



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

**EFFECTOS DE LA TASA DE
DEFORMACIÓN EN EL PROCESO DE
DOBLADO DE LÁMINAS DE ACERO
MEDIANTE LA APLICACIÓN DE LÁSER**

JAVIER IGNACIO CASTILLO ESPINOZA

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

Profesor Supervisor:
DIEGO CELENTANO

Santiago de Chile, Agosto, 2017

© 2017, Javier Castillo Espinoza



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

EFFECTOS DE LA TASA DE DEFORMACIÓN EN EL PROCESO DE DOBLADO DE LÁMINAS DE ACERO MEDIANTE LA APLICACIÓN DE LÁSER

JAVIER IGNACIO CASTILLO ESPINOZA

Tesis (Proyecto) presentada(o) a la Comisión integrada por los profesores:

DIEGO JAVIER CELENTANO

JORGE RAMOS GREZ

MARCELA ANDREA CRUCHAGA

HERNÁN DE SOLMINIHAC TAMPIER

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

Santiago de Chile, Agosto, 2017

A mis Padres, familia y amigos, por su gran apoyo y motivación constante.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar a mi familia por todo el apoyo moral y material brindado, ya que sin ellos hubiese sido imposible lograr la consumación de este trabajo.

Por otro lado agradezco al profesor Diego Celentano, por las facilidades y oportunidades de desarrollo que me brindó a lo largo de la investigación, a Patricio Pérez por la buena disposición en el uso de las instalaciones del laboratorio, y a todos los trabajadores del taller del DIMM, que en todo momento me apoyaron de una u otra forma durante mi estadía en el magíster.

Doy las gracias a mis amistades tanto de la universidad como de la vida, quienes en todo momento estuvieron conmigo y por cada palabra de aliento y apoyo incondicional para seguir a pesar de las dificultades que se presentaron en el camino.

ÍNDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Presentación del problema	1
1.2	Motivación	4
1.3	Hipótesis y objetivos	4
1.4	Contenido	6
2	ESTADO DEL ARTE	7
2.1	Mecanismos de doblado.....	7
2.1.1	Mecanismo de gradiente térmico (TGM)	7
2.1.2	Mecanismo de pandeo (BM)	9
2.1.3	Mecanismo de perturbación (UM).....	10
2.1.4	Mecanismo de acoplamiento (CM)	11
2.2	Antecedentes del conformado láser	12
2.3	Antecedentes de la visco-plasticidad en el acero	16
3	DESARROLLO EXPERIMENTAL	19
3.1	Montaje experimental.....	19
3.1.1	Instrumentación	20
3.1.2	Material.....	25
3.2	Geometría de las placas y restricciones del montaje.....	27
3.3	Parámetros del conformado.....	28
3.3.1	Velocidad de pasada	28
3.3.2	Potencia suministrada	29
3.4	Resultados experimentales	32
3.5	Conclusiones	33
4	MODELAMIENTOS NUMÉRICOS Y RESULTADOS	35
4.1	Aspectos técnicos de las simulaciones	36
4.2	Modelamiento termo-mecánico	37
4.3	Modelo constitutivo elasto-plástico	38

4.3.1 Simulación y resultados con el modelo elasto-plástico.....	40
4.5 Primer modelo constitutivo visco-plástico.....	43
4.5.1 Simulaciones y resultados con el primer modelo visco-plástico	44
4.6 Segundo modelo constitutivo visco-plástico.....	48
4.6.1 Simulaciones con el segundo modelo visco-plástico	48
4.7 Análisis y discusión.....	49
5 CONCLUSIONES.....	52
A N E X O S	58
ANEXO A: DETALLE DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	59
ANEXO B: GRÁFICOS DE LA VISCOSIDAD DEL PRIMER MODELO VISCO- PLÁSTICO EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA	66
ANEXO C: GRÁFICOS DE LA VISCOSIDAD, LA TENSIÓN EQUIVALENTE Y LA TEMPERATURA DEL PRIMER MODELO VISCO-PLÁSTICO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO.....	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Composición química (% en peso) del acero AISI 304.	25
Tabla 3.2. Resultados experimentales del ángulo de doblado (en °).....	32
Tabla 4.1. Resultados simulación con el modelo elasto-plástico del ángulo.....	41
Tabla 4.2. Resultados simulación con el primer modelo visco-plástico del ángulo de doblado (en °).	45
Tabla 4.3. Valores de la viscosidad óptima K^* (en MPa · s).	45
Tabla 4.4. Resultados simulación con el segundo modelo visco-plástico del ángulo de doblado (en °).	49
Tabla 4.5. Resumen de resultados y errores asociados.	50
Tabla A.1: Resultados experimentales del ángulo de doblado (en °), potencia 30 W.	59
Tabla A.2: Resultados experimentales del ángulo de doblado (en °), potencia 60 W.	60
Tabla A.3: Resultados experimentales del ángulo de doblado (en °), potencia 90 W.	62
Tabla A.4: Resultados experimentales del ángulo de doblado (en °), potencia 120 W. ..	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Representación de un conformado tradicional con un punzón y un dado.	2
Figura 2.1. Esquema del TGM. a) El haz láser produce un gradiente térmico dominante en la cara irradiada. b) El cambio de temperatura a lo largo del espesor genera una expansión térmica. c) Los alrededores de la zona irradiada restringen la expansión térmica y se producen tensiones compresivas que doblan el material en la dirección ilustrada.	8
Figura 2.2. Esquema del BM. a) El gradiente térmico generado por el láser a lo largo del espesor es casi nulo. b) Debido a este tipo de gradiente, no hay certeza de la dirección del conformado.	9
Figura 2.3. Esquema del UM. a) El gradiente térmico no es tan pequeño como en el caso del BM. b) El material se acorta en la dirección mostrada, pero aumenta su espesor en la zona irradiada.	11
Figura 2.4. Esquema del CM. a) La distribución del gradiente térmico permite que haya deformación plástica en las caras inferior y superior. b) El material se dobla de forma similar al TGM y se acorta como el UM.	12
Figura 2.5. Desarrollo de los modelos del conformado láser. (Shen y Vollertsen, 2009)	13
Figura 3.1. Montaje experimental y componentes (imagen extraída de la tesis “Análisis experimental y numérico del proceso de doblado de chapas mediante la aplicación de un haz láser con patrones circulares de escaneo”, Álvaro Navarrete).	19
Figura 3.2. Dispositivo que suministra el haz láser.	20
Figura 3.3. Lentes que permiten la focalización del láser.	21
Figura 3.4. a) Contenedor de seguridad b) Sistema de dos ejes lineales (imagen extraída de la tesis “Efecto del ángulo de incidencia en el coeficiente de absorción y metodología para la fabricación de superficies craneales mediante doblado láser”, Felipe Cook).	22
Figura 3.5. a) Receptor del haz láser b) Medidor digital.	23
Figura 3.6. Grafito en <i>spray</i>	24
Figura 3.7. Propiedades termomecánicas del acero AISI 304 en función de la temperatura.	26
Figura 3.8. Esquema de la placa siendo irradiada por el láser.	27

Figura 3.9. Gráfico del factor de pérdida por lente a distintas potencias suministradas por el dispositivo láser.....	30
Figura 3.10. Esquema de las pérdidas de potencia del láser desde la fuente hasta la placa.	31
Figura 4.1. Malla utilizada para las simulaciones.	37
Figura 4.2. Caso $P = 60$ W, $V = 5$ mm/s. a) Evolución de la viscosidad K en el tiempo. b) Evolución de la tensión equivalente σ en el tiempo. c) Evolución de la temperatura en el tiempo.....	47
Figura B.1. Gráfico de la viscosidad en función de la temperatura para el caso $P = 60$ W, $V = 5$ mm/s.....	66
Figura B.2. Gráfico de la viscosidad en función de la temperatura para el caso $P = 60$ W, $V = 10$ mm/s.	66
Figura B.3. Gráfico de la viscosidad en función de la temperatura para el caso $P = 90$ W, $V = 10$ mm/s.	67
Figura B.4. Gráfico de la viscosidad en función de la temperatura para el caso $P = 90$ W, $V = 15$ mm/s.	67
Figura B.5. Gráfico de la viscosidad en función de la temperatura para el caso $P = 120$ W, $V = 10$ mm/s.	68
Figura B.6. Gráfico de la viscosidad en función de la temperatura para el caso $P = 120$ W, $V = 15$ mm/s.	68
Figura C.1. Gráfico de la viscosidad, la tensión equivalente y la temperatura en función del tiempo para el caso $P = 60$ W, $V = 5$ mm/s.	69
Figura C.2. Gráfico de la viscosidad, la tensión equivalente y la temperatura en función del tiempo para el caso $P = 60$ W, $V = 10$ mm/s.....	70
Figura C.3. Gráfico de la viscosidad, la tensión equivalente y la temperatura en función del tiempo para el caso $P = 90$ W, $V = 10$ mm/s.....	71
Figura C.4. Gráfico de la viscosidad, la tensión equivalente y la temperatura en función del tiempo para el caso $P = 90$ W, $V = 15$ mm/s.....	72
Figura C.5. Gráfico de la viscosidad, la tensión equivalente y la temperatura en función del tiempo para el caso $P = 120$ W, $V = 10$ mm/s.....	73
Figura C.6. Gráfico de la viscosidad, la tensión equivalente y la temperatura en función del tiempo para el caso $P = 120$ W, $V = 15$ mm/s.	74

RESUMEN

En esta investigación se busca la forma de explicar numéricamente el proceso del conformado láser en placas de acero inoxidable AISI 304, así como el comportamiento de las variables involucradas más importantes. Para esto, se propone un modelamiento visco-plástico del material para poder predecir el ángulo de doblado en las placas.

De esta forma, se realizaron experimentos con una fuente láser para doblar las placas de acero de 0,6 mm de espesor con el objetivo de obtener una base de datos que luego será comparada con los resultados de unas simulaciones termo-mecánicas usando el Método de Elementos Finitos.

Para estas simulaciones se usó un modelo elasto-plástico y dos modelos visco-plásticos del acero para mostrar la influencia que tiene la tasa de deformación en el conformado láser. El primer modelo de visco-plasticidad fue proporcionado por la literatura, mientras que el segundo es un modelo propuesto en este trabajo que está basado en el primero y que muestra la dependencia de la tensión equivalente en la viscosidad.

Los resultados demostraron que el último modelo visco-plástico propuesto se adapta mejor que los otros dos modelos y que sus resultados siguen una tendencia coherente, precisa y, para la mayoría de los casos, están dentro de la desviación estándar de los resultados experimentales.

Palabras claves: conformado láser, modelo elasto-plástico, modelo visco-plástico, método de elementos finitos, acero inoxidable.

ABSTRACT

This investigation tries to explain numerically the laser forming process in AISI 304 stainless steel sheets and the behavior of the most important variables involved. In order to do this, a visco-plastic model of the material is proposed to predict the bending angle on the sheets.

Thus, a number of laser source experiments were made to bend the 0,6 thickness stainless steel sheets with the purpose of obtain a data base that will be compared with the results of thermo-mechanic simulations using FEM.

For these simulations, an elasto-plastic model and two visco-plastic models of the steel were used to show the influence of the strain rate in the laser forming process. The first visco-plastic model was obtained from the literature, while the second one is a proposed model in this work that is based in the first one and shows the equivalent stress dependency of the material viscosity.

Results show the last visco-plastic model proposed fits better than the two others and that its results follow a coherent, accurate tendency and, in most of the cases, are within the standard deviation of the experimental results.

Keywords: laser forming, elasto-plastic model, visco-plastic model, FEM, stainless steel.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Presentación del problema

Dentro de los principales procesos de la manufactura, el proceso de conformado consiste en deformar un material mediante tensiones plásticas para obtener una forma deseada. Actualmente, el recurso más usado para deformar la mayoría de los materiales a gusto es el conformado usando una fuerza para poder llegar al rango plástico del material y así darle forma con algún molde. Los procesos como el embutido, el trefilado, el laminado, el estampado o el forjado son ejemplos de tipos de conformados más utilizados en estos días. En la Figura 1.1 se muestra un ejemplo de conformado tradicional que consta de un punzón, que da la fuerza para realizar el proceso y un dado que le permite al material obtener la forma deseada.

A pesar que estos tipos de conformado son efectivos y una gran opción para una productividad en masa, carecen de fineza y detalle para hacer formas más complejas. Además, se dejan de lado el comportamiento de las variables físicas involucradas que no tienen relación con la geometría final de la pieza de trabajo.

De esta forma, el conformado láser llega a mediados de la década de los 80 con el objetivo de solucionar estos problemas y lograr que el proceso del conformado alcance un nuevo nivel donde no existen fuerzas externas para poder cumplir el mismo objetivo.

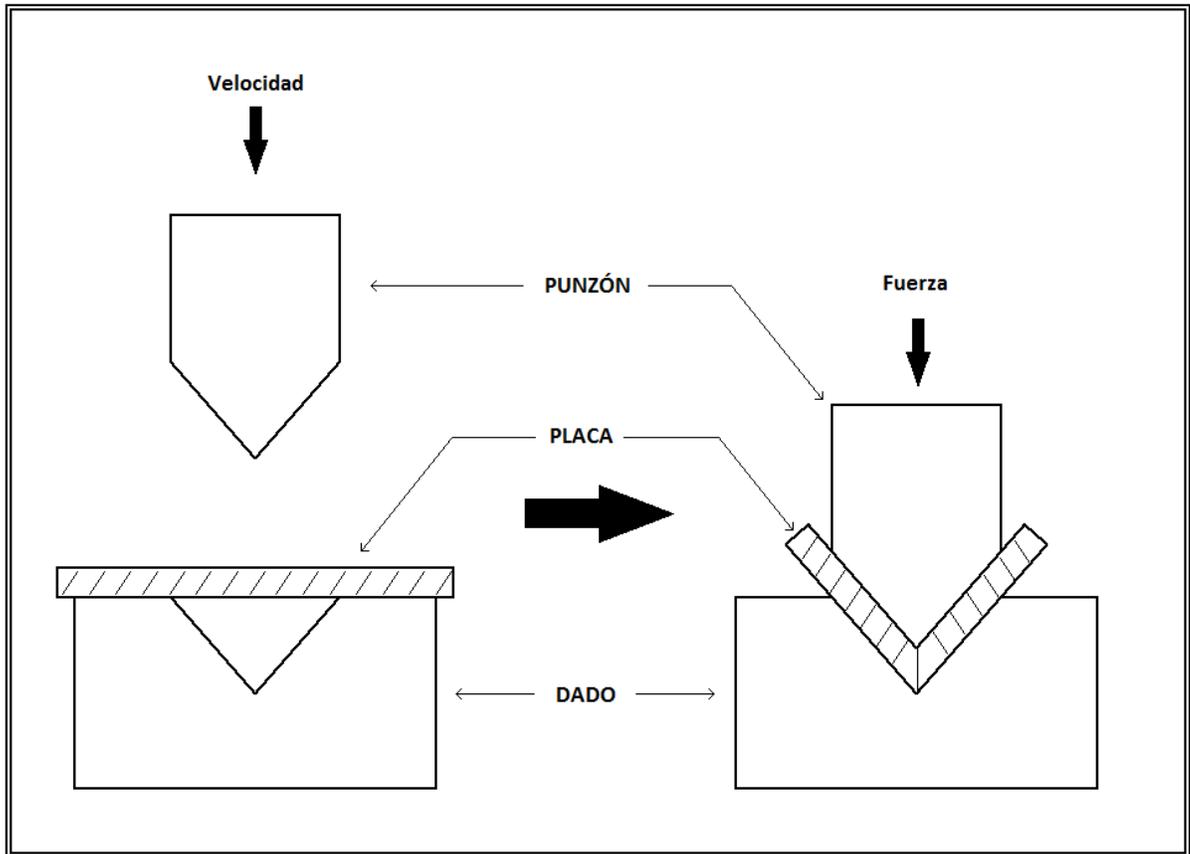


Figura 1.1. Representación de un conformado tradicional con un punzón y un dado.

El conformado láser logra doblar el material mediante deformaciones termo-mecánicas producto de un camino recorrido por un haz láser a una cierta potencia y velocidad de pasada. Básicamente, y como de detallará en el siguiente Capítulo, el ángulo de doblado se genera por la dilatación térmica del material y por el gradiente térmico a lo largo del espesor. La zona del material irradiado se expande térmicamente y, al ser tan focalizado, entra en conflicto con el material a su alrededor que posee una temperatura mucho más

baja, lo que provoca que hayan tensiones plásticas compresivas que terminan doblando la pieza de trabajo hacia la dirección donde se emite el haz láser.

Los materiales adecuados para ser doblados con láser son aquellos que poseen un alto coeficiente de expansión térmica como el acero inoxidable, el aluminio, el titanio y el magnesio (Yanjin, 2004). Además, con este método no son necesarios moldes para obtener una geometría deseada ya que el material se dobla dependiendo del recorrido del haz láser, de su potencia y velocidad. Todo esto permite que el conformado sea más flexible y adecuado para producciones a baja escala y para pedidos específicos. La principal desventaja de este proceso es que no es tan rápido en comparación a los métodos tradicionales y se requiere de un mejor control para poder manejar las variables involucradas.

