



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

**EFFECTO DEL ÁNGULO DE INCIDENCIA
EN EL COEFICIENTE DE ABSORCIÓN Y
METODOLOGÍA PARA LA
FABRICACIÓN DE SUPERFICIES
CRANEALES MEDIANTE DOBLADO
LÁSER**

FELIPE IGNACIO COOK HERNÁNDEZ

Tesis para optar al grado de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor:
DIEGO CELENTANO

Santiago de Chile, Agosto, 2015

© 2015, Felipe Cook Hernández



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

**EFFECTO DEL ÁNGULO DE INCIDENCIA EN EL
COEFICIENTE DE ABSORCIÓN Y
METODOLOGÍA PARA LA FABRICACIÓN DE
SUPERFICIES CRANEALES MEDIANTE
DOBLADO LÁSER**

FELIPE IGNACIO COOK HERNÁNDEZ

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

DIEGO CELENTANO

JORGE RAMOS-GREZ

MARCELA CRUCHAGA

DIEGO LÓPEZ-GARCÍA

Para completar las exigencias del grado de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Santiago de Chile, Agosto, 2015

Para Andrea, por su apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a CONICYT, quienes a través de su programa Beca de Magíster Nacional (PFCHA/22141448), brindaron un apoyo muy importante.

Agradezco a mi profesor guía, Diego Celentano por su conocimiento, apoyo y siempre brindar un trato cercano y amable. Gran parte de este trabajo se debe a su disposición por siempre ayudar. Aprovecho de agradecer a Patricio Pérez por facilitar las instalaciones para este trabajo.

INDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
INDICE DE TABLAS	vi
INDICE DE FIGURAS.....	vii
RESUMEN.....	ix
ABSTRACT	x
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Presentación del problema	1
1.2 Motivación	3
1.3 Hipótesis y objetivos	4
1.4 Contenido	5
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y ESTADO DEL ARTE	7
3. COEFICIENTE DE ABSORCIÓN DEL ACERO AISI 304	10
3.1 Introducción.....	10
3.2 Métodos	11
3.2.1 Procedimiento experimental.....	11
3.2.2 Modelamiento y simulación numérica	14
3.2.3 Mínimos cuadrados	17
3.3 Resultados.....	18
3.4 Discusión	20
4. EFECTO DEL ÁNGULO DE INCIDENCIA EN EL COEFICIENTE DE ABSORCIÓN DEL ACERO AISI 304 CUBIERTO CON GRAFITO	24
4.1 Introducción.....	24
4.2 Métodos	27
4.2.1 Procedimiento experimental.....	27
4.2.2 Modelamiento y simulación numérica	30

4.2.3	Mínimos cuadrados	31
4.3	Resultados	32
4.4	Discusión	34
5.	ANÁLISIS PROCESO DE DOBLADO LÁSER Y GENERACIÓN DE BASE DE DATOS	39
5.1	Introducción	39
5.2	Métodos	40
5.2.1	Procedimiento experimental.....	40
5.2.2	Modelamiento y simulación numérica	42
5.3	Resultados.....	46
5.4	Generación base de datos.....	49
5.5	Discusión	52
6.	METODOLOGÍA DE DISEÑO PARA OBTENCIÓN DE SUPERFICIE CRANEAL MEDIANTE CONFORMADO LÁSER.....	55
6.1	Introducción	55
6.2	Métodos	57
6.2.1	Superficie deseada.....	57
6.2.2	Campo de deformaciones	60
6.2.3	Determinación parámetros de irradiación	62
6.2.4	Procedimiento experimental.....	65
6.3	Resultados.....	66
6.4	Discusión	68
7.	CONCLUSIONES GENERALES.....	71
	BIBLIOGRAFIA.....	74
	A N E X O S.....	77
	Anexo A: Propiedades acero 304	78
	Anexo B: Detalle resultados doblado láser Capítulo 5	79

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 3-1: Composición química (% en peso) del acero AISI 304.....	12
Tabla 5-1: Resultados experimentales del ángulo de doblado (en °), incluyendo desviación estándar.	46
Tabla 5-2: Resultados simulaciones numéricas, ángulo de doblado (en °).....	47
Tabla B-1: Resultados experimentales del ángulo de doblado (en °), potencia 28 W	79
Tabla B-2: Resultados experimentales del ángulo de doblado (en °), potencia 54 W	79
Tabla B-3: Resultados experimentales del ángulo de doblado (en °), potencia 82 W	80
Tabla B-4: Resultados experimentales del ángulo de doblado (en °), potencia 111 W ...	81

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1-1: Esquema doblado láser.....	2
Figura 3-1: Montaje experimental.....	13
Figura 3-2: Montaje termopar.	14
Figura 3-3: Malla empleada, centro de la placa en esquina inferior izquierda.	17
Figura 3-4: Error experimental-numérico.	19
Figura 3-5: Curvas de temperatura: a) con grafito b) sin grafito.	20
Figura 3-6: Distribución de potencia experimental, máximos corresponden a las dos marcas centrales.	22
Figura 4-1: Angulo de incidencia láser.	25
Figura 4-2: Coeficiente de absorción del aluminio vs ángulo de incidencia para distintas rugosidades (Bergstrom, 2007). Los valores en el cuadro indican un medida adimensional proporcional a la rugosidad superficial.....	25
Figura 4-3: a) Montaje experimental b) Plataforma inclinable.....	28
Figura 4-4: a) Planos 1 y 2 generan la misma elipse b) Planos 1' y 2' generan distintas elipses.....	29
Figura 4-5: Esquema de la irradiación del láser en superficie inclinada. Los círculos muestran los puntos de medición.	31
Figura 4-6: Coeficiente de absorción en función del ángulo de incidencia.	33
Figura 4-7: Temperatura calculada en diferentes ubicaciones, $P_l = 55 \text{ W}$	34

Figura 4-8: Efecto de la rugosidad en la reflexión del haz láser para ángulos de incidencia menores a 20° .	35
Figura 4-9: Efecto de la rugosidad en la reflexión del haz láser para ángulos de incidencia mayores a 20° .	36
Figura 5-1: a) Montaje experimental b) Sistema de movimiento.	41
Figura 5-2: Malla doblado láser.	46
Figura 5-3: Validación del modelo termo-mecánico.	48
Figura 5-4: Campo de deformaciones perpendiculares a la trayectoria del láser.	49
Figura 5-5: Base de datos.	50
Figura 5-6: Base de datos, vista superior.	51
Figura 5-7: Fusión y vaporización de material a altas temperaturas.	52
Figura 6-1: Tomografía de cráneo.	58
Figura 6-2: Superficie deseada.	59
Figura 6-3: Superficie craneal mallada.	60
Figura 6-4: Campo vectorial de deformación principal máxima, configuración plana.	61
Figura 6-5: Caminos de irradiación.	62
Figura 6-6: Condiciones de irradiación para un camino en específico.	64
Figura 6-7: a) Montaje experimental b) Sistema de movimiento.	65
Figura 6-8: Forma resultante	66
Figura 6-9: a) Vista frontal b) Vista lateral c) Vista isométrica.	67
Figura 6-10: Comparación de la superficie obtenida y la deseada, en mm.	68

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es comprender de manera satisfactoria el conformado láser y su simulación numérica con la finalidad de usar esta técnica moderna de manufactura para obtener una superficie 3D compleja

Primero se propone un método experimental-numérico para medir el coeficiente de absorción del acero AISI 304 con y sin una capa de grafito superficial. Se muestra que el coeficiente de absorción de láminas metálicas difiere significativamente del valor reportado en la literatura para materiales puros y pulidos.

Luego, usando el mismo método, se obtiene la relación entre el coeficiente de absorción y el ángulo de incidencia del láser para el acero AISI 304 cubierto con grafito, mostrándose que hay un efecto importante de este parámetro.

A continuación, mediante un modelo termo-mecánico se simula numéricamente de manera correcta el conformado láser, con excepción de los casos en que la temperatura en la zona de irradiación del láser es cercana al punto de fusión del material.

Finalmente, se aplica una metodología de diseño mediante la cual se obtiene, con resultados óptimos, una superficie tridimensional correspondiente al cráneo humano a partir de una lámina metálica plana.

Palabras Claves: conformado láser, doblado 3D, simulación termo-mecánica, método de elementos finitos, coeficiente de absorción, acero inoxidable.

ABSTRACT

The objective of this work is to study and numerically simulate the laser forming process with the final aim of using this modern manufacturing technique to obtain a complex 3D surface.

First a numerical-experimental methodology for measuring the absorption coefficient of AISI 304 steel, with and without a layer of graphite, is presented. The results show that the absorption coefficient differs significantly from the value reported in literature for pure and polished materials.

Then, using the same method, the relationship between the laser angle of incidence and the absorption coefficient of AISI 304 steel covered with graphite is obtained, showing a significant effect of this parameter.

A thermo-mechanical model is used afterwards to simulate satisfactorily the laser forming process, except when the temperature in the irradiated zone is close to the melting point of the material.

Finally, a design methodology is applied to obtain a three-dimensional surface corresponding to the human skull from a flat metal sheet with optimum results.

Keywords: laser forming, 3D surface forming, thermo-mechanical simulation, FEM, absorptance, stainless steel.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Presentación del problema

Dentro de los distintos tipos de procesos de manufactura, los procesos de conformado son aquéllos en los que se modifica la forma inicial de un objeto mediante deformaciones plásticas para obtener una forma final según sean las necesidades del diseño. Los métodos tradicionales de conformado de planchas metálicas consisten en la aplicación de una fuerza para llevar al material hasta el rango plástico, entre ellos, se pueden mencionar al estampado, embutido o forjado.

El conformado de láminas metálicas mediante el uso de un haz láser es una técnica moderna de manufactura, desarrollada a partir de los años 80 (Shen y Vollertsen, 2009), que consiste en irradiar la superficie de la lámina e inducir tensiones térmicas no-uniformes (Figura 1-1). A diferencia de las técnicas convencionales de conformado, no requiere de fuerzas externas o contacto con herramientas de moldeo.

Materiales aptos para esta técnica son aquéllos que tengan alto coeficiente de expansión térmica, como los aceros inoxidable, aluminio, titanio o magnesio (Yanjin, 2004). La principal ventaja del doblado láser es una alta flexibilidad, ya que para obtener distintas formas no son necesarios nuevos cuños, moldes o prensas, sino que basta con modificar los parámetros de escaneo (camino de irradiación, potencia y velocidad del láser). En consecuencia, es una técnica de manufactura apta para volúmenes pequeños de producción, prototipado o ajuste de láminas metálicas. Por otro lado, dentro de las desventajas podemos mencionar una menor rapidez de doblado, comparado con el

estampado, y la necesidad de tener un control estricto sobre todos los parámetros del proceso para obtener resultados óptimos.

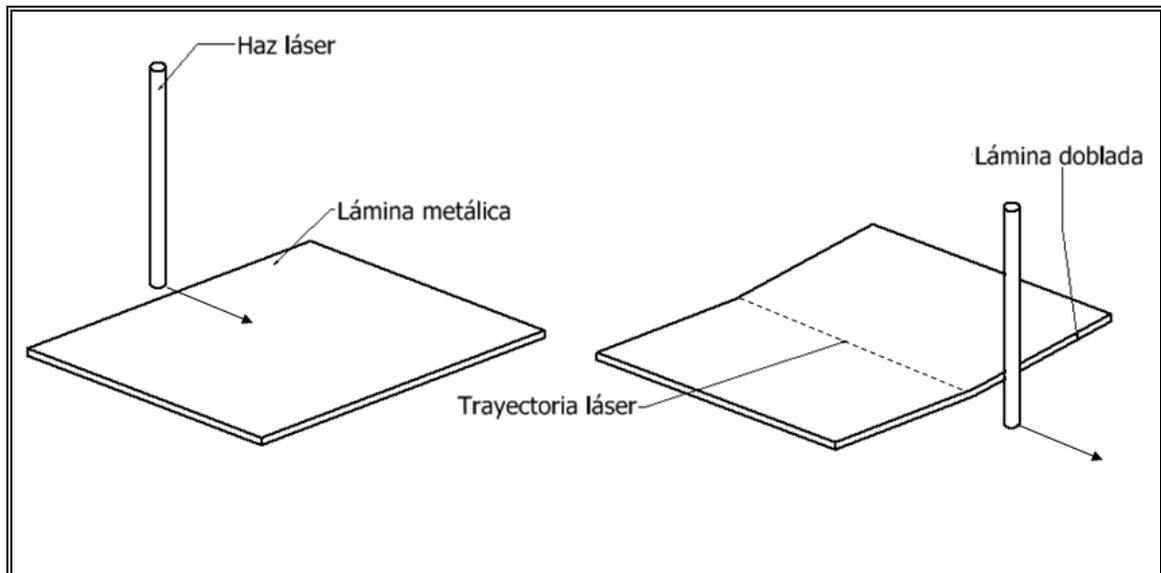


Figura 1-1: Esquema doblado láser.

El conformado láser involucra una interacción compleja entre distintos parámetros, tanto aquellos relacionados con la irradiación del láser (diámetro, longitud de onda, densidad de potencia, etc.), como aquéllos relacionados con las propiedades físicas, térmicas y mecánicas del material que se desea doblar (coeficiente de absorción, coeficiente de dilatación térmica, tensión de fluencia, etc.). Además, la temperatura, deformación inducida y distintas propiedades del material varían con el tiempo, por lo que es ampliamente reconocido que la herramienta adecuada para estudiar el proceso es la simulación numérica (Shen y Vollertsen, 2009).

Si el diámetro del láser es similar al espesor de la plancha metálica, el mecanismo por el cual ocurre el doblado láser se denomina mecanismo de gradiente térmico (TGM)

(Geiger y Vollertsen, 1993). Este mecanismo consiste en establecer, mediante la irradiación del láser en la superficie, un gradiente térmico pronunciado en el espesor de la lámina, ya que la superficie irradiada alcanza una temperatura considerablemente mayor que la de la superficie opuesta, lo que produce por lo tanto un gradiente en la expansión térmica a lo largo del espesor.

A su vez, dado que el láser genera un aumento de temperatura localizado en la lámina, las zonas de mayor temperatura quedan confinadas en su expansión y, por lo tanto, se produce compresión en esas zonas. Unido al hecho de que la tensión de fluencia disminuye con la temperatura, una vez que las compresiones térmicas alcanzan la tensión de fluencia, cualquier expansión térmica adicional se convierte en deformación plástica de contracción ya que la expansión está restringida por el material circundante.

Como resultado, una vez que el material se enfría a temperatura ambiente, presentará un ángulo de doblado cóncavo hacia la fuente del haz láser, ya que la superficie irradiada presenta mayor contracción plástica que la superficie opuesta.

1.2 Motivación

Debido a la flexibilidad del conformado láser como método de manufactura, es de particular interés estudiar su aplicación para la obtención de superficies tridimensionales complejas y con volúmenes de producción bajos, cuya fabricación requeriría altos costos usando métodos tradicionales o técnicas intensivas en habilidad manual.

Para ello, es necesario primero comprender y modelar satisfactoriamente el proceso termo-mecánico del doblado láser y, luego, seguir un proceso de diseño que permita determinar los parámetros necesarios para obtener una superficie deseada.

1.3 Hipótesis y objetivos

Esta tesis se centra en modelar numéricamente de manera satisfactoria el proceso de doblado láser y, posteriormente, aplicar esos resultados en un proceso de diseño que permita obtener una superficie 3D.

Se plantean tres hipótesis:

- El coeficiente de absorción de láminas metálicas difiere significativamente del valor reportado en literatura para materiales puros y pulidos.
- El ángulo de incidencia tiene un efecto en el coeficiente de absorción de superficies metálicas cubiertas con grafito.
- Mediante conformado láser se pueden obtener superficies tridimensionales correspondientes al cráneo humano a partir de una lámina metálica plana con resultados óptimos.

El objetivo general de este trabajo es validar el doblado láser como una técnica de conformado para obtener una superficie tridimensional. Los objetivos específicos son:

- Estudiar el proceso de absorción de energía y determinar el coeficiente de absorción mediante un análisis experimental-numérico.
- Estudiar el efecto del ángulo de incidencia en el coeficiente de absorción mediante un análisis experimental-numérico.

- Realizar experimentos de doblado en línea recta.
- Contrastar esos experimentos satisfactoriamente con simulaciones del proceso.
- Obtener una base de datos que relacione los parámetros del proceso con la deformación resultante.
- Mediante un proceso de diseño, determinar los parámetros necesarios para obtener una superficie tridimensional y analizar los resultados.
- Proponer mejoras al proceso.

1.4 Contenido

En el segundo capítulo se hace una revisión bibliográfica del conformado láser, estableciendo el estado del arte asociado al tema. En el tercer capítulo se determina el coeficiente de absorción del acero inoxidable AISI 304, mientras que en el cuarto capítulo se estudia el efecto del ángulo de incidencia en el coeficiente de absorción del mismo material. En el quinto capítulo se realizan experimentos de doblado en línea recta, se comparan las mediciones del ángulo de doblado con los resultados de simulaciones y, posteriormente, se obtiene una base de datos para el proceso. En el sexto capítulo se aplica esa base de datos para obtener una superficie tridimensional del cráneo humano y, finalmente, en el séptimo capítulo se realizan las conclusiones pertinentes y se proponen mejoras al proceso.

Los resultados del segundo capítulo se publicaron en el artículo *Characterization of the absorptance of laser irradiated steel sheets* en la revista *Journal of Laser Applications*, *Volume 27, Number 3*. Por otro lado, los resultados del cuarto capítulo se encuentran en

el artículo *Effect of inclination angle on the absorptance of a graphite-coated cold-rolled steel sheet*, y los resultados del quinto y sexto capítulo en el artículo *Experimental-numerical methodology for the manufacturing of cranial prosthesis via laser forming*, ambos en etapa de revisión en revistas. Además, los resultados del cuarto capítulo se presentaron en el congreso *1st Pan American Congress on Computational Mechanics*, realizado en Buenos Aires, Argentina en abril de 2015, mientras que los resultados del quinto y sexto capítulo en el congreso *VI International Conference on Coupled Problems in Science and Engineering*, realizado en Venecia, Italia en mayo de 2015.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se hace una revisión de la literatura científica en torno al conformado láser, destacando los artículos relevantes para este trabajo.

Cheng y Lin (2001) presentaron un modelo analítico para estimar el ángulo de doblado, superior en su capacidad predictiva a modelos analíticos previos, pero con la limitante de estar restringido a caminos de irradiación en línea recta.

Bao y Yao (2001) analizaron el efecto de borde (variación del ángulo de doblado a lo largo del camino de irradiación), que afecta adversamente el proceso ya que causa una desviación de un doblado con ángulo constante, y concluyeron que en procesos de doblado láser dominados por el mecanismo de gradiente térmico (TGM), el extremo libre de la lámina que es paralelo al camino de irradiación se curva hacia la fuente láser.

Shen et al. (2010) propusieron esquemas de irradiación para reducir el efecto de borde, mostrando que un camino con velocidad escalonada es el más efectivo.

Yanjin et al. (2004) estudiaron la influencia de las distintas propiedades del material en el ángulo de doblado resultante, concluyendo que una menor tensión de fluencia, menor conductividad térmica o mayor coeficiente de expansión térmica producen mayores ángulos de doblado.

Cheng et al. (2005) analizaron el efecto del tamaño de las láminas, observando que el ángulo de doblado disminuye cuando el largo de la lámina (definida como la dimensión paralela al camino de irradiación) es constante y el ancho aumenta, mientras que el ángulo de doblado aumenta cuando el largo de la lámina aumenta y el ancho se mantiene constante. Cheng y Yao (2005) estudiaron la influencia de la anisotropía de las láminas,

mostrando que si la potencia del láser aumenta mientras la velocidad se mantiene constante, mayores temperaturas en el material disminuyen el efecto de la anisotropía.

Vásquez-Ojeda y Ramos-Grez (2009) estudiaron el efecto de escanear con patrones zigzag, cuadrados o escalonados, mostrando que se obtienen ángulos de doblado más suaves y redondos, en vez de esquinas como ocurre con el patrón lineal convencional.

Walczak et al. (2010) concluyeron que debido al cambio en la microestructura que genera la carga térmica aplicada por el doblado láser, el acero AISI 302 se sensibiliza y por lo tanto en un medio corrosivo puede ocurrir corrosión intergranular.

Una técnica habitual para mejorar el coeficiente de absorción (fracción de la energía incidente que es absorbida por el material irradiado) en el doblado láser de láminas metálicas es cubrir la superficie con una capa de grafito spray. Bergstrom (2005) calcula el coeficiente de absorción de diversas superficies metálicas rugosas sin grafito y muestra que este valor depende del ángulo de incidencia del haz láser, pero no extiende su estudio a superficies metálicas cubiertas con grafito, condición que es relevante para el doblado láser.

Liu y Yao (2004) propusieron una metodología de diseño para obtener superficies 3D mediante doblado láser basada en geometría diferencial junto con optimización, mientras que Cheng y Yao (2004) presentaron una estrategia basada en simulación por medio del método de elementos finitos (FEM). Ambos métodos se basan en aplanar la superficie deseada, calcular la distribución del campo de deformaciones en la configuración plana y relacionar ese campo con las deformaciones que causa el doblado láser. En ambos métodos se obtuvieron resultados correctos para superficies similares a paraboloides

hiperbólicos (también llamada silla de montar) y elípticos, sin aplicar los métodos a superficies más complicadas.

Los temas a tratar en esta tesis constituyen un avance en el campo del doblado láser, pues se presentará un método relativamente simple para medir el coeficiente de absorción de superficies metálicas con y sin grafito superficial (Capítulo 3), usando ese mismo método se estudiará el efecto del ángulo de incidencia en el coeficiente de absorción del grafito superficial (Capítulo 4) y se aplicará el doblado láser para obtener una superficie tridimensional y complicada del cráneo humano (Capítulos 5 y 6).

3. COEFICIENTE DE ABSORCIÓN DEL ACERO AISI 304

3.1 Introducción

El análisis termo-mecánico del conformado láser es complejo ya que la temperatura, deformación inducida y distintas propiedades del material de la placa irradiada varían con el tiempo. Dado que las soluciones analíticas son precisas sólo en casos de doblado simple, como por ejemplo doblados rectos (Shen, 2005), es ampliamente reconocido que la herramienta adecuada para estudiar el proceso y predecir la superficie resultante es la simulación numérica (Shen y Vollertsen, 2009).

