



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS
POTOSÍ**



FACULTAD DE INGENIERÍA

Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

**“ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES EN PROCESOS
TÉRMICOS APLICADO AL FORMADO LÁSER”**

TESIS

que para obtener el grado de

MAESTRO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Presenta

ALBERTO TORRES CRUZ

Asesor: Dr. Dirk Frederik de Lange

San Luis Potosí, S.L.P.

FEBRERO DE 2014



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE SAN LUIS POTOSÍ**

21 de noviembre de 2013

**ING. ALBERTO TORRES CRUZ
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por el **Dr. Dirk Frederik de Lange**, Asesor de la Tesis que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Maestría en Ingeniería Mecánica**, me es grato comunicarle que en la Sesión de Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 21 de noviembre del presente año, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

**"ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES EN PROCESOS
TÉRMICOS APLICADO AL FORMADO LÁSER."**

Introducción.

- I. Estado del arte de procesos termo-mecánicos.
- II. Simulación de procesos termo-mecánicos.
- III. Desarrollo y análisis de modelos simplificados.
- IV. Simulación del proceso de formado láser.

Conclusiones.

Bibliografía.

Anexos.

"MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO"

ATENTAMENTE

**M. I. JORGE ALBERTO PÉREZ GONZÁLEZ
DIRECTOR.**



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCION



**90 AÑOS DE
AUTONOMÍA
UASLP**
Primera Universidad
Autónoma en México



**FACULTAD
DE INGENIERÍA**

Av. Manuel Nava 8
Zona Universitaria • CP 78290
San Luis Potosí, S.L.P.
tel. (444) 826 2330 al39
fax (444) 826 2336
www.uaslp.mx

*etn.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mis padres Graciela Cruz y Pedro Torres por el apoyo incondicional y por la gran motivación que siempre me han brindado. A mis hermanas Teresa y Alejandra por hacer mis días más alegres.

También quiero expresar mi gratitud a todos mis amigos y profesores que con sus comentarios y críticas hicieron posible este trabajo, especialmente al Dr. Dirk Frederik de Lange, asesor, quien mostró un gran compromiso y dedicación así como también por su gran apoyo motivacional brindado.

Para concluir, agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico otorgado, así como también a la Facultad de Ingeniería, CIEP-UASLP, por haber proporcionado las instalaciones y la oportunidad de realizar este proyecto.

San Luis Potosí, Febrero de 2014

Alberto Torres Cruz

*A Graciela,
Pedro,
Teresa
y
Alejandra*

RESUMEN

En el presente trabajo se hace un estudio sobre procesos termo-mecánicos, tales como: recubrimientos duros, soldadura y formado láser, donde se trata la problemática que se tiene en estos procesos y las interacciones que existen entre los diversos fenómenos físicos que están presentes durante su realización. Para una mejor comprensión de la problemática se realizaron diversos modelos simplificados para describir el proceso de formado láser mediante el mecanismo de gradiente de temperatura (TGM) y la solución de estos modelos se llevó a cabo mediante el software comercial COMSOL V4.2a, que hace uso del método de los elementos finitos (MEF).

Los modelos simplificados arrojaron resultados cercanos con respecto a las temperaturas obtenidas en la zona del calentamiento y la zona que está alrededor, cuando se modela el espesor de la lámina de forma explícita. Cuando el modelo simplificado desprecia el espesor no se obtiene una estimación cercana a la temperatura máxima obtenida en la superficie de interacción con la fuente láser. Para poder predecir la flexión de la lámina de forma correcta fue necesario usar un modelo 3-D que incluyera el efecto de la fuente móvil. Ninguno de los modelos simplificados en 2-D, ni el modelo 3-D con fuente fija aplicada sobre una línea es capaz de explicar la flexión hacia la fuente, arrojando al contrario una flexión temporal hacia abajo. La modelación de las 3 dimensiones y el calentamiento con una fuente móvil es esencial para obtener la tendencia correcta.

La validación de los modelos empleados se hizo mediante una comparación con datos numéricos y experimentales reportados en la literatura mostrando una gran congruencia entre los resultados obtenidos en las simulaciones presentadas en este trabajo y los datos reportados en la literatura.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	i
DEDICATORIA	ii
RESUMEN	iii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABLAS	xv
INTRODUCCIÓN	1
Antecedentes	1
Justificación del estudio.....	2
Objetivo general.....	3
Objetivos específicos.....	3
1 ESTADO DEL ARTE DE PROCESOS TERMO-MECÁNICOS	5
1.1 Introducción	5
1.2 Soldadura.....	6
1.2.1 Descripción del proceso de soldadura.....	7
1.3 Recubrimiento duro.....	8
1.3.1 Descripción del proceso de recubrimiento duro.....	9
1.4 Formado láser.....	10
1.4.1 Descripción del proceso de formado láser	10
1.5 Problemática común.....	12
1.5.1 Deformación.....	13
1.5.2 Esfuerzos residuales	14
1.5.3 Agrietamiento.....	16
1.6 Mitigación de efectos negativos y optimización de procesos	17

1.7	Efectos multi-físicos en procesos termo-mecánicos.....	19
1.8	Comportamiento inelástico del material.....	23
1.8.1	Características de la respuesta inelástica en metales	24
1.8.2	Propiedades dependientes de la temperatura	25
1.9	Técnicas experimentales para medir esfuerzos residuales.....	28
2	SIMULACIÓN DE PROCESOS TERMO-MECÁNICOS	33
2.1	Introducción.....	33
2.2	Suposiciones generales en el modelado.....	34
2.3	Modelo Térmico	36
2.3.1	Modelo de la fuente de calor	36
2.3.2	Modelado de las pérdidas de calor.....	39
2.4	Modelo Mecánico	40
2.4.1	Condiciones de contorno	42
2.4.2	Modelo del material.....	42
2.4.3	Modelo Elasto-Plástico.....	44
3	DESARROLLO Y ANÁLISIS DE MODELOS SIMPLIFICADOS	53
3.1	Caso 1: Estudio 2D-Fuente de calor fija y transiente: Deformaciones planas	57
3.2	Caso 2: Estudio 2D-Fuente de calor fija y transiente: Esfuerzos planos	63
3.3	Caso 3: Estudio 3D-Fuente de calor fija y transiente	69
3.4	Caso 4: Estudio 2D-Fuente de calor móvil.....	77
3.5	Caso 5: Influencia de las condiciones ambientales.....	83
3.6	Análisis de resultados	88
4	SIMULACIÓN DEL PROCESO DE FORMADO LÁSER.....	93
4.1	Planteamiento del problema	93
4.2	Análisis de resultados	94
4.3	Validación del modelo.....	99

4.3.1	Primer caso de validación	99
4.3.2	Segundo caso de validación	107
CONCLUSIONES		109
	Trabajo futuro	111
BIBLIOGRAFÍA		113
ANEXOS		117
	A.1. Propiedades mecánicas del material	117
	A.2. Propiedades térmicas del material	117

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Clasificación de los procesos de unión [4].	7
Figura 1.2. Proceso de recubrimiento láser. [6]	9
Figura 1.3. Mecanismos del formado láser: a) TGM, b) BM, c) UM.	11
Figura 1.4. Formado láser por medio del mecanismo de gradiente de temperatura, a) gradiente de temperatura, b) durante el calentamiento, c) durante enfriamiento. [9]	11
Figura 1.5. Vista esquemática de la irradiación de una línea recta por medio de un haz láser para producir un ángulo de flexión sobre una lámina. [9]	12
Figura 1.6. Tipos de distorsión provocados por el proceso de soldadura. [10]	14
Figura 1.7. Efecto de los esfuerzos residuales en los ciclos de esfuerzos [13].	15
Figura 1.8. Nivel de esfuerzo o distorsión producido por el grado de sujeción.	16
Figura 1.9. Fenómenos involucrados en el modelado de soldadura por fusión [10].	20
Figura 1.10. Fenómenos involucrados en el modelado de soldadura por fusión sin considerar cómo se produce el calor [10].	20
Figura 1.11. Fenómenos involucrados en el proceso de soldadura sin considerar el flujo del fluido y la física de la generación de calor [10].	21
Figura 1.12. Acoplamientos en un modelo termo-mecánico-metalúrgico. [10]	22
Figura 1.13. Grado del acoplamiento entre los campos considerados.	23
Figura 1.14. Comportamiento típico de la curva de esfuerzo-deformación para un material dúctil [16].	25
Figura 1.15. Variación de la resistencia a la cedencia con respecto a la temperatura [17].	26
Figura 1.16. Resultados de σ_{yy} usando un modelo de elemento finito [18].	27
Figura 2.1. Geometría de una fuente de calor de doble elipsoide [21].	37
Figura 2.2. Formas comunes del haz láser. (a) Distribución gaussiana. (b) Distribución constante. (c) distribución gaussiana en uno de los ejes [22].	38
Figura 2.3. Superficie de fluencia de von Mises para esfuerzo plano y su correspondiente curva esfuerzo-deformación para un prueba uniaxial para material ideal plástico. [26]	46
Figura 2.4. Superficie de fluencia de von Mises en el espacio de esfuerzos.	47
Figura 2.5. Superficie de von Mises para esfuerzo plano donde se muestra el incremento de deformación plástica en dirección normal a la tangente a la superficie. [26]	48
Figura 2.6. Endurecimiento isotrópico, en el cual la superficie de cedencia se expande con deformación plástica y su correspondiente curva uniaxial de esfuerzo-deformación. [26].	49
Figura 2.7. Endurecimiento cinemático que muestra la traslación de la superficie de cedencia debido a la deformación plástica y la curva de esfuerzo-deformación que muestra el efecto Bauschinger. [26]	50

Figura 2.8. Formas de las curvas de esfuerzo deformación de los diferentes modelos básicos. [27]	51
Figura 3.1. Modelos 2D para soldadura [28].	53
Figura 3.2. Dimensiones de la lámina y trayectoria del haz láser.	54
Figura 3.3. Casos de estudio a) Deformaciones planas, fuente fija, b) Esfuerzos planos, fuente fija, c) Modelo 3D, fuente de calor fija, d) Esfuerzos planos, fuente móvil.....	56
Figura 3.4. Condiciones de frontera mecánicas.	57
Figura 3.5. Mallado para el Caso 1	58
Figura 3.6. Mallado para el Caso 1 (Acercamiento).	58
Figura 3.7. Calor aplicado [W/m] contra tiempo [s] para el Caso 1.	58
Figura 3.8. Calor aplicado [W/m] contra tiempo [s] para el (acercamiento). Caso 1.	59
Figura 3.9. Distribución de la temperatura en el dominio para un tiempo de 3.2s (acercamiento) Caso 1.	59
Figura 3.10. Distribución de la temperatura en el dominio para un tiempo de 220s. Caso 1.....	60
Figura 3.11. Temperatura contra tiempo medida en el punto medio superior e inferior. Caso 1.....	60
Figura 3.12. Distribución del esfuerzo de Von Mises en el dominio a los 3.2s (acercamiento). Caso 1.....	61
Figura 3.13. Distribución del esfuerzo de Von Mises en el dominio a los 220s (acercamiento). Caso 1.....	61
Figura 3.14. Componentes del tensor de esfuerzos y esfuerzo de Von Mises a los 3.2s a lo largo de una línea transversal al movimiento de la fuente (línea superior). Caso 1.	62
Figura 3.15. Componentes del tensor de esfuerzos y esfuerzo de Von Mises al finalizar el estudio a lo largo de una línea transversal al movimiento de la fuente (línea superior). Caso 1.	62
Figura 3.16. Deformación plástica efectiva al finalizar el estudio. Caso 1.....	63
Figura 3.17. Ángulo que se forma entre el punto inferior derecho y el eje coordenado a través del tiempo. Caso 1.....	63
Figura 3.18. Mallado utilizado para la simulación 2D-esfuerzos planos. Caso 2.	64
Figura 3.19. Calor aplicado en el estudio 2D-esfuerzos planos. Caso 2.....	64
Figura 3.20. Calor aplicado en el estudio 2D-esfuerzos planos (acercamiento). Caso 2.....	65
Figura 3.21. Distribución de la temperatura para un tiempo de 3.2s. Caso 2.	65
Figura 3.22. Distribución de la temperatura para un tiempo de 220s. Caso 2.	65
Figura 3.23. Temperatura [°C] contra tiempo [s] para el punto medio de la lámina a lo largo del tiempo. Caso 2.....	66
Figura 3.24. Distribución de los esfuerzos de Von Mises para un tiempo de 3.2s. Caso 2.....	67
Figura 3.25. Distribución de los esfuerzos de Von Mises para un tiempo de 220s. Caso 2.....	67
Figura 3.26. Deformación plástica efectiva al finalizar el estudio. Caso2.....	67

Figura 3.27. Componentes del tensor de esfuerzo y esfuerzo de Von Mises a los 3.2s a lo largo de una línea transversal a la fuente. Caso 2.....	68
Figura 3.28. Componentes del tensor de esfuerzo y esfuerzo de Von Mises al finalizar el estudio a lo largo de una línea transversal a la fuente. Caso 2.....	69
Figura 3.29. Mallado para el caso 3D-fuente estática. Caso 3.....	70
Figura 3.30. Vista 3D del mallado empleado en la simulación. Caso 3.	70
Figura 3.31. Calor aplicado [W] a lo largo del tiempo [s]. Caso 3.....	70
Figura 3.32. Calor aplicado [W] a lo largo del tiempo [s] (acercamiento). Caso 3.	71
Figura 3.33. Distribución de la temperatura sobre la lámina para un tiempo de 3.2s. Caso3.	71
Figura 3.34. Distribución de la temperatura sobre la lámina para un tiempo de 220s. Caso 3.	72
Figura 3.35. Temperatura [°C] contra tiempo [s] para el punto medio superior. Caso 3.	72
Figura 3.36. Distribución de los esfuerzos de Von Mises sobre la lámina para un tiempo de 3.2s. Caso 3.	73
Figura 3.37. Resistencia a la cedencia y temperatura a lo largo de una línea de interés a los 3.2s del estudio. Caso 3.....	73
Figura 3.38. Distribución de los esfuerzos de Von Mises en el plano x - y para un tiempo de 220s.....	74
Figura 3.39. Vista cortada a partir de la Figura 3.38 (Acercamiento).	74
Figura 3.40. Deformación plástica efectiva al término del estudio. Caso 3.	75
Figura 3.41. Componentes del tensor de esfuerzo y esfuerzo de Von Mises a los 3.2s. Caso 3.	75
Figura 3.42. Componentes del tensor de esfuerzo y esfuerzo de Von Mises al finalizar el estudio. Caso 3.....	76
Figura 3.43. Ángulo [°] contra tiempo medido entre el punto medio inferior derecho y el eje de las abscisas. Caso 3.....	76
Figura 3.44. Mallado para el caso 2D con fuente móvil. Caso.4.....	77
Figura 3.45. Calor aplicado [W/m] a lo largo del tiempo [s]. Caso 4.....	78
Figura 3.46. Calor aplicado [W/m] a lo largo del tiempo [s] (acercamiento). Caso 4.....	78
Figura 3.47. Distribución de temperatura [°C] para un tiempo de 17s. Caso 4.....	79
Figura 3.48. Distribución de temperatura [°C] para un tiempo de 220s. Caso 4.....	79
Figura 3.49. Variación de temperatura [°C] con respecto al tiempo [s] para el punto medio de la lámina. Caso 4.....	79
Figura 3.50. Distribución de los esfuerzos de Von Mises [Pa] para un tiempo de 17s. Caso 4.	80
Figura 3.51. Resistencia a la cedencia [Pa] para un tiempo de 17s. Caso 4.	80
Figura 3.52. Fuente de calor [W/m ³] y componente en y del tensor de esfuerzos a tensión [Pa] respectivamente en $t=17s$	81
Figura 3.53. Fuente de calor [W/m ³] y componente en y del tensor de esfuerzos a compresión [Pa] respectivamente en $t=17s$	81
Figura 3.54. Distribución de los esfuerzos de Von Mises para un tiempo de 220s.....	81
Figura 3.55. Deformación plástica efectiva tras finalizar el estudio. Caso 4.	82

Figura 3.56. Componentes del tensor de esfuerzos y esfuerzo de Von Mises a lo largo de una línea a los 17s. Caso 4.....	82
Figura 3.57. Componentes del tensor de esfuerzos y esfuerzo de Von Mises a lo largo de una línea al término del estudio. Caso 4.....	83
Figura 3.58. Distribución de la temperatura sobre la lámina para un tiempo de 3.2s. Caso 5.....	84
Figura 3.59. Distribución de la temperatura sobre la lámina para un tiempo de 220s. Caso 5.....	84
Figura 3.60. Temperatura contra tiempo en los puntos medios superior e inferior. Caso 5.....	85
Figura 3.61. Distribución del esfuerzo de Von Mises sobre la lámina para un tiempo de 3.2s. Caso 5.....	85
Figura 3.62. Distribución del esfuerzo de Von Mises sobre la lámina para un tiempo de 220s. Plano x - y . Caso 5.....	86
Figura 3.63. Deformación plástica efectiva al finalizar el estudio. Caso 5.....	86
Figura 3.64. Componentes de tensor de esfuerzo y esfuerzo de Von Mises para un tiempo de 3.2s sobre una línea transversal a la fuente. Caso 5.	87
Figura 3.65. Componentes de tensor de esfuerzo y esfuerzo de Von Mises tras finalizar el estudio sobre una línea transversal a la fuente. Caso 5.....	87
Figura 3.66. Distorsión angular contra tiempo para el Caso 5.....	88
Figura 3.67. Comparación de las temperaturas en el punto central superior a través del tiempo para los casos con fuentes estáticas.....	89
Figura 3.68. Comparación de la temperatura para los Casos 3 y 5.....	90
Figura 3.69. Componente en x del tensor de esfuerzo.	91
Figura 3.70. Componente en y del tensor de esfuerzo.	91
Figura 3.71. Componente en y del tensor de esfuerzo (acercamiento).	92
Figura 4.1. Mallado utilizado para la simulación.....	93
Figura 4.2. Vista 3D del mallado.	93
Figura 4.3. Calor aplicado a la lámina [W] a través del tiempo [s]	94
Figura 4.4. Calor aplicado a la lámina [W] a través del tiempo [s] (acercamiento).	94
Figura 4.5. Distribución de la temperatura [°C] sobre la geometría para un tiempo de 17s	95
Figura 4.6. Distribución de la temperatura [°C] sobre la geometría para un tiempo de 220s	95
Figura 4.7. Distribución de los esfuerzos de Von Mises sobre la geometría para un tiempo de 17s	96
Figura 4.8. Iso-superficies para la fuente de calor [W/m ²] y la componente en x del tensor de esfuerzos (tensión) [Pa] respectivamente para $t=17s$	96
Figura 4.9. Iso-superficies para la fuente de calor [W/m ²] y la componente en x del tensor de esfuerzos (compresión) [Pa] respectivamente para $t=17s$	96
Figura 4.10. Iso-superficies para la fuente de calor [W/m ²] y la componente en y del tensor de esfuerzos [Pa] respectivamente para $t=17s$	97
Figura 4.11. Iso-superficies para la fuente de calor [W/m ²] y la componente en y del tensor de esfuerzos [Pa] respectivamente para $t=17s$	97

Figura 4.12. Fuente de calor [W/m^2] y componente en x del tensor de deformación [mm/mm] respectivamente en $t=17\text{s}$	98
Figura 4.13. Fuente de calor [W/m^2] y componente en x del tensor de deformación [mm/mm] respectivamente en $t=17\text{s}$	98
Figura 4.14. Fuente de calor [W/m^2] y componente en x del tensor de deformación [mm/mm] respectivamente en $t=17\text{s}$	98
Figura 4.15. Distribución de los esfuerzos de Von Mises tras finalizar el estudio.....	99
Figura 4.16. Deformación plástica efectiva sobre la geometría para el caso de formado láser.	99
Figura 4.17. Curvas obtenidas de Kyrsanidi et al. [30], a) Temperatura contra tiempo para la cara inferior y superior, b) Componente en x del tensor de esfuerzos,) Componente en x del tensor de deformaciones plásticas, d) Distorsión angular.....	100
Figura 4.18. Temperatura [$^{\circ}\text{C}$] contra a [s] medida en el punto central de la lámina.....	101
Figura 4.19. Comportamiento del ángulo de deflexión [$^{\circ}$] con respecto al tiempo [s].....	101
Figura 4.20. Distorsión final de la lámina sobre el plano x - z	102
Figura 4.21. Campo de temperatura a los 100s del proceso [31].....	102
Figura 4.22. Distribución de esfuerzos residuales transversales en $t=300\text{s}$ [31].	103
Figura 4.23. Esfuerzos transversales sobre la lámina.	103
Figura 4.24. Esfuerzos residuales longitudinales en $t=300\text{s}$ [31].	104
Figura 4.25. Esfuerzos longitudinales sobre la lámina.	104
Figura 4.26. Componente en x del tensor de deformación plástico medido en el centro de la lámina para tres puntos de interés.	104
Figura 4.27. Componente en x del tensor de esfuerzos sobre los tres puntos medios indicados.	105
Figura 4.28. Comparación de las temperaturas con la referencia.	106
Figura 4.29. Comparación del ángulo de deflexión con el caso de referencia. Primer caso de estudio.	106
Figura 4.30. Mallado para el segundo caso de validación.	107
Figura 4.31. Distorsión angular a través del tiempo. Segundo caso de validación. Kyrsanidi et al. [30].	107
Figura 4.32. Comparación del ángulo de deflexión con el caso de referencia. Segundo caso de validación.	108

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Modelos materiales básicos elasto-plásticos	51
Tabla 3.1. Propiedades del material utilizado en las simulaciones (Acero para barcos 1.0584 (D36)) [29]	54
Tabla 3.2. Temperaturas medidas en el punto medio de la lámina para cada uno de los casos	89

INTRODUCCIÓN

Antecedentes

La simulación de procesos industriales es cada vez más común en la industria, ya sea, para el diseño de nuevos procesos de producción u optimización de procesos ya existentes. La simulación también ayuda al diseño y evaluación de componentes favoreciendo el desarrollo de elementos más baratos y seguros. El incremento en la capacidad de cómputo así como la implementación de nuevas técnicas computacionales y numéricas a lo largo de estos años, han permitido que las simulaciones sean cada vez más rápidas.

Las simulaciones computacionales para estudiar los diversos procesos de soldadura se han realizado desde la de década de los 70's para componentes mecánicos que operaban en ambientes severos por un largo periodo de tiempo, tales como, reactores nucleares, ya que se sabe que la presencia de esfuerzos residuales a tensión sobre superficies expuestas a ambientes radiactivos es uno de los principales factores de contribución para el crecimiento lento de grietas. Éste es un serio problema para contenedores con desechos nucleares que están cerrados por medio de soldadura, y cuyo nivel de radiactividad permanece peligrosamente alto por muchos siglos [1]. Posteriormente su utilización se empezó a propagar a otros sectores donde la seguridad es crítica tales como la industria aeroespacial, ya que en un aeroplano la presencia de esfuerzos residuales tiene una profunda influencia sobre la integridad de esos componentes.

El formado láser es una técnica innovadora que utiliza un haz láser para formar láminas de metal por medio de esfuerzos térmicos más que por fuerzas externas, el proceso fue introducido originalmente en los 80's [2] y ha motivado muchas investigaciones en diferentes sectores impulsado principalmente por las problemáticas que se presentan durante y posterior al proceso. Actualmente las simulaciones numéricas son utilizadas ampliamente en la industria manufacturera aplicadas a componentes cuyo desempeño es crucial para la seguridad o en casos donde el costo por la falla de un elemento es importante.

Justificación del estudio

En procesos de manufactura, como soldadura o recubrimiento duro, el calentamiento y enfriamiento rápido del material causan la generación de esfuerzos residuales en la pieza de trabajo. Estos esfuerzos residuales van a la par con deformaciones, que generalmente no son deseables. Además, la presencia de estos esfuerzos residuales son un factor importante para la calidad y durabilidad de la soldadura o las capas depositadas, y por lo tanto la seguridad e integridad de los productos.

En piezas manufacturadas siempre resulta importante conocer sus propiedades finales, ya que de ello dependerá su desempeño. Uno de los métodos más empleados para obtener las características finales de una determinada pieza es mediante prueba y error. Aquí la experiencia previa juega un papel importante, ya que existen muchos parámetros que pueden ser modificados para obtener las características finales. Otro método que en recientes décadas ha tomado mucha fuerza es el empleo de simulaciones numéricas, ya que por medio de ellas es posible realizar un gran número de pruebas que permiten establecer parámetros optimizados y es aquí donde la competitividad en el mercado ha promovido que estas simulaciones sean aprovechadas en la manufactura, logrando así, una mayor eficiencia y calidad, ya que ahorran en buena medida tiempo y dinero, ambos son factores cruciales para una alta competitividad industrial. Otra de las ventajas es que es posible corregir errores en determinados procesos o predecir ciertos comportamientos antes de que la pieza real sea manufacturada proporcionando una mayor seguridad.

