

Optimización del recorrido y de la potencia de un haz láser de CO₂ en el tratamiento térmico de válvulas de motores diesel

J.M. Amado*, C. Álvarez*, G. Nicolás*, A.J. López*, J.A. Pérez*, A. Ramil*,
E. Saavedra*, J. Sanesteban*, M.J. Tobar* y A. Yáñez*

Resumen

En este trabajo se modeliza el proceso de tratamiento de válvulas de motores diesel mediante láser de CO₂. Este tratamiento consiste en la refusión de una aleación base níquel previamente proyectada por plasma sobre un asiento de válvula. La resolución de la ecuación de conducción del calor se presenta complicada, en el momento en el que se incluyen propiedades termofísicas dependientes de la temperatura y una descripción realista de la geometría de la pieza. En la modelización es necesario utilizar métodos numéricos y se ha escogido, en este caso, el Método de los Elementos Finitos en el marco del programa comercial ANSYS®. La aplicación del estudio paramétrico, tanto numérico como experimental, previamente realizado sobre probetas planas a geometrías más complejas, requiere de un ajuste fino de esos parámetros para conseguir resultados comparables y tratamientos equivalentes. Entre otros aspectos del problema cabe resaltar la necesidad de obtener un mapa de isoterma paralelo a la superficie tratada; además la naturaleza circular de la trayectoria que recorre por completo el asiento de la válvula hace que el haz láser, hacia el final de su trayectoria, vuelva sobre el punto inicial, pasando por puntos que ya han sido calentados en el arranque del proceso, por lo tanto el suministro de potencia sobre la pieza ha de adaptarse a estas nuevas condiciones. Evidentemente, es necesario realizar la simulación de la transición de fase, lo que se consigue con las propiedades termofísicas adecuadas y una correcta estimación del coeficiente de absorción en cada una de las fases. Este trabajo muestra las ventajas del modelado teórico como apoyo para la optimización del tratamiento térmico superficial por láser de piezas de geometría compleja partiendo de validaciones realizadas en piezas más sencillas.

Palabras clave

Refusión por láser. Modelo de elementos finitos. Transmisión de calor. Monitorización en tiempo real. Válvulas.

Optimization of the laser path and power in the surface heat treatment of diesel engine exhaust valves

Abstract

In this article, a model for the process of CO₂ laser treatment of diesel engine exhaust valves is presented. The treatment consists on the remelting of a nickel based alloy which has been previously plasma sprayed on the valve seat. Such process can be well described by means of a transient heat transfer equation, even if some numerical method must be applied when both temperature dependent thermophysical properties and realistic geometry description of the workpiece are taken into account. For this work the Finite Element Method, within the framework of ANSYS®, was chosen. to solve that equation and this was done in the framework of ANSYS®. The use of the process parameters previously assessed during a the theoretical and experimental study of box shaped workpieces requires a fine tuning based on simulation in order to be sure that the treatment of the valve seat gets comparable results to that of the flat workpieces. Among the important conditions to be satisfied stands the need for the temperature map to be parallel to the valve seat surface and so have the same treated depth. Besides, as the beam describes a circular path, coming back to the starting position, the initial temperature at that point will be higher than for rest of the workpiece. Therefore the beam power has to be optimized

(*) Universidad de La Coruña. Departamento de Ingeniería Industrial II. Escuela Politécnica Superior. Mendizábal s/n. 15403 Ferrol, La Coruña, España.

in order to get adapted to this new situation. Phase transition is included in the model by using the right thermophysical properties and a correct estimation of the effective absorption coefficients in both phases. This work shows the advantages of the process modelling to support the optimization of laser surface treatment of complex geometry workpieces using the model validation performed in simpler workpieces.

Keywords Laser remelting. Finite element modelling. Heat transfer. On-line monitoring. Valve.