Un parámetro importante para simular el proceso es el coeficiente de absorción (usualmente denotado en la literatura con la letra a). Este parámetro se define como la fracción de la energía incidente que es absorbida por el material irradiado. Para el proceso de doblado láser, este parámetro se considera como independiente de la temperatura del material y el diámetro del haz láser, pero dependiente del material irradiado, la condición superficial del material irradiado (rugosidad superficial o presencia de óxidos), la longitud de onda y polarización del haz láser (Bergstrom, 2007). Una técnica habitual para mejorar el coeficiente de absorción de superficies metálicas es cubrirlas con una capa de grafito aplicado mediante un spray.

Usar valores erróneos de coeficiente de absorción en las simulaciones numéricas del doblado láser resulta en desviaciones importantes de los resultados experimentales. El análisis de la influencia en la propagación de errores muestra que variaciones en la potencia del láser y en el coeficiente de absorción son los factores más influyentes en los resultados numéricos (Hennige et al., 1997). Más aún, el coeficiente de absorción de los

materiales usados en aplicaciones industriales difiere grandemente de los valores reportados para materiales puros. Por lo tanto, es importante determinar su valor para cada situación experimental, dependiendo de la condición superficial y de la presencia de una capa de grafito, entre otros factores (Bergstrom, 2007).

En este capítulo, se propone y emplea un procedimiento basado en ensayos experimentales junto con simulaciones térmicas para determinar el coeficiente de absorción de un láser de fibra de iterbio (Yb) irradiando una lámina de acero inoxidable 304 laminada en frío bajo dos condiciones superficiales, con y sin una capa de grafito.

3.2 Métodos

3.2.1 Procedimiento experimental

El procedimiento experimental adoptado en este trabajo para caracterizar el coeficiente de absorción consiste en la medición de la evolución de la temperatura (usando termopares tipo K) en diferentes lugares de una lámina de acero inoxidable durante la aplicación de un haz láser fijo. Se decidió caracterizar este material ya que es un material habitual en procesos de estampados y será el mismo que se empleará en los experimentos de doblado láser presentados en el Capítulo 5. La composición se muestra en la Tabla 3-1 (Davis, 1994).

Tabla 3-1: Composición química (% en peso) del acero AISI 304

C min	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Fe
0,08	2,00	1,00	0,05	0,03	18-20	8-11	Bal.

El montaje experimental se muestra en la Figura 3-1. Consiste en un colimador del haz láser (longitud de onda 1,07 μm , fibra de Yb multimodo, $M^2 = 1,2$) y una plataforma donde una placa metálica (100 x 100 mm, 2 mm espesor) se apoya en sus bordes, dejando las superficies superior e inferior en contacto con aire. La potencia del haz láser se regula electrónicamente y se verifica mediante un potenciómetro. El diámetro del láser es 6,00 mm, dato provisto por el fabricante del láser, así como también verificado experimentalmente midiendo la marca producida por un pulso de corta duración sobre un papel sensible al láser (ZAP-IT[®] Laser Burn and Alignment Paper). Dado que este método entregó el mismo diámetro informado por el fabricante, el mismo será usado en experimentos posteriores de esta tesis, pero cabe notar que requiere emisión pulsada del láser para evitar quemar el papel.

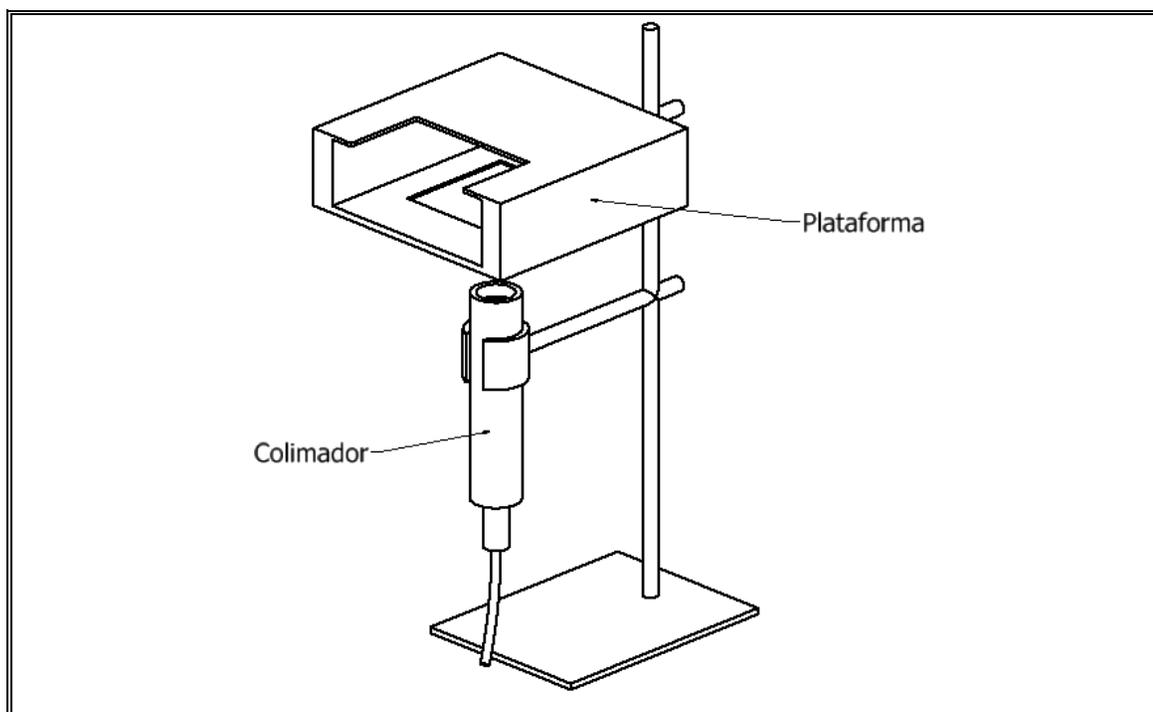


Figura 3-1: Montaje experimental.

Las muestras se irradian en el centro de la superficie inferior de la placa durante 20 segundos. La evolución de la temperatura durante esos 20 segundos se registra mediante termopares ubicados en tres lugares de la superficie superior (al centro, 4 mm y 8 mm en la dirección radial) para diferentes potencias del láser (30 W, 60 W y 80 W).

Se utilizaron muestras con y sin capa de grafito. El grafito usado es Tool Crib[®] Dry Graphite Lube, para el cual el fabricante reporta una temperatura de resistencia de 450 °C. Sobre esta temperatura, se espera que ocurra ablación de la capa de grafito.

Con el fin de obtener mediciones precisas, se emplea la pasta térmica Arctic Silver[®], cuya conductividad térmica (8,7 W/(m·K)) es del mismo orden de magnitud que la conductividad del acero, como interfaz en el contacto entre el termopar y el lugar de

medición (Figura 3-2). Esto impide que el aire (cuya conductividad térmica es de 0,03 W/(m·K)) actúe como un aislante entre el termopar y el metal.

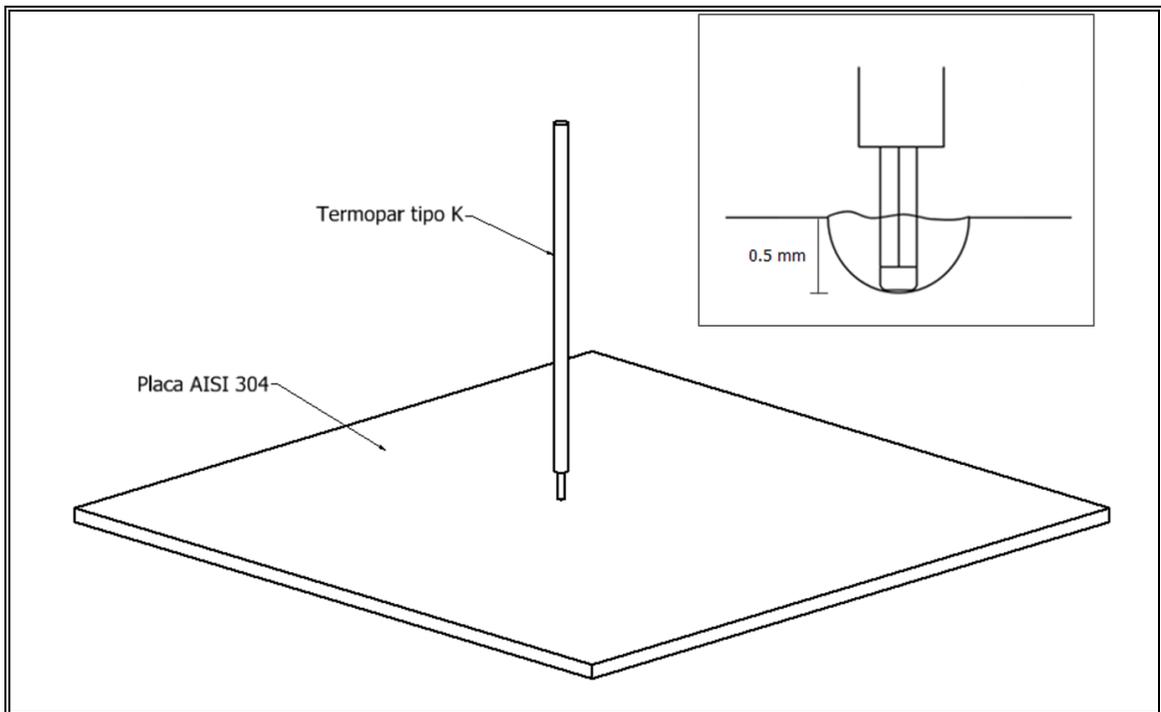


Figura 3-2: Montaje termopar.

3.2.2 Modelamiento y simulación numérica

La ecuación local que gobierna la evolución de temperatura en este problema puede ser expresada mediante el balance de energía (válida en $\Omega \times [0, t_f]$, donde Ω es la configuración espacial del cuerpo y $[0, t_f]$ es el intervalo de tiempo de interés, con $t \in [0, t_f]$), escrita en la configuración espacial como:

$$\rho c \dot{T} - \nabla \cdot (k \nabla T) = 0 \quad (\mathbf{x}, t) \in \Omega \times [0, t_f] \quad (3.1)$$

junto con las condiciones de borde y condiciones iniciales apropiadas. En estas ecuaciones, ∇ es el gradiente espacial, T es la temperatura, el punto sobre las letras indica derivada temporal, ρ es la densidad, c es el calor específico y k es la conductividad térmica. Fuentes volumétricas internas de calor y cambios de fase no están incluidas en este modelo.

La condición de borde correspondiente al flujo de calor (válida en $\Gamma_{th} \times [0, t_f]$, donde Γ_{th} es la frontera térmica de Ω) es:

$$-k\nabla T \cdot \mathbf{n} = q_c + q_l \quad (\mathbf{x}, t) \in \Gamma_{th} \times [0, t_f] \quad (3.2)$$

donde q_c es el flujo correspondiente a la radiación y convección, q_l es el flujo del haz láser y \mathbf{n} es la normal unitaria de Γ_{th} . Las siguientes leyes se adoptan en este trabajo:

$$q_c = -h_{cr}(T - T_{env}) \quad (3.3)$$

$$q_l = -af_l(P_l, d_l) \quad (3.4)$$

donde T_{env} es la temperatura ambiente, a es el coeficiente de absorción, f_l es la función que describe la densidad de potencia del haz láser (P_l y d_l son la potencia y el diámetro láser, respectivamente) y h_{cr} es el coeficiente de convección-radiación. Se supone un mecanismo de convección-radiación en paralelo, es decir, $h_{cr} = h_c + h_r$ donde h_c y h_r son los coeficientes de convección y radiación, respectivamente. La radiación se define en este contexto como:

$$h_r = \varepsilon \sigma_B (T + T_{env}) (T^2 + T_{env}^2) \quad (3.5)$$

donde ε es el coeficiente de emisividad y σ_B la constante de Boltzmann. En este trabajo, valores constantes se asumen para h_c (9,8 W/(m² K)) y ε (0,8 para superficies cubiertas

con grafito y 0,25 para el resto) (Roger et al., 1979). Cabe mencionar que cambios en los parámetros de radiación y convección mostraron un efecto despreciable en la evolución simulada de la temperatura durante el tiempo que el láser está irradiando.

Además, una distribución Gaussiana es empleada para f_i :

$$f_i = \frac{8P_l}{\pi d_l^2} e^{-\frac{8r^2}{d_l^2}} \quad (3.6)$$

donde r es la distancia radial al centro del haz láser.

Las ecuaciones mostradas son discretizadas y resueltas dentro del marco del método de elementos finitos. La malla de elementos lineales de seis nodos que se muestra en la Figura 3-3 se usa para discretizar el dominio. Dada la simetría del problema, sólo es necesario considerar un cuarto del problema, imponiendo las condiciones de borde de simetría necesarias, es decir, de flujo de calor nulo en esas fronteras. Un refinamiento en la zona central, tanto en la coordenada radial como en el espesor, es necesario para capturar los elevados gradientes de temperatura generados por el haz láser durante la irradiación en dicha zona. Tanto la temperatura ambiente como la temperatura inicial son de 20 °C. Las dimensiones de la placa se escogieron de tal manera que la temperatura en los bordes se mantiene constante y, por lo tanto, se desprecia en la simulación el efecto del apoyo de la placa sobre la plataforma.

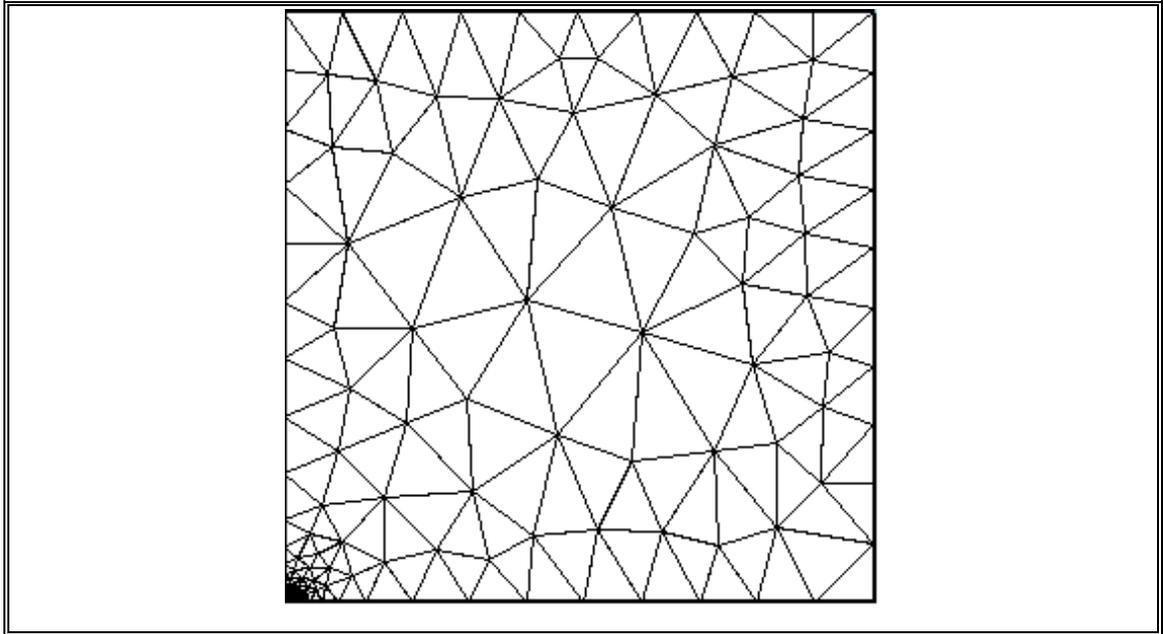


Figura 3-3: Malla empleada, centro de la placa en esquina inferior izquierda.

Las propiedades físicas y térmicas del material usadas en la simulación se encuentran en el Anexo A (Che et al., 2010).

3.2.3 Mínimos cuadrados

En este trabajo, el coeficiente de absorción se determina a través del ajuste de datos experimentales como el valor que minimiza el error entre las mediciones experimentales de temperatura, $T_{exp}(t)$, y los valores simulados numéricamente, $T_{sim}(a,t)$, para las diferentes ubicaciones del termopar y para las diferentes potencias de los experimentos. La unidad usada para la temperatura es °C.

Las simulaciones numéricas se usan para obtener evoluciones de $T_{sim}(a,t)$ con distintos valores de a . Luego, el error para cierto valor de a se calcula como:

$$Error(a) = \frac{1}{n} \sum_i \sum_j \frac{\sum_{t=0}^{t_f} (T_{exp}(t) - T_{sim}(a, t))^2}{\sum_{t=0}^{t_f} T_{exp}^2} \quad (3.7)$$

donde i y j representan las diferentes configuraciones experimentales de potencia láser y ubicación del termopar, mientras que $n = i \times j$ es el número de configuraciones experimentales. Como ya se mencionó, el valor escogido de a es aquel que minimiza el error.

3.3 Resultados

El valor del error para diversos valores del coeficiente de absorción se muestra en la Figura 3-4. Se distingue con claridad el resultado correspondiente a la superficie sin grafito ($a = 0,40$) con el resultado correspondiente a la superficie cubierta con grafito ($a = 0,64$).

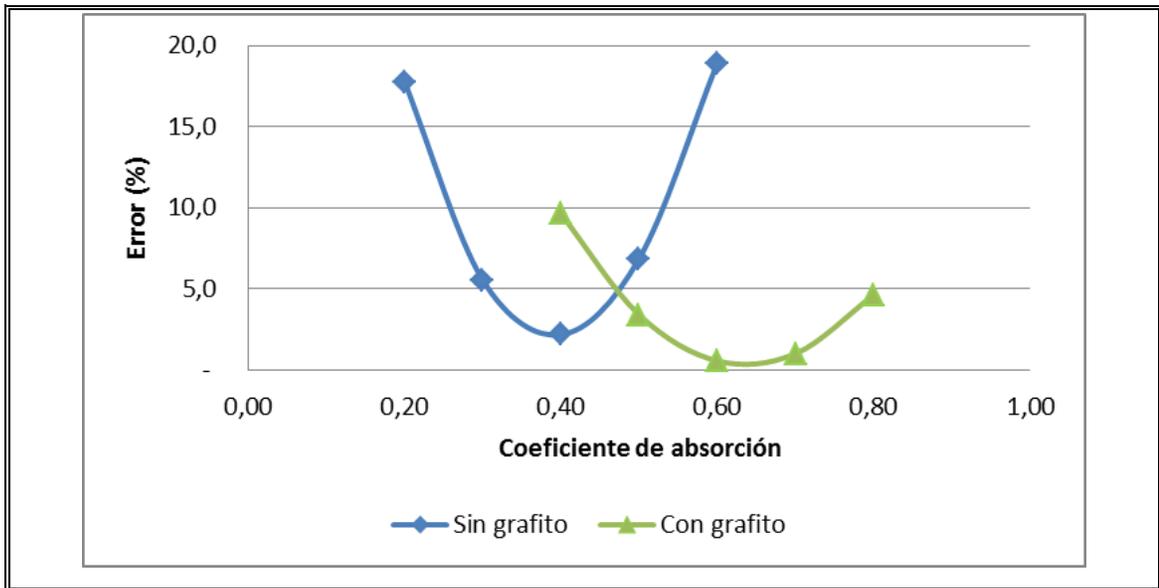


Figura 3-4: Error experimental-numérico.

La Figura 3-5 compara las curvas experimentales y numéricas de temperatura, estas últimas usando el valor de absorción que minimiza el error. Se muestran sólo las correspondientes a $P_l = 60 \text{ W}$, ya que se considera que el coeficiente de absorción es independiente de la potencia aplicada. A través de un test chi-cuadrado con una confianza del 95%, se verifica que hay un ajuste satisfactorio entre los datos experimentales y numéricos, excepto para el termopar localizado al centro del lado opuesto irradiado por el láser.

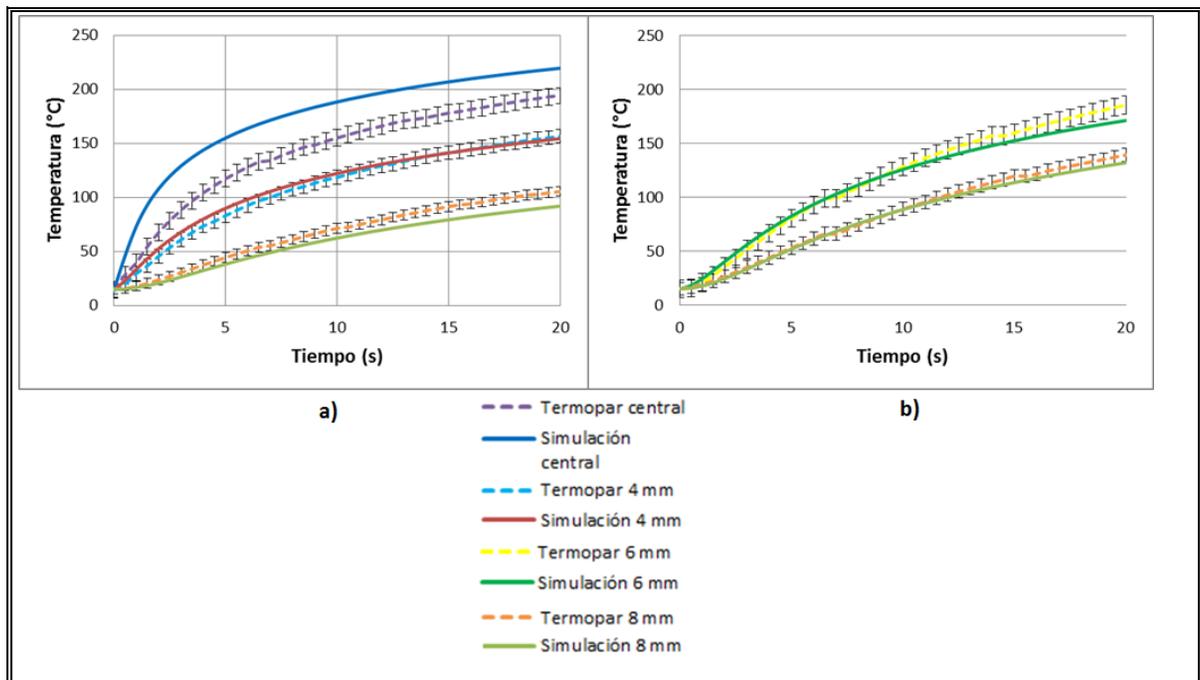


Figura 3-5: Curvas de temperatura: a) con grafito b) sin grafito.

Para el caso de la placa cubierta con grafito, a distancias menores que 6 mm la temperatura registrada superaba la temperatura permitida por la pasta térmica, por lo que sólo se realizaron mediciones a 6 mm y 8 mm.

