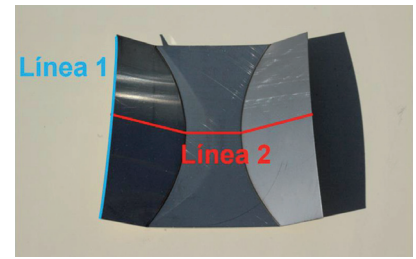


Simulación termo-mecánica de procesos de conformado directo por láser



Thermomechanical modelling of direct laser forming



Carlos Correa-Guinea, Ángel García-Beltrán y José Luis Ocaña

Universidad Politécnica de Madrid. Edificio Tecnológico "La Arboleda". Campus Sur U.P.M. Carretera de Valencia, km. 7.300 - 28031 Madrid.
Tfno: +34 91 332 42 80

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7497> | Recibido: 09/12/2014 • Aceptado: 03/02/2015

ABSTRACT

- Direct Laser Forming (DLF) is a thermo-mechanical process wherein the controlled deposition of laser energy induces internal stresses in the material, producing permanent deformations. The final result is a deformation of the material according to a 2D or 3D geometry, similarly to results obtained by traditional forming processes. The development of fundamental knowledge about DLF technique represents a scientific and technological improvement in the production of low series and sheet metal prototypes. The laser typical variables determine the energy transfer rate and resulting deformations. In this paper, we present a numerical model to simulate the process which permits to analyze the influence of the characteristic variables.
- **Key Words:** laser forming, numerical simulation, finite elements method, temperature gradient mechanism, steel AISI 304.

RESUMEN

El Conformado Directo por Láser (*Direct Laser Forming*, DLF) es un proceso de tratamiento termo-mecánico en el que la deposición controlada de energía, aportada por un láser de potencia, da lugar al desarrollo de tensiones internas en el material que son capaces de producir deformaciones permanentes en el mismo. El resultado final es una deformación del material de acuerdo a una geometría 2D o 3D, de manera semejante al resultado obtenido por procesos de conformado tradicionales. El desarrollo de conocimiento fundamental y aplicado para la técnica DLF representa un gran avance científico-técnico para la producción de bajas series y prototipos en chapa metálica. Las variables características del láser determinan el régimen de transferencia de energía y las deformaciones resultantes. En este trabajo, se presenta un modelo numérico para simular el proceso que permite analizar la influencia de sus variables características.

Palabras Clave: conformado láser, simulación numérica, elementos finitos, conformado por gradiente térmico, acero AISI 304.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años el *conformado directo por láser* (DLF) se ha revelado como una técnica innovadora y prometedora para conformar piezas metálicas mediante la inducción de tensiones plásticas de origen térmico en el material [1]. El desarrollo de la técnica puede representar grandes avances para la producción de bajas series y prototipos con aplicaciones en la fabricación de componentes para las industrias naval, automovilística, microelectrónica y aeronáutica [2], [3], [4] y [5]. El DLF tiene potencial para aportar ventajas tecnológicas significativas sobre los procesos de conformado tradicionales. No requiere fuerzas externas, por lo que la recuperación elástica o *spring-back* se reduce, y permite conformar piezas con curvatura compleja, así como microcomponentes. Se puede comprobar que el fenómeno de *spring-back* en el conformado directo por láser, al no haber herramienta material de conformado, se reduce de forma muy notable, siendo ésta una de las más importantes ventajas del proceso con respecto a los procesos tradicionales. Además, materiales duros y frágiles, como las aleaciones de titanio, de níquel, cerámicos, etc. pueden ser conformados con mayor facilidad que con otros procedimientos [1].

En la bibliografía se han determinado varios tipos de DLF: "*Temperature Gradient Mechanism*" (TGM), "*Buckling Mechanism*" (BM) y "*Upsetting Mechanism*" (UM) [6], [7], [8] y [9]. Este trabajo se centra en el primero de los tipos de DLF enunciados, el TGM, por ser el único fácilmente controlable posibilitando alcanzar ángulos de doblado precisos mediante la superposición de pasadas láser sucesivas. En el TGM, las pasadas sucesivas del haz láser, aplicadas



Figura 1: Mecanismo TGM de conformado directo por láser (DLF)

con los parámetros adecuados, generan un gradiente térmico en el espesor de la pieza. La superficie irradiada aumenta más su temperatura que la superficie opuesta, produciéndose una dilatación mayor en la superficie irradiada. Esto genera tensiones térmicas que si superan el límite de fluencia del material, dan lugar a deformaciones plásticas y, por consiguiente, al doblado final de la pieza. El proceso viene esquematizado en la figura 1, donde queda patente que el sentido del doblado siempre es hacia el láser.

Se trata, por lo descrito en el párrafo anterior, de un proceso complejo en el que intervienen fenómenos termodinámicos y elasto-plásticos. El mecanismo de deformación viene determinado por la evolución y la distribución espacial de la temperatura que, a su vez, se ve influenciada por multitud de variables como la geometría de la pieza, las propiedades del material y los parámetros característicos del láser, entre los que se encuentran: la longitud de onda, la potencia, el tamaño de la distribución transversal del haz láser, la velocidad de procesado y la trayectoria del haz. Tal cantidad de variables hace que la optimización experimental de los parámetros de aplicación para un componente dado requiera un gran número de experimentos. En este sentido, surge la necesidad del modelado numérico como herramienta efectiva para la optimización paramétrica del proceso. Sin embargo, la mayoría de los estudios numéricos recogidos en la bibliografía se centran únicamente en la simulación de una única pasada láser para la generación de doblados 2D [10] y [11] o la simulación de doblados 3D en geometrías simplificadas [12] dado su elevado coste computacional. El modelo numérico que se describe a continuación permite además, gracias a la paralelización del cálculo, la simulación de doblados 3D con varias pasadas sucesivas ajustándose a las condiciones reales de conformado.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

Para controlar la deformación resultante en las piezas es necesario tener en cuenta la influencia de los parámetros característicos del láser, las propiedades del material y las condiciones de contorno. Por esta razón, se ha desarrollado un modelo numérico basado en el método de los elementos finitos (FEM) para simular el proceso real de conformado directo por láser teniendo en cuenta fundamentalmente las aportaciones de [10], [11], [12], [13] y [14]. En la sección 2.1 se describirá el modelo numérico y en la 2.2 el montaje experimental para su posterior validación. En cuanto al material utilizado, todo el estudio se ha realizado en chapas metálicas de acero inoxidable AISI 304 cuya composición se muestra en la Tabla 1.

