

Estudio computacional de la capa endurecida por múltiples pasos de temple láser en componentes cilíndricos.



Computational study of the hardened layer by multiple steps of laser tempering in cylindrical components.

Milton Israel Quinga Morales.¹, Paul Alejandro Montufar Paz.² & Santiago Alejandro López Ortiz.³ & Lenin Santiago Orozco Cantos.⁴

Recibido: 28-02-2019 / Revisado: 28-02-2019 / Aceptado: 26-03-2019/ Publicado: 05-04-2019

Abstract.

DOI: <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v3i2.475>

The thermal treatment of superficial hardening by laser, contributes heat in a specific area, which allows that the interior of the piece stays cold and conducts the conduction of heat towards the interior of the piece, very high cooling speeds are reached, leaving to one side the need to use a tempering medium or coolants. In cylindrical pieces of great length it is necessary to make multiple steps of the laser spot to cover a certain work area, this advance process generates overlapping trajectories that form a non-uniform hardened layer, analyzing this principle and the factors that intervene in the tempering process, a strategy was developed that uses concepts of properties of carbon steels, temperature diagrams, time and transformation, continuous cooling curves, to understand the tempering phenomenon, and provide the necessary input data to the software, and solve each one of the cases of a previously determined design of experiments, the optimal values of this study are shown from the analysis of the design of experiments, and a special contribution to determine the degree of uniformity of the resulting martensite layer is the ternary factor diagram.

¹Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Chimborazo Ecuador, milton.quinga@esPOCH.edu.ec

²Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Chimborazo Ecuador, paul.montufar@esPOCH.edu.ec

³Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Chimborazo Ecuador, sa_lopez@esPOCH.edu.ec

⁴Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Chimborazo Ecuador, lsorozco@esPOCH.edu.ec

Keywords: Homogenization of tempered surfaces, Martensite, Multiple Steps of laser, Laser Temple, Thermal treatment.

Resumen.

El tratamiento térmico de endurecimiento superficial por láser aporta calor en un área específica, lo cual permite que el interior de la pieza se mantenga frío y propicie la conducción de calor hacia el interior de la pieza, se alcanzan velocidades de enfriamiento muy elevadas, dejando a un lado la necesidad de utilizar un medio de temple o líquidos refrigerantes. En piezas cilíndricas de gran longitud es necesario realizar pasos múltiples del spot láser para cubrir una determinada área de trabajo, este proceso de avance genera trayectorias traslapadas que forman una capa endurecida no uniforme, analizando este principio y los factores que intervienen en el proceso de temple, se desarrolló una estrategia que emplea conceptos de propiedades de los aceros al carbono, diagramas de temperatura, tiempo y transformación, curvas de enfriamiento continuo, para comprender el fenómeno de temple, y aportar los datos de entrada necesarios al software, obteniendo como resultado cada uno de los casos de un diseño de experimentos previamente determinado, los valores óptimos de este estudio se muestran en el análisis del diseño de experimentos, y se genera un aporte especial para determinar el grado de uniformidad de la capa de martensita resultando el diagrama ternario de factores.

Palabras Clave: Homogeneización de superficies templadas, Martensita, Pasos Múltiples de láser, Temple láser, Tratamiento térmico

Introducción.

Los procesos para endurecimiento superficial basados en tecnologías láser, como el temple, revenido, reducción de esfuerzos, etc. cada vez se consolidan más dentro de las líneas de producción en la industria automotriz, debido a que el efecto térmico se realiza en zonas muy específicas y localizadas de los elementos manufacturados.

Si se compara el temple por láser con otros procesos más tradicionales para tratamientos superficiales, como el endurecimiento por inducción o por flama, es posible obtener una zona tratada muy localizada sobre superficies complejas en 3D con mínimas tensiones residuales, sin que sea necesario un proceso final de rectificado o pulido. Además, el interés de este proceso radica en la posibilidad de integrar una fuente láser muy versátil directamente dentro de la cadena de producción, sin la necesidad de un medio de temple adicional y con la posibilidad de producir sobre un mismo material dos microestructuras muy diferentes, un núcleo blando y con una capa superficial endurecida (S. Martínez, E. Ukar, A. Lamikiz, 2010)

El tratamiento térmico involucra varios procesos de calentamiento y enfriamiento para efectuar cambios microestructurales en un material, con el propósito de modificar las propiedades mecánicas finales de un componente, la reducción y optimización de procesos en la industria manufacturera representa un ahorro de energía, tiempo y recursos, por esta razón el procedimiento usado para el endurecimiento superficial ha cambiado a lo largo de la historia, siempre de la mano del desarrollo de nuevas tecnologías, en la tabla 1 se resume los principales procesos empleados hasta la actualidad con sus respectivas ventajas y desventajas.

