

Caracterización del coeficiente de absorción en el proceso de doblado de chapas mediante la aplicación de un haz láser

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA

Vicente Jacobsen¹, Alumno de sexto año

Diego Celentano¹, Profesor Asociado

¹DEPARTAMENTO DE MECÁNICA Y METALÚRGICA

INTRODUCCIÓN

En Chile se puede apreciar que la industria metalmecánica derivada de los productos del cobre y del acero es la gran exponente de todos los procesos asociados a la elaboración de artículos metálicos, normalmente utilizados como producto final. En estos procesos es de vital importancia la forma en que se elaboran los productos metálicos. Una categoría importante de procesos de manufactura se refiere a aquellos que cambian la forma de un producto inicial sólo con **deformación plástica**, para darle una forma diferente, adecuada a la demanda del usuario. Éstos son conocidos como procesos de **conformado plástico de metales**. Comparativamente, los procesos asociados a deformación plástica requieren un aporte energético mucho mayor al que necesitan los relacionados con la aplicación de un haz **láser**.

La aplicación de calor en lugares selectivos para mejorar el proceso de conformado ha sido empleado desde el siglo XIX en la industria de la construcción. Es común ver que en la forja de metales se utilice

una fuente de calor, donde en este caso el fuego se produce con carbón como combustible, que permite facilitar el doblado del metal y así poder llegar a la forma final deseada. Esto supone la aplicación de una fuerza externa, en general reducida, que permita doblar el metal.

Con el desarrollo de la tecnología láser es posible reemplazar al fuego como fuente de calor. Además, con el láser es posible controlar con una alta precisión los lugares de aplicación del calor. Como se muestra en la Figura 1, la operación de doblar placas metálicas con un haz láser corresponde a un proceso de conformado termomecánico que se produce por la aplicación de un flujo térmico superficial aportado por dicho haz.

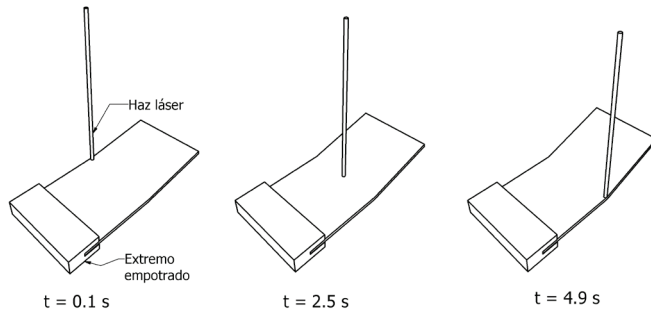


Figura 1. Conformado láser donde se observa que a medida que el láser va recorriendo la plancha se produce una curvatura de ésta.

En general, el **conformado láser** es un **proceso cuasiestático**, en el cual una superficie de la chapa es escaneada con un haz láser que avanza en una dirección determinada, produciendo un calentamiento localizado de la superficie, idealmente sin fundirla. El aumento de la temperatura del material produce la expansión muy localizada de éste, pero dicha expansión está restringida por el material que le rodea generando esfuerzos y, consecuentemente, **deformaciones plásticas**.

El **coeficiente de absorción** cumple un rol fundamental al momento de estimar la cantidad de energía necesaria para realizar un procedimiento de doblado mediante un haz láser. En este trabajo se busca estimar dicho coeficiente, para así poder cuantificar con exactitud la cantidad de energía necesaria para realizar el conformado. Resulta interesante destacar que para la estimación del coeficiente de absorción no es necesario realizar el doblado, ya que éste sólo depende de la frecuencia del láser y de las características de la superficie sobre la cual este actúa. Por ende, en el presente trabajo se considera que el coeficiente de absorción puede determinarse fijando el láser en un punto, lo que simplifica enormemente el estudio.

También es importante mencionar que la aplicación de una leve capa de grafito (de 0,1-0,13 mm de espesor) en la superficie de la placa permite aumentar considerablemente el coeficiente de absorción. Sin embargo, al aplicar una fuente de calor concentrada puede ocurrir que dicha capa de grafito se degrade causando, de esta forma, una disminución del coeficiente de absorción. El efecto de la capa de grafito y de su degradación en el coeficiente de absorción también serán objeto de esta investigación en la cual, además, se hará una estimación del diámetro efectivo del **termopar** utilizado en la experimentación, ya que éste no realiza mediciones puntuales sino en un entorno.

