



Efecto de la geometría del espécimen sobre los esfuerzos residuales y vida por fatiga de placas tratadas superficialmente con láser.

The effect of specimen geometry on residual stress and fatigue life of plates treated with laser shock peening.

-  **Santiago Flores-García**, Universidad Tecnológica de Querétaro (UTEQ) / Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI) (México) (santiago.flores@uteq.edu.mx), (<https://orcid.org/0000-0003-2364-2201>), Máster.
-  **Carlos Rubio-González**, Tecnológico de Monterrey, Escuela de Ingeniería y Ciencias, Campus Querétaro (México) (<https://orcid.org/0000-0002-4447-3788>), Doctor.

Resumen: El presente estudio analiza la influencia del tratamiento superficial con láser (LSP) sobre la vida por fatiga en especímenes del acero inoxidable dúplex 2205, con regiones curvas de geometría. El propósito de este trabajo fue examinar, mediante un modelo de simulación de elementos finitos, la efectividad del LSP cuando se aplica en especímenes con distintos niveles de curvatura (radio de la zona central o muesca), empleando tres diferentes formas de aplicación: Aplicación del LSP en regiones curvas (sobre la zona de la muesca), en regiones planas (sobre el centro de las caras frontal y posterior) y como combinación de las anteriores (zonas de muesca más regiones planas). Los especímenes poseen de dos muecas centrales con radios de curvatura 6, 9, 12, 18 y 20 mm y espesores, de 2, 4, 6 y 8 mm. Se utilizó ABAQUS/ Explicit para determinar la distribución de los esfuerzos residuales en el centro de cada espécimen, aplicando el pulso de presión LSP, combinado con una carga estática para fatiga. La vida por fatiga, aplicada en una relación de carga de $R=0.1$, fue estimada mediante el software fe-safe, empleando los resultados de esfuerzo residual de las simulaciones de elemento finito. Se encontró que existe relación entre la magnitud de esfuerzo residual y la vida por fatiga de cada espécimen, para los tres casos analizados de aplicación de LSP. Como resultado, se logró mejorar en un máximo de 1418 % la vida por fatiga en aquellos que se aplicó el LSP sobre las regiones curvas, 906% cuando se aplica en las caras planas y 1038% cuando se aplica en ambas regiones curvas y planas. Para todos los casos analizados de radios de curvatura, espesor de probeta y forma de aplicación de LSP, siempre existe mejora del tratamiento LSP, en comparación con especímenes sin el tratamiento laser.

Palabras clave: Tratamiento superficial con láser, vida por fatiga, esfuerzos residuales, acero inoxidable dúplex 2205. Simulación por elementos finitos.

Cómo citar: Flores-García, S. y Rubio-González, C. (2024). Efecto de la geometría del espécimen sobre los esfuerzos residuales y vida por fatiga de placas tratadas superficialmente con láser. *Tecnología, Ciencia y Estudios Organizacionales*, 6(12), pp. 257-275. <https://doi.org/10.56913/teceo.6.12.257-275>

Recepción: 30-09-24
Aprobación: 23-10-24



Abstract: In the present work, the influence of laser shock peening (LSP) on the fatigue lives of 2205 duplex stainless Steel with curved geometry regions was analyzed. The purpose of this work was to examine the effectiveness of LSP applied on different specimen curvature levels (notch on the center of the specimen) with a FEM simulation. Three different configurations of the application of the LSP were used: LSP on curved regions (notch region), LSP on flat surfaces (front and rear specimen faces) and on the four central specimen faces. The specimens have 2 central notches with 6, 9, 12, 18 & 20 mm curvature radius and 2, 4, 6 and 8 mm thickness. ABAQUS/Explicit was used to determine the residual stress distribution on each central specimen Surface, after the application of LSP, combined with a static load for fatigue analysis. The fatigue load, applied with a load relation of $R=0.1$, was calculated with the fe-safe software, using the residual stress field results from FEA analysis. For the three LSP application cases, it was found a relationship between the residual stress magnitude and fatigue lives of each specimen. For each LSP load case, a maximum improvement of 1418%, 906% and 1038% of the fatigue life for the LSPed curvature region. LSPed flat central zone and LSPed four central faces was found, respectively. For every curvature radii, specimen thickness and LSP load case, there is always an improvement of the fatigue lives due to LSP treatment, compared with non-LSP fatigue specimen lives.

Keywords: Laser shock peening, fatigue life, residual stress, 2205 duplex stainless Steel, FEM simulation.

Introducción

El tratamiento superficial con láser (LSP, laser shock peening por sus siglas en inglés), es un método de tratamiento superficial que mejora la resistencia a la fatiga de componentes metálicos mecánicos. El LSP genera esfuerzos residuales de compresión en la región cercana a la superficie, en donde las grietas pueden crecer y propagarse debido a cargas cíclicas, lo que puede ocasionar la falla por fatiga del componente (Ding & Ye, 2006). El punto clave del LSP es generar ondas de presión de magnitud elevada, en el orden de los GPa, por medio de un pulso laser de alta energía (generalmente desde 1 GW/cm^2) y un medio confinante transparente, para deformar plásticamente el material en la superficie (Zhang et al., 2013), (Yadav et al., 2017). Típicamente, este tratamiento se aplica en forma de un tren de pulsos, es decir, impactos láser consecutivos, uno tras otro, a manera de zigzag, o bien, de forma aleatoria, de modo que se abarque completamente el área a tratar sobre el espécimen (Correa, 2015).

Se ha demostrado ampliamente, de manera experimental, el beneficio del tratamiento superficial sobre las propiedades a fatiga en distintos tipos de materiales metálicos. Peyre et al. (1996) demostró que el LSP incrementa la vida por fatiga en tres distintas aleaciones de aluminio, en comparación con otros procesos de tratamiento superficial como el shot peening (SP). Rubio-González et al. (2011) encontró que el tratamiento superficial con láser reduce la tasa de crecimiento de grietas por fatiga, en una aleación de aluminio y un acero inoxidable dúplex. Las características geométricas del componente también influyen en el comportamiento a la fatiga, cuando se aplica el tratamiento LSP. Vázquez-Jiménez et al. (2019) observó el comportamiento a la fatiga del acero inoxidable dúplex 2205 con dos diferentes geometrías, encontrando que muestras con filetes poseen menor vida por fatiga que elementos con muescas centrales. En el artículo de Granados et al. (2018) se menciona que se descubrió que el espesor del espécimen, en un acero inoxidable dúplex, influye notablemente en el desempeño a la fatiga cuando se aplica LSP, logrando una mejora de hasta 300%.

También se han llevado a cabo distintas investigaciones en simulación para comprender y predecir los efectos del tratamiento superficial con láser, con diferentes materiales y configuraciones geométricas. En el trabajo de Peyre et al. (2007), se realizó el cálculo por medio de elementos finitos de esfuerzos residuales de una geometría 2D rectangular de acero inoxidable 316L, encontrando que el proceso LSP genera esfuerzos residuales de compresión, que están en función

de la magnitud del pulso de presión y energía utilizados. Achintha et al. (2011) observó que para una aleación de Ti-6-Al, el LSP aplicado sobre una región plana de una geometría 3D rectangular, produce una capa de esfuerzos residuales de compresión de 2 mm por debajo de la superficie. Ocaña et al. (2015) desarrolló un modelo de elementos finitos de geometría 3D rectangular y espesor delgado, para una aleación de aluminio, determinando la distribución de esfuerzos residuales y deformación plástica a lo largo del espesor. En la investigación de Correa et al. (2015), se construyó un modelo de elementos finitos en 3D, con geometría plana y de aleación de aluminio Al2024-T351, con la finalidad de encontrar la distribución de esfuerzos residuales a causa de distintas estrategias en la aplicación de los pulsos de presión láser.

En la literatura, existen pocas referencias en las cuales se analice el efecto de las características geométricas sobre la vida por fatiga cuando se ha aplicado LSP y en menor medida aquellas donde se realice este tratamiento sobre superficies curvas. Im et al. (2012) estudió, con modelo de elementos finitos, el efecto de la aplicación del LSP en los bordes de una sección 3D de geometría curva. Vasu et al. (2013) ha investigado de forma numérica el efecto de la forma en la curvatura sobre los esfuerzos residuales, al aplicar LSP en regiones cóncavas y convexas. Los mismos autores han analizado en simulación la vida por fatiga de un elemento con regiones cóncavas (Vasu & Grandhi, 2015), no obstante, características geométricas como el radio de curvatura y espesor del componente mecánico permanecieron constantes dentro del estudio.