2.1. MODELO NUMÉRICO

El modelo numérico desarrollado resuelve el problema termo-mecánico haciendo uso del programa comercial de elementos finitos ABAQUS/Standard [15]. A continuación se describen los fundamentos del modelo desarrollado.

2.1.1. Hipótesis de partida

Para el desarrollo del modelo numérico se parte de las siguientes hipótesis: (a) la isotropía del material, (b) se trabaja a temperatura por debajo del límite de fusión, (c) no actúan fuerzas externas sobre la pieza más allá de las restricciones al movimiento

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
≤ 0.07 %	≤ 1.00 %	≤ 2.00 %	≤ 0.045 %	≤ 0.015 %	17.00 % 19.50 %	-	8.00 % 10.50 %

Tabla 1: Composición química del acero AISI 304

impuestas por las condiciones de contorno y (d) el material está inicialmente libre de tensiones residuales.

2.1.2. Elementos y mallado

El modelo numérico se ha implementado mediante un análisis implícito (ABAQUS/Standard) y acoplado de temperatura y desplazamientos. Los elementos utilizados en este análisis tienen 8 nodos y su nomenclatura en ABAQUS es C3D8T [15]. Debido a los elevados gradientes de temperaturas y tensiones que se alcanzan durante el proceso, se hace necesario utilizar elementos de pequeño tamaño en las zonas irradiadas. Por otro lado, como las simulaciones requieren grandes recursos computacionales, los mallados han de optimizarse, reduciendo el tamaño de los elementos en la zona sujeta a los elevados gradientes y aumentando el tamaño de los elementos del mallado que están alejados de dicha zona (ver Figura 2) a través del uso de la función "BIAS" de ABAQUS.

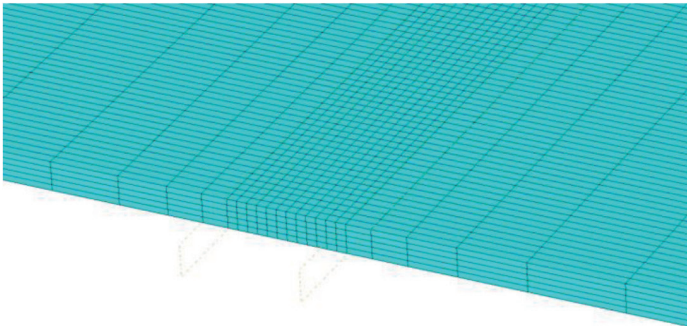


Figura 2: Mallado optimizado con mayor densidad de elementos en la zona irradiada

La optimización del mallado junto a la paralelización del cálculo en múltiples procesadores (paralelización MPI en dos CPUs Intel® Xeon® E5530 con 2.40 GHz y 48 GB de memoria RAM) permite reducir el tiempo de cálculo en torno a un 70 %, pasando de tiempos de cálculo que implicaban más de un día por pasada del haz a unas pocas horas por pasada. No obstante el tiempo de cálculo depende del número de elementos, que a su vez es dependiente de la longitud de las trayectorias que describe el haz, y del número de pasadas efectuadas hasta alcanzar el ángulo final de doblado.

2.1.3. Flujo térmico

El flujo térmico aportado por el haz láser (irradiancia) viene dado por la siguiente función gaussiana:

$$I = \frac{8AP}{\pi\phi^2} \exp\left(-8\frac{(x-f_x(t))^2 + (y-f_y(t))^2}{\phi^2}\right)$$
 (1)

Donde P es la potencia del láser, ϕ el diámetro de la distribución transversal del haz láser (definido como el diámetro para el cual el valor pico de la irradiancia se ve multiplicado en un factor de $1/e^2$), A es la absorbancia de la superficie, x e y son las coordenadas del plano que contiene a la superficie irradiada, y $f(t)$ es la función que describe la trayectoria del centro del haz durante la pasada, que se relaciona con la velocidad, $v(t)$, mediante la siguiente expresión:

$$f(t) = (f_x(t), f_y(t)) = \int (v_x(t), v_y(t)) \cdot dt$$
 (2)

2.1.4. Condiciones de contorno

Se distinguen dos tipos de condiciones de contorno según su naturaleza: térmicas y me-

cánicas. A través de condiciones de contorno térmicas se modelan tanto las pérdidas de calor por convección como por radiación. Estas se han definido en todas las superficies de la geometría problema. La convección se considera libre y viene dada por la ecuación 3:

$$q = h(T - T_0)$$
 (3)

donde q es el calor, T es la temperatura, T_0 es la temperatura ambiente ($T_0 = 293\text{ K}$) y h es el coeficiente de película. Para las simulaciones se ha tomado $h = 10\text{ W/m}^2\text{K}$. No obstante, al final del apartado 3.1 se muestra una comparativa de simulaciones tomando diferentes coeficientes de película para analizar su efecto en la velocidad de enfriamiento tras la pasada del haz láser. Las pérdidas por radiación vienen dadas por la ecuación 4:

$$q = R_z(T^4 - T_0^4)$$
 (4)

donde R_z es la constante de radiación definida como $R_z = \sigma \varepsilon$, siendo σ la constante de Stefan-Boltzman y ε la emisividad de la superficie. En cuanto a las condiciones de contorno mecánicas, en las geometrías simuladas el modelo permite empotrar alguna de las caras laterales y, también, dejar la pieza libre de restricciones a los desplazamientos en su totalidad. Para simular el empotramiento mecánico, se utiliza la función "ENCASTRE" de ABAQUS durante el proceso, lo que implica que los desplazamientos y las rotaciones en todos y cada uno de los puntos pertenecientes a la superficie empotrada son nulos ($U1 = U2 = U3 = UR1 = UR2 = UR3 = 0$).

2.1.5. Propiedades del material

El material utilizado en las simulaciones es acero inoxidable AISI 304. Sus propiedades mecánicas y térmicas se describen en las tablas 2 y 3 [1]. Es muy importante la caracterización de las propiedades del material en función de la temperatura porque dan lugar a notables variaciones en los resultados. En cambio, en este estudio se ha considerado que el valor medio de la absorbancia es 0.27 [16] y que el valor medio de la emisividad es 0.30 [17] en todo el rango de temperaturas.