3.4 Discusión

Para un uso óptimo del conformado láser, es importante caracterizar el mecanismo de absorción de energía que ocurre en el proceso. La interacción materia-fotón es un fenómeno complejo el cual, para efectos prácticos, se resume en el valor del coeficiente de absorción y, por lo tanto, su determinación es de vital importancia, particularmente para la simulación numérica del proceso.

En este capítulo, se presentó un método experimental-numérico simple para obtener el coeficiente de absorción. Los valores son $a = 0,40$ para el acero 304 y $a = 0,64$ para el mismo acero pero cubierto con una capa de grafito, ambos para un láser de fibra de longitud de onda $1,07 \mu\text{m}$. La aplicación del grafito aumento la absorción en un 60%.

Para efectos de comparación de los resultados obtenidos, Bergstrom (2007) reporta, para un láser de la misma longitud de onda acoplado a una lámina de acero inoxidable laminada en frío como la de este estudio, un valor de $a = 0,37$, muy similar al reportado en este estudio ($a = 0,40$).

Es importante destacar que el valor encontrado en este trabajo para el acero 304 laminado en frío sin grafito difiere considerablemente del valor reportado en la literatura para hierro puro ($a = 0,30$). Esto se debe principalmente a la presencia de óxido superficial y a la rugosidad superficial. El primero aumenta la absorción ya que parte de la energía reflejada es reflejada nuevamente hacia el material por la capa de óxido, mientras que la rugosidad provoca que parte de la energía incidente sea reflejada en un ángulo tal que vuelve a irradiar nuevamente el material (Bergstrom, 2008).

El hecho de que el valor de a para una superficie laminada en frío difiera del valor reportado para superficies puras y pulidas, enfatiza que es crítico determinar el valor del coeficiente de absorción para cada combinación de longitud de onda, material y condición superficial con la que se desee trabajar en un proceso de conformado láser.

Los datos experimentales y numéricos se ajustaron satisfactoriamente, excepto para el termopar ubicado en el lado opuesto del centro de la irradiación. Este error se puede deber al supuesto simplificador de que el haz láser tiene un perfil Gaussiano. El perfil difiere levemente de esta distribución de densidad de potencia, evidenciado por la marca

que un pulso corto del láser deja sobre el papel sensible, donde se observan dos máximos de potencia cercanos (Figura 3-6), en vez de solo uno como sería de esperar en una distribución Gaussiana.



Figura 3-6: Distribución de potencia experimental, máximos corresponden a las dos marcas centrales.

Esto ayudaría a explicar por qué las temperaturas medidas en el termopar central son inferiores a las esperadas para un perfil Gaussiano, ya que en la realidad la distribución es más uniforme. De todas formas, esta diferencia en la forma del perfil no influye en los termopares alejados del centro del láser ya que la energía que ingresa a la superficie es la misma.

En este trabajo no se examina la degradación del grafito, fenómeno en el cual, cuando hay repetidas irradiaciones sobre una misma zona cubierta con grafito, el coeficiente de

absorción de la capa de grafito disminuye (Carey, 2007), ya que los experimentos de doblado que se realizarán en capítulos siguientes y en los cuales se usará el valor obtenido para el coeficiente de absorción aquí estimado, consistirán en una sola corrida de irradiación.

Cabe mencionar que el método propuesto para medir el coeficiente de absorción es relativamente simple en comparación a otros métodos (por ejemplo, calorimetría láser, gonio-reflectómetros, esferas integrantes, espejos integrantes o medición de emisividad) (Bergstrom, 2005). Pero, en cambio, requiere del uso de elementos finitos para resolver la distribución de temperatura, lo que añade la dificultad de que todos los parámetros del proceso deben ser caracterizados correctamente si se desean obtener resultados apropiados.

4. EFECTO DEL ÁNGULO DE INCIDENCIA EN EL COEFICIENTE DE ABSORCIÓN DEL ACERO AISI 304 CUBIERTO CON GRAFITO

4.1 Introducción

Cuando materiales con superficies muy lisas son irradiados y se varía el ángulo de incidencia del haz láser θ (Figura 4.1), se observa un fenómeno llamado curva de absorción de Fresnel (Bergstrom, 2008), correspondiente a la curva de línea continua en la Figura 4-2. Los detalles de este fenómeno se relacionan con la interacción materia-fotón, pero la consecuencia relevante es que la absorptividad del campo eléctrico paralelo al plano formado por la normal de la superficie y el haz láser en materiales lisos alcanza un máximo para cierto ángulo, llamado ángulo de Brewster (Steen, 1991).

Además, Bergstrom (2007) muestra que para superficies metálicas con cierta rugosidad, como el aluminio laminado en frío, el coeficiente de absorción también varía con el ángulo de incidencia, pero con una tendencia muy distinta a la esperada para superficies muy lisas (Figura 4-2).

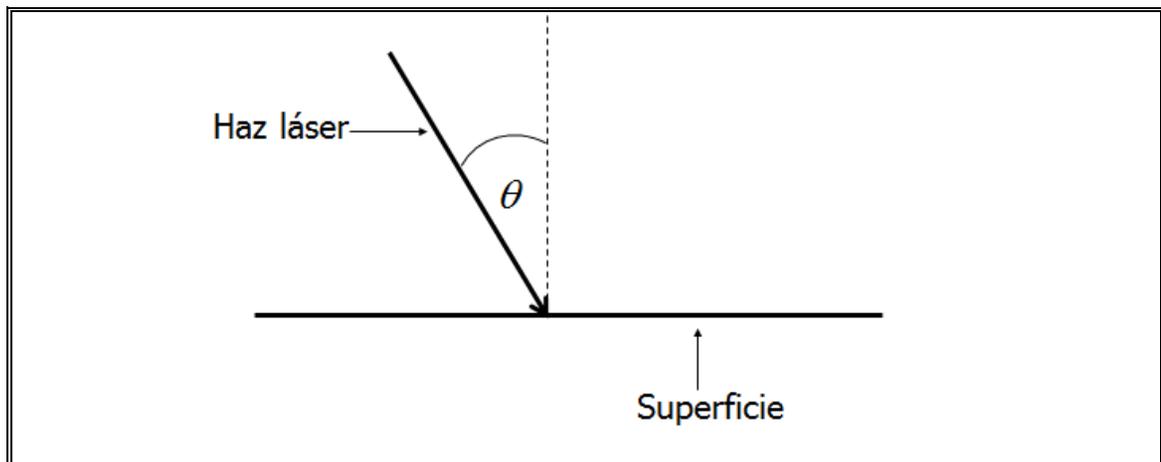


Figura 4-1: Ángulo de incidencia láser.

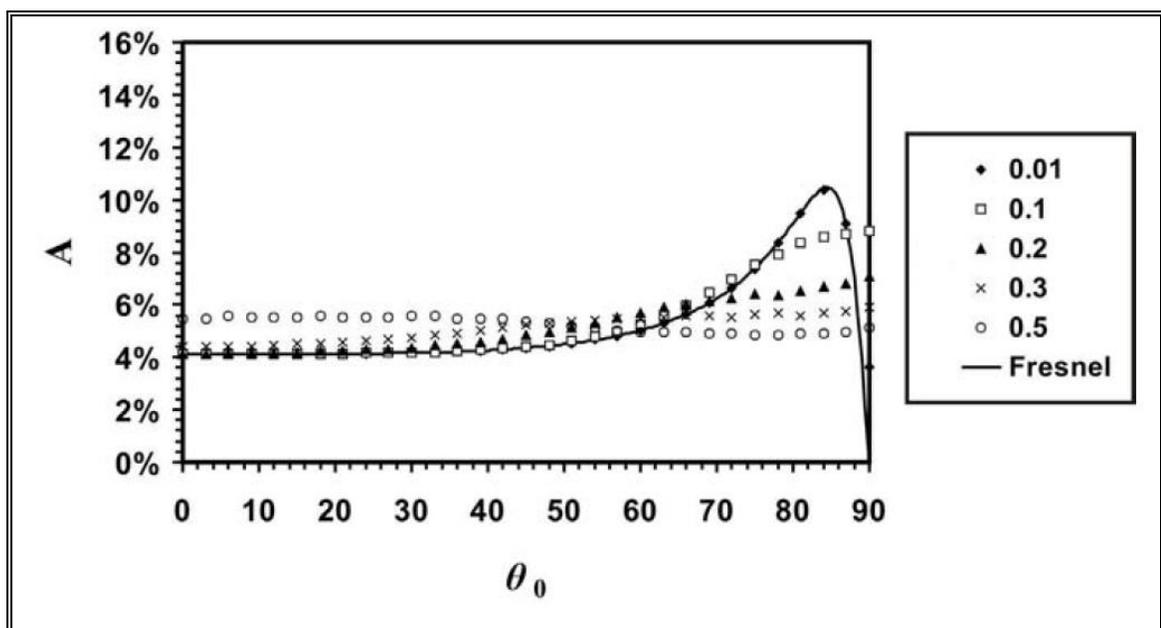


Figura 4-2: Coeficiente de absorción del aluminio vs ángulo de incidencia para distintas rugosidades (Bergstrom, 2007). Los valores en el cuadro indican un medida adimensional proporcional a la rugosidad superficial.

Por otro lado, Yanjin (2011) propuso que una manera alternativa de aumentar el coeficiente de absorción de una lámina de acero sin cubrirla con grafito spray es irradiar

la superficie con un ángulo de inclinación, obteniendo mayores ángulos de doblado en función del ángulo de incidencia.

Estos antecedentes conducen a pensar que es importante investigar si el coeficiente de absorción del acero AISI 304 laminado en frío y cubierto con grafito, irradiado con un láser de fibra aleatoriamente polarizado y de longitud de onda $1,07 \mu\text{m}$, dependerá del ángulo de incidencia. Es decir, es necesario cuantificar el coeficiente de absorción no sólo dependiendo de la longitud de onda, material irradiado y su condición superficial, sino que, además, en función del ángulo incidente. A pesar de que la técnica más habitual para aumentar el coeficiente de absorción de láminas metálicas es cubrir la superficie de interés con una capa de grafito spray, en la literatura no se encontró información que relacione el coeficiente de absorción con el ángulo de incidencia para superficies cubiertas con grafito.

Esta dependencia, en caso de existir, será relevante para el doblado de superficies 3D que se desea realizar en capítulos posteriores, pues en esos experimentos la superficie irradiada no estará siempre perpendicular al láser, ya que la geometría y por lo tanto el ángulo de incidencia, variará con el tiempo.

En este capítulo, se propone y emplea un procedimiento basado en ensayos experimentales junto con simulaciones térmicas para determinar el coeficiente de absorción en función del ángulo de incidencia (0° a 80° , donde 0° indica incidencia perpendicular) de un láser de fibra de iterbio (Yb) irradiando una lámina de acero inoxidable 304 laminada en frío cubierta con una capa de grafito spray. Se estudiará sólo esa condición superficial, y no el caso sin grafito, ya que será con una capa de grafito

cómo se realizarán los experimentos de doblado 3D a presentar en el Capítulo 6 y, por lo tanto, esa es la situación que interesa caracterizar.

4.2 Métodos

4.2.1 Procedimiento experimental

Al igual que en el Capítulo 3, el procedimiento experimental adoptado en este trabajo para caracterizar el coeficiente de absorción consiste en la medición de la evolución de la temperatura (usando termopares tipo K) en diferentes lugares de una lámina de acero inoxidable durante la aplicación de un haz láser fijo, con la diferencia que aquí se variará el ángulo de incidencia inclinando la lámina irradiada.

El montaje experimental se muestra en la Figura 4-3. Consiste en un colimador del haz láser (longitud de onda $1,07 \mu\text{m}$, polarización aleatoria, fibra de Yb multimodo, $M^2 = 1,2$), un sistema de dos lentes biconvexas para concentrar el haz láser y una contenedor de seguridad. Al interior del contenedor, se ubica una plataforma (Figura 4-3b) donde una placa metálica (100 x 100 mm, 2 mm espesor) se apoya en sus bordes en un ángulo de inclinación entre 0° y 80° (donde 0° indica paralelo a la línea horizontal).

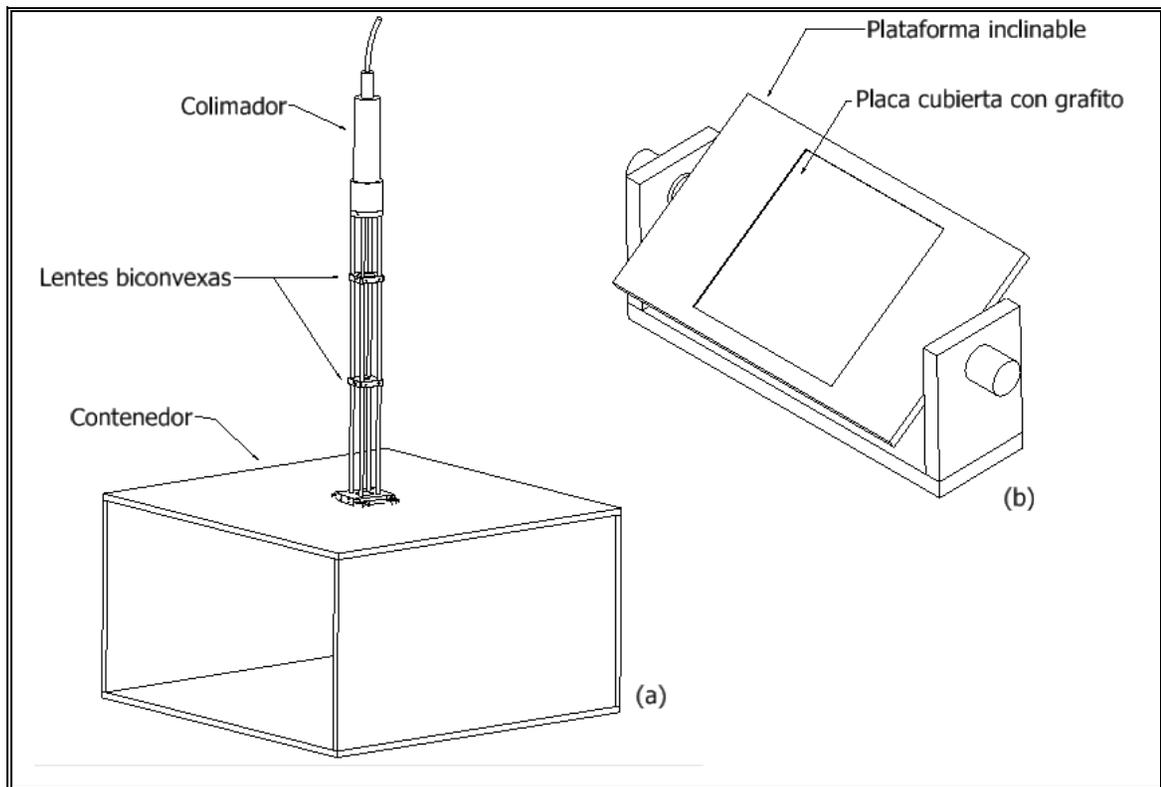


Figura 4-3: a) Montaje experimental b) Plataforma inclinable.

El propósito de usar dos lentes biconvexas para enfocar el haz láser en vez de sólo una lente se muestra en la Figura 4-4. En el primer caso (Figura 4-4a), el láser resultante es un cilindro, mientras que en el segundo caso (Figura 4-4b) es un cono. Dado que el diámetro del cilindro es constante y conocido a lo largo del eje axial del haz, el área incidente en un plano inclinado corresponde a una elipse cuyos parámetros dependen del ángulo de inclinación pero no de la distancia en el eje axial, algo que no ocurre en el segundo caso. Ya que la distancia a lo largo del eje varía cuando la plataforma se inclina (ya que no necesariamente el eje de rotación pasa por el punto de incidencia), el montaje utilizado simplifica la caracterización del área incidente para efectos de la simulación numérica.

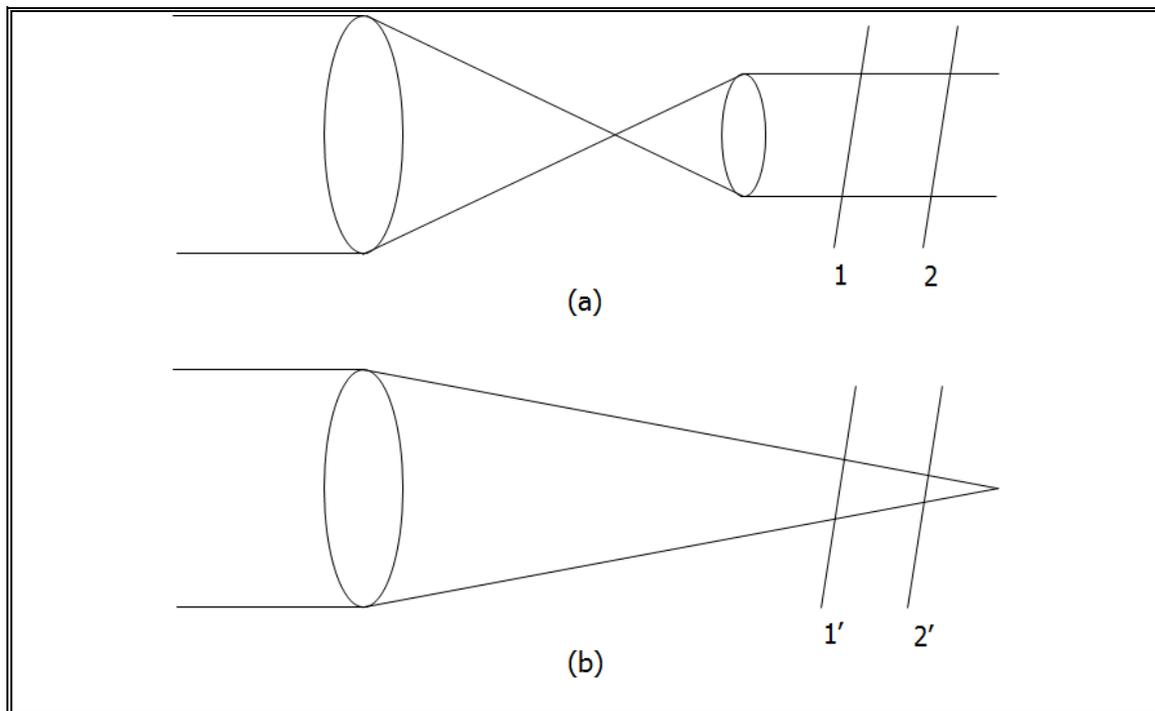


Figura 4-4: a) Planos 1 y 2 generan la misma elipse b) Planos 1' y 2' generan distintas elipses.

La potencia que efectivamente irradia la superficie metálica (es decir, la potencia del colimador descontada con la pérdida de cada lente) se mide con un potenciómetro a la salida del sistema de lentes. La distancia focal de las lentes se escogió de manera de obtener un diámetro láser de 1,20 mm, verificado experimentalmente midiendo el diámetro dejado por pulsos cortos del láser en un papel sensible a éste.

Las muestras se irradian en el centro de la superficie superior de la placa durante 10 segundos. La evolución de la temperatura durante ese tiempo se registra mediante termopares ubicados en dos lugares de la superficie superior (4 mm y 6 mm desde el centro de la irradiación, en la dirección del eje menor de la elipse incidente) para diferentes potencias del láser (33 W y 55 W).

Al igual que en el Capítulo 3, el grafito usado es Tool Crib[®] Dry Graphite Lube y se usó pasta térmica Arctic Silver[®], para evitar que el aire actúe como un aislante entre el termopar y el metal.

4.2.2 Modelamiento y simulación numérica

Respecto al Capítulo 3, el único cambio en el modelamiento tiene que ver con la distribución de energía del láser, ya que debe incorporar el ángulo de incidencia,

$$f_l = \frac{8P_l \cos\theta}{\pi d_l^2} e^{-\frac{8(x^2+y^2 \cos^2 \theta)}{d_l^2}} \quad (4.1)$$

donde x e y son las coordenadas en el plano de la placa metálica inclinada con origen en el centro de irradiación (Figura 4-5) y θ es el ángulo de incidencia del haz láser. Como es de esperar de una distribución Gaussiana, se puede verificar que la intensidad en los bordes de la elipse cae a $1/e^2$ del valor axial y que la integral sobre un dominio infinito es igual a P_l .

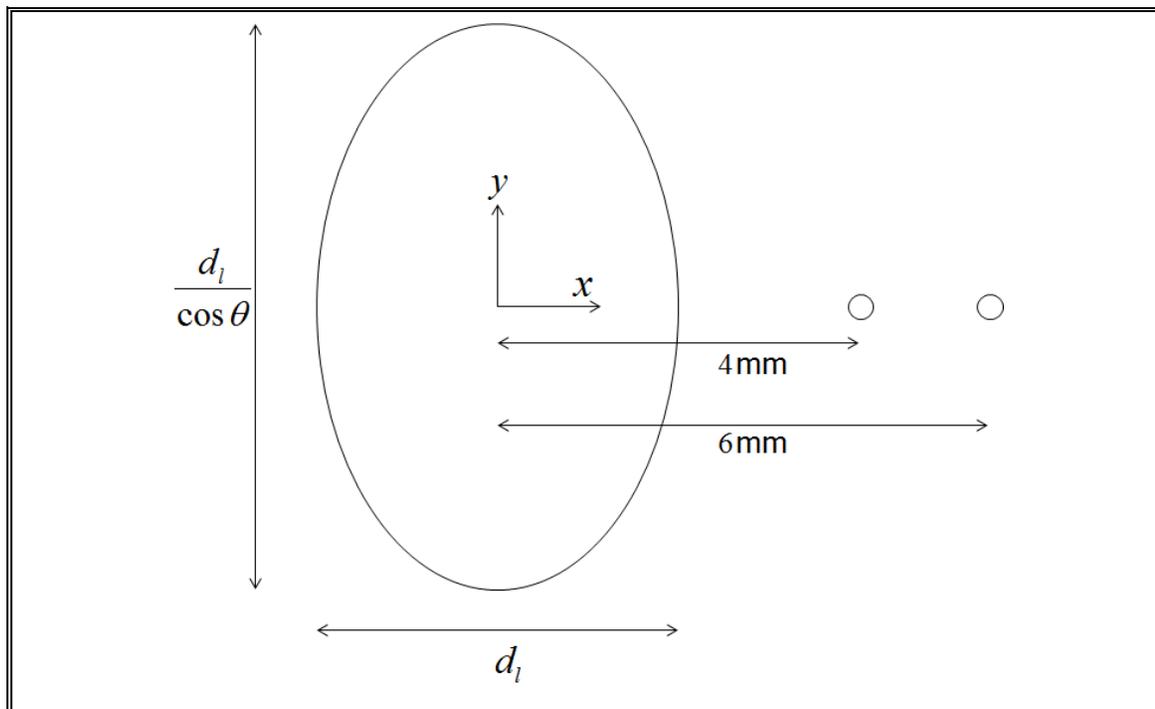


Figura 4-5: Esquema de la irradiación del láser en superficie inclinada. Los círculos muestran los puntos de medición.