El propósito de esta investigación es evaluar el efecto del tratamiento superficial con láser en el desempeño a la fatiga del acero inoxidable dúplex 2205 (DSS2205), en especímenes de dos muescas planos, cuando el LSP se aplica en distintas regiones de su geometría, mediante una simulación computacional de elementos finitos. La simulación de elementos finitos, de la aplicación del pulso de presión debida al LSP, se llevó a cabo mediante el software ABAQUS/Explicit y ABAQUS/Standard.

Se analizan tres casos de aplicación del LSP en este estudio: Efecto del radio de curvatura al aplicar LSP sobre las superficies curvas de la muesca, efecto del espesor al aplicar LSP sobre las caras planas y efecto del espesor aplicando LSP sobre las superficies de la muesca más las caras planas. Los especímenes modelados poseen una geometría base, donde los parámetros son el radio de curvatura de la muesca, espesor del espécimen y el área de la zona de tratamiento. La estimación del número de ciclos a la falla de los especímenes se realizó en el software fe-Safe, utilizando los datos de esfuerzo residual, una vez aplicado el tratamiento LSP.

Método

Análisis de elementos finitos de LSP

Modelado de LSP

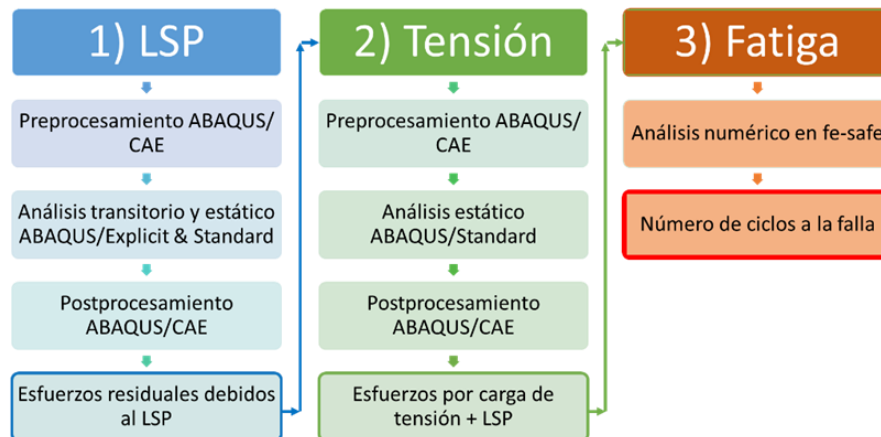
El tratamiento superficial con láser fue simulado mediante el software de análisis de elemento finito ABAQUS/Explicit. Este análisis estima la distribución de los esfuerzos residuales en los especímenes mecánicos, después de una combinación de análisis transitorio y de relajación, en el que se utiliza la presión generada por el plasma del impacto laser en sobre la superficie del material, durante el proceso físico LSP. Este tipo de análisis ha sido utilizado en investigaciones recientes de simulación de este proceso (Zhou et al., 2019), (Ivetic et al., 2012). Para esta investigación, se consideró el material acero inoxidable dúplex 2205 (DSS2205), con módulo de elasticidad de 190 GPa, esfuerzo de cedencia de 520 MPa y resistencia última de 710 MPa (Rubio-González et al., 2020).

La simulación del LSP se realiza en dos etapas: Primero, se efectúa un paso de carga (análisis transitorio), en el que se aplica un pulso de presión, de magnitud elevada y duración corta, sobre un área definida, de tal forma que se simule el efecto del impacto de los pulsos láser en el comportamiento mecánico del espécimen. Posteriormente, se realiza un paso de relajación (análisis estático), empleando los resultados del análisis transitorio y conservando las condiciones de frontera. En el diagrama de la Figura 1 se muestra el esquema del proceso de simulación LSP y estimación del número de ciclos a la falla. Se crearon distintos modelos para la simulación, dependiendo de su radio de curvatura de muesca R y espesor t . Los radios de curvatura utilizados fueron $R = 6, 9, 12, 18$ y 20 mm. Los espesores empleados fueron $t = 2, 4, 6$ y 8 mm. La Figura 2 c) muestra un modelo de elemento finito con 12 mm de radio de curvatura de muesca, el cual posee elementos individuales C3D8R hexaédricos lineales, de ocho nodos e integración reducida. El número de elementos para cada radio de curvatura fue de $168454, 179584, 176256, 166496$ y 158464 para $R=6, 9, 12, 18$ y 20 mm respectivamente, con espesor de 8 mm. Por su parte, el número de elementos de las probetas para cada espesor fue de $188356, 180960, 192960$ y 176256 , para $t=2, 4, 6$ y 8 mm respectivamente, para $R=12$ mm.

Cada uno de los especímenes fue sujeto a una condición de frontera fija sobre el lado opuesto al de aplicación de LSP, durante los análisis transitorio y estático. Esta condición de frontera se refiere a las condiciones reales a las que se somete cada probeta en la etapa de experimentación. Para ahorrar costo computacional, en vez de simular la presión de cada pulso circular de manera individual, se realizó la simulación de un pulso que abarcara el área total de aplicación del tratamiento láser. Esta condición de frontera ha sido empleada con éxito en investigaciones recientes (Achintha et al., 2014).

La aplicación del tratamiento LSP en las superficies curvas se muestra en la Figura 3. Se observa que en las superficies curvas de la muesca se coloca el pulso de presión en un análisis transitorio. Posteriormente, se efectúa el análisis estático sin carga y al final, junto con los esfuerzos obtenidos en los dos pasos anteriores, se realiza el análisis estático con carga de tensión, para obtener un esfuerzo en la zona central. En las Figura 4 y Figura 5 se muestra el proceso de simulación para las probetas para los casos de aplicación del LSP en las caras planas y en las cuatro caras centrales, respectivamente.

Figura 1. Proceso de simulación del tratamiento LSP y estimación del número de ciclos a la falla.



Las condiciones de carga en el tratamiento superficial con láser dependen de cada uno de los modelos de análisis. Dos distintos tipos de carga del tratamiento LSP fueron propuestos: Carga en las regiones con curvatura (zonas con muesca) y carga en las caras frontal y posterior (zonas planas). Para la carga LSP aplicada en las regiones curvas, se propuso un área de 10×8 mm, para todos los radios de curvatura. En cambio, para la carga LSP aplicada en las caras planas, se utilizó un área de 25×25 mm, aplicada al centro de cada espécimen.

Para las áreas de tratamiento mencionadas, se utilizó un único modelo de pulso de presión. En la Tabla 1 se muestra la evolución en el tiempo del pulso de presión, en el cual se alcanza una presión máxima de 4.38 GPa (Peyre, et al, 2007). La presión máxima P_{peak} fue calculada empleando un valor densidad de energía del láser igual a 7.5 GW/cm², mediante la ecuación [1]:

$$P_{peak} = 1.6\sqrt{I} \quad (1)$$

Donde I es la densidad de energía del láser. Para simular el comportamiento dinámico del material, durante la aplicación de la carga, se utilizó el modelo de Johnson-Cook (Vázquez et al., 2019; Vasu & Grandhi, 2013; Vasu et al., 2015), cuyas constantes se describen en la Tabla 2:

$$\sigma = (A + B\epsilon^n) \left[1 + C \ln \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^m \right] \quad (2)$$

Tabla 1.

Distribución de presión del pulso de plasma LSP.

Tiempo(ns)	0	3	5	7	9	12	15	19	26	33	59	80	120	178	200
Presión (GPa)	0	0.63	1.19	2.46	4.06	4.38	4.30	3.58	2.31	1.75	1.11	0.87	0.47	0.15	0

Tabla 2.

Parámetros del modelo de Johnson-Cook para el acero inoxidable 2205.