METODOLOGÍA

La metodología está compuesta por tres partes:

1. Experimentación
2. Modelación y simulación numérica
3. Validación

La primera es la realización de una campaña experimental orientada a la adecuada toma de datos de las evoluciones de temperatura que se producen sobre la plancha, de acuerdo al montaje mostrado en la Figura 2, considerando distintas potencias del haz láser (20 W y 30 W), distintas distancias al haz láser (2 termopares a 2 mm, 1 termopar a 4 mm y 1 termopar a 6 mm) y distintas condiciones de la superficie de la placa (sin la aplicación de grafito, con grafito degradado y con grafito no degradado). A continuación, sólo se expondrán los resultados para 30 W ya que ambas potencias otorgaron resultados muy similares.

Al momento de realizar los experimentos se observaron diferencias grandes de temperatura para cada caso. En la primera prueba se aprecian temperaturas sustancialmente mayores que en las pruebas posteriores, por lo que estas se consideran como grafito no degradado. Las pruebas posteriores incluyen grafito degradado, ya que se observaban temperaturas similares para todos los experimentos. Finalmente, sin grafito corresponde al material en la misma condición de fábrica.

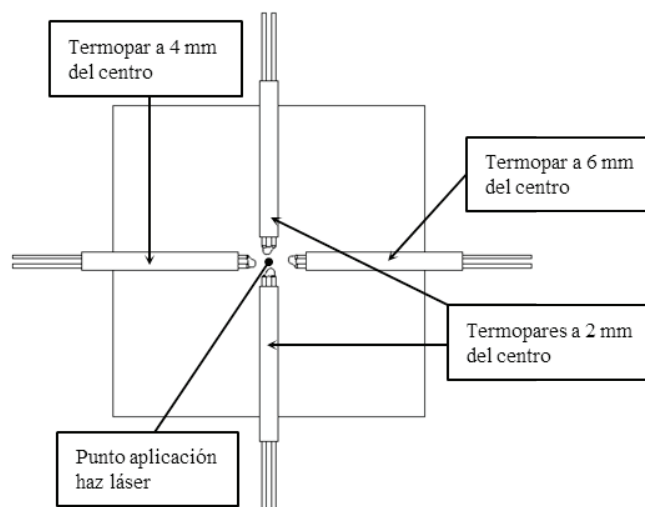


Figura 2. Montaje completo, vista superior. Se observan los cuatro termopares utilizados para la medida de la temperatura en los distintos puntos de interés.

El láser de CO_2 utilizado, modelo *Evolution 100* fabricado por la empresa *Synrad*, está ubicado en el laboratorio LATIL (Laboratorio de Aplicaciones Tecnológicas e Industriales del Láser) que se encuentra en el Departamento de Ingeniería Mecánica y Metalúrgica en la Pontificia Universidad Católica de Chile. Su potencia máxima nominal es 60 W con una longitud de onda $10,6 \mu\text{m}$. El sistema completo se muestra en la Figura 3.

El control de la potencia de salida es manual y muy sensible, por lo que es necesario configurarlo con un medidor de potencia antes de cada experiencia. Este instrumento es un equipo marca *Coherent*, modelo *FieldMax II*, que permite obtener la potencia en tiempo real de un flujo de energía que apunta directamente a un sensor. Tiene precisión de 0,1 W en la escala usada.

Este equipo es habitualmente empleado para el conformado de chapas por lo que el haz láser, antes de llegar a la superficie estudiada, recorre una serie de espejos que permiten crear patrones de movimiento. Este sistema, que se mueve gracias a dos motores, permite proyectar el láser sobre una superficie de trabajo de $250 \times 250 \text{ mm}$ y, además, permite obtener distintos tipos de patrones de escaneo útiles en otro tipo de conformado. Para nuestros experimentos no se consideraron distintos patrones de conformado, sino que sólo se proyectó el haz sobre la superficie irradiada.