En el conformado láser, como ya se ha mencionado, se necesita conocer el comportamiento de cada una de las variables involucradas para poder obtener los resultados esperados. Debido a su alta complejidad por la interacción entre todas estas variables, este método ha demostrado ser atractivo para ser estudiado mediante simulaciones numéricas (Shen y Vollertsen, 2009). Entre los parámetros y variables a tomar en cuenta se encuentran los relacionados con la fuente del láser (el diámetro del láser, longitud de onda, densidad de potencia), los relacionados con las propiedades físicas, térmicas y mecánicas del material (el tiempo, la temperatura, el coeficiente de absorción, etc.) y aquellas variables concernientes al ambiente en el que se lleva a cabo el proceso (temperatura ambiente y las propiedades del aire). También cabe destacar que en el conformado tradicional, el espesor del material a doblar es de proporciones más

pequeñas en comparación con su largo y su ancho, por lo que esta y la mayoría de las investigaciones se usan placas o chapas con diferentes geometrías pero conservando estas proporciones.

1.2 Motivación

El conformado láser promete ser un método atractivo fundamental en el área de la manufactura y ha llamado la atención en el área astronáutica, automotriz, médica, entre otras, por su gran flexibilidad y precisión. Es por esto que es importante estudiar el comportamiento del material durante este proceso y poder describirlo de manera adecuada con el objetivo de obtener formas tridimensionales deseadas a un bajo costo y en un tiempo de producción razonable.

Comprender el comportamiento termo-mecánico de las variables más importantes involucradas en este tipo de conformado es el primer paso para abrir una nueva ventana en el mundo de la manufactura moderna y, de esta forma, poder realizar diseños complejos que hoy en día han sido imposibles de realizar.

1.3 Hipótesis y objetivos

Desde los inicios de las investigaciones del conformado láser hasta el día de hoy, las simulaciones numéricas se han basado en una modelación elasto-plástica de los materiales (en su mayoría metales) para poder explicar este proceso, entregando resultados prometedores. Sin embargo, existen excepciones donde este modelo no ha podido

representar el verdadero comportamiento del doblado con láser, especialmente en casos donde las temperaturas son muy altas.

Esta tesis pretende encontrar un modelo numérico capaz de predecir el comportamiento del doblado en placas de acero inoxidable de 0,6 mm de espesor para recorridos lineales de un haz láser cuando la potencia y la velocidad de pasada del láser varían de 30 W a 120 W y de 5 mm/s a 20 mm/s, respectivamente.

La principal hipótesis en esta investigación es que el conformado láser se puede representar mediante un modelamiento visco-plástico del acero, logrando mejores resultados que los obtenidos con el modelo elasto-plástico.

El objetivo general de este trabajo es encontrar este modelo visco-plástico y comparar sus resultados con los del modelo elasto-plástico. Con ayuda de investigaciones anteriores, las actividades a realizar durante esta investigación son:

- Realizar experimentos doblando placas de acero inoxidable con una fuente láser irradiándolas a través de un camino recto de pasada.
- Generar una base de datos con los resultados de los experimentos para poder compararla más adelante con los resultados de las simulaciones numéricas.
- Proponer un modelo visco-plástico para usarlo en las simulaciones y analizar los resultados.
- Utilizar un *software* computacional para hacer las simulaciones con el modelo elasto-plástico y con el modelo visco-plástico usando el Método de Elementos Finitos.

- Comparar los resultados experimentales y los proporcionados por las simulaciones y validar o refutar la hipótesis planteada en esta investigación.
- Proponer mejoras para futuras investigaciones.

1.4 Contenido

Para introducir al lector en el mundo del conformado láser, en el Capítulo 2 se mostrará una revisión bibliográfica de los mecanismos de doblado existentes, seguido de una secuencia cronológica de algunas investigaciones importantes concernientes al tema del doblado con láser y también se expone un subcapítulo de algunos modelos de viscoplasticidad que sirvieron de base para este trabajo. En el Capítulo 3 se detallará todo el desarrollo experimental para obtener la base de datos de los resultados al doblar placas de acero inoxidable AISI 304, donde se muestran los instrumentos utilizados, la composición y geometría del material y una descripción de los parámetros más influyentes en el proceso. En el Capítulo 4 se presentan los modelos numéricos utilizados y los resultados de las simulaciones. Por último, en el Capítulo 5 mostrarán las conclusiones de la investigación junto a las sugerencias y mejoras para futuros trabajos.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Mecanismos de doblado

Los mecanismos de doblado sirven para poder diferenciar las características y condiciones del conformado láser que se lleva a cabo. Las principales diferencias entre ellos son la geometría del material irradiado por el láser y el tamaño del diámetro del haz láser. A continuación se mostrarán los principales tipos de mecanismos.

2.1.1 Mecanismo de gradiente térmico (TGM)

Este mecanismo es el más usado en el conformado láser debido a su capacidad de control y predictibilidad. Además cabe destacar que es el mecanismo base para el trabajo explicitado en los Capítulos 3 y 5.

Básicamente, el TGM es dominante en los procesos de doblado donde el diámetro del haz láser es levemente menor que el espesor del material a conformar (Shen et al., 2006). Para diámetro demasiado pequeños del láser lo que determinará el conformado del material son la potencia y la velocidad. Las altas temperaturas que se generan en la superficie irradiada van decreciendo a lo largo del espesor, generando un gradiente de deformación térmico predominante en la zona irradiada. Estas deformaciones hacen que el material, en un principio, se doble en dirección a la superficie no irradiada. Finalmente, en la etapa de enfriamiento, el material se dobla en sentido contrario, producto de las tensiones compresivas que se generan entre la zona irradiada y el área a su alrededor que restringe

su expansión térmica (Shi et al., 2006). Cabe destacar que, a diferencia de la cara superior donde el láser irradia, en la cara inferior no se genera deformación plástica. Todo este proceso se resume en la Figura 2.1.

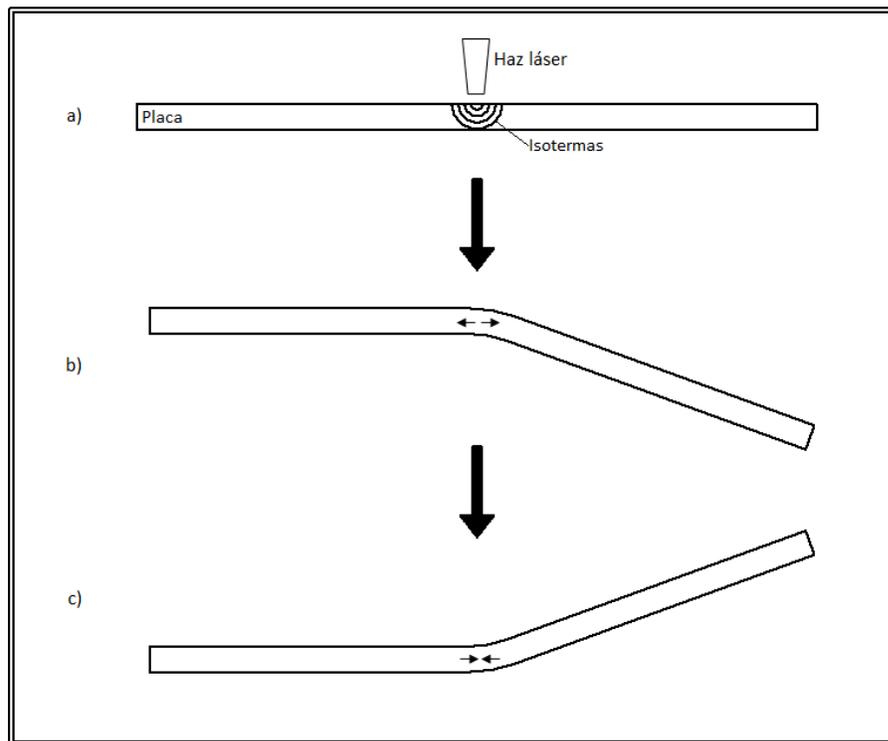


Figura 2.1. Esquema del TGM. a) El haz láser produce un gradiente térmico dominante en la cara irradiada. b) El cambio de temperatura a lo largo del espesor genera una expansión térmica. c) Los alrededores de la zona irradiada restringen la expansión térmica y se producen tensiones compresivas que doblan el material en la dirección ilustrada.

2.1.2 Mecanismo de pandeo (BM)

A diferencia del TGM, este mecanismo se produce comúnmente en casos donde el diámetro del haz láser es mayor al espesor del material. Como se muestra en la Figura 2.2, el gradiente de temperatura en el espesor de la placa es muy bajo y de esta forma la expansión térmica es prácticamente uniforme. Esta deformación, al ser restringida por sus alrededores, genera tensiones de compresión, pero debido a la uniformidad de esta el material se dobla por un efecto de pandeo, lo que se traduce en una incertidumbre de la dirección del doblado (Vollertsen et al., 1995).

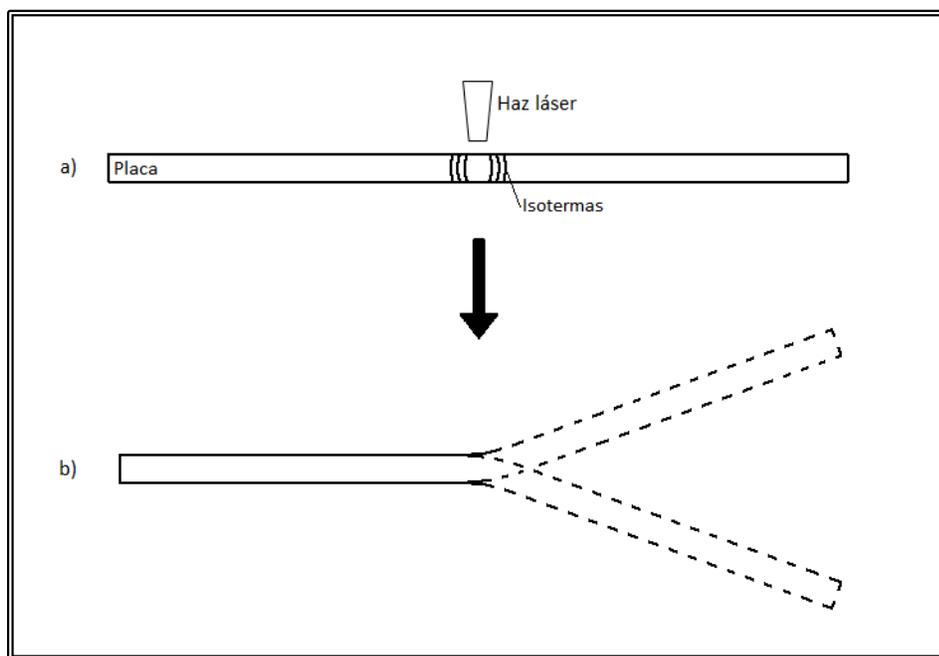


Figura 2.2. Esquema del BM. a) El gradiente térmico generado por el láser a lo largo del espesor es casi nulo. b) Debido a este tipo de gradiente, no hay certeza de la dirección del conformado.

2.1.3 Mecanismo de perturbación (UM)

En este mecanismo los parámetros del proceso son similares a los del BM, pero el pandeo se previene debido a la geometría del material y a su alto momento de inercia.

En este proceso el material se comprime en el área de escaneo por la misma restricción de expansión térmica que los otros mecanismos mencionados anteriormente. De esta forma la placa, además de comprimirse longitudinalmente, también aumenta su espesor en la zona de irradiación (Shi et al., 2012) como se muestra en la Figura 2.3. Por otro lado, la placa se dobla hacia la dirección del haz láser porque, de alguna manera, las tensiones compresivas siguen siendo mayores en la superficie irradiada, lo que hace que este proceso sea más predecible que el BM.

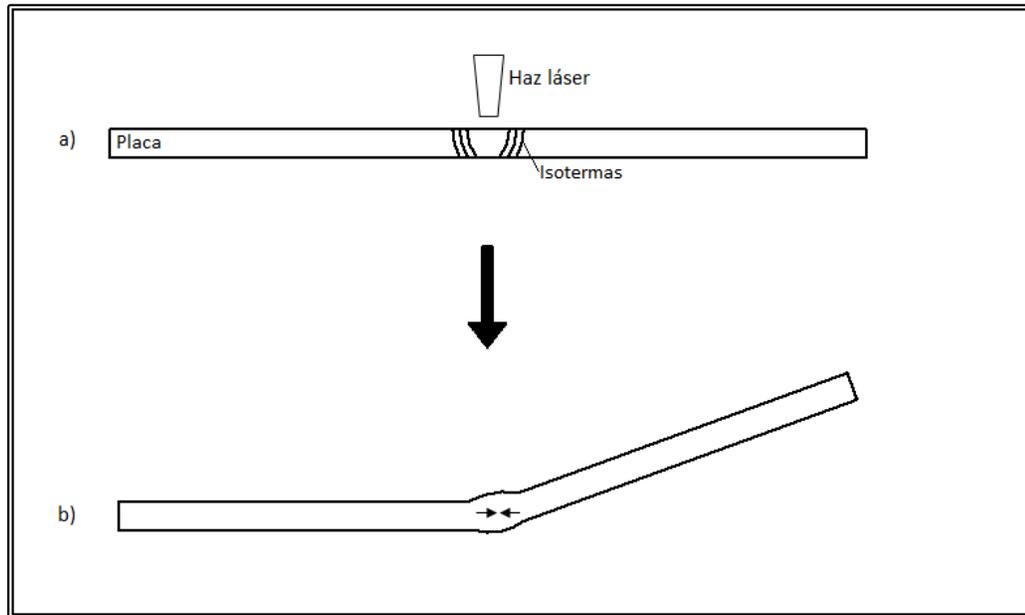


Figura 2.3. Esquema del UM. a) El gradiente térmico no es tan pequeño como en el caso del BM. b) El material se acorta en la dirección mostrada, pero aumenta su espesor en la zona irradiada.

2.1.4 Mecanismo de acoplamiento (CM)

Este mecanismo es la combinación del TGM y del UM. En este caso, a diferencia del TGM, el gradiente de temperatura a lo largo del espesor produce deformación plástica en ambas caras, pero la diferencia entre estas deformaciones es mucho mayor que las reportadas en el UM (Shi et al., 2005).

De esta forma, el material se comprime longitudinalmente, lo que permite un ensanchamiento del espesor en la zona irradiada (al igual que el UM) y además, como en

el TGM, el ángulo de conformado es producto del gradiente térmico en el espesor (Figura 2.4).

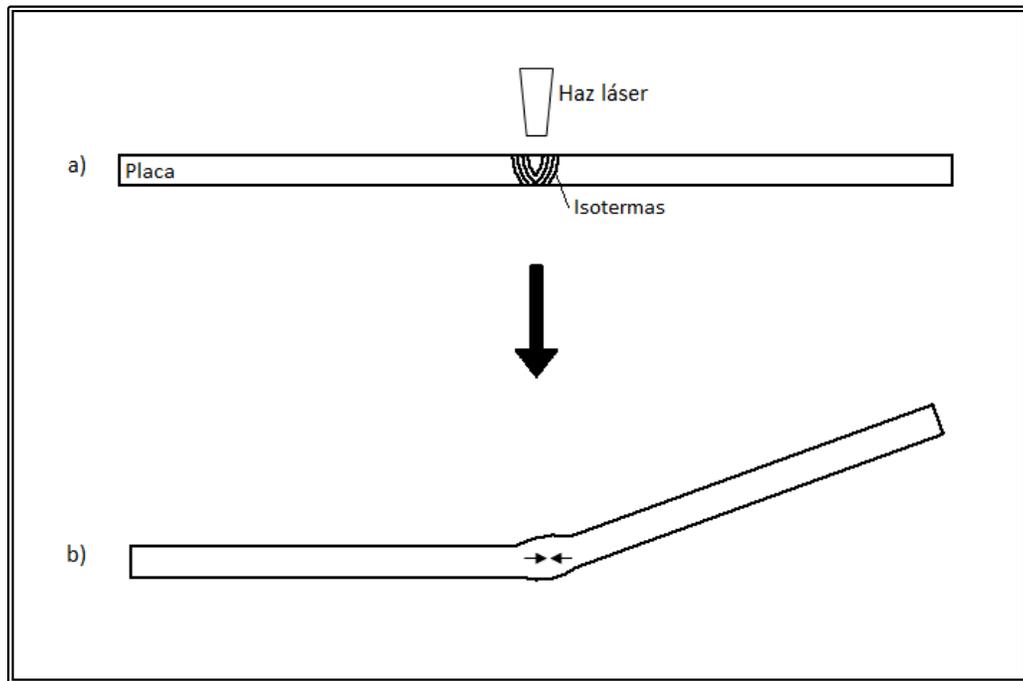


Figura 2.4. Esquema del CM. a) La distribución del gradiente térmico permite que haya deformación plástica en las caras inferior y superior. b) El material se dobla de forma similar al TGM y se acorta como el UM.

2.2 Antecedentes del conformado láser

A mediados de la década de los ochenta comienzan los primeros trabajos e investigaciones relacionados con el conformado láser, pero básicamente eran procedimientos experimentales. Luego, en la década de los noventa se empiezan a investigar modelos analíticos para poder predecir el comportamiento del TGM y también comienzan los

estudios del conformado lineal con el Método de Elementos Finitos. Durante esta época Geiger y Vollertsen (1993) describen por primera vez los mecanismos de gradiente térmico (TGM), de pandeo (BM) y de perturbación (UM). Alberti et al. (1994) usaron el Método de Elementos Finitos (MEF) para el TGM con el objetivo de calcular el campo de temperaturas involucrado en el conformado y así obtener datos para un análisis mecánico.

Un poco antes del año 2000 se inicia algunos estudios relacionados con el modelamiento del conformado para múltiples escaneos y para caminos no lineales. Finalmente, unos años más tarde hay un enfoque destinado a buscar modelos empíricos para explicar el doblado con láser. En la Figura 2.5 se muestra un resumen temporal del conformado láser.