A (MPa)	B (MPa)	C	n	m	$\dot{\epsilon}_0$
520	840.5	0.0124	0.1904	0.965	1

Figura 2. Geometría del espécimen y aplicación del pulso de presión LSP, a) Aplicación sobre las zonas curvas, vistas frontal y lateral, b) Aplicación sobre las caras planas, vista frontal. Radio de curvatura R ; espesor t , c) Mallado del espécimen.

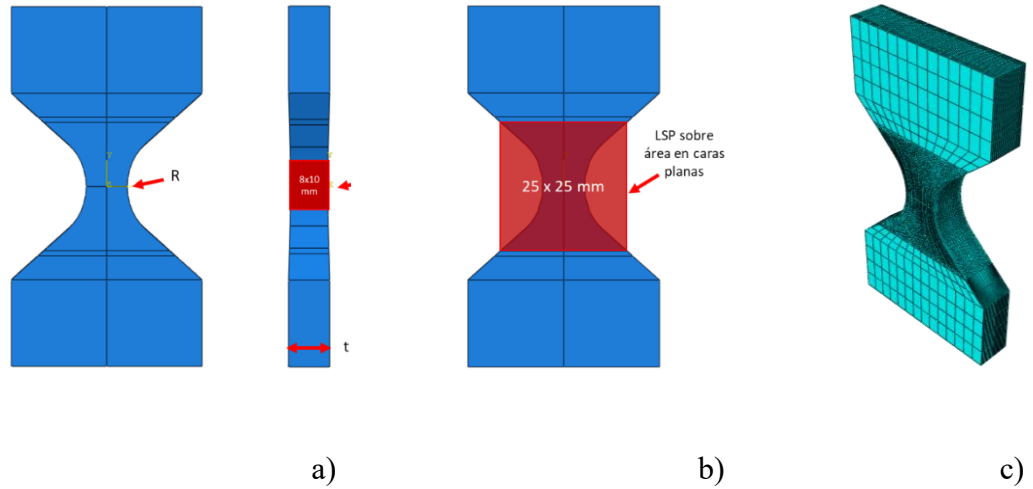


Figura 3. Proceso de simulación LSP, aplicado en las zonas curvas. $R=12$ mm, $t=8$ mm.

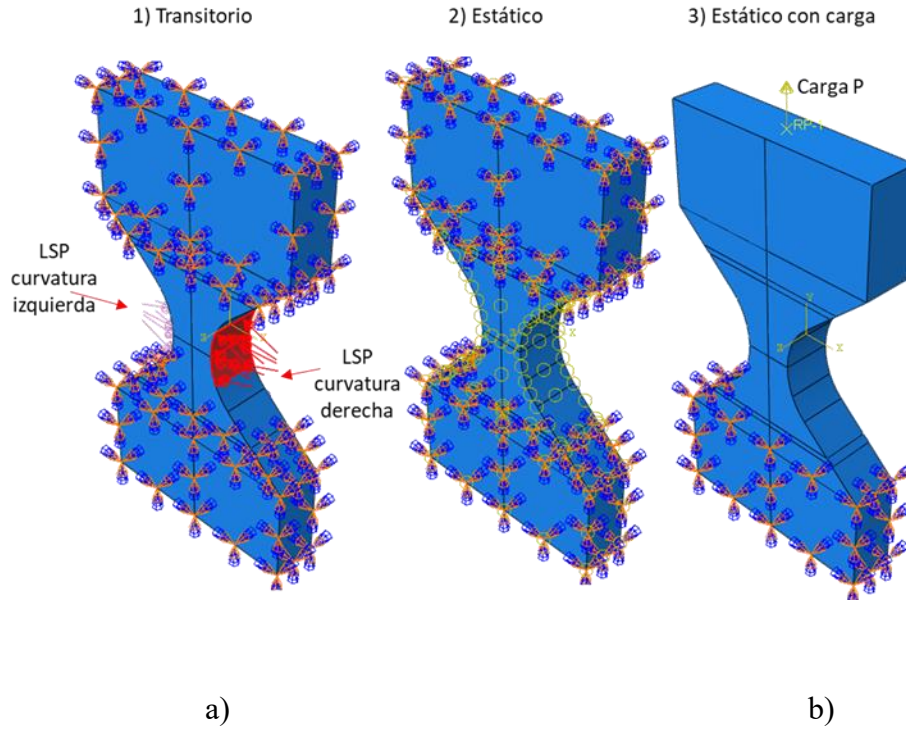


Figura 4. Proceso de simulación LSP, aplicado en las caras planas. $R=12\text{ mm}$, $t=2\text{ mm}$.

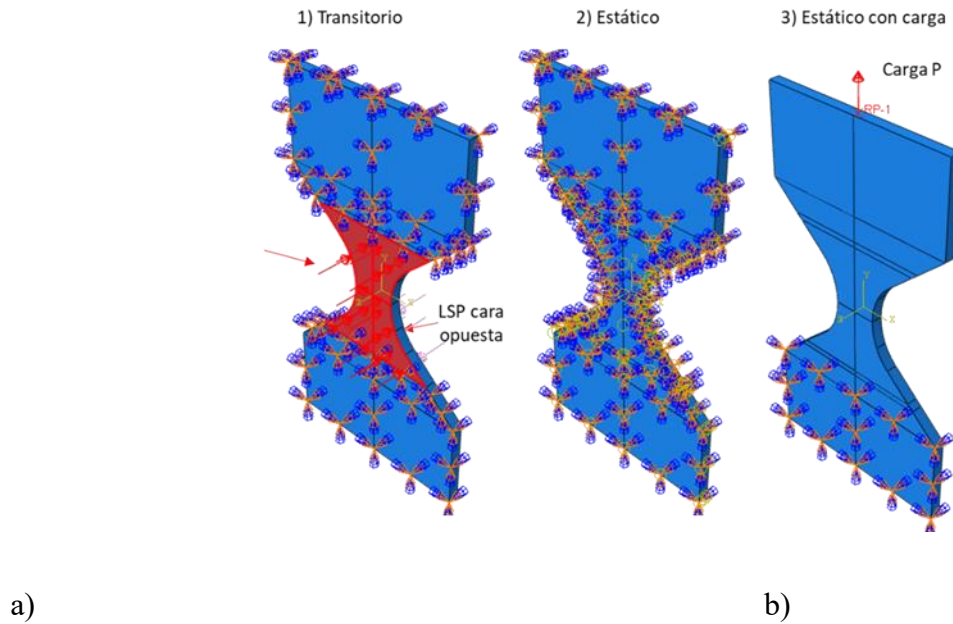
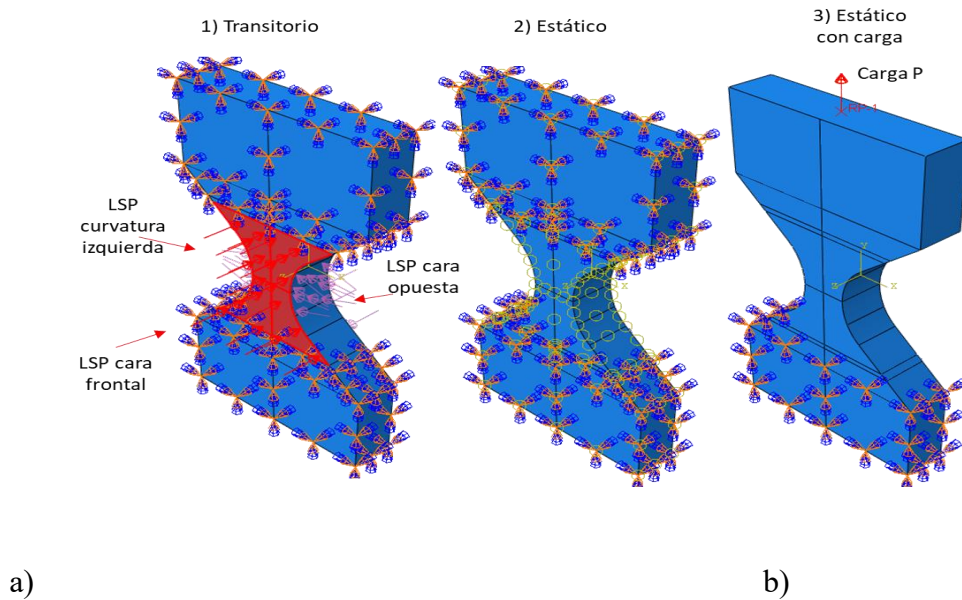


Figura 5. Proceso de simulación LSP, aplicado en las cuatro caras centrales. $R=12\text{ mm}$, $t=8\text{ mm}$



Análisis de fatiga

El tratamiento superficial con láser fue simulado mediante el software de análisis de elemento finito ABAQUS/Explicit.