Temperatura (K)	Densidad (kg/m³)	Módulo de Young (GPa)	Límite elástico (MPa)	Coef. Poisson
293	7900	193	230	0.270
373	7850	187	230	0.280
573	7780	174	230	0.284
773	7750	160	200	0.298
1073	7600	140	130	0.305
1273	7470	65	90	0.320

Tabla 2: Propiedades mecánicas del acero AISI 304 en función de la T^o

Temperatura (K)	Calor específico (J/kg K)	Conductividad (W/m K)	Coef. Dilatación ($\times 10^{-6}$)
293	485	15	16.0
373	510	16	16.5
573	535	19	18.0
773	575	21	19.3
1073	620	25	21.0
1273	675	28	23.4

Tabla 3: Propiedades térmicas del acero AISI 304 en función de la T^o

2.2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Las piezas se conformaron experimentalmente en la instalación para aplicaciones industriales con láseres de potencia que se encuentra en el Centro Láser de la Universidad Politécnica de Madrid. El láser que se utilizó es un sistema láser continuo de Nd:YAG, ROFIN-SINAR con 3300 W de potencia máxima, longitud de onda de 1064 nm, de haz con distribución gaussiana y con su salida conectada por fibra óptica hasta el cabezal de proceso instalado en el robot. El robot antropomórfico de seis grados de libertad, modelo IRB 4400 de la marca ABB, controla la velocidad y el posicionamiento de las pasadas. Las piezas, situadas sobre la mesa de trabajo, pueden fijarse mediante un sistema de anclaje mecánico o, simplemente, apoyarse en la mesa de trabajo. La medición de los ángulos de doblado que aparecen en el apartado 3.3. se realizó con un microscopio modelo Leica DCM3D.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se muestran los resultados de la simulación del proceso DLF. En primer lugar, a través de un caso concreto y sencillo que consiste en la irradiación láser de una chapa aplicando una trayectoria rectilínea sobre su superficie para generar un doblado en 2D, se va a poner de manifiesto la capacidad del modelo para analizar la temperatura, las tensiones residuales, las deformaciones plásticas y las deformadas resultantes. En segundo lugar, se mostrarán varios casos de conformado aplicando una trayectoria curva de irradiación capaz de generar doblado en 3D.

3.1. DOBLADO EN 2D

La geometría de la chapa simulada se corresponde con un prisma de dimensiones 120x120x2 mm. La trayectoria seguida por el haz láser es rectilínea y cruza la chapa de un lado a otro pasando

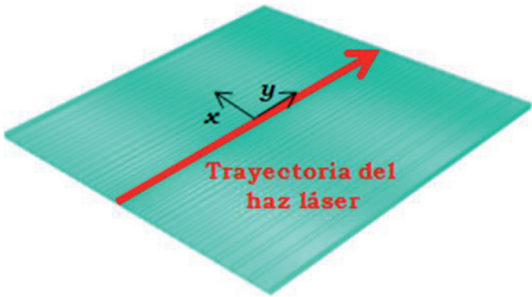


Figura 3: Mecanismo TGM de conformado directo por láser (DLF)

por el centro de la superficie (figura 3). Los parámetros del sistema láser empleados se recogen en la Tabla 4.

Potencia (W)	Longitud de onda (nm)	Velocidad (mm/s)	Diámetro de spot (mm)
2000	1064	60	6

Tabla 4: Parámetros láser aplicados en el caso de doblado en 2D

A la geometría definida (mallada con 25000 elementos) se le imponen las condiciones de contorno térmicas (convección y radiación) y las condiciones de contorno mecánicas. Estas últimas consisten en el empotramiento de una de las caras laterales paralela a la dirección de avance del láser en su trayectoria.

El proceso de calentamiento se muestra en la Figura 4. En 4(a) se muestra la representación gráfica del campo de temperaturas en la superficie durante el avance de la pasada del haz

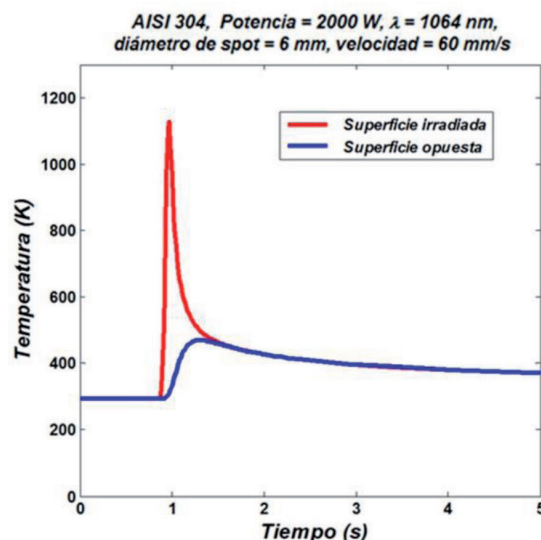
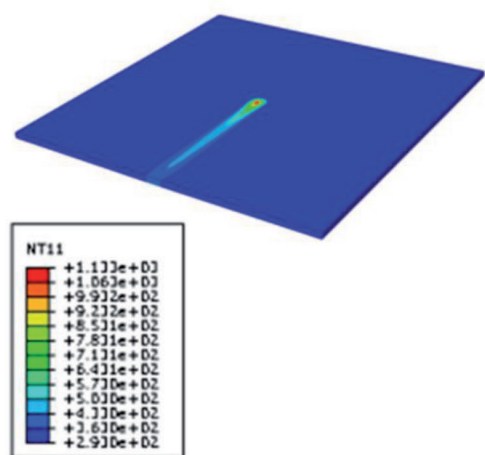


Figura 4: (a): Temperatura en la superficie durante el avance del haz láser (K). (b) Gradiente térmico entre la superficie irradiada y la superficie opuesta

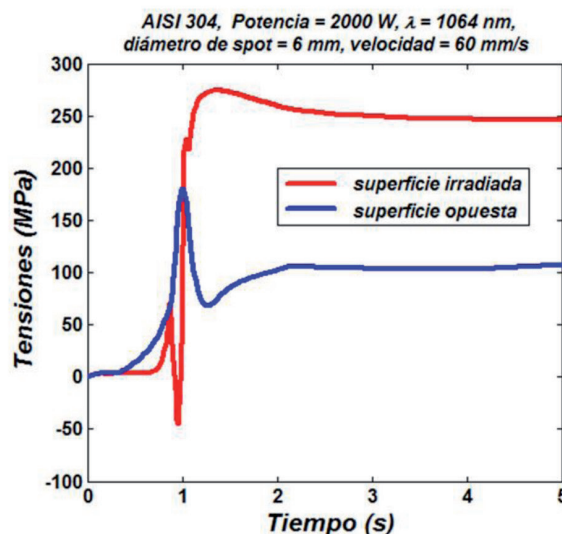
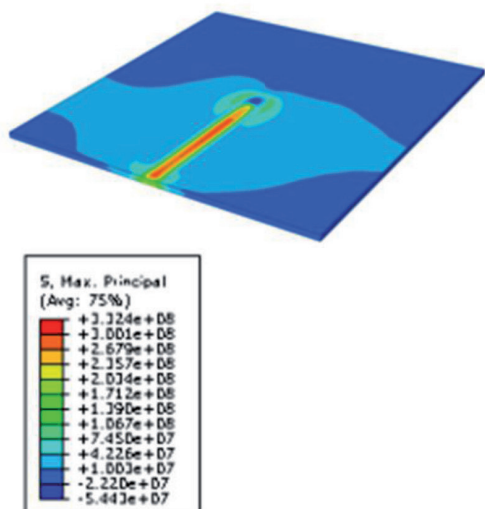


