

Aproximación al proceso de temple por láser remoto

S. Martínez Rodríguez⁽¹⁾, E. Ukar Arrien⁽¹⁾, I. Taberero Campos⁽¹⁾, A. Lamikiz Mentxaka⁽¹⁾, J. Figueras Puig⁽²⁾

*(1) Dpto. de Ingeniería Mecánica. Universidad del País Vasco UPV/EHU
silvia.martinez@ehu.es*

(2) Centro tecnológico IDEKO – IK4

En los últimos años se están desarrollando e industrializando sistemas basados en ópticas móviles, también denominados escáneres, para dotar de movimiento al haz láser con velocidades lineales superiores a 7000 mm/s. Estos sistemas son muy versátiles y abren la puerta a nuevos procesos de tratamiento superficial por láser además de variantes remotas en otro tipo de procesos láser como es el corte ó la soldadura. Por otro lado el temple, o endurecimiento, por láser es un tratamiento superficial que se usa en una gran variedad de aplicaciones industriales ya que se consigue una dureza en la superficie de la pieza, mientras que el núcleo queda tenaz, con unas distorsiones geométricas mínimas. En cambio, el temple por láser en su variable remota es muy poco conocido.

Así, en el presente trabajo se pretende estudiar el proceso de temple por láser remoto que por tratarse de un tratamiento térmico necesita un control y un conocimiento preciso del registro térmico que se ha dado durante el proceso. Para ello, se analizarán las distintas variables que intervienen y se compararán con el proceso de temple convencional. También se estudiarán las estrategias que se pueden seguir en cuanto al barrido del área a templar y se evaluará el registro térmico de una serie de ensayos medidos por métodos sin contacto. Además, se estudiará el área de material templado mediante medición de microdurezas, ya que el principal problema de la superposición de trayectorias en el proceso de temple por láser es el reblandecimiento parcial de las zonas solapadas.

1. INTRODUCCIÓN

El temple por láser convencional es probablemente la operación de tratamiento por láser más utilizada en la industria y con mayor crecimiento en la actualidad. Si se compara el temple por láser con otros procesos más tradicionales para tratamientos superficiales, como un endurecimiento por inducción o por llama, es posible obtener una zona tratada muy localizada sobre superficies complejas en 3D con mínimas distorsiones dimensionales, siendo posible eliminar en algunos casos el proceso final de rectificado [1]. 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 en la posibilidad de producir sobre un mismo material dos microestructuras muy diferentes, un núcleo dúctil junto a una capa superficial endurecida con tensiones residuales de compresión [2]. Se trata de un proceso que está siendo utilizado en el temple de matrices y troqueles. En concreto, en aristas de cortantes [3], dado que se puede obtener una superficie de alta dureza después de realizar la operación de ajuste del troquel, sin introducir prácticamente una distorsión geométrica.

Por otro lado, en los últimos años se están desarrollando e industrializando sistemas basados en ópticas móviles para el guiado de láseres de alta potencia. Estos sistemas también se denominan escáneres y se suelen acoplar a la muñeca de un robot serie [4], como se aprecia en la figura 1a, ó en el cabezal de máquinas cartesianas [5]. La característica principal de los escáneres es que son capaces de mover el haz láser con velocidades superiores a 7000 mm/s. Esto es debido a que el movimiento se hace a través del giro de unos espejos con muy poca masa e inercia que convierten pequeños giros en movimientos lineales del haz láser en el espacio de trabajo, figura 1b.

