

Caracterización de la microdureza en el proceso de tratamiento térmico superficial en acero 4140 con láser pulsado multilinea de ND-YAG.

Micro hardness characterization in the Surface Process Treatment in Steel 4140 using Pulsed Laser ND-YAG Multiline

Liliam Cristina Ramírez Contreras¹, Yeimi Alexandra Donato González²

Resumen

El acero es uno de los mayores insumos utilizados en la industria. Teniendo en cuenta sus múltiples aplicaciones, debe contar con diferentes propiedades; para lograr estas propiedades se utilizan los procesos de tratamientos térmicos (temple, revenido, recocado, entre otros). En estos tratamientos, el calentamiento y enfriamiento es lento y modifica toda su microestructura. En los años 80 se utilizó el láser pulsado multilinea ND-YAG como la nueva tecnología para tratamientos térmicos; este proceso usa una longitud de onda de 1064 nm a 920 mJ con una duración por pulso de 5,05 ns. En este proceso los cambios de microdureza se dan solo en la superficie y aumentan al doble la dureza; aquí el calentamiento y enfriamiento son rápidos. Por esta razón, el artículo muestra el desarrollo experimental realizado en acero SAE 4140.

Palabras clave: *tratamiento térmico, capa delgada, láser pulsado ND-YAG, microdureza, microestructura, SAE 4140.*

Abstract

Steel is one of the most increasing inputs used by the industry. For that reason, it is very important to keep in mind its multiple applications and at the same time its different properties. Some of those are tempering process and annealing among others. In these treatments the process of heating and cooling is too slow and it modifies all its micro-structure. In the 80s, the laser pulsed ND-YAG multiline was used as new technology for heating treatments. This process uses a wavelength from 1064 nm to 920 mJ with a duration of 5.05 ns per pulse. During this process, the micro-hardness changes are only given on the surface and its hardness increases twice, so, here the heating and cooling is very fast. The purpose of this paper is to show the experimental development made in SAE 4140 steel.

Key words: *heat treatment, thin layer, ND-YAG pulsed laser, micro-hardness, microstructure, SAE 4140.*

1 Aspirante a título en Ingeniera en Procesos Industriales de la Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central (2016). Tecnóloga en Procesos Industriales Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central (2014). Tecnóloga en Seguridad y Salud en el Trabajo, Sena (2009). Correo electrónico: liliamcristina@misena.edu.co.

2 Aspirante a título en Ingeniera en Procesos Industriales de la Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central (2016). Tecnóloga en Procesos Industriales, Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central (2014). Correo electrónico: yadonato@gmail.com.

1 Introducción

Cuando la radiación electromagnética incide sobre la superficie de un material, ocurren varios fenómenos: reflexión, absorción, refracción y transmisión. Uno de los fenómenos más importantes es la absorción de la radiación en los materiales. La energía láser absorbida por el material durante la interacción láser-material es convertida en calor por degradación de la energía de excitación primaria localizada. La conversión de la energía en calor y su posterior conducción dentro del material establece distribuciones de temperatura en el material. Dependiendo de la magnitud del ascenso de la temperatura, se originan varios efectos en el material tratado: calentamiento, fusión, vaporización, formación de plasma. Estos efectos dependen de las características de la radiación electromagnética, como la longitud de onda, su energía, tipo de emisión continua o pulsada, entre otras, y, por otro lado, de las propiedades termofísicas del material, como su conductividad térmica y difusividad térmica.

Para este proyecto se utilizó el proceso de ablación láser para generar -de manera rápida- cambios en la microestructura de la superficie del acero 4140 y para que estos resultados constituyan réplicas idénticas al inicial. Por tanto, se genera una nueva tecnología competitiva y limpia: sin productos químicos ni residuos contaminantes y, por el contrario, amigable con el medio ambiente; además, es muy útil para la industria, al existir múltiples aplicaciones que buscan que la estructura interna del acero no sufra cambios y continúe flexible y su superficie sufra modificaciones en las fases que favorezcan su utilidad.

Finalmente, para llevar a cabo el trabajo de grado, se tomaron piezas de acero SEA 4140 de 1" x 1,5 cm, las cuales se pulen con acabado tipo espejo; de este modo, se busca garantizar la homogeneidad de las piezas, para luego ser atacadas con el láser a diferentes pulsos e iniciar el análisis de microdureza en cada una.