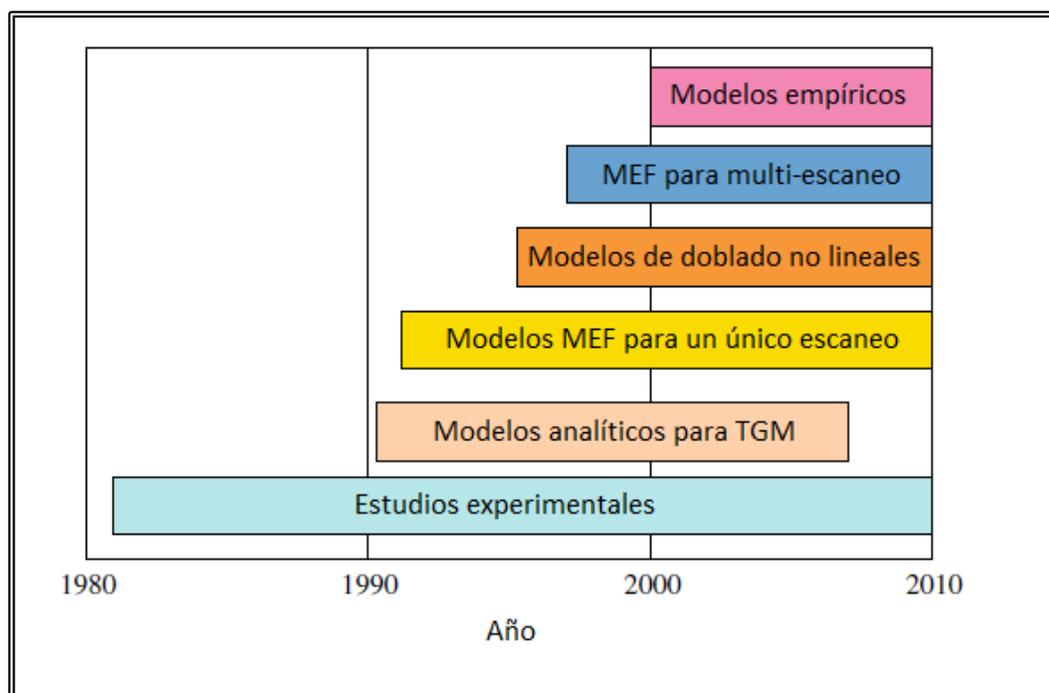


Figura 2.5. Desarrollo de los modelos del conformado láser. (Shen y Vollertsen, 2009)

A continuación se presentarán algunos avances importantes después de la década de los noventa. Hennige (2000) estudió la variación del ángulo de doblado en el cambio de geometría en la placa usando caminos rectos en placas rectangulares y caminos curvos en placas de geometría circular. Los resultados muestran que hay una reducción del ángulo en los casos circulares en comparación al caso recto. Cheng y Lin (2000) determinaron la temperatura de una placa finita con una fuente de calor con una distribución Gaussiana con un escaneo recto mediante la implementación de un modelo analítico de tres dimensiones. Al año siguiente, Cheng y Lin (2001) determinaron otro modelo analítico capaz de predecir el ángulo de doblado. En dicho modelo se considera el ángulo generado en la etapa de calentamiento del material y el ángulo de la etapa de enfriamiento. Además se incluyó la dependencia de la temperatura en algunos parámetros del material, tales como el coeficiente de expansión térmica, el módulo de elasticidad y la tensión de fluencia. Los resultados obtenidos fueron más precisos que las investigaciones realizadas en los años anteriores. En el mismo año, Bao y Yao (2001) estudiaron la variación del ángulo de doblado que se generaba a medida que el haz pasaba por un camino recto en la placa con TGM. Este efecto de borde hacía que, en el extremo donde se terminaba el escaneo, la placa se curvara hacia la fuente del láser.

Tiempo después, Liu y Yao (2004) propusieron un método para obtener superficies en 3D con el uso del conformado láser mediante una geometría diferencial y optimización. Cheng y Yao (2004) desarrollaron una idea similar pero usando MEF. Ambos métodos se basaron en aplanar una superficie curva deseada y estudiar los campos de deformaciones y de tensiones que se originan en esta configuración plana, para luego relacionar dichos

campos con los generados por el conformado láser. Los errores fueron muy pequeños, por lo que los dos métodos lograron su objetivo.

Shi et al. (2005) proponen seis estrategias de escaneo para reducir el efecto de borde dejando áreas del camino libres de acción. La diferencia entre los tamaños de dichas áreas distinguía a cada caso. Las simulaciones hechas con MEF mostraron que estas estrategias lograban disminuir el efecto de borde en el conformado láser.

Shen et al. (2010) propusieron reducir el efecto de borde con una variación escalonada de la velocidad del láser. La aceleración, desaceleración y su combinación lograron reducir el efecto de borde con más precisión.

Venkadeshwaran et al. (2010) estudiaron el conformado de un camino curvo simple en placas circulares mediante un análisis termo-mecánico usando un modelo clásico de elasto-plasticidad con el Método de Elementos Finitos. El estudio estuvo destinado a reducir la ondulación que se genera en este tipo de conformado debido a la deformación vertical a lo largo del recorrido del láser. Para llevar a cabo este objetivo, se propusieron distintas configuraciones del camino recorrido por el haz láser. Específicamente, se dividen algunas secciones discretizadas en la placa circular de tal forma de reducir el efecto antes mencionado.

Gautam et al. (2015) estudió el comportamiento de la absorción en placas de acero de bajo carbono al agregarles una capa de cemento y cal. Los resultados obtenidos determinaron que el coeficiente de absorción del material aumentaba al usar la capa de cemento.

Algunas de las investigaciones planteadas sirvieron como base para la elección de instrumentos y materiales explicados con mayor detalle en el Capítulo 3 y para las simulaciones numéricas descritas en el Capítulo 4.

2.3 Antecedentes de la visco-plasticidad en el acero

Los modelos constitutivos visco-plásticos, a diferencia de la elasto-plasticidad, incorporan la relevancia que tiene la tasa de deformación del material en el proceso que se está estudiando. En el caso del acero, la influencia de la tasa de deformación es importante cuando existen altas temperaturas. En esta sección se describirán algunos modelos visco-plásticos propuestos por algunos autores y que fueron importantes para poder determinar el modelo final que se usó en esta investigación.

Partiendo cronológicamente, Anand (1982) estudió el efecto que tiene la tasa de deformación en metales que trabajan a altas temperaturas. A partir de esto, propuso el siguiente modelo constitutivo de visco-plasticidad:

$$\dot{\mathbf{e}}_p = \sqrt{\frac{3}{2}} \Lambda \left(\frac{\sigma}{\xi} \right)^m \mathbf{v}, \quad \sigma < \xi \quad (2.1)$$

Donde $\dot{\mathbf{e}}_p$ es el tensor tasa de deformación del material, σ es la tensión de Von Mises Λ es un factor dependiente de la temperatura, ξ es la variable interna que caracteriza el endurecimiento del material, \mathbf{v} es la normalización del vector $\mathbf{s} = dev(\boldsymbol{\sigma})$ y $\boldsymbol{\sigma}$ es el tensor de tensiones.

Luego, Kozlowski et al. (1992) compararon cuatro modelos visco-plásticos a altas temperaturas para el acero con los resultados de un ensayo de tracción. La relación

constitutiva que se adaptaba de mejor forma a la realidad de este ensayo se describe a continuación:

$$\dot{\epsilon}_p = C \exp\left(-\frac{Q}{T}\right) [\sigma - a_\epsilon e_p^{n_\epsilon}]^n \quad (2.2)$$

donde el término $a_\epsilon e_p^{n_\epsilon}$ es la fuerza generalizada en el problema, T es la temperatura, C es una constante, Q es el parámetro de temperatura de Arrhenius y n es un parámetro del material que depende de la temperatura. Otro punto importante que tuvo este trabajo fue que se entregaron las ecuaciones de los parámetros del material que dependen de la temperatura y de la composición de carbono del acero.

Más tarde, Huespe et al. (2000) realizó una comparación entre el modelo de Kozlowski y el de Anand apoyándose en simulaciones numéricas usando el Método de Elementos Finitos. Finalmente, los resultados determinaron que el modelo de Kozlowski era el más adecuado debido a que se aproximaba mucho más al comportamiento real de las variables involucradas.

En el mismo año, Li y Yao (2000) estudiaron el efecto de la tasa de deformación en el proceso del conformado láser donde propusieron el siguiente modelo constitutivo:

$$\dot{\epsilon}_p = K \left(\sinh\left(\frac{V\sigma}{RT}\right) \right)^{1/m} \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (2.3)$$

donde K es una constante, Q es la energía de activación y V es otra constante con unidades de volumen. Si $\sigma \ll RT/V$, entonces la ecuación se puede simplificar a:

$$\sigma = C' \dot{\epsilon}_p^m \exp\left(\frac{mQ}{RT}\right) = C \dot{\epsilon}_p^m \quad (2.4)$$

siendo m determinado por la siguiente ecuación:

$$m = \frac{(T-873)}{4330-895 \sinh(C)} + 0.034 \quad (2.5)$$

Los resultados demostraron que el efecto de la tasa de deformación para los casos estudiados es relevante en el proceso de doblado con láser ya que el error disminuyó de forma significativa al considerarla.

Celentano et al. (2011) estudiaron el efecto de la tasa de deformación en el proceso de trefilación analizando datos entregados por experimentos realizados en laboratorio y los resultados de simulaciones usando el siguiente un modelo constitutivo de viscoplasticidad. La conclusión de esta investigación determinó que el modelo propuesto pudo representar el proceso de trefilado con resultados bastante cercanos a los experimentales. Todos los trabajos y modelos descritos anteriormente sirvieron de apoyo para poder implementar el modelo propuesto más adelante en el Capítulo 4.

3 DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1 Montaje experimental

Todo el desarrollo hecho para realizar todos los ensayos de conformado láser se llevaron a cabo en el Laboratorio de Aplicaciones Tecnológicas e Industriales del Láser (LATIL-UC), ubicado en el Departamento de Ingeniería Mecánica y Metalúrgica de la Pontificia Universidad Católica de Chile.

En la Figura 3.1 se puede apreciar tanto el montaje experimental como todos los componentes involucrados en el proceso de conformado.

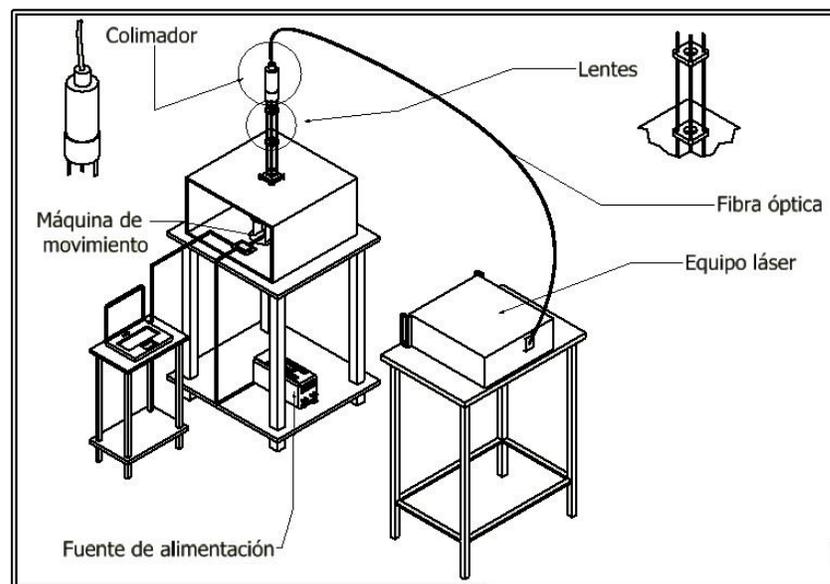


Figura 3.1. Montaje experimental y componentes (imagen extraída de la tesis “Análisis experimental y numérico del proceso de doblado de chapas mediante la aplicación de un haz láser con patrones circulares de escaneo”, Álvaro Navarrete).

3.1.1 Instrumentación

Láser

El láser utilizado es de fibra óptica dopado con iterbio, fabricado por la empresa *IPG Photonics* (Figura 3.2). La potencia nominal máxima entregada es de 200 W. La longitud de onda de la emisión tiene un rango espectral cercano al infrarrojo (1060-1080 nm.). Este equipo posee un sistema digital propio, dentro del cual se pueden determinar los parámetros necesarios del haz láser, entre los que destacan la potencia a entregar y la forma en que se entrega tal potencia (de manera continua, discreta o a pulsos). Físicamente está compuesto por el equipo láser, la fibra óptica y el colimador, desde donde sale la radiación hacia el exterior.



Figura 3.2. Dispositivo que suministra el haz láser.

Lentes

Las dos lentes utilizadas, de la empresa *ThorLabs* (Figura 3.3), son montadas en los rieles a una determinada distancia relativa de acuerdo al diámetro del haz láser que se desea obtener. En el caso de esta investigación, las lentes se posicionan a una distancia tal que el diámetro de entrada de 6,00 mm se concentre hasta un diámetro de 1,2 mm después de salir del último lente. Es necesario mantenerlas protegidas del contacto con las partículas del medio ambiente, además de evitar impactos sobre ésta, lo que implica un deterioro y su posible inutilización, para lo cual se les debe efectuar una constante limpieza, la que se realiza mediante el uso de papel *tissue* de la empresa *ThorLabs*, el que se humedece con gotas de acetona, eliminando las impurezas existentes en la superficie.



Figura 3.3. Lentes que permiten la focalización del láser.

Dispositivo de movimiento lineal

Para el doblado de placas mediante un recorrido lineal a lo largo de éstas, se utiliza una mesa CNC desarrollada por *Newmark Systems, Inc.*, que posee dos ejes coordenados (eje A y B) sobre los que se mueve la placa a doblar que se encuentra dentro de un contenedor de seguridad (ver Figura 3.4). La velocidad y la distancia recorrida son controladas por el software *GalilTools*. Para cumplir con los objetivos de los experimentos solo se usa el movimiento de un eje para realizar el conformado.

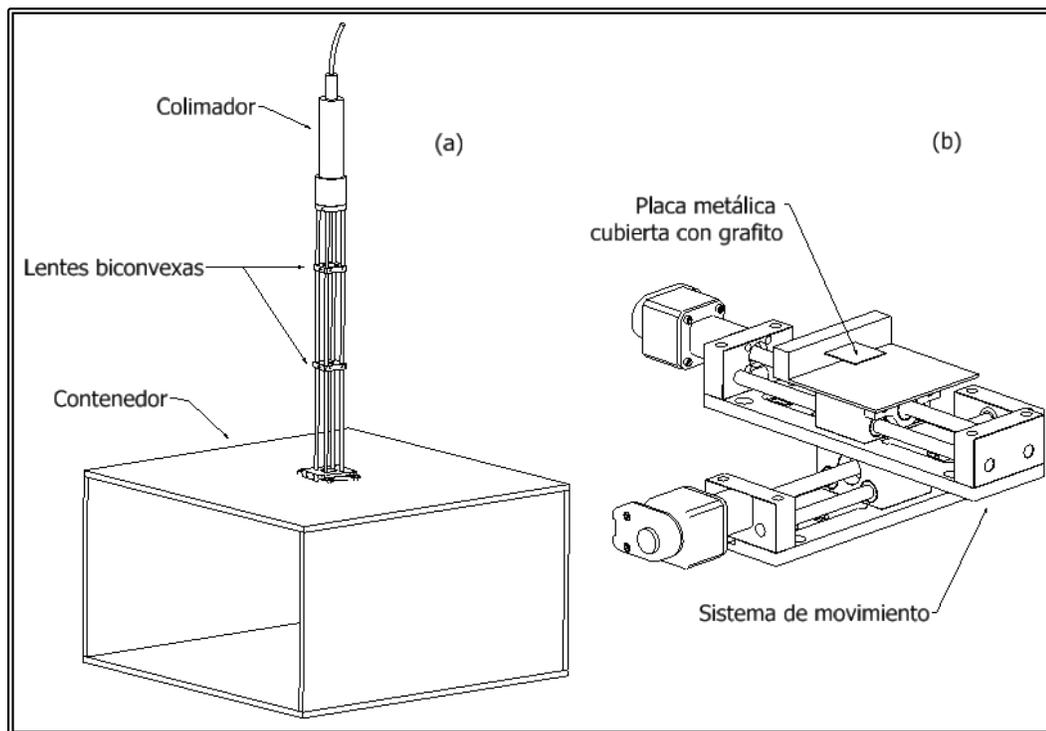


Figura 3.4. a) Contenedor de seguridad b) Sistema de dos ejes lineales (imagen extraída de la tesis “Efecto del ángulo de incidencia en el coeficiente de absorción y metodología para la fabricación de superficies craneales mediante doblado láser”, Felipe Cook).

Potenciómetro

Un aspecto fundamental a determinar es la potencia real del haz láser que llega a la placa que se dobla. La principal pérdida de energía se genera cuando el haz láser hace paso a través de la lente. Para medir tal efecto se ocupa un potenciómetro (ver Figura 3.5), que es utilizado para medir la potencia entregada sin el uso de la lente y compararlo con la entregada una vez que la lente está montada. Dicho potenciómetro, creado por la empresa *Macken Instruments, Inc*, consta de un receptor para el haz láser y de un medidor digital de la potencia. A partir de los valores entregados por el potenciómetro, se calcula la pérdida porcentual de potencia. Es importante remarcar que tal procedimiento se realiza tanto al comienzo como al final de la jornada de experimentación, ya que por el efecto del contacto con el ambiente la lente se ensucia, aumentando la pérdida de potencia en comparación a los valores obtenidos en el principio de cada jornada.