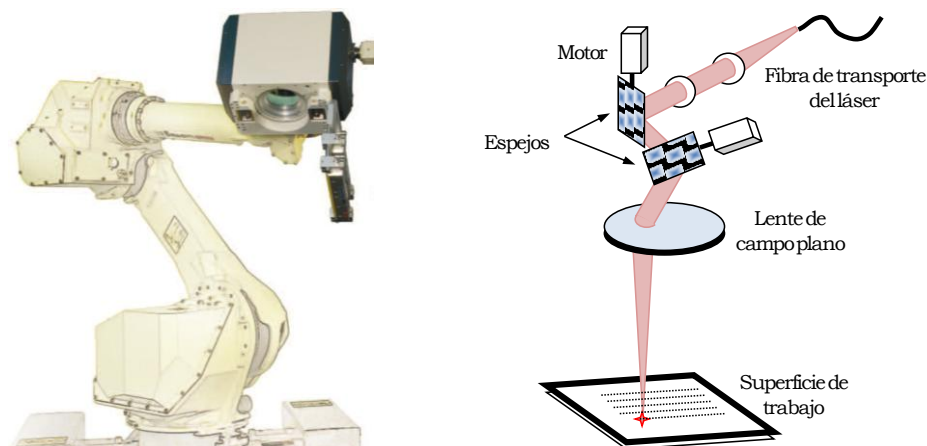


Figura 1. a) Escáner posicionado en el brazo de un robot para procesos láser remotos (Blackbird); b) Esquema de los componentes básicos de un escáner

La principal ventaja de los escáneres es que trabajan lejos de la zona a procesar, pudiendo así llegar a zonas poco accesibles, con buena calidad de haz láser. Por esto, a los procesos de fabricación por láser que utilizan escáneres se les añade la palabra *remoto* (“on the fly”) [6]. En la actualidad los escáneres se utilizan en varios procesos de fabricación sobre todo en la industria automovilística como son el corte, el marcado ó la soldadura por láser remota. Poco a poco los procesos por láser remotos se están introduciendo en otros sectores como el del molde y van apareciendo nuevos procesos como el texturizado, el pulido ó el taladrado por láser remoto. En cambio, tratamientos superficiales por láser, como el temple en su variante remota, son muy poco conocidos pero se están empezando a estudiar [7]. Por último decir que todo esto da una idea de la flexibilidad en cuanto a proceso que tienen los sistemas de ópticas móviles ó escáneres.

Así, en el presente trabajo se pretende estudiar el proceso de temple por láser remoto que a diferencia del temple convencional, en el que las dimensiones del haz láser son de la anchura del área a templar, esta anchura se forma mediante barridos muy rápidos de un haz de menores dimensiones. Además, por tratarse de un tratamiento térmico necesita un control y un conocimiento preciso del registro térmico que se ha dado durante el proceso. Para ello, se analizarán las distintas variables que intervienen y se compararán con el proceso de temple convencional. También se estudiarán las estrategias que se pueden seguir en cuanto al barrido del área a templar y se evaluará el registro térmico de una serie de ensayos medidos por métodos sin contacto. Además, se estudiará el área de material templado mediante medición de microdurezas, ya que el principal problema de la superposición de trayectorias en el proceso de temple por láser es el reblandecimiento parcial de las zonas solapadas [9].

2. PARÁMETROS DEL PROCESO

A diferencia del temple por láser convencional, en el temple por láser remoto coexisten dos velocidades, la de escaneo y la de avance.

El parámetro característico de este proceso es la *velocidad de escaneo* [mm/s] que es la velocidad de movimiento del haz láser. Está, es controlada por el sistema óptico de espejos del escáner y puede llegar a superar los 7000 mm/s.

Por otro lado está la *velocidad de avance* [mm²/s] que es el movimiento real de avance de la línea templada sobre la pieza. Sus dimensiones se dan en velocidades de área barrida, no en velocidades lineales, ya que es dependiente de la velocidad de escaneo [mm/s] y la anchura del área barrida [mm], además de la velocidad relativa entre máquina, ó robot, y escáner. Dependerá de cómo se haga la programación de la trayectoria en el proceso.

Además, en el proceso de temple por láser, es necesario controlar la temperatura de la superficie de la pieza en tiempo real, lo que normalmente se hace mediante pirometría

bicromática. Esta tecnología consigue medir la temperatura real en la superficie de la pieza sin contacto, de forma puntual, sin prácticamente retrasos térmicos y adquiriendo hasta 1000 datos por segundo. En el caso del temple por láser remoto, sobre el registro térmico adquirido durante el proceso se pueden distinguir una *temperatura de fondo o base* y unas *temperaturas de pico* sobre la temperatura de fondo que se asemejan en algunos casos a las que aparecen en el proceso de rectificado [10].

En el proceso de temple remoto, para barrer el área a templar se han usado dos tipos de estrategias, la de *barrido continuo* y la de *barrido pulsado*, que se explican a continuación más detalladamente.