Figura 5: (a) Tensión: Máximo principal en la superficie durante el avance del haz láser (Pa). (b) Gradiente tensional entre la superficie irradiada y la superficie opuesta

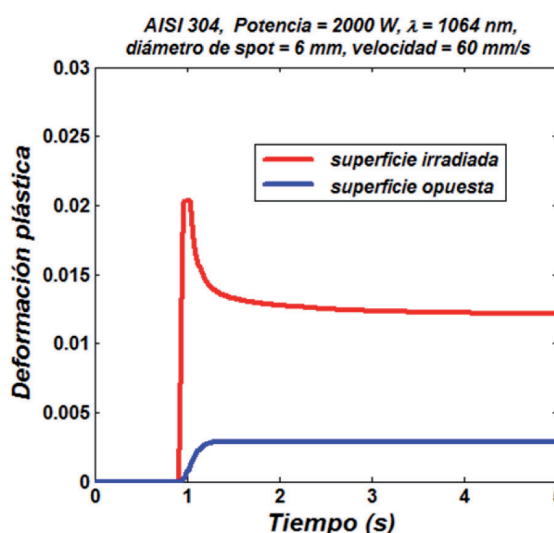
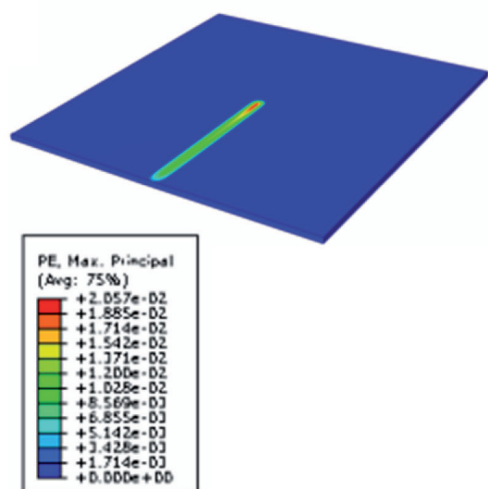


Figura 6: (a) Deformación plástica: Máximo principal en la superficie durante el avance del haz láser. (b) Gradiente en def. plásticas entre la superficie irradiada y la superficie opuesta

láser a través de la superficie. Se puede observar cómo la temperatura se eleva dentro del spot láser y cómo, a medida que este avanza, la superficie se va enfriando dejando una estela a su paso. En 4(b) se muestra la evolución de la temperatura en el punto central de la superficie y en el punto equivalente de la cara opuesta revelando un gradiente que llega a superar los 1000 K. Del mismo modo se puede analizar el gradiente de tensiones dinámicas (Figura 5) y de deformaciones plásticas (Figura 6). Como se observa en las figuras, el gradiente térmico generado tiene una gran influencia en las variables de carácter mecánico. En la Figura 7, se representa el doblado final tras la pasada del haz y el periodo de enfriamiento hasta que la temperatura de la pieza retorna a la temperatura ambiente. En la Figura 7 (b) están representadas las deformadas en las direcciones "x" e "y". En ella se aprecia un doblado 2D predominante en la dirección "x", pero también hay pequeñas distorsiones en la dirección paralela a la trayectoria del haz (deformada en "y").

Hasta este punto se ha considerado que la pieza se enfría por convección libre y se consideró un coeficiente de película $h = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$. Este tipo de enfriamiento puede resultar lento en la práctica, pues para que la pieza alcance

la temperatura ambiente es necesario esperar varios minutos. Este tiempo de espera puede ser inasumible si hay que realizar múltiples pasadas láser sucesivas sobre la misma trayectoria. Una solución para realizar pasadas sucesivas en poco tiempo y sin fundir el material es aumentar el coeficiente de película. Esto se consigue aplicando un chorro de aire o de agua sobre la pieza durante el tiempo de enfriamiento.

En la tabla 5 se cuantifica la reducción en el tiempo de enfriamiento al usar convección forzada. Para ello, se compara el tiempo de enfriamiento de un punto perteneciente a la trayectoria del haz en los siguientes casos: chorro de agua ($h = 2000 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$), chorro de aire $h = 100 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ y convección libre $h = 10 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$.

Utilizando el chorro de agua se reduce notablemente el tiempo de enfriamiento, no obstante su implementación en el sistema es mucho más complicada que la aplicación de un chorro de aire o de un gas inerte.

3.2. DOBLADO EN 3D

Además de generar doblados 2D, también es posible generar curvaturas 3D mediante DLF como muestran las simulaciones que se analizan a continuación. La geometría de la chapa modelada es de dimensiones 150x150x1 mm. Los parámetros láser de la simulación se recogen en la Tabla 6:

Se han empleado diferentes trayectorias de pasada del haz láser que están definidas en las Figuras 8, 9, 10 y 11. Como sucede en el doblado 2D, el gradiente térmico en el espesor genera tensiones superficiales que superan el límite elástico y la pieza se deforma. Sin embargo, al aplicar trayectorias curvas en vez de trayectorias rectilíneas en la pasada del haz sobre la superficie del material, la pieza se dobla dando lugar a una curvatura 3D. La elección de la trayectoria del haz y del número de pasadas abre un gran abanico de posibilidades para el conformado de precisión para la obtención de diversas geometrías, desde las más sim-