4.2.3 Mínimos cuadrados

El coeficiente de absorción para cada ángulo de incidencia (a_θ) se determina a través del ajuste de datos experimentales como el valor que minimiza el error entre las mediciones experimentales de temperatura, $T_{exp}(t)$, y los valores simulados numéricamente, $T_{sim}(a_\theta, t)$, para las diferentes ubicaciones del termopar y para las diferentes potencias de los experimentos. La unidad usada para la temperatura es $^{\circ}\text{C}$.

Las simulaciones numéricas se usan para obtener evoluciones de $T_{sim}(a_\theta, t)$ con distintos valores de a_θ . Luego, el error para cierto valor de a_θ se calcula como:

$$Error(a_\theta) = \frac{1}{n} \sum_i \sum_j \frac{\sum_{t=0}^{t_f} (T_{exp}(t) - T_{sim}(a_\theta, t))^2}{\sum_{t=0}^{t_f} T_{exp}^2} \quad (4.2)$$

donde i y j representan las diferentes configuraciones experimentales de potencia láser y ubicación del termopar, mientras que $n = i \times j$ es el número de configuraciones experimentales. Como ya se mencionó, el valor escogido de a_θ es aquel que minimiza el error.

4.3 Resultados

El resultado de la minimización del valor del coeficiente de absorción para ángulos de incidencia entre 0° y 80° se muestra en la Figura 4-6. A los datos se les ajustó un polinomio de quinto orden para mostrar la tendencia.

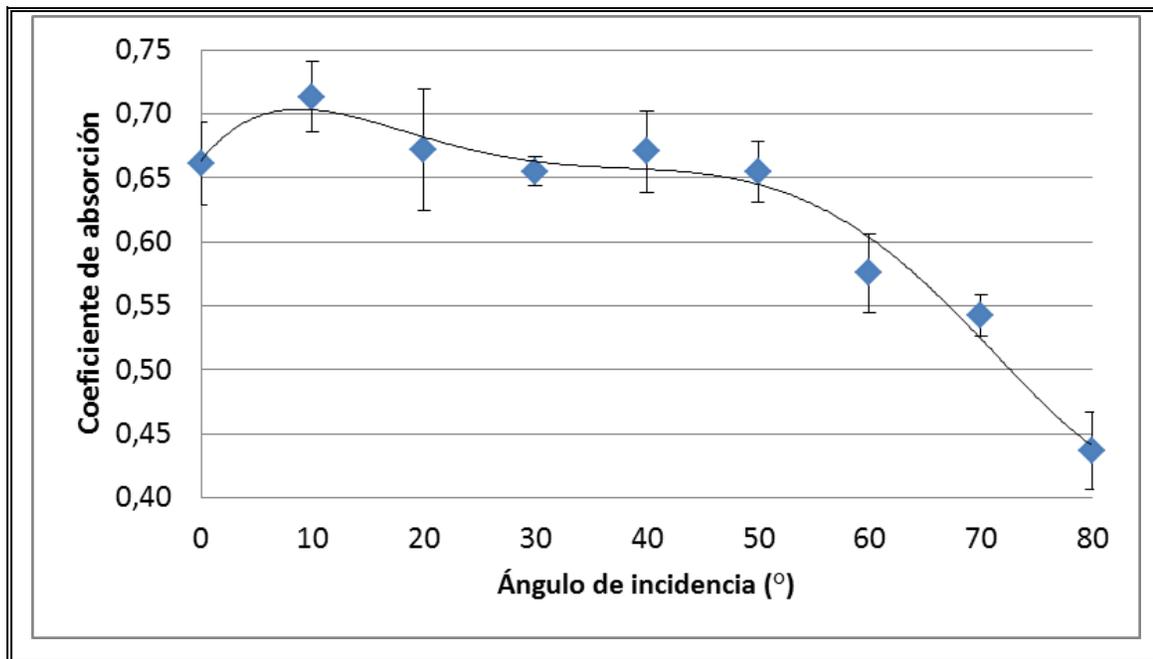


Figura 4-6: Coeficiente de absorción en función del ángulo de incidencia.

Se puede observar que hay un aumento en la absorción, desde 0,66 a 0,71, entre los 0° y 10°, luego vuelve al valor original entre 10° y 20°, seguido por una región estable entre 20° y 50°, seguido finalmente de una caída pronunciada hasta 0,44 a 80°. Una posible explicación para este comportamiento se otorga en la Sección 4.4.

En la Figura 4-7 se grafica la temperatura obtenida mediante simulaciones, en función del ángulo de incidencia, usando los valores de absorción ya mostrados. Las curvas corresponden al centro de la zona de irradiación láser y a los puntos de medición, para $t = 10$ s.

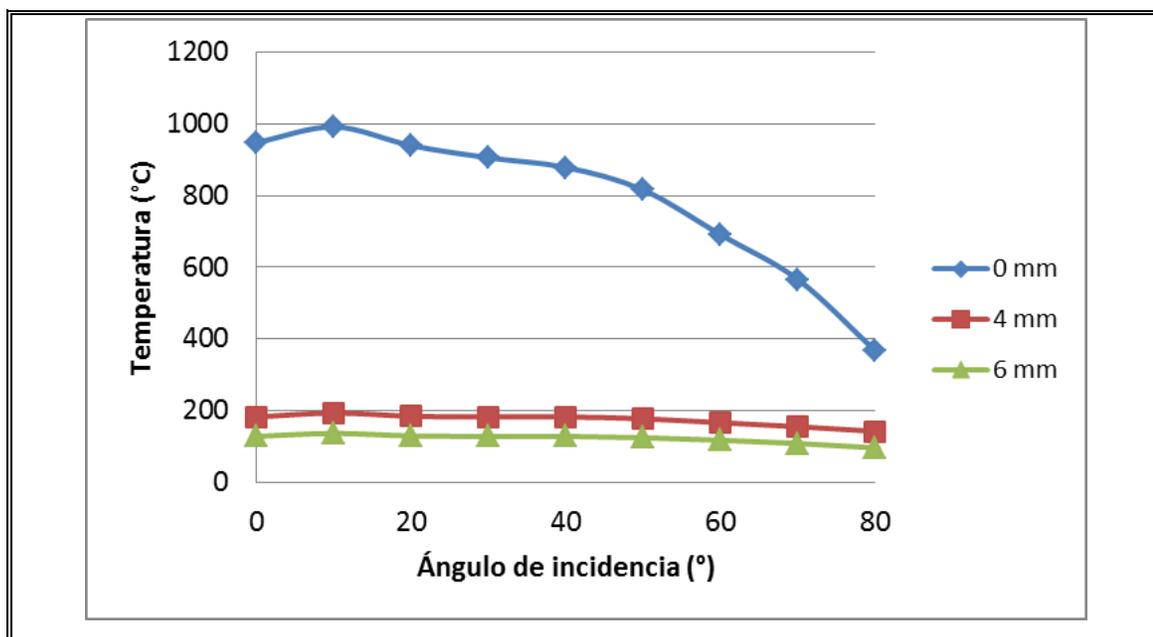


Figura 4-7: Temperatura calculada en diferentes ubicaciones, $P_l = 55$ W.

A pesar de un valor constante del coeficiente de absorción en la región entre 20° y 50° , la temperatura en el centro del láser decae luego de un máximo a los 10° . Por otro lado, la temperatura en las ubicaciones de medición sólo decae significativamente cuando la absorción cae abruptamente, en la región entre 60° y 80° .

4.4 Discusión

En este capítulo se presentó un método experimental-numérico simple para obtener el coeficiente de absorción de una placa de acero 304 cubierto de grafito en función del ángulo de incidencia. Entre los 0° y 10° el coeficiente de absorción aumenta, luego vuelve al valor original entre 10° y 20° , seguido por una región estable entre 20° y 50° , y finalmente una caída pronunciada entre 50° y 80° .

Una posible explicación para este fenómeno se entrega a continuación. En contraste con superficies perfectamente lisas, superficies metálicas laminadas en frío presentan considerable rugosidad superficial, aun cuando se aplica una capa de grafito. Para una capa de grafito similar a la usada en este estudio (una sola pasada de spray sobre una superficie laminada en frío), Carey reporta una rugosidad superficial media de $2,36 \mu\text{m}$ (Carey, 2007). Esta rugosidad causa que, para ángulos levemente distintos al perpendicular, parte de la energía reflejada se dirija nuevamente al material, aumentando la absorción, como muestra la Figura 4-8 en un dibujo bidimensional simplificado. Pero, en la medida en que el ángulo incidente aumenta más (Figura 4-9), la energía reflejada se distancia de la superficie, por lo tanto reduciendo la absorción.

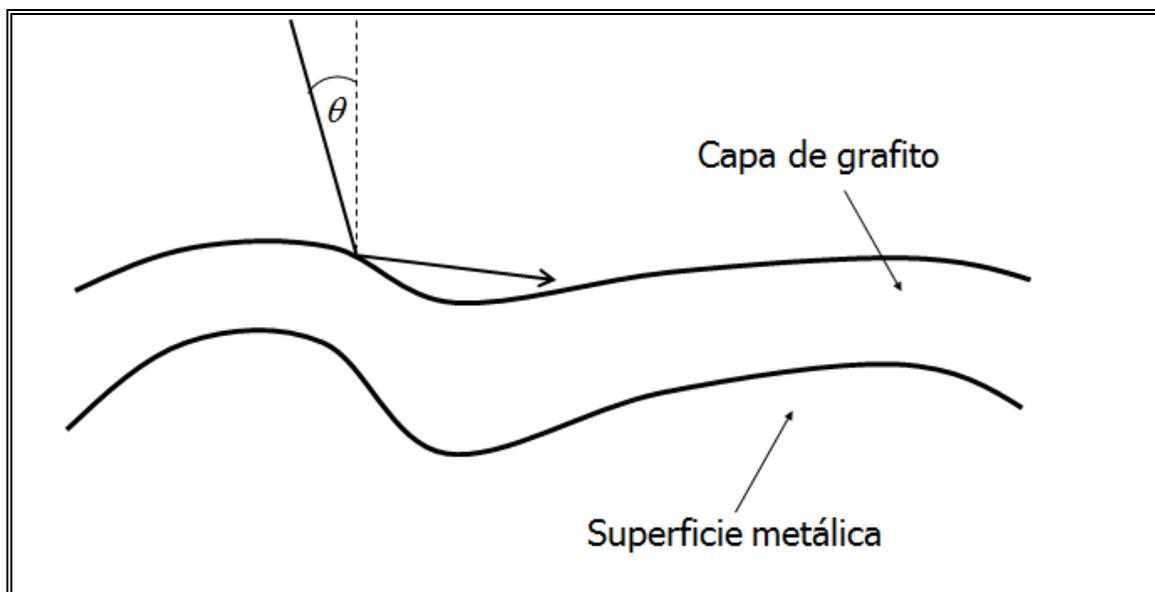


Figura 4-8: Efecto de la rugosidad en la reflexión del haz láser para ángulos de incidencia menores a 20° .

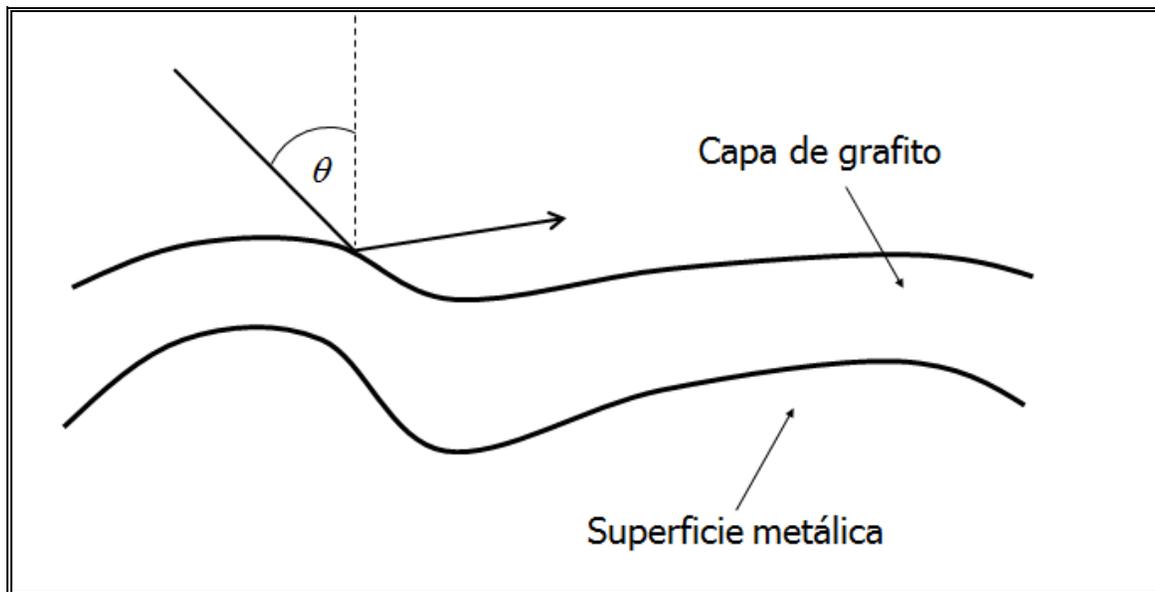


Figura 4-9: Efecto de la rugosidad en la reflexión del haz láser para ángulos de incidencia mayores a 20° .

Bergstrom (2007) propone una explicación similar para superficies metálicas no cubiertas con grafito, donde muestra que la curva de absorción de Fresnel sólo aplica a superficies muy lisas, mientras que para superficies rugosas, se evidencia una tendencia similar a la mostrada en este estudio.

Para el proceso de doblado láser, el valor de la temperatura en la zona de irradiación es de gran importancia. Se mostró que un aumento de temperatura ocurre entre 0° y 10° , en línea con el aumento en la absorción. Pero luego comienza a declinar, aun cuando la absorción se mantiene relativamente constante en la región entre 20° y 50° . Esto se debe al efecto del ángulo de incidencia en la función de intensidad de potencia (Ecuación 4.1) que disminuye en la medida que el ángulo de incidencia (y por lo tanto el área de la zona de irradiación) aumenta.

La importancia del valor máximo de absorción y temperatura a 10° significa que los resultados de doblado láser se podrían maximizar (o la energía necesaria reducirse) si

ese ángulo de incidencia pudiera ser mantenido durante el proceso de irradiación, lo cual ciertamente impondría desafíos técnicos adicionales al proceso. Sólo la región entre 0° y 20° es útil, ya que sólo en esta región hay un aumento de la temperatura en la zona de irradiación con respecto a las condiciones a 0° .

Si los resultados de este trabajo se aplican al doblado láser de superficies 3D, las conclusiones que se extraen es que en lo posible se debiera mantener siempre el mismo ángulo de incidencia, de tal manera que las condiciones de absorción no vayan cambiando en la medida en que se obtiene la superficie doblada, ya que el ángulo de incidencia modificaría la temperatura en la zona de irradiación, lo que a su vez alteraría el ángulo de doblado resultante.

Debido a que mantener siempre el mismo ángulo de incidencia impone dificultades técnicas (sería necesario un cabezal que modifique dinámicamente su ángulo en función de la superficie que se está formando), una alternativa es escoger los caminos de irradiación tal que la perpendicularidad se mantenga el mayor tiempo posible y suponer que el coeficiente de absorción es el mismo, siempre que el ángulo de incidencia no sea superior a 10° . De esa manera, si bien se incurre en una imprecisión, al menos las condiciones de doblado se subestimarán, ya que entre 0° y 10° el coeficiente de absorción y la temperatura en la zona de irradiación aumentan.

Es importante destacar que, a pesar de que el montaje experimental es distinto al empleado en el Capítulo 3 (donde el diámetro del láser era 6,00 mm a diferencia de 1,20 mm usados en este montaje), el valor obtenido para el coeficiente de absorción en la misma situación (haz láser perpendicular al material) es bastante cercano (0,66 y 0,64

respectivamente), una diferencia del 3,03%, lo cual indica que la metodología empleada para determinar este parámetro no es sensible al diámetro del láser empleado.

5. ANÁLISIS PROCESO DE DOBLADO LÁSER Y GENERACIÓN DE BASE DE DATOS

5.1 Introducción

Como se refleja del estudio bibliográfico presentado en el Capítulo 2, el conformado láser se utiliza extensivamente para el doblado en línea recta, sin embargo este puede ser aplicado para la generación de geometrías más complejas. Si bien para la mayoría de los procesos de conformado convencionales la determinación de parámetros es típicamente directa (por ejemplo, ruta y forma del punzón), para el conformado láser el proceso para determinar los caminos, potencia y velocidad de irradiación necesarias para obtener cierta superficie 3D no es directa. Además, el contorno de la forma plana de material que se desea irradiar debe ser determinado también de antemano.

Como ejemplo de la dificultad para pasar de doblado en línea recta a superficies 3D, Hennige (2000) observó que el ángulo de doblado de probetas correspondientes a círculo o segmentos de círculo difiere significativamente del doblado en línea recta y, en consecuencia, utilizó un patrón tanto radial como circunferencial de irradiación para obtener superficies esféricas.

Por lo tanto, para fabricar superficies mediante doblado láser, se debe establecer y seguir una metodología de diseño con el objetivo de determinar los parámetros del proceso que permitan obtener de manera óptima la superficie deseada.

Como se mencionó en el Capítulo 2, se han reportado distintas metodologías de diseño. Entre ellas, Liu y Yao (2004) propusieron una estrategia de planificación del proceso basada en geometría diferencial junto con optimización, mientras que Cheng y Yao

(2004) presentaron una estrategia basada en FEM. Ambos métodos se basan en aplanar la superficie deseada y calcular la distribución del campo de deformaciones en la configuración plana. Además, en ambos métodos es necesario contar con una base de datos que relacione la potencia y velocidad del láser con la deformación resultante, de tal manera que la selección del camino, potencia y velocidad del láser se realiza igualando la deformación necesaria con la deformación que genera el haz láser.

El objetivo de este capítulo es simular correctamente la respuesta del doblado láser del acero 304 cubierto con grafito y, luego, generar una base de datos que caracterice el proceso en función de la velocidad de escaneo y potencia del haz láser. Para ello, se realizan experimentos de doblado en línea recta y se mide el ángulo de doblado resultante, los que luego son contrastados con el ángulo de doblado de simulaciones numéricas, con el objeto de validar la formulación termo-mecánica empleada. Una vez realizada esa validación, se genera una base de datos del proceso. La necesidad de realizar simulación del proceso se debe a que la medición experimental de deformaciones es complicada en este caso.

5.2 Métodos

5.2.1 Procedimiento experimental

El montaje experimental se muestra en la Figura 5-1. Consiste en un colimador del haz láser (longitud de onda 1,07 μm , polarización aleatoria, fibra de Yb multimodo, $M^2 = 1,2$), un sistema de dos lentes biconvexas para concentrar el haz láser y una contenedor de seguridad. Al interior del contenedor, se ubica un sistema de movimiento de dos ejes

(Figura 5-1b) donde una placa de acero 304 (30 x 30 mm, 0,6 mm espesor) cubierta con grafito se encuentra empotrada en uno de sus extremos.

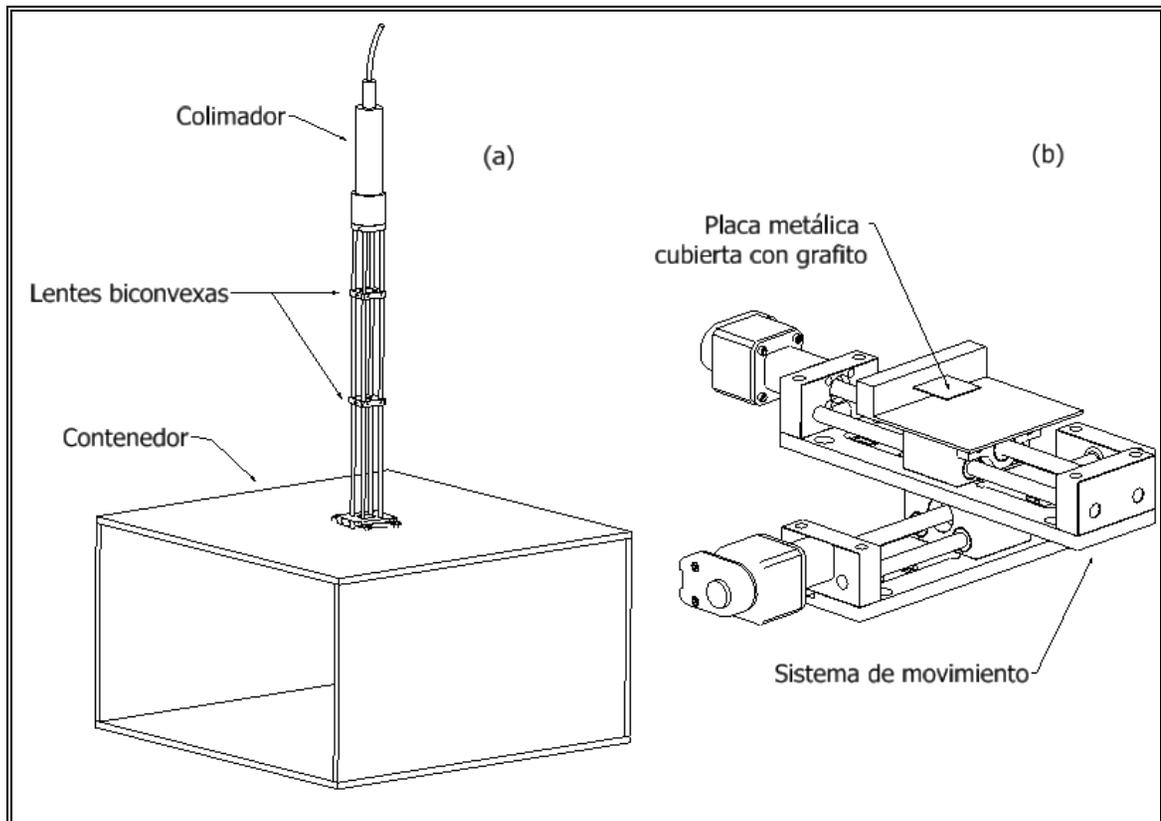


Figura 5-1: a) Montaje experimental b) Sistema de movimiento.