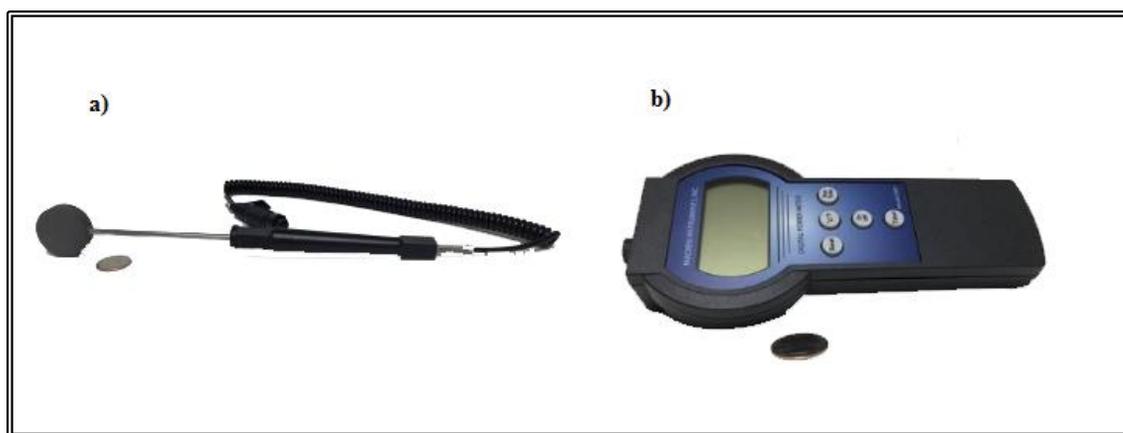


Figura 3.5. a) Receptor del haz láser b) Medidor digital.

Cubierta de grafito

La placa a ser doblada por la acción de la radiación láser absorbe parte de su energía, mientras que la restante es reflejada y devuelta hacia el ambiente, lo cual ciertamente es un efecto indeseado, ya que no se está utilizando toda la energía entregada en el objetivo del doblado. Para aminorar tal efecto, antes de poner la placa bajo la influencia del haz láser, se cubre con grafito en *spray* sobre la superficie que entra en contacto directo con la radiación. Tal acción permite que la absorción (caracterizada por el coeficiente de absorción) aumente. El *spray* utilizado es de marca *Tool Crib* y fabricado por la empresa *Seymour* (Figura 3.6).



Figura 3.6. Grafito en *spray*.

3.1.2 Material

El material para hacer las distintas configuraciones de conformado láser es acero AISI 304 obtenido de la empresa *Maquimetal* y su composición química se muestra en la Tabla 3.1 (Davis, 1994). Este material viene en planchas de distintos espesores, pero para los experimentos se compraron planchas de 0,6 mm de espesor. Además cabe mencionar que cada plancha viene esmerilada en una de sus caras, por lo que se optó que el haz láser entrara por la cara no esmerilada en caso de que este proceso haya afectado algunas propiedades del material y así mantener la objetividad de lo investigado.

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.

Debido a las altas temperaturas a las que se llega en el conformado, es importante trabajar con las propiedades del material en función de la temperatura. En este trabajo se usaron las propiedades obtenidas por Cook et al. (2015) al realizar ensayos de tracción a distintas temperaturas para el acero AISI 304 (Figura 3.7).

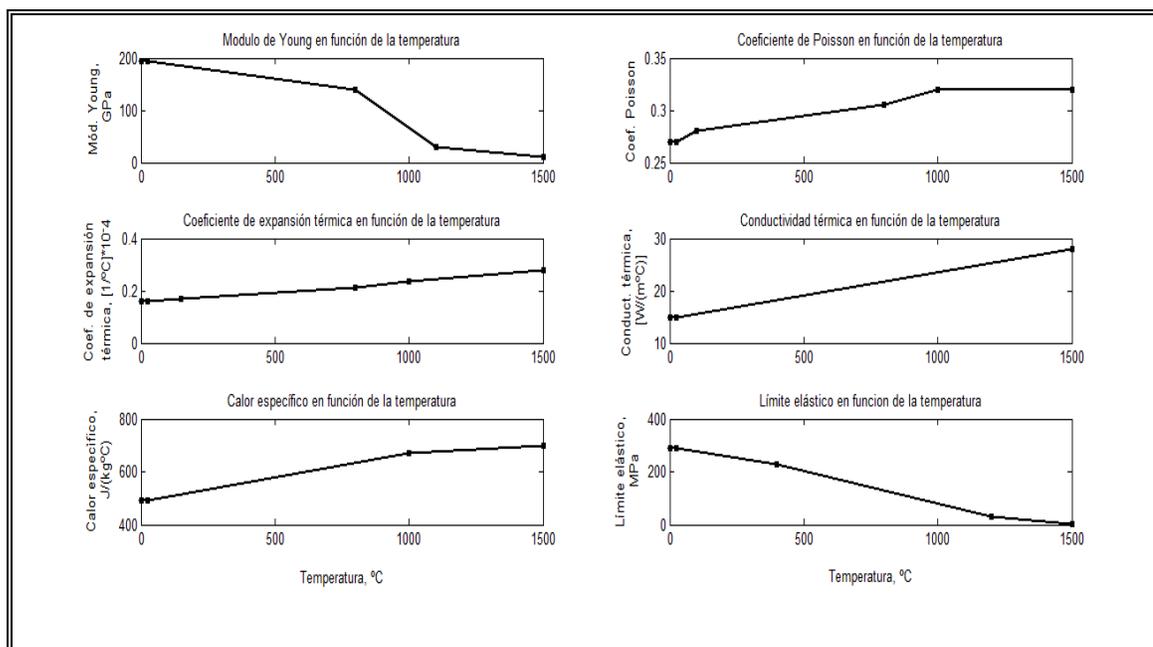


Figura 3.7. Propiedades termomecánicas del acero AISI 304 en función de la temperatura.

Para darle la forma inicial deseada a las placas con medidas específicas, las planchas se llevaron a cortar por láser a la empresa *Lemaco*, proporcionando los planos de la placa en formato CAD. Para el diseño de los planos se usó el programa *Autodesk Inventor* y se exporta el formato del archivo a IGES a petición de la empresa.

Se entiende que las características del material se pueden ver afectadas por el corte láser, pero, para efecto de los experimentos, las zonas donde esto ocurre (las orillas) no tienen mayor relevancia en comparación a todo el camino que el haz láser recorre a través de la placa. Además, cualquier otro tipo de corte podría alterar dichas propiedades de alguna

forma por lo que se puede considerar que este efecto es despreciable frente a toda la zona donde pasa el haz láser.

3.2 Geometría de las placas y restricciones del montaje

Como se mencionó anteriormente, las placas usadas para los experimentos fueron obtenidas mediante corte láser. En la Figura 3.8 se muestra el camino recorrido por el haz láser en las placas con dimensiones de 60 x 75 mm y 0,6 mm de espesor, donde el láser irradia a 41 mm de la zona de sujeción de la probeta. Estas medidas fueron elegidas de tal forma que no excedieran las dimensiones de los artículos involucrados en el proceso de conformado.

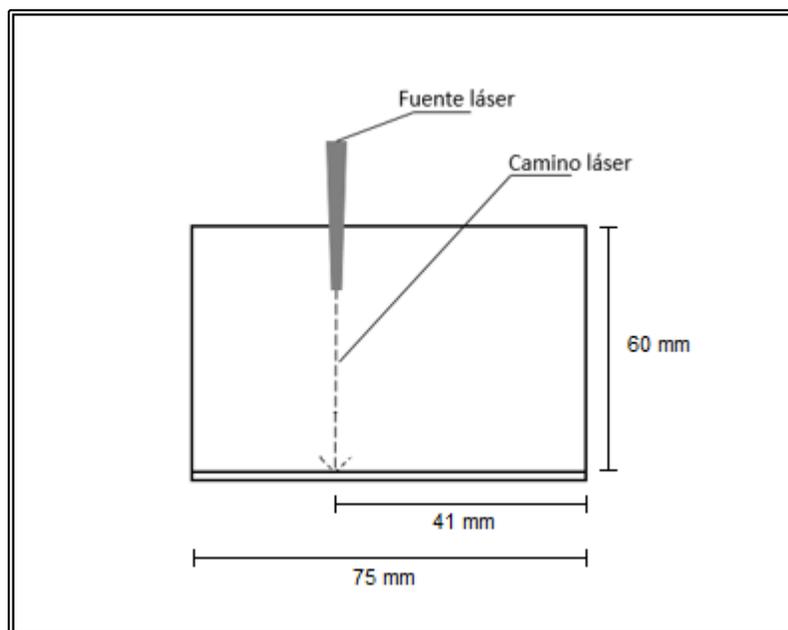


Figura 3.8. Esquema de la placa siendo irradiada por el láser.

3.3 Parámetros del conformado

Los principales factores de entrada que se usaron en los experimentos de conformado fueron la velocidad de pasada del haz láser y la potencia suministrada por él. Las distintas configuraciones entre los dos factores proporcionan distintos valores de ángulos de doblado en cada placa. Para efectos de esta investigación, en cada configuración los valores de ambos fueron constantes a lo largo del camino que el haz recorre.

3.3.1 Velocidad de pasada

El primero de los parámetros de entrada en el proceso de conformado láser es la velocidad a la que el haz láser recorre el material en forma de línea recta. Este parámetro hace variar la cantidad de energía que recibe la placa en un lapso de tiempo, ya que para una misma distancia mientras mayor sea la velocidad a una misma potencia del láser la cantidad de energía recibida por el material es menor, lo que se traduce en un menor ángulo de doblado.

El dispositivo de movimiento lineal mencionado en la sección anterior cuenta con un sistema de medición propio denominado *count*, que representa las unidades de las coordenadas espaciales y, por lo tanto, también representa a las unidades de la velocidad si se dividen por un lapso de tiempo en moverse de una coordenada a otra. La relación lineal entre milímetros y *counts* es de 1:4166,66, por lo tanto 15 mm equivalen a 62500 *counts*.

Los valores de entrada (en *counts*) para poder manipular el dispositivo se ingresan al programa *GalilTools*, siguiendo el orden que se describe a continuación: en la primera línea de códigos del programa se escribe el comando “PR *coordenada_eje_1* *coordenada_eje_2*” para indicar la posición final del empotrado con la placa según los ejes coordenados intrínsecos que tiene el sistema de dos ejes; luego se escribe “SP *velocidad_eje_1* *velocidad_eje_2*” para indicar las velocidades a las que se desea llegar a esta posición; finalmente, para poder iniciar el movimiento del dispositivo se escribe “BG AB”.

3.3.2 Potencia suministrada

El dispositivo que proporciona el haz láser cuenta con una potencia nominal máxima de 200 W que puede ser regulada digitalmente en términos porcentuales para obtener la potencia deseada, es decir, si se requiere un haz a una potencia de 100 W se debe ingresar en el panel digital del equipo un porcentaje de 50%.

Como ya se ha mencionado, el láser debe pasar por dos lentes para enfocarlo y lograr un diámetro determinado (1,2 mm), por lo que es importante conocer la pérdida de energía que hay al pasar por cada lente. Es por esto que se procedió a tratar de obtener un factor de pérdida de un lente para conocer la potencia que efectivamente le llega a la placa. Para lograr este objetivo, se hicieron pruebas donde el láser llegaba a un potenciómetro ubicado en la posición de las placas. Específicamente, el láser recorre 15 cm de la fuente hasta el primer lente, luego 20 cm hasta el segundo lente (para lograr el diámetro deseado) y

finalmente impacta al potenciómetro a 35 cm desde dicho lente. La potencia, a un valor determinado, se midió con y sin lente para obtener la pérdida de energía y se calculó el factor de pérdida a distintas potencias. En la Figura 3.9 se muestra un gráfico de este factor a distintas potencias. Como la variación entre estos valores no fue significativa se asumió un factor de pérdida promedio de 9,92% por lente para todos los experimentos de conformado.

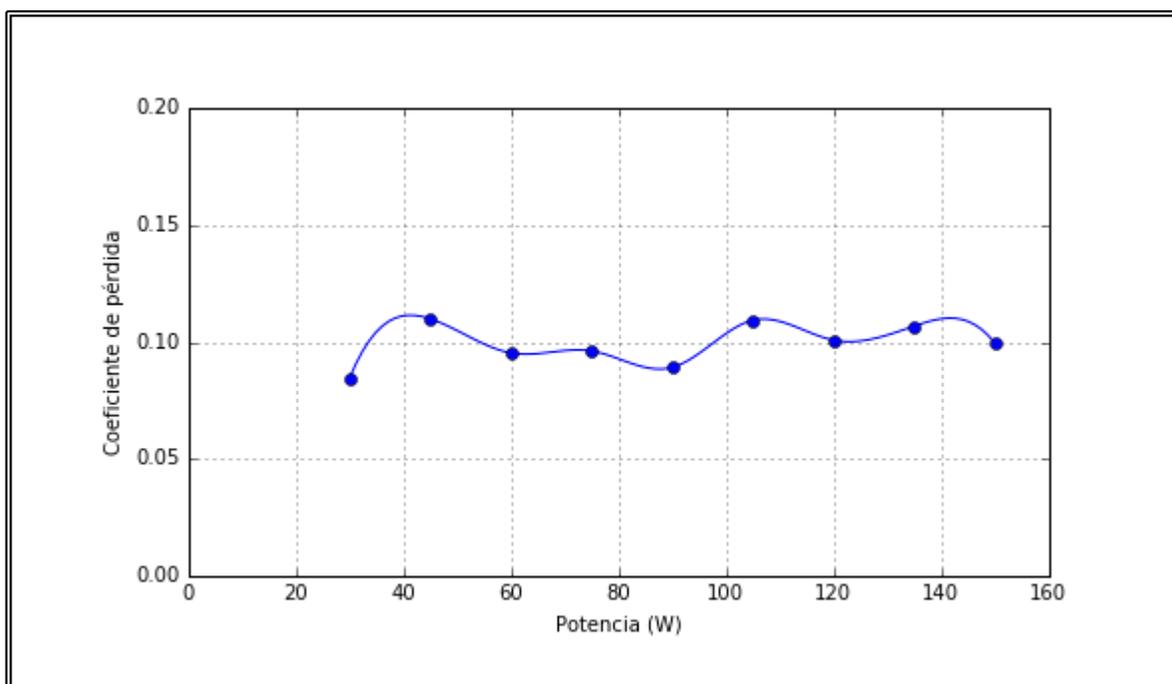


Figura 3.9. Gráfico del factor de pérdida por lente a distintas potencias suministradas por el dispositivo láser.

Debido al contacto que hay entre el lente y el medioambiente, el aumento en el valor del factor de pérdida a causa de las partículas en el aire acumuladas en cada lente no es trivial.

Es por esto que antes de cada jornada experimental los lentes se limpian y se realiza la misma rutina para calcular el factor de pérdida. Cabe destacar que durante todos los experimentos realizados el valor de este factor se mantuvo muy cercano a los primeros resultados obtenidos.

Otra pérdida de energía que es importante considerar es la que se genera cuando el haz láser incide en la placa que se pretende doblar. Siempre habrá parte de la energía que se refleja ya que todo material tiene un coeficiente de absorción.

Para aumentar el coeficiente de absorción de cada placa, se usó un *spray* de grafito para crear una capa en la superficie de la placa que será irradiada según un método propuesto por Carey (2007). Según Cook et al. (2015), al agregar la capa de grafito en las placas el coeficiente de absorción cambia de 0,40 a 0,64, siendo este último el valor que se usó para todo el procedimiento experimental.

Un resumen de las pérdidas energéticas desde que se proporciona el láser del dispositivo hasta que llega a la placa que se quiere doblar se muestra en la Figura 3.10.

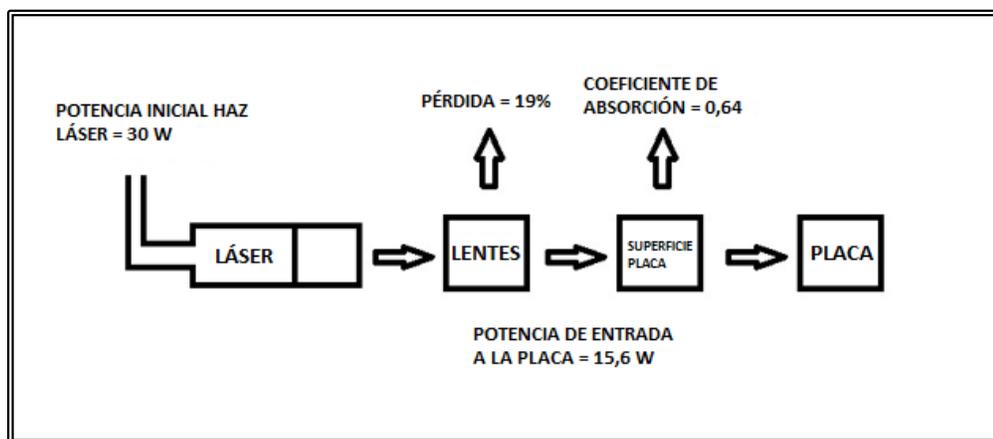


Figura 3.10. Esquema de las pérdidas de potencia del láser desde la fuente hasta la placa.