Tabla 1. Comparación de los procesos empleados para endurecimiento superficial.

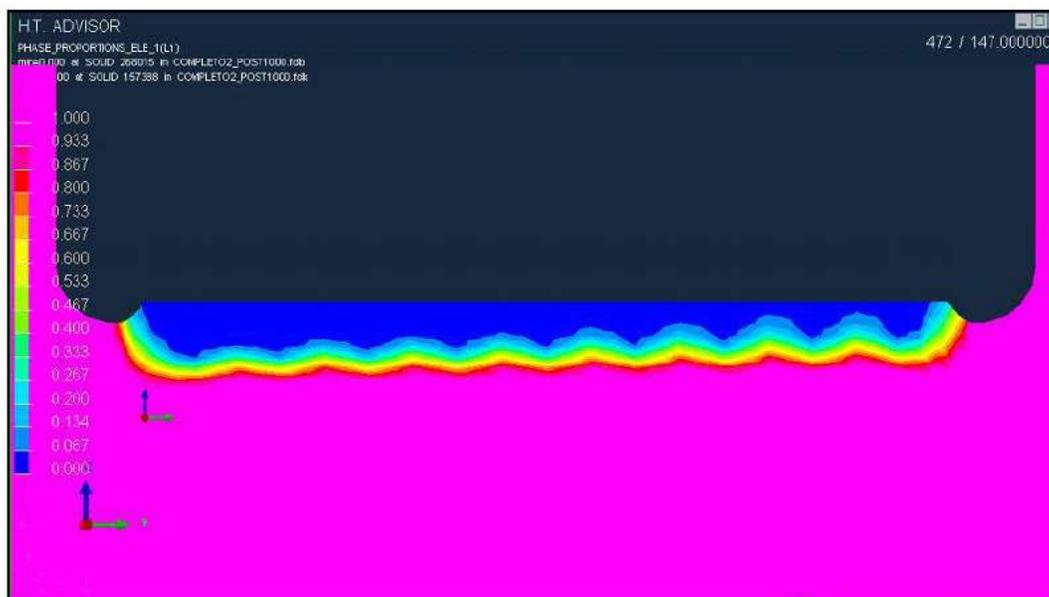
Procesos	Ventajas	Desventajas
Flama	Económico Flexible Móvil	Baja productividad. Requiere de un choque térmico y de un medio donde efectuarlo. Alta distorsión de componentes
Inducción	Alta productividad. Máxima penetración de la capa de martensita. Buena cobertura en grandes áreas.	Tiempos muertos por cambios de bobinas inductoras. Requiere de un choque térmico y de un medio donde efectuarlo. Distorsión elevada de las piezas tratadas. Incidencia térmica en toda la pieza. Fabricación de bobinas complejas para casos específicos. Requiere un postproceso de acabado.
Láser	Distorsión mínima de los componentes. Endurecimiento localizado. No se requiere de un choque térmico. Se elimina el postproceso. Mejora la vida a la fatiga del componente	Alto costo de equipos. Restricciones en la cobertura de grandes áreas. El proceso puede requerir de recubrimientos de las piezas para incrementar la opacidad. Múltiples carreras ocasionan el revenido local.

Fuente: Steen, W., & Mazunder, J. (2012)

Rockwood (2014) realizó una modelación computacional del proceso de temple utilizando tecnología láser sobre el muñón de un cigüeñal, uno de sus resultados se muestra en el gráfico 1, donde en color azul se distingue el perfil de la capa endurecida, nótese la irregularidad de

la martensita que se forma en la superficie al realizar 9 pasadas del haz de luz láser, lo cual se traduce en un perfil de dureza irregular a lo largo de toda la superficie tratada, para contrarrestar esta problemática se desarrolló una nueva simulación computacional, variando cada uno de los factores involucrados en el fenómeno, lo que permite hallar los valores adecuados para conseguir una capa endurecida uniforme.

