

# Simulación termo-mecánica de procesos de conformado directo con láser

C. Correa, J. A. Porro, F. Cordovilla, M. Morales, J.L. Ocaña

Centro Láser. Universidad Politécnica de Madrid

carlos.correa@upm.es

---

*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 forma 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 las variables características.*

---

## 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el conformado directo por láser (DLF) se ha revelado como una técnica innovadora y prometedora para conformar chapa metálica mediante la inducción de tensiones residuales de origen térmico en el material [1]. El desarrollo de la técnica puede representar grandes avances para la producción de bajas series y prototipos en chapa metálica, con aplicaciones en la fabricación de componentes para las industrias: naval, automovilística, microelectrónica y aeronáutica [2].

El DLF tiene potencial para aportar ventajas tecnológicas significativas sobre los procesos de conformado tradicionales. No requiere fuerzas externas, por lo que el spring-back se reduce, y se puede conformar piezas con curvatura compleja, así como microcomponentes. Además, materiales duros y frágiles, como las aleaciones de titanio, de níquel, cerámicos, etc..., pueden ser conformados con mayor facilidad [1].

En la bibliografía se han determinado varios tipos de DLF: Temperature Gradient Mechanism (TGM), Buckling Mechanism (BM) y Upsetting Mechanism (UM) [3]. Este trabajo se centra en el primero de los tipos de DLF enunciados, el TGM, por ser el único fácilmente controlable y que permite alcanzar ángulos de doblado precisos mediante la superposición de pasadas láser sucesivas. En el TGM, la pasada del haz láser, aplicada con los parámetros adecuados, genera 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 spot, la velocidad de procesado y la trayectoria del haz. Para controlar la deformación resultante en las piezas, es necesario tener en cuenta la influencia de estos parámetros. 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 por láser.



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

## 2. MODELO NUMÉRICO

Las simulaciones se han realizado utilizando el programa comercial ABAQUS de elementos finitos. A continuación se describen los fundamentos del modelo numérico desarrollado.

### 2.1. Hipótesis de partida

Para el desarrollo del modelo numérico se parte de las siguientes hipótesis: la isotropía del material, el láser opera en modo continuo, se trabaja a temperatura por debajo del límite de fusión, no actúan fuerzas externas sobre la pieza más allá de las restricciones al movimiento impuestas por las condiciones de contorno y, por último, el material está inicialmente libre de tensiones residuales.

### 2.2. Elementos y mallado

El modelo numérico se ha implementado mediante un análisis implícito y acoplado de temperatura y deformaciones. Los elementos utilizados en este análisis tienen 8 nodos y su nomenclatura en ABAQUS es C3D8T.

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.

### 2.3. Flujo térmico

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

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

Donde  $P$  es la potencia del láser,  $\phi$  el diámetro de spot (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:

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

## 2.4. Condiciones de contorno

Se distinguen dos tipos de condiciones de contorno según su naturaleza: las térmicas y las mecánicas. A través de condiciones de contorno térmicas, se modela tanto las pérdidas de calor por convección como por radiación. Estas están definidas en todas las superficies de la geometría problema.

La convección se considera libre y viene dada por la ecuación 3.

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

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 todas las simulaciones se ha tomado  $h = 10 \text{ W/m}^2\text{C}$ .

Las pérdidas por radiación vienen dadas por la ecuación 4.

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

donde  $R_z$  es la constante de radiación definida como  $R_z = \sigma\varepsilon$ , siendo  $\sigma$  la constante de Stefan-Boltzman y  $\varepsilon$  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.

## 2.5. Propiedades del material

El material utilizado en las simulaciones es acero inoxidable AISI 304. Sus propiedades mecánicas y térmicas se describen en las tablas 1 y 2 [1].

Temperatura (°C)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Módulo de Young (GPa)	Límite elástico (MPa)	Coef. Poisson
20	7900	193	230	0.270
100	7850	187	230	0.280
300	7780	174	230	0.284
500	7750	160	200	0.298
800	7600	140	130	0.305
1000	7470	65	90	0.320

Tabla 1. Propiedades mecánicas del acero AISI 304 en función de la  $T^a$ .