Estrategia de barrido continuo

La estrategia de barrido continuo consiste en ir moviendo el láser en una línea ascendente y descendente a la velocidad de escaneo mientras la pieza se mueve en la mesa de trabajo con la velocidad de avance. En este caso el centro del haz láser solo pasa una vez por cada punto. Es el esquema más sencillo posible y se puede hacer con escáneres de una sola dimensión pero no es posible variar la densidad de energía del haz en el sentido de avance.

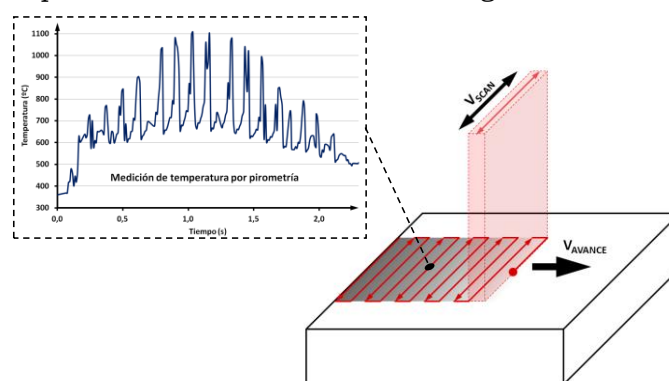


Figura 2. Estrategia de temple por láser de barrido continuo

Estrategia de barrido pulsado ó de barrido por áreas

La estrategia de barridos múltiples consiste en ir proyectando distintas áreas que se barren con el láser a la velocidad de escaneo mientras la pieza se mueve con la velocidad de avance. En este caso el haz láser pasa varias veces por el mismo punto y por lo tanto se podría configurar la potencia para dar densidades de energía variables en las distintas zonas del barrido. En el temple por láser convencional para poner en el haz la densidad de energía más apropiada es necesario fabricar "a medida" un elemento fijo que puede ser una óptica difractiva [11] ó un espejo facetado. En el caso de los escáneres y con este procedimiento de barrido es posible cambiar la densidad de energía en el haz simplemente con un cambio de trayectoria.

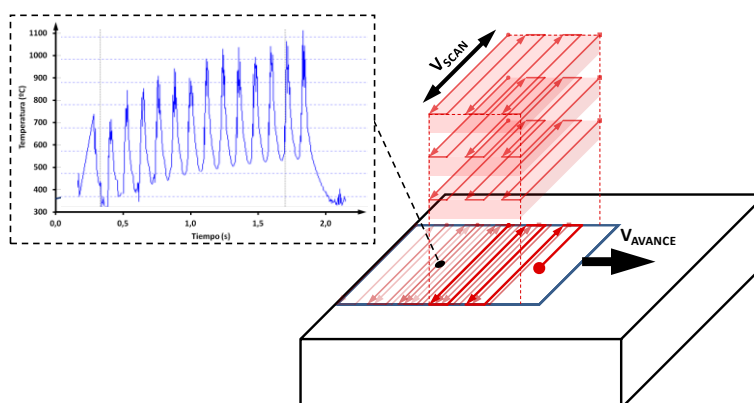


Figura 3. Estrategia de temple por láser de barrido múltiple o de barrido por áreas

3. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO EXPERIMENTAL

Para la realización de los ensayos de temple con escáner en el presente trabajo se ha utilizado un centro de procesamiento láser de materiales especialmente diseñado para la experimentación por el Grupo de Fabricación de Alto Rendimiento del Dpto. de Ingeniería Mecánica de la UPV/EHU denominado *Aktinos 500*. Se trata de un centro de mecanizado *Kondia B500* reconvertido en el que se han eliminado elementos como el cabezal, el cambiador de herramientas, el filtro del fluido de corte, etc. y se han añadido dos láser industriales: un láser de diodos de alta potencia de 1,5KW con un cabezal de aporte por láser y un láser de fibra de 1KW con dos fibras de salida. Una de ellas de 600 μm a la que se ha acoplado otro cabezal de laser cladding y una fibra de 50 μm acoplada a un escáner 2D. El escáner es un *Scanlab™ Hurriscan 25* de dos ejes, con el que se puede barrer un área de 120x120mm. En la figura 4 se muestra el centro de procesamiento láser *Aktinos 500*.

