAG, para tratamiento LSP. Robot FANUC LR Mate 200iB Programación particular para cada tipo de probeta. Con una longitud de onda de 1064nm, energía de 1J y frecuencia de 10Hz. La composición química del polvo metálico de acero inoxidable 316L se observa en la Tabla 1.

Tabla 1
Composición química tipo 316L acero inoxidable

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
316L	0.03-0.5	0.6-1.0	2.00	-	-	16-18	10.00-14.00	2-3

El método del agujero ciego para la medición de esfuerzos residuales, es una técnica utilizada en la investigación y la ingeniería para evaluar esfuerzos residuales en materiales, se realiza un agujero cilíndrico en el material utilizando una broca de diámetro específico. Este agujero es generalmente de un tamaño controlado y se hace de manera mas precisa. Después de perforar se utilizan galgas extensiométricas colocadas alrededor del agujero para medir la deformación del material, en la Figura 1 se observa la galga para la medición de deformación, denominación CEA-06-062UL-120 en este análisis de estudio (ASTM-E837, 2002).

Forma como se calculan esfuerzos residuales a partir de la norma, parámetros de ecuaciones 1, 2, 3, mediciones de medida ε_1 , ε_2 , ε_3 :

$$P = \frac{\varepsilon_3 + \varepsilon_1}{2} \quad (1)$$

$$q = \frac{\varepsilon_3 - \varepsilon_1}{2} \quad (2)$$

$$t = \frac{\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2}{2} \quad (3)$$

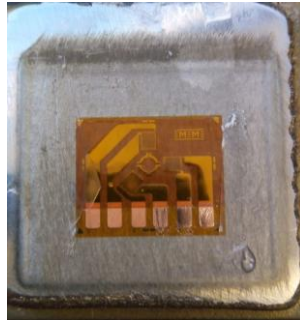
En el plano cartesiano esfuerzos σ_x , σ_y y τ_{xy} usando:

$$\sigma_x = P - Q \quad (4)$$

$$\sigma_y = P + Q \quad (5)$$

$$\tau_{xy} = T \quad (6)$$

Figura 1. Pieza fabricada de acero inoxidable 316L manufactura aditiva laser cladding con postproceso LSP a densidad 2500pul/cm², laboratorio CIDESI



Análisis de piezas FEM Abaqus.

En este apartado analizaremos la construcción de piezas hechas en un simulador en Abaqus, se siguió las propiedades mecánicas convencionales del acero inoxidable 316L, con alguna desviación del módulo de Young. Un ajuste utilizado es el modelo de Johnson Cook que se reporta en la literatura, un ajuste utilizado es el modelo de Johnson-Cook que se observa en la tabla 2 y los parámetros que se detalla en la tabla antes mencionada tomados de la literatura para el análisis del modelo. (M.A. Bevan, 2017)

Tabla 2

Jonhson Cook modelo de parámetro de construcción MA acero inoxidable 316L (M.A. Bevan, 2017)

Referencia	A	B	C	N
M1	305	11611	0.01	0.61
M3	301	1472	0.09	0.807
M5	514	514	0.042	0.533
Mejor ajuste	514	1472	0.01	0.61

Se dibujo una pieza de 5x5cm y 2.5cm de ancho, se dividió en varias secciones para poder aplicar la distribución de nodos y se le aplico condiciones de frontera como se observa en la Figura 2. Posteriormente se agregó los parámetros de la pieza de acero inoxidable 316L de manufactura aditiva dados por la tabla 1 de mejor ajuste para el desarrollo de la simulación y después se crearon los nodos cuadrados, en la parte donde se simula el LSP son más cerrados a una dimensión de 2.5X2.5cm como se observa en la pieza real de la Figura 1 y en la Figura 3 la división de nodos con la misma dimensión para la simulación, el tiempo de simulación y magnitud del pulso de presión LSP.

Figura 2. Diseño de pieza de 5x5x2.5 cm en software abaqus

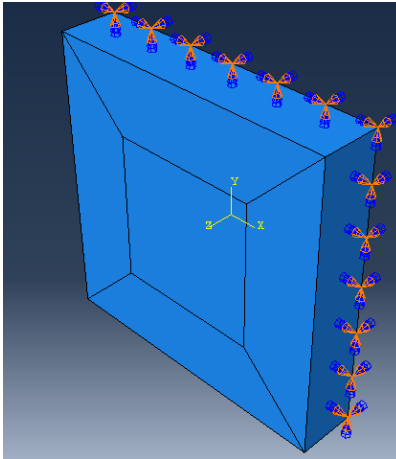


Figura 3. División de nodos más finos 2.5x2.5cm, cuadro en el centro para simulación de LSP en software Abaqus