Temperatura (°C)	Calor específico (J/kg °C)	Conductividad (W/m°C)	Coef. Dilatación ( $\times 10^{-6}$ )
20	485	15	16.0
100	510	16	16.5
300	535	19	18.0
500	575	21	19.3
800	620	25	21.0
1000	675	28	23.4

Tabla 2. Propiedades térmicas del acero AISI 304 en función de la  $T^a$ .

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 de la absorbancia es 0.27 [4] en todo el rango de temperaturas.

### 3. RESULTADOS DEL MODELO NUMÉRICO

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 mostrará un caso de conformado aplicando una trayectoria de irradiación algo más compleja y capaz de generar doblado en 3D.

#### 3.1. Doblado en 2D

La geometría de la chapa modelada se corresponde con un prisma de dimensiones 120x120x2 mm.



Figura 2. Mecanismo TGM de conformado directo por láser (DLF).

La trayectoria seguida por el haz láser es rectilínea y cruza la chapa de un lado a otro pasando por el centro de la superficie. Los parámetros láser aplicados se recogen en la siguiente tabla:

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

Tabla 3. Parámetros láser aplicados en el caso de doblado en 2D.

A la geometría definida 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 cara laterales de la chapa.

El proceso de calentamiento se muestra en la figura 3. En ella aparece representada una captura del avance de la pasada del haz láser a través de la superficie. Se puede ver como 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. También se muestra la evolución de la temperatura en el punto central de la superficie y en el punto equivalente de la cara opuesta.

Del mismo modo se puede analizar el gradiente de tensiones dinámicas (figura 4) y de deformaciones plásticas (figura 5). Como se observa en las figuras, el gradiente térmico establecido tiene una gran influencia en las variables de carácter mecánico.

En la figura 6, 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 (b) están representadas las deformadas en las direcciones "x" e "y". Es cierto que hay doblado predominante en 2D (deformada en "x"), pero también hay pequeñas distorsiones en la dirección perpendicular a la pasada del haz (deformada en "y").

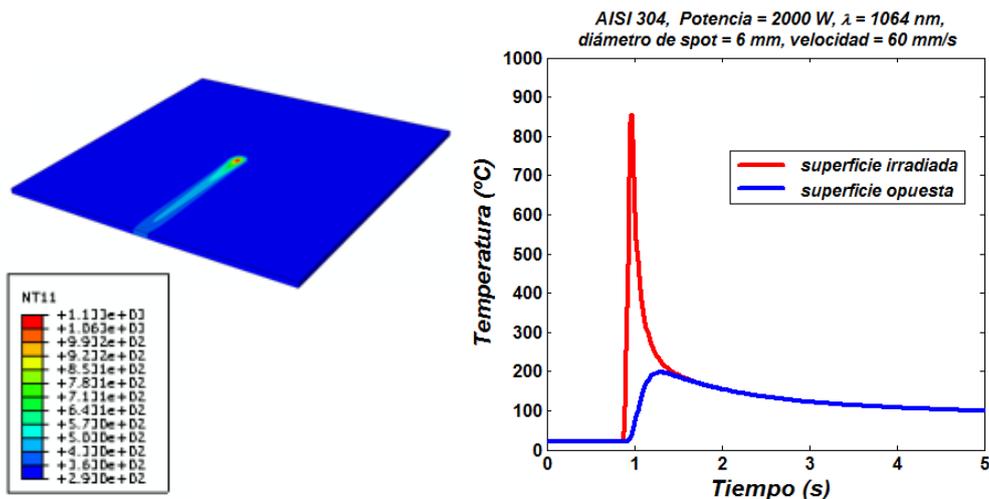


Figura 3. (a) Temperatura durante el avance del haz láser. (b) Gradiente térmico entre la superficie irradiada y la superficie opuesta.