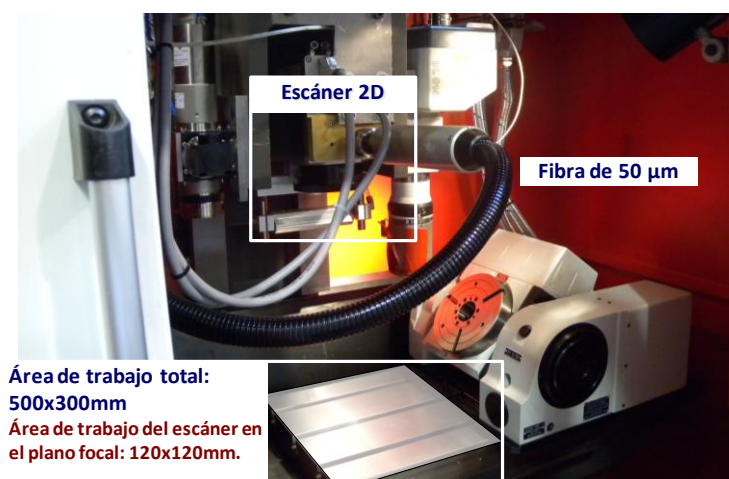


Figura 4. Menú contextual para cambiar la posición de una figura en MS Office 2010

Todos los ensayos se han grabado con una cámara de alta velocidad *Olympus BW 2000* fps con el objetivo de disponer de datos de la trayectoria real realizada por el haz láser. Dado que el escáner es capaz de guiar el haz a velocidades superiores a 6 m/s, se han grabado videos a 1000 imágenes por segundo para poder observar la trayectoria del haz de forma continua y sin saltos. También se ha medido la temperatura alcanzada mediante un pirómetro de dos colores *IMPAC IGAR 12 LO* cuyo rango de medida es de 350°C hasta 1300°C. Por último, se ha medido la dureza resultante en cada ensayo con un microdurómetro *Future-tech FM800*.

Los ensayos se han realizado sobre un acero estructural poco aleado, AISI 1045, el cual es empleado en diversos componentes de maquinaria y que suele requerir tratamientos de temple superficial. La composición del acero utilizado se muestra en la tabla 1.

Elemento	C	Mn	P	S
% Peso	0.45-0.50	0.60-0.90	0.04 (Máx.)	0.05 (Máx.)

Tabla 1. Composición del acero estructural AISI 1045

Por otro lado, para la puesta a punto del proceso, se ha caracterizado el escáner en el plano de trabajo. Los sistemas ópticos que componen el escáner necesitan complicadas correcciones que normalmente vienen hechas de fábrica en el plano focal, $Z = 0\text{mm}$, y que dependen de la configuración del escáner [12]. Además, hay que tener en cuenta que para el temple por láser y otros procesos de tratamiento superficial se trabaja con el haz desenfocado [7], esto hace que las dimensiones de la zona a tratar respecto de las programadas varíen considerablemente dependiendo del plano de trabajo (figura 5a). En este caso se ha trabajado en el plano $Z = +50\text{mm}$. Para su caracterización se ha hecho una cuadrícula sobre una pintura negra a lo largo de todo el plano de trabajo y se han medido

las dimensiones X e Y de las distintas cuadrículas en un proyector de perfiles. Como se observa en la figura 5b, en este plano de trabajo la zona central tiene el mayor error en la distorsión total, que se ha sacado haciendo una media cuadrática de la distorsión correspondiente a las dimensiones X e Y de cada cuadrícula, pero su variación es menor y por tanto es más fácil corregirla. Así, la zona central se considera la zona óptima y es en la se ha trabajado.