Uno de los principales problemas a superar en proceso de manufactura son esfuerzos residuales, ya que se sabe, reducen el tiempo de vida de un componente cuando éste es sometido a cargas que pueden desencadenar fallas por fatiga, además, pueden llegar a producir agrietamientos en la pieza de trabajo y favorecer la corrosión. De aquí la necesidad de saber la magnitud de los esfuerzos residuales presentes en el componente, pues ellos determinarán directamente cómo será su desempeño, sin embargo, el determinar tales esfuerzos no resulta nada sencillo. Actualmente existen técnicas experimentales, pero son costosas, difíciles de realizar y limitadas a solo algunos puntos.

Por esta razón se ha buscado su cuantificación mediante simulaciones computacionales las cuales son capaces de proporcionarnos, entre otras cosas, los esfuerzos residuales en todo el dominio. Otra de las consecuencias que se tiene en estos procesos es la distorsión de los elementos, que en algunos casos no es deseable, pues dicha distorsión puede provocar que el elemento salga de las tolerancias especificadas, tal es el caso de los procesos de soldadura o de los recubrimientos. Por otra parte la distorsión controlada de la pieza es lo que se busca en procesos como el formado láser.

Objetivo general

Obtener e implementar modelos de simulación que sirvan para demostrar los fenómenos que causan la generación de esfuerzos residuales y deformaciones en procesos térmicos, enfocándose en particular al proceso de formado láser, buscando su validación por medio de datos experimentales y de simulación obtenidos a partir de casos de referencia encontrados en la literatura.

Objetivos específicos

1. Analizar los factores por los que se generan esfuerzos residuales por efecto del calentamiento local en procesos térmicos.
2. Estudiar el impacto que tiene cada uno de los factores involucrados en el comportamiento del caso de estudio, buscando un modelo que sea capaz de describir de la mejor forma estas relaciones.
3. Implementación y simulación de modelos que sean capaces de describir los procesos termo-mecánicos, buscando su validación por medio de datos experimentales o casos de referencia enfocados al formado láser.

1 ESTADO DEL ARTE DE PROCESOS TERMO-MECÁNICOS

1.1 Introducción

Se llaman procesos termo-mecánicos a aquellos procesos en los que está presente una fuente de calor, la cual, produce alteraciones mecánicas en nuestro elemento de trabajo que pueden llegar a ser visibles tales como grietas o la distorsión de la pieza. También se presentan alteraciones que no son visibles, como es el caso de los esfuerzos residuales, que son generados internamente en el material. Es importante destacar que tales alteraciones pueden resultar perjudiciales, sin embargo, en algunos casos se pueden aprovechar.

Los procesos termo-mecánicos son ampliamente utilizados en el sector industrial para procesos de unión, corte, formado, recubrimiento, tratamientos térmicos, etc. Dichos procesos están íntimamente ligados con la calidad final de los productos, por esta razón, hay una gran cantidad de trabajos dedicados a su estudio y análisis con la intención de comprender mejor la física que está detrás de cada uno de estos fenómenos y tener un mejor control de las propiedades finales de los productos, además, el entender más a fondo cada uno de los procesos puede ayudar a la mejora de técnicas ya existentes.

Uno de los medios que ha servido para el estudio y desarrollo de productos y procesos es el análisis por medio de simulaciones computacionales, las cuales se basan en diversos métodos numéricos que permiten resolver los sistemas de ecuaciones diferenciales de los diversos fenómenos físicos considerados en el problema. Gracias a los avances realizados en los métodos numéricos y el incremento en la capacidad de los equipos de cómputo, ha sido posible llevar a cabo simulaciones que incluyen modelos cada vez más complejos. Uno de los métodos numéricos más empleados para la solución de las ecuaciones diferenciales gobernantes es el método de los elementos finitos (MEF) y es el que se emplea en este trabajo.

1.2 Soldadura

La soldadura es un proceso de fabricación utilizado en la unión de metales, es eficiente, económico y muy versátil ya que puede ser utilizado en diferentes ambientes tales como aire, agua e incluso en el espacio exterior. Los usos que tiene van desde aplicaciones críticas como es el caso de cuartos de fisión en plantas nucleares [3] hasta en la fabricación de electrodomésticos.

El proceso de soldadura es un proceso de unión. Existen diversos procesos de unión. A continuación se clasifican de acuerdo a la American Welding Society (AWS).

Podemos definir tres categorías principales para los procesos de unión:

- Soldadura
- Unión con adhesivos
- Sujeción mecánica

A su vez los procesos de soldadura se clasifican por lo general en tres categorías básicas:

- Soldadura por fusión
- Soldadura de estado sólido
- Soldadura fuerte y soldadura blanda.

Algunos tipos de procesos de soldadura pueden clasificarse tanto en la categoría de fusión como en la de estado sólido. La Figura 1.1, muestra de forma esquemática los procesos de unión.

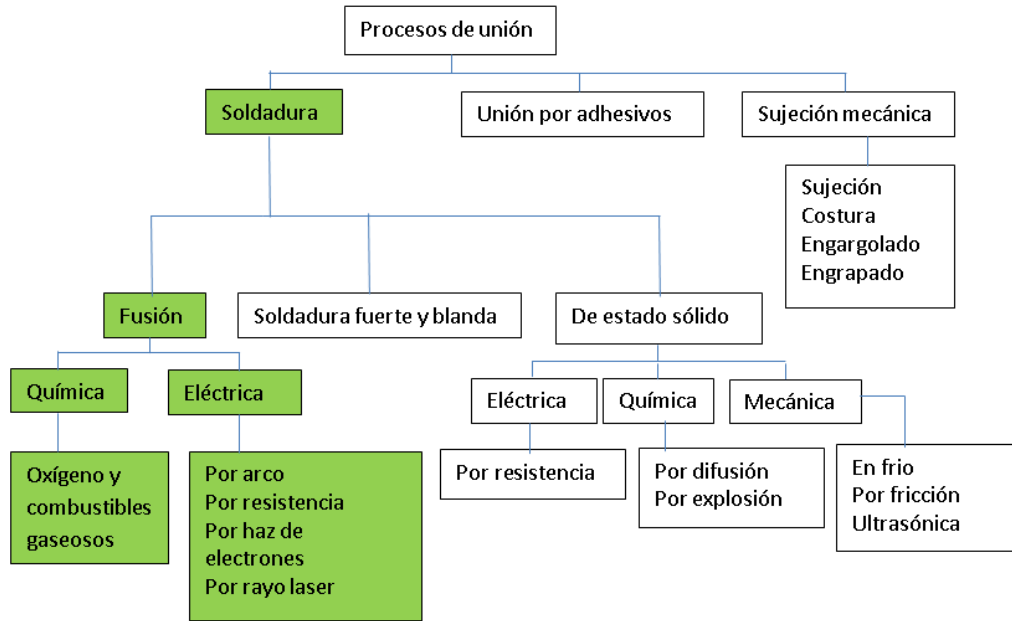


Figura 1.1. Clasificación de los procesos de unión [4].

Como se puede observar en la Figura 1.1 existen varios procesos de soldadura usados actualmente en la industria, la diferencia es la forma en la que se genera el calor y, como consecuencia, cada proceso tiene un modelo diferente, sin embargo, todos se pueden modelar de forma muy parecida y también con los demás procesos mencionados en este trabajo.

En la mayoría de los casos es preciso evaluar la calidad de una soldadura, ya que el tener defectos repercutirá directamente en la reducción de su tiempo útil de vida. La evaluación de los procesos de soldadura se basa en la integridad de la unión, ausencia de defectos, microestructura y pruebas mecánicas. De esta forma se puede garantizar que la unión podrá soportar las cargas a las que se someterá si el proceso se lleva adecuadamente.

1.2.1 Descripción del proceso de soldadura

Para describir el proceso ilustrativamente, se considerará que se realiza el proceso a través de una línea recta. Un área localizada es calentada y gracias a las altas temperaturas alcanzadas rápidamente es llevada a su punto de fusión. Como consecuencia se

obtienen elevados gradientes térmicos que hacen que el material se expanda de forma desigual, sin embargo, la expansión es restringida por el material circundante, el cual, está a una temperatura inferior y debido a que la resistencia a la cedencia es más baja en la zona de alta temperatura, deformaciones plásticas se desarrollarán en el área soldada. Cuando el área se enfría el material se contrae. Durante el enfriamiento el material recuperará su resistencia, por lo regular, a un nivel más elevado como consecuencia del endurecimiento por deformación, dando como resultado, esfuerzos residuales. Otra de las características negativas es la distorsión final, ya que, en algunas ocasiones se percibe a simple vista y la pieza puede llegar a salir de las tolerancias permitidas.

1.3 Recubrimiento duro

Se entiende por recubrimientos duros a aquellas películas con las que se recubren las superficies de muchas piezas de uso técnico con la finalidad de proporcionarles mayor dureza y resistencia al desgaste [5]. Los recubrimientos duros entran dentro de la categoría de tratamientos superficiales, los cuales son aplicados para mejorar las propiedades o características de algún componente. A continuación se mencionan algunas de las características [4]:

- Aumentar la resistencia al desgaste, a la erosión y a la penetración (en las correderas de las máquinas herramientas, superficies de desgaste de maquinaria, ejes, rodillos, levas y engranes).
- Controlar la fricción sobre superficies deslizantes de las herramientas, dados, cojinetes y correderas de máquinas.
- Reducir la adhesión (contactos eléctricos).
- Beneficia la lubricación (modificar la superficie para que retenga lubricantes).
- Incrementan la resistencia a la corrosión y oxidación.
- Mejorar la resistencia a la fatiga.
- Reconstruir superficies de componentes desgastados, como herramientas, dados y componentes de máquinas.

1.3.1 Descripción del proceso de recubrimiento duro

De entre todos los procesos de recubrimiento duro se explicará el de recubrimiento láser, el cual utiliza un haz de alta intensidad para fundir el material que será depositado como una capa protectora sobre superficies de trabajo. El material puede ser depositado por una de tres formas [6]:

1. Inyección de polvo (Powder injection)
2. Colocación previa del polvo (Pre-placing the powder)
3. Por alimentación de alambre (Wire feeding)

Posteriormente un haz láser genera el baño fundido en el sustrato y permite al material adicional ser fundido. Debido al movimiento del haz láser sobre la superficie, una capa sólida es formada inmediatamente después de que el láser ha pasado. Igual que en el proceso de soldadura donde el gradiente térmico causa esfuerzos residuales al final del proceso en el recubrimiento duro existe otra causa adicional debida a los diferentes materiales utilizados (sustrato y material de aporte) que tendrá como consecuencia una diferencia en el coeficiente de expansión térmica, haciendo que uno de los materiales se expanda más que el otro (efecto del bimetálico). Esta característica no permite una expansión pareja aun si se tuviera un calentamiento uniforme.

El recubrimiento láser por inyección de polvo (Figura 1.2) es un proceso muy superior en cuanto a eficiencia energética y permite un mejor control de proceso y reproducibilidad. El rango de los espesores de la capa depositada oscilan entre 0.05-2mm.

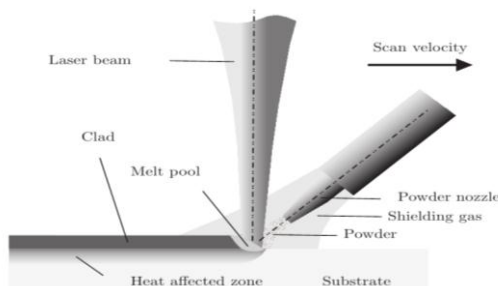


Figura 1.2. Proceso de recubrimiento láser. [6]

1.4 Formado láser

El formado láser es una técnica que utiliza un haz láser para formar láminas de metal por medio de esfuerzos térmicos en lugar de usar fuerzas externas, que es cómo se llevan a cabo los procesos de formado convencionales. Al no haber una carga mecánica externa la distribución de temperatura es la que controla la deformación de la placa. Por lo tanto, es muy importante entender como los diversos parámetros del proceso afectan la transferencia de calor generada por el haz. El proceso de formado láser es logrado mediante la creación de esfuerzos térmicos en la pieza de trabajo debido a la radiación de un haz láser, esto induce calentamientos rápidos localizados y posteriormente sigue una etapa de enfriamiento, que es cuando la energía del láser ha sido retirada. Entre algunas aplicaciones podemos destacar el prototipado rápido dentro de las industrias automotrices, aeroespaciales y en la construcción de barcos. A una escala microscópica es utilizado en la industria microelectrónica para el ajuste preciso de ciertos componentes.

En el formado láser, la forma y grado de flexión son determinados por la intensidad, la velocidad de escaneo del haz, el tamaño y forma del haz así como también de la trayectoria seguida por éste [7]. Los factores importantes en el formado láser pueden ser divididos en tres grupos: parámetros de la fuente calor, propiedades del material y geometría de la placa.

1.4.1 Descripción del proceso de formado láser

En los procesos convencionales de formado, la lámina de metal es deformada plásticamente cuando es expuesta a esfuerzos superiores a su resistencia a la cedencia. En el proceso de formado láser la deformación ocurre por medio de la introducción de esfuerzos térmicos en la superficie de la lámina de metal durante el calentamiento y el subsecuente enfriamiento. Geiger y Vollertsen [8] explican tres importantes mecanismos de comportamiento termo-mecánico relacionados al formado láser, cada uno asociado a combinaciones específicas de componentes geométricas y parámetros del proceso láser,

éstas incluyen el mecanismo de gradiente de temperatura (TGM), mecanismo por pandeo (BM), y mecanismo de abombamiento (UM) Figura 1.3.

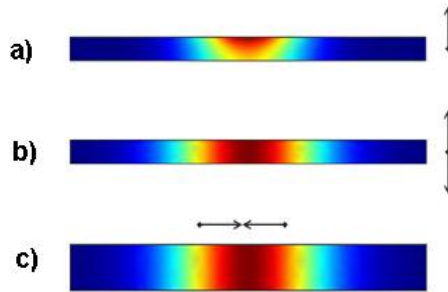


Figura 1.3. Mecanismos del formado láser: a) TGM, b) BM, c) UM

El mecanismo por gradiente de temperatura es dominante si el diámetro de la fuente láser es del orden del espesor de la lámina. Cuando un haz láser de alta intensidad es guiado rápidamente a lo largo de la superficie de una lámina de metal, el material absorbe parte de la energía irradiada por el láser, dicha energía es conducida dentro del material a una tasa más baja que la de la absorción de la superficie, dando lugar a un gradiente de temperatura sobre su espesor. Como resultado ocurre una expansión térmica no uniforme, que hace que el material se expanda en la zona calentada, produciendo una flexión con una concavidad hacia el lado contrario a donde se aplica la fuente de calor. Por otro lado, en la etapa de enfriamiento la lámina es flexionada hacia la fuente láser debido a la contracción térmica de la superficie (Figura 1.4).

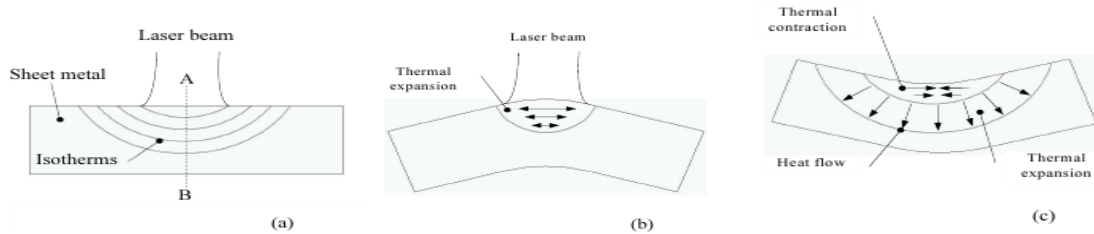


Figura 1.4. Formado láser por medio del mecanismo de gradiente de temperatura, a) gradiente de temperatura, b) durante el calentamiento, c) durante enfriamiento. [9]

El mecanismo de pandeo permite flexionar hacia cualquiera de los lados, ya sea hacia la fuente láser o en sentido contrario y actúa cuando la superficie irradiada es grande en comparación con el espesor del material, así el gradiente de temperatura en entre la

superficie superior e inferior es pequeño. La expansión térmica inducida será obstaculizada por los alrededores que están a una temperatura más baja provocando el pandeo del material. En la región de transición entre el material pandeado y el material plano hay una gran deformación plástica, debido a la alta temperatura y bajo esfuerzo de cedencia.

El mecanismo de abombamiento involucra parámetros similares a los de pandeo, pero se presenta cuando los parámetros de la geometría son tan rígidos que no se puede producir pandeo. En lugar de ello, se produce un acortamiento y abombamiento en la zona irradiada.

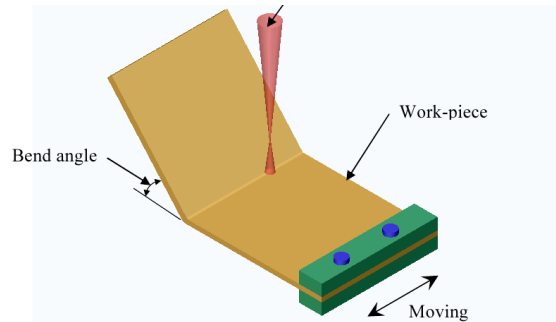


Figura 1.5. Vista esquemática de la irradiación de una línea recta por medio de un haz láser para producir un ángulo de flexión sobre una lámina. [9]

En los procesos de formado láser se puede mantener fijo el láser mientras la pieza de trabajo se va moviendo. La Figura 1.5 muestra el calentamiento sobre una línea recta para poder producir una flexión en la lámina. Alternativamente se puede escanear la fuente láser por medio de un espejo galvano que gira sobre dos ejes para mover el punto focal del haz sobre el área de trabajo, manteniendo la pieza fija.

1.5 Problemática común

Todo proceso que involucre un calentamiento tendrá como efecto una dilatación térmica, ésta es la culpable de dar lugar a ciertos efectos que, en la mayoría de las ocasiones no son deseables. Por una parte tenemos el calentamiento irregular de un material, que provoca una expansión no uniforme mientras que un calentamiento regular también puede provocar expansiones no uniformes de la pieza, como es el caso de piezas donde

existen dos materiales con distinto coeficiente de dilatación térmica. En ambas situaciones la deformación térmica desigual puede llegar a provocar esfuerzos residuales si se supera la resistencia a la cedencia del material. Cuando estos esfuerzos residuales son demasiado altos pueden dar lugar a agrietamientos, en particular cuando el material es frágil como sucede generalmente con los recubrimientos duros, sin embargo, a veces también ocurre en la soldadura, por ejemplo, cuando se forma la fase dura y frágil de martensita durante la soldadura de aceros al carbón al enfriarse el material de forma rápida. Los esfuerzos residuales también están íntimamente ligados a las distorsiones finales en la pieza de trabajo. A continuación se tratarán los siguientes problemas:

- Deformación
- Esfuerzos residuales
- Agrietamiento

1.5.1 Deformación

La deformación que se presenta en procesos termo-mecánicos se debe a la dilatación térmica producida por la aplicación de calor sobre la pieza de trabajo. Si calentamos uniformemente una pieza nos daremos cuenta que es fácil cuantificar las distorsiones finales producidas, sin embargo, el problema viene cuando el calentamiento no es uniforme dando como resultado una deformación que no resulta tan fácil de predecir.

En procesos como la soldadura la intención es la de unir ciertas piezas pero siempre respetando algunas tolerancias geométricas y es aquí donde se encuentra el problema, pues como se mencionó en el párrafo anterior, la deformación por un calentamiento no uniforme es difícil de predecir. Por esta razón se acostumbra a restringir las piezas de trabajo, ya que así se evita la deformación excesiva. Desgraciadamente esto acarrea otra consecuencia que es un incremento en los esfuerzos residuales.

La distorsión final provocada por el proceso de soldadura, como se observa en la Figura 1.6, puede ayudar a comprender uniones más complejas y a predecir ciertos comporta-

mientos, por ejemplo, puede verse que la contracción de la soldadura tanto en la dirección longitudinal como transversal son las que provocan la distorsión total. El caso 1 en la figura muestra el efecto de la contracción transversal y el caso 2 es debido a la contracción longitudinal. Si la placa es relativamente delgada para el tamaño de la soldadura entonces ésta podría arquearse ya que la contracción está encima del eje neutro de la placa como en el caso 3. Una contracción transversal no uniforme sobre el espesor dará una distorsión angular como en el caso 4. Otra deformación es llamada “warping”, caso 5, que es una deformación de torsión sobre el eje longitudinal de la soldadura.

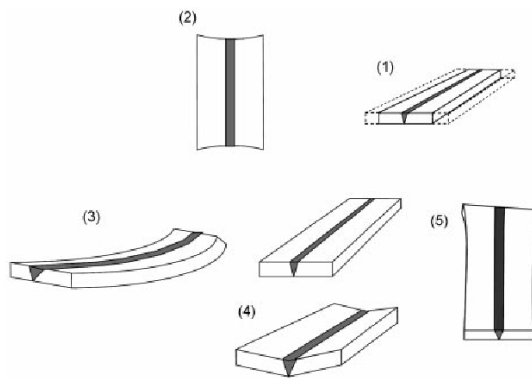


Figura 1.6. Tipos de distorsión provocados por el proceso de soldadura. [10]

Contrariamente a los procesos de soldadura donde se evita una deformación mediante la restricción de la pieza, en los procesos de formado por láser la deformación controlada es lo que se busca, ya que se aprovecha la deformación producida por el gradiente de temperatura cuando la fuente de calor pasa por la pieza de trabajo, de esta manera, podemos obtener una gran cantidad de formas y diseños gracias a la infinidad de trayectorias que se pueden generar en la pieza [7] [11].

1.5.2 Esfuerzos residuales

Otro de los efectos que en la mayoría de las ocasiones no es deseable, son los esfuerzos residuales. Los esfuerzos residuales pueden ser definidos como aquellos esfuerzos internos que permanecen en el material o cuerpo después de un proceso de manufactura en la ausencia de fuerzas externas o gradientes térmicos [12].

Los esfuerzos residuales los podemos dividir en dos:

1. Compresión
2. Tensión

Los esfuerzos residuales son de importancia dado que los esfuerzos totales en el cuerpo se componen de la suma de los esfuerzos causados por la carga externa que soporta la pieza y los esfuerzos residuales ya presentes en ésta. En general, esto resulta en una disminución de la carga máxima con la que se alcanza el esfuerzo de cedencia. Pero más importante es el efecto de los esfuerzos residuales en la resistencia a la fatiga y para esto puede tener tanto efectos positivos como negativos. Los esfuerzos compresivos se consideran benéficos ya que es sabido que mejoran la resistencia a la fatiga de un componente determinado. Por otra parte los esfuerzos residuales a tensión resultan perjudiciales ya que disminuyen la resistencia a la fatiga (Figura 1.7) y son un factor importante para la corrosión y agrietamiento en frío, por tanto, influyen directamente en el tiempo de vida de la estructura, el cual siempre es un factor que se desea conocer.

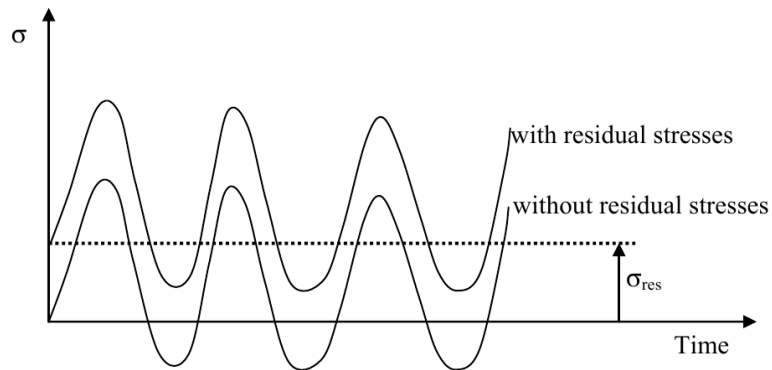


Figura 1.7. Efecto de los esfuerzos residuales en los ciclos de esfuerzos [13]

En los procesos de manufactura que involucren grandes gradientes térmicos no es posible evitar por completo los esfuerzos residuales, sin embargo, hay algunos métodos que permiten minimizarlos, de hecho, si la pieza no se restringe, los esfuerzos residuales disminuyen en buena medida pero la deformación se incrementa, como se puede ver en la Figura 1.8. En muchas ocasiones esta deformación se percibe a simple vista y por lo

regular las grandes deformaciones no son deseadas en procesos de soldadura. Por el contrario, si restringimos por completo la pieza (Figura 1.8), los esfuerzos residuales se incrementan en demasía y la pieza podría llegar a agrietarse una vez puesta en servicio. Es importante mencionar que aunque no existan gradientes térmicos se pueden producir esfuerzos en un material. Este es el caso de los recubrimientos térmicos donde la presencia de dos materiales distintos implica tener coeficientes de dilatación térmica diferentes y, aunque ambos materiales fueran sometidos a un cambio uniforme de temperatura se producirían esfuerzos por la diferente dilatación que sufriría cada uno de ellos.