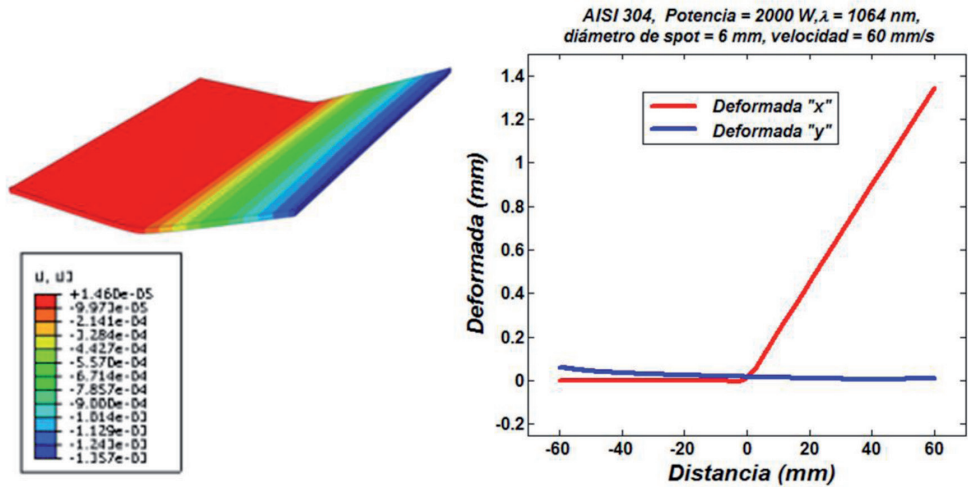


Figura 7: (a) Deformación final (factor de escala x20)(m). (b) Deformadas en la dirección paralela y normal a la pasada del haz láser.

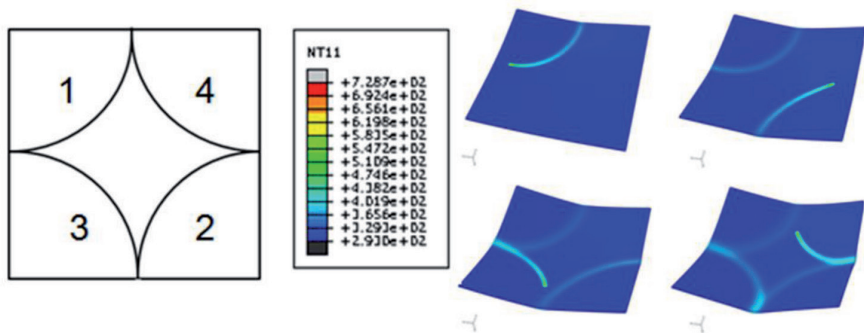


Figura 8: Caso 1 - Trayectoria del haz y campos de la temperatura (K) en la superficie en cuatro instantes distintos durante el proceso

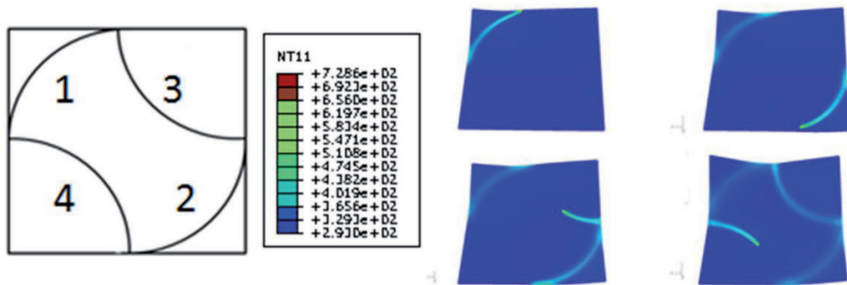


Figura 9: Caso 2 - Trayectoria del haz y campos de la temperatura (K) en la superficie en cuatro instantes distintos durante el proceso

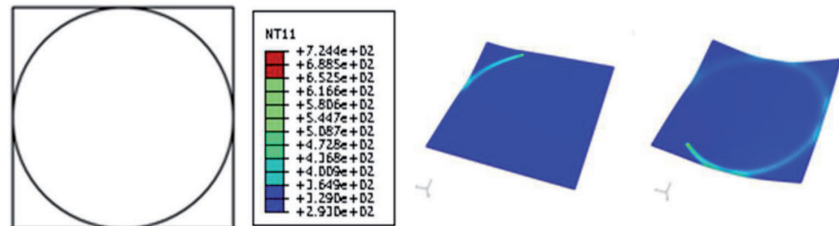


Figura 10: Caso 3 - Trayectoria del haz y campos de la temperatura (K) en la superficie en dos instantes distintos durante el proceso

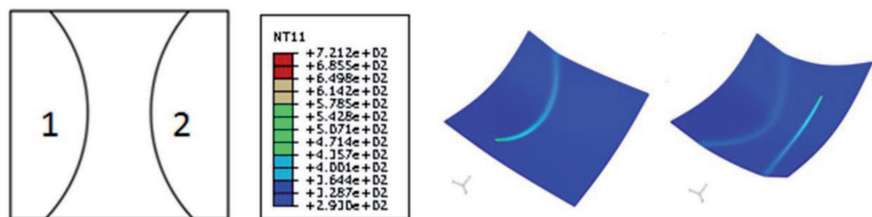


Figura 11: Caso 4 - Trayectoria del haz y campos de la temperatura (K) en la superficie en dos instantes distintos durante el proceso

Convección	Natural	Forzada aire	Forzada agua
$h \text{ (Wm}^{-2}\text{K}^{-1}\text{)}$	10	100	2000
Tiempo enfriamiento (s)	182	51	5

Tabla 5: Comparativa de tiempos de enfriamiento con diferentes coeficientes de película

Potencia (W)	Longitud de onda (nm)	Velocidad (mm/s)	Diámetro de spot (mm)
500	1064	100	2

Tabla 6: Parámetros láser aplicados en el caso de doblado en 3D

Potencia (W)	Longitud de onda (nm)	Velocidad (mm/s)	Diámetro de spot (mm)
2000	1064	40	6
2000	1064	50	6
2000	1064	60	6
2000	1064	70	6

Tabla 7: Parámetros láser aplicados para la validación

ples a las más complejas.

3.3. VALIDACIÓN DEL MODELO

En primer lugar, se validó el modelo numérico para el cálculo de doblado 2D. Se realizaron doblados 2D por DLF de chapas de acero AISI 304 con la geometría mostrada en el apartado 3.1 aplicando los parámetros de la Tabla 7.