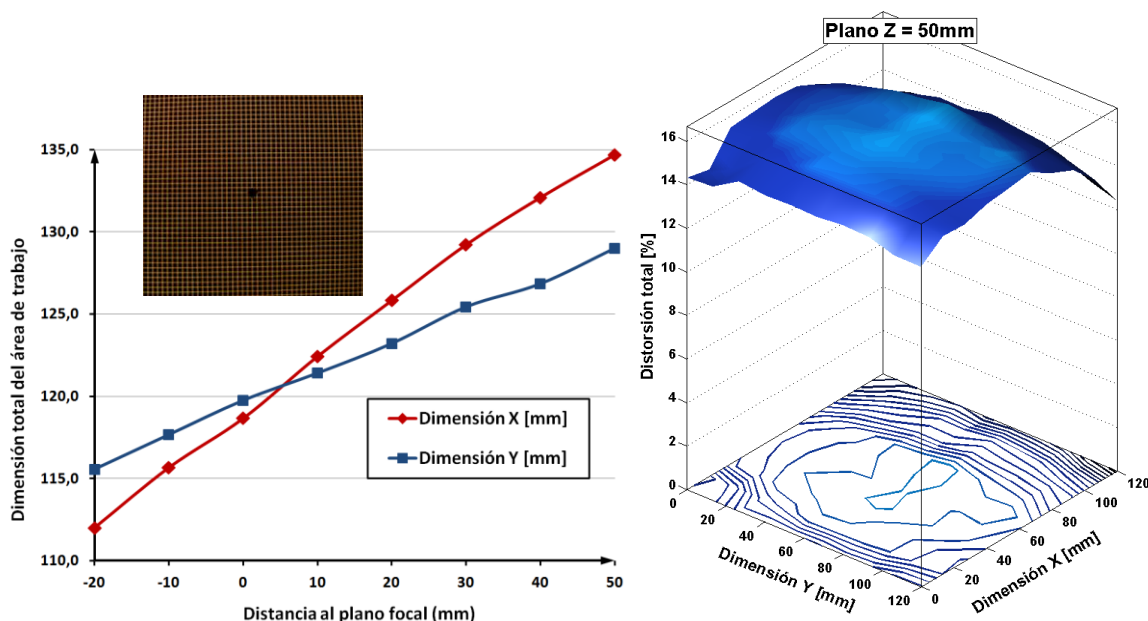


Figura 5. a) Variación de la dimensión total del espacio de trabajo en distintos planos; b) Distorsión local a lo largo del espacio de trabajo en el plano $Z = +50\text{mm}$.

4. ENSAYOS EXPERIMENTALES: DISCUSIÓN Y RESULTADOS

El planteamiento de los ensayos experimentales se ha hecho en dos fases. En la primera fase, al no encontrar documentación en la bibliografía consultada sobre los posibles valores de las distintas variables del proceso, se ha realizado un barrido con distintas condiciones de trabajo para las dos estrategias planteadas. Posteriormente, en una segunda fase, se han realizado unos ensayos sistemáticos para observar la influencia de las nuevas variables, la velocidad de escaneo y la separación entre pasadas, en el proceso de temple por láser remoto.

Así, en la *primera fase* se han ido probando distintas variables del proceso, monitorizando en todo momento mediante pirometría infrarroja los registros térmicos de cada ensayo e intentando maximizar la temperatura de fondo minimizando las temperaturas de pico. Los parámetros óptimos obtenidos en cuanto a profundidad máxima de capa templada se muestran en la tabla 2 para las estrategias de barrido continuo y de barrido múltiple.

Estrategia de barrido continuo	Estrategia de barrido múltiple
Potencia = 500 W	Potencia = 1000 W
Velocidad de avance = 6 mm ² /s	Velocidad de avance = 15 mm ² /s
Velocidad de escaneo = 200 mm/s	Velocidad de escaneo = 3000 mm/s
Anchura de temple = 10 mm	Anchura de temple = 10 mm
Separación entre pasadas = 0.03 mm	Separación entre pasadas = 0.1 mm
Profundidad templada = 510 μm	Profundidad templada = 230 μm
Desenfoque = 40 mm	Desenfoque = 50 mm