Además de los 2 espejos, también se observa que el haz láser pasa a través de una lente F-theta que permite enfocar el haz. Esta lente tiene un plano focal de 360 mm y concentra el haz láser en un diámetro de 0,45 mm. Este diámetro fue calculado y además corroborado mediante experimentación aplicando el láser sobre una plancha plástica y midiendo el diámetro de la penetración sobre la plancha. Estos tres instrumentos anteriormente mencionados provocan pérdidas energéticas evaluadas en un 42%. El valor de potencia de 30 W considerado en los resultados que se muestran en el apartado siguiente corresponde a la medida después de estas pérdidas, es decir, es la potencia efectiva que está ingresando a la placa.

Para la determinación del coeficiente de absorción se usó el acero inoxidable AISI 304 en planchas de $100 \times 100 \text{ mm}$ con un espesor de 2 mm. Éste es el más versátil y uno de los más usados de los aceros inoxidables de la serie 300, ya que tiene excelentes propiedades para el conformado. Este acero corresponde a la aleación M [1]. La composición química de este material queda expresada en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición química nominal del acero AISI 304 (% en peso).

Elemento	%
C mín.	0.08
Mn	2
Si	1
Cr	18-20
Ni	8-10.5
P	0.045
S	0.03

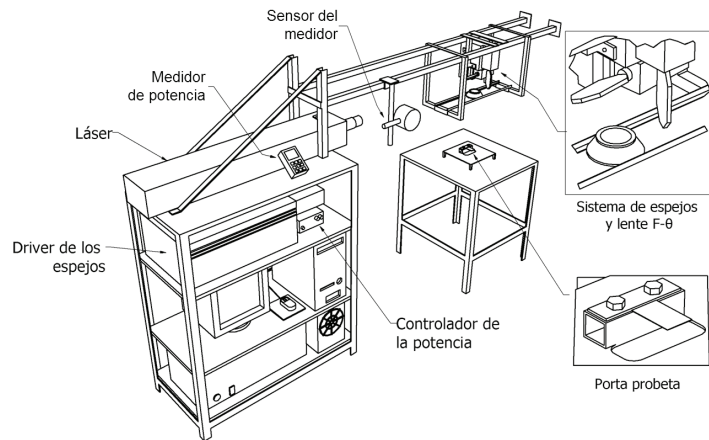


Figura 3. Sistema láser completo, partiendo desde el láser donde produce el haz recorriendo el sistema de espejos y la lente, para finalmente llegar al portaprobeta donde se coloca la plancha donde se producirán los gradientes de temperatura a medir.

Con esta etapa ya realizada se procede a la segunda, que consiste en la simulación numérica mediante el método de elementos finitos. El software destinado para esta simulación es COMSOL Multiphysics versión 4.3, módulo de transferencia de calor. Las ecuaciones que modelan los mecanismos de transferencia de calor de este proceso se detallan en el principio científico. La simulación permite obtener la distribución y evolución de temperaturas en la placa. Cabe destacar que se realizaron ciertas simplificaciones, por ejemplo, asumir que las condiciones superficiales de las placas son iguales, o sea, sin poseer hendiduras o perforaciones considerables.

La plancha fue discretizada con una malla de 12.000 elementos finitos (tetraedros de cuatro nodos), donde cada elemento posee un tamaño entre 5,5 mm a 0,04 mm, tal que las zonas críticas de mayor gradiente térmico producto de la acción del haz láser aplicado en el centro de la placa posean una mayor densidad de elementos tal como se observa en la Figura 4. Esto es necesario para que el método de elementos finitos entregue resultados precisos en las zonas de interés.

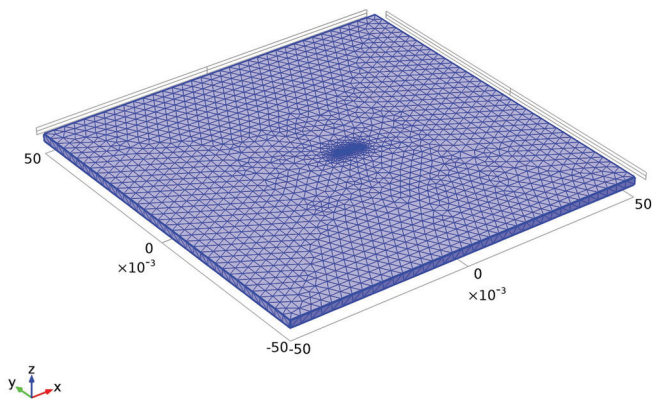


Figura 4. Mallado completo producido por COMSOL Multiphysics, compuesto por 12.000 elementos. En el punto central donde se aplica el haz láser se realizó una discretización con una densidad de elementos mucho mayor.