1. INTRODUCCIÓN

Los procesos industriales de tratamiento de materiales con láser, más tradicionales, son el corte, la soldadura, el taladrado y los tratamientos superficiales; todos ellos han sido ya estudiados tanto de manera teórica como experimental^[1 y 2]. Como denominador común a todos ellos es necesario hacer notar que, los parámetros experimentales que han de ser ajustados son la potencia incidente, la velocidad relativa entre la pieza y el haz y diámetro de este último. Entre los tratamientos térmicos superficiales se encuentra la refusión por láser; en este caso, se trata de refundir recubrimientos de una aleación tipo NiCrBSi depositados por plasma sobre asientos de válvula; el objetivo es mejorar, a través de la refusión, la unión metalúrgica de las diferentes partículas que componen la capa proyectada y de éstas con el sustrato, para así mejorar la unión entre el recubrimiento y el material base y disminuir la fragilidad de la capa proyectada.

En el contexto de esta modelización el haz láser se considera como una fuente de calor en movimiento, con una distribución de intensidad bien conocida que induce una serie de condiciones de contorno sobre la superficie del material. Este modelo incluye efectos realistas tales como propiedades termofísicas dependientes de la temperatura (calor específico, densidad y conductividad térmica). La simulación del haz incluye la distribución espacial de su energía que es la que corresponde al modo TEM_{01*}. La validación del modelo se realiza a través de los registros de los diferentes sensores y de la determinación de la forma de la región fundida, para el caso de una probeta en forma de caja. En lo que sigue se presentará el modelo propuesto junto con alguno de los resultados obtenidos que sirven para la validación del mismo.

2. MODELADO DEL PROCESO

Cuando la superficie de nuestra pieza de trabajo es irradiada se induce un campo de temperaturas en la pieza; el objetivo del modelo propuesto es encontrar la solución de este campo de temperaturas y su evolución con el tiempo, a partir de las condiciones de contorno inducidas por el movimiento del haz láser sobre la superficie del material, teniendo únicamente en cuenta procesos de conducción. El modelo utilizado, como ocurre en otros modelos de tratamiento térmico, tiene como entrada la distribución de energía del haz, la geometría de la probeta que está siendo tratada y las propiedades termofísicas, densidad (ρ), capacidad calorífica (C_p) y conductividad térmica (K), dependientes de la temperatura^[2 y 3].

Asimismo, este modelo incluye la posibilidad de utilizar coeficientes de absorción efectivos diferentes en cada una de las fases, aunque dentro de cada una de ellas, estos, se suponen constantes. Se considera como coeficiente de absorción efectivo la fracción de energía incidente que es absorbida por la pieza. La manera de obtener estos coeficientes de absorción es diferente según se trate de la fase sólida o de la fase fundida^[4]. Determinados los coeficientes de absorción, se tienen todos los ingredientes para resolver la ecuación de conducción del calor, para lo que se utiliza el Método de los Elementos Finitos con la ayuda del Programa ANSYS®.

La simetría cilíndrica de la válvula obliga a la realización de un tipo especial de mallado (Fig. 1) en trapecios, que permite ir reduciendo la densidad de nodos conforme decrece la distancia al eje de la válvula, mejorando otras soluciones a este problema^[5] que tienden a eliminar la parte central del cilindro. Sobre el asiento de la válvula se depositó una capa de aleación METCO 16C^[6] de 0,5 mm (Fig. 1) de espesor que ha de ser refundida conforme el láser avanza sobre la superficie del asiento.