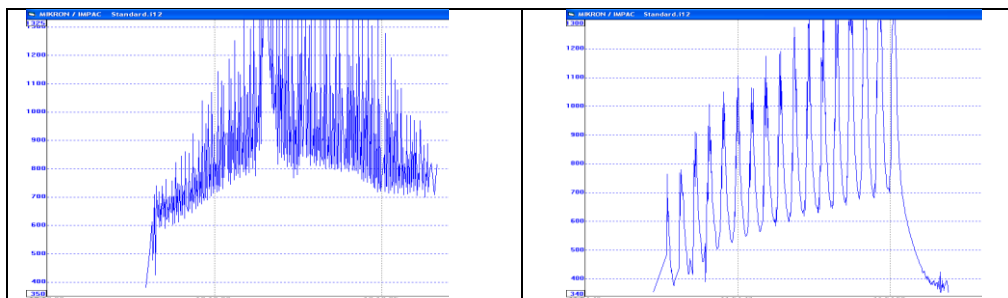


Tabla 2. Parámetros con los que se ha conseguido la máxima profundidad templada en cada estrategia

En una *segunda fase*, y una vez observados los resultados anteriores, se opta por realizar una serie de ensayos sistemáticos empleando la estrategia de barrido continuo. El motivo de la elección de esta estrategia es que el control de los parámetros es más sencillo y los resultados obtenidos son más homogéneos. Con estos ensayos se pretende comparar el temple por láser convencional con el temple por láser con escáner. Para ello, se han mantenido la velocidad de avance y la potencia en todos los ensayos y se han considerando distintos valores de velocidad de escaneo y separación entre pasadas, y así, poder ver el efecto de las variables del escáner. Los distintos parámetros ensayados con los resultados en profundidad de capa templada se observan en la tabla 3.

Ensayo N°	Potencia (W)	Velocidad de avance (mm ² /s)	Desenfoque (mm)	Velocidad de escaneo (mm/s)	Separación entre pasadas (mm)	Profundidad templada (μm)
C17	400	10	40	500	0.02	112.6
C18	400	10	40	2000	0.005	33.4
C19	400	10	40	1000	0.01	57.4
C20	400	10	40	250	0.04	139.3
C21	400	10	40	125	0.08	265.2
C22	400	10	40	4000	0.0025	-
C23	400	10	40	75	0.133	342.3
C24	400	10	40	667	0.015	99.8
C25	400	10	40	333	0.03	176.8

Tabla 3. Parámetros utilizados en los ensayos de la segunda fase.

De los resultados obtenidos en la segunda fase se puede concluir que los parámetros de barrido programados en el escáner influyen en el proceso de forma que se varía el campo térmico generado y, por tanto, el ciclo de calentamiento-enfriamiento que se da en el temple por láser de la superficie tratada. Además, se observa que en ningún caso se ha alcanzado una profundidad de capa templada por encima de los 0,5 mm de espesor. A velocidades de escaneo bajas con mayores separaciones entre pasadas la profundidad de capa templada es también mayor. Esto es debido al tiempo que se encuentra en cada ciclo sobre la temperatura de austenización, siendo este un factor con mucho peso sobre el espesor final templado.

Un parámetro muy importante a considerar en el proceso de temple por láser es la *dureza final* a la que ha llegado la pieza. Para aceros al carbono con pocos elementos de aleación depende en gran medida del contenido en carbono. Se han hecho ensayos de microdurezas Knoop (figura 6) y se ha observado que los valores de dureza de la zona templada con escáner son similares a las obtenidas, para el mismo material, que en el temple por láser convencional, entre 55 y 65 HRC. Por otro lado, en este proceso no se ha observado la pérdida de dureza o el revenido parcial que se da en el temple por láser convencional cuando hay un solapamiento de trayectorias. Esto es debido a que a pesar de que entre cada pasada haya un descenso de temperatura no es lo suficiente para que se inicie la formación de martensita, estructura que le da la dureza al acero AISI 1045 tras ser templado.