Finalmente, se dio pie a la tercera y última etapa, que corresponde a un proceso de discusión y validación experimental de los resultados numéricos obtenidos. Para esto, se usó el método de mínimos cuadrados ajustando los datos experimentales ($T_{exp}(t)$) de temperatura medidos por los cuatro termopares a las obtenidas por medio de la simulación ($T_{sim}(a,d,t)$), para así encontrar los parámetros a y d , que corresponden al coeficiente de absorción y al diámetro efectivo de los termopares, respectivamente.

Tal como se mencionó anteriormente, es importante destacar que la medición del termopar no es estrictamente puntual sino que la misma se supone que corresponde al promedio de un área circular de diámetro d , el cual también debe ser estimado. Por último, se destaca que la sumatoria del error se realiza para los cuatro puntos de medición asociados de manera independiente para cada una de las tres condiciones de la superficie de la placa ya expuestas.

Ya que no se cuenta con una expresión para $T_{sim}(a,d,t)$, el método de mínimos cuadrados se implementó obteniendo la evolución de temperatura en cierto intervalo de tiempo en los puntos de interés, usando el software de simulación para un rango de valores de 'a' y 'd', los cuales son parámetros que se

ingresan al programa. Una vez obtenidos esos datos, se calcula el error cuadrático medio respecto de los datos experimentales. Finalmente, para cada valor de los parámetros se grafica el error calculado (Figura 5 variando el diámetro efectivo y Figura 6 variando el coeficiente de absorción). El valor determinado para el parámetro será aquel que minimice el error.

RESULTADO Y DISCUSIÓN

Se debe considerar que se tienen dos parámetros que se deben determinar: el primero corresponde al objetivo principal, el coeficiente de absorción a para cada una de las tres condiciones de la superficie de la placa, mientras que el segundo surge del hecho que, al momento de utilizar termopares, es necesario evaluar el área que efectivamente afecta la toma de datos y que depende del diámetro d .

A continuación se presenta el estudio mediante simulación numérica del diámetro efectivo del termopar. Cabe notar que se consideraron diámetros a priori apropiados, tomando como referencia que cada uno de los cables del termopar mide 0,5 mm y la soldadura de ambos aproximadamente 1,5 mm. También se analizaron casos extremos como lo son 0,1 mm y 2 mm.

En la Figura 5 se grafica el valor mínimo del error (ver apartado de Principio Científico) para los coeficientes de absorción de 0,28, 0,29 y 0,30. Estos coeficientes corresponden a los obtenidos de la minimización del error para el caso de la simulación de grafito degradado tal como se muestra más adelante.

Se nota que el efecto del diámetro es poco relevante. Además, el error tiende a disminuir a medida que el diámetro se considera como un punto, o sea cuando tiende a $d = 0$ mm, algo que carece de sentido físico. Estos resultados claramente reflejan que los gradientes de temperatura en las posiciones de los termopares no son tan pronunciados. Por lo tanto, se puede considerar que el diámetro efectivo no es un parámetro influyente y basta con suponer que el mismo vale 1,5 mm.

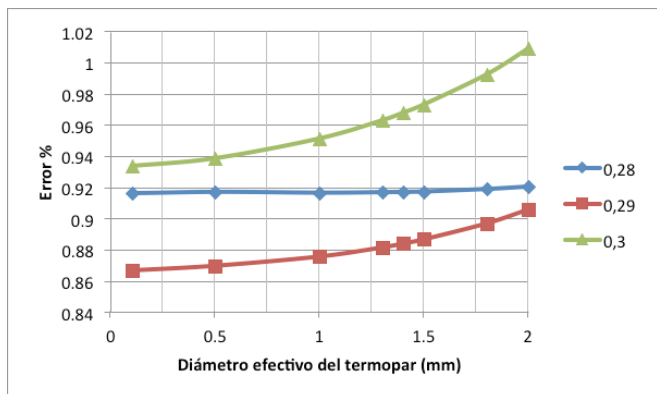


Figura 5. Diámetro efectivo del termopar para una potencia de 30 W con grafito degradado.