Al igual que en el montaje experimental del Capítulo 4, el propósito de usar dos lentes biconvexas, en vez de una, es producir un haz focalizado de diámetro constante a lo largo del eje del haz. Esta característica del montaje será importante para el doblado de superficies 3D, donde el láser irradiará caminos que no yacen en el plano original. El diámetro del haz focalizado es 1,20 mm. Se realizan distintos experimentos de doblado en línea recta paralela al empotramiento y a través de la mitad de la probeta, de una sola

pasada, variando la velocidad (de 5 mm/s a 20 mm/s) y potencia del láser (de 28 W a 111 W). Los resultados se muestran en la Sección 5.3.

5.2.2 Modelamiento y simulación numérica

Una formulación termo-mecánica considerando plasticidad, grandes deformaciones, propiedades dependientes de la temperatura y convección-radiación se usa para simular el problema, cuyos detalles se muestran a continuación (Stevens et al., 2012).

Las ecuaciones locales que gobiernan la conservación de masa, equilibrio y balance de energía son, respectivamente:

$$\rho J = \rho_0 \quad (\mathbf{x}, t) \in \Omega \times [0, t_f] \quad (5.1)$$

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = 0 \quad (\mathbf{x}, t) \in \Omega \times [0, t_f] \quad (5.2)$$

$$\rho c \dot{T} - \nabla \cdot (k \nabla T) = 0 \quad (\mathbf{x}, t) \in \Omega \times [0, t_f] \quad (5.3)$$

donde Ω es la configuración espacial del cuerpo y $[0, t_f]$ es el intervalo de tiempo de interés, con $t \in [0, t_f]$, junto con las condiciones de borde y condiciones iniciales apropiadas. En estas ecuaciones, ρ es la densidad, J es el determinante del gradiente de deformación, $\nabla \cdot$ es el operador divergencia, ∇ es el gradiente espacial, el punto sobre las letras indica derivada temporal, $\boldsymbol{\sigma}$ es el tensor de Cauchy, T es la temperatura, c es el calor específico y k es la conductividad térmica. Fuentes volumétricas internas de calor y cambios de fase no están incluidas en este modelo. En la ecuación de equilibrio se desprecian los efectos inerciales

Las ecuaciones adoptadas en este trabajo que gobiernan la plasticidad se asumen independientes de la tasa de deformación. En este trabajo se usará el tensor de deformaciones de Almansi:

$$\mathbf{e} = 1/2(\mathbf{I} - \mathbf{F}^{-T} \mathbf{F}^{-1}) \quad (5.4)$$

donde \mathbf{F} es el tensor gradiente de deformación. La regla de flujo para las variables plásticas es:

$$L_v(\mathbf{e}^p) = \dot{\lambda} \frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \quad (5.5)$$

$$\dot{\bar{e}}^p = \dot{\lambda} \quad (5.6)$$

donde L_v es la derivada temporal objetiva (independiente del marco de referencia) de Lie, $\dot{\lambda}$ es el parámetro de consistencia plástica, \bar{e}^p es la deformación plástica efectiva y F es la función de fluencia (no hay evolución plástica si $F < 0$). Se adopta la función de fluencia de von Mises:

$$F = \sqrt{3J_2} - C_y \quad (5.7)$$

donde J_2 es el segundo invariante de la componente deviatorica de $\boldsymbol{\sigma}$ ($\sigma_{eq} = \sqrt{3J_2}$ es el esfuerzo equivalente) y C_y es el límite de fluencia. En este trabajo se asume endurecimiento plástico, es decir:

$$C_y = C_{y0}(T) + H(T)\bar{e}^p \quad (5.8)$$

donde $C_{y_0}(T)$ es la tensión de fluencia en función de la temperatura y $H(T)$ es el coeficiente de endurecimiento (pendiente de la curva tensión-deformación real en el rango plástico) en función de la temperatura.

El tensor de deformaciones térmicas de Almansi está definido por:

$$\mathbf{e}^{th} = 1/2 \left(1 - (1 - a_{th})^{2/3} \right) \mathbf{I} \quad (5.9)$$

donde $a_{th} = \alpha_{th}(T - T_0)$ con α_{th} el coeficiente de dilatación térmica, \mathbf{I} el tensor unidad de segundo orden y T_0 la temperatura inicial. Además, se adopta la descomposición aditiva del tensor Almansi, de tal manera que la deformación elástica es igual a la deformación total menos las componentes plástica y térmica. Por lo tanto, la ley de Hooke se puede expresar como:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C} : (\mathbf{e} - \mathbf{e}^p - \mathbf{e}^{th}) \quad (5.10)$$

Respecto a las condiciones de borde e iniciales térmicas, el único cambio con respecto a las usadas en el Capítulo 3 consiste en considerar una fuente Gaussiana móvil (con velocidad constante y trayectoria en línea recta) y no estática para el flujo de calor del haz láser.

Respecto a las condiciones de borde mecánicas, éstas consisten en fijar los desplazamientos en el extremo que está empotrado. La condición mecánica inicial es que la placa está plana.

Las propiedades del material usadas en la simulación y la dependencia de éstas con la temperatura se muestran en el Anexo A. Las propiedades térmicas y físicas para este material se tomaron de Che et al. (2010), mientras que las propiedades mecánicas

(tensión de fluencia, módulo de Young y coeficiente de endurecimiento) se midieron a temperatura ambiente a través de ensayos de tracción en el contexto del presente trabajo y, a partir de esos valores a temperatura ambiente, se aplicaron tendencias en función de la temperatura basada en lo encontrado en diversas fuentes (Che et al., 2010; Cheng y Lin, 2001; Towfighi et al., 2013), ya que no se dispone del equipo adecuado para medir las propiedades mecánicas en función de la temperatura. Todas las propiedades asumen isotropía del material. Esta hipótesis se consideró válida para las propiedades mecánicas tras la medición del coeficiente de anisotropía de Lankford de la lámina metálica a doblar ($R_{0^\circ} = 0,96$, $R_{45^\circ} = 1,35$, $R_{90^\circ} = 0,82$ y $R_n = (R_{0^\circ} + 2 R_{45^\circ} + R_{90^\circ})/4 = 1,13$) que, si bien indica que existe anisotropía, para efectos de este estudio se despreciará, ya que en comparación con una lámina con calidad de embutido ésta debe poseer $R_n = 1,5$ (Charca et al., 2010). Cheng y Yao (2005) estudiaron el efecto de la anisotropía en el doblado láser de una lámina con $R_n = 1,53$, y la diferencia en el ángulo de doblado para caminos de irradiación perpendiculares y paralelos a la dirección de laminación era $0,2^\circ$, lo que refuerza la hipótesis de despreciar la anisotropía en este trabajo, donde el grado de anisotropía del material es menor ($R_n = 1,13$). En el Capítulo 7 se proponen mejoras a la caracterización del material.

La malla empleada en las simulaciones numéricas se muestra en la Figura 5-2. Posee un refinamiento en el camino del láser, tanto en el plano como en el espesor, para capturar el gradiente térmico generado por éste. La malla se refinó en esa zona hasta que sucesivas refinaciones no cambiaran significativamente los resultados.

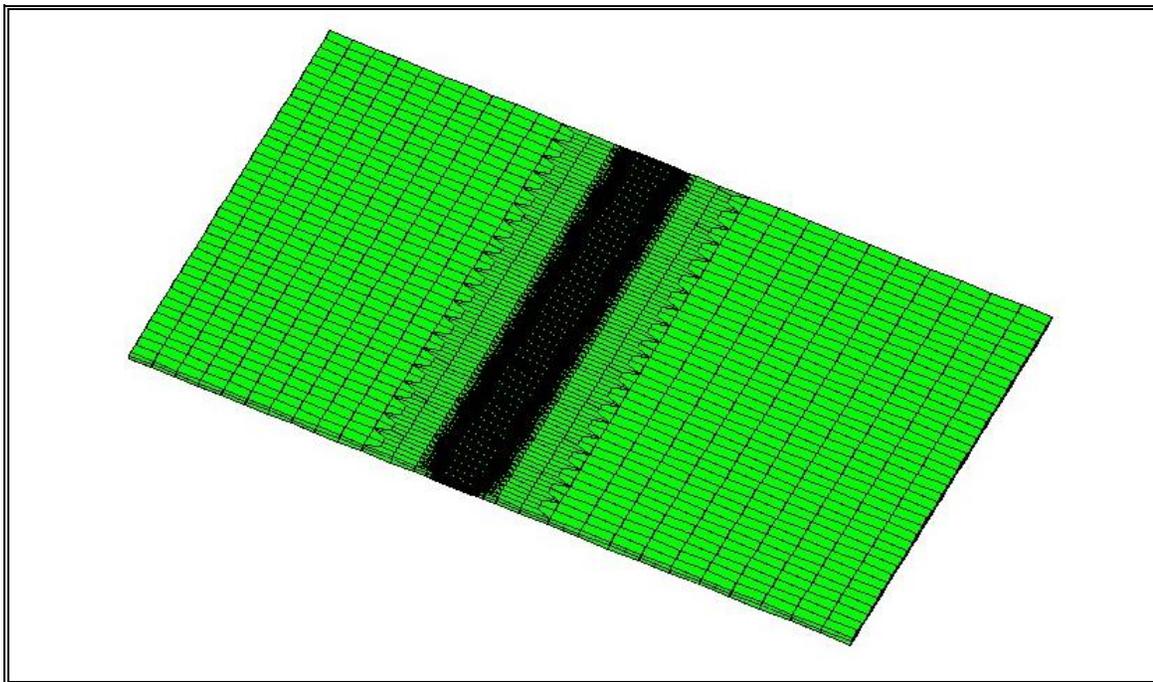


Figura 5-2: Malla doblado láser.

5.3 Resultados

Para comparar los experimentos y las simulaciones numéricas, se usará el ángulo de doblado resultante, promediado entre los valores de la entrada y de la salida del láser. En la Tabla 5-1 se muestran los resultados experimentales promediados para distintas probetas. En el Anexo B se encuentra el detalle de los resultados.

Tabla 5-1: Resultados experimentales del ángulo de doblado (en °), incluyendo desviación estándar.

		Velocidad (mm/s)			
		5	10	15	20
Potencia (W)	28	0,95 +/- 0,14	0,51 +/- 0,18	-	-
	54	2,74 +/- 0,34	1,54 +/- 0,24	1,06 +/- 0,11	-
	82	4,22 +/- 0,55	2,73 +/- 0,18	1,72 +/- 0,10	1,67 +/- 0,10
	111	4,37 +/- 0,68	3,10 +/- 0,58	2,47 +/- 0,40	1,97 +/- 0,17

Como se observa, a mayor potencia o menor velocidad, el ángulo de doblado resultante es mayor, en concordancia con lo esperado y lo reportado en la literatura. Varios casos, por ejemplo 28 W y 25 mm/s, no se reportan, ya que el ángulo de doblado en esas combinaciones es muy bajo y por lo tanto la medición es poco precisa.

En la Tabla 5-2 se muestran los resultados de las simulaciones numéricas realizadas.

Tabla 5-2: Resultados simulaciones numéricas, ángulo de doblado (en °).

		Velocidad (mm/s)			
		5	10	15	20
Potencia (W)	28	0,93	0,55		
	54	1,89	1,40	1,16	
	82		1,84	1,75	1,65
	111			2,19	2,08

Ocurre la misma tendencia de los casos experimentales, es decir, a mayor potencia o menor velocidad, mayor es el ángulo de doblado. Se observa además que en varios casos el ángulo resultante es cercano al resultado experimental (por ejemplo, para 28 W y 5 mm/s), pero en otras combinaciones eso no ocurre (por ejemplo, para 54 W y 5 mm/s). En todos esos casos fallidos, el valor de la simulación numérica está por debajo del valor experimental.

Analizando en las simulaciones la zona de irradiación del láser, se concluye que en todos los casos en que la simulación entrega resultados correctos, la temperatura en el material no supera los 1400 °C, mientras que en los casos en que la simulación es errónea, la temperatura excede los 1400 °C. Este valor es cercano a la temperatura de fusión del

material, que se encuentra en el rango $1405\text{ }^{\circ}\text{C} - 1448\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Davis, 1994). Por lo tanto, una posible explicación es que en esos casos erróneos ocurre un fenómeno físico a altas temperaturas que no está considerando en la simulación y que debiera ser añadido en futuros estudios, como se propone en el Capítulo 7.

La Figura 5-3 compara los casos en que se obtienen valores cercanos entre las mediciones experimentales y los resultados numéricos.

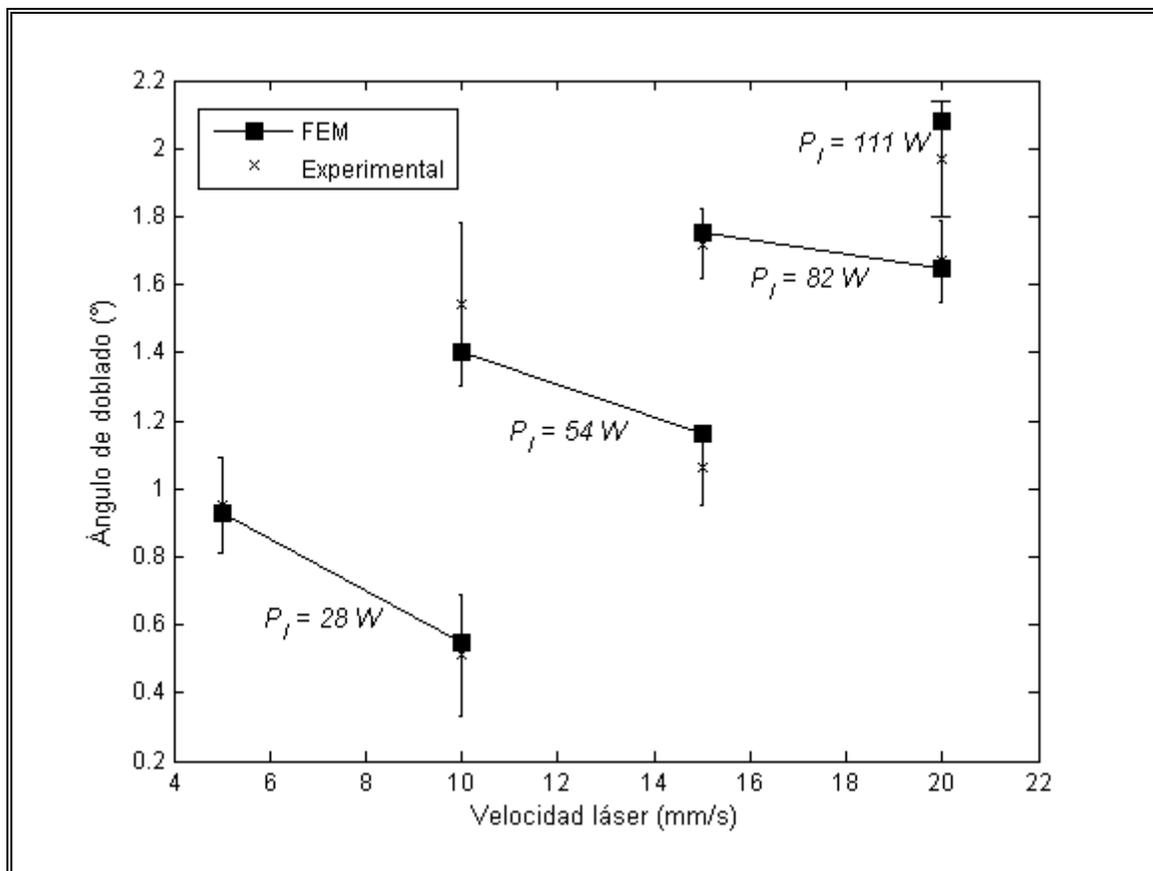


Figura 5-3: Validación del modelo termo-mecánico.

Para estos casos, la diferencia promedio entre el valor simulado y el valor experimental es $0,04^{\circ}$, por lo tanto, se observa que para varias condiciones de irradiación, es decir,

diferentes combinaciones de potencias y velocidades, los valores simulados son cercanos a los experimentales, validando así el modelo termo-mecánico usado, en la medida en que la temperatura alcanzada no supere cierto valor límite cercano a la temperatura de fusión del material.

5.4 Generación base de datos

En procesos de doblado láser en que el espesor de la placa es similar al diámetro del láser y por lo tanto que operan bajo el mecanismo de gradiente térmico (Vollertsen, 1994), como en este trabajo, la lámina irradiada se dobla hacia la fuente del láser, indicando que deformaciones de contracción ocurren en la dirección perpendicular al recorrido del láser. La Figura 5-4 muestra el campo de deformaciones perpendiculares al láser.

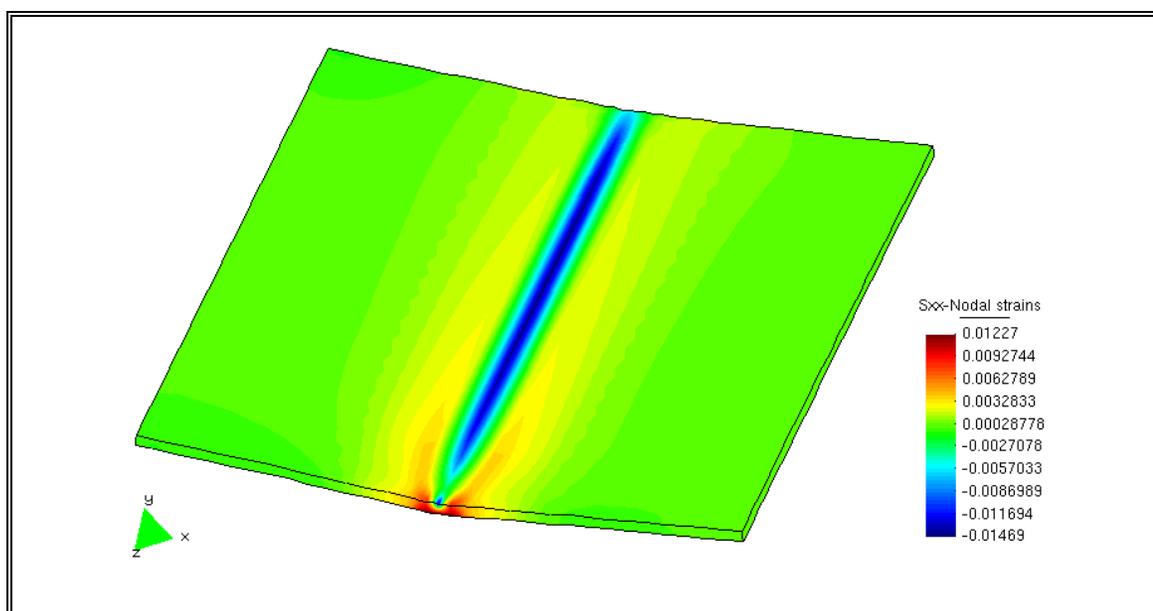


Figura 5-4: Campo de deformaciones perpendiculares a la trayectoria del láser.

Por lo tanto, ésta es la deformación escogida para caracterizar el proceso de doblado láser en función de la potencia y la velocidad, como muestra la Figura 5-5.

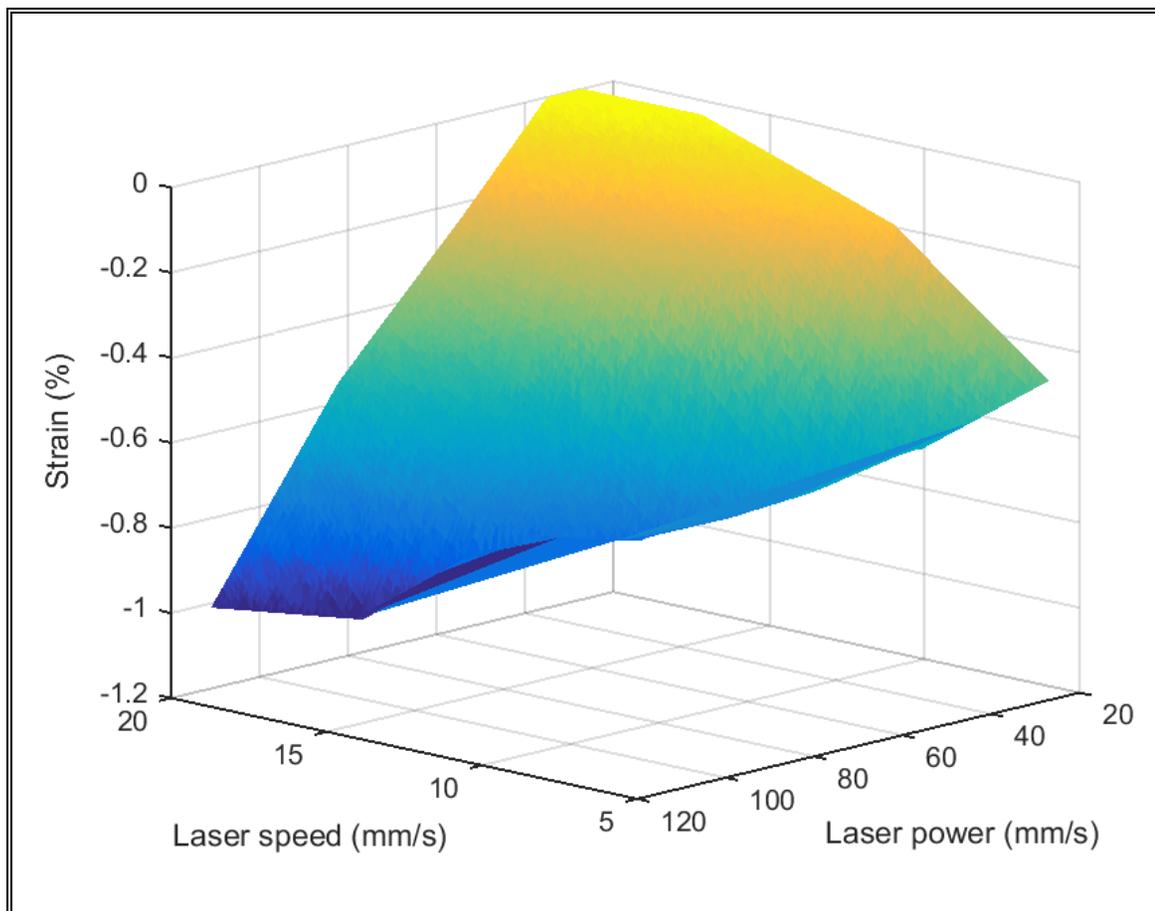


Figura 5-5: Base de datos.

La deformación calculada para cada combinación de potencia y velocidad corresponde a la deformación perpendicular al camino del láser en la superficie superior de la lámina, promediada en el diámetro del haz láser y en su recorrido. Se puede observar que para cierta potencia, la deformación aumenta cuando la velocidad disminuye, mientras que

para cierta velocidad, la deformación aumenta cuando la potencia aumenta, de acuerdo a lo esperado según la literatura (Cheng y Yao, 2004).