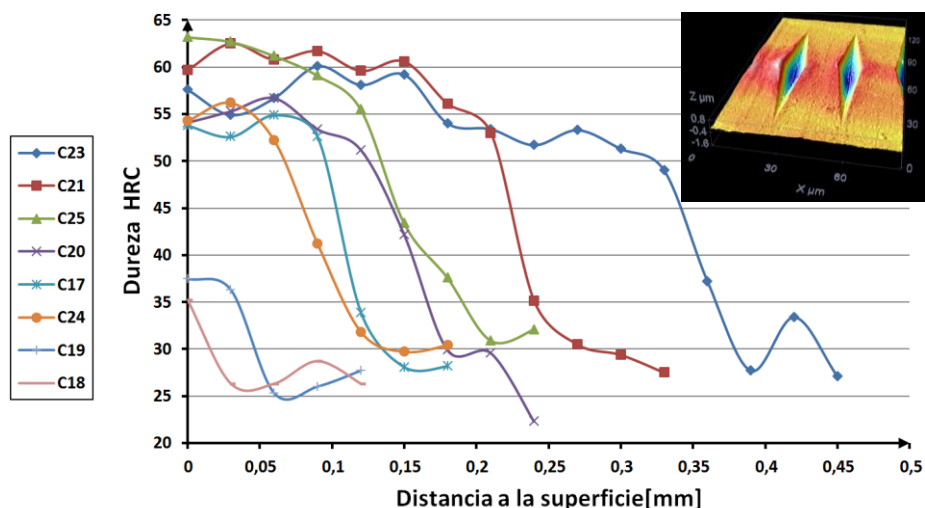


Figura 6. Variación de la dureza a lo largo de la zona templada por láser en los distintos ensayos

Otro parámetro a considerar es el *espesor de capa templada*. En el temple por láser con escáner estos espesores son bastante menores, no superan las 500 μm , lo cual puede ser una gran desventaja en algunas aplicaciones que requieran temple profundos. Por otro lado, el corte de la zona templada pasa de tener una forma semi-elíptica a ser de un espesor prácticamente constante en toda la zona templada como se puede observar en la figura 7. Este hecho sí que puede ser beneficioso ya que en el temple por láser convencional se emplean ópticas especiales para conseguir estas formas de capas templadas.

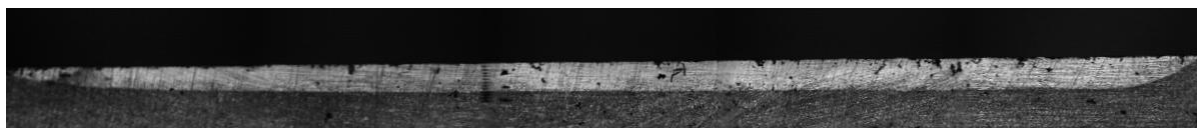


Figura 7. Corte transversal del ensayo C21 con una anchura de la zona templada de 10 mm

En la figura 8a y 8b se muestran dos ensayos, uno en el que el estado superficial después del temple por láser con escáner es óptimo y otro en el que se observa la fusión de una micro-capa sobre la superficie que ha provocado daños en forma de grietas que no serían aceptables en un supuesto industrial. Estos ensayos se han realizado a potencia constante, sin utilizar un control en lazo cerrado de la potencia. Utilizando una consigna de temperatura como referencia se habrían mejorado algunos resultados, sobre todo aquellos donde se ha dado fusión parcial del material. Por ello se puede concluir diciendo que es muy importante controlar el aporte de energía mediante la correcta elección de los parámetros del láser, escáner y máquina.

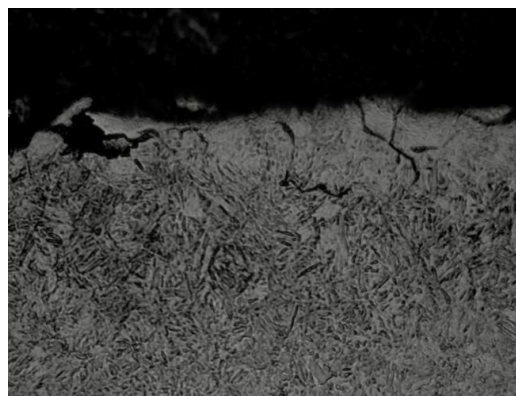
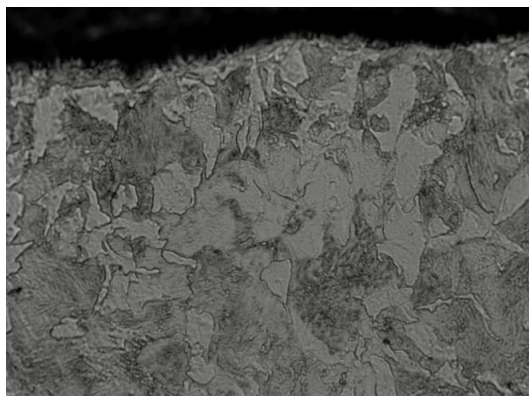