Planteamiento del problema

Los tratamientos térmicos son procesos aplicados para modificar y mejorar las características de los aceros o materiales utilizados (piezas, herramientas o componentes en las máquinas o equipos industriales). Estas modificaciones buscan que las piezas cuenten con características como resistencia al desgaste, tenacidad, fricción, maquinabilidad, entre otras, y aunque se logran estos objetivos, se afecta la pieza en su totalidad tanto interna como externamente.

Con el desarrollo tecnológico que se ve en la actualidad -las exigencias y requerimientos del material son aun más altos-, estos tratamientos no son suficientes para brindar solución a este tipo de demandas.

En Colombia se vienen utilizando los tratamientos térmicos como el revenido, el recocido, el normalizado y el temple -que modifican toda la estructura del acero-; los resultados obtenidos dependen de las diferentes variables que en ellos se manejan (tiempo, temperatura o transformación), fácilmente afectadas por condiciones externas en el proceso. Además, algunos tratamientos requieren procesos adicionales, como el enfriamiento en agua o aceite, para lograr los cambios solicitados.

Ahora bien, no es fácil alcanzar estos resultados con estos tratamientos en piezas tridimensionales o con geometrías complejas, pues no se logran superficies homogéneas ni con espesores regulares. Adicional a esto, si varias piezas requieren características idénticas, estos procesos no tienen la facilidad de reproducirlas con los mismos resultados de calidad, durezas, fases y propiedades; siempre existirán diferencias ínfimas.

Finalmente, en Colombia se han desarrollado investigaciones relacionadas con el mejoramiento de este proceso, pero están enfocadas más hacia el desarrollo del conocimiento científico y no de aplicación industrial; por tanto, se puede afirmar

que se desconocen los beneficios que pueden traer estos resultados para la industria.

Justificación

Este proyecto busca ser el pionero para el desarrollo de nuevos proyectos, sean de investigación científica o aplicada. Una investigación para promover, así, el desarrollo tecnológico y fomentar la creación de empresa y elaboración de máquinas o equipos. Un trabajo que busca ser reconocido por su impacto, avance tecnológico, beneficios y nivel de investigación, además de ser una herramienta de conocimiento y crecimiento profesional que permita optar al título en Ingeniería de Procesos Industriales.

En la década de los años 60 se descubre un dispositivo que revoluciona el proceso de tratamiento térmico: *el láser*. Pero solo hasta los años 80 el láser se comienza a utilizar para conocer realmente sus aplicaciones; en ese momento se determina uno de los mejores láseres: el de ND-YAG, un láser pulsado multilínea que realiza procesos de ablación con excelentes resultados en las piezas tratadas, modificando solamente la superficie de la pieza sin alterar su estructura interna. Es más, sus resultados son fácilmente reproducibles en la cantidad de piezas que se requieran; por tanto, la calidad obtenida es la misma en cada una de ellas. Este resultado se logra gracias a que las variables no son afectadas por condiciones externas; es un proceso limpio que no genera residuos ni contaminación al medio ambiente.

Al disponer de un equipo con excelentes características y capacidades, se establece que este tratamiento térmico de ablación láser debe ser efectuado en un metal o acero que responda bien al tratamiento. Los resultados, en correspondencia, potencian las propiedades de estos y, por consiguiente, sus aplicaciones en la industria, además de ser económico y con una presentación comercial que facilite su manejo. En este tipo de tratamiento se definió el acero 4140 como ideal para desarrollar la investigación; este es un acero de

aleación que nos permite pensar en resultados de mayor optimización, lo que admite con la ablación láser una buena penetración de la dureza, homogeneidad de esta y resistencia al desgaste.

Dentro de los resultados esperados, se confían en que piezas como los espárragos o tornillos (piezas clave en una caldera, una turbina de vapor o plantas químicas, que necesitan características de resistencia de temperaturas que oscilan entre los 150 °C y 300 °C) puedan resistir temperaturas superiores a las expuestas, ampliando así su vida útil y mejorando las condiciones de operación de la máquina.