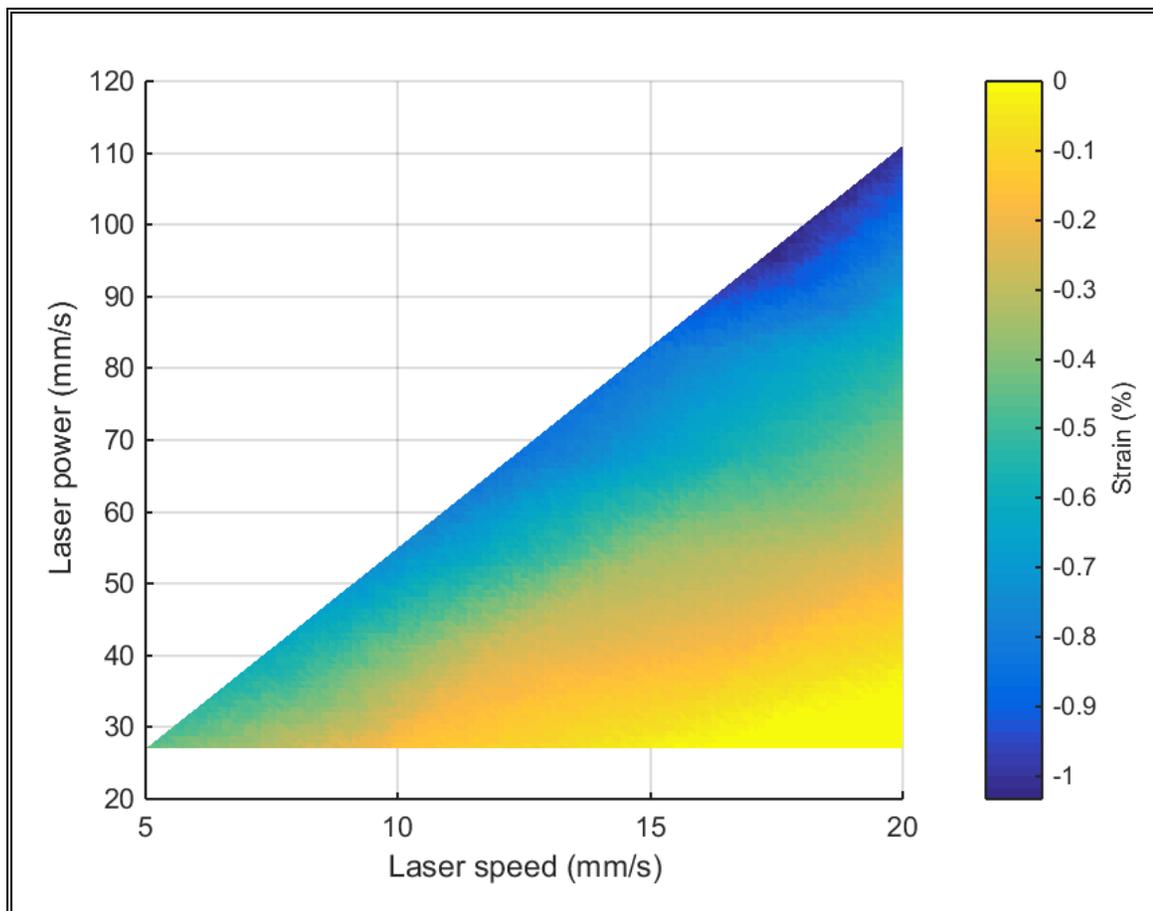


Figura 5-6: Base de datos, vista superior.

Varias combinaciones de velocidad y potencia (por ejemplo 5 mm/s y 120 W) se excluyeron de esta base de datos (Figura 5-6) pues, como ya se mencionó, violan la hipótesis asumida en la simulación de no ocurrir cambios de fase, viscoplasticidad o fusión del material.

5.5 Discusión

En este capítulo, se modeló y simuló satisfactoriamente el proceso de doblado láser, bajo la condición que la temperatura que alcanza localmente el material no sea superior a un valor cercano a la temperatura de fusión. En las combinaciones de potencia y velocidad en que esa condición no se cumple, el ángulo de doblado simulado es inferior al obtenido experimentalmente. Para ejemplificar el hecho de que hay fenómenos que ocurren a altas temperaturas que no están considerados en la simulación, en la Figura 5-7 se muestra que para la combinación en que se alcanza la mayor temperatura (111 W y 5 mm/s), durante el camino del láser ocurre fusión del material y al final del camino ocurre vaporización.

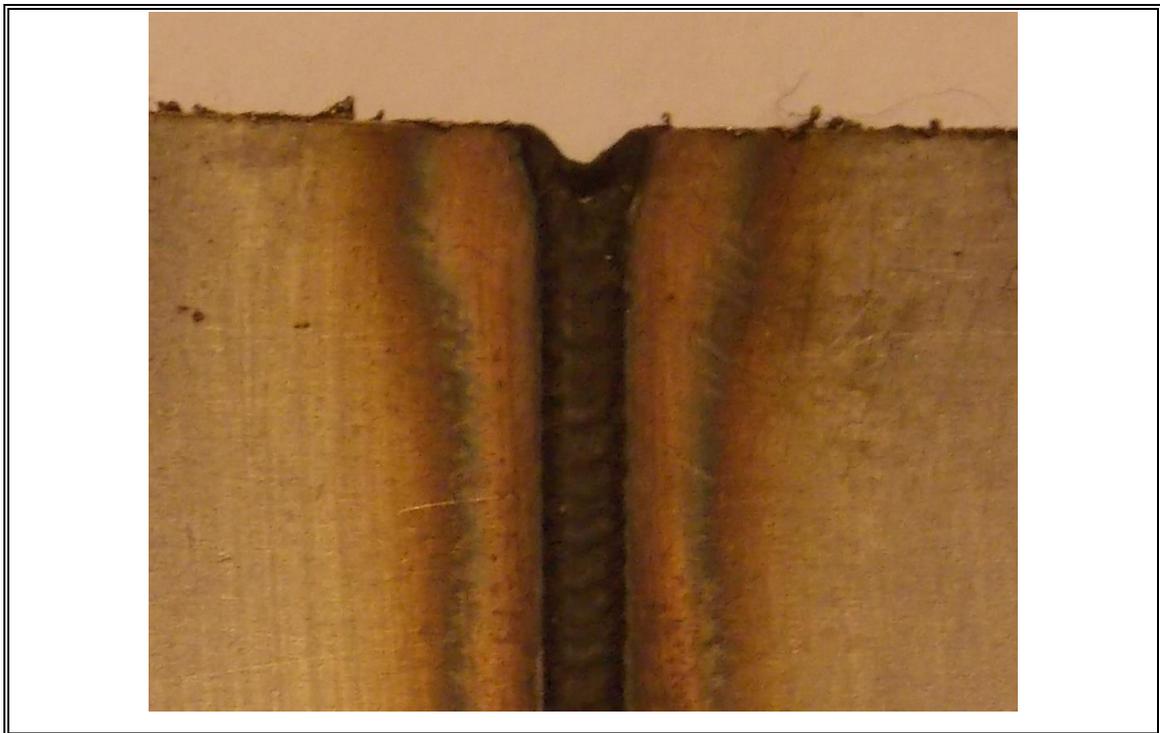


Figura 5-7: Fusión y vaporización de material a altas temperaturas.

La finalidad de este trabajo es obtener superficies 3D mediante doblado láser, por lo que la base de datos del proceso elimina los casos en que la temperatura es muy elevada para así tener una caracterización correcta del proceso. Para futuros estudios, queda propuesto incorporar al modelo termo-mecánico modificaciones que permitan simular casos con elevada temperatura como, por ejemplo, la cinética de cambios de fase, el comportamiento viscoplástico o la evolución de la estructura granular (Fan et al., 2007). Cabe mencionar que para cada condición de velocidad y potencia láser se realizaron experimentos de doblado con caminos de irradiación tanto paralelos como perpendiculares a la dirección de laminación y, en promedio, el ángulo de doblado con camino perpendicular es inferior en $0,17^\circ$ al ángulo de doblado bajo las mismas condiciones de irradiación pero con camino paralelo a la dirección de laminación (Anexo B). Para explicar ese fenómeno, se midió experimentalmente que la tensión de fluencia en la dirección perpendicular a la laminación es levemente inferior a la tensión de fluencia en la dirección paralela a la laminación (290 MPa versus 300 MPa a temperatura ambiente, respectivamente). Por lo tanto, escaneos en la dirección paralela tienen una menor tensión de fluencia que superar, lo que significa un mayor ángulo de doblado (Cheng y Yao, 2005). Como se mencionó en la Sección 5.2.2, el efecto de la anisotropía de la lámina no está considerado en la simulación numérica, por lo que una futura mejora sería es incorporarlo al modelo termo-mecánico.

Además, el ángulo de doblado en el lado en que el láser comienza a irradiar es por lo general inferior al ángulo de doblado en el lado en que el láser abandona el material, fenómeno ampliamente revisado en la literatura y llamado efecto de borde (Bao y Yao, 2001). Este fenómeno se captura en las simulaciones pero, para el cálculo de la base de

datos, sólo se considera un valor promedio de deformación a lo largo del camino del láser, enmascarando así ese fenómeno. Comentarios respecto a la potencial incorporación de este se entregan en el Capítulo 7.

6. METODOLOGÍA DE DISEÑO PARA OBTENCIÓN DE SUPERFICIE CRANEAL MEDIANTE CONFORMADO LÁSER

6.1 Introducción

El objetivo de este capítulo es obtener mediante doblado láser una superficie correspondiente a una parte del cráneo humano a partir de una lámina de acero 304 inicialmente plana. La motivación detrás de esta idea se presenta a continuación.

La alteración de la forma del cráneo puede ser causada por distintas razones, entre ellas tumores, infecciones o traumas. La craneoplastia es la cirugía reconstructiva posterior al trauma de la cabeza y se realiza para rehabilitar funcional y morfológicamente la bóveda craneal, habitualmente usando prótesis.

Diferentes técnicas y materiales son usados en la manufactura de prótesis craneales y la elección depende del tamaño y condición del defecto. Titanio (aleación Ti-6Al-4V) es un material metálico biocompatible con la ventaja de presentar osteointegración (conexión entre hueso e implante) y alta tensión de fluencia. Prótesis de titanio se pueden fabricar en forma de mallas o en forma de sólidos (Schipper et al., 2004). El uso de mallas tiene la ventaja de que éstas son moldeables para satisfacer distintas formas, pero está limitado el uso en áreas que no soporten altas cargas. Las mallas habitualmente se combinan con hidroxiapatita para permitir el crecimiento progresivo del hueso. Estas mallas deben ser dobladas y ajustadas a mano por el cirujano, con el riesgo que un excesivo doblado pueda romper el implante.

Una alternativa a las mallas de titanio es utilizar información de tomografía computarizada (TC) para recrear con precisión el defecto en un modelo computacional y

usar esa información para fabricar implantes específicos para cada paciente que reducen el tiempo de cirugía. Implantes de titanio específicos para cada paciente tienen estabilidad superior a las mallas de titanio y se fabrican mediante el mecanizado de un bloque de titanio (Schipper et al., 2004), estampado con matrices específicas a cada paciente (Williams et al., 2015), tecnología de estampado multipunto (Tan et al., 2007) o manufactura aditiva (Jardini et al., 2014).

Debido a las características particulares del doblado láser (flexibilidad, apto para producción de bajo volumen y materiales como el titanio), esta técnica debiera ser evaluada para la manufactura de implantes craneales específicos a cada paciente. En este trabajo se evaluará la obtención de superficies craneales mediante doblado láser. El material que se empleará es acero 304 cubierto con grafito, ya que es conveniente trabajar con él (debido a que es más barato y disponible que el titanio) y sirve de igual manera para el propósito de este trabajo, que es validar el doblado láser como técnica de manufactura de superficies craneales.

Para poder fabricar implantes craneales con tecnología de conformado láser, se debe establecer una metodología de diseño con el objetivo de determinar los caminos y parámetros (potencia y velocidad) de irradiación del láser que permitan obtener la superficie 3D deseada a partir de una lámina plana. Mientras que para la mayoría de los procesos de conformados la determinación de los parámetros (por ejemplo el camino del punzón) típicamente no son difíciles de determinar, los parámetros del doblado láser son menos obvios. También, el contorno de la lámina plana que se irradiará debe determinarse de antemano.

El procedimiento de diseño para obtener superficies 3D mediante doblado láser que se adopta en esta tesis se basa en el trabajo de Cheng y Yao (2004) y Liu y Yao (2005). Este procedimiento consiste en primero establecer una base de datos del proceso, es decir, la relación de la deformación resultante en función de la potencia y la velocidad (ésta ya fue obtenida en el Capítulo 5). Luego, la superficie 3D deseada se aplanada mediante simulación elástica de grandes desplazamientos usando método de elementos finitos. Esta simulación provee el contorno de la forma plana. El camino, potencia y velocidad del láser se determina analizando la distribución de deformaciones principales en la configuración plana y comparándola con la base de datos del proceso.

La razón para usar esta metodología de diseño, por sobre otras propuestas encontradas en la literatura (Liu y Yao, 2004; Seon et al., 2013), es que no es necesario conocer la superficie 3D en alguna forma analítica. En cambio, la superficie requerida puede ser obtenida directamente de la técnica de tomografía computarizada (TC), luego mallada y aplanada en una simulación de elementos finitos, como se mostrará a continuación.

6.2 Métodos

6.2.1 Superficie deseada

La Figura 6-1 muestra un escáner TC (en formato .stl) obtenido de un cráneo humano. Este archivo es leído usando el software MeshLab[®] y la superficie craneal es exportada en formato .sat al software Autodesk[®] Inventor[®] (Figura 6-2). Una región particular del hueso parietal es la escogida para este trabajo, de tamaño aproximado 56 mm x 41 mm. Esta superficie es extruida en 0,6 mm (espesor de las láminas de acero 304 usadas en el

Capítulo 5) para generar la versión digital del implante que se desea fabricar mediante doblado láser.

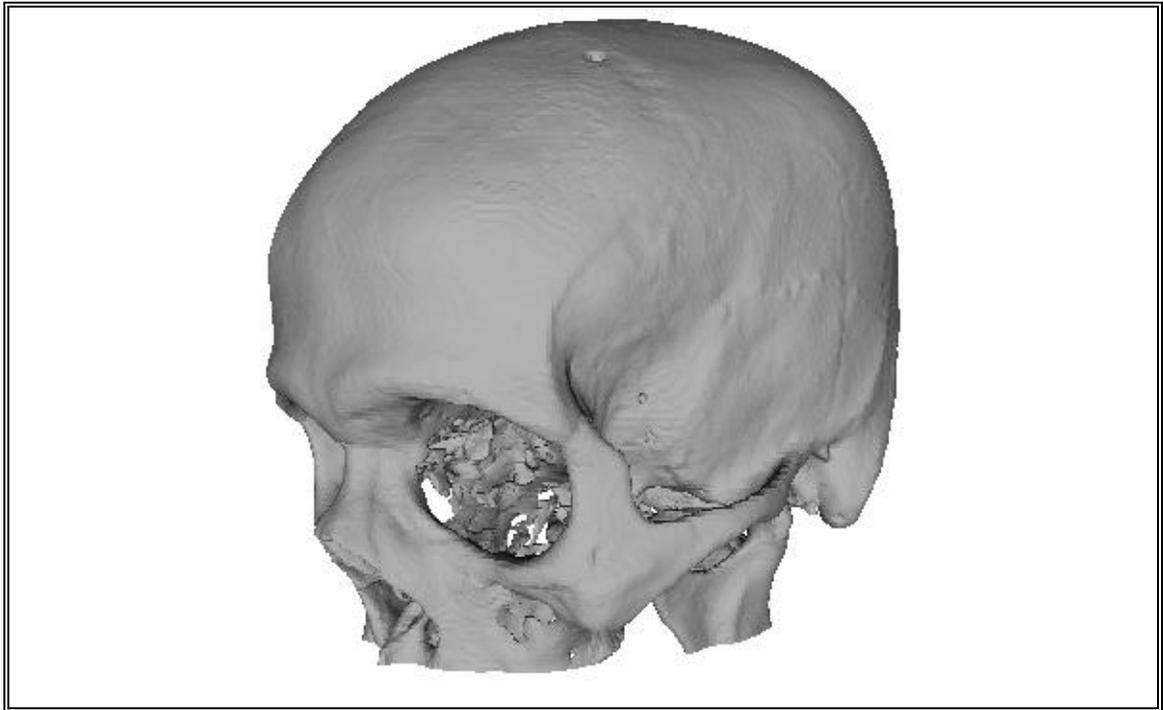


Figura 6-1: Tomografía de cráneo.

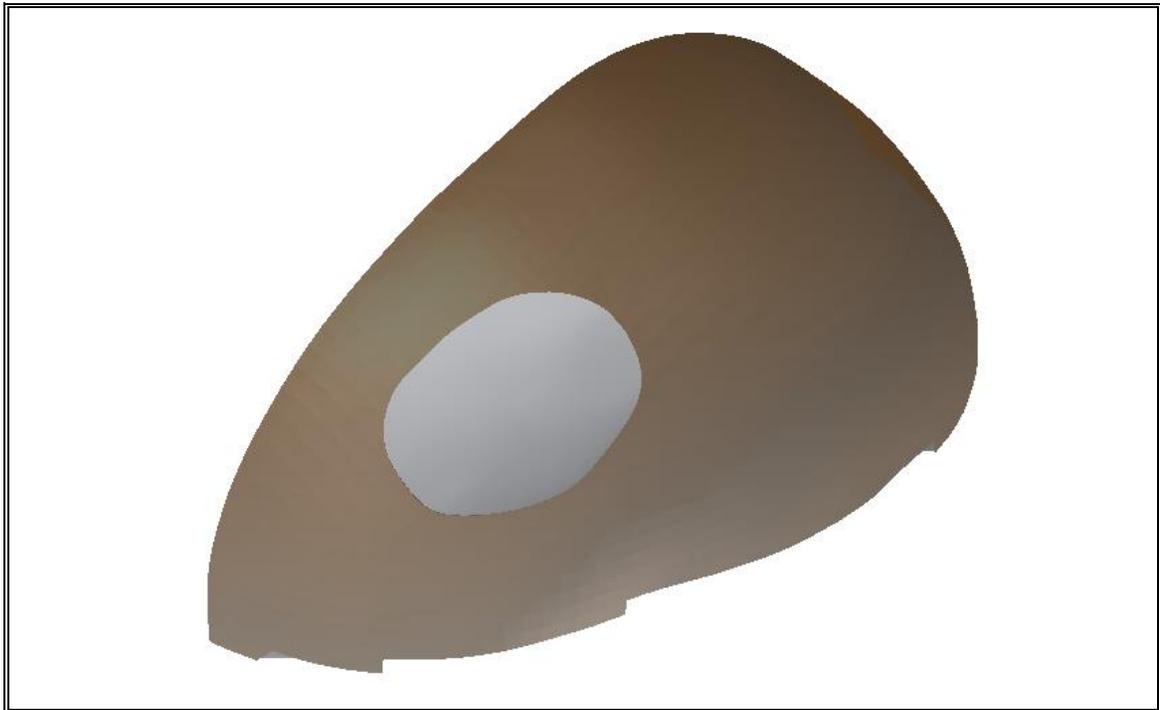


Figura 6-2: Superficie deseada.

En este trabajo, el cráneo empleado no presenta defecto ya que el principal propósito es validar el conformado láser como técnica de manufactura de superficies craneales. Técnicas para reconstruir la superficie del cráneo en caso de haber un defecto, como por ejemplo usar simetría del cráneo, se pueden encontrar en diversas fuentes (Jardini et al., 2014).

Esta superficie se exporta a COMSOL, donde es mallada usando elementos hexaédricos de 8 nodos (Figura 6-3). Luego, esta malla es leída y exportada para el siguiente paso.

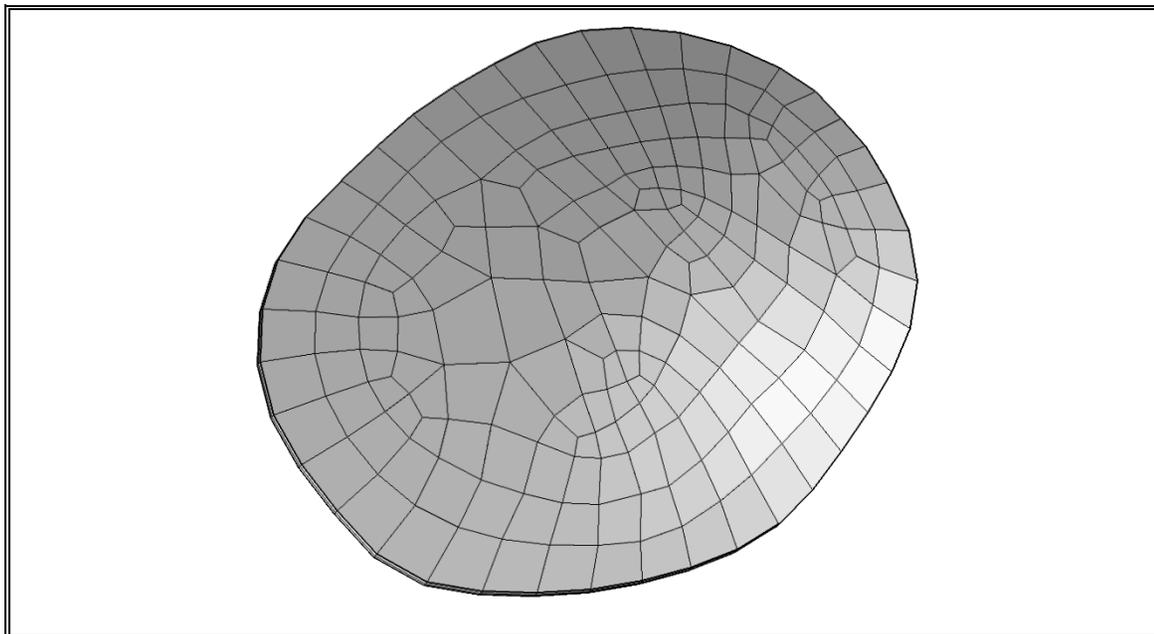


Figura 6-3: Superficie craneal mallada.