Un estudio realizado por Kandil [12] hace algunos años reveló que para el 50% de las industrias manufactureras entrevistadas en Reino Unido (la población fue cerca de 50 industrias), los esfuerzos residuales eran de gran importancia, el 30% de mediana importancia y que el 60% del total realizaba pruebas experimentales para determinar los esfuerzos residuales. Estos números van en aumento, ya que cada vez los estándares de calidad y seguridad son más altos y deben ser satisfechos bajo el menor costo para seguir siendo competitivos.

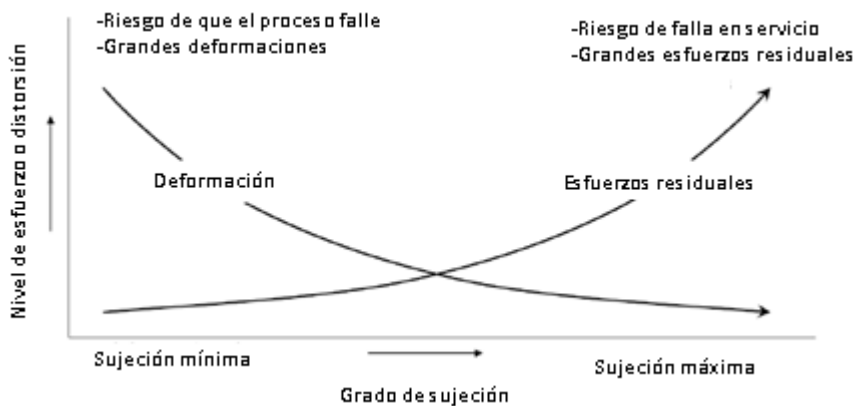


Figura 1.8. Nivel de esfuerzo o distorsión producido por el grado de sujeción.

1.5.3 Agrietamiento

Como se mencionó anteriormente los esfuerzos residuales pueden producir un agrietamiento en frío, esto quiere decir que el agrietamiento se produce después de haber aplicado la carga térmica, generalmente ocurre durante el enfriamiento de la pieza.

Existe otro tipo de agrietamiento que se conoce como agrietamiento en caliente y se ha demostrado que es un problema multifacético [14] donde influyen muchos factores tales como, el rango de solidificación. Este efecto aparece durante el proceso térmico, cuando la soldadura ya se está solidificando, pero cuando todavía existe una fracción de la fase líquida en la soldadura. En este caso no son los esfuerzos residuales los que lo producen, pues éstos todavía no existen, lo que lo produce es una deformación que abre la soldadura en dirección transversal, mientras que todavía existe la fracción de líquido, por lo que la zona no es capaz de resistir y el líquido se retira de la fracción solidificada dejando una grieta. Esto generalmente ocurre en aleaciones que tienen un intervalo grande entre la temperatura en la cual inicia la solidificación (temperatura líquidus) y la temperatura en la que el material se encuentra completamente solidificado (temperatura sólidus). En el caso de recubrimiento duro, el agrietamiento en frío es de particular consideración, dado que los materiales de recubrimiento que se aplican son duros pero generalmente también son frágiles.

1.6 Mitigación de efectos negativos y optimización de procesos

Uno de los objetivos en el diseño del componente y el proceso de manufactura es mitigar los efectos no deseables de los esfuerzos residuales en los componentes por medio de una selección apropiada del material, el proceso de manufactura y sus parámetros de operación, la geometría estructural incluyendo la sujeción y la secuencia de fabricación. Una forma simple pero efectiva para poder reducir los esfuerzos residuales es precalentar la pieza de trabajo, dado que de esta forma el gradiente térmico es menor.

Para poder evaluar y optimizar el componente y el proceso de manufactura de mejor forma es necesario que el diseñador tenga un modelo predictivo confiable que pueda ser usado desde las etapas tempranas del diseño.

Es común que los elementos que han recibido algún proceso de manufactura se sometan a tratamientos térmicos como el recocido o procesos mecánicos como el granallado que

permiten aliviar los esfuerzos residuales a tensión o inclusive pueden crear esfuerzos residuales benéficos de compresión en la superficie.

El recocido es un proceso térmico utilizado para la eliminación de esfuerzos residuales sin afectar las propiedades mecánicas de la pieza terminada, podemos distinguir las siguientes etapas que pueden tener lugar en este proceso [15]:

- Recuperación
- Recristalización
- Crecimiento granular

Cuando se deforma un metal una pequeña fracción de la energía utilizada para deformarlo es almacenada como energía de deformación. Esta energía se acumula en forma de dislocaciones y defectos puntuales. Durante la recuperación, esta energía almacenada es liberada a causa del movimiento de las dislocaciones (las cuales se mueven sin esfuerzos externos aplicados) como resultado de la difusión atómica. Debido a que durante la recuperación no se ha reducido el número de dislocaciones, las propiedades mecánicas del metal quedan relativamente igual; sin embargo, al reordenar las dislocaciones se han reducido o incluso se han eliminado los esfuerzos residuales; esta recuperación a menudo se le conoce como recocido para eliminación de esfuerzos. Aun cuando la recuperación ha sido completada los granos de la estructura cristalina todavía se encuentran en un estado de elevada energía de deformación. Enseguida el proceso de movimiento de dislocaciones sigue y se empiezan a moverse a las fronteras de grano donde desaparecen, reparando de esta forma la estructura cristalina a su estructura normal. Durante este proceso el material se restaura a sus propiedades previas a la deformación plástica.

La recristalización se caracteriza por la formación de nuevos cristales en la estructura y suele ocurrir cuando el material es deformado al grado que la estructura cristalina queda fuertemente dañada, de tal forma que resulta más factible que se formen nuevos granos en lugar de la restauración gradual de los granos existentes. En esta etapa, las propieda-

des mecánicas que fueron cambiadas durante el proceso de deformación son restauradas a sus valores previos a la deformación plástica, es decir, el metal se vuelve más suave y dúctil, esto puede ser ventajoso dado que pueda dejar una estructura cristalina más fina, dependiendo del número de nuevos granos que se forman a partir de la estructura anterior. Cuando la temperatura de recocido se realiza a temperaturas superiores, tanto la recuperación como la recrystalización ocurren con rapidez, produciendo una estructura granular fina. Cuando la temperatura se mantiene por más tiempo a un nivel elevado, los granos empiezan a crecer: el crecimiento de ciertos granos es favorecido, lo cual elimina a los más pequeños, este fenómeno se conoce como crecimiento de grano. En general, esto no es deseable dado que disminuye la resistencia a la cedencia y la ductilidad.

Cabe mencionar que en los procesos de soldadura con aporte de material distinto al material base y recubrimientos duros no funciona del todo bien un tratamiento térmico, pues la diferencia en la expansión térmica seguirá produciendo esfuerzos residuales. En otros casos se aplican tratamientos superficiales, como el granallado, el cual mejora la resistencia a la fatiga gracias a la inclusión de esfuerzos residuales a compresión.

1.7 Efectos multi-físicos en procesos termo-mecánicos

El análisis de un proceso donde se involucre fusión del material (soldadura y recubrimiento duro) resulta en un gran desafío a los investigadores, ya que estos procesos involucran complejos fenómenos físicos. Analicemos primero la fuente de calor, que como se mencionó anteriormente (Figura 1.1), existen diversos mecanismos físicos y químicos para producir dicha fuente de los cuales va a depender la forma en la que el calor se distribuya sobre nuestro material. Cuando la fuente de calor interactúa con el material, éste reacciona cambiando su temperatura. Tal aumento de temperatura puede producir alteraciones en éste al grado de hacer cambiar su estado, pasando de sólido a líquido e incluso gaseoso. Además las transformaciones de fase en aceros son gobernadas por el historial de temperatura. Inversamente, durante las transformaciones de fase el calor latente influye en el campo de temperatura actual. Las cargas térmicas aplicadas a la estructura inducen deformación. Además cada transformación de fase es una fuente de

deformación, principalmente debidas a las variaciones de densidad y al grado de deformación plástica. La descripción anterior omite muchos de los fenómenos que ocurren en un proceso real pero es suficiente para darse cuenta que los procesos de soldadura, recubrimiento duro y formado láser son inherentemente multifísicos. Actualmente existen diversas formas de dividir este problema dependiendo de la finalidad y de que tan profundo se requiera hacer el estudio. Lindgren [10] realiza la siguiente descomposición de los fenómenos involucrados en el proceso de soldadura (Figura 1.9).

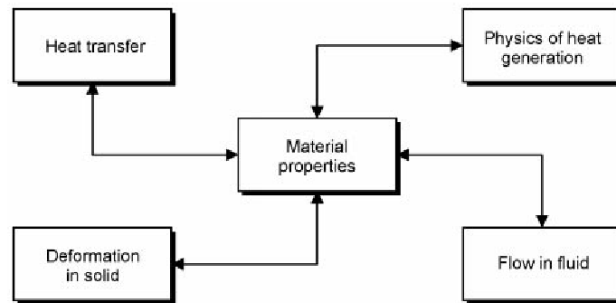


Figura 1.9. Fenómenos involucrados en el modelado de soldadura por fusión [10].

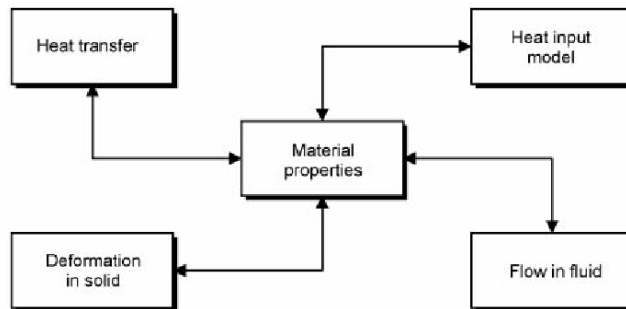


Figura 1.10. Fenómenos involucrados en el modelado de soldadura por fusión sin considerar cómo se produce el calor [10].

La descomposición realizada en la Figura 1.9 considera la forma en que es generado el calor, sin embargo, el realizar ese tipo de modelado implica conocer a fondo todos los fenómenos involucrados en cada proceso. Esto trae como consecuencia simulaciones muy complicadas. Para evitar el modelado de la física de la generación de calor se puede utilizar en su lugar un modelo de calor de entrada (Figura 1.10). La implementación de dicho modelo no considera la física que hay detrás de la fuente pero trata de representarla lo mejor posible.

Como puede verse en la Figura 1.9 y Figura 1.10 se considera un modelo que incluya el flujo del baño líquido, pues la interacción de éste, tiene gran influencia en, por ejemplo, la solidificación del material. La corriente principal es ignorar este flujo del fluido y considerar los efectos en el modelo de calor de entrada. Dando como resultado el esquema de la Figura 1.11.

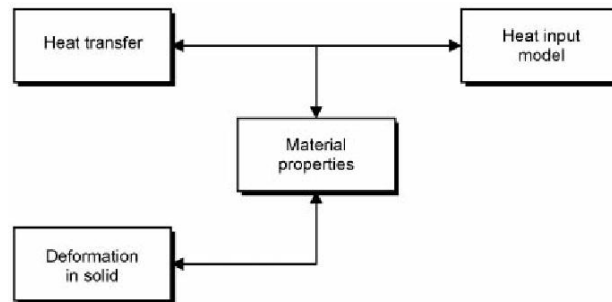
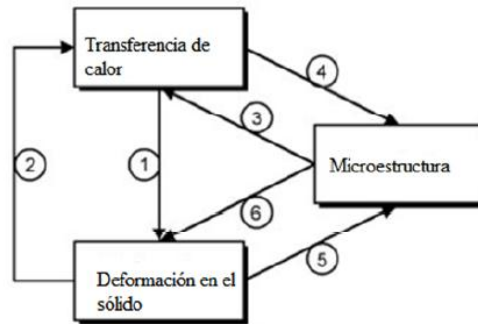


Figura 1.11. Fenómenos involucrados en el proceso de soldadura sin considerar el flujo del fluido y la física de la generación de calor [10].

La complejidad del problema se observa en la Figura 1.12, donde se puede apreciar la importancia de las propiedades del material y la interrelación que existe entre cada uno de los fenómenos que ocurren en el proceso haciendo que la solución al problema sea demasiado complicada computacionalmente. Por ello se han empleado diversas estrategias para su resolución. Una de ellas ha sido el desacoplar los fenómenos, pues no todos los acoplamientos tienen la misma importancia (Figura 1.13) y es aquí donde las simplificaciones pueden ser aplicadas, ya que la solución simultánea de los campos térmico y mecánico no es recomendada, puesto que implicaría resolver un gran sistema de ecuaciones no lineales, lo cual es computacionalmente más demandante que resolver múltiples sistemas de forma secuencial. Podemos ver que el efecto producido por la parte térmica sobre la mecánica es fuerte, pero inversamente el acoplamiento es débil, lo cual significa que si el campo mecánico varía, éste no tiene gran influencia sobre el campo térmico. De esta forma es posible eliminar tal acoplamiento sin que el problema en general se vea fuertemente afectado. Por ello es común que el efecto de los campos de esfuerzos y deformaciones sea usualmente ignorado para los cálculos de transferencia de calor. La aproximación típica es dividir cada paso de tiempo en un análisis térmico puro

seguido de un análisis mecánico, con el resultado del campo de temperatura como una carga. El calor generado debido a la deformación en el análisis mecánico puede ser calculado y aplicado en el siguiente paso de tiempo térmico, pero éste es usualmente despreciado. Algunas veces es necesario hacer la inclusión de un modelo de microestructura, ya que, por ejemplo, en el caso de los materiales donde hay más de una fase presente, el comportamiento resulta más complejo, puesto que durante las transformaciones de fase el calor latente influye de manera considerable en el campo de temperatura actual y el comportamiento del material debido a los cambios de microestructura depende fuertemente de la temperatura y del historial de deformación. Además, las propiedades termo-mecánicas varían de fase a fase. Por tanto, el suponer un material homogéneo resultaría en una predicción deficiente. El modelo que incluye la microestructura es llamado modelo termo-mecánico-metalúrgico.



1. La dilatación térmica conduce a la deformación.
2. La deformación genera relativamente una pequeña cantidad de calor en el material debido a la disipación del plástico.
3. El calor latente debido a los cambios de fase y las propiedades térmicas dependen de la microestructura y la temperatura.
4. La temperatura impulsa los cambios microestructura.
5. La deformación afecta a los cambios de microestructura.
6. Las propiedades mecánicas dependen de la microestructura y la temperatura.

Figura 1.12. Acoplamientos en un modelo termo-mecánico-metalúrgico. [10]

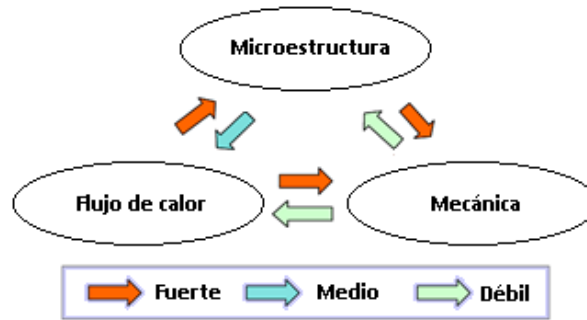


Figura 1.13. Grado del acoplamiento entre los campos considerados.

1.8 Comportamiento inelástico del material

Los materiales, especialmente en estado sólido, se comportan de maneras muy complejas si consideramos todo el rango posible de temperaturas y deformaciones. Por ello, no es factible escribir una ecuación o conjunto de ecuaciones que describa de forma precisa el comportamiento del material en todo el rango de comportamientos posibles. En su lugar, se formulan por separado distintas ecuaciones (ecuaciones constitutivas) que describen diferentes tipos ideales de respuesta del material.

El modelo constitutivo para un material es un conjunto de ecuaciones matemáticas que relacionan el esfuerzo con la deformación (y en algunos casos, historia de deformación, tasa de deformación, entre otras). Diferente a las ecuaciones gobernantes de equilibrio y deformación, estas ecuaciones generalmente no pueden ser calculadas usando leyes físicas fundamentales. En su lugar, los modelos constitutivos son ajustados a mediciones experimentales, de tal forma que aproximan el comportamiento físico observado del material real para un cierto rango.

Para muchos cálculos de diseño, las ecuaciones constitutivas elásticas son suficientes, ya que las grandes deformaciones plásticas, en su mayoría, se consideran como falla, sin embargo, hay algunas aplicaciones donde es interesante predecir el comportamiento de sólidos sometidos a cargas lo suficientemente grandes para provocar deformaciones plásticas permanentes. Ejemplos incluyen:

1. Modelado del formado de metales, maquinados u otros procesos de manufactura.
2. Diseño de resistencia de vehículos a choques.

1.8.1 Características de la respuesta inelástica en metales

Comenzaremos con una revisión de resultados de una prueba típica de tensión-compresión de un espécimen metálico, recocido, dúctil y policristalino. Suponga que la prueba es conducida a temperatura moderada (menos de 0.5 de la temperatura de fusión) y a deformaciones unitarias moderadas (menos del 10%) y bajas velocidades de deformación (0.01 a 10 s^{-1}) [16].

El resultado de tal prueba es:

Para esfuerzos y deformaciones moderadas el sólido responde elásticamente. En general el comportamiento elástico es lineal. Esto significa que los esfuerzos son proporcionales a la deformación, y las deformaciones son reversibles. Si los esfuerzos exceden una magnitud crítica, la curva de esfuerzo-deformación deja de ser lineal. Es a menudo difícil de identificar los esfuerzos críticos exactamente, ya que la curva esfuerzo-deformación comienza a curvarse gradualmente. Si el esfuerzo crítico es excedido, el espécimen es cambiado permanentemente en longitud una vez eliminada la carga. Si el esfuerzo es eliminado durante la prueba, la curva esfuerzo-deformación en la descarga tiene una pendiente igual a la región elástica de la curva esfuerzo-deformación. Si el espécimen es cargado nuevamente, seguirá la misma trayectoria hasta que el esfuerzo se aproxima a su máximo valor durante la carga previa, a este punto una vez más es deformado permanentemente. Si la prueba es interrumpida y el espécimen se mantiene a una deformación constante por un periodo de tiempo, los esfuerzos se relajarán lentamente. Si las deformaciones son reanudadas, el sólido se comportará elásticamente. Similarmente, si el material es sujeto a un esfuerzo constante, continuará deformándose plásticamente, aunque las deformaciones plásticas se incrementarán muy lentamente. Este fenómeno es conocido como “creep”. Si éste es deformado en compresión, la curva de esfuerzo-deformación es una imagen espejeada de la curva de esfuerzo-deformación

de tensión. Si el espécimen es primero deformado en compresión y luego cargado a tensión, generalmente comenzará a deformarse a un esfuerzo de tensión más bajo. Este fenómeno es conocido como “efecto Bauschinger”.

La respuesta del material a una carga cíclica puede ser extremadamente compleja. Un ejemplo puede ser el que se muestra en la Figura 1.14, donde el material se endurece cíclicamente. Otros materiales pueden ablandarse.

La forma detallada de la curva esfuerzo-deformación depende de la velocidad de carga y también de la temperatura.

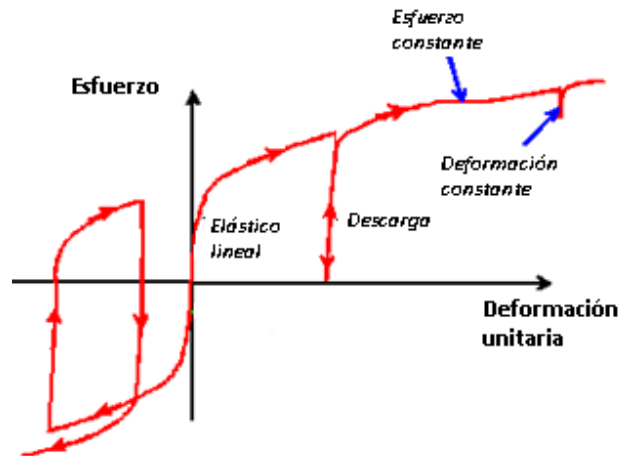


Figura 1.14. Comportamiento típico de la curva de esfuerzo-deformación para un material dúctil [16].

1.8.2 Propiedades dependientes de la temperatura

Las propiedades de un material varían con la temperatura, estos cambios pueden ser despreciables si las temperaturas desarrolladas son pequeñas. Si las temperaturas son considerables, el material sufre cambios en su estructura interna, dando lugar a un comportamiento diferente. Esto se complica aún más cuando en el material existen diferentes fases.

Los cambios que experimenta un material con la variación de la temperatura pueden ser incluidos de diversas maneras, una de ellas es olvidarnos de los cambios micro-

estructurales, suponer un valor promedio de la propiedad y considerar que existe una dependencia directa de las propiedades térmicas y mecánicas con la temperatura. La efectividad que tiene este planteamiento para describir el proceso resulta muy acertada cuando en el material no coexisten diferentes fases, pues de ser así, las propiedades de cada una deben ser consideradas, ya que, cada una de las fases tiene sus propiedades y éstas a su vez, cambian con la temperatura. Sin embargo, el caracterizar un material bajo condiciones ambientales es difícil en la mayoría de los casos y si a esto le agregamos una temperatura variable, lo complica aún más. La Figura 1.15 muestra la variación de la resistencia a la cedencia de un material con respecto a la temperatura, puede notarse que su valor disminuye prácticamente hasta que su efecto es prácticamente despreciable. Como se puede observar, el comportamiento de la curva solo depende del cambio en la temperatura, por tanto no estamos considerando los cambios microestructurales que producen ese comportamiento, es decir, se considera un valor promedio de todo el material.

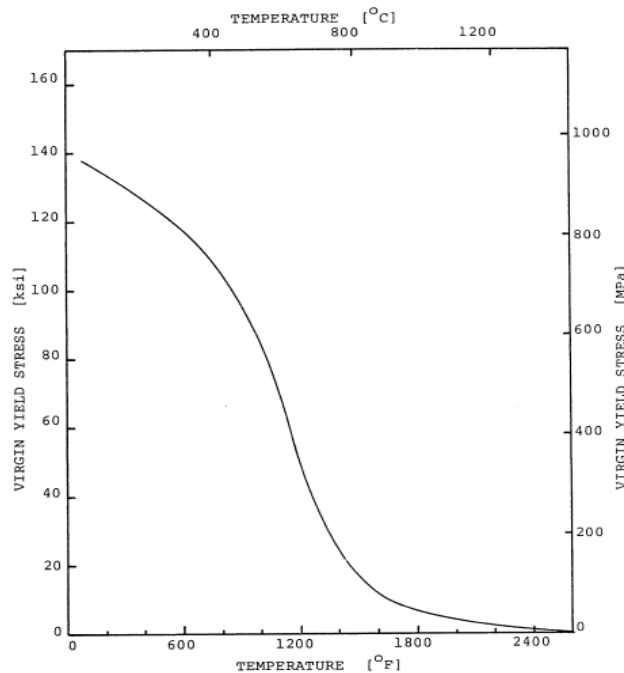


Figura 1.15. Variación de la resistencia a la cedencia con respecto a la temperatura [17].

Es común que siempre se busque una forma de simplificar las cosas, ya que, como se mencionó en el párrafo anterior, el caracterizar un material para obtener todas sus

propiedades no resulta nada sencillo. Barroso et al., [18] realizaron algunos estudios donde fue posible observar la influencia de la temperatura en las propiedades térmicas y mecánicas de los materiales para la obtención de esfuerzos residuales en un proceso de soldadura a tope de placas delgadas de aleación de aluminio. Los análisis muestran que por lo menos para resultados numéricos preliminares, valores constantes (independientes de la temperatura) para todas las propiedades mecánicas conducen a esfuerzos similares (Figura 1.16).