Se realizó un análisis de fatiga mediante el software fe-safe, para estimar el número de ciclos a la falla en cada espécimen, utilizando el campo de esfuerzos residuales de los especímenes con y sin LSP, resultado de las simulaciones de elemento finito en ABAQUS/CAE. El análisis de fatiga se dividió en dos: Sin LSP (esfuerzos resultantes de la carga de tensión estática) y casos con LSP (esfuerzos resultantes de la carga de tensión estática más esfuerzos residuales provocados por el pulso de presión del impacto láser). Se compararon ambos resultados para observar la diferencia en el número de ciclos a la falla, debido al tratamiento láser. Para los casos sin LSP se empleó el algoritmo del criterio falla de esfuerzo principal, con la corrección de esfuerzo de Morrow (Normal Stress: Morrow). Por su parte, para los casos con LSP, se utilizó el algoritmo del criterio de falla de deformación cortante máxima (Maximum Shear Strain: Morrow).

Para calcular la vida por fatiga cuando se aplica una carga constante, mediante los criterios de falla de esfuerzo principal (3) y deformación cortante máxima (4), se utiliza la ecuación de Coffin-Manson modificada para cada caso (Spadaro et al., 2017).

$$\sigma_{n,max} \frac{\Delta \varepsilon_1}{2} = \frac{\sigma_f'^2}{E} (2N_f)^{2b} + \sigma_f' \varepsilon_f' (2N_f)^{b+c} \quad (3)$$

$$\frac{\Delta \gamma_{max}}{2} = \frac{\Delta \varepsilon_n}{2} = 1.65 \frac{(\sigma_f' - \sigma_{n,mean})}{E} (2N_f)^b + 1.75 \varepsilon_f' (2N_f)^c \quad (4)$$

Donde $\Delta \gamma_{max}$ es la deformación cortante máxima y $\Delta \varepsilon_n$ es la amplitud de la deformación normal, σ_f' y ε_f' los coeficientes de resistencia y ductilidad en fatiga, N_f el número de ciclos a la falla, E el módulo de elasticidad y b y c los exponentes de resistencia y ductilidad a la fatiga, respectivamente. Los parámetros desconocidos de las ecuaciones (3) y (4), se determinaron mediante dos métodos. Para el caso de la ecuación 3, se utilizó el método de Mitchell (Mitchells Method) y para la ecuación 4, se utilizó el método de endurecimiento de aceros (Hardness Method Steels) (Kim et al., 2002). Los valores para cada método mencionado se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3.

Parámetros de los modelos método de Mitchell y método de dureza de aceros, para el cálculo de los parámetros en las ecuaciones del número de ciclos a la falla, de la aleación DSS2205.

Parámetro	Mitchell's Method (MM)	Hardenss Method Steels (HMS)	Valor MM	Valor HMS
σ'_f	$\sigma_u + 345$	$4.25(HB) + 225$	1065	1282.72
ε'_f	ε_f	$\frac{1}{E} [0.32(HB)^2 - 487(HB) + 191000]$	0.5954	0.471
b	$-\frac{1}{6} \log \log \left[\frac{2(\sigma_u + 345)}{\sigma_u} \right]$	-0.09	-0.0785	-0.09
c	-0.58	-0.56	-0.58	-0.56
K'	$\sigma'_f / (\varepsilon'_f)^{b/c}$	$\sigma'_f / (\varepsilon'_f)^{b/c}$	1194	1447
n'	b/c	b/c	0.2155	0.1607

Resultados

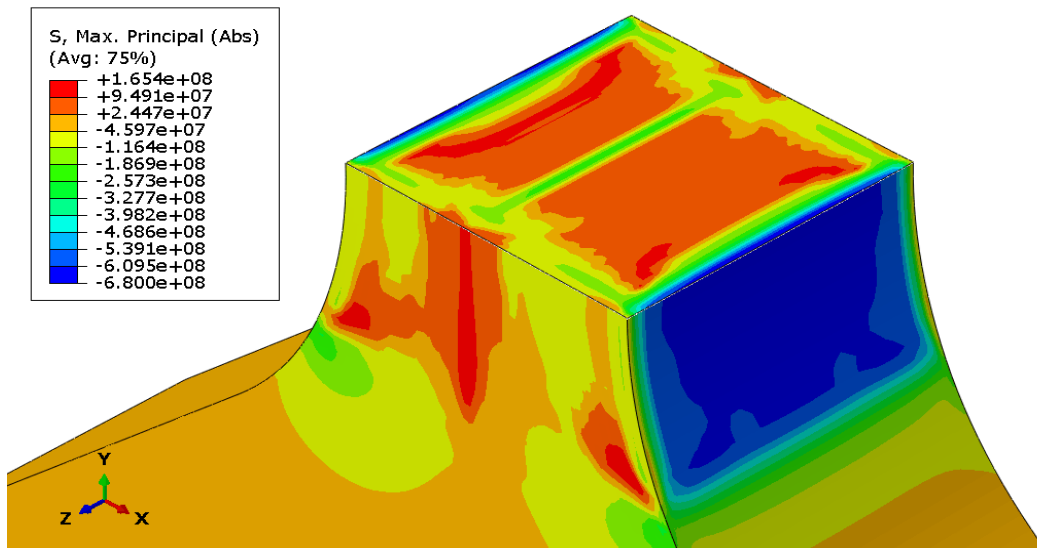
LSP aplicado en la región curva

En la Figura 6 se muestra el campo de esfuerzos residuales en la sección transversal del espécimen con R=12 mm. Es posible observar que en las regiones cercanas a la superficie se generan esfuerzos residuales de compresión. Conforme se avanza sobre el ancho de la probeta, es decir, desde una región curva hacia otra, es posible notar que los esfuerzos de compresión disminuyen y cambian a esfuerzos de tensión en la parte central del espécimen.

En la gráfica de la Figura 7, se muestran los perfiles de esfuerzos residuales sobre el plano central de los especímenes de t=8 mm y diferentes radios de curvatura, desde una muesca hacia otra. El perfil de esfuerzos residuales para todos los casos del radio de muesca es similar. No obstante, la magnitud del esfuerzo residual en la región cercana a la superficie es distinta. Se observa que con

radios de curvatura pequeños se alcanzan niveles mayores de esfuerzo residual de compresión. De esta manera, con $R=6$ mm, se obtuvo un esfuerzo residual de compresión de hasta -689 MPa, mientras que, con un radio de 20 mm, se registró un esfuerzo de -629 MPa. En esta misma gráfica de la Figura 7, es posible observar que la distribución en los esfuerzos residuales es simétrica, con una ligera discontinuidad alrededor de 4.5 mm de -200 MPa.

Figura 6. Campo de esfuerzos residuales en un espécimen al aplicar LSP sobre las regiones curvas; $R=12$ mm, $t=8$ mm. Vista de sección transversal.



En la gráfica de la Figura 8 se muestra el efecto del radio de curvatura sobre la vida por fatiga en los especímenes donde se aplicó LSP sobre la zona de curvatura, contra aquellos en los que no fue aplicado. El número de ciclos a la falla para todos los casos es mayor en los especímenes con LSP. Se presentaron porcentajes de mejora de 10456% , 3746% , 1418% , 540% y 431% para los especímenes de $R=6$, 9 , 12 , 18 y 20 mm, respectivamente. La Figura 9 representa la distribución del número de ciclos a la falla para el mismo espécimen sin y con LSP. Como se aprecia, el inicio de la falla para el caso sin LSP, ocurre en el centro de la muesca, mientras que en el espécimen con LSP la zona más débil está en la parte superior de la muesca, trasladando la falla fuera del punto de concentración de esfuerzos original.

Figura 7. Perfiles de esfuerzo residual para diferentes radios de curvatura de muesca de espécimen. Medición a lo largo de la línea central del plano medio; $t=8\text{mm}$.