Gráfico 1. Sección transversal de un muñón de cigüeñal, con 9 pasos del spot láser para cubrir toda la superficie.



Fuente: Rockwood, México, 2014

Cada una de las trayectorias traslapa a la anterior en el proceso de avance del spot láser, lo que genera un tratamiento no homogéneo y un perfil de dureza irregular, esto no es deseable en componentes tales como cigüeñales, ejes, flechas de potencia y cualquier componente mecánico de superficie cilíndrica, por tal motivo se busca perfeccionar el proceso de temple láser para masificar su uso y aprovechar sus beneficios en la reducción de los costos de producción.

Modelar los procesos de tratamiento superficial por láser y obtener los parámetros óptimos, se puede lograr mediante un modelo analítico local, donde se introduce los efectos de los cambios metalúrgicos para un material específico, o intentar simular un proceso más global en máquina, introduciendo las trayectorias del láser. Este trabajo propone realizar un diseño de experimentos a partir de los datos obtenidos por medio de simulación computacional del fenómeno de temple por láser, donde tendremos en cuenta los factores que influyen directamente en la uniformidad de la capa de martensita, para posteriormente enfocar el análisis en desarrollar una metodología que pueda ser fácilmente aplicable y reproducible.

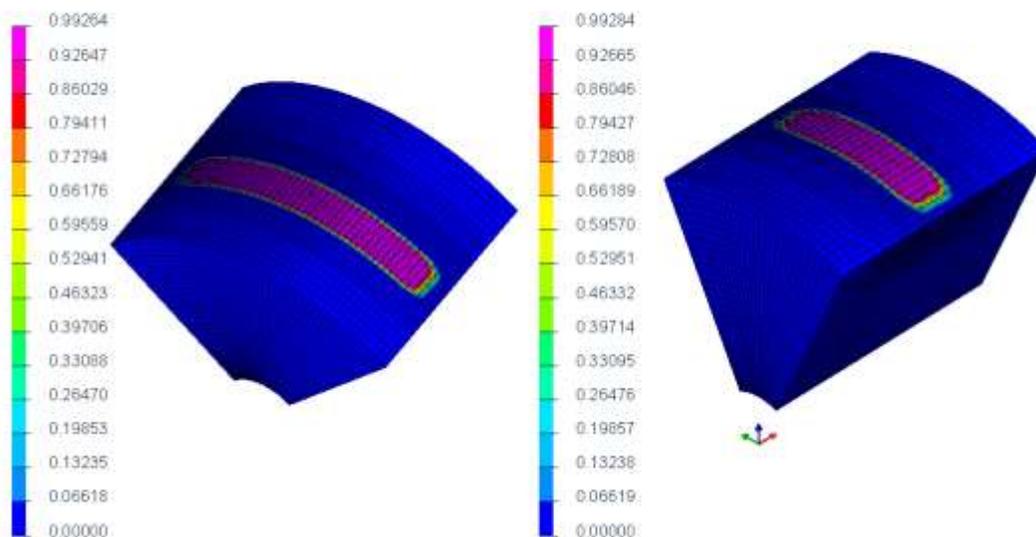
Materiales y Métodos

Para el presente estudio se empleó la aplicación Visual Environment 10.5 de ESI Group, y su plataforma Sysweld, un software especializado para la simulación de tratamientos térmicos y soldadura, que cuenta con los módulos de Malla, Soldadura y Visualización, que permite predecir el proceso de tratamiento térmico empleando tecnología láser, el *solver* de Sysweld ofrece una solución automática de problemas de soldadura, cubriendo todas las matemáticas complejas relacionadas con la física y el material, dependiendo de la temperatura, fases presentes, proporción de los elementos químicos y térmicos, se computan los resultados micro estructurales y mecánicos.