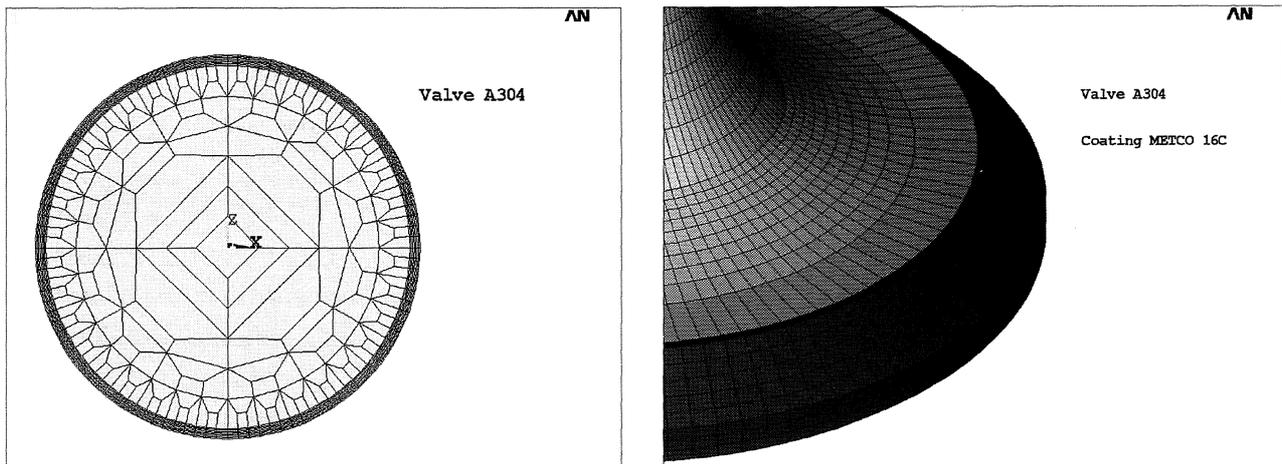


Figura 1. Detalle del mallado trapezoidal realizado en la válvula (izquierda), a la derecha en color oscuro, aspecto del recubrimiento depositado sobre el asiento.

Figure 1. Detail of trapezoidal mesh performed on valve (left). Aspect of coating deposited on seating (right).

3. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Para la determinación experimental de los coeficientes de absorción efectivos en cada una de las fases es necesario un sistema de irradiación y monitorización que consiste en un láser de CO₂ de 2.200 W. Un pirómetro, que cubre el rango que va desde 450 hasta 1.850 °C con una precisión mejor que el 1%, se utiliza para la determinación de la temperatura en la superficie del material. La señal del pirómetro, que oscila entre 450 mV y 1.850 mV, está conectado a un sistema de lectura que consiste en una tarjeta de adquisición conectada a un PC. La capacidad de muestreo de la tarjeta de adquisición instalada es de 5×10^5 muestras por segundo, con una resolución de 12 bits; la capacidad de muestreo máxima por canal es, entonces, la octava parte de la capacidad total. El periodo de muestreo utilizado es de 20 ms, que se ha estimado suficiente dado el tiempo característico del proceso estudiado.

El sistema de monitorización se completa con una cámara CCD que proporciona secuencias de la emisión de luz visible que acompaña al proceso de fusión^[4]. De la forma y tamaño de la región ilumina-

nada puede extraerse información adicional sobre el proceso, que ayuda a la determinación del coeficiente de absorción efectivo.

4. RESULTADOS

Se tomaron unas probetas de $50 \times 50 \times 5$ mm³ de AISI 304^[7] y se procedió a determinar el coeficiente de absorción efectivo para cada una de las fases obteniendo como resultado $\alpha_L = 0,129$ y $\alpha_S = 0,280$. Introducidos estos datos en el modelo, éste hace un buen seguimiento de la profundidad y anchura de la región fundida (Fig. 2), en parcial acuerdo con lo determinado con ayuda de la monitorización y de la caracterización de las probetas tratadas. La profundidad obtenida en el modelo, transcurridos 6 s desde el inicio del proceso, se hace tender al valor que se encuentra al analizar las probetas planas tratadas. En lo referente a la anchura que predice el modelo, una vez ha sido fijada la profundidad, este acuerdo no es completo, puesto que se encuentran discrepancias que están en el 15 %, diferencia aceptable dado el conocimiento limitado que se tienen de las propiedades termofísicas del material proyectado.

Tabla I. Composiciones (% en peso)

Table I. Chemical composition (% wt.)