3.4 Resultados experimentales

Los experimentos realizados para obtener una base de datos que sea representativa constaron en doblar con láser las placas de acero mencionadas en el apartado 3.2. De esta forma, se irradiaron las placas con 13 configuraciones distintas variando la velocidad de pasada y la potencia de la máquina láser. Dichas configuraciones fueron de 5, 10, 15 y 20 mm/s para la velocidad, mientras que para la potencia de entrada a las placas fueron de 30, 60, 90 y 120 W (la potencia inicial del láser fue mayor para cada caso de tal forma que la potencia de entrada a la placa fueran las mencionadas).

Para cada combinación de velocidad y potencia se realizaron siete experimentos para tener un espectro de datos significativo. En la Tabla 3.2 se muestra el promedio de los resultados experimentales para cada configuración con su respectiva desviación estándar. En el Anexo A está el detalle de cada experimento.

Tabla 3.2. Resultados experimentales del ángulo de doblado (en °).

		Velocidad (mm/s)			
		5	10	15	20
Potencia (W)	30	0,97+/-0,10	0,47+/-0,14	-	-
	60	2,96+/-0,36	1,50+/-0,20	1,05+/-0,11	-
	90	4,16+/-0,49	2,68+/-0,16	1,73+/-0,11	1,67+/-0,08
	120	4,28+/-0,60	3,23+/-0,48	2,48+/-0,29	1,96+/-0,19

Como se puede apreciar, a medida que la velocidad aumenta el ángulo decrece, mientras que a mayor potencia el ángulo va aumentando, lo que es coherente a lo planteado por hipótesis y a lo reportado en la bibliografía.

Para los casos de 15 y 20 mm/s a 30 W y de 20 mm/s a 60 W el ángulo medido es demasiado bajo, por lo que son valores que no se reportarán debido a la poca precisión en su medición.

Por otro lado, hay que destacar que en el caso particular de 120 W y 5 mm/s se realizaron 12 experimentos, donde 5 de ellos daban como resultado ángulos negativos, es decir, se deformaban en dirección contraria a la irradiación del láser. Estos experimentos no se consideraron para el cálculo del ángulo mostrado en la Tabla 3.2, ya que no se mostraba una tendencia clara entre ellos como para incluirlos dentro del espectro de datos. Sin embargo, hay que recalcar que la posible explicación de esto es que esta configuración puede estar en el límite del mecanismo de gradiente térmico (TGM) y el mecanismo de pandeo (BM) descritos en la Sección 2.1, información que podría ser útil para futuras líneas de investigación.

3.5 Conclusiones

En este capítulo se describió el montaje y procedimiento experimental para obtener información sobre los ángulos de doblado generados por el proceso de conformado láser al variar la velocidad de pasada y la potencia del mismo. También se destacó la

importancia que tienen las pérdidas de energía durante el proceso, ya que son significativas y se pueden evitar con el uso de coeficientes de pérdida energética.

Los resultados experimentales obtenidos serán la base para un análisis de las simulaciones que se verán con mayor detalle en el Capítulo 5.

4 MODELAMIENTOS NUMÉRICOS Y RESULTADOS

Con el objetivo de poder explicar el proceso del conformado láser y la evolución de las variables involucradas en él, se realizaron simulaciones termo-mecánicas con el Método de Elementos Finitos.

A diferencia del modelo elasto-plástico clásico usado y reportado en la gran mayoría de la literatura referente al doblado con láser, se propuso un modelo visco-plástico del acero en cuestión para poder apreciar la influencia de la tasa de deformación en el proceso debido a las altas temperaturas a las que se llega.

Específicamente, en este trabajo se analizó los resultados de un modelo elasto-plástico y dos modelos visco-plásticos. El primer modelo de visco-plasticidad es el reportado por Celentano et al. (2011) con la función del exponente m propuesta por Kozłowski et al. (1992), mientras que el segundo es un modelo propuesto a base de los resultados entregados por el primero.

La principal razón de cambiar de modelos es que el error entre los resultados obtenidos con el modelamiento elasto-plástico y los experimentales aumentan de manera significativa al aumentar la potencia del láser y al disminuir la velocidad del escaneo.

Como la elasto-plasticidad es un caso límite de la visco-plasticidad (la tasa de deformación se considera prácticamente nula), se optó por estudiar el comportamiento del proceso con este último modelo capaz de abarcar este fenómeno.

4.1 Aspectos técnicos de las simulaciones

El proceso de conformado láser es modelado mediante un análisis cuasi-estático, donde en cada instante de tiempo se resuelve la ecuación de equilibrio estático. El haz láser es modelado como una fuente de calor con una distribución del flujo de tipo Gaussiana, la cual se mueve a lo largo del camino lineal sobre las placas. Además, se definen como parámetros de entrada la potencia y la velocidad con que se mueve la fuente láser.

En el proceso de simulación bajo el método de elementos finitos en 3D, usando el *software Vulcan*, se ocupan elementos hexaédricos con ocho nodos para el mallado del volumen correspondiente a la placa, mientras que tanto en la superficie superior como en la inferior se agregan elementos cuadriláteros de superficie con cuatro nodos, de manera de poder representar la interacción entre el material y el ambiente. La cantidad de nodos y elementos que tiene un determinado problema va relacionado de manera directa con el tiempo de cálculo, por lo que es importante generar un equilibrio entre estos dos aspectos, de tal manera de tener una cantidad no tan elevada de elementos sin afectar la calidad de los resultados y que el tiempo de cálculo sea el menor posible. Es por esto que en la zona afectada térmicamente, que en este caso corresponde al área por donde pasa el haz láser, debe existir un mayor refinamiento de la malla, con una mayor cantidad de elementos de menor volumen, de tal forma de captar de buena manera los cambios relevantes en las variables, mientras que en las zonas alejadas de la influencia de la fuente de calor, no hay cambios tan importantes de las variables, por lo que el mallado es más grueso, tal como se muestra en la Figura 4.1.

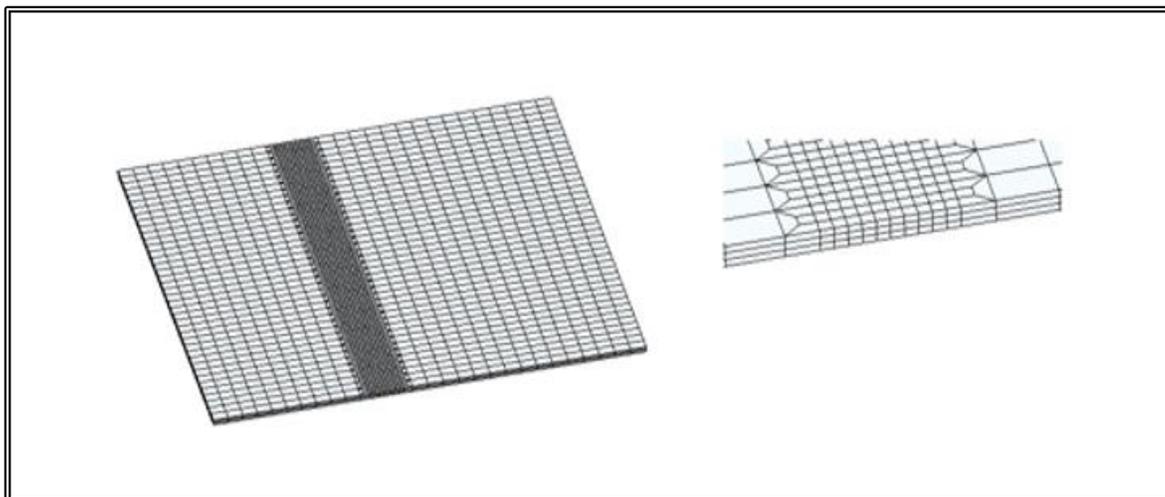


Figura 4.1. Malla utilizada para las simulaciones.

4.2 Modelamiento termo-mecánico

Para el modelamiento termo-mecánico se consideró la convección-radiación de la fuente láser, la interacción con el medioambiente, la conducción térmica presente en la placa de acero, las restricciones geométricas de esta y la plasticidad del material a grandes deformaciones.

Específicamente existen cuatro ecuaciones que gobiernan lo mencionado anteriormente: una ecuación de continuidad, una ecuación de cantidad de movimiento, una ecuación referente al balance energético y una inecuación de disipación. Esta última, relacionada con la segunda ley de la termodinámica, se cumple mediante una correcta formulación de las relaciones constitutivas.

Las ecuaciones mencionadas y formuladas mediante la descripción Lagrangeana (Celentano, 2002) son:

$$\rho] = \rho_0 \quad (\mathbf{x}, t) \in \Omega \times [0, t_f], \quad (4.1)$$

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{0} \quad (\mathbf{x}, t) \in \Omega \times [0, t_f], \quad (4.2)$$

$$-\rho c \dot{T} - \nabla \cdot \mathbf{q} = 0 \quad (\mathbf{x}, t) \in \Omega \times [0, t_f], \quad (4.3)$$

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.

Todas las ecuaciones tienen que satisfacer las condiciones iniciales, condiciones de borde y las ecuaciones constitutivas tanto para el tensor de *Cauchy* $\boldsymbol{\sigma}$, como para el vector flujo de calor \mathbf{q} .

Finalmente, la expresión que determina el valor de \mathbf{q} es:

$$\mathbf{q} = -k \nabla T, \quad (4.4)$$

siendo k la conductividad térmica del material.

4.3 Modelo constitutivo elasto-plástico

Los modelos constitutivos son los que relacionan las tensiones con las deformaciones del material. De esta manera se eligen una serie de variables internas para poder apreciar su evolución en el modelo de plasticidad utilizado (Celentano, 2002). En el caso de la elasto-

plasticidad una de las variables escogidas fue el tensor de deformaciones plásticas de Almansi \mathbf{e}_p , el cual corresponde a la parte plástica del tensor de Almansi \mathbf{e} definido como:

$$\mathbf{e} = \frac{1}{2}(\mathbf{I} - \mathbf{F}^{-T} \cdot \mathbf{F}^{-1}) \quad (4.5)$$

donde \mathbf{F} corresponde al tensor gradiente del campo de desplazamiento, \mathbf{I} al tensor unidad y T a la operación traspuesta.

Otra variable elegida es la deformación plástica efectiva \bar{e}_p , la cual está relacionada a los efectos de endurecimiento de deformación isotrópica (Celentano, 2002a).

Las ecuaciones de evolución para tales variables plásticas están dadas por:

$$L_v(\mathbf{e}_p) = \dot{\lambda} \frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}}, \quad (4.6)$$

$$\dot{\bar{e}}_p = -\dot{\lambda} \frac{\partial F}{\partial C}, \quad (4.7)$$

donde $L_v(*)$ corresponde a la derivada temporal de Lie (independiente del marco de referencia), $\dot{\lambda}$ corresponde al parámetro plástico de consistencia de acuerdo a los conceptos clásicos de teoría de la plasticidad (Lubliner, 1990), C a la función de endurecimiento plástico isotrópico y F es la función de fluencia que gobierna el comportamiento plástico del sólido, de tal manera que no hay evolución plástica mientras $F < 0$. La función F escogida es la de Von Mises y viene dada por:

$$F = \sqrt{3J_2} - C_{Y_0} - C, \quad (4.8)$$

donde C_{Y_0} corresponde al límite de fluencia y J_2 es el segundo invariante del tensor desviador de tensiones .

De acuerdo a la Ley de Hooke, el tensor de tensiones de Cauchy puede ser expresado de la siguiente forma:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C} : (\mathbf{e} - \mathbf{e}_p - \mathbf{e}_{th}), \quad (4.9)$$

tal que \mathbf{C} es tensor constitutivo isótropo de elasticidad y \mathbf{e}_{th} es el tensor de deformaciones térmicas de Almansi definido como:

$$\mathbf{e}_{th} = \frac{1}{2} [1 - (1 - a_{th})^{2/3}] \mathbf{I}, \quad (4.10)$$

con $a_{th} = \alpha_{th}(T - T_0)$, siendo α_{th} el coeficiente de dilatación térmica y T_0 la temperatura en la configuración inicial.

4.3.1 Simulación y resultados con el modelo elasto-plástico

Para los tres modelos utilizados se hicieron simulaciones con los mismos casos que los resultados experimentales. Los resultados obtenidos con el modelo elasto-plástico, usando las ecuaciones descritas en la sección 4.3, se muestran en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Resultados simulación con el modelo elasto-plástico del ángulo de doblado (en °).

		Velocidad (mm/s)			
		5	10	15	20
Potencia (W)	30	0,93	0,55	-	-
	60	1,89	1,36	1,01	-
	90	2,09	1,83	1,73	1,65
	120	1,97	1,88	1,94	2,07

Nota: Los casos marcados con “-” son aquellos que no se calcularon debido a que sus respectivos ángulos experimentales eran muy cercanos a 0.

Es importante destacar que los resultados entregados por la simulación siguen la misma tendencia que los experimentales, donde el ángulo de doblado va aumentando a medida que la potencia crece y la velocidad disminuye.

Además, al comparar estos resultados con los experimentales se puede concluir que el modelamiento elasto-plástico es más eficiente a velocidades altas y a potencias bajas, ya que el error va aumentando a medida que la potencia aumenta y la velocidad disminuye. Es más, si se analizan todos los resultados dados por las simulaciones, se puede ver que en los casos que presentan errores bajos la temperatura no sobrepasa los 1400 °C, temperatura cercana al punto de fusión del material.

Todo lo mencionado anteriormente da indicio de que puede haber más variables involucradas en el problema y/o que el modelamiento elasto-plástico no sea el adecuado para representar el comportamiento general del conformado láser.

4.4 Viscosidad y visco-plasticidad

La viscosidad es una propiedad mecánica irreversible de la materia y está firmemente relacionada con el movimiento de los átomos y moléculas de los materiales (Kobayashi et al., 1996). La viscosidad en sólidos, así como en líquidos y gases, está definida como la división entre la tensión de corte y la tasa de deformación de corte o dicho de otra forma:

$$\sigma = \mu \dot{\epsilon} \quad (4.11)$$

donde σ es la tensión, μ es la viscosidad y $\dot{\epsilon}$ es la tasa de deformación del material.

Por otro lado, la visco-plasticidad es una teoría de la Mecánica del Continuo que describe procesos dependientes de la tasa de deformación inelástica en sólidos, es decir, que las deformaciones plásticas dependen del tiempo que se producen tensiones debido a una carga, tomando en cuenta las propiedades viscosas del material (Perzyna, 1996). En el caso de metales y aleaciones, la visco-plasticidad es el comportamiento macroscópico causado por el movimiento de las dislocaciones de grano con efectos de superposición de los deslizamientos inter-cristalinos.

La teoría de la visco-plasticidad se usa comúnmente cuando las temperaturas de los metales son altas (cuando superan el tercio de la temperatura de fusión), también para los cálculos de deformaciones permanentes, para investigaciones de estabilidad y problemas

dinámicos donde existen tasas de deformaciones altas. Es por esto que este tipo de modelación es atractiva para poder explicar el proceso del conformado láser que involucra todos estos problemas. Las siguientes secciones involucran simulaciones donde se usaron modelos visco-plásticos para poder explicar este proceso.

4.5 Primer modelo constitutivo visco-plástico

En este modelo, se incorpora la influencia de la tasa de deformación en el material. Al igual que en el modelo elasto-plástico, las variables escogidas fueron el tensor de deformaciones plásticas de Almansi y la deformación plástica efectiva. Las ecuaciones que marcan la diferencia entre estos dos modelos son:

$$L_v(\mathbf{e}_p) = \lambda \frac{\partial F}{\partial \sigma}, \quad \dot{\mathbf{e}}_p = -\lambda \frac{\partial F}{\partial C} \quad (4.12)$$

$$\lambda = \left[\frac{F}{K} \right]^m \quad (4.13)$$

$$m = 8.132 - 1.540 \times 10^{-3} T \quad (4.14)$$

donde T es la temperatura, $L_v(*)$ representa a la derivada de Lie y K es la viscosidad del material. Este modelo implementa lo reportado por Celentano et al. (2011) en las ecuaciones 4.12 y 4.13, además de la ecuación 4.14 referente al exponente m reportada por Kozlowski et al. (1992).

4.5.1 Simulaciones y resultados con el primer modelo visco-plástico

En este caso, las simulaciones dependían del valor que se le atribuía a la viscosidad K del material. Para cada combinación de potencia y velocidad de pasada del láser, se realizaban iteraciones hasta encontrar el comportamiento de la viscosidad en función de la temperatura que minimizaba el error en el ángulo de doblado. Para llevar a cabo todo esto, se partió con la hipótesis de que el material no sufría cambios en la viscosidad entre los 25 °C y los 600 °C, pero que decrecía linealmente hasta llegar a 0.1 MPa · s entre los 600 °C y los 1500 °C. Más allá de los 1500 °C la viscosidad se mantiene constante en este mismo valor. Lo que variaba en cada iteración fue el valor de K en el primer intervalo mencionado, y se definió con el nombre de viscosidad óptima K^* .

Para minimizar el tiempo entre simulaciones, se evaluaron los casos más extremos en términos de potencia y velocidad. De esta forma se realizaron ocho simulaciones para poder analizar y comparar el comportamiento de K^* de cada caso y ver si existen diferencias importantes entre ellos. En la Tabla 4.2 se muestran los resultados de los ángulos simulados con este modelo, usando las ecuaciones planteadas en la sección 4.4, mientras que en la Tabla 4.3 se muestran los valores de los K^* (los gráficos de K para cada caso están en el Anexo B). En ambas tablas se remarcan con color amarillo los ocho casos mencionados y con un “-” los casos que no convergieron.