6.2.2 Campo de deformaciones

Una vez que la superficie deseada está determinada, se aplanada mediante simulación elástica de grandes desplazamientos usando elementos finitos. Ésta se realiza comprimiendo la superficie deseada entre dos placas rígidas hasta que la distancia entre ellas es igual al espesor del implante. Se supone que no hay roce entre las superficies. El campo de deformaciones resultantes del aplanamiento es un problema geométrico e independiente de las propiedades del material, ya sean elásticas o plásticas (Cheng y Yao (2004) presentan una demostración matemática detallada) y, por lo tanto, se prefiere un modelo constitutivo elástico pues es más simple de resolver. Para verificar esa hipótesis, se realizaron aplanamientos con distintos módulos elásticos y el campo de deformaciones fue efectivamente el mismo.

La deformación principal máxima (es decir, de estiramiento) en la configuración aplanada se muestran como campo vectorial en la Figura 6-4. El campo mostrado corresponde al lado de la configuración plana que es el lado convexo en la configuración 3D.

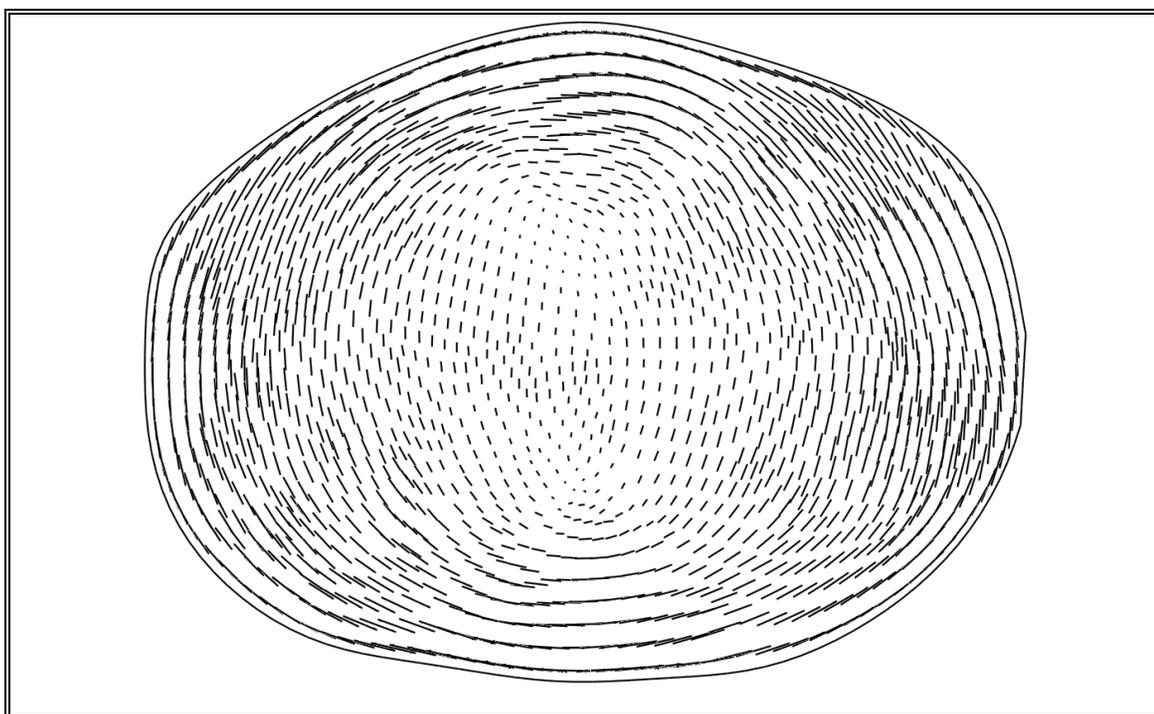


Figura 6-4: Campo vectorial de deformación principal máxima, configuración plana.

Este valor principal de la deformación es escogido para representar la deformación en la configuración plana bajo la lógica que el láser irradiará este lado de la forma plana y los caminos se ubicarán perpendiculares a las direcciones de máxima deformación, de tal manera que las deformaciones de contracción causadas por el láser lleven la configuración plana a la configuración deseada.

Además, el contorno de la superficie aplanada provee el perfil que debe ser cortado de una lámina de metal previo al doblado láser.

6.2.3 Determinación parámetros de irradiación

Como ya se mencionó, los caminos de irradiación se trazan perpendiculares a las direcciones de máxima deformación de estiramiento en la configuración aplanada (Figura 6-5), ya que el doblado láser causa máxima contracción en la dirección perpendicular al camino del láser llevando, por lo tanto, la configuración plana a la forma deseada.

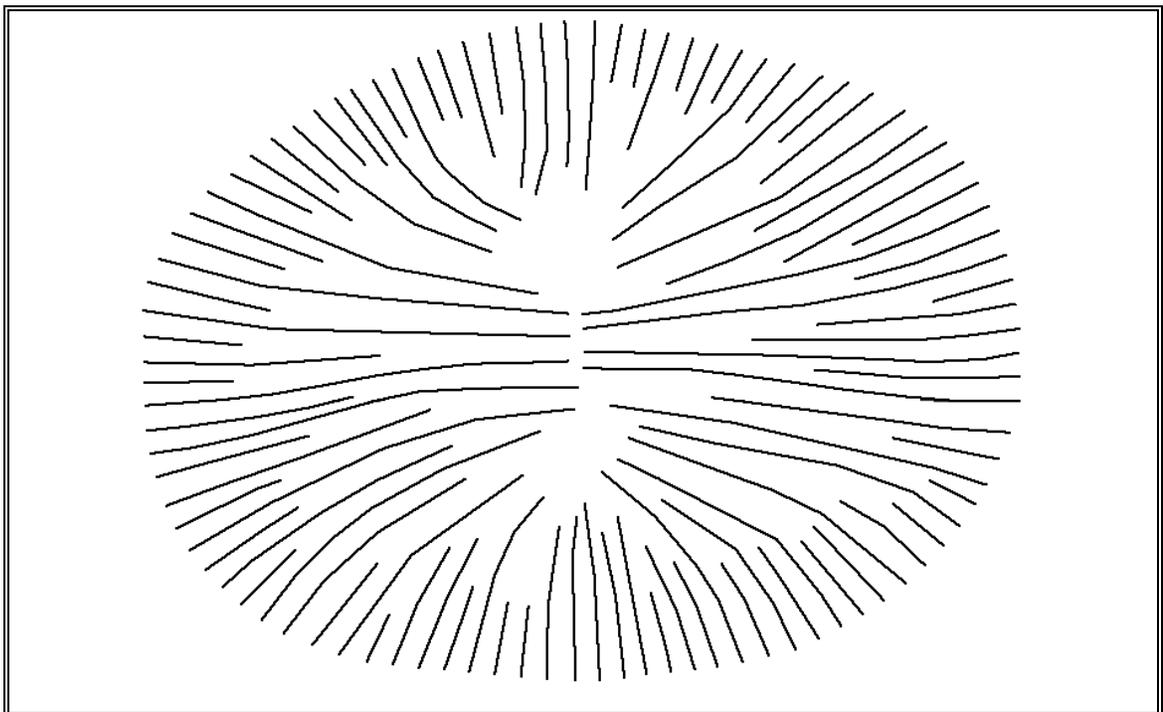


Figura 6-5: Caminos de irradiación.

Se puede observar que, para esta superficie en particular, los caminos de irradiación ocurren radialmente desde los bordes. El espaciado entre caminos se ha fijado en 1,5 mm. El razonamiento es que mientras menor sea el espaciado, menor energía se requiere por cada camino y la superficie puede ser escaneada de manera más precisa. Pero un espaciado menor a 1,5 mm, dado que el diámetro del láser es 1,2 mm, violaría el supuesto de caminos independientes bajo el cual se derivó la base de datos del Capítulo 5, ya que habría deformación sobrepuesta en caminos adyacentes.

Otra medida tomada para no violar el supuesto de caminos independientes es permitir que haya tiempo suficiente de enfriamiento entre caminos adyacentes, lo cual se logra a través del patrón de irradiación consistente en hacer un camino, luego un camino que comience del borde opuesto, luego un camino que comience desde un borde perpendicular y así sucesivamente, de tal manera que se irradian tres caminos alejados antes de volver al camino adyacente.

Una vez que se establecen los caminos de irradiación, el siguiente paso es determinar las condiciones de irradiación (velocidad y potencia del láser) de cada camino. Para este propósito, las deformaciones principales máximas son promediadas entre el inicio y final de cada camino y ese valor es multiplicado por $1,5/1,2$ ya que el diámetro del láser es 1,2 mm y el espacio entre caminos es 1,5 mm, con lo cual se toma en cuenta la deformación en la zona entre caminos que no es irradiada por el láser. Se ha establecido como criterio que si la diferencia de deformación entre el inicio y final de un camino es mayor a 0,004, el camino se divide en caminos más cortos, permitiendo así cambios en la potencia y velocidad del láser con el objetivo de cumplir de manera más precisa el

requisito de deformación que resultaría si se escogiera una única velocidad y potencia por cada camino.

El valor de deformación de cada camino se multiplica por -1 (ya que el campo de deformación en la configuración plana es de estiramiento mientras que las deformaciones causadas por el láser son de contracción), ese valor se busca en la base de datos obtenida en el Capítulo 5 y se escogen las condiciones de irradiación que satisfacen ese valor. A modo ilustrativo, la Figura 6-6 muestra el detalle de las condiciones de irradiación para uno de los caminos.

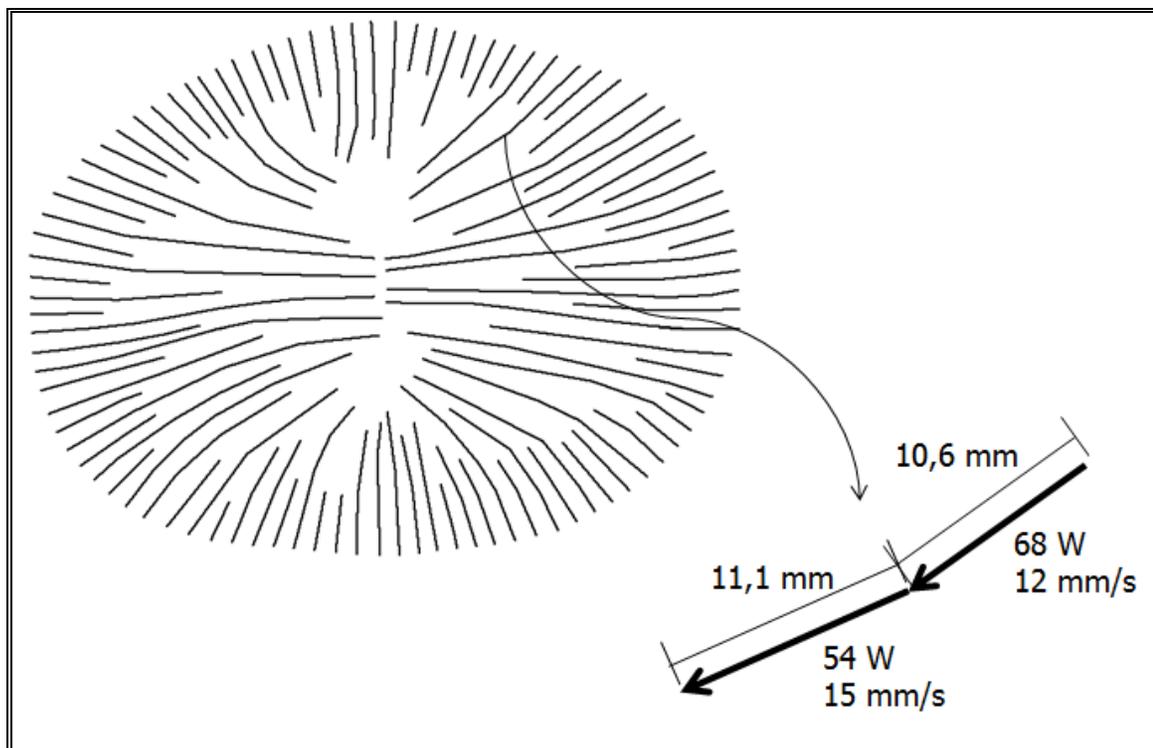


Figura 6-6: Condiciones de irradiación para un camino en específico.

Dado que para esta superficie en particular, si se apoya en el centro (Sección 6.2.4), el ángulo de incidencia del láser no superará los $8,5^\circ$ y, de acuerdo a lo comentado en el

Capítulo 4, se considerará que el coeficiente de absorción es el mismo para todos los caminos.

6.2.4 Procedimiento experimental

Una vez que se determinan los parámetros de irradiación, la forma plana se obtiene mediante corte láser, ya que el contorno es de forma irregular y difícil de cortar con otras técnicas, y luego se la cubre con grafito para mejorar el coeficiente de absorción. El montaje experimental se muestra en la Figura 6-7. La forma plana es apoyada en su centro y afirmada al sistema de movimiento mediante un perno M3. El tiempo total de movimiento para obtener esta superficie es 234 segundos.

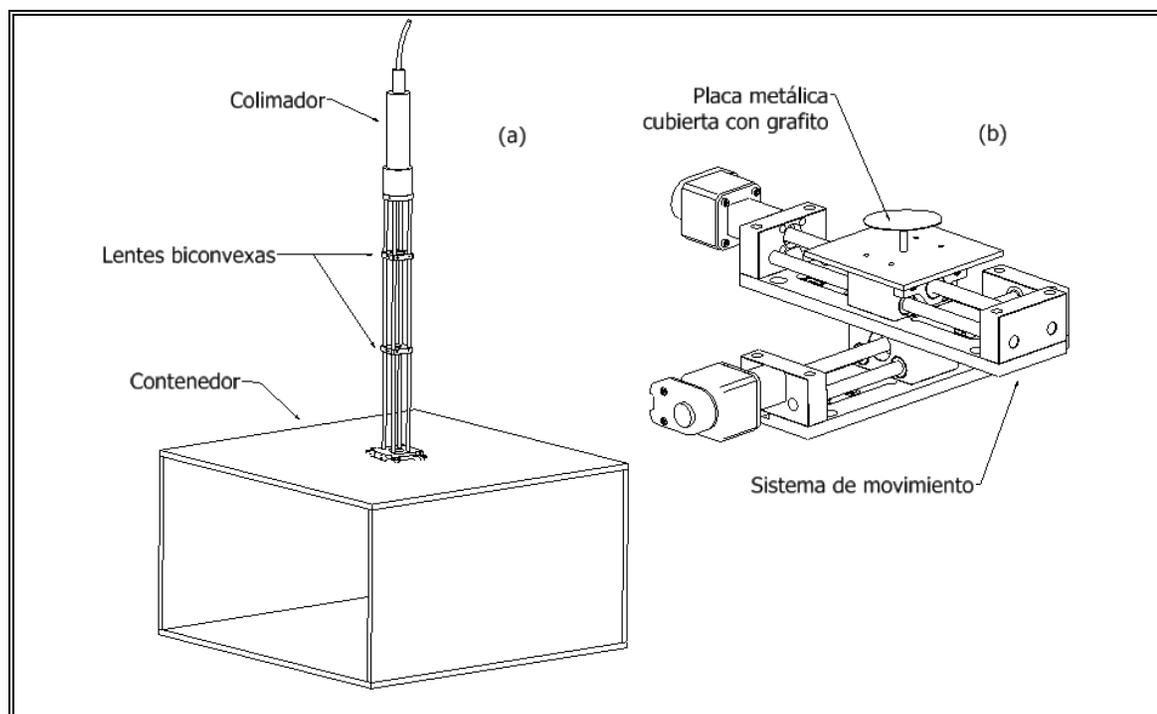


Figura 6-7: a) Montaje experimental b) Sistema de movimiento.

6.3 Resultados

La superficie resultante se muestra en la Figura 6-8, una vez retirada la capa de grafito. Las líneas de color café corresponden a los caminos de irradiación y se puede apreciar una zona afectada térmicamente para cada uno.



Figura 6-8: Forma resultante

En la Figura 6-9 se muestra la forma resultante colocada sobre una impresión 3D del cráneo del cual se tomó la superficie deseada. Se aprecia un acuerdo general con la forma deseada.

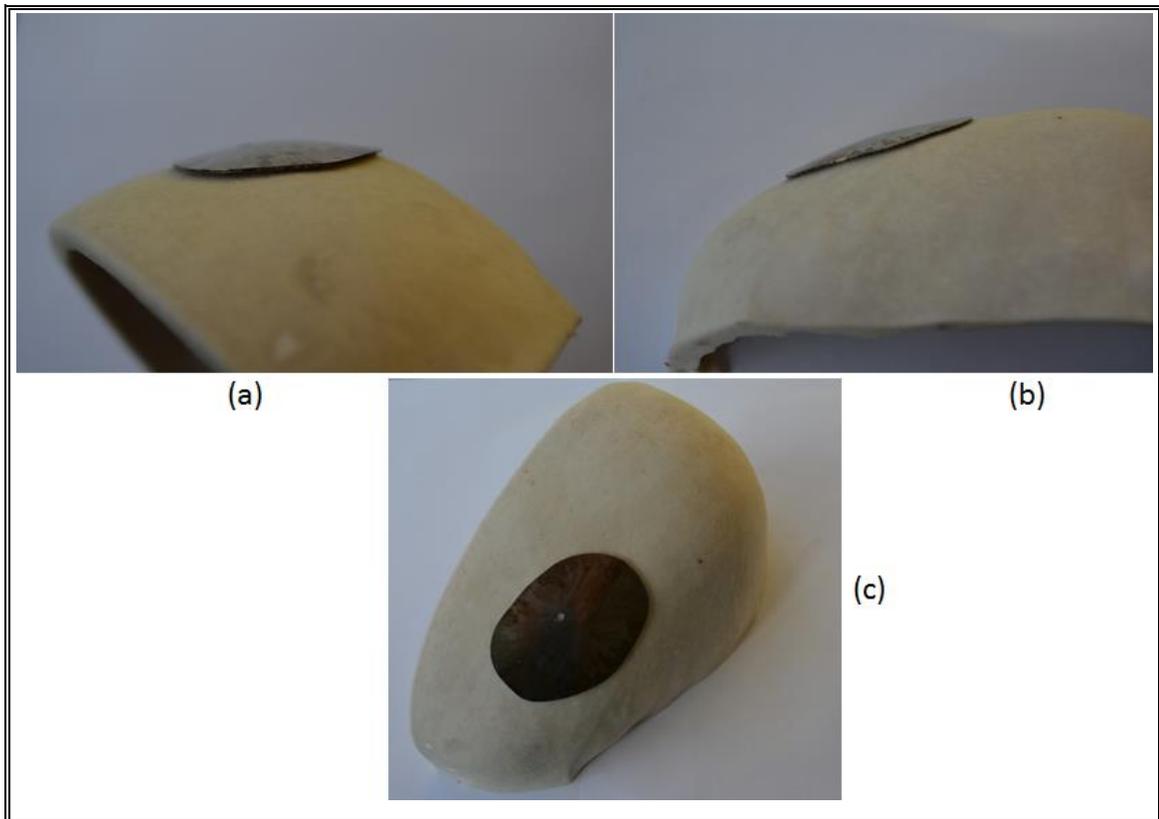


Figura 6-9: a) Vista frontal b) Vista lateral c) Vista isométrica.

Mediante una máquina de medición de coordenadas (CMM) se midieron las coordenadas de la superficie resultante a lo largo de dos ejes perpendiculares (Figura 6-10). La diferencia absoluta promedio entre la superficie deseada y la obtenida es 0,21 mm con un valor máximo de 0,52 mm en los bordes.

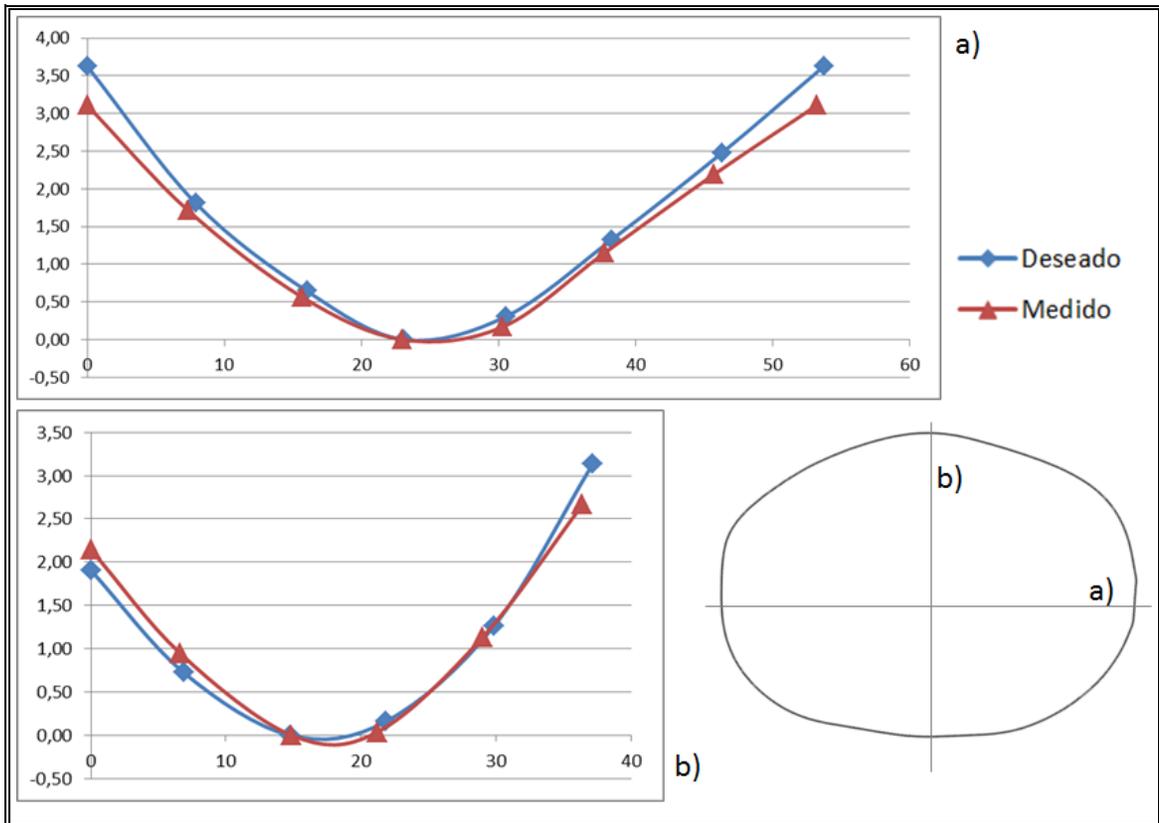


Figura 6-10: Comparación de la superficie obtenida y la deseada, en mm.