Finalmente, se busca brindar nuevos conocimientos y campos de aplicación con procesos limpios y económicamente rentables y sostenibles.

2 Metodología

El proyecto desarrollado está enmarcado en la modalidad de “Innovación o desarrollo tecnológico”, en la que se realizará una investigación experimental de prueba y errores, con base en conocimientos previos y alta tecnología. El proyecto busca mejorar las características de un producto y, así mismo, ampliar su campo de aplicación industrial (aviación, aeroespacial, sector petrolero, altos hornos, calderas y automotores). Así mismo, esta es una investigación pionera en su campo: en Colombia no se han desarrollado técnicas similares, aunque a nivel internacional se han logrado excelentes resultados, los cuales se toman como evidencia bibliográfica para este proyecto.

El proyecto se desarrolló en las siguientes fases:

1. Revisión documental: Se estudian artículos científicos relacionados con el uso de láser pulsado ND-YAG, capas delgadas y cambios en la microestructura a partir de esta tecnología.
2. Alistamiento de las probetas: Se preparan 24 probetas de 1” x 2 cm del acero SAE 4140 y se les realiza pulido manual, mecánico y en paño.

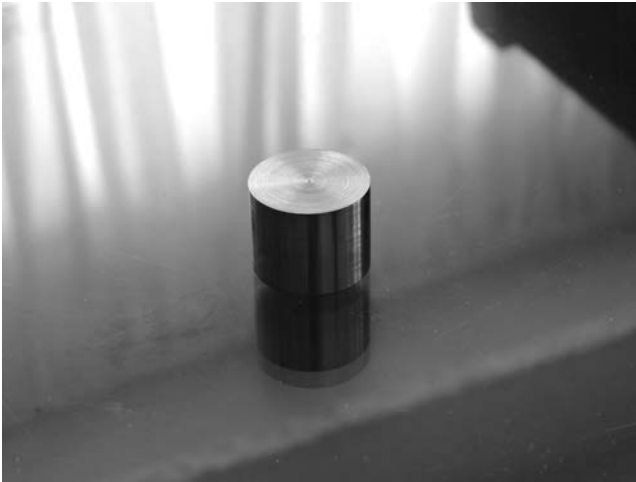


Figura 1. Probeta Acero SAE 4140.

Fuente: autores.

3. Tratamiento térmico: A 11 probetas se les realiza tratamiento térmico en mufla (temple) a diferentes temperaturas, y a las 11 restantes tratamiento térmico con láser pulsado multilínea de ND-YAG a diferentes pulsos.
4. Tomas HV y microestructura: Se efectúa pulido mecánico, manual y en paño; se toman microdurezas y ataque químico para ver fases.
5. Análisis de resultados: Se escogen ocho probetas representativas y se hace el análisis comparativo de resultados obtenidos.

Objetivo general: Caracterizar los cambios de microdureza superficial en el proceso de ablación en el acero 4140 con láser pulsado multilínea de ND-YAG.

Objetivos específicos: Atacar piezas de acero 4140 con láser pulsado multilínea de ND-YAG, variando la cantidad de energía.

- Tomar medidas de microdureza en la superficie atacada.
- Determinar las fases haciendo uso del proceso metalográfico a las muestras atacadas.

- Analizar los cambios de dureza superficial en el proceso de ablación con diferentes cantidades de pulsos láser.

Tratamiento térmico con láser pulsado multilínea de ND-YAG

Capas delgadas

En la superficie de un material existe una asimetría en la dirección de las fuerzas de los enlaces, lo que hace que la energía de los átomos de la superficie sea diferente a la de los del interior, al igual que sus características.

Por esta razón, se puede denominar capa delgada “a aquel a partir del cual los fenómenos de superficie predominan sobre los de un volumen en las propiedades del material”. Esto, determinado por una propiedad considerada (conductividad, dureza, transparencia óptica de la luz, etc.) e incluso por la temperatura. El orden del espesor está en la decena y centena de los nanómetros, mientras que otras están en las micras.

Su objetivo es modificar las propiedades superficiales de un material para mejorar la capa-sustrato o una función específica. El composite que se obtiene (base o sustrato) da unas características básicas (por ejemplo, resistencia mecánica), mientras la capa delgada o recubrimiento ofrece propiedades muy superiores.