Tabla 4.2. Resultados simulación con el primer modelo visco-plástico del ángulo de doblado (en °).

		Velocidad (mm/s)			
		5	10	15	20
Potencia (W)	30				
	60	2,77	1,42		
	90	-	2,73	1,73	
	120	-	3,23	2,48	

Tabla 4.3. Valores de la viscosidad óptima K^* (en MPa · s).

		Velocidad (mm/s)			
		5	10	15	20
Potencia (W)	30				
	60	766,3	215,0		
	90	-	430,9	887,7	
	120	-	482,2	203,7	

Como se puede apreciar en la Tabla 4.3, el valor de K^* es muy variable entre los distintos casos y además, no se marca una tendencia al aumentar o disminuir la potencia o la velocidad. No obstante, al analizar el comportamiento en el tiempo de la viscosidad K y el de la tensión equivalente σ en un nodo ubicado en la mitad del camino recorrido por el láser, se puede ver que existe una tendencia. En la Figura 4.2 se presentan los resultados del caso de potencia 60 W y velocidad de 5 mm/s para ambas variables y también el comportamiento de la temperatura (los demás casos se presentan en el Anexo C). Al comparar ambos gráficos se puede ver que los máximos y los mínimos son muy similares entre sí en instantes de tiempo cercanos. A pesar de que en algunos casos la diferencia entre los máximos es grande, los mínimos siguen siendo parecidos y la tendencia para todos es la misma. Esto se puede concluir gracias al gráfico de la temperatura en el tiempo, donde el *peak* de temperatura se alcanza cuando el haz láser pasa justo por el nodo.

Todo este análisis permitió llegar a la conclusión de que existe una posibilidad de que la viscosidad y la tensión equivalente estén relacionadas a través de una ecuación simple. Es así que nace la hipótesis para plantear el segundo modelo de visco-plasticidad descrito en la siguiente sección.

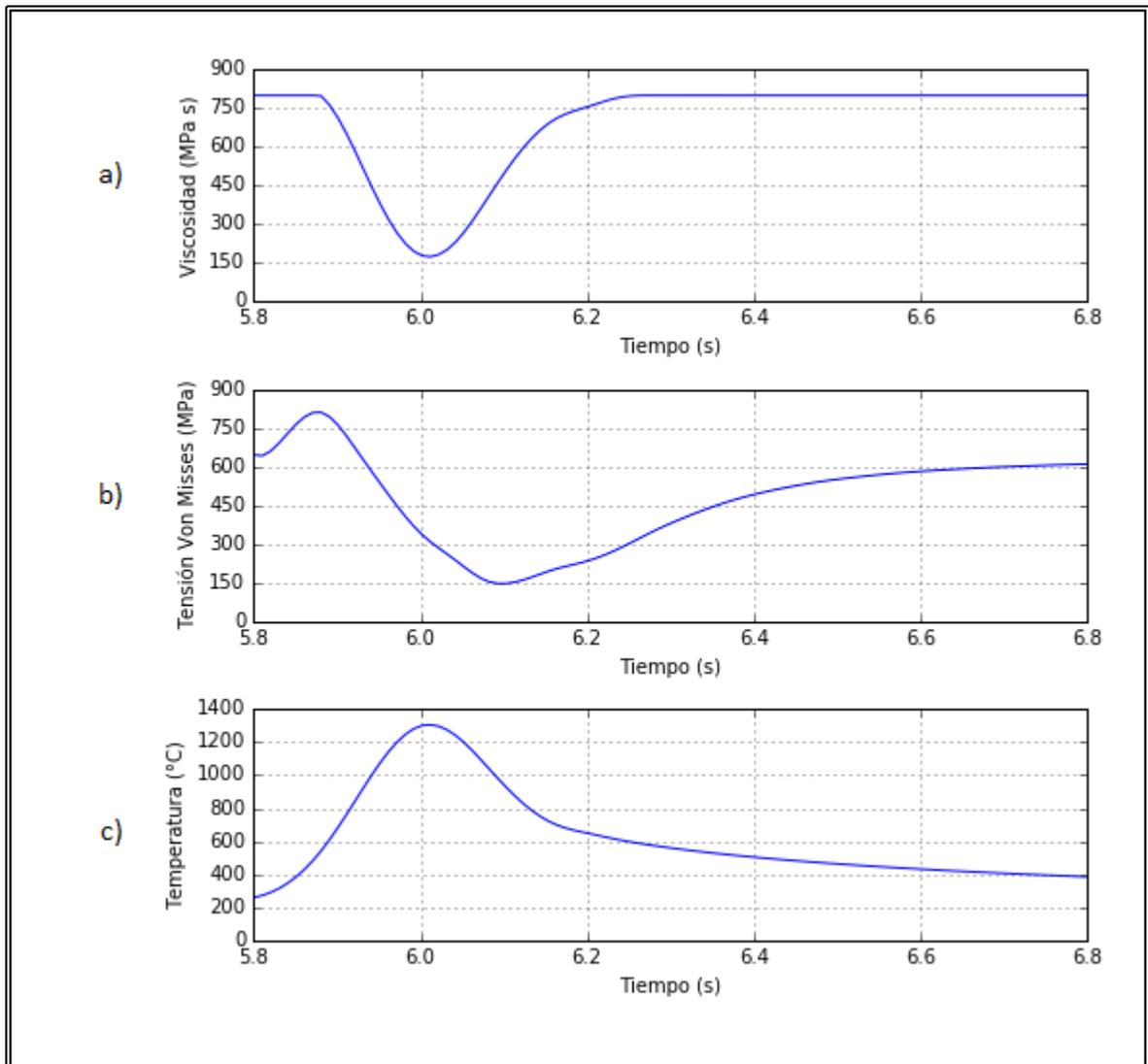


Figura 4.2. Caso $P = 60 \text{ W}$, $v = 5 \text{ mm/s}$. a) Evolución de la viscosidad K en el tiempo. b) Evolución de la tensión equivalente σ en el tiempo. c) Evolución de la temperatura en el tiempo.

4.6 Segundo modelo constitutivo visco-plástico

Este último modelo se formuló a partir de los resultados obtenidos en los dos modelos anteriores. Al comparar la evolución de la viscosidad K y la tensión de Von Mises σ en función del tiempo para un nodo específico se pudo apreciar que la tendencia es similar para todos los casos simulados, por lo que en el nuevo modelo la viscosidad queda definida como:

$$K = a \cdot \sigma \quad (4.15)$$

donde $a = 1 \text{ s}$ y el exponente $m = 7$.

4.6.1 Simulaciones con el segundo modelo visco-plástico

Este modelo relaciona la viscosidad y la tensión equivalente en una ecuación de carácter lineal, específicamente en una relación numérica de uno a uno. Los resultados de estas simulaciones, haciendo uso de las ecuaciones presentadas en la sección 4.5, se muestran en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4. Resultados simulación con el segundo modelo visco-plástico del ángulo de doblado (en °).

		Velocidad (mm/s)			
		5	10	15	20
Potencia (W)	30	0,87	0,50	-	-
	60	2,81	1,34	0,97	-
	90	4,23	2,68	2,01	1,68
	120	4,72	2,92	2,45	2,42
Nota: Los casos marcados con “-” son aquellos que no se calcularon debido a que sus respectivos ángulos experimentales eran muy cercanos a 0.					

4.7 Análisis y discusión

Un resumen de los resultados experimentales, los numéricos y sus respectivos errores se muestran en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5. Resumen de resultados y errores asociados.

	Ángulo experimental (°)	Ángulo numérico (°)		Error relativo al ángulo experimental (%)	
		Modelo elasto-plástico	Modelo visco-plástico	Modelo elasto-plástico	Modelo visco-plástico
P1V1	0,97+/-0,10	0,93	0,87	4,12	10,3
P1V2	0,47+/-0,14	0,55	0,50	17,0	6,38
P2V1	2,96+/-0,36	1,89	2,81	36,1	5,10
P2V2	1,50+/-0,20	1,36	1,34	9,33	10,7
P2V3	1,05+/-0,11	1,01	0,97	3,81	7,62
P3V1	4,16+/-0,49	2,09	4,23	49,8	1,68
P3V2	2,68+/-0,16	1,83	2,68	31,7	0,00
P3V3	1,73+/-0,11	1,73	2,01	0,00	16,2
P3V4	1,67+/-0,08	1,65	1,68	1,20	0,60
P4V1	4,28+/-0,60	1,97	4,72	54,0	10,3
P4V2	3,23+/-0,48	1,88	2,92	41,8	10,0
P4V3	2,48+/-0,29	1,94	2,45	21,8	1,21
P4V4	1,96+/-0,19	2,07	2,42	5,61	23,5

Nota: Potencias: P1 = 30 W, P2 = 60 W, P3 = 90 W, P4 = 120 W. Velocidades: V1 = 5 mm/s, V2 = 10 mm/s, V3 = 15 mm/s, V4 = 20 mm/s.

Los resultados de las simulaciones hechas con el segundo modelo visco-plástico muestran que este se adapta de mejor manera a los resultados experimentales que los otros dos modelos.

La primera razón de esto es que en el primer modelo visco-plástico, a pesar de converger a la solución, no hubo coherencia entre los distintos comportamientos de las viscosidades en función de la temperatura. Por otro lado, la gran mayoría de los resultados con el último modelo tienen errores pequeños y están dentro de la desviación estándar de los resultados experimentales. Además, la tendencia del ángulo a crecer a medida que aumenta la potencia y/o disminuye la velocidad, también está presente en los resultados del último modelo, a diferencia del modelo elasto-plástico que, en el caso $P = 120$ W hay una disminución en el ángulo de $V = 15$ mm/s a $V = 10$ mm/s y un aumento de $V = 10$ mm/s a $V = 5$ mm/s

Las posibles razones de los altos errores para los casos $P = 90$ W, $V = 15$ mm/s y $P = 120$ W, $V = 20$ mm/s, podrían deberse a anomalías al momento de realizar los experimentos y también a la pequeña influencia del exponente m en las simulaciones. Sin embargo, es menos probable que el modelo sea el culpable, debido a que estos dos casos están entre resultados con potencias y velocidades más altas y bajas y no se podrían considerar como casos límite para llegar a concluir que el modelo falla a partir de una combinación de estos dos parámetros.

5 CONCLUSIONES

En esta investigación se trató de encontrar un modelo matemático que incorporara el efecto de la tasa de deformación (modelo de visco-plasticidad) capaz de poder representar de manera confiable el proceso del conformado láser en placas de acero inoxidable a través de caminos rectos.

Los resultados entregados por el modelo elasto-plástico, donde no se incorpora la tasa de deformación, sugirieron que el comportamiento del proceso era más complejo cuando las temperaturas eran demasiado altas en el material, específicamente, cuando la potencia era alta y la velocidad de pasada del láser era baja donde el mayor error fue de un 36,1 %.

En el caso del primer modelo visco-plástico no se pudo encontrar una única representación del comportamiento de la viscosidad en función de la temperatura ya que el mayor valor para el K^* fue de 887,7 MPa · s y el menor fue de 203,7 MPa · s resultando ser cuatro veces más pequeño.

De esta forma se determinó que estos dos modelos no son apropiados para poder explicar el proceso en los casos planteados en este trabajo debido a los altos errores reportados y a su falta de coherencia al momento de comparar variables.

El último modelo propuesto pudo adaptarse a todos los casos presentados, ya que en todos hubo una convergencia y solución única para todas las variables. Además, los errores fueron significativamente más pequeños que en el caso elasto-plástico siendo de un 23,5 % y de un 16,2 % los errores más grandes y los demás no sobrepasan el 11 % de error.

Todo esto apunta a que este último modelo podría cumplir el objetivo de esta investigación al incorporar la relevancia del efecto de la tasa de deformación del material y servir como base para futuras investigaciones relacionadas con el conformado láser.

También se recalca que en este trabajo no se analizó la importancia que tiene el exponente m si varía con la temperatura, ya que para el modelo propuesto se consideró constante y con un valor de 7. De la misma forma, no se estudió la influencia de la evolución de la microestructura en el material que podría tener en este proceso.

Es por esto que se deja propuesto investigar estos dos fenómenos y, sobre todo, la adaptación de este modelo en el conformado con caminos curvos o más complejos o en el conformado de múltiples pasadas del láser para refutar o fortalecer la hipótesis de este nuevo modelo. También se propone investigar el fenómeno involucrado en la configuración de potencia 120 W y velocidad 5 mm/s descrito en la sección 3.4, donde hubo experimentos que involucraron ángulos negativos.

Además es importante dejar en claro que en esta investigación el espacio de inferencia está acotado a placas de acero de 0,6 mm de espesor en el espectro de combinaciones de potencia y velocidad presentadas, con la esperanza de potenciar futuros trabajos que busquen ampliarlo al aumentar o disminuir el espesor o investigar otras posibles configuraciones, donde la energía proporcionada por el láser sea mayor o menor al variar potencias y velocidades.

Por último, se deja una invitación para implementar el modelo propuesto en este trabajo con el objetivo de potenciar futuras líneas de investigación concernientes al conformado láser, como la realización de prótesis craneales en el área de la medicina, la creación de

repuestos para la estructura fracturada de barcos en el área de transportes marítimos o la fabricación de instrumentos o estructuras micro y hasta nanométricas en el área de la aeronáutica.

BIBLIOGRAFÍA

Anand, L. (1982). Constitutive Equations for the Rate-Dependent Deformation of Metals at Elevated Temperatures. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 104, 12-17.

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.

Carey, C. (2007). Effects of laser interaction with graphite coatings. *Laser Assisted Netshape Engineering*, 5, 673-686.

Celentano, D. (2001). A large strain thermoviscoplastic formulation for the solidification of S.G. cast iron in a green sand mould. *International Journal of Plasticity*, 17, 1623–1658.

Celentano, D. (2002a). Thermomechanical analysis of the Taylor impact test. *Journal of Applied Physics*, 91, 3675–3686.

Celentano, D., Rosales, D. and Peña, J. (2011). Simulation and Experimental Validation of Tube Sinking Drawing Processes. *Materials and Manufacturing Processes*, 26, 770-780.

Cheng, P.J. and Lin, S.C. (2000). An analytical model for the temperature field in the laser forming of sheet metal. *Journal of Materials Processing Technology*, 101, 260-267.

Cheng, P.J. 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.

Cook, F., Jacobsen, V., Celentano, D. and Ramos, J. (2015). Characterization of the absorptance of laser irradiated steel sheets. *Journal of Laser Applications*, 27, en prensa.

Davis, J.R. (1994). *Introduction to stainless steels ASM Specialty Handbook: Stainless Steels*, 5. Ohio, EE.UU.: ASM International.

Gautam, S.S., Singh, S. K. and Dixit, U. S. (2015). Laser Forming of Mild Steel Sheets Using Different Surface Coatings. *Selected Papers of 5th International and 26th National All India Manufacturing, Technology, Design and Research Conference*, en prensa.

Geiger, M. and Vollertsen, F. (1993). The mechanisms of laser forming. *CIRP Annals*, 42, 301–304.

Hennige, T. (2000). Development of irradiation strategies for 3D-laser forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 103, 102-108.

Huespe A.E., Cardona, A., Nigro, N. and Fachinotti, V. (2000). Visco-plastic constitutive models of steel at high temperature. *Journal of Materials Processing Technology*, 102, 143-152.

Kobayashi, H., Hiki, Y. and Takahashi, H. (1996). An experimental study on the shear viscosity of solids. *Journal of Applied Physics*, 80, 122-130.

Kozłowski, P., Thomas, B., Azzi, J. and Wang, H. (1992). Simple Constitutive Equations for Steel at High Temperature. *Metallurgical Transactions A*, 23, 903-918.

Li, W. and Yao, Y.L. (2000). Numerical and Experimental Study of Strain Rate Effects in Laser Forming. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 122, 445-451.

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.

Lubliner, J. (1990). *Plasticity Theory*. Nueva Jersey, EE. UU.: Pearson Education.

Perzyna, P. (1996). Fundamental Problems in Viscoplasticity. *Advances in Applied Mechanics*, 9, 243-377.

Shen, H., Yongjun Shi, Y., Zhenqiang Yao, Z. and Hu, J. (2006). 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 - A review. *Computational Materials Science*. 37, 593-598.

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.

Shi, Y., Shen, H., Yao, Z.Q. and Liu, J. (2005). Edge effects of metal plate in laser forming. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 15, 260-263.

Shi, Y., Yao, Z., Shen, H. and Hu, J. (2006). Research on the mechanisms of laser forming for the metal plate. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46, 689–697.

Shi, Y., Liu, Y., Yi, P. and Hu, J. (2012). Effect of different heating methods on deformation of metal plate under upsetting mechanism in laser forming. *Optics & Laser Technology*, 44, 486-491.

Venkadeshwaran, K., Das, S. y Misra, D. (2010). Finite element simulation of 3-D laser forming by discrete section circle line heating. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 4, 163-175.

Vollertsen, F., Komel, I. and Kals, R. (1995). The laser bending of steel foils for microparts by the buckling mechanism-a model. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 3, 107-119.

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

ANEXOS

ANEXO A: DETALLE DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES

Leyenda:

Los valores marcados con un “*” son resultados que difieren con significancia del resto y se consideran errores experimentales, por lo que no son considerados dentro del cálculo del promedio.

Los valores marcados con un “-” representan casos en los que se generó pandeo en el conformado por lo que también no se consideraron dentro del promedio.

Tabla A.1: Resultados experimentales del ángulo de doblado (en °), potencia 30 W.