Dominio de la geometría

Uno de los objetivos de una simulación computacional es encontrar soluciones confiables y cercanas a la realidad, ocupando la menor cantidad de recursos disponibles, ya que pueden presentarse limitantes tanto en hardware, software y tiempo, impidiendo realizar estudios en geometrías complejas o en operaciones innecesarias que no interfieren en los resultados. Se realizó un análisis de la geometría propuesta para este estudio, que consiste en una barra circular de gran longitud, la aplicación de la geometría completa no se justifica, por lo que se realizó un análisis en una geometría de un cuarto de sección es decir 90° y una de 50° de sección propuesta por Rockwood (2014), el gráfico 2 muestra un caso práctico para cada una de las geometrías, empleando los mismos parámetros y se compararon los resultados obtenidos de las simulaciones.

Gráfico 2. Caso práctico, geometrías de 50° y 90° de sección, dos pasadas de láser en cada pieza. En colores se indica el porcentaje de concentración de martensita.



Fuente: Los Autores, Ecuador, 2018

Diseño de experimentos

Una vez definida la geometría que se empleará en el estudio, se consideran los factores que intervienen en el proceso de temple láser, y una variable de respuesta adecuada que permita comparar cada uno de los experimentos, dentro de un arreglo ortogonal L9 de Taguchi que se ajustó perfectamente a las variables propuestas para el estudio.

Factores

Para definir los factores que influyen en la uniformidad de la capa de martensita, se consideran las variables controlables dentro del software de Sysweld, y los estudios previos realizados por (S. Martínez et al., 2010), (Dong-Hyeon Kim y Choon-Man Lee, 2013), (Rockwood, 2014), (Lakhkar, Shin y Krane, 2009), donde para caracterizar adecuadamente el haz de luz láser se consideran los factores: Traslape de las trayectorias, velocidad de avance del *spot* láser, potencia y penetración del láser, cada uno de ellos se analizó en tres niveles con el propósito de verificar la linealidad del efecto por factor.

Traslape de las trayectorias del haz de luz láser

Por la necesidad de cubrir grandes áreas en piezas cilíndricas con un tratamiento térmico por láser, es imprescindible realizar múltiples pasadas en una trayectoria de avance, es decir una trayectoria traslapa en cierta medida a la anterior, se fijó el valor del diámetro del haz de luz láser en 3,4 mm típicamente usado en los estudios expuestos anteriormente.

Con el valor fijo del diámetro del haz de luz láser, el valor del traslape de las trayectorias mínimo es cero, mientras que el valor máximo será de 3,4 mm si se cruzan en su totalidad, en términos prácticos ningún valor extremo es útil, ya que con un traslape de cero la uniformidad de la capa endurecida será deficiente, y con un traslape total no existiría avance por superposición de las trayectorias.

Una limitación en la selección de los niveles del traslape es el tamaño del elemento de la malla, que en este caso es de 0,25 mm que determina la resolución de los valores, por lo tanto, si se define el dominio del traslape tendríamos {0,15; 0,4; 0,65; 0,9; 1,15; 1,4; 1,65; 1,9; 2,15; 2,4; 2,65; 2,9; 3,15; 3,4} como posibles valores, para la experimentación se toman los valores centrales 1,4; 1,9 y 2,4.

Potencia del láser

El haz de luz láser es la fuente de calor que permite al material alcanzar la temperatura de austenización, dependiendo de la composición química del acero tendrá un rango específico de valores, se estudió el diagrama de fases del material a templar, y para el acero DP-W-600 el rango de temperaturas de austenización es de: [812° C, 1495° C]. (McCallum, Brent, 2014)

Una vez determinado el rango de temperaturas, en una simulación del proceso de temple se ejecutan varios casos de estudios, variando únicamente el valor de la potencia, en el caso de Sysweld se expresa en términos de energía, de esta manera se encuentran los valores mínimos y máximos de potencia, que garantizan que el material alcance la temperatura de austenización. El rango de potencia cuando se mantienen fijas las demás variables es: [64 J/mm, 70 J/mm].

Velocidad del *spot* láser

La velocidad determina el avance que tendrá el láser cuando la pieza cilíndrica gira sobre su propio eje, para el estudio se emplearán velocidades reportadas en publicaciones de estudios relacionados, considerando un rango de valores entre 7 mm/s y 18 mm/s.