	B	C	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	P	S	Si
AISI 304		< 0,08	18-20		> 66	< 2		8-10,5	< 0,045	< 0,03	< 1
METCO 16C	4	0,5	16	3	2,5		3	67			4

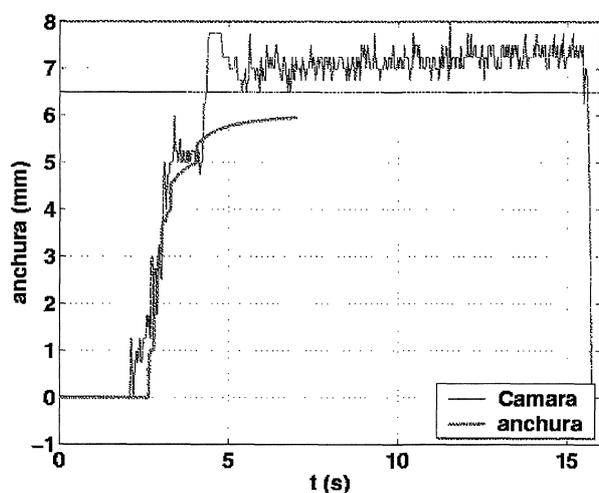
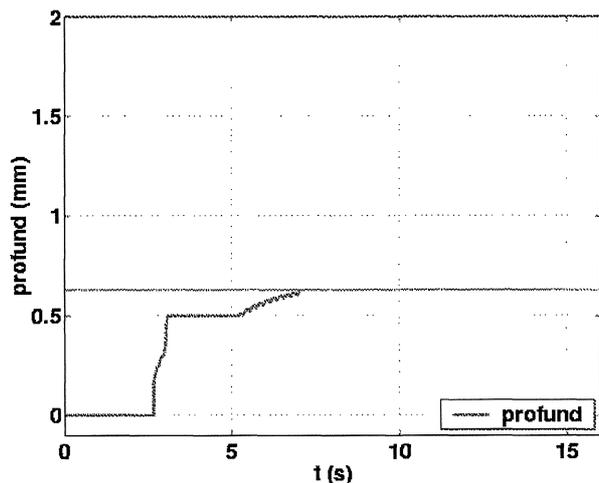


Figura 2. Profundidad y anchura de la región fundida. En color oscuro el resultado del modelo, las líneas horizontales aparecen de la determinación experimental de altura y anchura, en trazo más fino los datos proporcionados por la cámara CCD.

Figure 2. Depth and width of melted zone. The model application is shown in dark colour and the CCD data as a fine plot.

A continuación corresponde hacer el estudio paramétrico para el caso del asiento de la válvula; utilizando como punto de partida el estudio realizado sobre la geometría plana se plantean los conjuntos de parámetros de la tabla II; σ es la longitud del asiento; la posición del haz sobre el asiento se mide comenzando en la parte inferior de este, en el vértice agudo, y terminando en su parte superior. El estudio paramétrico tiene dos objetivos fundamentales: de una parte, eliminar los poros y grietas asociados al recubrimiento por plasma y, de otra, mejorar la unión metalúrgica entre el recubrimiento y el sustrato, con un mínimo grado de

Tabla II. Estudio paramétrico realizado

Table II. Parametric study

#	Potencia (W)	Velocidad (mm/s)	Anchura del haz (mm)	Posición del haz
C ₀	2.250	2,5	2,4	0,8 σ
C ₁	2.250	4,0	2,4	0,6 σ
C ₂	2.250	4,0	2,4	0,6 σ
C ₃	2.250	2,5	1,8	0,6 σ
C ₄	2.250	4,0	2,4	0,4 σ
C ₅	2.250	4,0	1,8	0,6 σ
C ₆	2.250	4,0	1,8	0,4 σ

dilución. En el caso particular de la válvula es necesario que los dos objetivos anteriores se complementen con un mapa de isotermas que permita asegurar la uniformidad del tratamiento en todo el asiento. Para ello, se prestará atención al nodo central y a otros que se encuentren en los extremos, a tres profundidades dadas, tal y como se muestra en la figura 3.

Del análisis conjunto de los casos C₁, C₂ y C₄ se extrae el comportamiento del proceso con la posición del haz sobre el asiento y de aquí, se puede concluir (Fig. 4) que la posición del láser sobre la pieza ha de estar próxima a 0,5 σ .

Del análisis comparativo de los pares (C₄, C₆) y (C₂, C₅) se puede extraer el comportamiento de la forma de las isotermas con la anchura del haz.