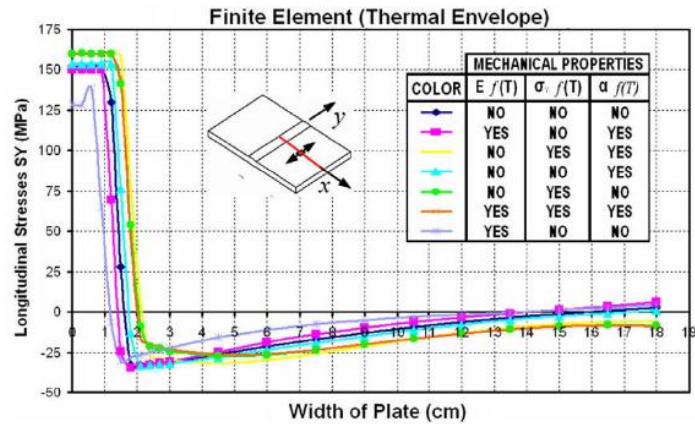


Figura 1.16. Resultados de σ_{yy} usando un modelo de elemento finito [18].

Se demostró desde un punto de vista cuantitativo, que la principal influencia de las propiedades involucradas en el modelo sobre los resultados, particularmente en σ_{yy} , viene de la consideración del esfuerzo de cedencia, con la temperatura (Figura 1.16). Esta suposición de valores constantes para las propiedades del material, representa una importante mejora en el tiempo computacional. Así la no-linealidad en las propiedades materiales es eliminada (para este caso), además de que elimina la necesidad de caracterizar las demás propiedades.

La capacidad computacional requerida puede llegar a ser un problema en el caso de estructuras tridimensionales complejas. Sin embargo el mayor obstáculo para el uso de simulaciones en la práctica es la necesidad de los parámetros de material. Es importante observar que la incertidumbre de las propiedades del material y el calor neto de entrada hacen que el éxito de la simulación dependa en gran medida de los resultados experi-

mentales que fueron utilizados para definir los parámetros necesarios para el modelo de simulación.

1.9 Técnicas experimentales para medir esfuerzos residuales

Las técnicas de medición de esfuerzos residuales miden invariablemente deformaciones unitarias más que esfuerzos y los esfuerzos residuales son entonces determinados usando los parámetros del material tales como el módulo de Young y la razón de Poisson. Solo un valor es obtenido y los esfuerzos son implícitamente supuestos constantes dentro del volumen medido tanto en el plano superficial y a través de la profundidad.

Cuando se comparan las diferentes técnicas de medición de esfuerzos residuales es preciso considerar la resolución que proporciona cada método, ya que hay tres tipos de esfuerzos residuales dependiendo del nivel al cual aparecen [19].

Tipo I. Se refiere a esfuerzos residuales macroscópicos que se desarrollan en el cuerpo de un componente a una escala más grande que el tamaño de grano del material.

Tipo II. Son micro-esfuerzos residuales que varían sobre la escala de un grano individual.

Tipo III. Son micro-esfuerzos residuales que existen dentro de un grano, esencialmente como el resultado de la presencia de dislocaciones y otros defectos cristalinos. Los tipos II y III son comúnmente agrupados como micro-esfuerzos.

Los esfuerzos residuales micro a menudo resultan de la presencia de diferentes fases o constituyentes en un material. Ellos pueden variar de signo y/o magnitud sobre distancias comparables a tamaño de grano del material en cuestión.

Los métodos disponibles para medir físicamente los esfuerzos residuales se puede dividir en dos grupos, destructivos y no destructivos.

Entre las técnicas principales no-destructivas tenemos:

- Difracción de rayos X
- Difracción de neutrones

Destructivas:

- Taladrado de agujeros (Hole drilling)
- Remoción de capas (Layer removal)

Difracción de Rayos X

En esta técnica las deformaciones unitarias son determinadas directamente de las medidas entre el espaciamiento de las capas atómicas de un material utilizando difracción de rayos X. Este fenómeno se presenta cuando un haz monocromático del mismo orden que el espaciamiento atómico del material lo golpea, los rayos X se dispersan en todas direcciones, sin embargo, los rayos que golpean ciertos planos cristalográficos en ángulos específicos se ven reforzados en vez de eliminados, este fenómeno se conoce como difracción. Una vez obtenidas estas deformaciones se calculan los esfuerzos. Cabe mencionar que la técnica está limitada a mediciones superficiales.

Difracción de Neutrones

La difracción de neutrones es una técnica muy parecida a la de rayos X, la diferencia entre estas dos técnicas es que los neutrones llegan a penetrar varios centímetros en la mayoría de los materiales, sin embargo, la limitación es que debe realizarse en laboratorios con un reactor nuclear de alto flujo o un acelerador inducido por fuentes de neutrones.

Taladrado de agujeros

Es uno de los métodos más ampliamente utilizados para medir esfuerzos residuales, es relativamente simple, barato, rápido, versátil y la técnica puede aplicarse a una amplia gama de materiales y componentes.

El principio de la técnica involucra la creación de un pequeño agujero dentro de un componente con esfuerzos residuales mientras se miden localmente las deformaciones aliviadas en la superficie alrededor del agujero. Entonces los esfuerzos residuales que estuvieron presentes en el material removido pueden ser calculados a partir de esas deformaciones.

Remoción de capas

Este método consiste en la remoción de capas de material de uno de los lados de una placa delgada que contiene esfuerzos residuales. Cuando se remueve una capa de material los esfuerzos en la placa se desbalancean dando lugar a una curvatura. La curvatura depende de la distribución de esfuerzos presentes en la capa que ha sido removida y de las propiedades elásticas de la placa restante. Después de la remoción de capas consecutivas la distribución de esfuerzos en la placa original puede ser determinada.

Todos los métodos mecánicos para la medición de esfuerzos residuales requieren medir la deformación debida al alivio de dichos esfuerzos, los cuales son entonces estimados usando un análisis basado en elasticidad lineal. Por tanto el uso de un método particular depende de la disponibilidad de no solo el medio para el alivio de los esfuerzos y una forma de medir las deformaciones sino también de la configuración para medir dichas deformaciones.

Es importante saber qué tipo de esfuerzos residuales se desea medir, ya que dependiendo del tipo de técnica utilizada será el tipo de esfuerzos que será capaz de medir, por ejemplo, la mayoría de las técnicas de remoción como hole drilling y layer removal, remueven grandes volúmenes de material sobre los cuales los tipos II y III promedian cero, por ello, solo los esfuerzos macro podrán ser medidos. Como ya se mencionó, los esfuerzos residuales pueden ser medidos por diversos métodos, sin embargo resulta complicado hacerlo con precisión. Además el alto costo de tales experimentos limita aún más el uso de mediciones experimentales, asimismo las mediciones son inherentemente discretas y a menudo limitadas a decenas de puntos. Este pequeño conjunto de puntos es

burdo considerando el campo total tridimensional de esfuerzos residuales en una estructura, por tanto, su predicción por modelado numérico es un complemento deseable para mediciones experimentales de esfuerzos residuales. Aunque los modelos numéricos recientes son poderosas herramientas para predecir esfuerzos residuales la validación con una referencia para resultados experimentales es esencial para tener confianza en el modelo y el algoritmo.

2 SIMULACIÓN DE PROCESOS TERMO-MECÁNICOS

2.1 Introducción

Los procesos termo-mecánicos generan esfuerzos y deformaciones no deseadas, un hecho que tiene que ser tomado en consideración cuando se diseña o cuando se cambia la secuencia de operaciones de manufactura para un componente dado. La experimentación previa puede ofrecer algo de ayuda, pero estos experimentos a menudo son costosos y lentos. Una forma para disminuir tanto el costo como el tiempo de desarrollo del producto es usar simulaciones numéricas, las cuales pueden predecir de manera fiel las propiedades finales y forma del componente.

Las simulaciones computacionales ofrecen la posibilidad de examinar los procesos de producción así como también conocer las propiedades de los productos resultantes finales antes de realizar los productos físicamente.

Las publicaciones que presentan simulaciones por elemento finito de los efectos mecánicos por soldadura aparecieron tempranamente en la década de los 70's, y las simulaciones eran usadas en aplicaciones donde los aspectos de seguridad son importantes, como la industria aeroespacial o plantas nucleares, sin embargo, en los últimos años ha habido un creciente uso en otros sectores industriales. Esto se debe principalmente a la competitividad y alta calidad que necesitan tener las industrias manufactureras hoy en día para poder permanecer en el mercado. El abaratar los costos de los productos en la industria metal-mecánica implica en muchas de las ocasiones utilizar la menor cantidad de material posible, pero siempre garantizando la seguridad en la utilización de los productos, ya que una reducción de material sin un estudio previo podría desatar una falla catastrófica, de aquí, la necesidad de poder garantizar la durabilidad de los elementos. Es común que se realicen pruebas experimentales sobre los productos terminados que permiten conocer las condiciones críticas que los llevarían a la falla, sin embargo, no siempre es posible realizar dichas pruebas, ya que, económicamente podría ser muy costoso o simplemente muy difícil de realizarse y es aquí donde las simulaciones computacionales son deseadas.

Información sobre la forma, dimensiones, esfuerzos internos y microestructura en un componente después de la aplicación de calor son de gran interés en la mejora de la calidad y prevención de fallas durante la manufactura o servicio. El conocimiento de esas características permite elegir de mejor forma la secuencia de los procesos que se le aplicaran a un componente, además permite conocer las propiedades finales que ésta tendrá. Se espera que las simulaciones computacionales puedan predecir ciertas características térmicas y mecánicas, sin embargo, en ocasiones solo son un complemento para obtener la información necesaria. Pues no siempre resulta fácil simular por completo todos los procesos termo-mecánicos con todos los fenómenos que se involucran, tal es el caso de la soldadura, donde en ocasiones es necesario realizar primero el proceso físicamente para poder obtener ciertos parámetros que son necesarios para introducirlos en el modelo computacional.

2.2 Suposiciones generales en el modelado

El modelado es el proceso de representar mediante ecuaciones matemáticas un fenómeno determinado. Involucra determinar qué aspectos del problema real pueden ser ignorados o simplificados, ya que, el considerar todos los fenómenos presentes en un proceso puede llegar a ser una tarea bastante complicada y en caso de lograrse, su resolución podría llegar a ser casi imposible.

Como se mencionó en el Capítulo 1 podemos en general, dividir nuestro problema considerando tres modelos:

1. Térmico
2. Mecánico
3. Metalúrgico

Es común que se omita el modelo metalúrgico para aceros de bajo carbono y también cuando se está en una etapa temprana de diseño y no se precisa de un modelo más complejo. En nuestro caso no se considerará un modelo metalúrgico.

Los modelos matemáticos generalmente están compuestos por ecuaciones diferenciales parciales que son capaces de describir la física dentro del dominio, sin embargo, para poder complementar estos modelos se necesita de dos ingredientes más:

1. Condiciones frontera
2. Ecuaciones constitutivas del material

Las condiciones de frontera son las diferentes restricciones a las que se somete nuestro elemento, por tanto, tendremos dos tipos:

1. Condiciones de frontera térmicas.
2. Condiciones de frontera mecánicas.

Las condiciones térmicas a las que se somete el elemento pueden ser visualizadas como la aplicación de energía mediante la fuente de calor y pérdidas de calor hacia el ambiente. Los modelos matemáticos capaces de describir estos fenómenos pueden ser tan complejos como se desee, sin embargo, se acostumbra a realizar varias suposiciones de tal forma que asemeje lo más posible a la realidad. Como se mencionó anteriormente, la fuente de calor se modela como un calor de entrada sin considerar el proceso físico o químico que produzca el calor. Para las pérdidas de calor se utiliza un modelo de convección y radiación

Las condiciones de frontera mecánicas corresponden al movimiento de los nodos de nuestro material o esfuerzos que se ejercen sobre la frontera. Por ejemplo, un punzón tratando de doblar una lámina impone un desplazamiento sobre los nodos de la superficie que a su vez desplazan los demás. En nuestro caso no existe un punzón, lo que hay son restricciones de movimiento que corresponden a un movimiento de cero en ciertos nodos y en ciertos grados de libertad. En ocasiones las restricciones mecánicas solo son incluidas con la intención de eliminar los movimientos de cuerpo rígido. Es importante recordar que las condiciones de frontera deben de corresponder con la condiciones de sujeción en la realidad, e igual que la sujeción en experimentos afecta al resultado, lo pueden hacer un cambio de las condiciones de frontera.

2.3 Modelo Térmico

La forma de modelar la distribución de calor en un material es realizada mediante la ecuación de difusión de calor (2.1), la cual se obtiene aplicando la conservación de la energía a un volumen de control:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot q = Q \quad (2.1)$$

Dónde Q es la tasa de generación de calor por unidad de volumen, y q flujo de calor que está relacionado al gradiente térmico por medio de la ley de Fourier:

$$q = -K\nabla T \quad (2.2)$$

La Ecuación (2.1) nos permite cuantificar la distribución de calor en nuestro material para los tiempos de interés.

2.3.1 Modelo de la fuente de calor

La diferencia entre los diversos procesos considerados radica en la forma en que aplicamos el calor, ya que, éste se puede aplicar de varias formas y bajo diversos principios físicos. Por esta razón, una de las características más importantes en procesos termo-mecánicos es la fuente de calor.

Como se mencionó anteriormente, el modelar un fenómeno siempre resulta en simplificaciones ya que tratar de reproducir el fenómeno que produce el calor para cada uno de los diversos procesos termo-mecánicos implicaría llevar a cabo simulaciones muy complejas y esto solamente para poder saber cuál es el calor de entrada. De forma práctica esto no es recomendado, en su lugar, se prefiere averiguar de forma experimental cuánto calor se introduce en el material de acuerdo a la absorción que se tiene en éste y el tipo de proceso utilizado para producir el calor. En el caso de procesos de soldadura se va más allá, pues aun sabiendo cual es el calor aproximado de entrada se precisa conocer la forma del baño fundido y eso solo se puede conocer una vez aplicada la

soldadura, este es el caso de la fuente de calor tipo Goldak, también llamada Fuente de calor de doble elipsoide, la cual fue propuesta por Goldak et al., [20]. Este modelo de doble elipsoide es uno de los más utilizados para la simulación de procesos de soldadura, tratamientos y recubrimientos térmicos (2.3) y (2.4). La Figura 2.1 muestra su geometría.

A continuación se muestran las ecuaciones que describen dicha fuente:

$$Q_1(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_f Q}{a_f b c \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-3 * \left(\frac{x_p^2}{a_f^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2}\right)\right) \quad (2.3)$$

$$Q_2(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_r Q}{a_r b c \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-3 * \left(\frac{x_p^2}{a_r^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2}\right)\right) \quad (2.4)$$

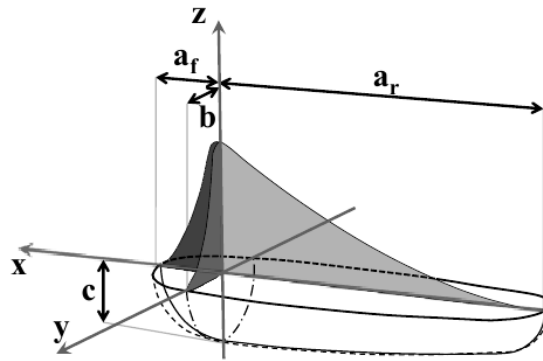


Figura 2.1. Geometría de una fuente de calor de doble elipsoide [21].

Donde a_r , a_f , b y c son las dimensiones de los elipsoides obtenidas de forma experimental, f_f y f_r corresponden a la fracción del calor depositado que se distribuye en los cuadrantes frontal y trasero, donde $f_f + f_r = 2$ [22].

La utilización de esta fuente de calor se debe a que las simulaciones realizadas, considerando una distribución únicamente sobre la superficie, no resultan congruentes con los experimentos, dado que la penetración de calor sobre la profundidad es mayor de lo que se obtiene con una fuente meramente superficial. Esto es porque el modelo solo incluye la conducción térmica y no incluye la contribución del flujo de calor por convección en

el material fundido. Por esta razón, se dio a la búsqueda de diversos tipos de modelos que tuvieran la capacidad de considerar la profundidad que se obtiene en la realidad. La desventaja del uso de esta fuente, es que se precisa conocer las dimensiones de los elipsoides mediante la experimentación previa, cabe mencionar que dependerá del proceso de soldadura y del material utilizado, por tanto las dimensiones del baño fundido serán diferentes para cada situación. Por otra parte, las simulaciones reportadas muestran una gran congruencia con los experimentos realizados, por esta razón, es tan socorrido este modelo.

En el caso del formado láser, es común que se utilice una fuente de calor aplicada únicamente sobre la superficie del material, pues en este caso no hay fusión y no existe una penetración de calor como sucede en la soldadura.

Existen diversas formas para modelar el calor que aplica la fuente láser (Figura 2.2), la expresión (2.5) es una de las más utilizadas para modelar el calor producido durante el formado láser. Representa un área de aplicación circular con una distribución de calor gaussiana sobre esa área.

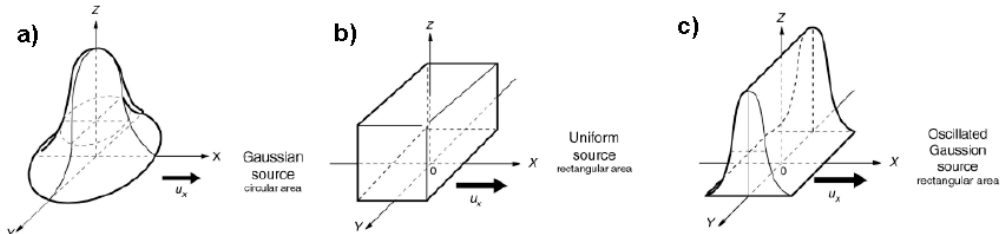


Figura 2.2. Formas comunes del haz láser. (a) Distribución gaussiana. (b) Distribución constante. (c) distribución gaussiana en uno de los ejes [23].

$$q(r) = \frac{2\eta P}{\pi R^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{R^2}\right) \quad (2.5)$$

Sin embargo con fines de aplicación y facilidad para introducirla dentro del software, resulta más útil utilizar una distribución promedio obtenida como sigue:

$$\bar{q}(r) = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R q(r) 2\pi r dr = \frac{2\pi}{\pi R^2} \int_0^R \frac{2\eta P}{\pi R^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{R^2}\right) r dr = \frac{0.865\eta P}{\pi R^2} \quad (2.6)$$

Donde η corresponde al coeficiente de absorción el cual dependerá de que tanta energía sea reflejada y cuánta es absorbida. P corresponde a la potencia del láser utilizado. R es el radio de la fuente láser. Es importante mencionar que también existen otro tipo de modelos para fuentes de calor, las cuales pueden tener una intensidad uniforme dentro del radio y reduciendo bruscamente a cero afuera, o con formas rectangulares o cuadradas, según varía la configuración óptica del haz de láser (Figura 2.2).

2.3.2 Modelado de las pérdidas de calor

Para modelar las pérdidas de calor al ambiente se recurre a los modelos de convección y radiación. Es común que se lleguen a omitir pues para determinados procesos la cantidad de calor que entra es muy superior a la que sale, claro que esto dependerá del tipo de análisis que se quiera llevar a cabo y la precisión requerida. Dependiendo del proceso realizado deberá de incluirse convección forzada, como por ejemplo en procesos de soldadura donde el gas protector sale a velocidades muy altas. Para este trabajo se supondrá que existe convección natural y radiación.

2.3.2.1 Convección

Las pérdidas de calor por convección las podemos calcular con la ecuación (2.7):

$$q_c = h_f(T_s - T_\infty) \quad (2.7)$$

donde:

$h_f \rightarrow$ Coeficiente de convección

$T_s \rightarrow$ Temperatura superficial absoluta de la placa

$T_\infty \rightarrow$ Temperatura ambiente absoluta

Las pérdidas por convección no tienen mucha influencia durante la etapa de calentamiento, sin embargo, en la etapa de enfriamiento impactan en los esfuerzos residuales. Para los estudios realizados se considerará un coeficiente de convección de $15\text{W/m}^2\text{K}$.

2.3.2.2 Radiación

Las pérdidas por radiación las podemos modelar con la ecuación (2.8):

$$q_r = \sigma \epsilon_r (T_r^4 - T_\infty^4) \quad (2.8)$$

Donde:

$\sigma \rightarrow$ Constante de Stefan-Boltzmann.

$\epsilon_r \rightarrow$ Emisividad de superficie radiante.

$T_r \rightarrow$ Temperatura absoluta de la superficie radiante.

La emisividad varía con respecto a la calidad de la superficie del material (rugosidad, grado de oxidación y presencia de contaminaciones), además también varía de acuerdo a la temperatura de la superficie emisora. Para fines prácticos se considerará una emisividad constante de 0.4 para los análisis realizados.

Haciendo una comparación del impacto que llegan a tener las pérdidas por radiación con respecto a la convección, las pérdidas por radiación tienen un menor impacto.

2.4 Modelo Mecánico

Para formular el modelo mecánico se recurre a los fundamentos básicos de la mecánica del medio continuo donde se considera una descripción matemática de la tensión y la deformación, así como de la velocidad de deformación que experimenta el medio y se establecen una serie de condiciones que deben cumplir. Así por ejemplo, tenemos las ecuaciones de equilibrio para las tensiones (2.9), y las restricciones a las que se somete nuestro elemento (2.10) sin embargo estas ecuaciones no son suficientes para resolver

problemas de tensión-deformación. Para ello es necesario considerar unas ecuaciones que caractericen cada tipo de material y su reacción a las cargas aplicadas. Estas ecuaciones se conocen como ecuaciones constitutivas, puesto que describen el comportamiento macroscópico que resulta de la constitución interna del material.

Dados los tensores de tensión σ_{ij} y de deformaciones ϵ_{ij} :

Equilibrio (análisis cuasi-estático)

$$\sigma_{ij,j} + b_i = 0 \quad (2.9)$$

Condiciones de contorno

$$\sigma_{ij}n_j = \sigma_{ji}n_j = T_i \quad (2.10)$$

Material (Ej. Elástico lineal)

$$\sigma_{ij} = E_{ijkl}\epsilon_{kl} \quad (2.11)$$

Donde:

$b_i \rightarrow$ Vector de fuerzas volumétricas.

$T_i \rightarrow$ Vector de tensiones en el contorno.

$n_j \rightarrow$ Vector normal al contorno.

$E_{ijkl} \rightarrow$ Tensor de rigidez elástica

Como se puede observar en la ecuación (2.9) se ha supuesto que es un estudio cuasi-estático, es decir, se supone que los efectos inerciales no tienen gran influencia en los procesos considerados.

2.4.1 Condiciones de contorno

En los procesos térmicos se supone que las únicas fuerzas externas que existen corresponden a las restricciones que limitan el movimiento de nuestras piezas (Ecuación (2.10)). Las restricciones corresponderán a un desplazamiento de cero en determinados nodos y a ciertos grados de libertad según sea el proceso de estudio. Por ejemplo para el caso de soldadura es común que se eviten a toda costa desplazamientos grandes, contrariamente en el formado láser, donde se permiten grandes desplazamientos, ya que ese es el objetivo.

2.4.2 Modelo del material

La materia por naturaleza no es continua pues sabemos que están compuestas por moléculas las cuales a su vez están compuestas por átomos, por tanto, existen huecos en los materiales, es aquí donde se aplica la primer hipótesis, que es considerar un medio “continuo”, esta hipótesis es bajo la que se rige la mecánica de materiales y considera que el material no tiene huecos ni fisuras.

Para realizar el modelado de material no resulta nada sencillo pues existen actualmente muchos modelos que se aplican a diversas situaciones, tan solo Allan F. Bower [16] menciona trece modelos principales de materiales para diversos casos en los que se va desde el típico material elástico isotrópico lineal, pasando por modelos hiperelásticos, plásticos, viscoplásticos, hasta modelos atómicos, estos últimos remplazan las leyes tradicionales de esfuerzo-deformación usando simulaciones atómicas embebidas. Por esta razón resulta indispensable conocer cuáles son las características que nos interesa modelar para poder elegir el modelo adecuado.

Nuestro interés se centra en modelar más allá de la parte elástica, ya que para ciertas aplicaciones resulta interesante analizar el comportamiento inelástico del material. En procesos de manufactura como la soldadura, formado láser y recubrimientos duros, se precisa de un modelo material que incluya características inelásticas que puedan ser

capaces de describir como mínimo, el proceso de deformación permanente que sufre el material después de haber aplicado el calor.

Conociendo nuestra necesidad de modelar la parte inelástica de los procesos termomecánicos, la segunda hipótesis, que es comúnmente utilizada, es suponer que el tensor de deformación puede ser descompuesto aditivamente [24], de esta forma se puede realizar la siguiente descomposición aditiva del tensor de deformación:

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p + d\varepsilon_{ij}^{vp} + d\varepsilon_{ij}^c + d\varepsilon_{ij}^{th} + d\varepsilon_{ij}^{tp} \quad (2.12)$$

Donde:

$d\varepsilon_{ij}$ → Deformación infinitesimal total.