Dentro de las técnicas de preparación de capas delgadas está el tratamiento superficial con láser, considerado un proceso avanzado de tratamiento y deposición en el que se obtiene luego de un tratamiento una capa superficial del mismo sustrato con propiedades mejoradas.

Láser

Fuente de luz monocromática. Un medio excitado puede ser devuelto a su estado fundamental emitiendo fotones (ondas de luz), de manera coherente y no espontánea, como en las fuentes de luz natural. En el proceso de emisión del lá-

ser, un fotón incide en átomos activos excitados y crean un fotón similar en términos de longitud de onda. Y cuando la fase se agota, el átomo vuelve a su estado de energía fundamental. El medio en el cual la emisión del láser es producida se conoce como medio activo o medio de amplificación.

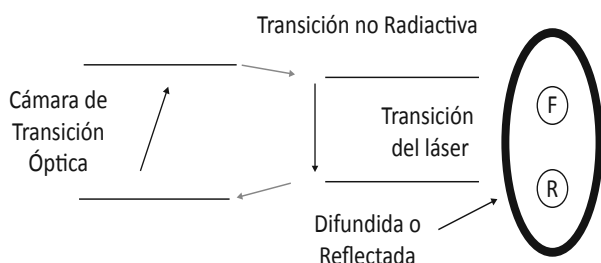


Figura 2. Diagrama del ND:YAG. Principales transiciones atómicas y transversales vistas en una cámara de bombeo.

A la derecha, el diagrama representa la transición atómica principal en el medio activo, usando un láser en estado sólido de ND-YAG. A la izquierda, muestra una vista transversal de una cámara de bombeo en donde la luz emitida por la lámpara se transfiere al medio activo por un camino directo o después de haber sido difundida o reflejada.

La amplificación se incrementa en un grado considerable si las ondas emitidas son forzadas a pasar a través del mismo medio activo varias veces.

Este medio activo está metido en una cavidad óptica compuesta de dos o varios espejos, con el fin de que la onda de luz se amplifique después de haber pasado a través de los medios de amplificación varias veces.

La emisión láser se obtiene a la salida de la cavidad (resonador), por medio de uno de los espejos que pueden reflejar parcialmente o se extrae de la cavidad por otros medios.

La emisión del láser puede ser continua o por impulsos como paquetes de energía, dependiendo del modo de excitación del medio activo y del modo de extraer la luz láser de la cavidad.

La figura 3 ilustra el láser utilizado en el desarrollo experimental.



Figura 3. Láser pulsado multilinea de ND-YAG
Fuente: autores.

Este láser es clase 4 en temas de seguridad: Es capaz de producir reflexiones difusas peligrosas, puede causar lesiones en la piel y los ojos y generar riesgo de incendio; por lo tanto, se deben usar caretas protectoras que cumplan con el estándar EN 207.

A continuación se ilustra el momento del ataque con el haz de láser en la probeta; se tiene en cuenta que este se genera por impulsos o pulsos de energía.



Figura 4. Ataque con láser pulsado multilinea ND-YAG.
Fuente: autores.

Luego de ser atacada la pieza, se evidencia una huella dejada por el haz del láser, que aumenta de acuerdo con la cantidad de pulsos emitidos y programados.

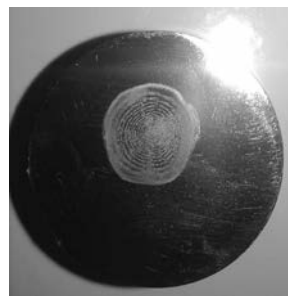


Figura 5. Probeta atacada con 11.000 pulsos.
Fuente: autores.

Microdureza

Se utilizó el ensayo Vicker, un método que mide la resistencia de los materiales para ser penetrados. En este tipo de ensayos, la penetración se da en el orden de micrones. Su fórmula es:

$$HV = \frac{2F \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} \quad HV = 1.854 \frac{F}{d^2}$$

Ecuación 1. Fórmula Microdureza Vicker

Se emplea un penetrador piramidal, y como el método es tan sensible, la constante se toma con mayor exactitud ($2 \text{ Sen}(68^\circ) = 1,85436$).