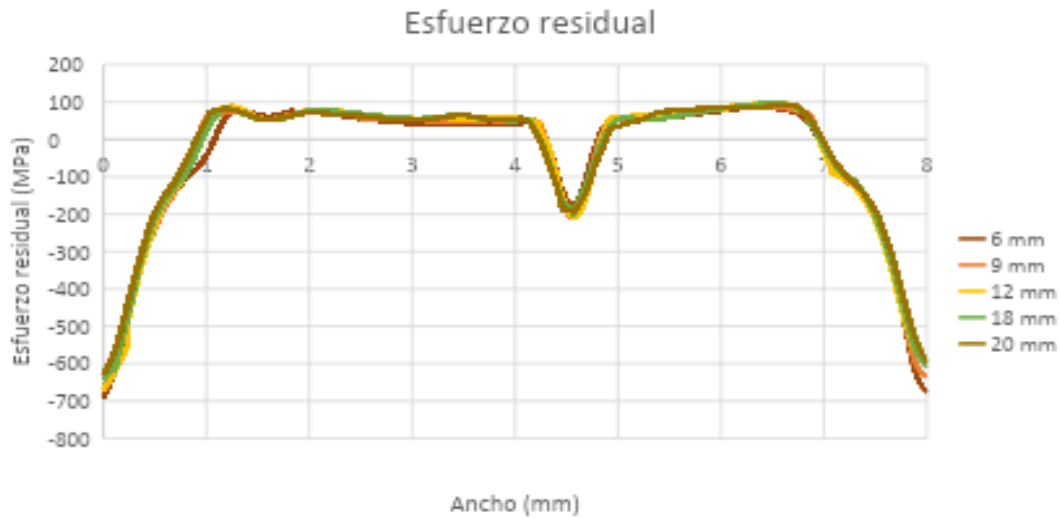


Figura 8. Efecto del radio de curvatura en la vida por fatiga, $t=8\text{ mm}$. LSP aplicado sobre regiones curvas.

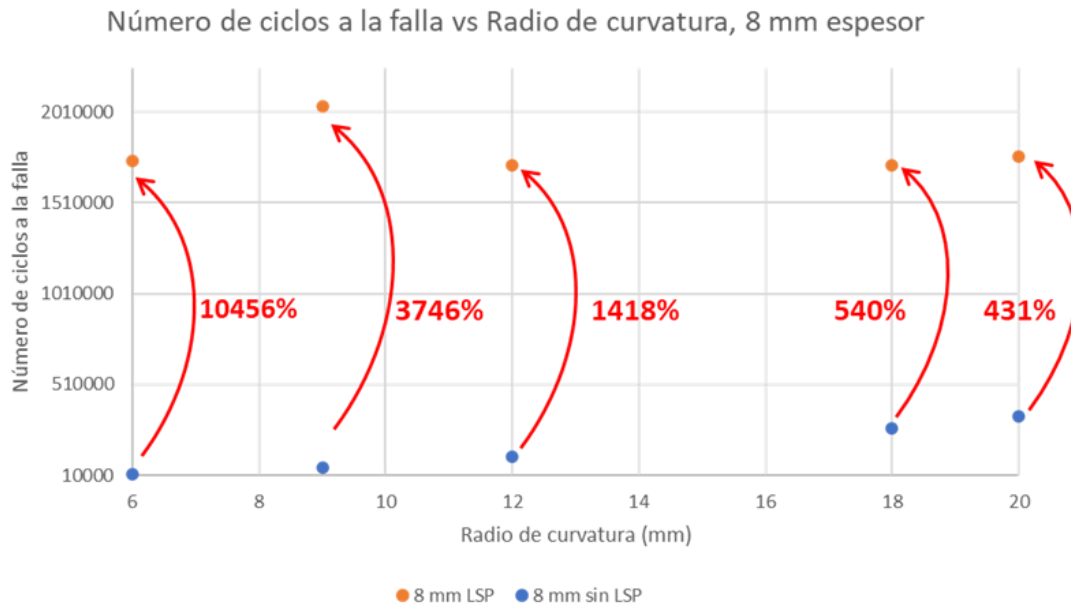
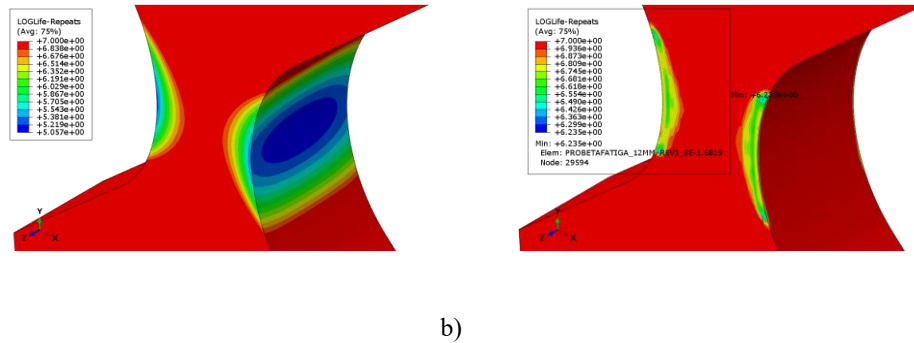


Figura 9. Geometría del espécimen y aplicación del pulso de presión LSP, a) Aplicación sobre las zonas curvas. Radio de curvatura, R ; espesor, t . Vistas frontal y lateral. b) Aplicación sobre las caras planas. Vista frontal.



LSP aplicado en las caras planas

El análisis en la aplicación del LSP sobre las caras planas (caras frontal y posterior), fue realizado seleccionando un solo radio de curvatura, $R=12$ mm y $t=2, 4, 6$ y 8 mm. La distribución del campo de esfuerzos residuales, para un espécimen de $t=2$ mm, se aprecia en la Figura 10. Existen esfuerzos residuales de compresión cerca de la superficie en donde se aplicó el pulso de presión LSP y en el centro del espécimen se generan esfuerzos residuales de tensión. Esto se aprecia de mejor manera al realizar una gráfica del perfil de esfuerzos a través de la sección transversal de cada espécimen, como se aprecia en la Figura 11. Los valores de esfuerzo residual de tensión son de 100 MPa, a 3 mm de profundidad. Puede notarse que los valores alcanzados de esfuerzo de compresión son menores comparados con los alcanzados en la aplicación del LSP en las regiones curvas. Se obtienen esfuerzos de compresión de hasta 414 MPa, para $t=6$ mm.

Figura 10. Campo de esfuerzos residuales en un espécimen al aplicar LSP sobre las caras frontal y posterior; $R=12$ mm, $t=2$ mm. Vista de sección transversal.