Sección asiento válvula

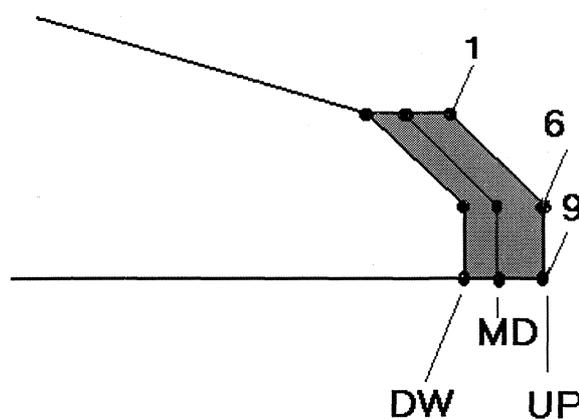


Figura 3. Detalle de los nodos seleccionados para la realización del análisis.

Figure 3. Detail of nodes selected for analysis.

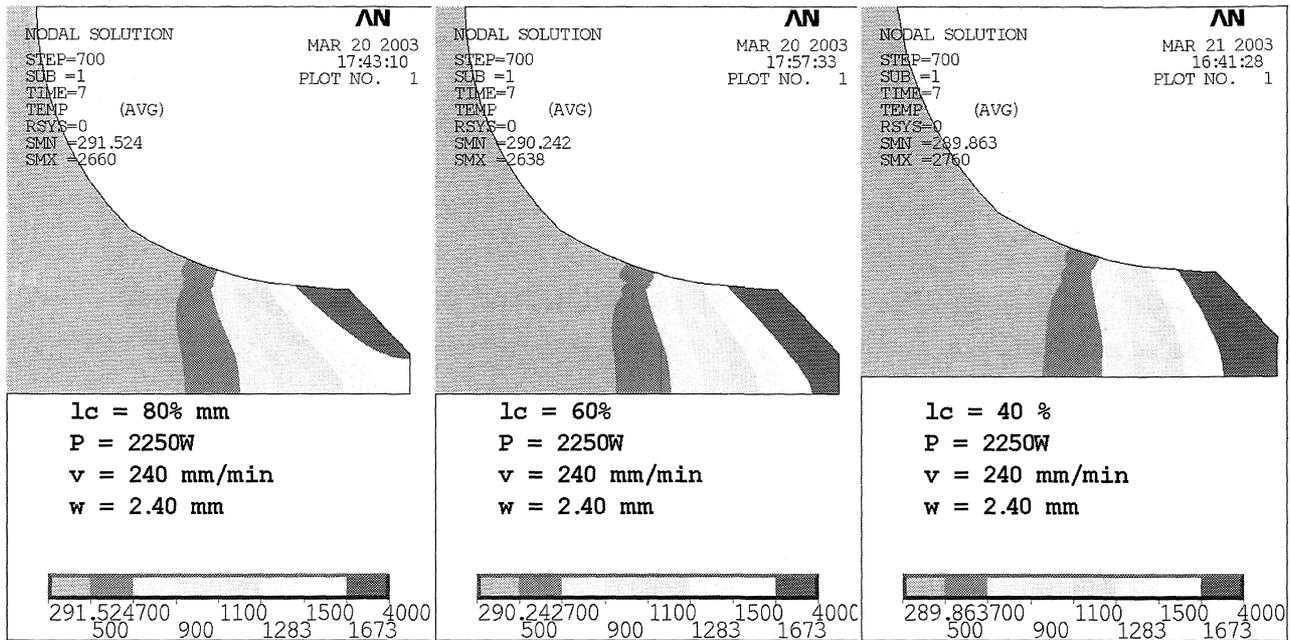


Figura 4. Detalle de la forma de las isotermas para tres diferentes conjuntos de parámetros, en particular para los que corresponden a los casos, de izquierda a derecha, C₁, C₂ y C₄.

Figure 4. Detail of isotherms for three parameter sets, (left to right) cases C₁, C₂ and C₄.

Este comportamiento indica que cuanto menor es el diámetro del láser mayor es el calor depositado sobre la pieza; asimismo el mapa de isotermas es menos paralelo a la superficie del asiento (Fig. 5). El último análisis a realizar trata de estudiar el comportamiento con respecto a la velocidad –pares (C₃, C₅) y (C₀, C₁)– observándose que apenas hay variación en la forma del mapa de isotermas.