A continuación se muestra la huella del identador dejada después de realizado el ensayo Vicker en una probeta.

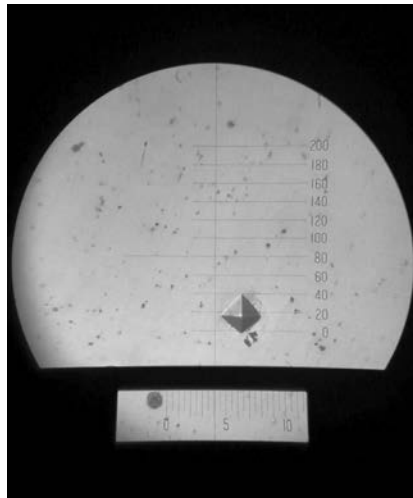


Figura 6. Muestra huella indentación.
Fuente: autores.

Microestructura

Se analiza el conjunto de fases que conforman el material. En este caso se realizó una comparación

entre la microestructura del SAE 4140 en tratamiento térmico en temple y en tratamiento térmico con el láser pulsado ND-YAG. Los resultados se muestran a continuación:

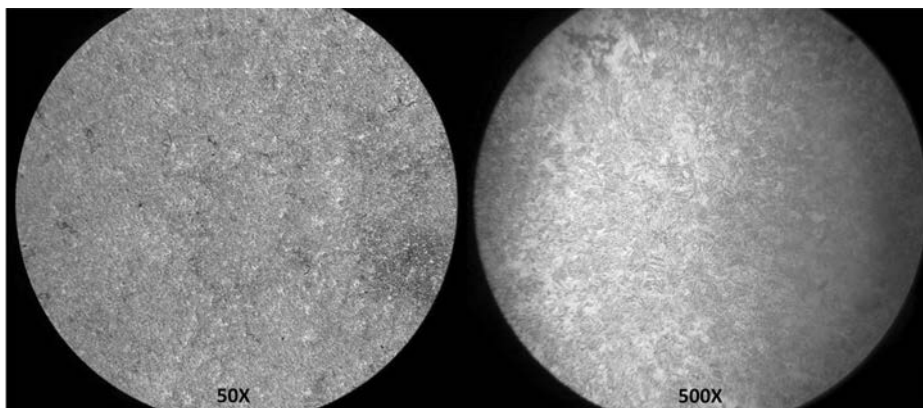


Figura 7. Microestructura SAE 4140. A la derecha, con láser pulsado ND-YAG; a la izquierda, en mufla temple 850 °C.

3. resultados y conclusiones

Los resultados obtenidos demuestran que este tipo de tratamiento genera un cambio revolucionario en los procesos de los tratamientos térmicos,

además de ser una excelente opción para la industria colombiana. Es un proceso limpio para el medio ambiente, altamente eficiente y con un margen de error del 0 % en las piezas atacadas.