El ángulo de doblado de cada una de las piezas dobladas se midió experimentalmente. A continuación, se realizaron las cuatro

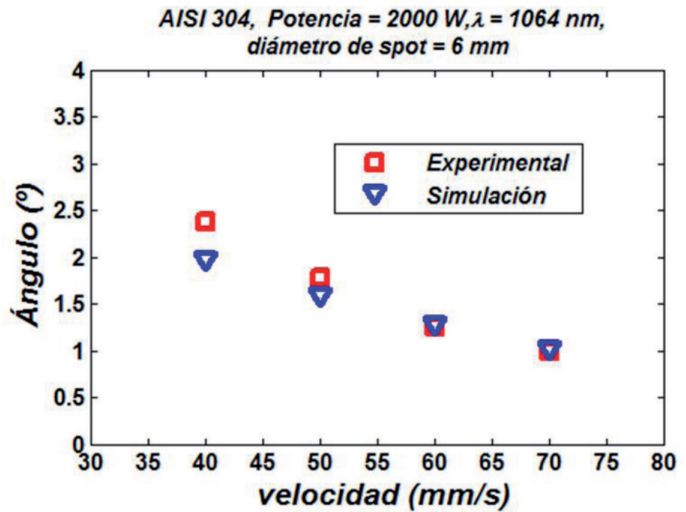


Figura 12: Comparación entre los ángulos de doblado calculados con el modelo y los medidos experimentalmente

simulaciones correspondientes a cada uno de los casos propuestos en la tabla y se calcularon los ángulos de doblado. La comparación entre los resultados experimentales y de la simulación se muestra en la Figura 12.

La comparación muestra una buena aproximación entre los resultados experimentales y las simulaciones, sobre todo al aumentar la velocidad de pasada del haz. Es razonable pensar que el aumento del error que aparece a bajas velocidades (por debajo de 60 mm/s) se debe a que la caracterización de las propiedades del

material a altas temperaturas no es tan buena como a temperaturas más bajas y al hecho de haber asumido valores constantes para la absorbancia, la emisividad y el coeficiente de película en todo el rango de temperaturas estudiado. No obstante el máximo error cometido (~14 % para velocidad de pasada de 40 mm/s) es menor que el que aparece en los estudios recogidos en la bibliografía [10] y [11]. Esto nos indica que se debe seguir mejorando el modelo para conseguir una mayor aproximación a los resultados experimentales al aplicar bajas velocidades de pasada, el modelo a elevadas velocidades de pasada del haz permite simular el proceso cometiendo errores asumibles.

A efectos de complementar la validación del modelo, se efectuó la medida de temperaturas con pirómetro en el caso descrito en la sección 3.1 (velocidad de pasada 60 mm/s). Para ello, con el pirómetro se midió la temperatura de la superficie del material en el spot láser a medida que este iba avanzando describiendo su trayectoria con una respuesta de captación de 20 ms. La compa-

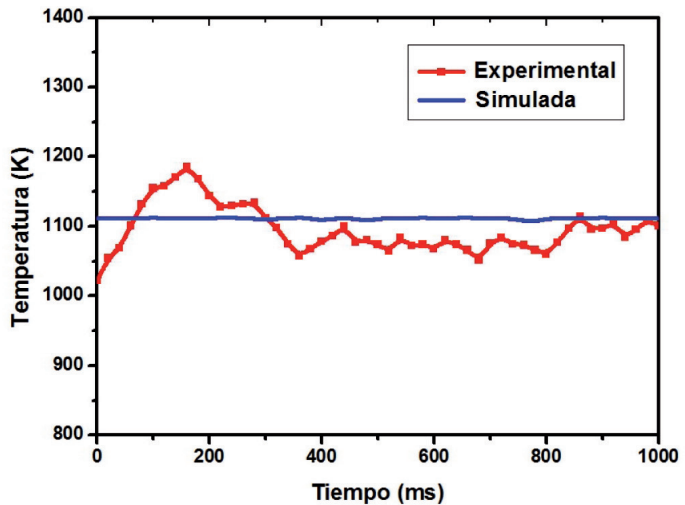


Figura 13: Comparación entre resultados de temperatura experimentales y de simulación

ración de los resultados de la simulación con las medidas experimentales se muestra en la Figura 13. Como se puede observar, los resultados numéricos muestran una buena aproximación a los resultados experimentales.

Una vez validado el modelo numérico para simular doblado 2D, se procedió a la generación de curvaturas 3D a nivel experimental implementando los parámetros láser y las trayectorias del haz correspondientes a los casos 1, 2, 3 y 4 expuestos en el apartado 3.2. Las piezas conformadas tras la aplicación de 15 pasadas láser sucesivas (y sus correspondientes tiempos de enfriamiento entre pasadas) se muestran en la Figura 14. Como se observa claramente en las figuras, se inducen diferentes curvaturas 3D dependiendo de la trayectoria seguida por el haz láser.

La capacidad del modelo numérico desarrollado para predecir la curvatura 3D generada se ha validado comparando la deformación simulada y experimental obtenida tras aplicar los parámetros láser y la trayectoria de pasada del haz correspondientes al caso 4 del apartado 3.2. Para realizar la comparación, se midió la deformada en las líneas 1 y 2 definidas en la Figura 15 y los resultados se contrastaron con la simulación. En la Figura 16 (a) se aprecia la comparativa correspondiente a la línea 1 y en la Figura 16 (b) la correspondiente a la línea 2. En ambos casos, se observa que la deformación experimental es ligeramente mayor que la deformación simulada (error máximo del -4 %). No obstante, los resultados de