	Entrada	Salida	Promedio
5 mm/s	0,96	1,01	0,97
	0,95	1,07	
	1,02	1,02	
	0,63	0,97	
	0,92	0,95	
	0,98	1,06	
	0,95	1,05	

	Entrada	Salida	Promedio
10 mm/s	0,83	*1,40	0,47
	0,35	0,45	
	0,54	0,48	
	0,28	0,35	
	0,30	0,40	
	0,50	0,58	
	0,50	0,52	

Tabla A.2: Resultados experimentales del ángulo de doblado (en °), potencia 60 W.

	Entrada	Salida	Promedio
5 mm/s	2,70	2,81	2,96
	2,71	3,19	
	2,49	3,27	
	2,47	2,30	
	3,02	3,36	
	3,36	3,44	
	3,19	3,11	

	Entrada	Salida	Promedio
10 mm/s	1,19	1,60	1,50
	1,49	1,79	
	1,79	*0,95	
	1,23	1,40	
	1,60	1,76	
	1,43	1,60	
	1,26	1,34	

	Entrada	Salida	Promedio
15 mm/s	1,10	1,13	1,05
	1,14	1,19	
	1,04	1,03	
	0,85	0,96	
	1,18	0,84	
	0,92	1,11	
	1,16	1,01	

Tabla A.3: Resultados experimentales del ángulo de doblado (en °), potencia 90 W.

	Entrada	Salida	Promedio
5 mm/s	3,69	4,27	4,16
	3,84	4,58	
	3,93	4,77	
	3,56	5,10	
	3,69	4,19	
	-	-	
	-	-	

	Entrada	Salida	Promedio
10 mm/s	2,61	2,70	2,68
	2,87	3,11	
	2,57	2,68	
	2,56	2,70	
	2,53	2,69	
	2,69	2,43	
	2,60	2,77	

	Entrada	Salida	Promedio
15 mm/s	1,80	1,82	1,73
	1,79	1,69	
	1,76	1,78	
	1,57	1,58	
	1,60	1,85	
	1,60	1,76	
	1,68	1,95	

	Entrada	Salida	Promedio
20 mm/s	1,73	1,75	1,67
	1,58	1,83	
	1,60	1,70	
	1,53	1,67	
	1,68	1,76	
	1,60	1,69	
	1,61	1,68	

Tabla A.4: Resultados experimentales del ángulo de doblado (en °), potencia 120 W.

	Entrada	Salida	Promedio
5 mm/s	3,79	5,05	4,28
	3,95	4,61	
	4,05	4,92	
	3,34	5,24	
	3,95	3,94	
	-	-	
	-	-	

	Entrada	Salida	Promedio
10 mm/s	3,55	4,02	3,23
	2,35	2,85	
	2,56	2,66	
	3,49	3,33	
	3,52	3,61	
	3,53	2,78	
	3,44	3,61	

	Entrada	Salida	Promedio
15 mm/s	2,68	2,87	2,48
	2,44	2,96	
	2,06	2,72	
	1,98	2,04	
	2,61	2,52	
	2,52	2,52	
	2,44	2,36	

	Entrada	Salida	Promedio
20 mm/s	1,93	2,16	1,96
	1,80	*2,52	
	1,76	2,13	
	*1,67	2,01	
	2,02	2,02	
	2,11	2,27	
	1,68	1,68	

**ANEXO B: GRÁFICOS DE LA VISCOSIDAD DEL PRIMER MODELO
VISCO-PLÁSTICO EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA**

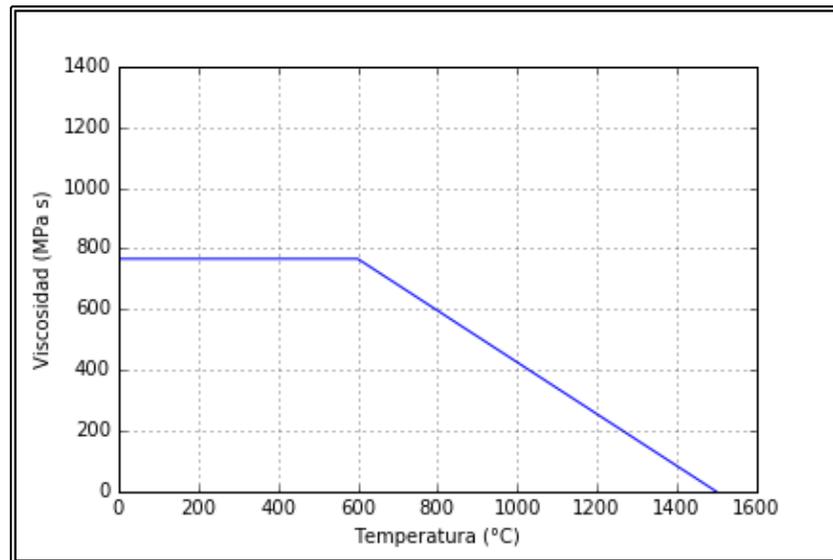


Figura B.1. Gráfico de la viscosidad en función de la temperatura para el caso $P = 60$ W,
 $V = 5$ mm/s.

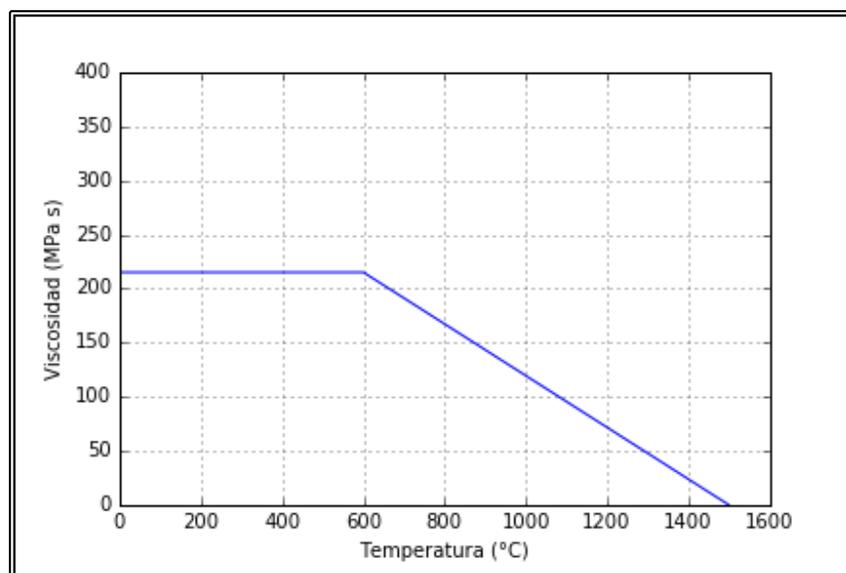


Figura B.2. Gráfico de la viscosidad en función de la temperatura para el caso $P = 60$ W,
 $V = 10$ mm/s.

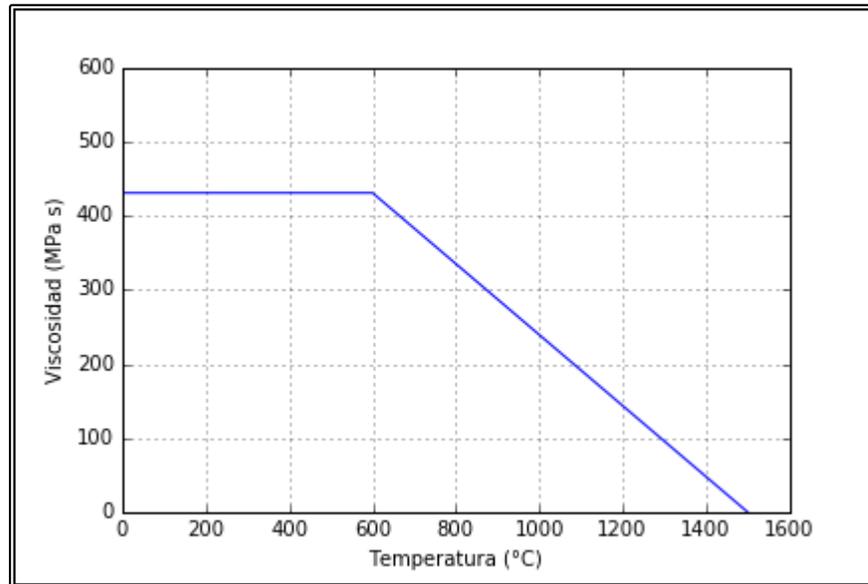


Figura B.3. Gráfico de la viscosidad en función de la temperatura para el caso $P = 90$ W,
 $V = 10$ mm/s.

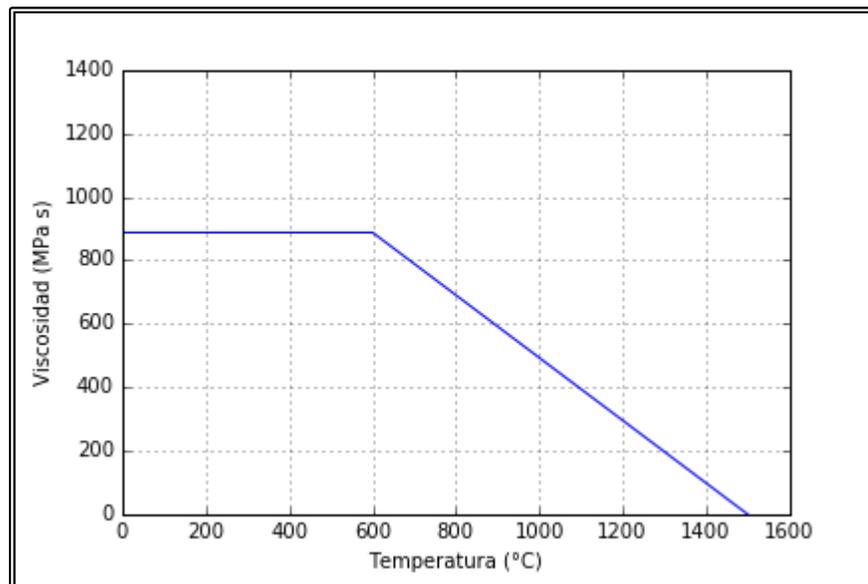


Figura B.4. Gráfico de la viscosidad en función de la temperatura para el caso $P = 90$ W,
 $V = 15$ mm/s.

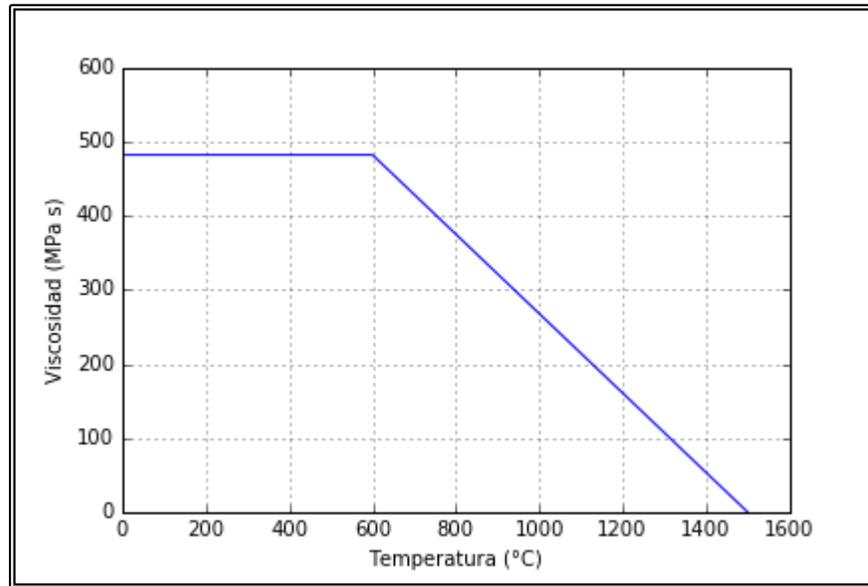


Figura B.5. Gráfico de la viscosidad en función de la temperatura para el caso $P = 120$

$W, v = 10$ mm/s.

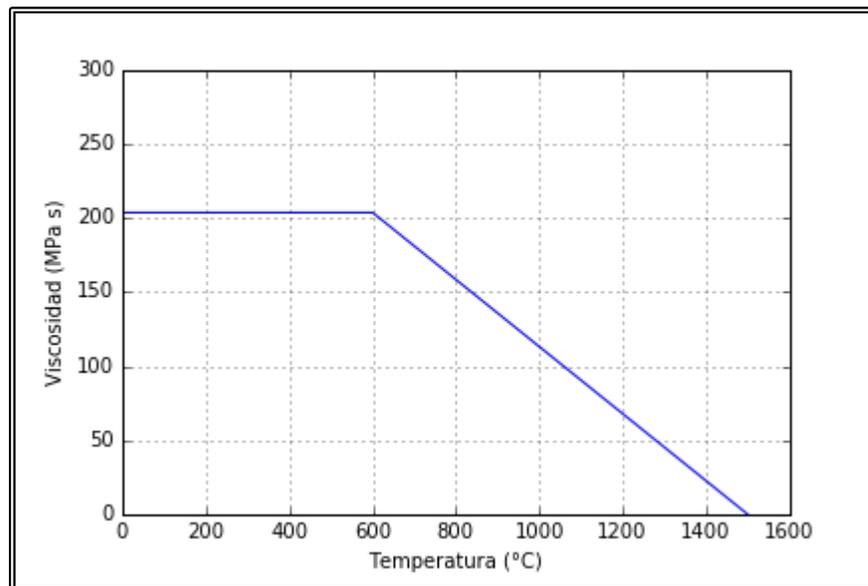


Figura B.6. Gráfico de la viscosidad en función de la temperatura para el caso $P = 120$

$W, v = 15$ mm/s.

ANEXO C: GRÁFICOS DE LA VISCOSIDAD, LA TENSIÓN EQUIVALENTE Y LA TEMPERATURA DEL PRIMER MODELO VISCO-PLÁSTICO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO

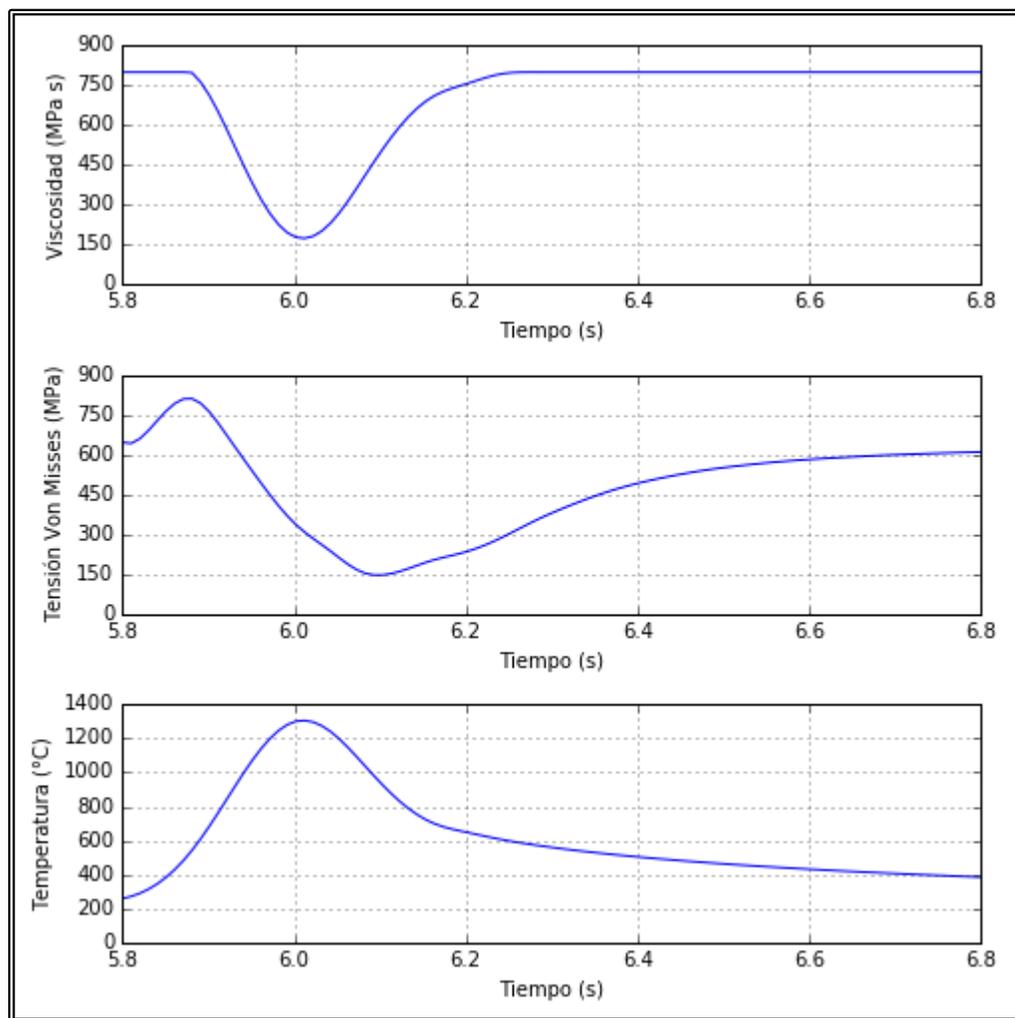


Figura C.1. Gráfico de la viscosidad, la tensión equivalente y la temperatura en función del tiempo para el caso $P = 60 \text{ W}$, $V = 5 \text{ mm/s}$.