Obtenido el efecto de cada uno de los conjuntos de parámetros sobre el proceso, se ha pasado a la optimización de los mismos, determinándose como los más adecuados: una potencia del láser de 2000 W, una velocidad relativa haz-pieza de 4 mm/s, un diámetro de haz de 2,4 mm situado a 0,55 σ medido desde el vértice agudo del asiento. Con todo esto se obtiene un tratamiento uniforme de la válvula recubierta (Fig. 6).

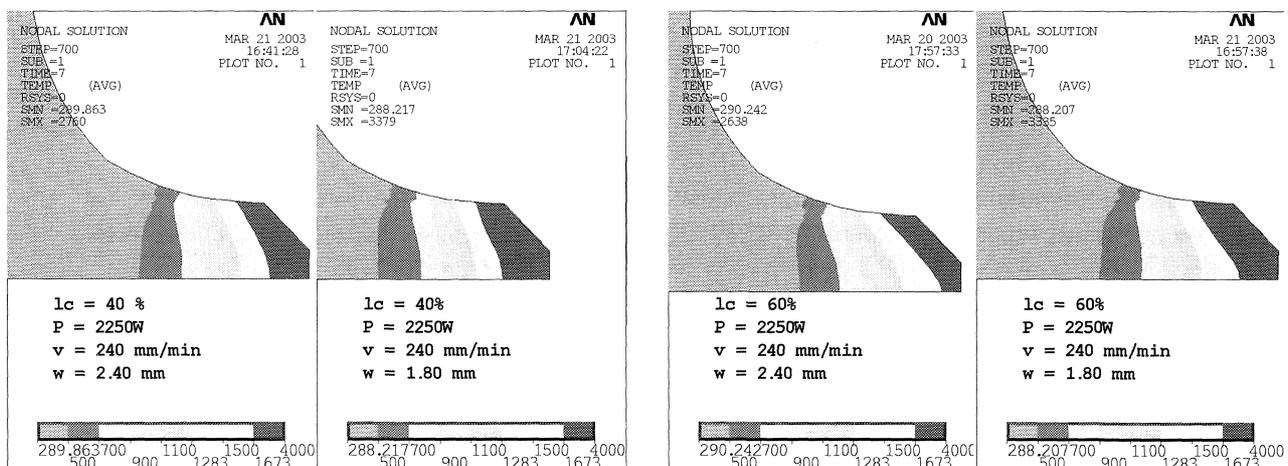


Figura 5. Detalle de las isotermas para cuatro conjuntos diferentes de parámetros, de izquierda a derecha el C₃, C₅, C₀ y C₁.

Figure 5. Detail of isotherms for four parameter sets, (left to right) cases C₃, C₅, C₀ and C₁.