$d\varepsilon_{ij}^e$ → Deformación infinitesimal elástica.

$d\varepsilon_{ij}^p$ → Deformación infinitesimal plástica debida a la plasticidad independiente de la velocidad.

$d\varepsilon_{ij}^{vp}$ → Deformación infinitesimal viscoplástica (debida a la plasticidad dependiente de la velocidad).

$d\varepsilon_{ij}^c$ → Deformación infinitesimal por termoplasticidad (“creep”).

$d\varepsilon_{ij}^{th}$ → Deformación infinitesimal térmica debida a la expansión térmica y a los cambios de volumen debidas a las transformaciones de fase.

$d\varepsilon_{ij}^{tp}$ → Deformación infinitesimal debida a la transformación plástica.

La ecuación (2.12) trata de capturar todos los procesos de deformación debido a diferentes fenómenos que tienen lugar en un proceso termo-mecánico-metalúrgico. En un marco general, son pocas las personas que trabajan con modelos tan completos, debido a que incluir cada uno de esos términos implica determinar muchos parámetros que no son fáciles de obtener. En su lugar, es común que se engloben las deformaciones debidas a los diferentes fenómenos en una sola variable inelástica ε_{ij}^i , o bien, que algunos de sus efectos sean despreciados. La ecuación que resulta (2.13) permite cuantificar deformaciones permanentes [25].

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^i + d\varepsilon_{ij}^{th} \quad (2.13)$$

En la referencia [16] se dice que un modelo viscoplástico es el adecuado para un caso donde se trabaje con altas temperaturas, pues el fenómeno de “creep” se incrementa a medida que aumenta la temperatura. A pesar de que se recomienda utilizar un modelo viscoplástico, no siempre se utiliza, ya que, en ocasiones considerar un modelo de plasticidad independiente de la velocidad resulta bastante adecuado, de esta forma se facilita el análisis. Pero surge la pregunta ¿En qué situaciones es adecuado utilizar un modelo más completo? La respuesta es que todo depende del grado de precisión con el que se desee trabajar. Se recomienda que para etapas tempranas de diseño se utilice un modelo sencillo de plasticidad y posteriormente se vaya mejorando el modelo mediante la inclusión de otros fenómenos. Diversos estudios como el de H. Alberg y D. Berglund [26] donde se estudia el impacto que tiene el considerar modelos más completos se concluye que efectivamente el utilizar un modelo con plasticidad independiente de la velocidad no es el más preciso, sin embargo, considerando la cantidad de parámetros que se evita determinar, resulta un modelo más que adecuado para etapas donde la precisión no sea requerida. El fenómeno de “creep” se suele despreciar pues el tiempo bajo el que se somete a altas temperaturas el elemento es breve, por tanto, la influencia que tiene puede llegar a ser despreciada para ciertos estudios. Esto llega a ser más relevante en procesos donde haya fusión del material, pues la temperatura alcanzada llega a ser muy elevada. Los modelos que incluyen el fenómeno de “creep” son ampliamente utilizados para modelar procesos de normalizado, recocido, etc., es decir, en procesos donde la aplicación de calor es por un periodo prolongado. La inclusión del modelo de “creep” permite aliviar paulatinamente las tensiones remanentes en el material.

2.4.3 Modelo Elasto-Plástico

Como se menciona en la sección anterior se pretenden capturar las deformaciones permanentes ε_{ij}^i mediante un modelo sencillo, esto lo logramos considerando ε_{ij}^p como la única deformación inelástica.

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p + d\varepsilon_{ij}^{th} \quad (2.14)$$

La ecuación. (2.14) representa uno de los métodos más antiguos y con mayor difusión para cuantificar las distorsiones permanentes sufridas por el material en un proceso termo-mecánico y la teoría se denomina *Teoría clásica de plasticidad* que fue desarrollada para predecir el comportamiento de metales bajo cargas que sobrepasan el rango elástico, pero en general el marco de referencia de la teoría de plasticidad ha sido adaptado a otros materiales, incluyendo polímeros y suelos. En la plasticidad de metales la teoría necesaria para describir flujo plástico es particularmente simple ya que los metales son, para fines prácticos, incompresibles e insensibles a la presencia de presión hidrostática. Por otra parte, para materiales como rocas, suelos, concreto, y otros materiales granulares la condición es más complicada, pues estos materiales si son compresibles, sin embargo, también es posible modelarlos dentro del marco de la teoría de plasticidad.

La teoría clásica de plasticidad hace uso de los siguientes conceptos fundamentales:

- Criterio de cedencia: Define el límite al cual el material alcanza la plasticidad.
- Regla de flujo: Establece la relación entre esfuerzos y deformaciones una vez que el material ha alcanzado la plasticidad.
- Regla de endurecimiento (Si es que existe endurecimiento): Establece la forma en que se endurece un material una vez alcanzada la plasticidad.

2.4.3.1 Criterio de cedencia

Existe un límite elástico sobre el cual el material llega a ser plástico, es decir, sufre deformaciones irreversibles. En la prueba de tensión uniaxial (Figura 2.3) se puede definir este límite por el esfuerzo uniaxial de cedencia o fluencia. Sin embargo, cuando varias componentes del esfuerzo están presentes y actuando simultáneamente, la pregun-

ta de cuándo el material llega a ser plástico es más difícil de responder. Generalmente se define una función de cedencia como:

$$f(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}, \alpha_1, \dots, \alpha_n) = 0 \quad (2.15)$$

Y la podemos abreviar como sigue:

$$f(\sigma, \alpha) = 0 \quad (2.16)$$

Donde σ contiene las 6 componentes independientes de esfuerzo y α define n parámetros específicos del material.

En ocasiones también resulta conveniente escribir la función de cedencia en función de invariantes (2.17), es decir, cantidades que no sean afectadas por una rotación del sistema coordinado, por ejemplo los esfuerzos principales.

$$f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \alpha_1, \dots, \alpha_n) = 0 \quad (2.17)$$

La función de cedencia define una superficie en el espacio de esfuerzos. La frontera $f = 0$ define el límite elástico (Figura 2.3):

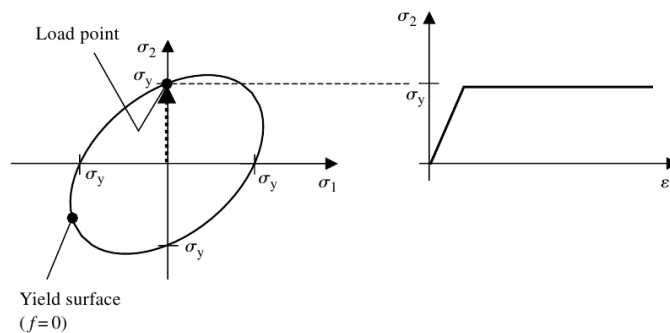


Figura 2.3. Superficie de fluencia de von Mises para esfuerzo plano y su correspondiente curva esfuerzo-deformación para un prueba uniaxial para material ideal plástico. [27]

Por tanto, el estado de esfuerzos está dado por un punto ya sea dentro o sobre la superficie. En carga plástica, con plasticidad perfecta, el estado de esfuerzos solo puede ser

alterado por una redistribución de los esfuerzos entre las diferentes componentes, tal que un punto puede ser imaginado como si se deslizara sobre la periferia de la superficie de cedencia. Si el endurecimiento está presente, el punto permanecerá sobre la frontera definida por $f = 0$ pero esta frontera será cambiada por las apropiadas reglas de endurecimiento conforme la deformación progresa. En la descarga el punto se mueve de la frontera de la superficie de cedencia a dentro de la superficie, por tanto, inmediatamente recupera su comportamiento elástico.

Existen muchos criterios de cedencia dependiendo del material modelado. En nuestro caso donde se modelan metales dúctiles e isotrópicos se recomienda el criterio de Von Mises el cual es ampliamente utilizado y recomendado en estas situaciones. Cabe mencionar que la isotropía implica tener las mismas propiedades en el material en todas las direcciones y esto trae como consecuencia una gran simplificación a nuestro modelo, pues solamente se precisa de dos constantes elásticas para su solución, módulo de Young y razón de Poisson.

$$f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = \sigma_e - \sigma_y \quad (2.18)$$

Donde:

$\sigma_y \rightarrow$ Es la resistencia a la cedencia y se determina a partir de un ensayo de tracción.

$\sigma_e \rightarrow$ Es el esfuerzo equivalente y lo definimos como sigue:

$$\sigma_e = \left[\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + \frac{1}{2}(\sigma_2 - \sigma_3)^2 + \frac{1}{2}(\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.19)$$

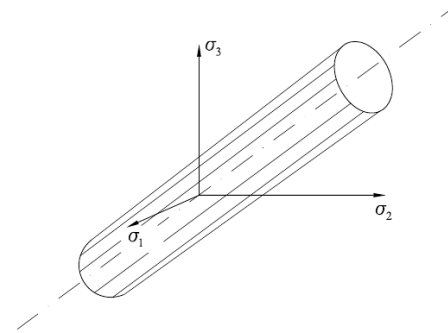


Figura 2.4. Superficie de fluencia de von Mises en el espacio de esfuerzos.

La Figura 2.4 muestra la superficie de fluencia para el criterio de von Mises vista en el espacio de esfuerzos principales. Podemos observar que corresponde a un cilindro cuyo eje se encuentra a lo largo de la línea $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$, lo cual cumple con los requisitos de incompresibilidad para metales, pues esto garantiza que aunque los esfuerzos σ_1 , σ_2 y σ_3 se vayan al infinito, mientras se mantengan igual, σ_e será cero, por tanto, nunca se alcanzará la fluencia del material.

2.4.3.2 Regla de flujo

Una vez que el material ha alcanzado la plasticidad es necesario saber cómo se seguirán desarrollando los esfuerzos y deformaciones, para cuantificar esto, hacemos uso de la regla de flujo (forma incremental) que se define como:

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \quad (2.20)$$

Donde:

$f \rightarrow$ Corresponde a la función de cedencia definida en (2.17).

$d\lambda \rightarrow$ Multiplicador plástico

La implicación que tiene la ecuación (2.20) es la de decir en qué cantidad y dirección fluye el material. La dirección va a estar dada por el gradiente de la función de cedencia que será perpendicular a la superficie. La magnitud la proporciona el multiplicador plástico.

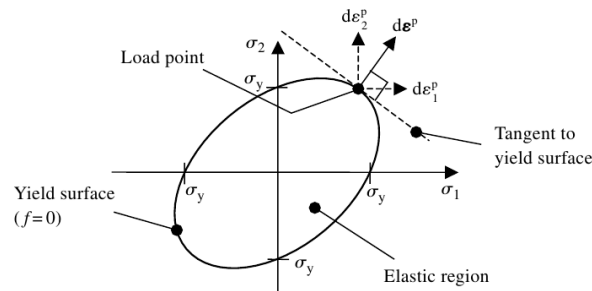


Figura 2.5. Superficie de von Mises para esfuerzo plano donde se muestra el incremento de deformación plástica en dirección normal a la tangente a la superficie. [27]

2.4.3.3 Regla de endurecimiento

La regla de endurecimiento trata (desde un punto de vista geométrico) acerca de cómo se comporta la superficie de cedencia, es decir, si se expande, distorsiona, rota o traslada. Las reglas de endurecimiento más utilizadas son la que describen la expansión y la traslación, llamadas, regla de endurecimiento isotrópico y cinemático respectivamente.

Hay tres clases de materiales:

1. Con endurecimiento por deformación.
2. Sin endurecimiento (perfectamente plástico).
3. Materiales que se suavizan por deformación.

Generalmente los metales están en el primer caso, es decir experimentan endurecimiento por deformación, es decir, el esfuerzo requerido para provocar más deformación plástica se incrementa. El endurecimiento isotrópico supone que a partir de la superficie de cedencia inicial, la superficie se expande uniformemente como en la Figura 2.6.

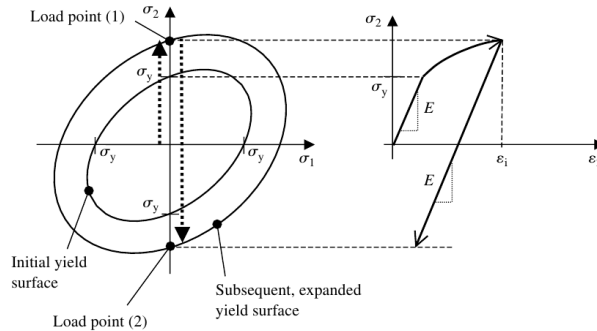


Figura 2.6. Endurecimiento isotrópico, en el cual la superficie de cedencia se expande con deformación plástica y su correspondiente curva uniaxial de esfuerzo-deformación. [27]

En el caso de un incremento de carga monolítico, es común suponer de manera razonable que el endurecimiento que ocurre es isotrópico. Para el caso de cargas a tensión-compresión, esto no siempre resulta apropiado, pues lo que se observa en experimentos, es algo más parecido al endurecimiento cinemático que incluye el efecto conocido como efecto Bauschinger. Este efecto también conocido como back-stress involucra un incre-

mento en el esfuerzo de cedencia bajo una carga plástica a tensión, al mismo tiempo, el límite negativo es disminuido, tal que, el rango del esfuerzo permisible permanece constante. (Figura 2.7).

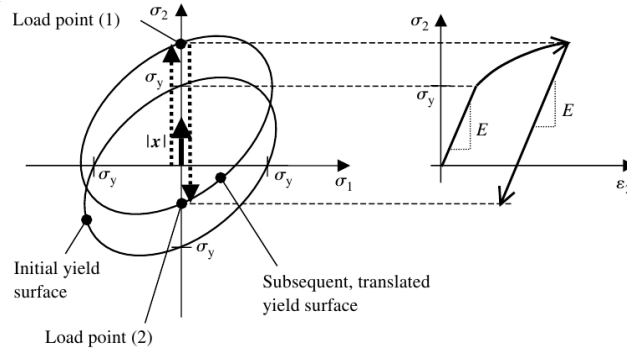


Figura 2.7. Endurecimiento cinemático que muestra la traslación de la superficie de cedencia debido a la deformación plástica y la curva de esfuerzo-deformación que muestra el efecto Bauschinger. [27]

Por otra parte la trayectoria que sigue la curva esfuerzo-deformación puede ser determinada a partir de un ensayo de tracción. La curva que se obtiene describe que tanto se endurece dicho material. En general esta curva se aproxima mediante ecuaciones empíricas que pueden ser lineales o no-lineales. Entre las ecuaciones empíricas no-lineales podemos mencionar la de Ludwik (1909) [28]

$$\sigma = C \epsilon^n \quad (2.21)$$

sin embargo, no siempre resulta de interés aproximar toda la curva de endurecimiento y para estos casos existen modelos simplificados que aproximan su comportamiento para un pequeño rango. La Figura 2.8 muestra algunos modelos idealizados de plasticidad. La selección adecuada del modelo elasto-plástico elegido dependerá en gran medida del problema a analizar.

La Tabla 2.1 describe los diferentes tipos de combinaciones entre ellos y pueden combinarse de acuerdo a las necesidades.

Tabla 2.1. Modelos materiales básicos elasto-plásticos

Elástico	a rígido
	b lineal
	c no lineal
Plástico	1 ideal
	2 endurecimiento lineal
	3 endurecimiento no-lineal

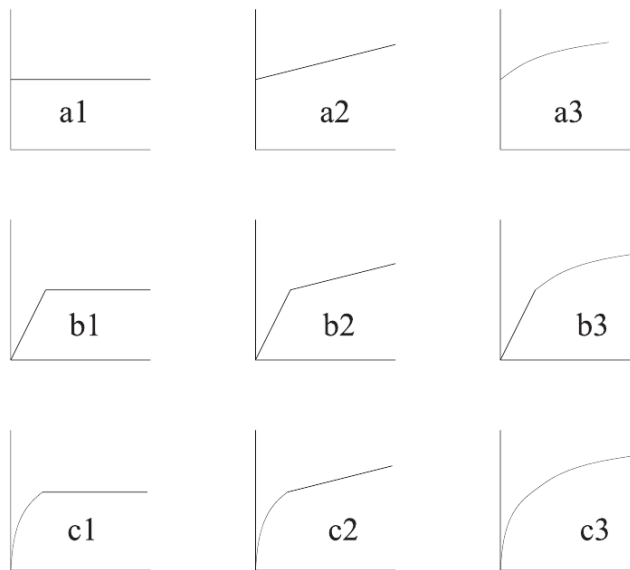


Figura 2.8. Formas de las curvas de esfuerzo deformación de los diferentes modelos básicos. [29]

3 DESARROLLO Y ANÁLISIS DE MODELOS SIMPLIFICADOS

Durante el desarrollo de modelos siempre se desea que sean lo más simple posible, por esta razón, es deseable reducir el número de dimensiones espaciales, así como también, la dependencia del tiempo, sin embargo, esto no siempre es viable, ya que, en ocasiones, el realizar este tipo de acciones nos lleva a la solución de un problema totalmente distinto al que queremos resolver, proporcionándonos resultados erróneos. ¿Qué tanto puede ser simplificado un problema? Esta pregunta no siempre resulta fácil responderla y es aquí donde las simulaciones computacionales nos permiten evaluar este tipo de situaciones, ya que, en ocasiones un modelo 2D o 1D puede llegar a describir de manera fiel el fenómeno, pero en otras no es así.

Lindgren [30] nos muestra los casos típicos para reducir un modelo 3D a un modelo 2D en el proceso de soldadura. En la Figura 3.1 se muestran estas simplificaciones. En el inciso a) de la Figura 3.1 se muestra el modelo 2D cuando se consideran deformaciones planas, el inciso b) corresponde a un modelo axisimétrico y el inciso c) es un modelo basado en la suposición de esfuerzos planos. Cabe mencionar que cada una de estas suposiciones despreja ciertos efectos que ocurren en el modelo 3D, por tanto, al hacer la reducción, se está resolviendo otro problema que puede llegar a semejar el caso 3D. El inciso a) de la Figura 3.1 considera que las deformaciones a lo largo del eje longitudinal son despreciables así como también al flujo de calor.

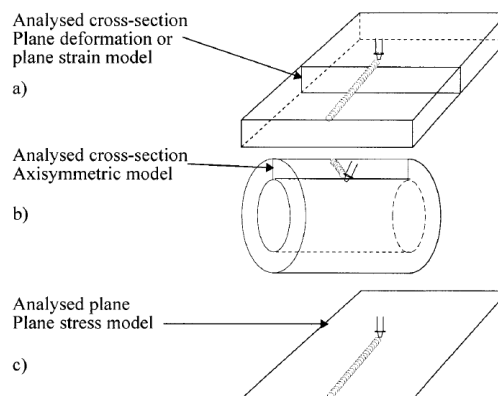


Figura 3.1. Modelos 2D para soldadura [30].

CAPÍTULO 3 DESARROLLO Y ANÁLISIS DE MODELOS SIMPLIFICADOS

El área de estudio corresponde a la sección perpendicular al movimiento de la fuente, por tanto, supone que cada uno de esos cortes no interactúa con los demás. El inciso b) es útil cuando se estudian casos axisimétricos, por ejemplo tubos y se analiza la sección perpendicular al movimiento de la fuente y se supone que ésta se mueve a una velocidad infinita. En el inciso c) se desprecian los esfuerzos producidos a lo largo del espesor de la placa, lo cual aproxima de mejor forma cuando se modelan láminas muy delgadas.

En este capítulo se analizan algunos casos simplificados que tratan de representar los efectos de las simplificaciones en problemas térmico-estructurales. El caso de estudio corresponde al proceso de formado láser de una lámina con geometría rectangular de 300mm x 150mm x 6mm, ver Figura 3.2. Se consideran propiedades mecánicas del material variables con la temperatura (Tabla 3.1) y se utiliza un modelo elasto-plástico bilineal con endurecimiento isotrópico.

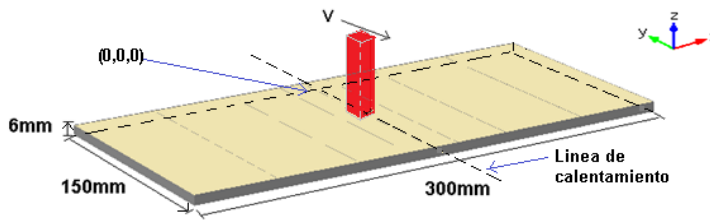


Figura 3.2. Dimensiones de la lámina y trayectoria del haz láser.

Tabla 3.1. Propiedades del material utilizado en las simulaciones (Acero para barcos 1.0584 (D36)) [31]

Propiedades	Material: Acero para barcos 1.0584 (D36)
Calor específico [J/(kg °C)]	427
Conductividad térmica [W/(m °C)]	35.1
Densidad [kg/m ³]	7860
Coefficiente de expansión térmica [1/°C]	12x10 ⁻⁶
Módulo de Young [MPa]	$E = 11100 + \frac{188600}{1 + \exp\left(\frac{T - 629.94}{69.84}\right)}$

Módulo tangente [MPa]	$E_t = 462 + \frac{10334}{1 + \exp\left(\frac{T - 631.06}{88.87}\right)}$
Razón de Poisson	$\nu = 0.298 + 0.000117T$
Resistencia a la cedencia [MPa]	$\sigma_y = 45.5 + \frac{329.5}{1 + \exp\left(\frac{T - 589}{121.6}\right)}$

El modelo de calor de entrada se realiza mediante la siguiente ecuación [32]:

$$q(x, y) = \begin{cases} \frac{B}{d^2} \left(a_1 + a_2 \exp\left(-\frac{bx^2}{d^2}\right) \right) & -\frac{d}{2} < x < \frac{d}{2}, \quad 0 < y < d \\ 0 & \text{en el resto del dominio} \end{cases} \quad (3.1)$$

donde:

a_1, a_2, b y $B \rightarrow$ Constantes determinadas a partir de experimentos.

$d \rightarrow$ Dimensión de fuente de calor (fuente cuadrada)

$x \rightarrow$ Eje perpendicular a la dirección de soldadura.

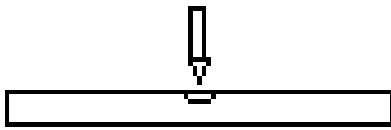
$y \rightarrow$ Eje en la dirección de soldadura.

En este trabajo se asume que el calor se aplica sobre una sección cuadrada de 16mm x 16mm.

La ecuación (3.1) a diferencia de la ecuación (2.5) corresponde a un área de aplicación cuadrada pero con distribución gaussiana a lo largo de uno de los ejes. Las constantes a_1 , a_2 y b fueron determinadas a partir de experimentación, cuyos valores son: 0.2, 0.8 y 6.05 respectivamente [32]. El valor de B se determina a partir de ecuación (3.2) con $P = 1.5kW$, dando como resultado $B = 2.06kW$. Como puede notarse el valor de B es mayor al de P , esto tiene el efecto de contabilizar que la densidad de energía no es uniforme sobre la zona de aplicación debido a la naturaleza de la función gaussiana.

$$P = \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} q(x) dx \quad (3.2)$$

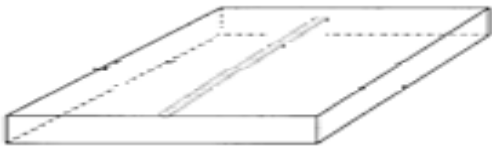
Para analizar el caso de estudio de la Figura 3.2 se realizan cuatro casos de estudio simplificados como se indica en la Figura 3.3. En cada caso de estudio se busca simplificar la complejidad del problema transiente en 3-D en diferente manera, sea por limitación de la dimensión del problema a 2-D o analizar el problema sin desplazamiento de la fuente de calor.



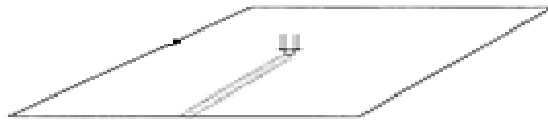
a) Caso 1: Deformaciones planas (Fuente de calor fija aplicada sobre una línea de 16mm)



b) Caso 2: Esfuerzos planos (fuente fija aplicada sobre una franja de 16x150mm)



c) Caso 3: Modelo 3D (fuente de calor fija y aplicada sobre una franja de 16x150mm).



d) Caso 4: Esfuerzos planos (fuente móvil aplicada sobre una región cuadrada de 16x16mm).

Figura 3.3. Casos de estudio a) Deformaciones planas, fuente fija, b) Esfuerzos planos, fuente fija, c) Modelo 3D, fuente de calor fija, d) Esfuerzos planos, fuente móvil.