Realizando una minimización del error cuadrático para distintos coeficientes de absorción se obtienen los resultados expuestos en la Figura 6. Se observa que se obtienen los coeficientes de absorción de 0,20 para el caso sin grafito, 0,29 con grafito degradado y 0,41 con grafito no degradado. Este último resultado es ampliamente superior al del caso con grafito degradado.

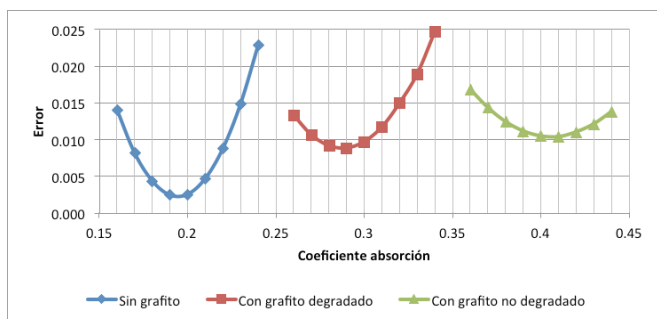


Figura 6. Minimización del error cuadrático para los tres coeficientes de absorción.

Finalmente, se muestran los gráficos comparativos entre los datos experimentales y los obtenidos por simulación numérica. La leyenda presentada en la Figura 7d es común para la Figura 7 completa. Se observa que el ajuste es en general bastante adecuado. Las mayores diferencias se producen en los termopares que están a 2 mm del haz láser, ya que estos puntos son los que poseen un gradiente más acentuado.