Penetración del láser

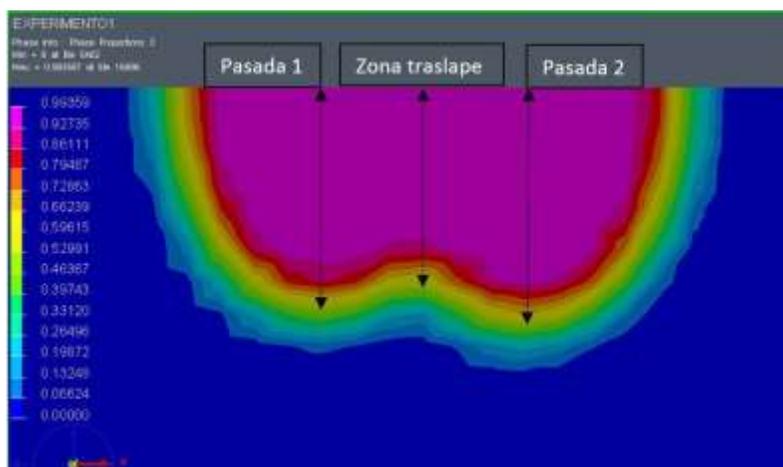
La penetración se refiere a la capacidad del haz de luz láser de alcanzar una determinada profundidad, entre los valores reportados en estudios previos se tienen los valores de 1,25 mm, 1,50 mm y 1,75 mm, que mantiene la misma proporción de variación.

Variable de respuesta

La variable de respuesta debe representar adecuadamente la uniformidad del perfil de la capa endurecida de un componente, dentro del diseño de experimentos permitirá comparar cada uno de los casos de estudio, la propuesta que se maneja en este documento se ilustra en el gráfico 3.

La profundidad de la capa endurecida se mide hasta una concentración de martensita del 50 %, este espesor brinda las características de dureza superficial efectiva y se relaciona con el concepto de diámetro crítico de temple.

Gráfico 3. Definición de la variable de respuesta en el perfil de martensita con dos pasadas de láser.



Fuente: Los Autores, Ecuador, 2018

La profundidad de la capa endurecida de la segunda pasada del láser no es igual a la primera, esto se debe a que el software toma en cuenta aspectos multi-físicos y el calor acumulado en la pieza, el fenómeno presente en la pieza es el aumento de volumen (A.S.M. Handbook, 1991), que representa la transformación de austenita a martensita y que depende del porcentaje de carbono a razón de:

$$\Delta V = 4,64 - 1,43 * (\% C)$$

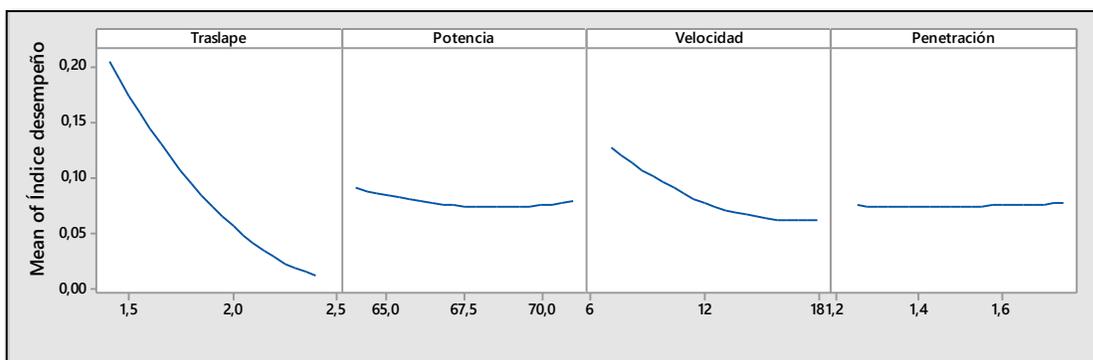
La variable de repuesta tomará el nombre de índice de desempeño (ID) que se calcula dividiendo el promedio de la profundidad de las pasadas 1 y 2, menos la profundidad de la zona de traslape, entre el promedio de las pasadas 1 y 2, resultando valores entre cero y uno, los valores cercanos a cero representarán capas más uniformes.

Resultados y Discusión

Una vez definidos los factores que intervienen en el proceso de temple láser con sus respectivos niveles, se completa la matriz de experimentos de la tabla 2, constituida por tres diseños de experimentos L9 de Taguchi con su respectiva variable de respuesta o índice de desempeño.