La fuente de calor se debe modificar para cumplir los requisitos en cada uno de los estudios (Figura 3.3), sin embargo, se busca que la energía aplicada en cada uno de ellos sea exactamente la misma. La potencia del láser empleada en el proceso es de 1.5kW a una velocidad de 5mm/s, por lo tanto, el tiempo durante el cual se aplica calor es de 30s, esto da un total de 45000J aplicados a la lámina. El Caso 1 de la Figura 3.3 trata de representar al inciso a) de la Figura 3.1, por esta razón, debemos modificar el tiempo de

exposición a la fuente así como también, la intensidad. Si observamos nuestra sección perpendicular a la trayectoria de la fuente, nos daremos cuenta que solo es expuesta al calor el tiempo que tarda el haz en pasar por ella, según los datos antes mencionados, ese tiempo es de 3.2s, es decir, debemos aplicar los 45000J en un tiempo de 3.2s. Con esta información obtenemos una potencia para nuestra fuente de 14.06kW. En el Caso 2 se realiza lo mismo, pero ahora con la suposición de esfuerzos planos, por lo tanto, el calor se estará aplicando sobre una franja que cubra todo el recorrido de la fuente móvil (eje y), pero con una distribución gaussiana a lo largo del eje x . El Caso 3 corresponde al Caso 2 pero esta vez 3D. La diferencia con el caso de referencia es que todo el trayecto de soldadura se calienta al mismo tiempo, sin tomar en cuenta que la fuente real se mueve. El último caso del capítulo es un estudio 2D bajo la suposición de esfuerzos planos igual como el Caso 2, pero ahora con una fuente móvil, ver Figura 3.3 inciso d). En los procesos reales el calor aplicado nunca es absorbido totalmente por el material, por esta razón, es común utilizar un coeficiente de absorción, para este proceso dicho coeficiente corresponde a un valor de 0.7.

Las restricciones mecánicas a las que se someterá el elemento 3D son las mostradas en la (Figura 3.4)

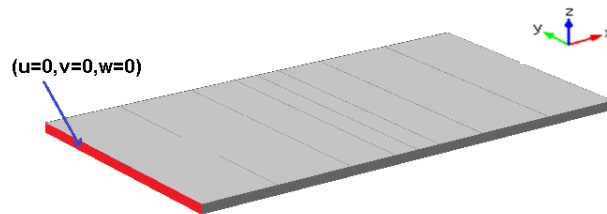


Figura 3.4. Condiciones de frontera mecánicas.

3.1 Caso 1: Estudio 2D-Fuente de calor fija y transiente: Deformaciones planas

En esta sección se realiza un estudio termo-estructural 2D bajo la suposición de deformaciones planas, dado que la dimensión perpendicular al plano de estudio es grande.

Características del estudio:

El mallado consiste en 2008 elementos triangulares cuadráticos (Figura 3.5) y se resolvieron 12951 grados de libertad.



Figura 3.5. Mallado para el Caso 1

Debido a que se tiene una fuente de calor focalizada en la región central es preciso hacer un refinamiento del mallado en esa zona. En la Figura 3.6 se puede apreciar dicho refinamiento.

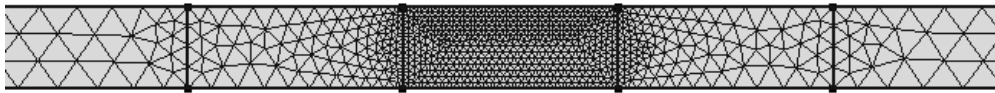


Figura 3.6. Mallado para el Caso 1 (Acercamiento).

El calor total aplicado sobre la frontera con respecto al tiempo se muestra en la Figura 3.7. Esta figura nos muestra que el calor total aplicado en cada instante de tiempo es de aproximadamente 65500 W/m, que multiplicado por el espesor de 150mm, nos da 9825W que aproxima muy bien al valor esperado de 9843W.

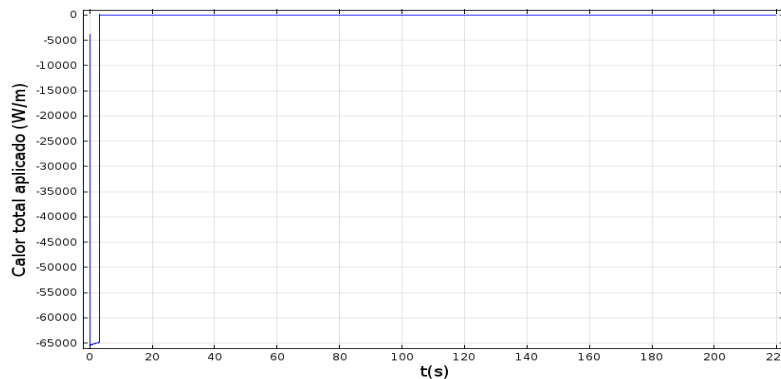


Figura 3.7. Calor aplicado [W/m] contra tiempo [s] para el Caso 1.

La Figura 3.8 permite observar los efectos de la no linealidad geométrica y a la forma en que se implementa la fuente, ya que el área donde se está aplicando el calor aumenta debido a la expansión térmica

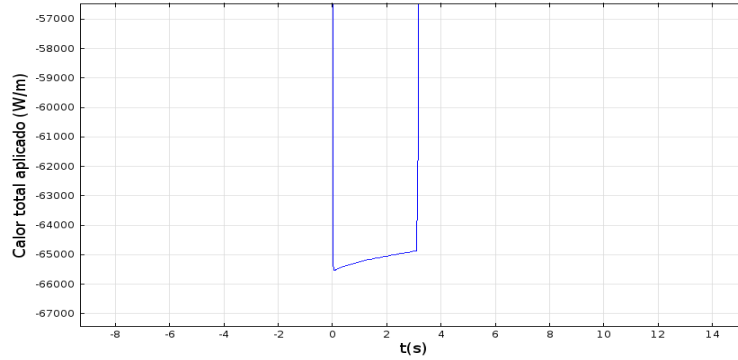


Figura 3.8. Calor aplicado [W/m] contra tiempo [s] para el (acercamiento). Caso 1.

La Figura 3.9 muestra la distribución de temperatura a los 3.2s de análisis sobre la geometría. Se puede apreciar que, debido a la naturaleza de la fuente gaussiana la temperatura más elevada se alcanza en el punto medio de la placa. La temperatura en el punto medio inferior es de 460°C lo cual tiene una repercusión directa sobre la distribución de los esfuerzos de Von Mises, ya que el gradiente térmico se reduce con el tiempo de exposición a la fuente. Recordemos que el mecanismo por el que queremos generar la deformación es por medio de un gradiente térmico, y si éste se reduce, también se reducirá la deflexión angular, por ello es de vital importancia tener un control en los parámetros del proceso.

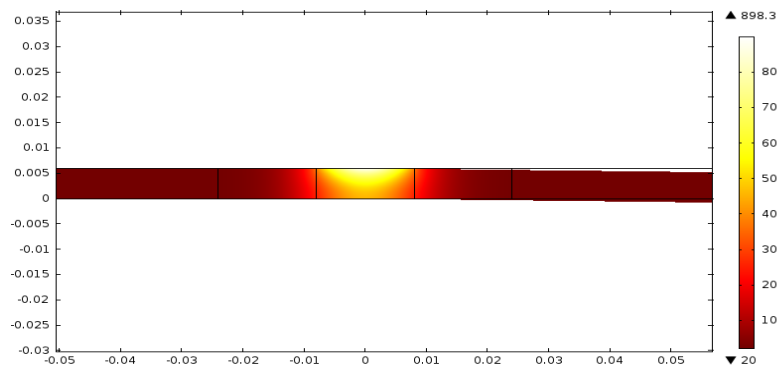


Figura 3.9. Distribución de la temperatura en el dominio para un tiempo de 3.2s (acercamiento) Caso 1.

La Figura 3.10 muestra la distribución de la temperatura al finalizar el estudio, se observa que aún hay una diferencia entre la temperatura máxima y mínima de aproximadamente 50°C, pero para nuestros fines esto no tiene importancia ya que solo se busca ejemplificar la veracidad de modelos simplificados.

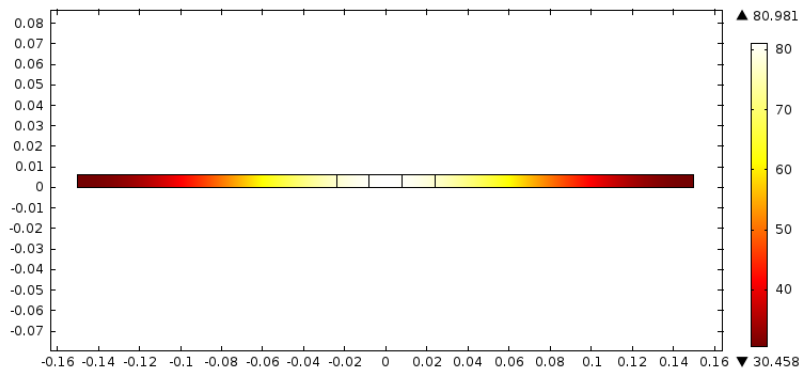


Figura 3.10. Distribución de la temperatura en el dominio para un tiempo de 220s. Caso 1.

La temperatura medida en el punto medio central superior a lo largo del tiempo se muestra en la Figura 3.11. En esta curva se grafican dos puntos de interés, que son, el punto medio superior e inferior. La temperatura máxima alcanzada para el punto superior es de 912.6°C y de 81°C al término del estudio. A pesar de que son dos puntos separados y que alcanzan su máximo a diferente tiempo, ambas se fusionan en la etapa de enfriamiento. Esto implica que el gradiente de temperatura a lo largo del espesor ha desaparecido, recordemos que este gradiente es precisamente la fuerza motriz para nuestra deformación, a partir de este punto la deflexión angular será mucho menor.

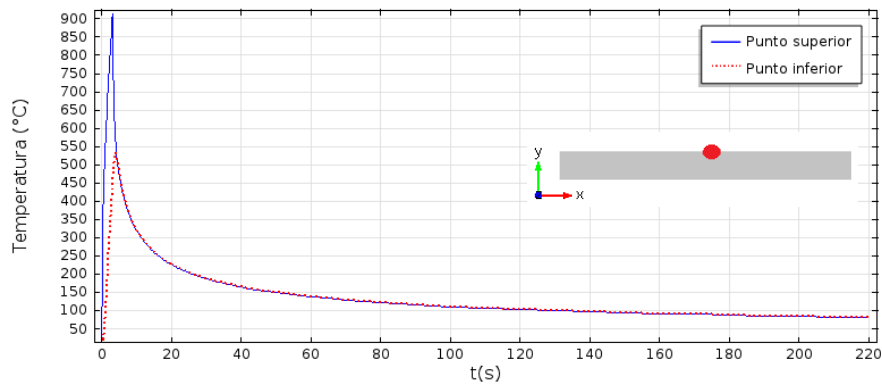


Figura 3.11. Temperatura contra tiempo medida en el punto medio superior e inferior. Caso 1.

En cuanto a los esfuerzos, la Figura 3.12 muestra el esfuerzo de Von Mises a los 3.2s y se puede apreciar que gracias a que el gradiente de temperatura no es tan elevado a lo largo del espesor, los esfuerzos tienden a alinearse a lo largo del eje x .

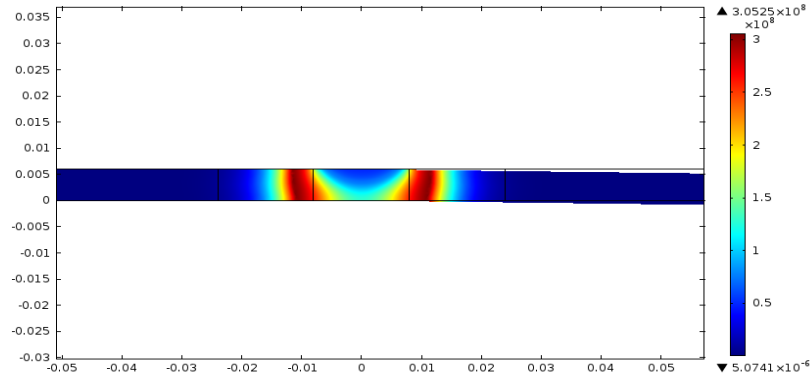


Figura 3.12. Distribución del esfuerzo de Von Mises en el dominio a los 3.2s (acercamiento). Caso 1.

La Figura 3.13 muestra la distribución de esfuerzos térmicos (podemos considerarlos esfuerzos residuales para nuestros fines) al final del estudio. En ella podemos apreciar que los esfuerzos máximos se encuentran en la zona donde se aplicó el haz láser y se van reduciendo conforme se alejan de dicha región.

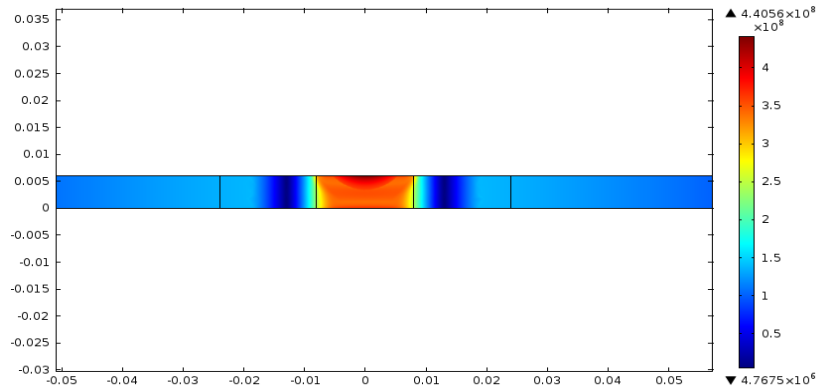


Figura 3.13. Distribución del esfuerzo de Von Mises en el dominio a los 220s (acercamiento). Caso 1.

Podemos analizar las seis componentes del tensor de esfuerzos para ver cuál de ellas es la que tiene más impacto. La Figura 3.14 muestra las seis componentes del tensor de esfuerzos para un tiempo de 3.2s a lo largo de una línea transversal al movimiento del haz. Puede notarse que la componente que más figura es σ_z , que es la componente perpendicular al plano de análisis y que corresponde a σ_y en los casos siguientes. La otra componente con menor influencia en Von Mises es σ_x . Las demás componentes prácticamente no afectan al esfuerzo de Von Mises.

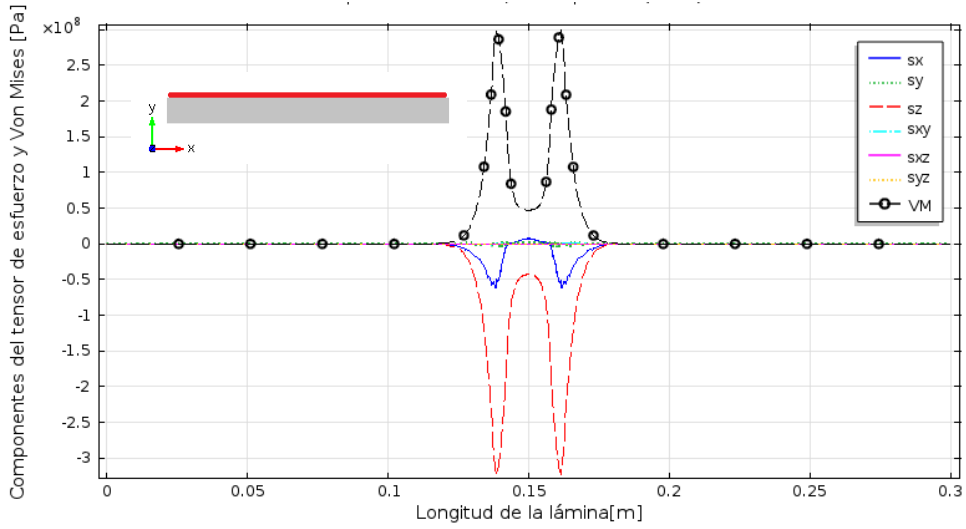


Figura 3.14. Componentes del tensor de esfuerzos y esfuerzo de Von Mises a los 3.2s a lo largo de una línea transversal al movimiento de la fuente (línea superior). Caso 1.

Se puede realizar lo mismo pero ahora al término del estudio (Figura 3.15). Se verifica que la componente con mayor influencia es σ_z y en menor medida σ_x . Este comportamiento puede justificarse recordando la Figura 1.8 donde se muestra que a mayor grado de restricción los esfuerzos se incrementan, por otra parte si ésta se disminuye las deformaciones aumentan. En este caso la naturaleza de la fuente permite casi una expansión libre sobre la componente en x e y . Esto no es así para la componente en z pues está restringida a deformaciones planas.

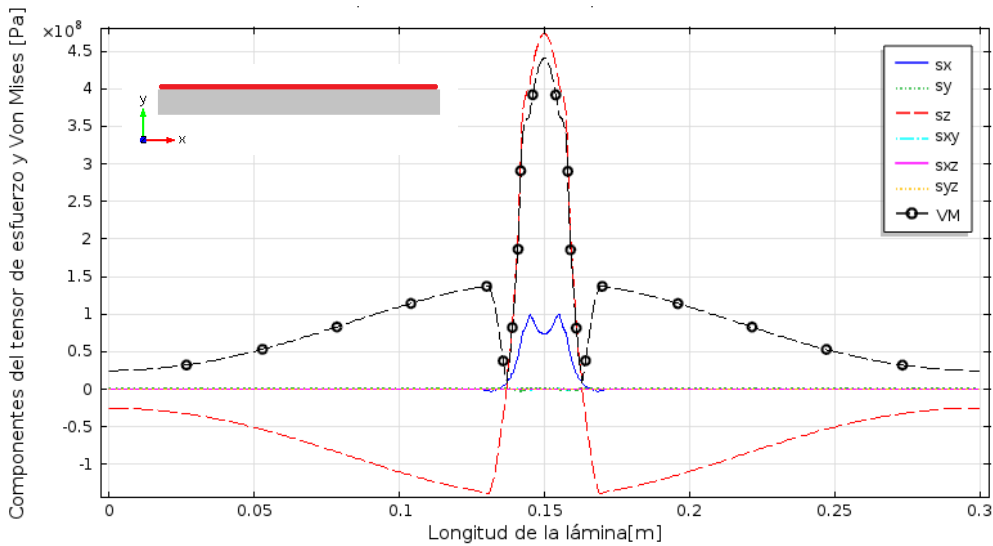


Figura 3.15. Componentes del tensor de esfuerzos y esfuerzo de Von Mises al finalizar el estudio a lo largo de una línea transversal al movimiento de la fuente (línea superior). Caso 1.

En procesos donde se alcanza la región plástica resulta de interés saber cuál fue la zona dañada plásticamente. La Figura 3.16 muestra qué tanta deformación plástica fue alcanzada. Como era de esperarse, la región donde se aplicó calor fue la más afectada, debido a la baja rigidez que alcanza por las altas temperaturas.

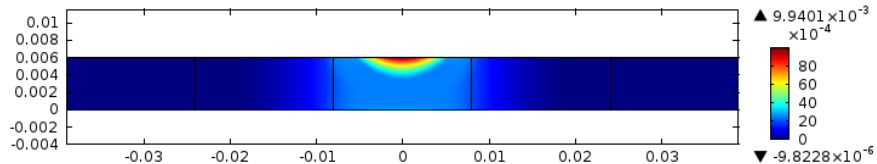


Figura 3.16. Deformación plástica efectiva al finalizar el estudio. Caso 1.

Uno de los intereses en el formado láser es la evaluación de la distorsión final en la pieza, hablando de este caso en específico, correspondería a evaluar la distorsión angular producida por la fuente de calor. El ángulo a medir es el que se forma entre el punto extremo inferior derecho y el eje de las abscisas. La Figura 3.17 muestra la evolución de dicho ángulo con respecto al tiempo.

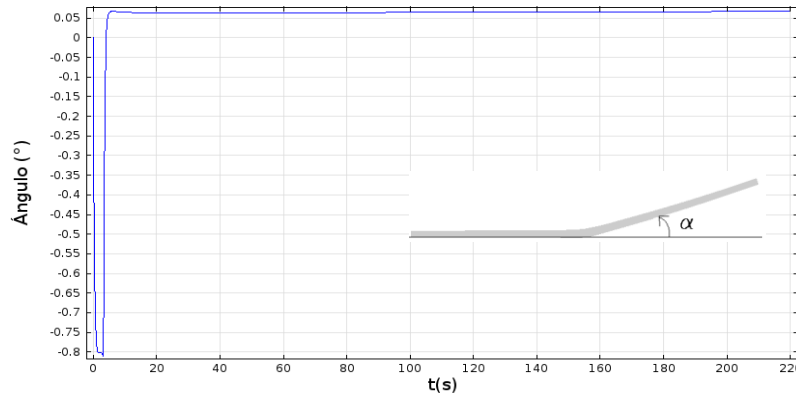


Figura 3.17. Ángulo que se forma entre el punto inferior derecho y el eje coordenado a través del tiempo. Caso 1.

3.2 Caso 2: Estudio 2D-Fuente de calor fija y transiente: Esfuerzos planos

En esta sección se realiza un estudio termo-estructural 2D, ahora en el plano de la soldadura bajo la suposición de esfuerzos planos. Para la simulación se utilizó un mallado de 3700 elementos triangulares cuadráticos y en el estudio se resolvieron 44679

grados de libertad. La Figura 3.18 muestra el mallado utilizado en la simulación. También se realizó un refinado en el área donde pasa la fuente así como también en las cercanías.

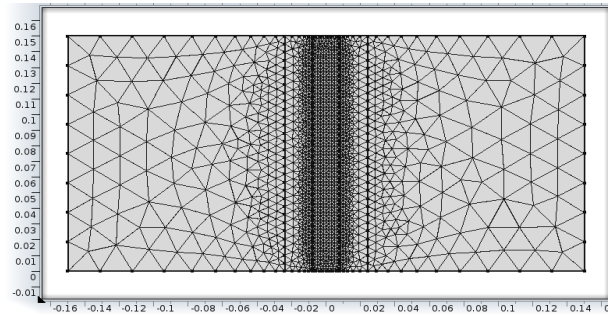


Figura 3.18. Mallado utilizado para la simulación 2D-esfuerzos planos. Caso 2.

El calor aplicado a la zona de interés [W/m] a lo largo del tiempo [s] se muestra en la Figura 3.19. De la misma forma que en el caso de la sección anterior, el calor aplicado disminuye debido a la no-linealidad geométrica que se está considerando. En Figura 3.20 se puede apreciar mejor este efecto. Para calcular la potencia aplicada y verificar que se está aplicando la misma potencia basta con multiplicar por el espesor de la profundidad, en este caso la profundidad corresponde a 6mm, por tanto, se obtiene una potencia de 9840W y se aproxima perfectamente a la potencia esperada de 9843W.

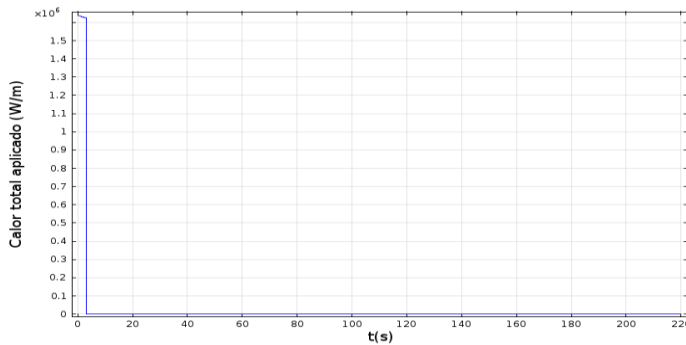


Figura 3.19. Calor aplicado en el estudio 2D-esfuerzos planos. Caso 2.

La Figura 3.21 muestra la distribución de la temperatura para un tiempo de 3.2s. Se puede apreciar que debido al corto tiempo de exposición a la fuente la temperatura en los extremos no se ve afectada. La Figura 3.22 muestra la distribución de temperatura al

finalizar el estudio. Como se esperaba, no existen gradientes de temperatura sobre el eje y solo sobre eje x

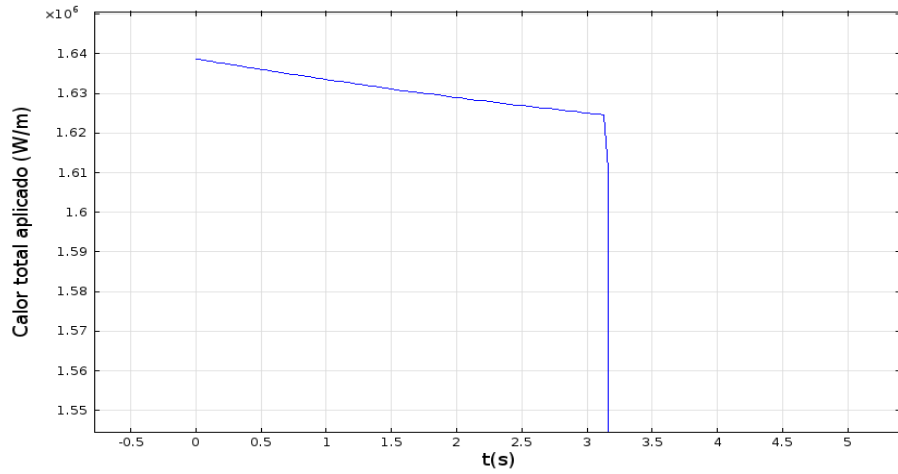


Figura 3.20. Calor aplicado en el estudio 2D-esfuerzos planos (acercamiento). Caso 2.