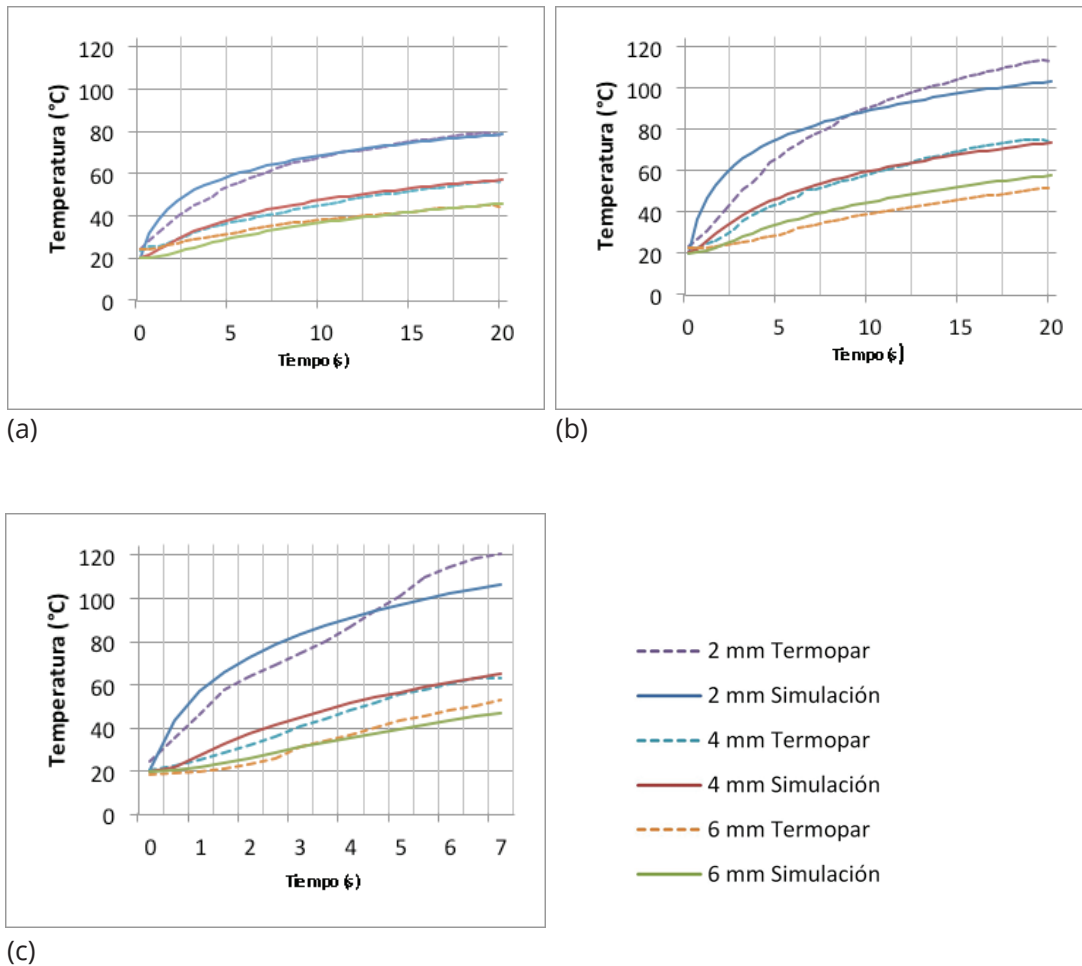


Figura 7. Comparación de temperaturas a 30 W: a) sin grafito, b) con grafito, c) con grafito degradado.

CONCLUSIONES

El aspecto de vital importancia en este proceso y que fue especialmente analizado en este trabajo fue la determinación del coeficiente de absorción de la superficie de la placa para distintas condiciones superficiales. Este coeficiente depende del material sobre el cual se está aplicando el haz láser y de la longitud de onda de éste. El mismo se puede obtener sin mover el láser.

El área que efectivamente era afectada por el termopar se consideró previa a la experimentación como un parámetro importante a determinar. Sin embargo, los resultados obtenidos mostraron que su influencia no era tan relevante y, por lo tanto, fue finalmente considerado como un parámetro secundario.

Se pudo observar la influencia de la capa de grafito. Ésta permite aumentar considerablemente la energía absorbida por la placa, que aumenta casi en un 50%, por lo que la energía necesaria para realizar un conformado podrá ser disminuida considerablemente. Por otro lado, la degradación del grafito es, sin duda, un aspecto de total relevancia: cuando es parcial, disminuye el coeficiente de absorción pero tanto como para considerar que el material no tuviese una capa del material. Por ende, se puede considerar que existen de tres coeficientes de absorción independientes: el primero, corresponde al coeficiente sin la aplicación de una capa de grafito, de valor 0,20; posteriormente se obtuvo un coeficiente con una capa de grafito degradado, de valor 0,29; y, finalmente, un coeficiente de absorción con el grafito no degradado correspondiente a 0,41.

Con la determinación de los distintos coeficientes de absorción se puede estimar de manera precisa la energía asociada a un proceso de conformado plástico. Este eventual ahorro de energía debería repercutir fuertemente a nivel industrial donde se realicen una gran cantidad de procesos de conformado.

PRINCIPIO CIENTÍFICO UTILIZADO

Flujo de calor que aporta el láser al material de trabajo para el conformado. Éste considera que la energía aportada del láser se distribuye uniformemente en el área cubierta por el haz láser de la siguiente forma:

$$\varphi_{laser} = \frac{P}{\pi \cdot r_b^2} \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

Donde φ_{laser} es el flujo de energía aportado por el láser, P es la potencia del láser y r_b es el radio del haz láser irradiado. Esta energía aportada por el láser no es íntegramente absorbida por la placa metálica, ya que una parte de esta energía es reflejada por ella hacia el ambiente. La densidad de flujo es de la forma:

$$I = \frac{2 \cdot a \cdot P}{\pi \cdot r_b^2} \cdot \exp\left(-\frac{2 \cdot r^2}{r_b^2}\right) \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

Donde a corresponde al coeficiente de absorción de la superficie de la placa metálica, y r es la distancia al centro del haz láser.