Los datos de la tabla 2 se analizaron en Minitab 17, para determinar el efecto de cada uno de los factores, gráfico 4, el traslape tiene el mayor efecto en la uniformidad de la capa de martensita, lo que se confirma con el cálculo del factor de influencia de cada factor, resultando: 89,60 % para el traslape, 4,50 % para la potencia, 5,69 % para la velocidad y la penetración 0,22 %

Gráfico 4. Efectos principales de cada factor

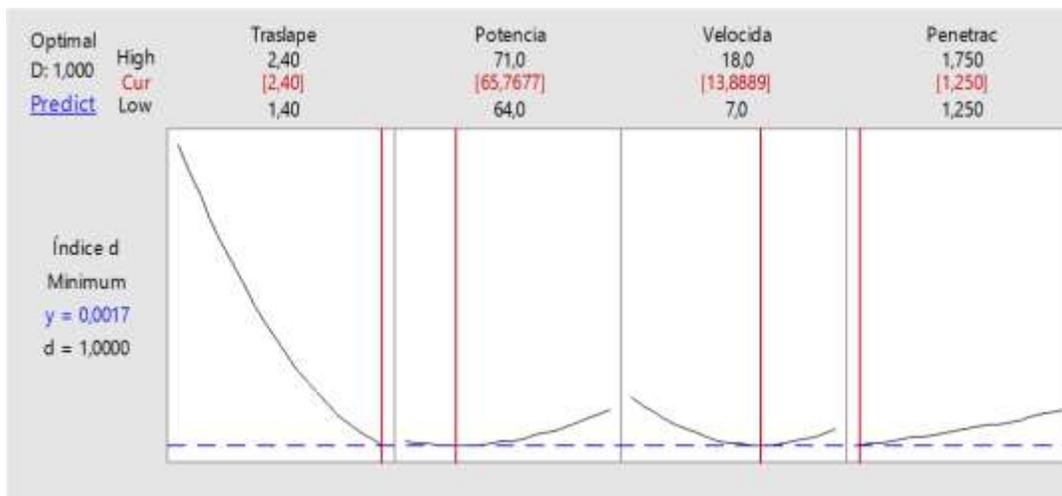


Fuente: Los Autores, Ecuador, 2018

Teniendo en cuenta que cuando el índice de desempeño tiende a cero la capa endurecida resulta más uniforme, se determinan los valores de cada factor obteniendo el menor valor del índice de desempeño, el experimento 27 de la tabla 2 registra el mejor resultado, el experimento halla un valor óptimo de manera discreta, y no se descarta que existan valores en los cuales se obtenga un resultado aún mejor, para tal efecto se usa la herramienta de optimización de respuesta dentro del paquete de Minitab 17, los resultados se muestran en el

gráfico 5, donde se aprecia que mientras mayor es el traslape mejor es el resultado, la potencia alcanzaría un valor óptimo de 65,767 7 J/mm, la velocidad un valor de 13,888 9 mm/s y la penetración en su valor más bajo de 1,25 mm.

Gráfico 5. Optimización de la variable de respuesta en su valor mínimo.



Fuente: Los Autores, Ecuador, 2018

Tabla 2. Matriz de experimentos

Experimento	Traslape mm	Potencia J/mm	Velocidad mm/s	Penetración mm	Índice de desempeño
1	1,4	64	8	1,25	0,2974
2	1,4	67	10	1,5	0,2264
3	1,4	70	12	1,75	0,1947
4	1,9	64	10	1,75	0,1344
5	1,9	67	12	1,25	0,0743
6	1,9	70	8	1,5	0,1081
7	2,4	64	12	1,5	0,0242
8	2,4	67	8	1,75	0,0478
9	2,4	70	10	1,25	0,0185
10	1,9	65	7	1,25	0,1339
11	1,9	68	10	1,5	0,0876
12	1,9	71	13	1,75	0,0730
13	2,15	65	10	1,75	0,0650
14	2,15	68	13	1,25	0,0474
15	2,15	71	7	1,5	0,0737
16	2,4	65	13	1,5	0,0212
17	2,4	68	7	1,75	0,0502
18	2,4	71	10	1,25	0,0235