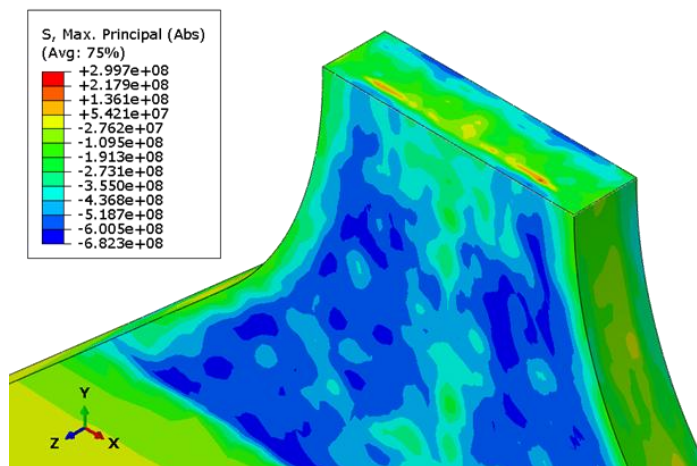
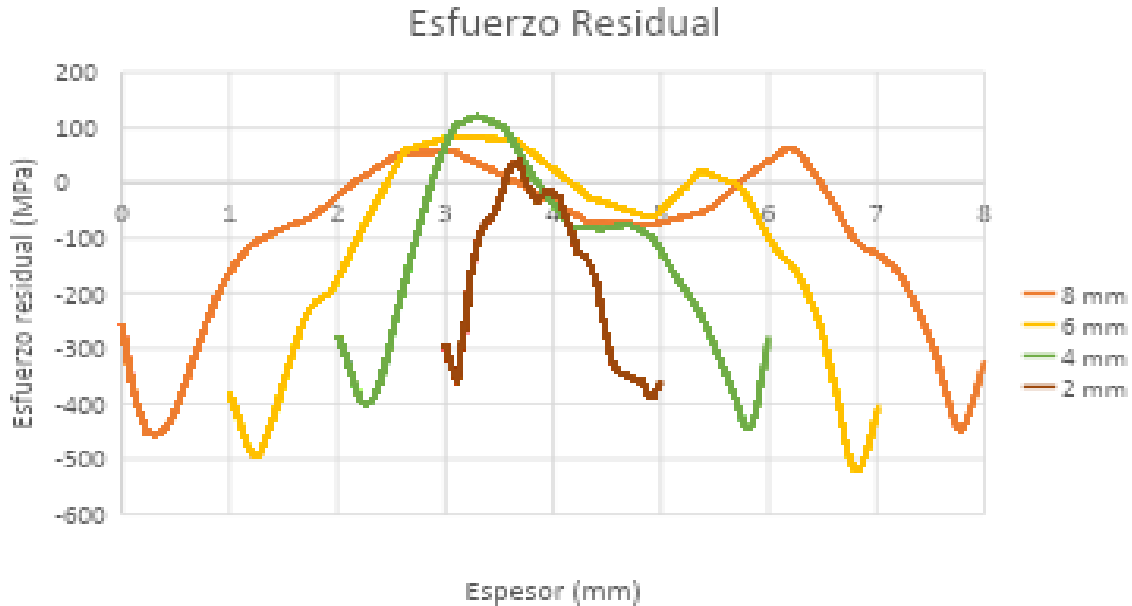


Figura 11. Perfiles de esfuerzo residual para diferentes radios de curvatura de muesca de espécimen. Medición a lo largo de la línea central del plano medio; $t=8\text{mm}$.



En la Figura 12 se muestran los resultados de la vida por fatiga para los especímenes de $R=12\text{ mm}$ y distintos espesores. El número de ciclos a la falla, cuando se aplica LSP, es mayor para todos los casos de espesor, comparados contra el caso sin LSP. Conforme se incrementa el espesor, la vida a la fatiga cuando se aplica el LSP incrementa. Los porcentajes de mejora en la vida por fatiga van desde 253% para $t=2\text{ mm}$, hasta 906% para $t=8\text{ mm}$. La distribución en el número de ciclos a la falla del espécimen de $t=2\text{ mm}$, sin y con LSP, se aprecia en la Figura 13. El inicio de las grietas por fatiga para el caso del elemento sin LSP se ubica en la parte central de la muesca, en cambio, para el espécimen con LSP, el inicio de la falla se encuentra por debajo de la superficie en la cara frontal. Esta zona más débil, para el caso con LSP, corresponde con la región con esfuerzos residuales de tensión, cercana al centro del espécimen.

Figura 12. Efecto del espesor en la vida por fatiga, $R=12$ mm. LSP aplicado sobre las caras planas frontal y posterior

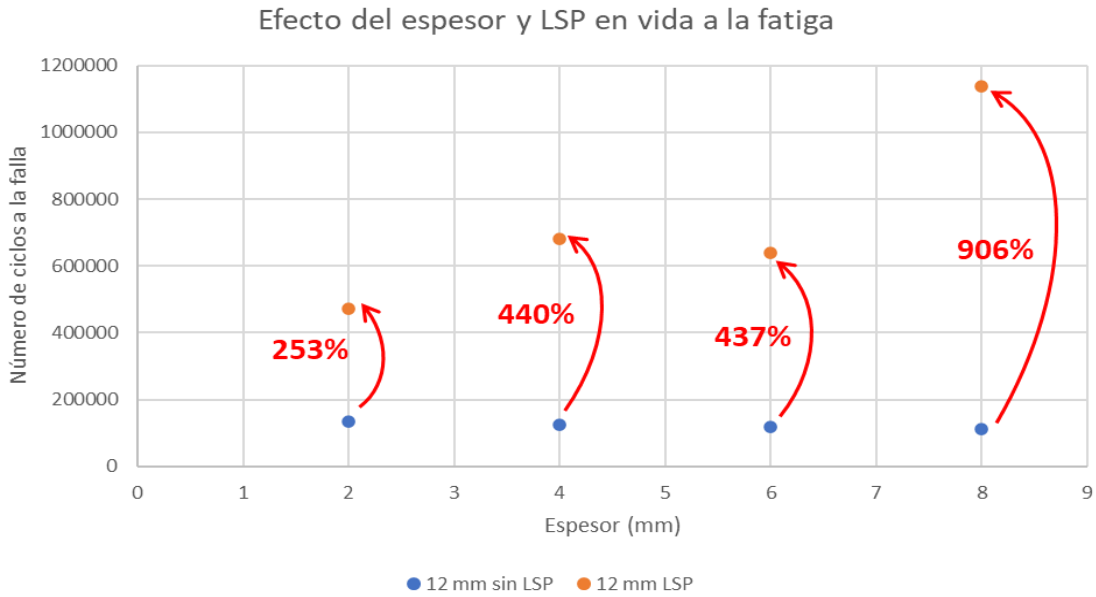
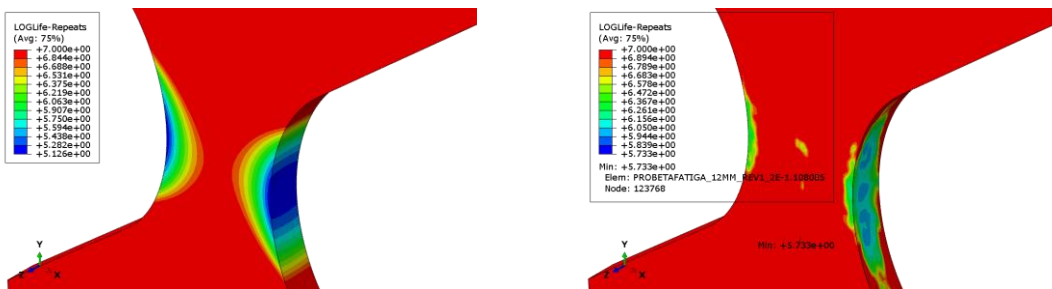


Figura 13. Geometría del espécimen y aplicación del pulso de presión LSP, a) Aplicación sobre las zonas curvas. Radio de curvatura, R ; espesor, t . Vistas frontal y lateral. b) Aplicación sobre las caras planas. Vista frontal.



a)

b)

LSP aplicado en las cuatro caras centrales del espécimen

La aplicación del LSP en las cuatro caras centrales (zonas curvas más caras frontal y posterior) se realizó sobre los especímenes de $t=8$ mm y $R=6, 9, 12, 18$ y 20 mm. Los resultados de esfuerzo residual, como se aprecia en la Figura 14, son semejantes a aquellos donde se empleó el LSP sobre las regiones curvas. El campo de esfuerzos residuales posee esfuerzos de compresión en las cuatro caras, a diferencia del caso con LSP en las zonas curvas que posee únicamente esfuerzos de compresión sobre las caras de la muesca. Al realizar una medición del perfil de esfuerzos, desde la cara frontal hacia la posterior, como la mostrada en la gráfica de la Figura 15, es posible notar que las distribuciones a lo largo del espesor para todos los casos del radio de muesca mantienen un comportamiento muy similar, teniendo una variación notable en el valor del esfuerzo de compresión en la superficie y a los 2 y 6 mm de profundidad. Para este caso de LSP sobre las cuatro caras, se llega a alcanzar un esfuerzo de compresión máximo de 412 MPa, para el espécimen de $R=18$ mm.

Figura 14. Campo de esfuerzos residuales en un espécimen al aplicar LSP sobre las cuatro caras centrales. $R=12$ mm, $t=8$ mm. Vista de sección transversal.