La validación se realizó mediante mínimos cuadrados, la cual es una técnica de análisis numérico enmarcada dentro de la optimización matemática, en la que, dados un conjunto de pares ordenados (variable independiente, variable dependiente, y una familia de funciones), se intenta encontrar la función continua, dentro de dicha familia, que mejor se aproxime a los datos, de acuerdo con el criterio de mínimo error cuadrático.

$$\text{Min}_{(a,d)} \text{error}(a,d) = \frac{\sum_{\text{Tiempo de medición}} (T_{exp}(t) - T_{sim}(a,d,t))^2}{\sum_{\text{Tiempo de medición}} T_{exp}(t)^2}$$

Donde $T_{exp}(t)$ corresponde a la temperatura a cierta distancia del haz obtenida experimentalmente y $T_{sim}(a,d,t)$ corresponde a la temperatura a la misma distancia pero obtenida para un coeficiente de absorción a y un diámetro de termopar d , obtenida mediante la simulación por elementos finitos en COMSOL Multiphysics.

GLOSARIO

Coefficiente de absorción: Es una medida de la facilidad con la que un medio puede ser penetrado por una onda, partículas o energía. En otras palabras, corresponde al cociente entre la energía absorbida y la energía incidente sobre una superficie, que depende primordialmente del material de la superficie y de la longitud de onda de la energía incidente.

Conformado plástico de metales: Son todos aquellos procesos donde se busca generar formas a metales, de tal manera que su volumen y masa se conservan, y las partículas son desplazadas de una posición a otra. Por ejemplo: trefilado, embutido.

Deformación plástica: Modo de deformación en que el material no regresa a su forma original después de retirar la carga aplicada.

Láser: Originado como un acrónimo de "light amplification by stimulated emission of radiation", corresponde a un dispositivo que utiliza un efecto de la mecánica cuántica, la emisión inducida o estimulada, para generar un haz de luz coherente de un medio adecuado y con el tamaño, la forma y la pureza controlados.

Método de elementos finitos: Es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales, muy empleado en diversos problemas de ingeniería y física. Utiliza métodos variacionales para disminuir una función de error y producir soluciones estables.

Proceso cuasi estático: Idealización de un proceso real que se lleva a cabo de tal modo que el sistema está en todo momento muy cerca del estado de equilibrio.

Proceso de doblado de chapas con láser: Alude normalmente al conformado térmico. Usa la distorsión térmica inducida por el láser para conformar piezas metálicas sin el empleo de herramientas o intervención de fuerzas externas.

Termopar: (Termocupla) Es un transductor formado por la unión de dos metales distintos que produce un voltaje, que es función de la diferencia de temperatura entre uno de los extremos denominado punto caliente y el otro, punto frío.

REFERENCIAS

1. J.R. Davis & Asociados (eds.). ASM Specialty Handbook: Stainless Steels. Ohio. EE.UU.: ASM International, 1994..
2. Cheng, P.; Yao, Y.L.; Chao, L.; Pratt, D.; Fan, Y. Analysis and prediction of size effect on laser forming of sheet metal. *Journal of Manufacturing Processes* 7 (1): 28-41, 2005.
3. Geiger, M.; Vollertsen, F. The mechanisms of laser forming. *CIRP Annals* 42 (1): 301-304, 1993.
4. Namba, Y. Laser forming of metal and alloys. *Proceeding of LAMP '87*, Osaka, Japón, 1986.
5. Rojas, F. Análisis experimental y numérico del proceso de conformado de láminas metálicas delgadas mediante la aplicación láser. Memoria de Título de Ingeniero Civil Mecánico. PUC, Santiago, Chile, 2008.
6. Scully, K. Laser line heating, *Journal of Ship Production* 3 (4), 237-246, 1987.
7. Stevens, V. Análisis experimental y simulación numérica del proceso de conformado de láminas metálicas delgadas mediante la aplicación de un láser de baja potencia. Tesis de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, PUC, Santiago, Chile, 2011.
8. Vásquez, C. Conformado de láminas metálicas delgadas mediante láser de baja potencia. Tesis de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, PUC, Santiago, Chile, 2007.

EQUIPO DE INVESTIGADORES

- 1 Vicente Jacobsen
- 2 Profesor Diego Celentano