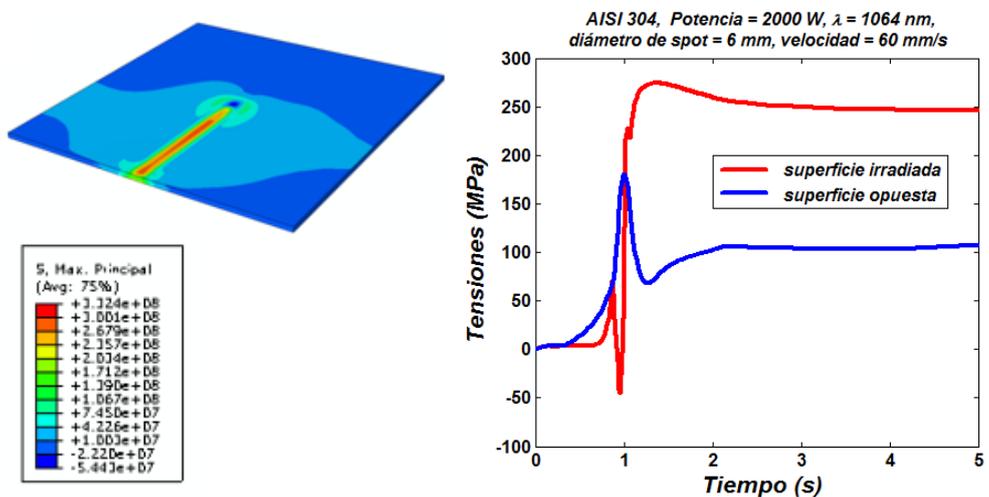


Figura 4. (a) Tensión: Máximo principal durante el avance del haz láser. (b) Gradiente tensional entre la superficie irradiada y la superficie opuesta.

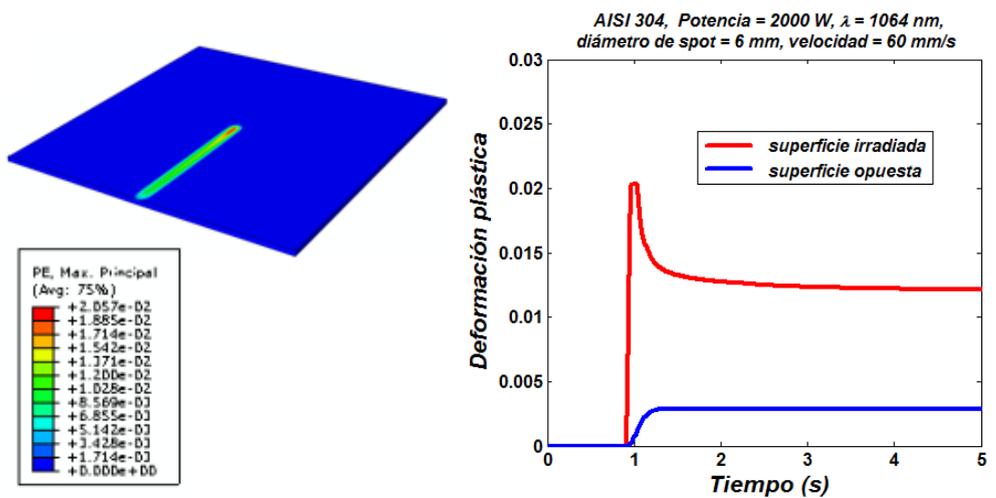


Figura 5. (a) Deformación plástica: Máximo principal durante el avance del haz láser. (b) Gradiente en deformaciones plásticas entre la superficie irradiada y la superficie opuesta.