19	1,9	64	12	1,25	0,0769
20	1,9	67	15	1,5	0,0681
21	1,9	70	18	1,75	0,0625
22	2,15	64	15	1,75	0,0516
23	2,15	67	18	1,25	0,0332
24	2,15	70	12	1,5	0,0402
25	2,4	64	18	1,5	0,0227
26	2,4	67	12	1,75	0,0207
27	2,4	70	15	1,25	0,0136

Fuente: Los Autores, Ecuador, 2018

En el trabajo experimental de (Lakhkar et al., 2009) se realizó una comparación de los perfiles de dureza a lo largo de la zona tratada, variando únicamente el traslape de las trayectorias, los autores determinaron que el traslape afecta significativamente el perfil de dureza del material, lo cual es comprobado en el presente trabajo, ya que la dureza en la capa superficial depende del porcentaje de martensita, y al tener capas uniformes se tendrá perfiles de dureza también uniformes.

Para predecir el fenómeno de uniformidad de la capa de martensita, se determina una ecuación de regresión con los factores significativos, para lo cual se genera un análisis de varianza que se muestra en la tabla 3.

Ecuación de regresión:

$$ID = 1,470 - 0,773 * T - 0,003 * P - 0,039 * V + 0,008 * T * V + 0,126 * T^2 + 0,0006 * V^2$$

Siendo:

ID= Índice de desempeño

T= Traslape de las trayectorias del láser en (mm)

P= Potencia del láser (J/mm)

V= Velocidad del spot láser.

Tabla 3. Análisis de varianza, generado en Minitab 17.

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	6	0,119149	0,019858	168,15	0,000
Traslape	1	0,011974	0,011974	101,39	0,000
Potencia	1	0,001118	0,001118	9,47	0,006
Velocidad	1	0,003292	0,003292	27,88	0,000
Traslape*Velocidad	1	0,000936	0,000936	7,92	0,011
Traslape^2	1	0,004517	0,004517	38,25	0,000

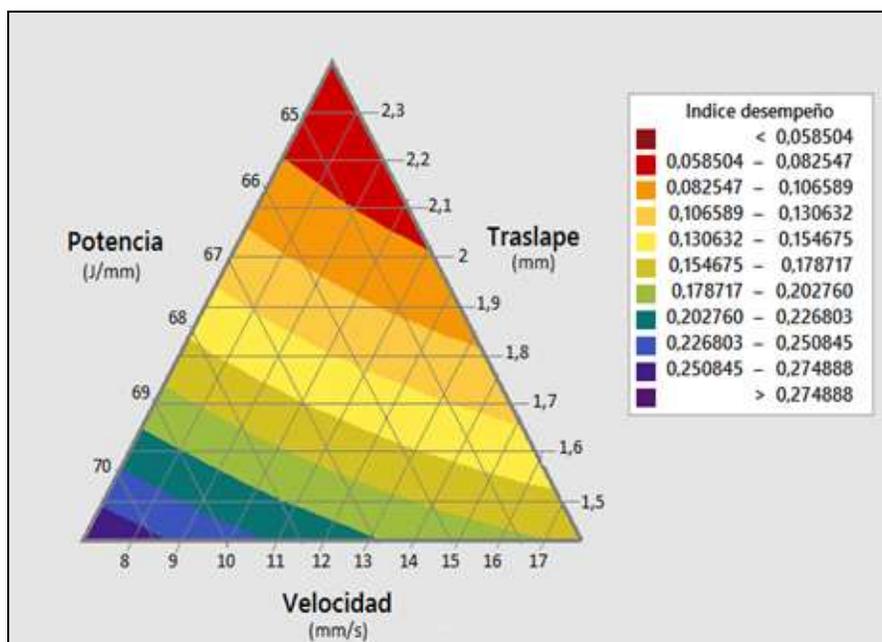
Velocidad^2	1	0,001445	0,001445	12,24	0,002
Error	20	0,002362	0,000118		
Total	26	0,121511			

El análisis de varianza se lo realizó con un $\alpha = 0,05$ y el resumen del modelo es: $S = 0,0108672$; $R\text{-sq} = 98,06\%$; $R\text{-sq}(\text{adj}) = 97,47\%$; $R\text{-sq}(\text{pred}) = 95,53\%$