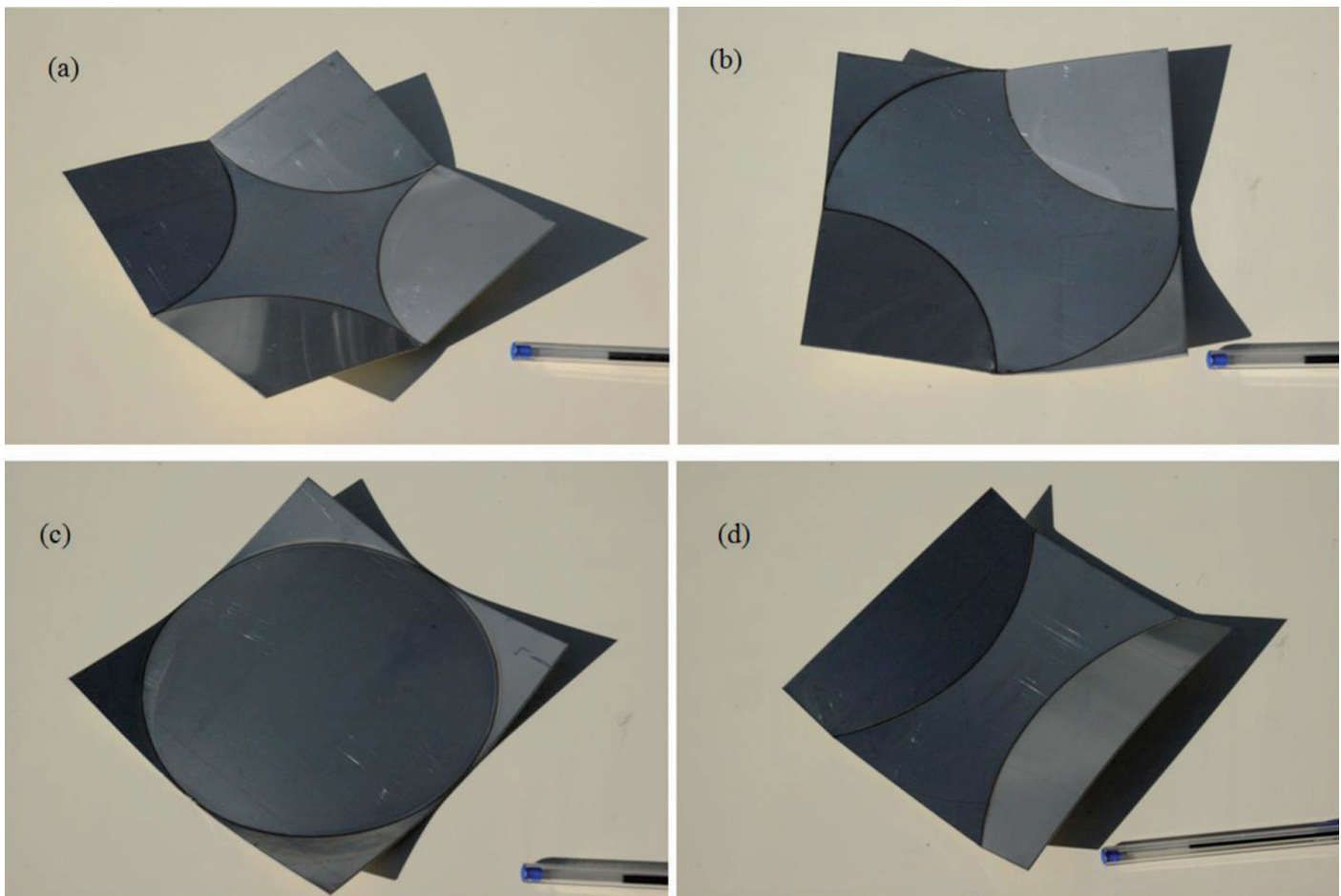


Figura 14: (a) Deformación experimental en el caso 1; (b) Deformación experimental en el caso 2; (c) Deformación experimental en el caso 3; (d) Deformación experimental en el caso 4

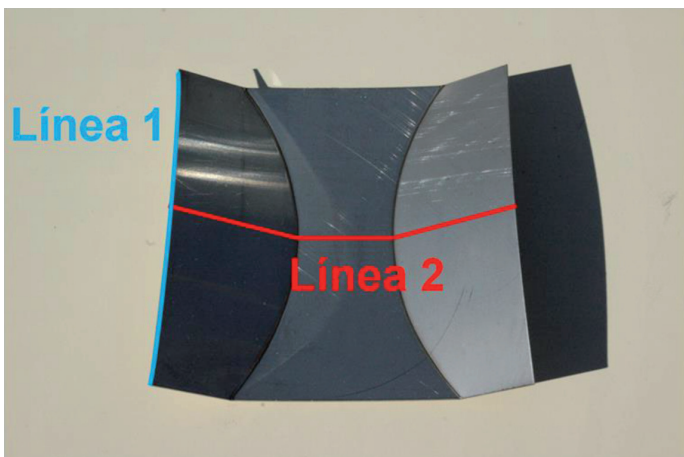


Figura 15: Definición de las líneas 1 y 2 sobre la geometría real correspondiente al caso 4 tras el aplicar DLF

la simulación se aproximan notablemente a las medidas experimentales y ponen de manifiesto la validez del modelo numérico desarrollado para el cálculo de deformaciones en casos realistas de aplicación de procesos de DLF.

4. CONCLUSIONES

Con el modelo desarrollado se ha adquirido una capacidad de diseño y desarrollo experimental sistemático de procesos prácticos de conformado directo por láser que permite la generación de geometrías complejas de conformado. Para el diseño se ha desarrollado un modelo numérico que permite estudiar procesos DLF

modelando de forma acoplada el comportamiento térmico y mecánico en chapas de acero AISI 304.

Las simulaciones de procesos DLF con el modelo desarrollado muestran que:

- 1) El modelo permite simular las estrategias de irradiación para la consecución de geometrías con doblados 2D y 3D.
- 2) El modelo permite analizar la distribución de temperaturas generadas en todo el volumen de la pieza, así como el estado de las tensiones y las deformaciones que se generan en el material durante y después de completarse el proceso. En este sentido, es importante destacar el análisis de la velocidad de enfriamiento tras la pasada del láser bajo diferentes condiciones de convección.
- 3) Los resultados del modelo se compararon con resultados experimentales mostrando una buena aproximación entre ambos.

Dentro de esta línea de investigación, en el futuro, se pretende ampliar el modelo para simular el proceso sobre otras aleaciones de interés industrial y analizar el problema de las tensiones residuales según el tipo de material conformado. Además, sería de gran interés desarrollar un estudio paramétrico exhaustivo con el fin de optimizar el proceso.

A modo de prospectiva, es importante destacar que el verdadero potencial del DLF solamente será aprovechado mediante el desarrollo de nuevo conocimiento asociado al proceso (sostenido por el desarrollo y mejora de los modelos termo-mecánicos) y de