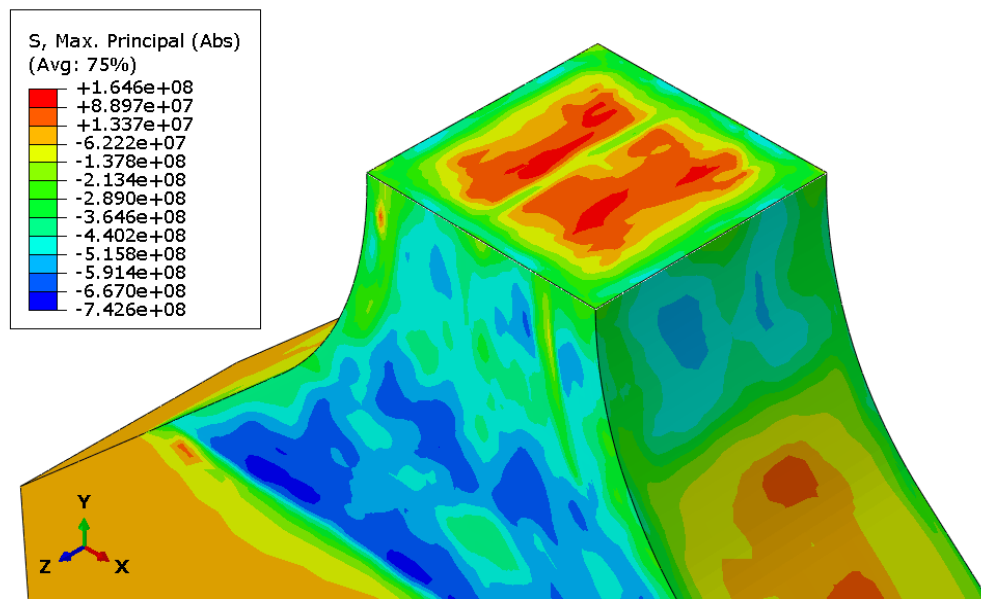
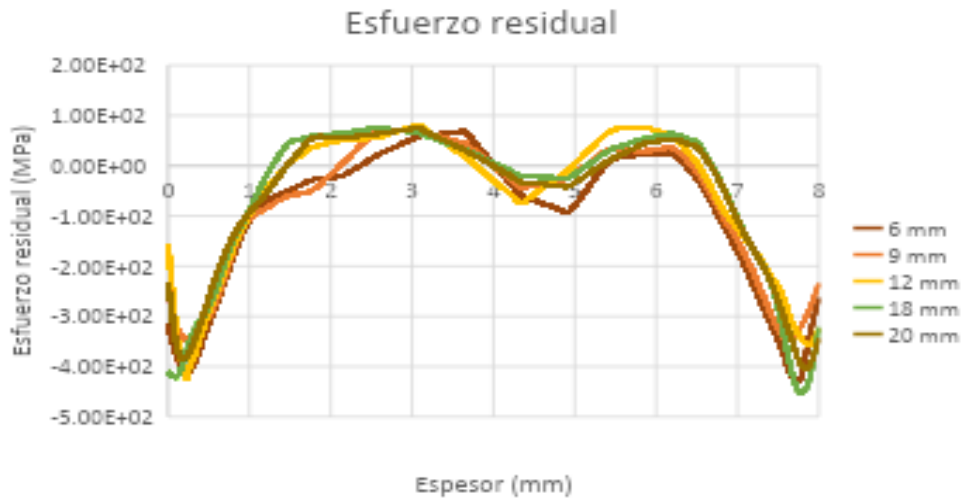


Figura 15. Perfiles de esfuerzo residual para diferentes radios de curvatura de muesca de espécimen. Medición a lo largo de la línea central del plano medio; $t=8\text{mm}$.



En la Figura 16 se observan los resultados de la vida por fatiga para los especímenes de $t=8\text{mm}$ y distintos valores de R . Existe una mejora en la vida por fatiga desde 211% para $R=20\text{ mm}$ hasta 3819% para $R=6\text{ mm}$. En la distribución del número de ciclos a la falla, mostrada en la Fig 17, el inicio de la falla se localiza en el centro de la zona curva para ambos casos sin y con LSP. Esta ubicación de la zona más débil se debe que los esfuerzos residuales de compresión generados no son suficientes para desplazar el inicio de falla fuera del concentrador de esfuerzos. Este resultado difiere de la ubicación del inicio de falla observado en la aplicación del LSP sobre las regiones curvas.

Figura 16. Efecto del espesor en la vida por fatiga, $R=8\text{ mm}$. LSP aplicado sobre las caras planas frontal y posterior.

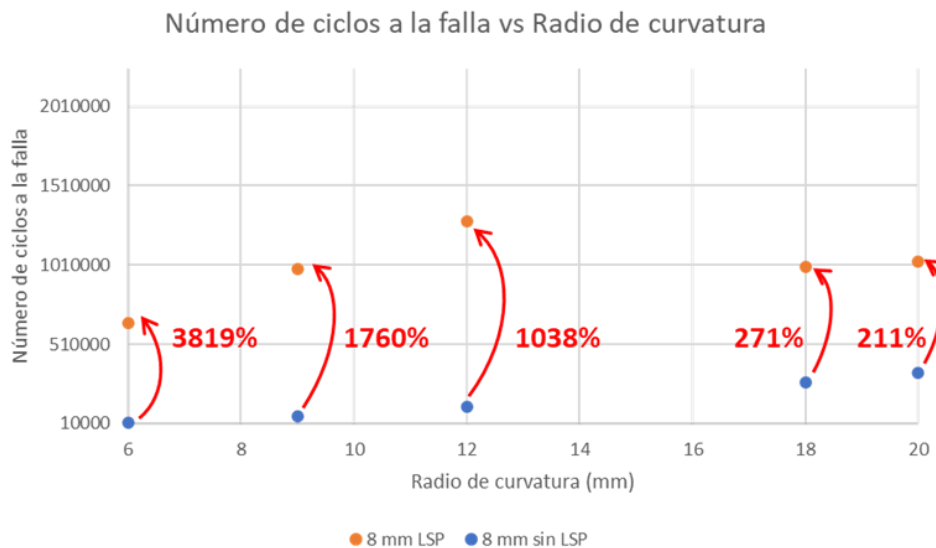
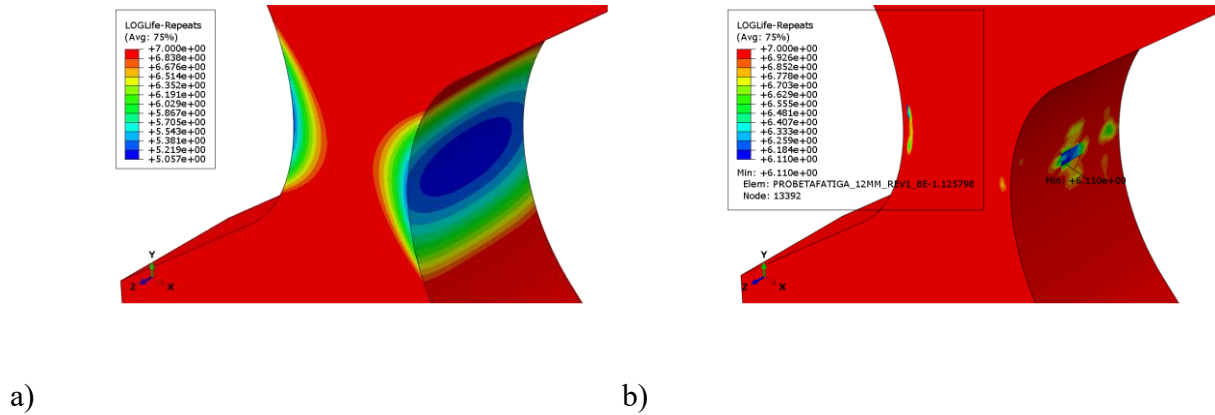


Figura 17. Geometría del espécimen y aplicación del pulso de presión LSP, a) Aplicación sobre las zonas curvas. Radio de curvatura, R ; espesor, t . Vistas frontal y lateral. b) Aplicación sobre las caras planas. Vista frontal.



Discusión

El efecto del tratamiento superficial con láser, aplicado en diferentes regiones de la geometría de componentes con dos muescas y distintos espesores de acero DSS2205 fue investigado. Se utilizó una simulación computacional de elementos finitos, más un análisis de predicción de vida a la fatiga. Tres propuestas fueron evaluadas en la aplicación del tratamiento LSP: Aplicación sobre las zonas curvas, sobre las caras planas y aplicación en las cuatro caras centrales, como una combinación de los dos anteriores.