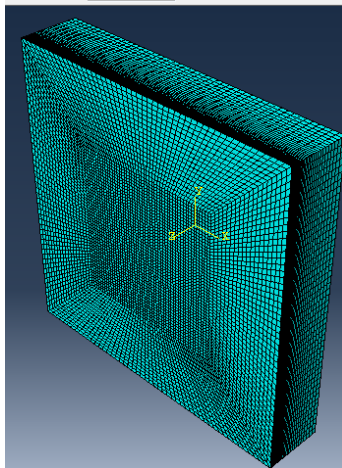
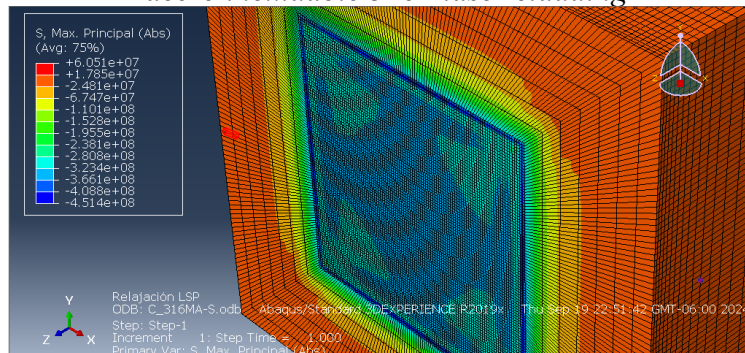


Figura 4. Simulación de LSP en el centro cuadro de 2.5x2.5cm parámetros acero inoxidable 316L laser cladding



Resultados

La idea de aplicar el método del agujero ciego con la galga extensiométrica en el espécimen fabricado de manufactura aditiva laser cladding, es que la perforación libera tensiones en el material circundante, los datos en las mediciones de deformación se utilizan para calcular los esfuerzos residuales. La comparativa de esfuerzos residuales sin LSP para onda continua se observa en la Figura 5. Se realizó comparativa de los esfuerzos de tensión modo CW en la región central 900MPa en dirección Sx y 800MPa en dirección Sy paralela al plano. Se observa una homogenización en esfuerzos residuales en ambas direcciones, aunque cabe aclarar que son esfuerzos de tensión; los cuales no favorecen las condiciones mecánicas de la pieza.

Figura 5. Distribución de esfuerzos residuales medida con la técnica del agujero ciego CW sin LSP, laboratorio CIDESI

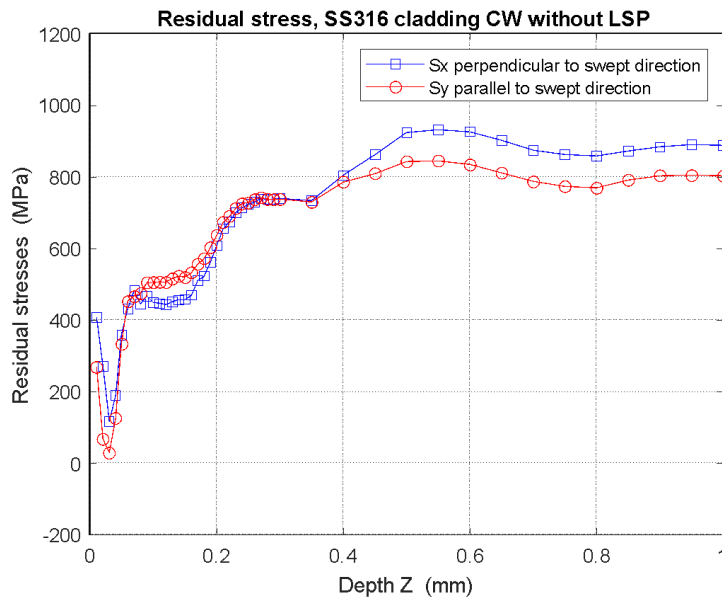
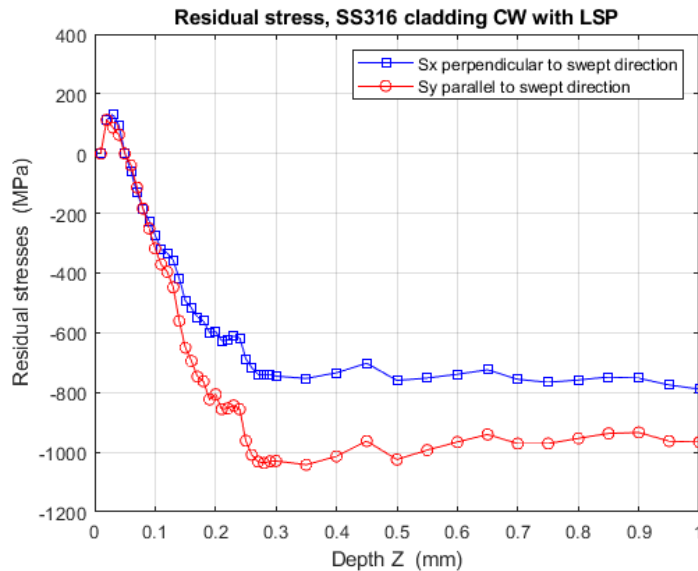