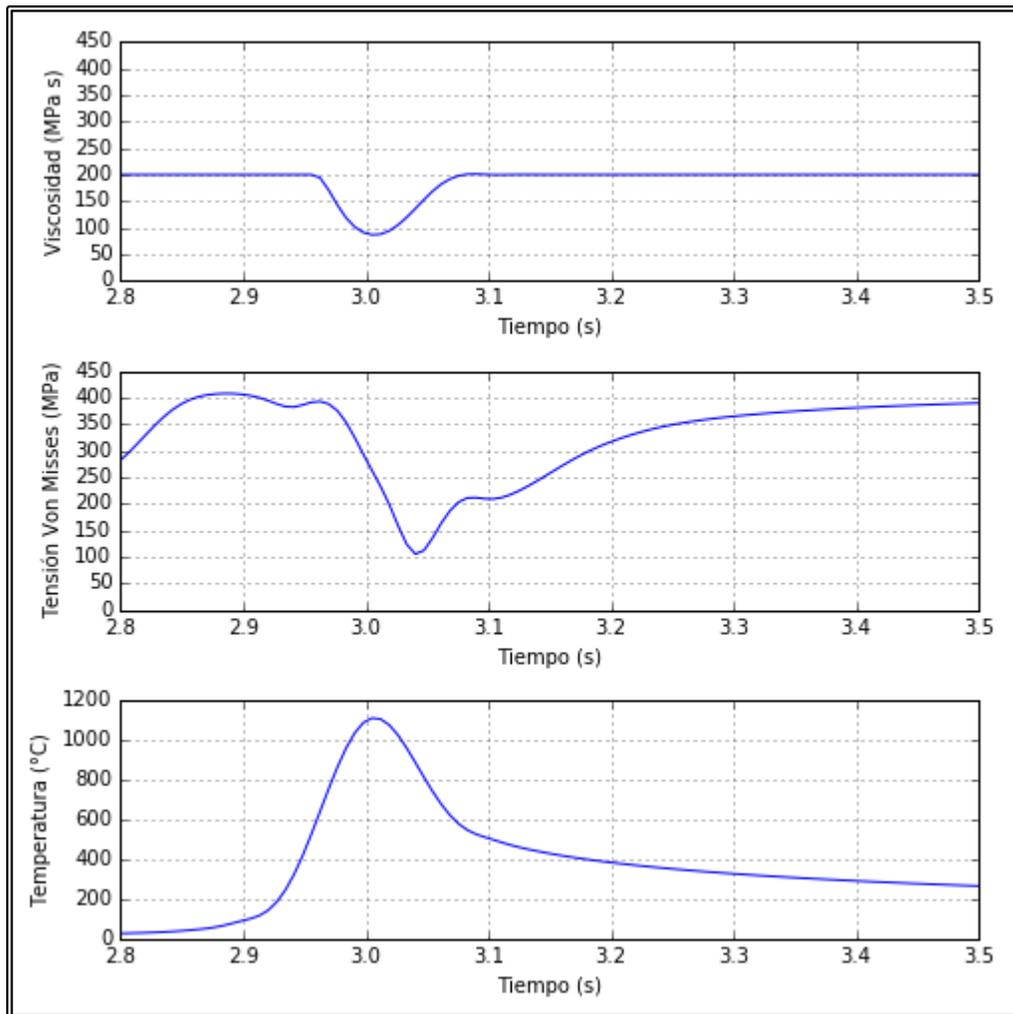


Figura C.2. Gráfico de la viscosidad, la tensión equivalente y la temperatura en función del tiempo para el caso $P = 60 \text{ W}$, $V = 10 \text{ mm/s}$.

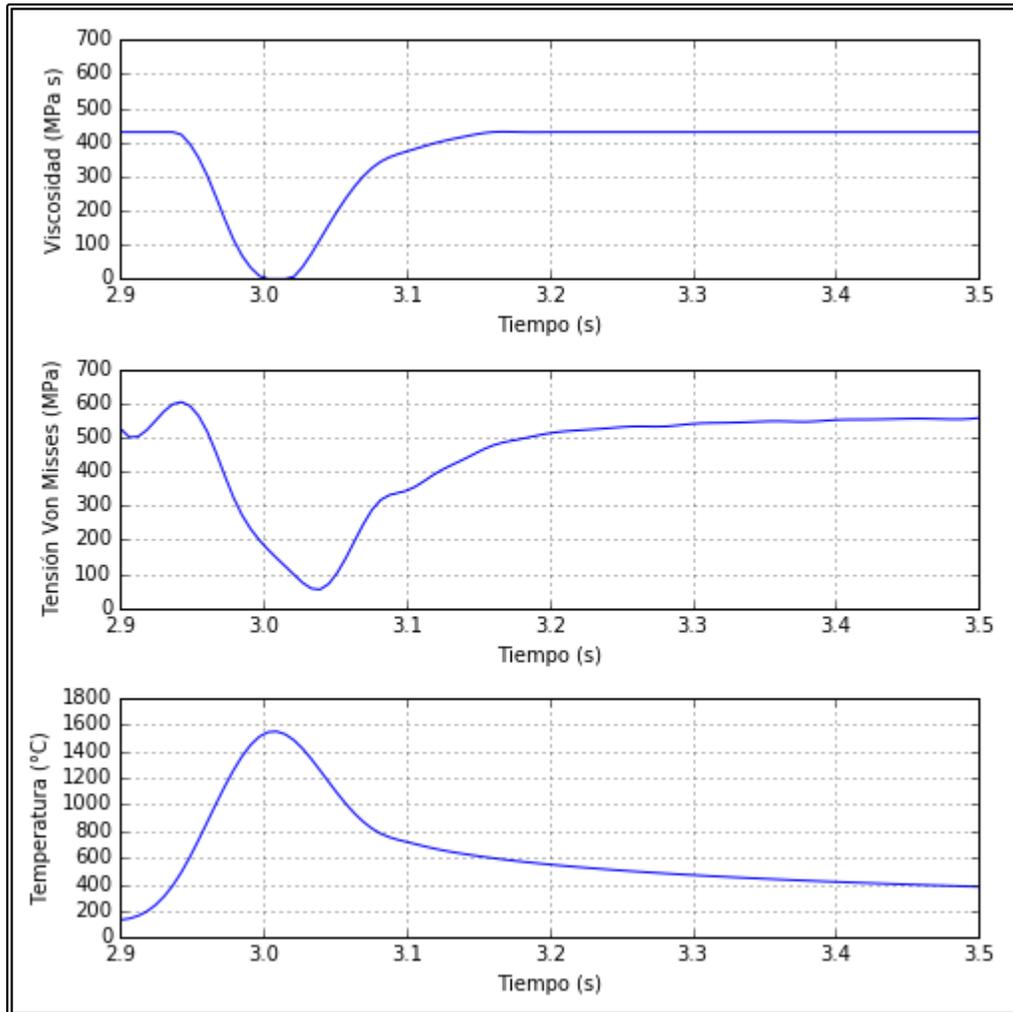


Figura C.3. Gráfico de la viscosidad, la tensión equivalente y la temperatura en función del tiempo para el caso $P = 90 \text{ W}$, $V = 10 \text{ mm/s}$.

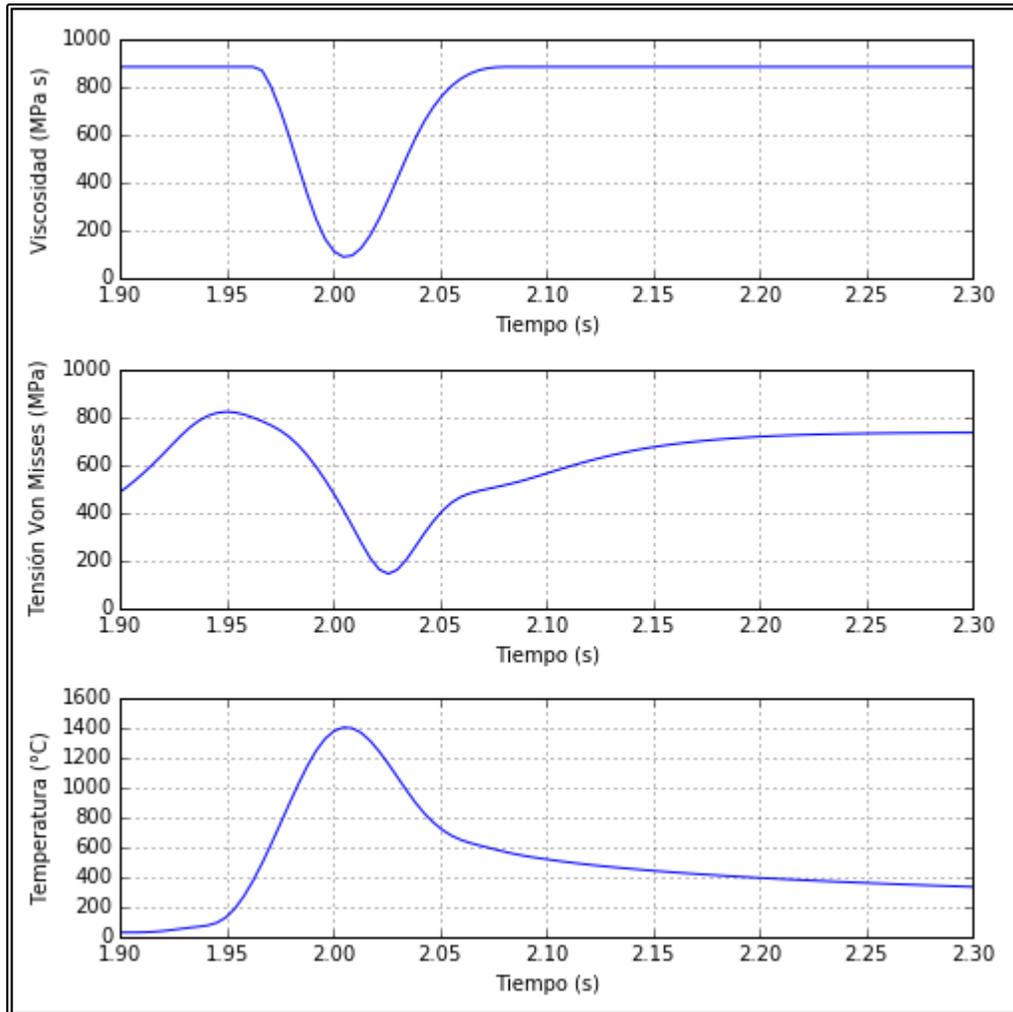


Figura C.4. Gráfico de la viscosidad, la tensión equivalente y la temperatura en función del tiempo para el caso $P = 90 \text{ W}$, $V = 15 \text{ mm/s}$.

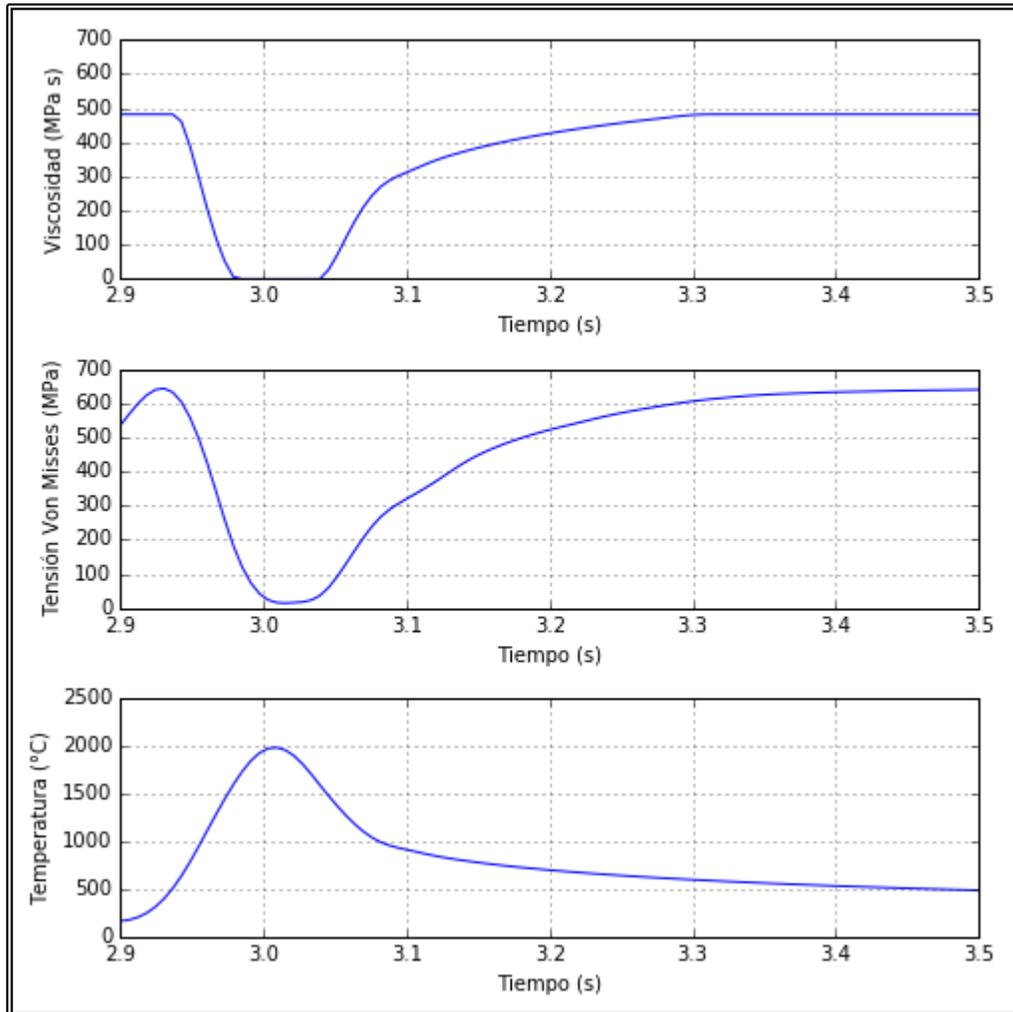


Figura C.5. Gráfico de la viscosidad, la tensión equivalente y la temperatura en función del tiempo para el caso $P = 120 \text{ W}$, $v = 10 \text{ mm/s}$.

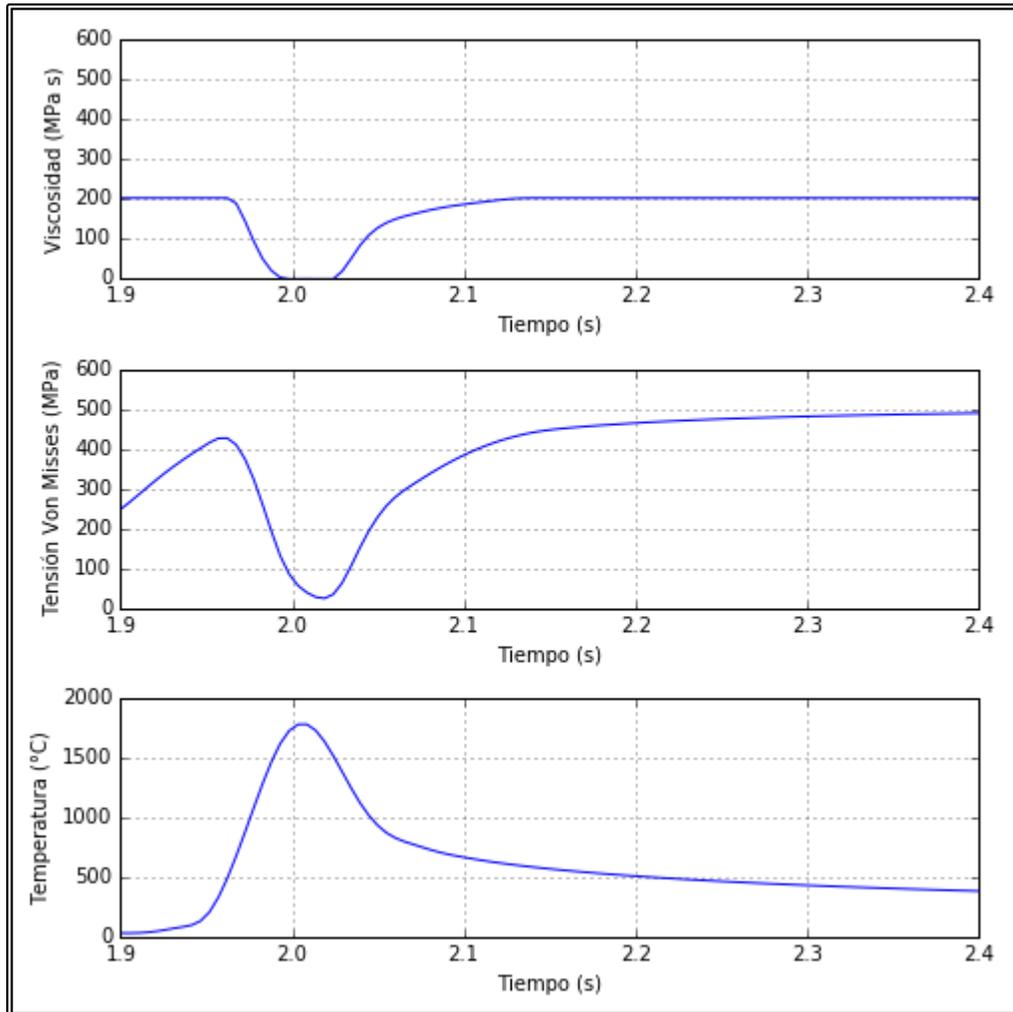


Figura C.6. Gráfico de la viscosidad, la tensión equivalente y la temperatura en función del tiempo para el caso $P = 120 \text{ W}$, $v = 15 \text{ mm/s}$.