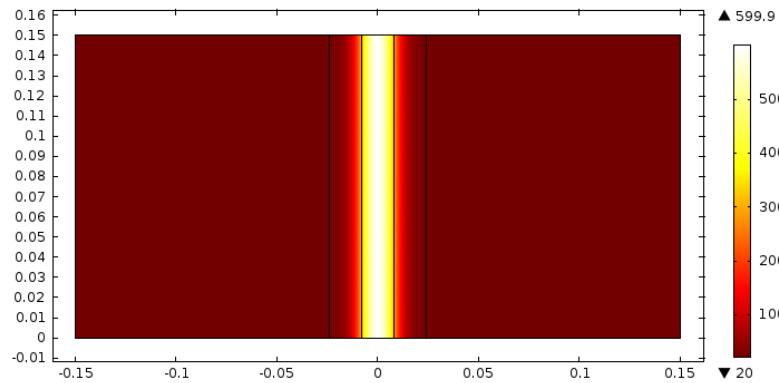


Figura 3.21. Distribución de la temperatura para un tiempo de 3.2s. Caso 2.

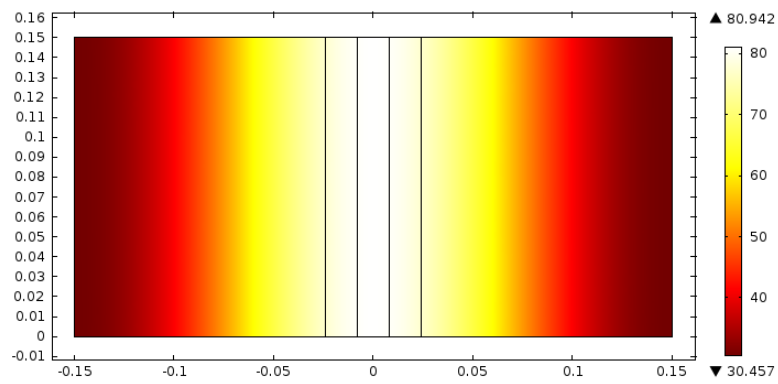


Figura 3.22. Distribución de la temperatura para un tiempo de 220s. Caso 2.

En la Figura 3.23 se observa la curva de temperatura contra tiempo para el punto medio de la lámina, la temperatura máxima alcanzada es de 624.85 °C y la temperatura al final del estudio es de 81°C. Como se puede observar la temperatura máxima alcanzada fue inferior (como se esperaba) a la obtenida en el estudio de deformaciones planas debido a la naturaleza de las fuentes de calor utilizadas para cada caso, ya que para el Caso 1 el calor se entrega sobre la superficie superior y en Caso 2 el calor se distribuye sobre el espesor de la lámina. Esto tiene como consecuencia que la temperatura en el Caso 2 se tendría que comparar con la temperatura promediada sobre el espesor que se obtiene en el Caso 1.

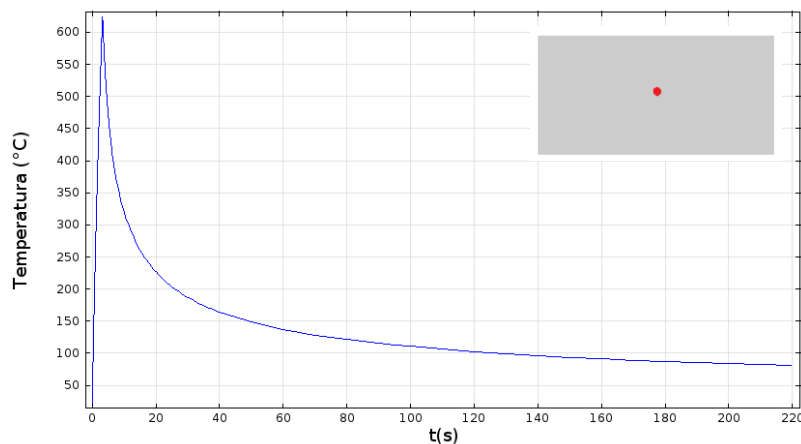


Figura 3.23. Temperatura [°C] contra tiempo [s] para el punto medio de la lámina a lo largo del tiempo. Caso 2.

La Figura 3.24 muestra que los esfuerzos de von Mises si se logran propagar a una gran distancia de la fuente. De ahí la necesidad de hacer un mallado fino en esa zona, de tal forma que los esfuerzos puedan ser descritos adecuadamente.

La Figura 3.25 muestra los esfuerzos al finalizar el estudio, se observa que los esfuerzos más elevados están en la zona por donde pasó el haz. Esta figura puede ayudar a comprender el comportamiento de las Figura 3.26, que indican la deformación plástica efectiva sobre el elemento tras finalizar el estudio, puede notarse que en los extremos verticales, donde se aplicó la fuente de calor, están las mayores deformaciones plásticas, las cuales propiciaron los dos pequeños círculos muy cerca de los extremos.

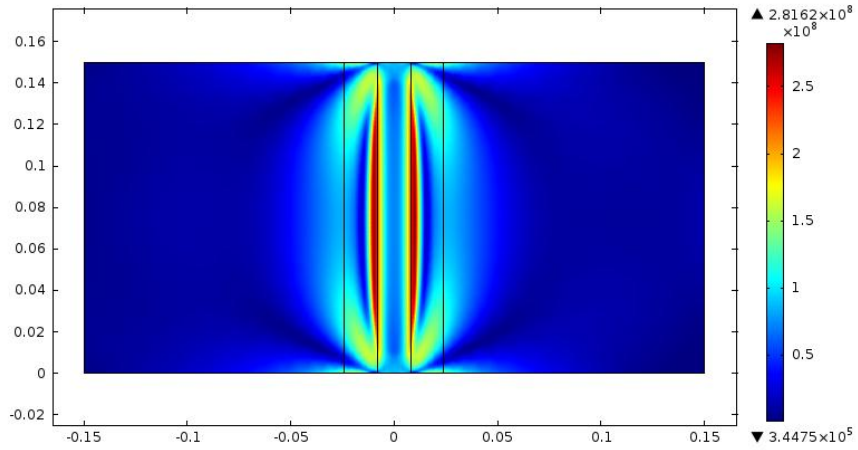


Figura 3.24. Distribución de los esfuerzos de Von Mises para un tiempo de 3.2s. Caso 2.

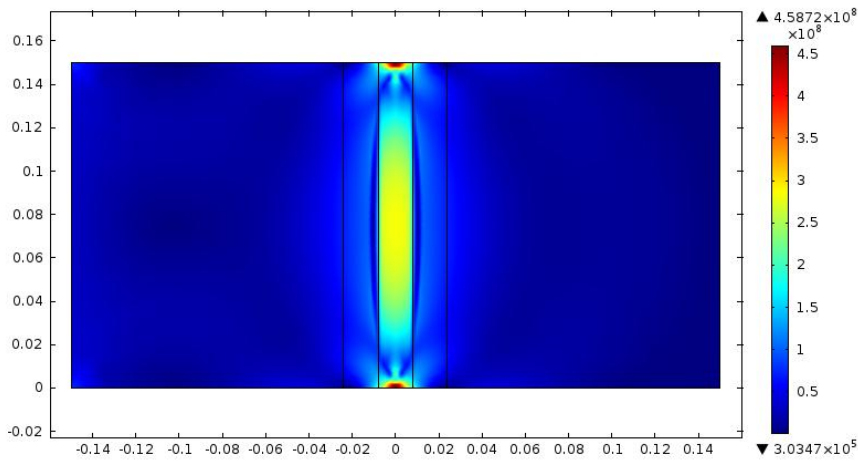


Figura 3.25. Distribución de los esfuerzos de Von Mises para un tiempo de 220s. Caso 2.

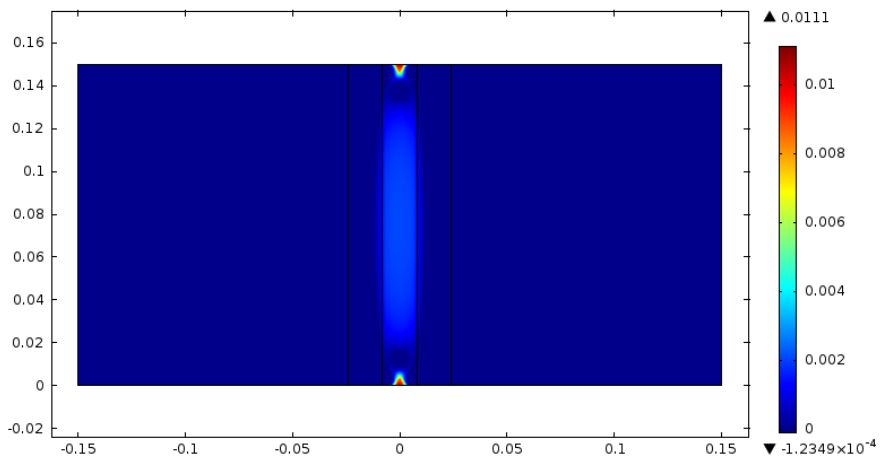


Figura 3.26. Deformación plástica efectiva al finalizar el estudio. Caso2.

Con la Figura 3.27 se puede observar cuál de todas las componentes del tensor de esfuerzos tiene una mayor influencia en el esfuerzo de Von Mises. Nuevamente, al igual que en el Caso 1, la componente en y es la que tiene mayor peso en el cálculo del esfuerzo de Von Mises. En este caso la restricción la produce la misma geometría de estudio, ya que al existir un calentamiento sobre toda una franja, la deformación es restringida sobre el eje y , no así para las deformaciones en x donde los elementos pueden deformarse con mayor libertad. La caída en la resistencia a la cedencia debido al incremento de la temperatura también se puede apreciar en esta figura donde en la parte central de la curva (zona donde se aplica el calor) hay una disminución el valor al cual el material cede, por tanto, los esfuerzos alcanzados deben ser menores. Una vez que la temperatura va en disminución (alejándose de la región de aplicación) el valor al cual el material cede se va incrementando.

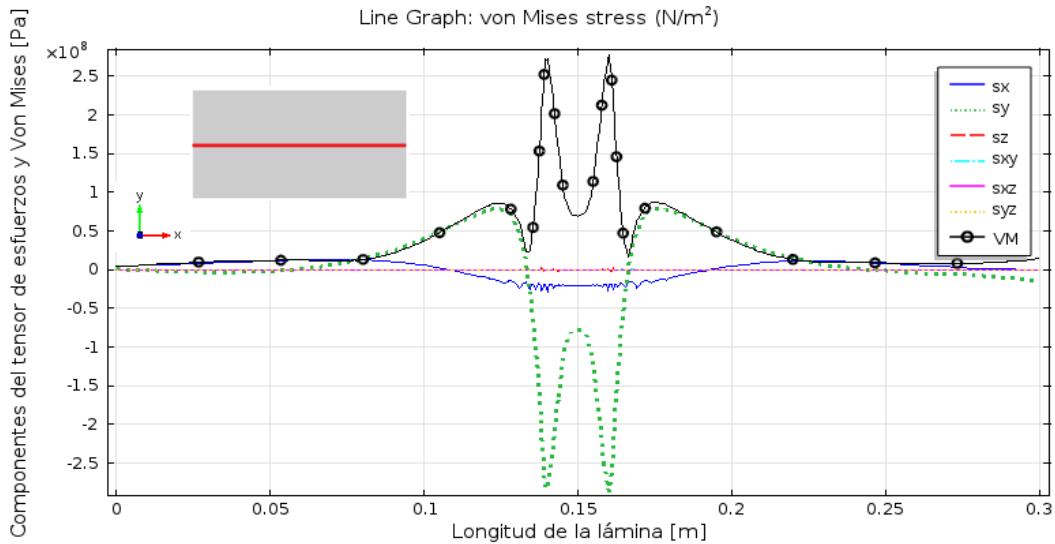


Figura 3.27. Componentes del tensor de esfuerzo y esfuerzo de Von Mises a los 3.2s a lo largo de una línea transversal a la fuente. Caso 2.

Una vez que el material se ha enfriado, su resistencia en la cedencia se ve incrementada y debido al endurecimiento por deformación su resistencia es aun mayor, haciendo que el esfuerzo necesario (esfuerzo de Von Mises) para que alcance la fluencia sea mayor (Figura 3.28). Otra característica es el cambio en el signo del esfuerzo en la región de calentamiento, pasando de estar a compresión durante el calentamiento a tensión en la etapa de enfriamiento.

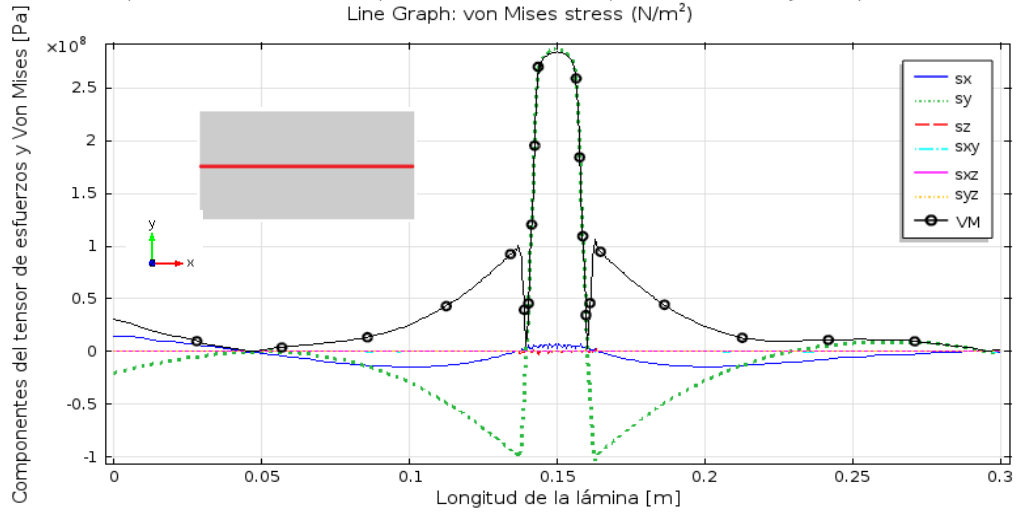


Figura 3.28. Componentes del tensor de esfuerzo y esfuerzo de Von Mises al finalizar el estudio a lo largo de una línea transversal a la fuente. Caso 2

3.3 Caso 3: Estudio 3D-Fuente de calor fija y transiente

En esta sección se realiza un estudio termo-estructural en 3D. Igual que en el caso anterior, la fuente de calor es aplicada sobre toda la línea de calentamiento, es decir, se aplica sobre una franja (Figura 3.3). Como en los casos anteriores el tiempo de exposición a dicha fuente es de 3.2s y el estudio se termina a los 220s. Para la simulación se utilizó un mallado de 39854 elementos tetraédricos de orden cuadrático y en el estudio se resolvieron 246348 grados de libertad.

La Figura 3.29 muestra el mallado utilizado para este caso de estudio en el plano x - y . Como en los casos anteriores se utilizó un mallado refinado en el área donde se aplica la fuente de calor y en las cercanías donde el gradiente de esfuerzos es bastante elevado. La Figura 3.30 muestra la distribución de los elementos a lo largo del espesor.

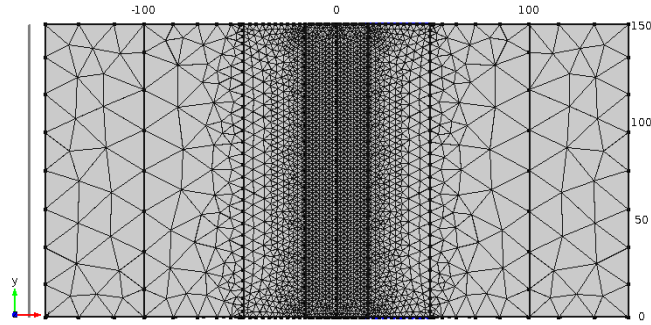


Figura 3.29. Mallado para el caso 3D-fuente estática. Caso 3.

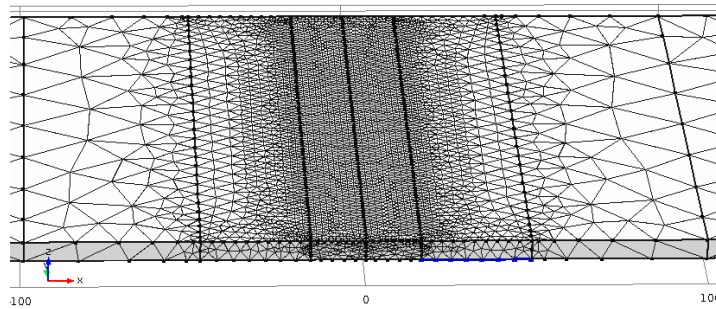


Figura 3.30. Vista 3D del mallado empleado en la simulación. Caso 3.

El calor aplicado [W] a lo largo del estudio [s] se puede apreciar en la Figura 3.31. Realizando un acercamiento (Figura 3.32) se puede apreciar que el valor es de aproximadamente 9825W que también está muy próximo al esperado de 9843W.

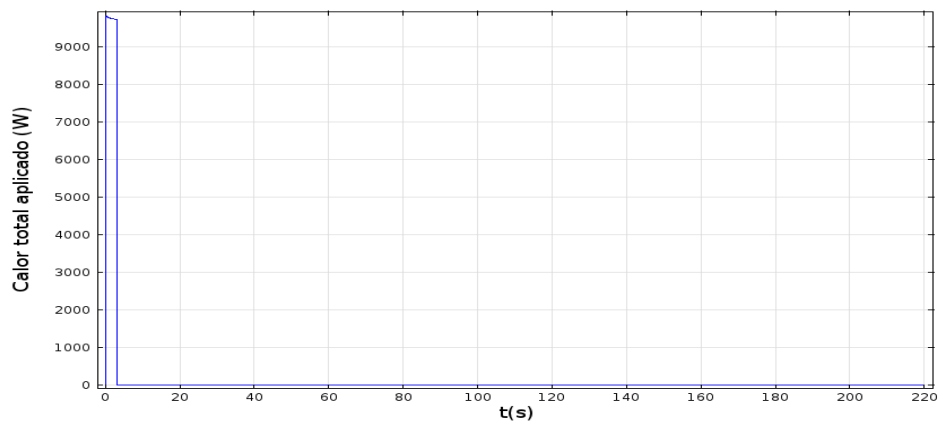


Figura 3.31. Calor aplicado [W] a lo largo del tiempo [s]. Caso 3.

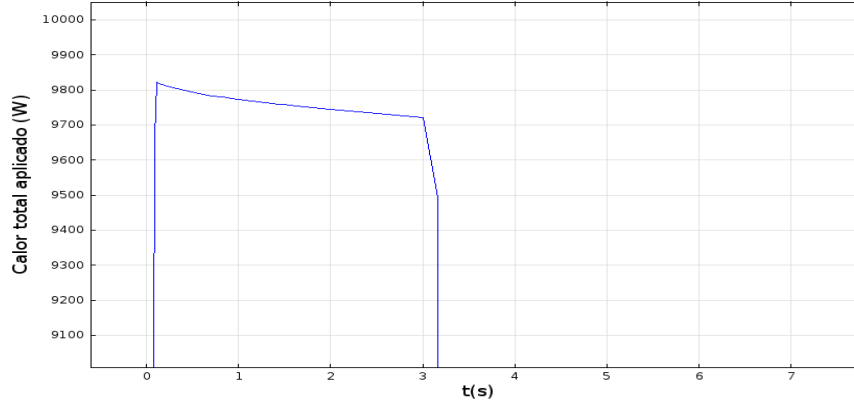


Figura 3.32. Calor aplicado [W] a lo largo del tiempo [s] (acercamiento). Caso 3.

La distribución de la temperatura sobre la lámina a los 3.2s es mostrada en la Figura 3.33, se observa que la temperatura se ha propagado muy poco sobre el plano x - y , sin embargo, esto no es así sobre el espesor de la lámina, pues como se observa en el Caso 1, la temperatura se ha propagado lo suficiente para hacer que el gradiente térmico se vea reducido. La Figura 3.34 muestra la distribución de temperatura al finalizar el estudio y se observa que el gradiente térmico aun es elevado.

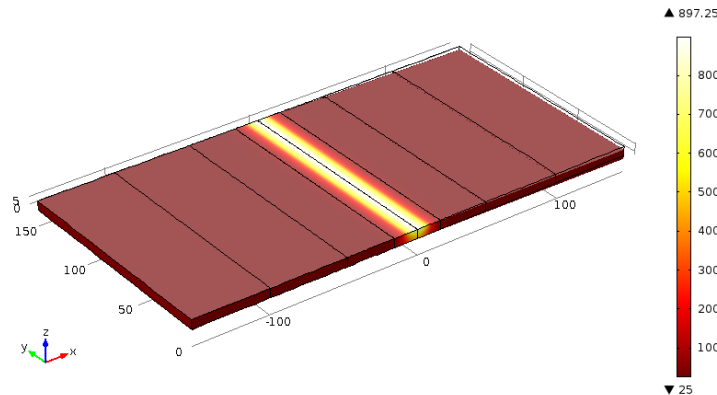


Figura 3.33. Distribución de la temperatura sobre la lámina para un tiempo de 3.2s. Caso3.

La distribución de la temperatura al finalizar el estudio es mostrada en la Figura 3.34. El gradiente térmico sobre el eje x es de 50°C , considerable para trabajos de precisión, sin embargo en nuestro caso se supone que ese gradiente ya no es representativo, pues el gradiente en dirección x no causa esfuerzos ni deformaciones de interés debido a que representa una dilatación uniforme y además no existe ninguna restricción en esta dirección.

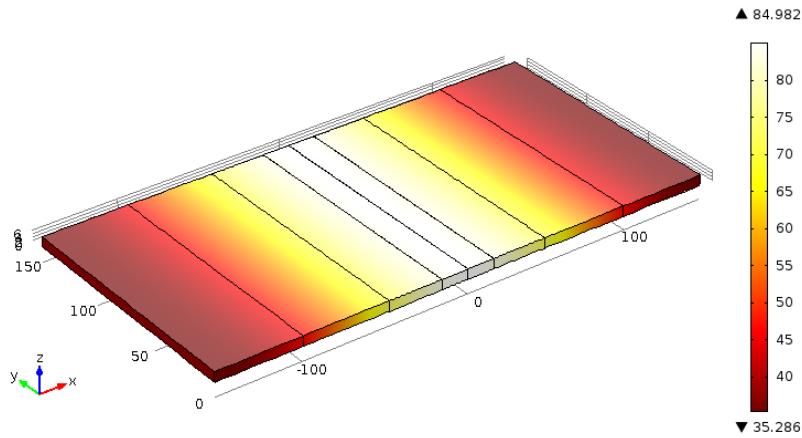


Figura 3.34. Distribución de la temperatura sobre la lámina para un tiempo de 220s. Caso 3.

El comportamiento de la temperatura en los puntos centrales puede ser observado en la Figura 3.35. Se puede notar que la temperatura máxima en el punto superior es muy parecida a la del Caso 1. La temperatura máxima del punto superior es de 897 °C y la temperatura final es 85°C. Se observa que, en el punto inferior la temperatura máxima está cerca de los 520°C. Ambas curvas alcanzan sus picos máximos en diferentes tiempos y en la etapa de enfriamiento las curvas se empalman completamente.