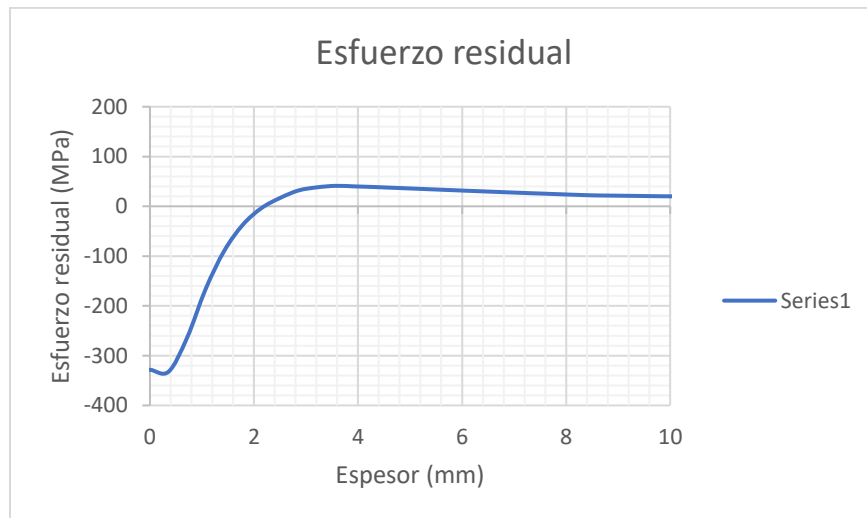
Figura 6. Distribución de esfuerzos residuales medida con la técnica del agujero ciego CW con LSP, laboratorio CIDESI



En el caso de la Figura 6, se realizó comparativa de los esfuerzos de residuales manufacturado en CW (onda continua) con LSP mostrando esfuerzos de compresión de -1000MPa en dirección paralela; en dirección perpendicular entre -780MPa.

Los resultados en Abaqus se obtuvieron con relajación de esfuerzos residuales de compresión de -350 MPa dando una mejora por la aplicación del LSP a una densidad 2500pul/cm² de la pieza simulada y obteniendo algo valido y semejante a lo que se obtuvo de forma experimental.

Figura 7. Análisis de esfuerzos residuales pieza simulada con parámetros Jonhson Cook acero inoxidable 316L con LSP, 2500pul/cm² dado por software Abaqus



Discusión

Por lo que se observa en los datos anteriormente dados en la Figura 5, los esfuerzos residuales con el método del agujero ciego sin LSP se obtuvieron esfuerzos de tensión en dirección S_x 900MPa y en S_y 800MPa, en contraste con la Figura 6 análisis de esfuerzos residuales con LSP, se valora una mejora de esfuerzos residuales de compresión de -780 MPa en dirección perpendicular. De forma similar, como se puede esperar en el simulador dado por el Abaqus utilizando un ajuste, es el modelo de Johnson Cook que se reporta en la literatura, de igual forma son esfuerzos residuales de compresión favorables de -350MPa. En resumen, se observa una mejora de esfuerzos de compresión favorables al aplicar LSP a piezas fabricadas con MA de acero inoxidable 316L con láser cladding.

Aunque el modelo prescrito no se ajusta perfectamente a la respuesta de nuestro material acero inoxidable 316L manufactura aditiva laser cladding; este resultado en la simulación, menor de magnitud, comparado con el resultado experimental, puede deberse a distintos factores: 1) Los parámetros del modelo de Johnson-Cook utilizado para simular el comportamiento dinámico del material, 2) El tipo de elementos y mallado de la geometría en la simulación, 3) El tiempo de simulación y magnitud del pulso de presión LSP.

Referencias

- A. S. Wu, D. B. (2014). An Experimental Investigation into Additive Manufacturing-Induced Residual Stresses in 316L Stainless Steel. *Metall Mater Trans A* 45, 6260–6270.
- D. Hu, N. G. (2022). Microscale residual stresses in additively manufactured stainless steel: Computational simulation. *ELSEVIER, J. Mech. Phys. Solids* 161, 104822.
- Lu, Y. S. (2020). The effects of laser peening on laser additive manufactured 316L steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107, 5, 2239- 2249.
- M.A. Bevan, A. A.-D. (2017). Mechanical Properties and Behavior of Additive Manufactured Stainless Steel 316L. *The Minerals, Metals & Materials Society*, 1-8.
- M.E. Stenderl, L. L. (2019). Simulations and Experimental Validation of Residual Stresses in Additively-Manufactured Components. *Sandia National Laboratories Livermore, CA 94550*, 1-4.
- P. Bian, J. S. (2020). Influence of laser power and scanning strategy on residual stress distribution in additively manufactured 316L steel. *ELSEVIER, Optics & Laser Technology, Volume* 132.
- S. Santa-aho, M. K. (2021). Additive Manufactured 316L Stainless-Steel Samples: Microstructure, Residual Stress and Corrosion Characteristics after Post-Processing. *Metals, MDPI*, 1-15.
- S. Waqar, K. G. (2021). FEM analysis of thermal and residual stress profile in selective laser melting of 316L stainless Steel. *ELSEVIER, Journal of Manufacturing Processes* 66, 81-100.
- Y. Yang, Y. G. (2019). Additive/subtractive hybrid manufacturing of 316L stainless steel powder: Densification, microhardness and residual stress. *Springer Journal of Mechanical Science and Technology* 33 (12), 5797-5807.