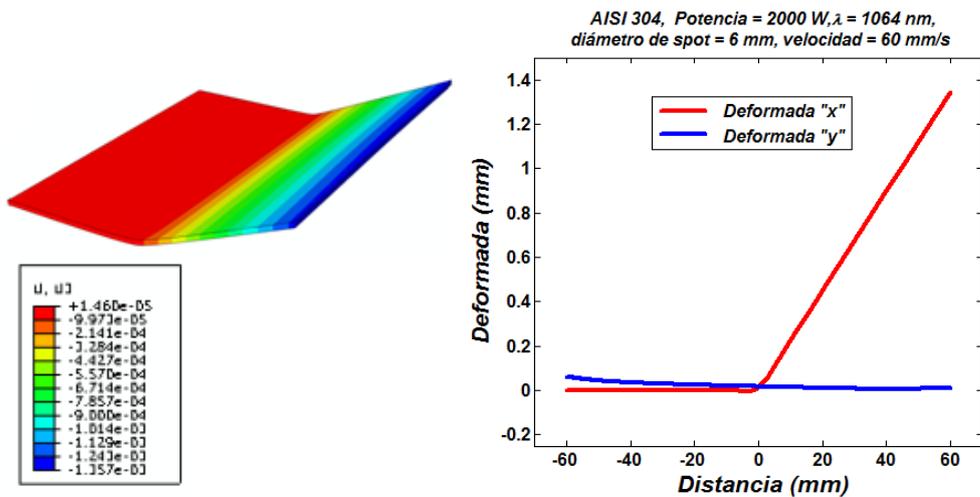


Figura 6. (a) Deformación final (factor de escala  $\times 20$ ). (b) Deformadas en la dirección de paralela y normal a la pasada del haz láser.

### 3.2. Doblado en 3D

También es posible generar curvaturas 3D mediante DLF como muestra la siguiente simulación. La geometría de la chapa modelada es de dimensiones 150x150x1 mm.

Los parámetros láser simulados se recogen en la siguiente tabla:

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

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

La trayectoria seguida por el haz láser consta de cuatro arcos de circunferencia, estando cada uno de ellos centrado en uno de los vértices de la superficie irradiada. En la figura 7 la trayectoria está representada.

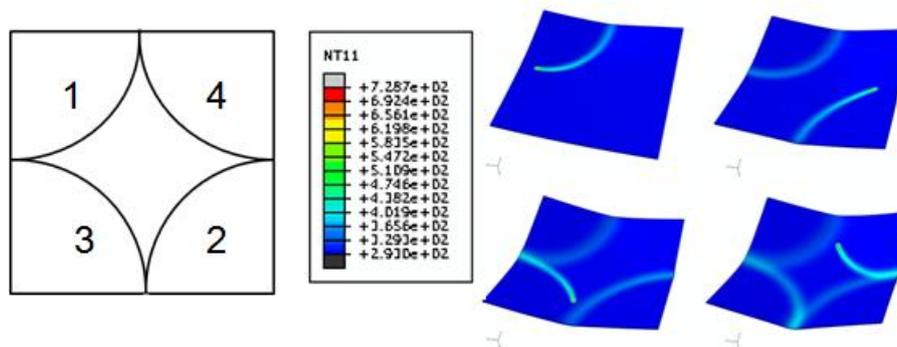


Figura 7. Trayectoria del haz y captura de la temperatura en 4 puntos distintos de la trayectoria.

Como sucede en el caso de doblado en 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, este se dobla dando lugar a una curvatura 3D.

## 4. MONTAJE EXPERIMENTAL Y VALIDACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

### 4.1. Montaje experimental

Para validar el modelo numérico se realizaron pruebas experimentales. Las piezas se conformaron experimentalmente en la instalación para aplicaciones industriales con láseres de potencia que se encuentra en el CLUPM.

El haz se genera en equipo el láser y es conducido mediante fibra óptica hasta un cabezal instalado en un robot antropomórfico que 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.

El láser que se utilizó es de Nd:YAG, continuo ROFIN-SINAR de 3300 W de potencia máxima con su salida conectada por fibra óptica hasta el cabezal de proceso instalado en el robot. El robot utilizado es el un robot industrial antropomórfico de seis grados de libertad, modelo IRB 4400 de la marca ABB.

La medición de los ángulos de doblado se realizó con un microscopio modelo Leica DCM3D.

### 4.2. Validación del modelo numérico.

En primer lugar, se realizaron doblados 2D de chapas de acero AISI 304 con la geometría mostrada en el apartado 3.1. Para el conformado por DLF de estas chapas se aplicaron los parámetros de la tabla 5:

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 5. Parámetros láser aplicados para la validación.