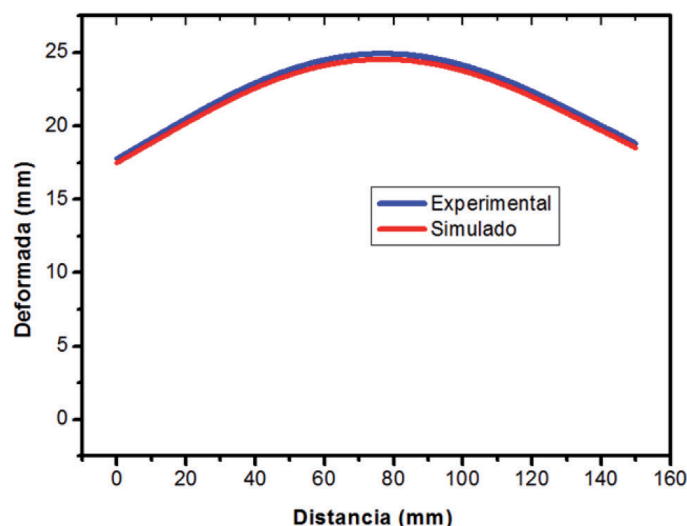


Figura 16 (a): Comparación en línea 1

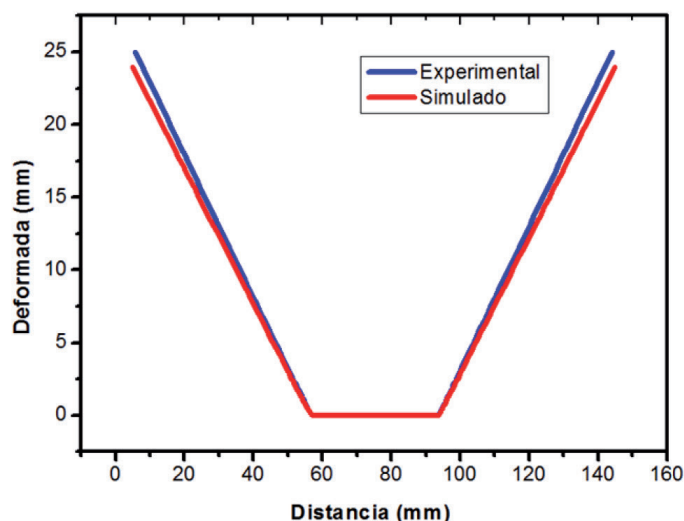


Figura 16 (b): Comparación en línea 2

los sistemas asociados. Aun siendo en la actualidad un proceso en fase de investigación, se puede afirmar que posee un potencial significativo en una amplia variedad de aplicaciones industriales y sectores. Comparado con otros procesos de conformado, el DLF tiene la ventaja de la flexibilidad, ya que puede realizarse de forma simultánea junto con otros procesos (corte, soldadura, etc...) mediante sistemas láser multi-tarea. En cuanto al DLF de planchas metálicas de mayores dimensiones, como por ejemplo las que se demandan para el sector naval, los altos costes de equipamiento y requerimientos de seguridad serán los principales obstáculos, pero estos deberán ser salvados mediante el desarrollo continuo de sistemas láser más baratos, compactos y eficientes (láseres de diodo y de fibra) y sistemas DLF automatizados.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Che Jamil MS, Sheikh MA, Li L. "A study of the effect of laser beam geometries on laser bending of sheet metal by buckling mechanism". *Optics & Laser Technology*. Vol.43 p.183-193. DOI:http://dx.doi.org/10.1016/j.optlastec.2010.06.011
- [2] Shi Y, Shen H, Yao Z, et al. "Application of similarity theory in the laser forming process". *Computational Materials Science*. Vol.37 p.323-327. DOI:http://dx.doi.org/10.1016/j.commatsci.2005.09.002
- [3] Lu Z, Li DC, Tong ZQ et al. "Investigation into the direct laser forming process of steam turbine blade". *Optics and Lasers in Engineering*. Vol. 48 Issues 9-10 p.1101-1110. DOI:http://dx.doi.org/10.1016/j.optlaseng.2011.05.016
- [4] Shen H, Gong C, Hu J et al. "Numerical and experimental study on bi-direction deformations in laser micro forming of two-bridge actuators". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. Vol.54-55 p.66-72. DOI:http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.11.006
- [5] Griffiths JD, Sheikholeslami G, Clark S et al. "Towards optimization of beam mode for high efficiency laser thermal within metallurgical constraints". En: *International Workshop on Thermal and Welding Distortion* (Bremen, Alemania, 9-10 Abril de 2014).
- [6] Geiger M, Vollertsen F. "The mechanisms of laser forming". *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. Vol.42 Issue 1 p301-304. DOI:http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62448-2
- [7] Vollertsen F, Shen H. "Modelling of laser forming-A review". *Computational Materials Science*. Vol.46 p.834-840. DOI:http://dx.doi.org/10.1016/j.commatsci.2009.04.022
- [8] Hu Z, Kovacevic R, Labudovic M. "Experimental and numerical modeling of buckling instability of laser sheet forming". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. Vol.42 Issue 13 p.1427-1439. DOI:http://dx.doi.org/10.1016/S0890-6955(02)00075-5
- [9] Shi YJ, Yao ZQ, Shen H et al. "Research on the mechanisms of laser forming for the metal plate". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. Vol.46 Issues 12-13 p.1689-1697. DOI:http://dx.doi.org/10.1016/j.

ijmachtools.2005.09.016

- [10] Shi Y, Shen H, Yao Z et al. "Temperature gradient mechanism in laser forming of thin plates". *Optics & Laser Technology*. Vol.39 Issue 4 p.858-863. DOI:http://dx.doi.org/10.1016/j.optlastec.2005.12.006
- [11] Labeas GN. "Development of a local three-dimensional numerical simulation model for the laser forming process of aluminium components". *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 207 Issues 1-3 p.248-257. DOI:http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.12.098
- [12] Hennige T. "Development of irradiation strategies for 3D-laser forming". *Journal of Materials Processing Technology*. Vol.103 p.102-108. DOI:http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00392-7
- [13] Yilbas BS, Arif AFM, Abdul Aleem BJ. "Laser bending of AISI 304 steel sheets: Thermal stress analysis". *Optics & Laser Technology*. Vol.44 Issue 2 p.303-309. DOI:http://dx.doi.org/10.1016/j.optlastec.2011.06.021
- [14] Liu J, Sun S, Guan Y. "Numerical investigation on the laser bending of stainless steel foil with pre-stresses". *Journal of Materials Processing Technology*. Vol.209 Issue 3 p.1580-1587. DOI:http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.04.006
- [15] ABAQUS User's Manual, © Dassault Systèmes, (2013).
- [16] He X, Fuerschbach PW, DebRoy T. "Heat transfer and fluid flow during laser spot welding of 304 stainless steel". *Journal of Physics D: Applied Physics*. Vol.36 p.1388-1398. DOI:http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/36/12/306
- [17] Çengel YA. "Heat transfer. A practical approach", WBC McGraw-Hill, 1998, p. 967.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado al amparo del proyecto consorciado ISF2G (PID_560300_2009_11), financiado a través del Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica. Se agradece a todos los participantes del proyecto su colaboración y la ayuda prestada para la realización del mismo.