Figura 8. a) Superficie templada con las condiciones óptimas; b) Sobrecalentamiento de la superficie en la que han aparecido micro-grietas

5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha planteado un nuevo método de temple por láser basado en escáneres que provocan el movimiento del haz láser a gran velocidad. Para realizar una primera aproximación a este proceso se ha comparado con el temple por láser convencional y se han llegado a las siguientes conclusiones sobre el proceso de temple por láser remoto:

- Existen dos variables más que entran en juego y que es necesario controlar, la velocidad de escaneo y la separación entre pasadas contiguas del láser.
- Mediante la estrategia de barrido continuo es posible levantar más la temperatura de fondo sin que las temperaturas de pico lleguen a fundir la superficie.
- Mediante la estrategia de barridos pulsados o por áreas se puede variar la densidad de energía que se le da a la pieza a lo largo del movimiento de avance, para imitar el efecto de las ópticas fijas en el temple por láser convencional.
- No se han llegado a los espesores de capa templada que se consiguen con el temple por láser convencional. En cambio, el perfil templado en profundidad es más homogéneo con formas rectangulares.
- La dureza final de la zona templada, para el AISI 1045, varía entre 55HRC y 65HRC.
- Se pueden obtener temples más localizados, menos energéticos y por lo tanto con menores distorsiones térmicas. Además, con los parámetros adecuados, no existe el efecto de revenido entre pasadas y pueden obtenerse líneas templadas más anchas.

Por último decir que en el caso de que se plantee introducir este proceso en un sistema de producción industrial sería posible utilizar el mismo equipo usado en otro proceso remoto por láser pero habría que plantear un sistema de control de temperatura a tiempo real durante el proceso.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha desarrollado dentro del proyecto “Tratamiento y modificación de superficies funcionales de alto valor añadido mediante radiación láser (SURFACER)” DPI2010-20317-C02-01, financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad.

7. REFERENCIAS

- [1] R. Poprawe, *Tailored Light 2 - Laser Application Technology*, Springer, (2011).
- [2] H. K. D. H. Bhadeshia. *Steels for bearings*, *Progress in Materials Science*, 57 (2012), 268-437.
- [3] M. Miralles, *Laser Hardening of Cutting Tools*, Tesis Doctoral, Lulea University of Technology, Lulea, (2003).
- [4] BLACKBIRD Robotics. “*Solutions for robotic laser processing*”. Disponible en la web: <http://www.blackbird-robotics.de/>. Consultado el 29 de mayo de 2012.
- [5] DMG/MORISEIKI. “*Gama de máquinas LASERTEC*”. Disponible en la web: <http://www.moriseiki.com/>. Consultado el 29 de mayo de 2012.
- [6] K. Kim, K. Yoon, J. Suh, J. Lee. *Laser Scanner Stage On-The-Fly Method for ultrafast and wide Area Fabrication*, *Physics Procedia*, 12 (2011), 452-458.
- [7] F. Klocke, C. Brecher, D. Heinen, C. J. Rosen, T. Breitbach. *Flexible scanner-based laser surface treatment*, *Physics Procedia*, 5 (2010), 467-475.
- [9] R. S. Lakhkar, Y. C. Shin, M. J. M. Krane. *Predictive modeling of multi-track laser hardening of AISI 4140 steel*, *Materials Science and Engineering A*, 480 (2008), 209-217.
- [10] I. Pombo, B. Izquierdo, N. Ortega, S. Plaza, J. A. Sánchez, *Fabricación de alto rendimiento: rectificado*, Publicaciones - E.T.S. Ingeniería de Bilbao, (2011).
- [11] M. K. H. Leung, H.C. Man, J. K. Yu. *Theoretical and experimental studies on laser transformation hardening of steel by customized beam*, *International Journal of heat and Mass Transfer*, 50 (2007), 4600-4606.
- [12] M. F. Chen, Y. P. Chen, W. T. Hsiao. *Correction of field distortion of laser marking systems using function*, *Optics and Lasers in Engineering*, 47 (2009), 84-89.