El ángulo de doblado de cada una de las piezas dobladas se midió experimentalmente. A continuación, se realizaron las 4 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 muestran en la figura 8.

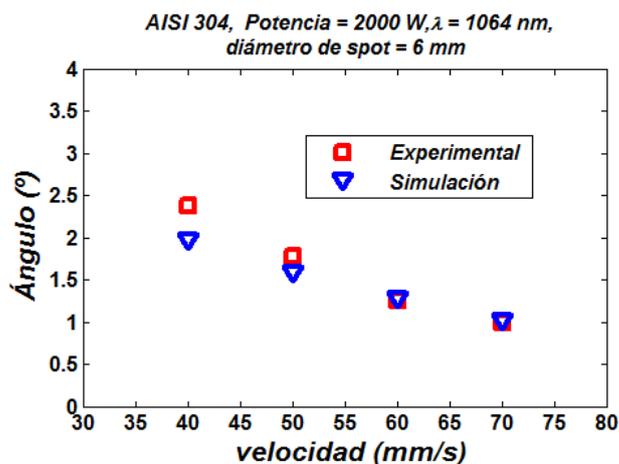


Figura 8. Comparación entre los ángulos de doblado calculados con el modelo y los medidos experimentalmente.

La comparación muestra una buena correlación entre los resultados experimentales y las simulaciones, sobre todo al aumentar la velocidad de pasada del haz. El error que aparece a bajas velocidades puede deberse a que la caracterización de las propiedades del material a altas temperaturas no es tan buena como a temperaturas más bajas, por lo que se debe

seguir mejorando el modelo para conseguir una mayor aproximación a los resultados experimentales.

Por otra parte, la estrategia de conformado DLF para conformar la pieza del apartado 3.2 se implementó experimentalmente. Tras 15 repeticiones de la misma estrategia de irradiación la pieza se plegó con la misma forma que predijo el modelo, dando lugar a un doblado 3D tal y como se observa en la figura 9.

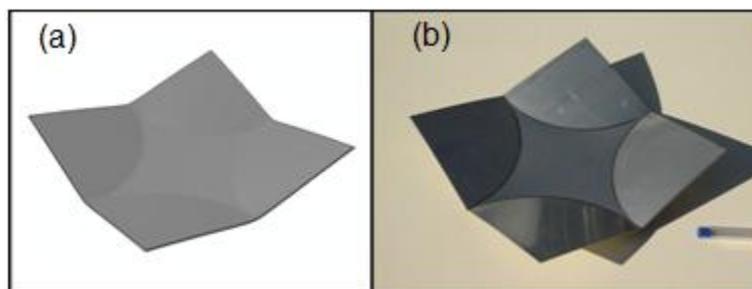


Figura 9. (a) Deformación final en la simulación tras una pasada (factor de escala  $\times 15$ ). (b) Deformación final en la pieza real tras 15 pasadas.

## 5. CONCLUSIONES

En el Centro Láser de la UPM 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:

- El modelo permite simular las estrategias de irradiación para la consecución de geometrías con doblados 2D y 3D.
- 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.
- Los resultados del modelo se compararon con resultados experimentales mostrando una buena correlación entre ambos.

## 6. REFERENCIAS

- [1] M.S. Che Jamil, M.A. Sheikh, L.Li, A study of the effect of laser beam geometries on laser bending of sheet metal by buckling mechanism, *Optics & Laser Technology* 43 (2011) 183–193
- [2] Y. Shi, H. Shen, Z. Yao, J. Hu, L. Xia, Application of similarity theory in the laser forming process, *Computational Materials Science* 37 (2006) 323–327.
- [3] H. Shen, F. Vollertsen, Modelling of laser forming – An review, *Computational Materials Science* 46 (2009) 834–840.
- [4] X. He, P. W. Fuerschbach, T. DebRoy, Heat transfer and fluid flow during laser spot welding of 304 stainless steel, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 36 (2003) 1388–1398

## 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.