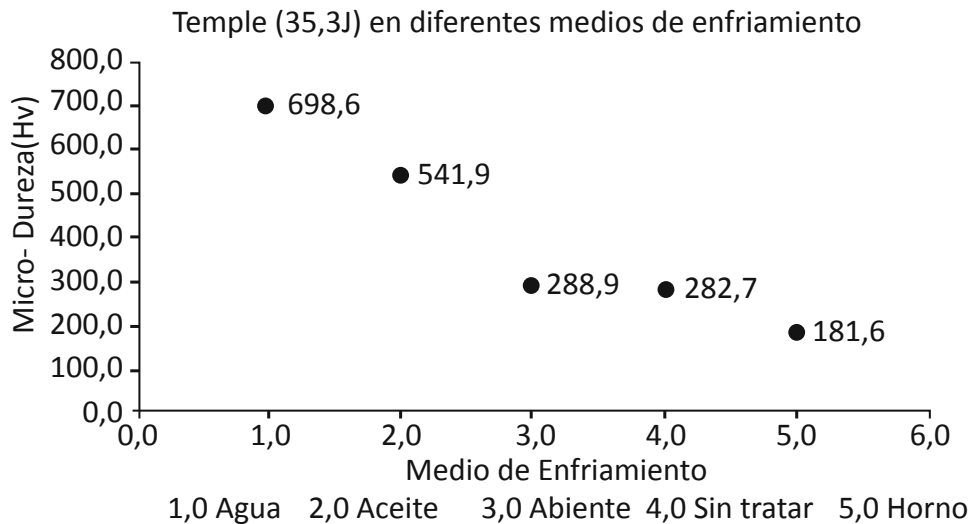


Figura 8. Comportamiento de Dureza en mufla según medio de enfriamiento

Se puede observar en la Figura 9, que los tratamientos térmicos en horno tipo mufla producen una micro-dureza según el proceso de enfriamiento reiterando conceptos anteriores sobre la

velocidad de enfriamiento y la dureza conseguida, pero esto solo puede darse en intervalos grandes de dureza, ya que, es muy difícil controlar la velocidad de enfriamiento.

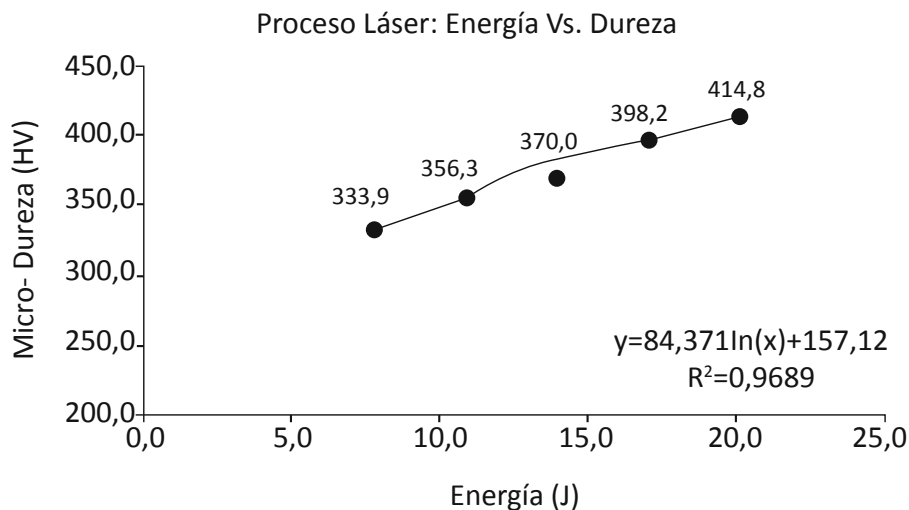


Figura 9. Comportamiento de Dureza en mufla según medio de enfriamiento

Como se observar en la Figura 10, la dureza es directamente proporcional a la cantidad de pulsos emitidos y su comportamiento puede ser acorde a una función logarítmica dada por:

$Dureza = 84,37 \ln(\text{No. pulsos}) - 388,99$, con una tendencia a 442HV cuando el número de pulsos crece.

Por lo anterior, se concluye que en el horno tipo mufla las condiciones de cambios de dureza no son de fácil control, provocando deficiencias en el material cuando sea utilizado en algún proceso industrial. Por otro lado, en la utilización del láser se pudo encontrar que las condiciones necesarias para que se desarrolle dureza sea más fáciles

Los resultados obtenidos demuestran que este tipo de tratamiento genera un cambio revolucionario en los procesos de los tratamientos térmicos, además de ser una excelente opción para la industria colombiana. Es un proceso limpio para el medio ambiente.

4. Agradecimientos

Primero a nuestro creador; luego al Centro Internacional de Física por facilitarnos el láser; a nuestro admirable Director de Tesis por secundarnos y alentarnos en este proyecto; a nuestros incondicionales docentes de carrera por cada ayuda, consejo y apoyo; a la ETITC por permitirnos el uso del Laboratorio de Tratamientos Térmicos, el cual se convirtió en nuestra segunda casa.

5. Referencias bibliográficas

A., Yariv. 1989. Quantum Electronics. s.l.: Wiley, 1989. págs. 208-211. ISBN: 0-471-60997-8.

Albella, José. M. (2003). Láminas delgadas y recubrimientos. Preparación, propiedades y aplicaciones. Madrid: Consejo Superior de Investigación Científica, 2003. ISBN 84-00-08166-8.