Fuente: Los Autores, Ecuador, 2018

En la industria automotriz y manufacturera existe una búsqueda permanente por mejorar y abaratar los costos de producción, en tal virtud un proceso debe acoplarse a cada producto y necesidad, para suplir esta necesidad se debe tener un control adecuado en el factor de mayor influencia, en este caso es el traslape de las trayectorias del láser, sin descuidar las demás variables significativas, por tal motivo se propone la utilización de un diagrama de proceso, gráfico 6, el cual involucre los tres factores significativos en una superficie de contornos que indiquen la variación del índice de desempeño; de esta manera, si un componente mecánico requiere un índice de desempeño predeterminado, se pueden conseguir la combinación de factores adecuados para cada necesidad, el ingeniero encargado del proceso de temple, seleccionará los niveles necesarios en cada factor con la ayuda del diagrama ternario de factores garantizando que se cumplan los requerimientos del proceso, al menor costo posible.

Gráfico 6. Diagrama ternario de factores, las capas de colores indican los rangos de ID.



Fuente: Los Autores, Ecuador, 2018

Conclusiones

- Dentro de los límites propuestos en el diseño de experimentos no se obtiene un ID de cero, es decir una capa de martensita completamente uniforme, pero se logra determinar una combinación de factores con un valor óptimo que permitiría una capa endurecida más uniforme.
- El factor más importante es el traslape de las trayectorias de láser, aquí se debe considerar que mientras mayor es el traslape menor será el avance, un mayor número de pasadas del láser se requerirá para cubrir una superficie determinada, lo que genera el aumento del costo del proceso, es aquí donde el uso del diagrama ternario de factores toma relevancia, ya que se pueden obtener los mismos resultados con un traslape menor.
- Si bien no se obtiene una capa endurecida totalmente uniforme, este estudio abre las puertas a la investigación para el desarrollo de nuevas propuestas en el uso del láser en tratamientos térmicos superficiales, variando diámetros del spot láser o trabajando en un sistema de barrido, que se complementaran en la práctica y experimentación con el desarrollo de la máquina especializada para el temple de superficies cilíndricas.

Referencias

A.S.M. Handbook, Heat treating. ASM international (1991) p. 19

Dong-Hyeon Kim, Choon-Man Lee. (2013). *A study of cutting force and preheating-temperature prediction for laser-assisted milling of Inconel 718 and AISI 1045 steel*. Heat and Mass transfer

McCallum, Brent, "*Characterization of DP600 Steel Subject to Electrohydraulic Forming*" (2014). *Electronic Theses and Dissertations*. Paper 5173.

Steen,W., & Mazunder, J. (2012). *Laser material processing*, cuarta edición, Nueva York, EEUU. Springer

Lakhkar, R. S., Shin, Y. C., & Krane, M. J. M. (2008). *Predictive modeling of multi-track laser hardening of AISI 4140 steel*. *Materials Science and Engineering A* 480(2008) 209-217.

Rockwood Iglesias, Robert (2014). Tesis de Maestría, *Simulación computacional del proceso de temple de los muñones de cigüeñales utilizando tecnología láser*. Toluca Estado de México, México, Tecnológico de Monterrey.

S. Martínez, E. Ukar, A. Lamikiz (2010). *Simulación del proceso de temple por láser en piezas de geometría compleja*. XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica. España.

ESI Group, (2008). *Sysweld Welding Simulation User's Guide*. Paris, Francia.

PARA CITAR EL ARTÍCULO INDEXADO.

Sánchez E., Castillo E., Bravo V., Abarca E. & Montufar E. (2019). Análisis del proceso de manufactura mediante proceso CAD-CAM de un molde para materiales compuestos para la industria automotriz. *Revista electrónica Ciencia Digital* 3(2), 676-688. Recuperado desde: <http://cienciadigital.org/revistacienciadigital2/index.php/CienciaDigital/article/view/475/1090>



El artículo que se publica es de exclusiva responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan el pensamiento de la **Revista Ciencia Digital**.

El artículo queda en propiedad de la revista y, por tanto, su publicación parcial y/o total en otro medio tiene que ser autorizado por el director de la **Revista Ciencia Digital**.