Se encontró que existe un incremento significativo en la vida por fatiga de los especímenes simulados con tratamiento láser, siendo mayor para los tres casos de aplicación de LSP analizados, comparados con los especímenes a fatiga sin tratamiento. Cada caso particular posee distintos niveles de mejora en el número de ciclos a la falla. Los elementos tratados con LSP únicamente en la zona de la muesca son los que presentan el mayor porcentaje de mejora. Si se toma un espécimen con características geométricas, $R=12$ mm y $t=8$ mm, se observó un 1418%. Para el caso donde se empleó LSP en las caras frontal y posterior, únicamente se logró alcanzar un máximo de mejora del 906%. En cambio, cuando se utilizó el tratamiento láser en las cuatro caras de un espécimen, se logró un porcentaje de mejora máximo del 1038%.

Para los casos analizados en la aplicación LSP, la extensión del inicio de grietas por fatiga guarda una relación directa con el radio de curvatura investigado. La mejora por el LSP es mayor cuando el radio de curvatura es menor, cuando el tratamiento se aplica en las caras curvas y en las cuatro caras centrales. Caso contrario con la aplicación en las caras frontal y posterior (con $R=12$ mm, $t=2$ mm), donde a menor radio de curvatura, menor porcentaje de mejora en el número de ciclos a la falla.

La magnitud del esfuerzo residual de compresión alcanzado se relaciona directamente con el número de ciclos a la falla y el porcentaje de mejora de vida por fatiga al emplear el tratamiento láser. El análisis de esfuerzos en ABAQUS CAE muestra que la aplicación de LSP únicamente

sobre las zonas con curvatura, el esfuerzo residual de compresión alcanza un valor máximo de -689 MPa. El campo de esfuerzos alcanzado en estas regiones es de compresión, hasta una profundidad de 1 mm, de manera similar con el caso de aplicación LSP en las cuatro caras, aunque en este último caso con una magnitud menor, de -412 MPa. Cuando el LSP se efectúa sobre las caras planas, existe una región por debajo de la superficie con esfuerzos residuales de tensión, que resultan perjudiciales en la vida por fatiga y por ello la vida por fatiga resulta en el menor porcentaje de mejora para este tipo de aplicación.

Referencias

- Ding, K., & Ye, L. (2006). *Laser shock peening: Performance and process simulation*. Woodhead Publishing.
- Zhang, Y., Luo, K., & Lu, J. (2013). *Laser shock processing of FCC metals*. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-33112-0>
- Yadav, M., Jinoop, A., Danduk, C., & Subbu, S. (2017). Laser shock processing: Process physics, parameters, and applications. *Materials Today: Proceedings*, 4(8), 7921–7930. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.07.127>
- Correa, C., Peral, D., Porro, J. A., Díaz, M., Ruiz de Lara, L., García-Beltrán, A., & Ocaña, J. L. (2015). Random-type scanning patterns in laser shock peening without absorbing coating in 2024-T351 Al alloy: A solution to reduce residual stress anisotropy. *Optics & Laser Technology*, 73, 179–187. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2015.04.017>
- Peyre, P., Fabbro, R., Merrien, P., & Lieurade, H. (1996). Laser shock processing of aluminium alloys: Application to high cycle fatigue behaviour. *Materials Science and Engineering: A*, 210(1-2), 102–113. [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(95\)10084-9](https://doi.org/10.1016/0921-5093(95)10084-9)
- Rubio-González, C., Ocaña, J. L., Gomez-Rosas, G., Molpeceres, C., Paredes, M., Banderas, A., & Morales, M. (2004). Effect of laser shock processing on fatigue crack growth and fracture toughness of 6061-T6 aluminum alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 386(1-2), 291–295. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.07.031>
- Rubio-González, C., Felix-Martinez, C., Gomez-Rosas, G., Ocaña, J. L., Morales, M., & Porro, J. A. (2011). Effect of laser shock processing on fatigue crack growth of duplex stainless steel. *Materials Science and Engineering: A*, 528(3), 914–919. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.09.066>
- Vázquez Jiménez, C. A., Granados Alejo, V., Rubio González, C., Gómez Rosas, G., & Llamas Zamorano, S. (2019). Fatigue life behavior of laser shock peened duplex stainless steel with different samples geometry. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019, Article 8013679. <https://doi.org/10.1155/2019/8013679>
- Granados-Alejo, V., Rubio-González, C., Vázquez-Jiménez, C. A., Banderas, J. A., & Gómez-Rosas, G. (2018). Influence of specimen thickness on the fatigue behavior of notched steel plates subjected to laser shock peening. *Optics & Laser Technology*, 101, 531–544. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.11.050>
- Peyre, P., Chaieb, I., & Braham, C. (2007). FEM calculation of residual stresses induced by laser shock processing in stainless steels. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 15(2), 205–221. <https://doi.org/10.1088/0965-0393/15/2/005>

- Achintha, M., & Nowell, D. (2011). Eigenstrain modelling of residual stresses generated by laser shock peening. *Journal of Materials Processing Technology*, 211(6), 1091–1101. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.12.016>
- Ocaña, J. L., Correa, C., García-Beltrán, A., Porro, J. A., Díaz, M., Ruiz-de-Lara, L., & Peral, D. (2015). Laser shock processing of thin Al2024-T351 plates for induction of through-thickness compressive residual stress fields. *Journal of Materials Processing Technology*, 223, 8–15. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.03.024>
- Correa, C., Ruiz de Lara, L., Díaz, M., Porro, J. A., García-Beltrán, A., & Ocaña, J. L. (2015). Influence of pulse sequence and edge material effect on fatigue life of Al2024-T351 specimens treated by laser shock processing. *International Journal of Fatigue*, 70, 196–204. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2014.09.011>
- Im, J., Grandhi, R. V., & Ro, Y. (2012). Residual stress behaviors induced by laser peening along the edge of curved models. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 26(12), 3943–3952. <https://doi.org/10.1007/s12206-012-1023-4>
- Vasu, A., & Grandhi, R. (2013). Effects of curved geometry on residual stress in laser peening. *Surface and Coatings Technology*, 218, 71–79. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.12.019>
- Vasu, A., Gobal, K., & Grandhi, R. (2015). A computational methodology for determining the optimum re-peening schedule to increase the fatigue life of laser peened aircraft components. *International Journal of Fatigue*, 70, 395–405. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2014.08.017>
- Zhou, W., Ren, X., Yang, Y., Tong, Z., & Larson, E. A. (2019). Finite element analysis of laser shock peening induced near-surface deformation in engineering metals. *Optics & Laser Technology*, 119, 105608. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.105608>
- Ivetic, G., Meneghin, I., Troiani, E., Molinari, G., Ocaña, J., Morales, M., & Lausi, A. (2012). Fatigue in laser shock peened open-hole thin aluminium specimens. *Materials Science and Engineering: A*, 534, 573–579. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.11.081>
- Rubio-González, C., Ruiz, A., Granados-Alejo, V., Banderas, J. A., & Vázquez-Becerra, C. (2020). Improvement of fatigue resistance and fracture toughness of thermally aged duplex stainless steel by laser shock peening. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 29(1), 53–65. <https://doi.org/10.1007/s11665-019-04319-9>
- Achintha, M., Nowell, D., Fufari, D., Sackett, E. E., & Bache, M. R. (2014). Fatigue behaviour of geometric features subjected to laser shock peening: Experiments and modelling. *International Journal of Fatigue*, 62, 171–179. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2013.04.020>
- Kim, K. S., Chen, X., Han, C., & Lee, H. W. (2002). Estimation methods for fatigue properties of steels under axial and torsional loading. *International Journal of Fatigue*, 24(7), 783–793. [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(01\)00207-0](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(01)00207-0)
- Spadaro, L., Gomez-Rosas, G., Rubio-González, C., Bolmaro, R., Chavez-Chavez, A., & Hereñú, S. (2017). Fatigue behavior of superferritic stainless steel laser shock treated without protective coating. *Optics & Laser Technology*, 93, 208–215. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.02.006>