Alfonso Orjuela, J. E., Andrade Zambrano, D. F. y Arroyo Osorio, J. M. (2011). Portal de la Revista

Científica y Arbitradas de la Universidad Nacional Autónoma de México. [En línea] 19 de septiembre de 2011. [Citado el 14 de septiembre de 2014.] www.revistas.unam.mx/index.php/rmf/article/view/30599. ISSN 475-480.

Alvira, Fernando Carlos (2011). Biblioteca de Recursos Universia. [En línea] 25 de noviembre de 2011. [Citado el 27 de octubre de 2014.] biblioteca.universia.net/html_bura/ficha/params/title/espectroscopia-plasma-inducidos-laser-libs-aplicada-caracterizacion-piezas-unicas-productos/id/53462548.html. ISBN 978-950-34-0809-4.

Andrade Zambrano, Darío Fernando (2012). Fabricación de redes de difracción sobre silicio monocristalino por láser pulsado multilinea de Nd-YAG. Tesis de Maestría. Bogotá, D.C.: s.n., 2012.

Castell M., Ricardo (2001). Ablación láser. Estudio fundamental y aplicación de los plasmas generados. Caracas, Venezuela: Revista de la Sociedad Colombiana de Física, 2001. Vol. 33.

Castillo Cuero, Harvy Alirio (2011). Bdigital Repositorio Institucional UN. [En línea] 27 de mayo de 2011. [Citado el 11 de diciembre de 2014.] www.bdigital.unal.edu.co/3580/. ID 3580.

Coureaux Mustelier, David, y otros (2009). ResearchGate. ResearchGate. [En línea] Abril-junio de 2009. [Citado el 18 de septiembre de 2014.] www.researchgate.net/28297613. Modelación del endurecimiento superficial láser del acero AISI W112, mediante el método de elementos finitos. ISSN 1405-0676.

Fonseca Fonseca, Frank Rodolfo; Alfonso Orjuela, José Édgar y ANDRADE Z, Darío Fernando (2014). Redalyc.org. Redes de Revistas de América Latina y el Caribe, España y Portugal. Sistema de Información Científica. [En línea] 9 de julio de 2014. [Citado el 20 de noviembre de 2014.] www.redalyc.org/articulo.oa?id=49632363014. ISSN 0012-7353.

- Larburu Arrizabalaga, Nicolás (2004). Máquinas. Prontuario. Técnicas Máquinas Herramientas. Madrid: Thomson Editores, 2004. ISBN 84-283-1968-5.
- Maco, A. L. y Belzunce, F. J. (1998) Researchgate. [En línea] enero de 1998. [Citado el 17 de octubre de 2014.] revistademetalurgia.csic.es/index.php/revistademetalurgia/article/view/674/686. . ISSN 0034-85-70.
- Mamlouk, Michael S. y Zaniewski, John P. 2009. Materiales de Ingeniería Civil. Segunda. Madrid: Pearson, S. A. Prentice Hall, 2009. pág. 616. 978-84-8322-510-3.
- Martínez, S., Ukar, E. y Lamikiz, A (2010). Universidad de Castilla La Mancha. [En línea] 2010. [Citado el 21 de septiembre de 2014.] www.uclm.es/2010/congresolM/pdf/cdarticulos/180.pdf.
- Méndez Álvarez, Carlos Eduardo (S. F.) Metodología, diseño y desarrollo del proceso de investigación con énfasis en Ciencias Empresariales. México: Limusa. ISBN 978-968-18-7177-2.
- Millán Gómez, Simón (2006). Procedimientos de mecanizado. Madrid: Thomson Paraninfo, 2006. ISBN: 84-9732-428-5.
- Peña Puerta, Arley Alberto y Rendón Marín, Hugo Alexander (2013). Guía y tablas técnicas de los aceros. Medellín: Ferrocortes, 2013. ISBN 978-84-613-0057-2.
- Ponce, L. *et al.* (1994). Revista Mexicana de Física 40. [En línea] 20 de abril de 1994. [Citado el 5 de noviembre de 2014.] 148.209.32.135/mfg/90-94/ablas-rmf94.pdf. ISSN 798-804.
- Sala P., keyffer J. *et al.* 20