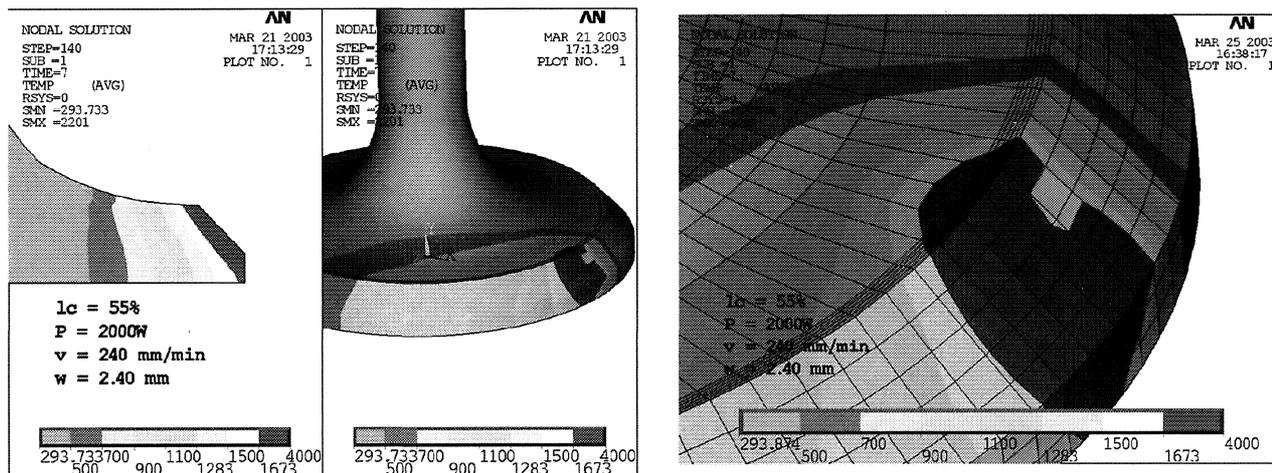


Figura 6. Aspecto del tratamiento realizado sobre la pieza que se ha considerado óptimo.

Figure 6. Aspect of treatment considered to be optimal.

5. CONCLUSIONES

La utilización combinada, tanto de programas de modelización y simulación como de datos experimentales tomados en tiempo real durante el proceso de tratamiento térmico superficial de materiales con láser, permite, con los esquemas de validación adecuados, obtener la forma y tamaño de las regiones fundidas.

Las medidas experimentales realizadas proporcionan datos que son de gran importancia para el ajuste de los coeficientes de absorción efectivos, que están entre las propiedades del material más difícilmente predecibles.

Determinados estos coeficientes es posible modelizar situaciones experimentales más complejas y este es el caso del asiento de válvula escogido. Así, se obtienen los parámetros adecuados para la refusión superficial de ese asiento, previamente recubierto por plasma con una aleación NiCrBSi. Con estos parámetros se fijan las condiciones experimentales para obtener una capa refundida de espesor uniforme y dilución mínima, optimizando otras soluciones obtenidas experimentalmente^[8].

Agradecimientos

Este trabajo fue realizado gracias a la subvención obtenida del Ministerio de Ciencia y Tecnología y Fondos FEDER (1FD97-2020-C03-03), del Progra-

ma Ramón y Cajal de ese mismo Ministerio. Los autores quieren agradecer al Centro de Supercomputación de Galicia toda la ayuda prestada en la realización de la parte computacional de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] G. MUÑIZ, A. CONDE, B.J. FERNÁNDEZ, R. VARELA, I. GARCÍA y J. DE DAMBORENEA, *Rev. Metal. Madrid* 39 (2003) 443-451.
- [2] J.M. AMADO, C. ÁLVAREZ, G. NICOLÁS, A.J. LÓPEZ, J.A. PÉREZ, A. RAMIL, E. SAAVEDRA, J. SANESTEBAN y M.J. TOBAR, *Rev. Metal. Madrid* 40 (2004) 365-368.
- [3] A. YÁÑEZ, C. ÁLVAREZ, A.J. LÓPEZ, G. NICOLÁS, J.A. PÉREZ, A. RAMIL y E. SAAVEDRA, *Appl. Surf. Sci.* 186 (2002) 611.
- [4] J.M. AMADO, C. ÁLVAREZ, G. NICOLÁS, A.J. LÓPEZ, J.A. PÉREZ, A. RAMIL, E. SAAVEDRA, J. SANESTEBAN, M.J. TOBAR y A. YÁÑEZ, *Bol. Soc. Esp. Ceram. V.* (2004) 441.
- [5] K. KOAI, R. DAMASCHEK y H.W. BERGMANN, *Transport phenomena in nonconventional manufacturing and materials processing*, ASME HTD-Vol. 259, 1993, p. 1.
- [6] METCO 16C, Self-Fluxing Nickel-Chromium Alloy Powder. Technical Bulletin n° 10.040. Sulzer Metco.
- [7] K.C. MILLS, *Recommended values of thermophysical properties for selected commercial alloys*, Woodhead Publishing Ltd, ASM International.
- [8] M. CADENAS, J.M. CUETOS, J.E. FERNÁNDEZ, M.R. FERNÁNDEZ, L.M. VEGA y J. DE DAMBORENEA, *Rev. Metal. Madrid* 38 (2002) 457-463.