6.4 Discusión

En este capítulo se presenta un proceso de diseño para obtener superficies craneales mediante doblado láser. El campo de deformaciones necesario para obtener la superficie deseada se determina mediante los siguientes pasos: 1) aplanamiento de ésta en una simulación elástica, 2) usando la dirección de la deformación principal máxima de estiramiento en la configuración plana, se escogen los caminos de irradiación y 3) usando los valores promedio de esta deformación en esos caminos, se determinan la potencia y velocidad del láser usando la base de datos obtenida en el Capítulo 5.

Los resultados experimentales muestran un acuerdo general con la superficie deseada, con pequeñas discrepancias, principalmente a lo largo del borde de la superficie obtenida. La principal razón para esa discrepancia se debe a que las deformaciones que causa el doblado láser tienen una distribución espacial (tanto en el espesor como en el plano de la lámina) distinta a la requerida en cada punto de la lámina para llevarla de la configuración plana a la configuración deseada. Por lo tanto, es imposible replicar exactamente el campo de deformaciones requerido mediante doblado láser. En cambio, lo que se ha hecho en este trabajo es generar mediante doblado láser deformaciones promedios iguales a los valores promedios requeridos.

Una ventaja del procedimiento de diseño seguido en este trabajo es que no se requiere simular la irradiación de todos los caminos en la forma plana e iterar hasta que se obtenga un resultado satisfactorio, sino que es un proceso de diseño inverso que parte de la superficie deseada.

Es importante notar que si el espesor de la lámina, el diámetro del láser o el material a doblar cambiaran, sería necesario generar una nueva base de datos del proceso. Además, si el espesor de la lámina aumentara, sería necesario ajustar el diámetro y potencia de tal manera que el doblado láser siga actuando bajo el mecanismo de gradiente térmico.

Finalmente, cabe recordar que en este capítulo se despreció el efecto del ángulo de incidencia en el coeficiente de absorción (Capítulo 4), ya que la superficie formada no supera los $8,5^\circ$ de inclinación. Si se deseara formar una superficie 3D con pendiente más pronunciada, sería necesario incorporar ese fenómeno, ya sea generando distintas bases de datos para intervalos del ángulo de incidencia, o usar proporcionalidad y multiplicar la potencia de la base de datos derivada en el Capítulo 5 por la razón entre la absorción

para la incidencia perpendicular y la absorción para cierto ángulo de incidencia y así obtener la potencia necesaria para cierta deformación y velocidad.

7. CONCLUSIONES GENERALES

El objetivo de este estudio fue comprender el conformado láser y usar esta técnica moderna de manufactura para obtener una superficie 3D compleja.

Se propuso un método experimental-numérico para medir el coeficiente de absorción y se mostró que el coeficiente de absorción de láminas metálicas difiere significativamente del valor reportado en literatura para materiales puros y pulidos. (Capítulo 3). Usando el mismo método, se obtuvo la relación entre el coeficiente de absorción y el ángulo de incidencia (Capítulo 4), mostrándose que hay un efecto importante de este parámetro. Finalmente, se simuló numéricamente de manera correcta el conformado láser (Capítulo 5) y se aplicó una metodología de diseño mediante la cual se mostró que se pueden obtener superficies tridimensionales correspondientes al cráneo humano a partir de una lámina metálica plana con resultados óptimos (Capítulo 6).

Una posible mejora a este trabajo es incorporar el efecto de la anisotropía en el modelamiento del doblado láser, ya que los materiales usados habitualmente han sido sometidos a un proceso previo de laminación en frío y por lo tanto es inevitable que presenten cierto grado de anisotropía, tanto en el espesor como en el plano (Cheng y Yao, 2005). Alternativamente, se podría trabajar con el material en estado recocido, lo que requeriría caracterizar las propiedades mecánicas en ese estado. Además, otra posible mejora es considerar el efecto de borde al proceso de selección de parámetro para obtener de una superficie 3D, incorporando por ejemplo caminos con velocidad escalonada para reducirlo (Shen et al., 2010).

Aún más importante, quedan por investigar las modificaciones necesarias al modelo termo-mecánico para conseguir que el ángulo de doblado simulado sea el mismo al experimental cuando las condiciones de irradiación resultan en temperaturas muy elevadas. Como se indicó en el Capítulo 5, el modelo no incorpora cambios de fase ni otros fenómenos relacionados con temperaturas cercanas o superiores a la temperatura de fusión del material, por lo que queda abierta esa línea investigativa.

Futuras extensiones a este trabajo son aplicar este procedimiento para obtener superficies craneales en placas de titanio del espesor usado en la industria médica. También se puede estudiar el conformado de otras superficies de forma compleja y con bajos volúmenes de producción. Cabe mencionar que independiente del material empleado, es interesante estudiar si la integridad del material cambia durante el tratamiento térmico que causa el haz láser. Walczak et al. (2010) mostró que en el acero AISI 302 ocurre sensibilización del material ya que hay agotamiento de cromo al interior de los granos debido a la formación de carburos, lo que eventualmente causa problemas de corrosión. Queda abierto estudiar y analizar si algo similar sucede en el acero 304. Si el material empleado fuera titanio, se debería estudiar un posible cambio en la integridad debido a cambios de fase en estado sólido.

Posibles mejoras al equipo usado en este trabajo es incorporar al laboratorio un sistema más preciso para medir la potencia y el diámetro del láser, así como también aislar las lentes biconvexas del aire, ya que el polvo en suspensión obliga a limpiar rutinariamente las lentes. También sería una mejora incorporar equipos para la medición de las propiedades mecánicas en función de la temperatura. Además, es posible mejorar el código de coordinación del láser con el sistema de movimiento, tal que se permitan

transiciones inmediatas de la potencia para cierto camino de irradiación, pues en este momento para cambiar potencia es necesario detener el movimiento.

BIBLIOGRAFIA

- Bao, J. and Yao, Y.L. (2001). Analysis and Prediction of Edge Effects in Laser Bending. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 123, 53-61.
- Bergstrom, D. (2005). Laser absorption measurements in opaque solids, *NOLAMP conference*, Pitea, Sweden.
- Bergstrom, D. (2007). A ray-tracing analysis of the absorption of light by smooth and rough metal surfaces. *Applied Physics*, 101, 113504/1-11.
- Bergstrom, D. (2007). The Absorptance of steels to Nd:YLF and Nd:YAG laser light at room temperature. *Applied Surface Science*, 253, 5017-5028.
- Bergstrom, D. (2008). Mathematical modelling of laser absorption mechanisms in metals: A review. *M4PLI6 workshop*, Igls, Austria.
- Carey, C. (2007). Effects of laser interaction with graphite coatings. *Laser Assisted Netshape Engineering*, 5, 673-686.
- Charca, G., Stout, M., Bolmaro, R.E, Signorelli, J.W. and Turner, P. (2010). Study of a drawing-quality sheet steel. I: Stress/strain behaviors and Lankford coefficients by experiments and micromechanical simulations. *International Journal of Solids and Structures*, 47, 2285-2293.
- Che, M.S., Sheikh, M.A. and Li, L. (2010). A study of the effect of laser beam geometries on laser bending of sheet metal by buckling mechanism. *Optics & Laser Technology*, 43, 183-193.
- Cheng, P. and Lin, S.C. (2001). An analytical model to estimate angle formed by laser. *Journal of Materials Processing Technology*, 108, 314-319.
- Cheng, P. and Yao, Y.L. (2004). Process Design of Laser Forming for Three-Dimensional Thin Plates. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 126, 217-225.
- Cheng, P. and Yao, Y.L. (2005). The Influence of Sheet Metal Anisotropy on Laser Forming Process. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 127, 572-582.
- Cheng, P., Yao, Y.L., Liu, C., Pratt, D. and Fan, Y. (2005). Analysis and Prediction of Size Effect on Laser Forming of Sheet Metal, *Journal of Manufacturing Processes*, 7, 28-41.

- Davis, J.R. (1994). *Introduction to stainless steels ASM Specialty Handbook: Stainless Steels*, 5. Ohio, EE.UU.: ASM International.
- Fan, Y., Yang, Z., Cheng, P., Eglund, K. and Yao, Y.L. (2007). Investigation of Effect of Phase Transformations on Mechanical Behavior of AISI 1010 Steel in Laser Forming, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 129, 110–116.
- Geiger, M. and Vollertsen, F. (1993). The mechanisms of laser forming. *CIRP Annals*, 42, 301–304.
- Hennige, T., Holzer, S., and Vollertsen, F. (1997). On the working accuracy of laser bending. *Journal of Materials Processing Technology*, 71, 422-432.
- Hennige, T. (2000). Development of irradiation strategies for 3D-laser forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 103, 102-108.
- Jardini, A., Larosa, M., Filho, R., Zavaglia, C., Bernardes, L., Lambert, C., Calderoni, D. and Kharmandayan, P. (2014). Cranial reconstruction: 3D biomodel and custom-built implant created using additive manufacturing. *Journal of Cranio-Maxillo-Facial Surgery*, 42, 1877-1884.
- Liu, C. and Yao, Y.L. (2004). Optimal Process Planning for Laser Forming of Doubly Curved Shapes. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 126, 1–9.
- Liu, C., and Yao, Y.L. (2005). FEM-Based Process Design for Laser Forming of Doubly Curved Shapes. *Journal of Manufacturing Processes*, 7, 109–121.
- Roger, C.R., Yen, S.H. and Ramanathan, K.G. (1979). Temperature variation of total hemispherical emissivity of stainless steel AISI 304. *Optical Society of America*, 69, 1384-1393.
- Schipper, J., Ridder, G., Spetzger, U., Teszler, C., Fradis, M., and Maier, W. (2004). Individual prefabricated titanium implants and titanium mesh in skull base reconstructive surgery. A report of cases. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 261, 282-290.
- Seong, W., Jeon, Y. and Na, S. (2013) Ship-hull plate forming of saddle shape by geometrical approach. *Journal of Materials Processing Technology*, 213, 1885-1893.
- Shen, H. (2005). An analytical model for estimating deformation in laser forming. *Computational Materials Science*, 37, 593-598.
- Shen, H. and Vollertsen, F. (2009). Modelling of laser forming – An review. *Computational Materials Science*, 46, 834–840.

Shen, H., Hu, J. and Yao, Z. (2010). Analysis and control of edge effects in laser bending. *Optics and Lasers in Engineering*, 48, 305–315.

Steen, W.M. (1991). *Laser Material Processing*. Londres, Reino Unido.: Springer-Verlag.

Stevens, V., Celentano, D., Ramos-Grez, J. and Walczak, M. (2012). Experimental and numerical analysis of low output power laser bending of thin steel sheets. *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 134, 031010-1-12.

Tan, F.X., Li, M.Z. and Cai, Z.Y. (2007). Research on the process of multi-point forming for the customized titanium alloy cranial prosthesis. *Journal of Materials Processing Technology*, 187-188, 453-457.

Towfighi, S., Romilly, D. and Olson, J. (2013). Elevated temperature material characteristics of AISI 304L stainless steel. *Materials At High Temperatures*, 30, 151-155.

Vásquez-Ojeda, C. and Ramos-Grez, J. (2009). Bending of stainless steel thin sheets by a raster scanned low power CO2 laser. *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 2641-2647.

Vollertsen, F. (1994). Mechanisms and Models for Laser Forming *Laser Assisted Net Shape Engineering, Proceedings of the LANE '94*, 1, 345-360.

Walczak, M., Ramos-Grez, J., Celentano, D. and Lima, E.B.F. (2010). Sensitization of AISI 302 stainless steel during low-power laser forming. *Optics and Lasers in Engineering*, 48, 906-914.

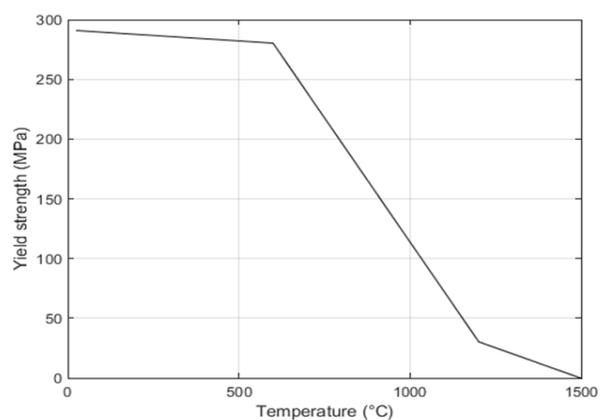
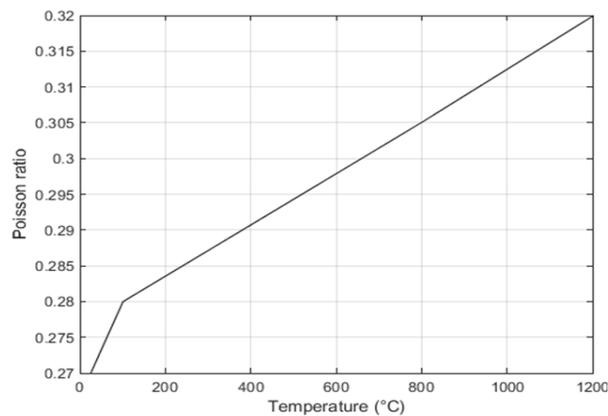
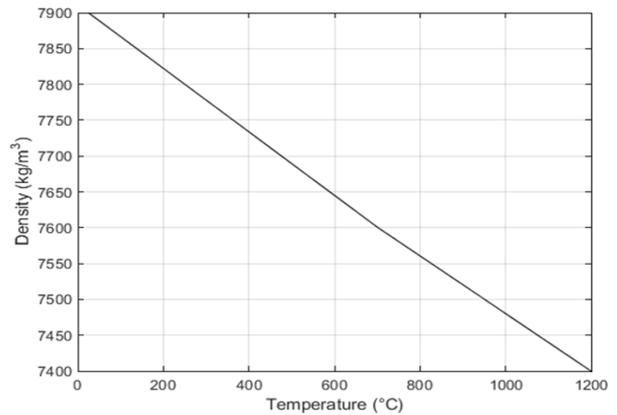
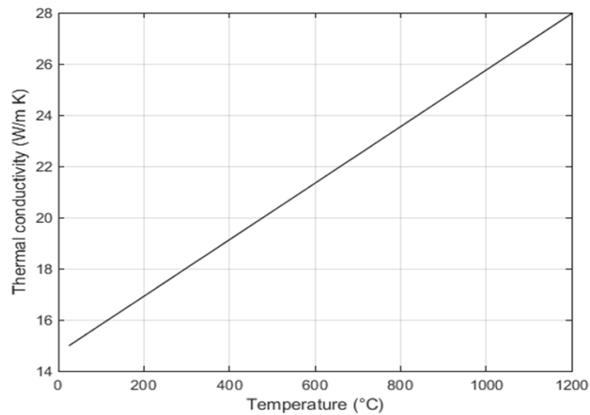
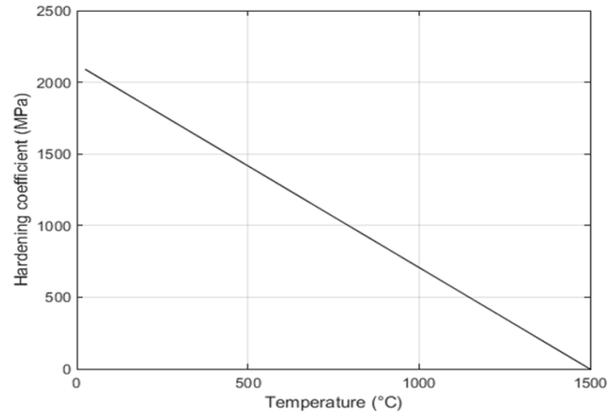
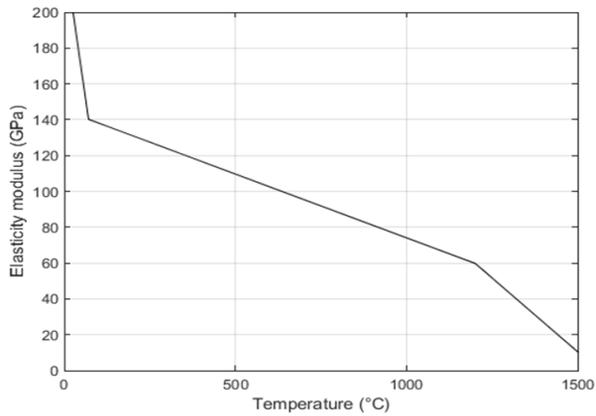
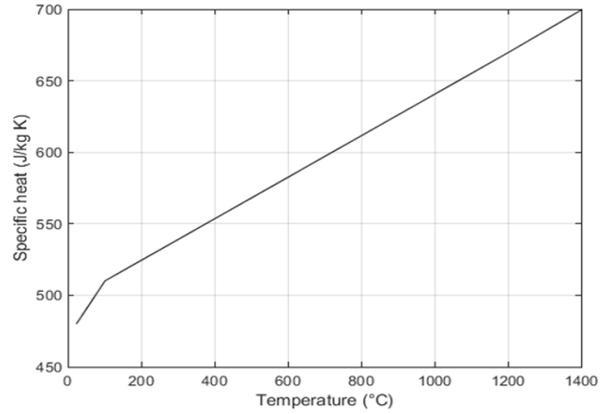
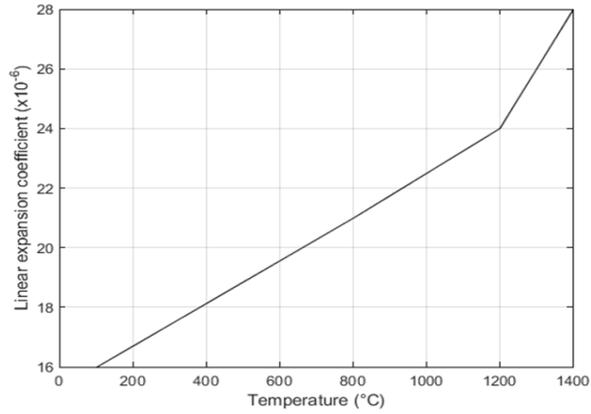
Williams, L.R., Fan, K.F. and Bentley, R.P. (2015). Custom-made titanium cranioplasty early and late complications of 151 cranioplasties and review of the literature. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 44, 599-608.

Yanjin, G. (2004). Influence of material properties on the laser-forming process of sheet metals. *Journal of Materials Processing Technology*, 167, 124-131.

Yanjin, G. (2011). Laser micro-bending process based on the characteristic of the laser polarization. *Journal of Materials Processing Technology*, 212, 662-671.

ANEXOS

ANEXO A: PROPIEDADES ACERO 304



ANEXO B: DETALLE RESULTADOS DOBLADO LÁSER CAPÍTULO 5

Leyenda:

II indica camino de irradiación paralelo a dirección de laminado.

T indica camino de irradiación perpendicular a dirección de laminado.

Valores marcados con * no se incorporaron en el cálculo del promedio, ya que difieren considerablemente del resto, y se consideraron como errores experimentales (láminas que presentaban un doblado previo, capa irregular de grafito superficial, etc.).

Tabla B-1: Resultados experimentales del ángulo de doblado (en °), potencia 28 W

5 mm/s	Entrada	Salida	Promedio	Promedio dirección	Promedio total
II	0,96	1,01	0,99	1,00	0,95
II	0,95	1,07	1,01		
T	1,02	1,02	1,02	0,91	
T	0,63	0,97	0,80		

10 mm/s	Entrada	Salida	Promedio	Promedio dirección	Promedio total
II	0,83	*1,40	0,83	0,62	0,51
II	0,35	0,45	0,40		
T	0,54	0,48	0,51	0,41	
T	0,28	0,35	0,32		

Tabla B-2: Resultados experimentales del ángulo de doblado (en °), potencia 54 W

5 mm/s	Entrada	Salida	Promedio	Promedio dirección	Promedio total
II	2,70	2,81	2,76	2,85	2,74
II	2,71	3,19	2,95		
T	2,49	3,27	2,88	2,63	
T	2,47	2,30	2,39		

10 mm/s	Entrada	Salida	Promedio	Promedio dirección	Promedio total
II	1,19	1,60	1,40	1,52	1,54
II	1,49	1,79	1,64		
T	1,79	*0,95	1,79	1,55	
T	1,23	1,40	1,32		

15 mm/s	Entrada	Salida	Promedio	Promedio dirección	Promedio total
II	1,10	1,13	1,12	1,14	1,06
II	1,14	1,19	1,17		
T	1,04	1,03	1,04	0,97	
T	0,85	0,96	0,91		

Tabla B-3: Resultados experimentales del ángulo de doblado (en °), potencia 82 W

5 mm/s	Entrada	Salida	Promedio	Promedio dirección	Promedio total
II	3,69	4,27	3,98	4,10	4,22
II	3,84	4,58	4,21		
T	3,93	4,77	4,35	4,34	
T	3,56	5,10	4,33		

10 mm/s	Entrada	Salida	Promedio	Promedio dirección	Promedio total
II	2,61	2,70	2,66	2,82	2,73
II	2,87	3,11	2,99		
T	2,57	2,68	2,63	2,63	
T	2,56	2,70	2,63		

15 mm/s	Entrada	Salida	Promedio	Promedio dirección	Promedio total
II	1,80	1,82	1,81	1,78	1,72
II	1,79	1,69	1,74		
T	1,76	1,78	1,77	1,67	
T	1,57	1,58	1,58		

20 mm/s	Entrada	Salida	Promedio	Promedio dirección	Promedio total
II	1,73	1,75	1,74	1,72	1,67
II	1,58	1,83	1,71		
T	1,60	1,70	1,65	1,63	
T	1,53	1,67	1,60		

Tabla B-4: Resultados experimentales del ángulo de doblado (en °), potencia 111 W

5 mm/s	Entrada	Salida	Promedio	Promedio dirección	Promedio total
II	3,79	5,05	4,42	4,35	4,37
II	3,95	4,61	4,28		
T	4,05	4,92	4,49	4,39	
T	3,34	5,24	4,29		

10 mm/s	Entrada	Salida	Promedio	Promedio dirección	Promedio total
II	3,55	4,02	3,79	3,19	3,10
II	2,35	2,85	2,60		
T	2,56	2,66	2,61	3,00	
T	3,49	3,30	3,40		

15 mm/s	Entrada	Salida	Promedio	Promedio dirección	Promedio total
II	2,68	2,87	2,78	2,74	2,47
II	2,44	2,96	2,70		
T	2,06	2,72	2,39	2,20	
T	1,98	2,04	2,01		

20 mm/s	Entrada	Salida	Promedio	Promedio dirección	Promedio total
II	1,93	2,16	2,05	1,92	1,97
II	1,80	*2,52	1,80		
T	1,76	2,13	1,95	1,98	
T	*1,67	2,01	2,01		