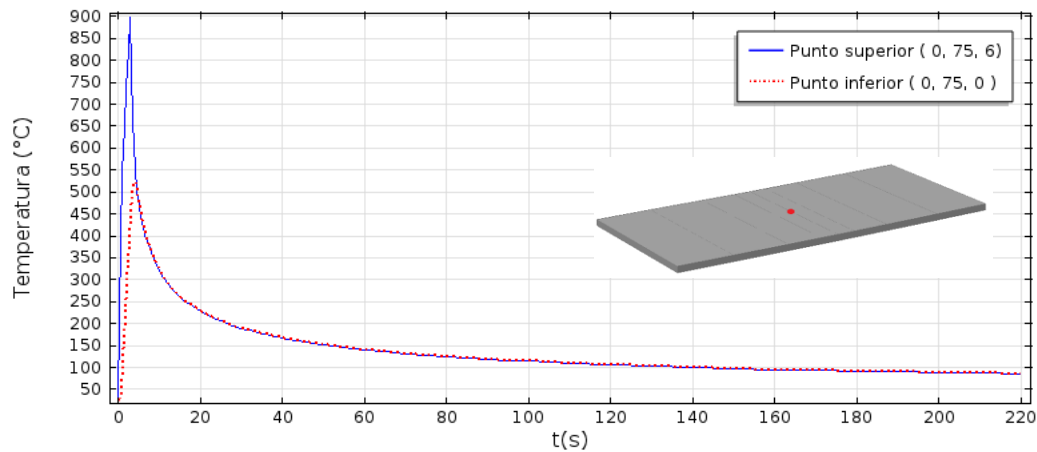


Figura 3.35. Temperatura [°C] contra tiempo [s] para el punto medio superior. Caso 3.

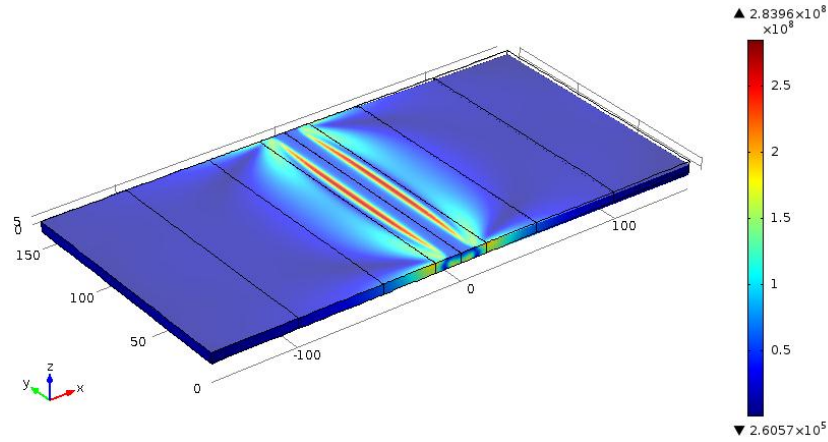


Figura 3.36. Distribución de los esfuerzos de Von Mises sobre la lámina para un tiempo de 3.2s. Caso 3.

La Figura 3.36 permite ver la distribución de los esfuerzos de Von Mises para un tiempo de 3.2s. Observamos que los esfuerzos máximos se encuentran localizados justo donde termina la fuente (sobre el eje x) y no donde la fuente aplica el calor directamente, esto se debe a que la alta temperatura disminuye la resistencia a la cedencia del material hasta valores muy pequeños (Figura 3.37).

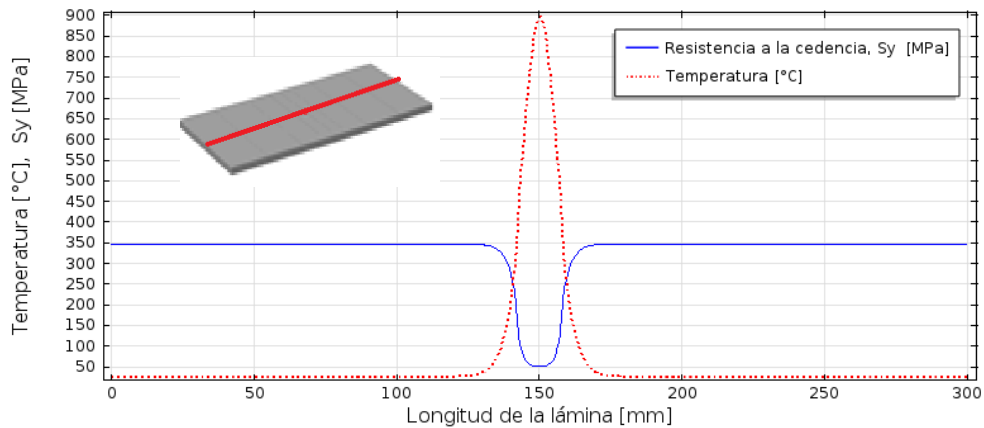


Figura 3.37. Resistencia a la cedencia y temperatura a lo largo de una línea de interés a los 3.2s del estudio. Caso 3.

En la Figura 3.38 se pueden apreciar los esfuerzos de Von Mises sobre la geometría una vez terminado el estudio. Podemos ver que los esfuerzos máximos se concentran en la región donde se aplicó la fuente e inmediatamente donde termina el área de aplicación.

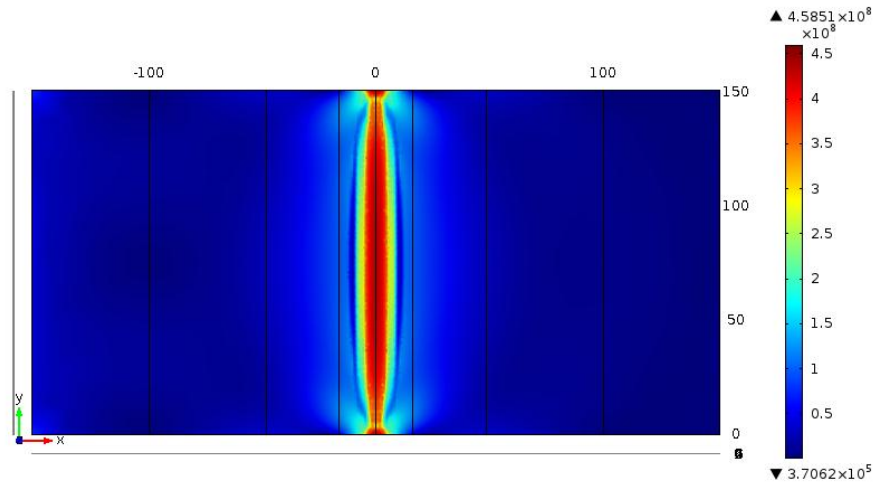


Figura 3.38. Distribución de los esfuerzos de Von Mises en el plano x-y para un tiempo de 220s

Realizando un corte a la Figura 3.38 a través de una sección perpendicular a donde pasa la fuente (Figura 3.39) observamos que semeja al Caso 1, sin embargo, la distribución de esfuerzos a lo largo de la geometría es diferente. Esto es natural ya que aquí se estudia un modelo 3D y en el Caso 1 se suponen deformaciones planas.

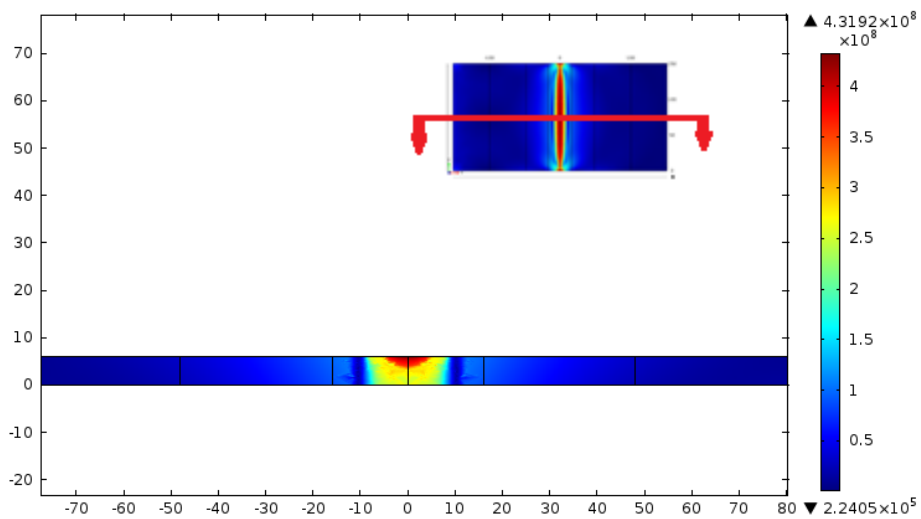


Figura 3.39. Vista cortada a partir de la Figura 3.38 (Acercamiento).

La deformación plástica efectiva es mostrada en la Figura 3.40 y como era de esperarse, la mayor deformación plástica se produce justo donde se aplica el calor.

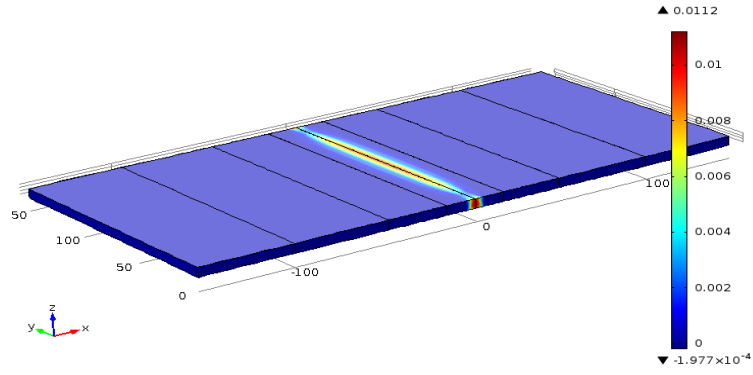


Figura 3.40. Deformación plástica efectiva al término del estudio. Caso 3.

Las componentes del tensor de esfuerzos en la Figura 3.41 dejan ver la influencia que tienen todas las componentes en el esfuerzo equivalente (esfuerzo de Von Mises). Nuevamente la componente con mayor predominio es la componente en y . La componente en z tiene más influencia que en el Caso 1, sin embargo, no se considera que tenga un gran aporte durante esta etapa de calentamiento.

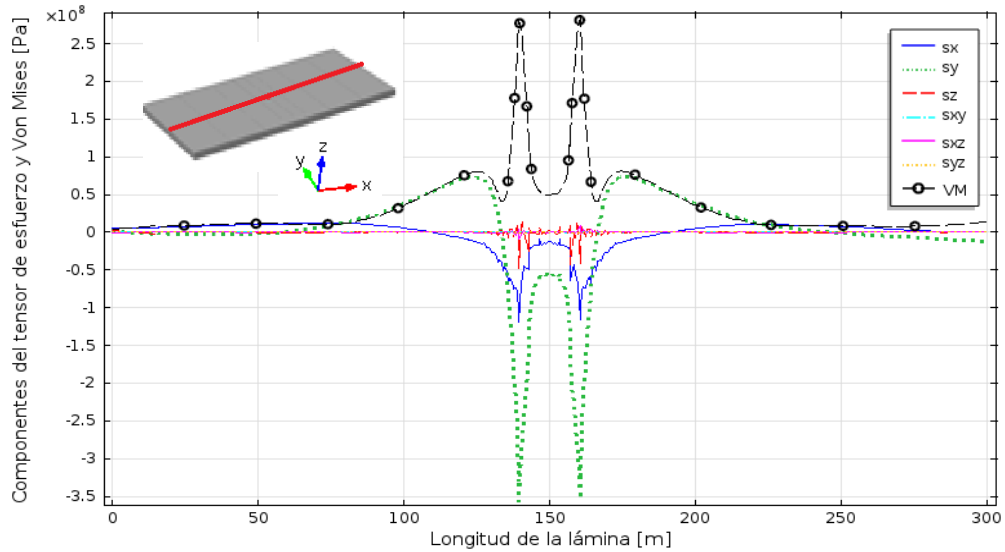


Figura 3.41. Componentes del tensor de esfuerzo y esfuerzo de Von Mises a los 3.2s. Caso 3.

Se observa que de la etapa de calentamiento (Figura 3.41) a la etapa de enfriamiento (Figura 3.42) los esfuerzos sufren una etapa de transición, pasando de estar a compresión a tensión. Esto puede visualizarse si imaginamos un cubo que, debido al incremento de la temperatura se expande (región donde se aplica calor), pero éste no se puede expandir libremente, ya que a su alrededor hay material a una temperatura inferior y no permitirá

que el material que se encuentra a alta temperatura se expanda libremente, ocasionando esfuerzos a compresión. Cuando el material calentado comienza a enfriarse tratará de encogerse provocando esfuerzos a tensión.

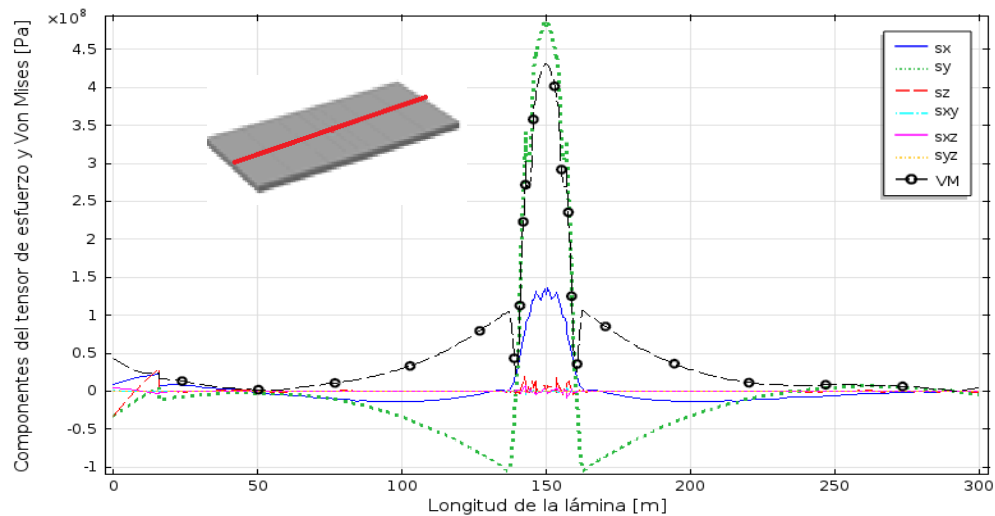


Figura 3.42. Componentes del tensor de esfuerzo y esfuerzo de Von Mises al finalizar el estudio. Caso 3.

Recordemos que una de las características a cuantificar en el formado láser es la distorsión final producida y para nuestro caso podemos realizarlo midiendo el ángulo que se forma entre el punto medio inferior derecho y el eje de las abscisas. La Figura 3.43 muestra el comportamiento de dicho ángulo con respecto al tiempo.

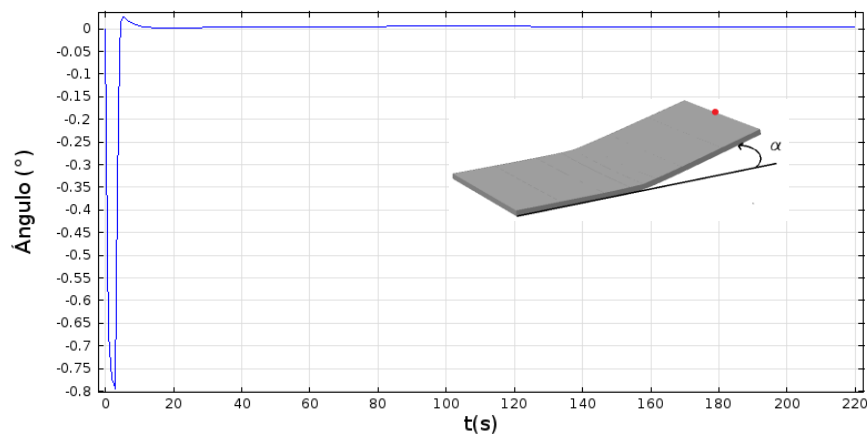


Figura 3.43. Ángulo [°] contra tiempo medido entre el punto medio inferior derecho y el eje de las abscisas. Caso 3.

3.4 Caso 4: Estudio 2D-Fuente de calor móvil

En esta sección se realiza un estudio termo-estructural 2D, comparable con el caso 2, pero ahora con la fuente reducida a su dimensión real y moviéndose sobre la línea de calentamiento. Para la simulación se utilizó un mallado de 3050 elementos triangulares de orden cuadrático y en el estudio se resolvieron 36861 grados de libertad. Para este caso se utilizó una fuente móvil de calor que recorre la lámina de principio a fin a una velocidad de 5mm/s.

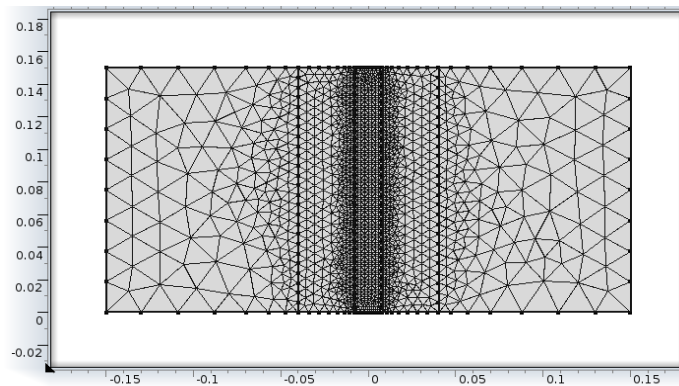


Figura 3.44. Mallado para el caso 2D con fuente móvil. Caso.4

La Figura 3.44 muestra el mallado para el caso con fuente móvil. Como en los casos anteriores, también se precisa de un refinado en el área de interés, que comprende la zona donde pasa la fuente de calor y las cercanías a dicha zona.

El calor aplicado a lo largo del tiempo se puede observar en la Figura 3.45 y en la Figura 3.46. Se puede apreciar que el valor es aproximadamente de 1.74 MW/m que multiplicado por el espesor nos da una potencia de 1044W, lo cual es muy próximo al valor esperado de 1050W.

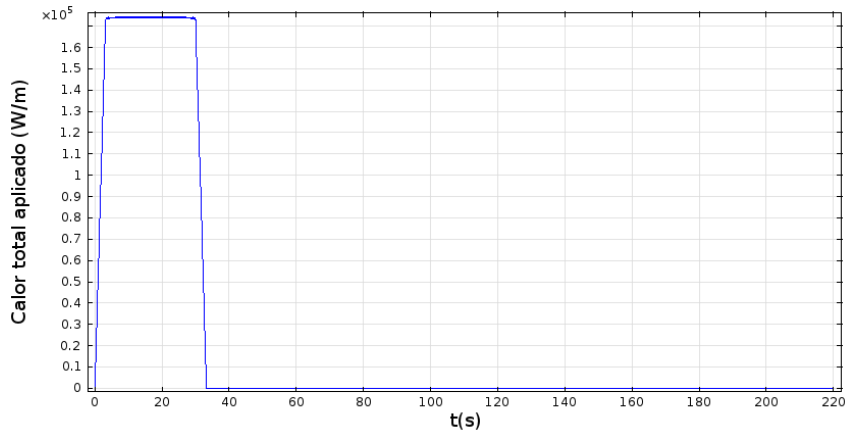


Figura 3.45. Calor aplicado [W/m] a lo largo del tiempo [s]. Caso 4.

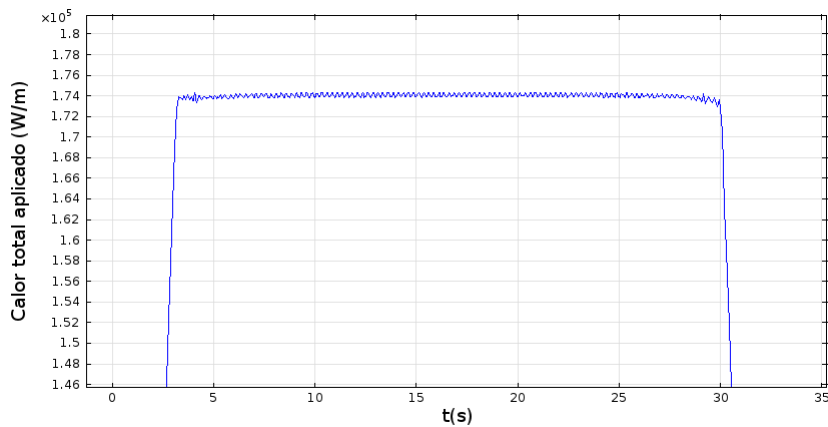


Figura 3.46. Calor aplicado [W/m] a lo largo del tiempo [s] (acercamiento). Caso 4

La Figura 3.47 muestra la distribución de la temperatura [°C] para un tiempo de 17s. Como puede notarse la temperatura máxima es muy parecida a la obtenida en el Caso 2 (como era de esperarse) esto debido a que la forma en que se aplica la fuente de calor es muy parecida (generación interna de calor).

La Figura 3.48 muestra la distribución de la temperatura sobre la geometría una vez que el estudio ha terminado. Podemos verificar que a pesar de ser un estudio con fuente móvil, las temperaturas finales, máximas y mínimas, están cercanas a las de los estudios con fuente fija.

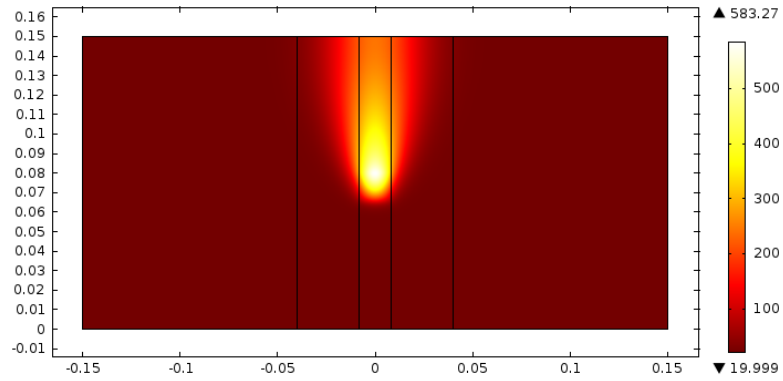


Figura 3.47. Distribución de temperatura [°C] para un tiempo de 17s. Caso 4.

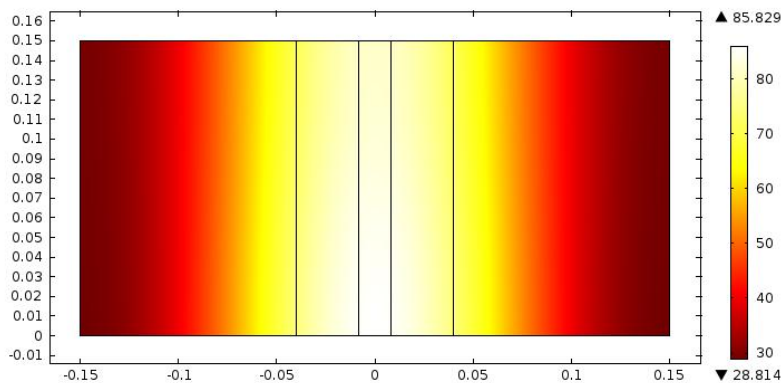


Figura 3.48. Distribución de temperatura [°C] para un tiempo de 220s. Caso 4.

La variación de la temperatura [°C] contra el tiempo [s] es mostrada en la Figura 3.49. Se alcanza una temperatura máxima de 583°C y una temperatura final de 83.6°C.

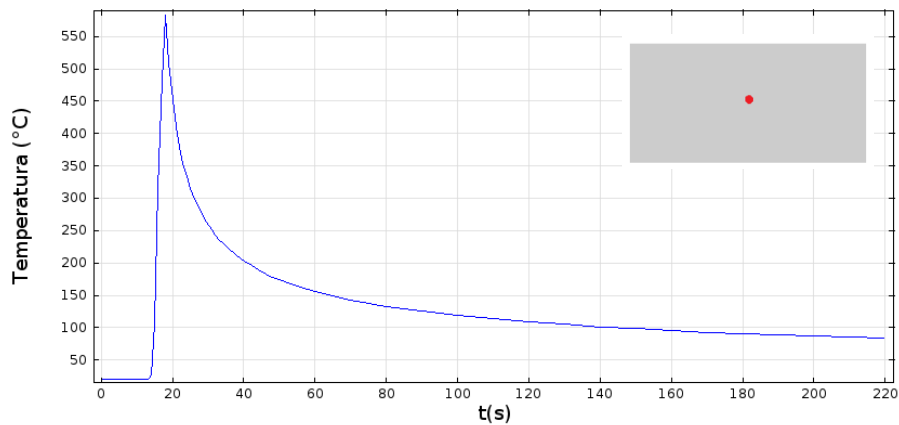


Figura 3.49. Variación de temperatura [°C] con respecto al tiempo [s] para el punto medio de la lámina. Caso 4

Los esfuerzos de Von Mises para un tiempo de 17s son mostrados en la Figura 3.50. Se puede observar que los esfuerzos más grandes se encuentran justo donde se termina la fuente de calor (como en los casos anteriores) provocado por la caída en la resistencia a la cedencia (Figura 3.51).

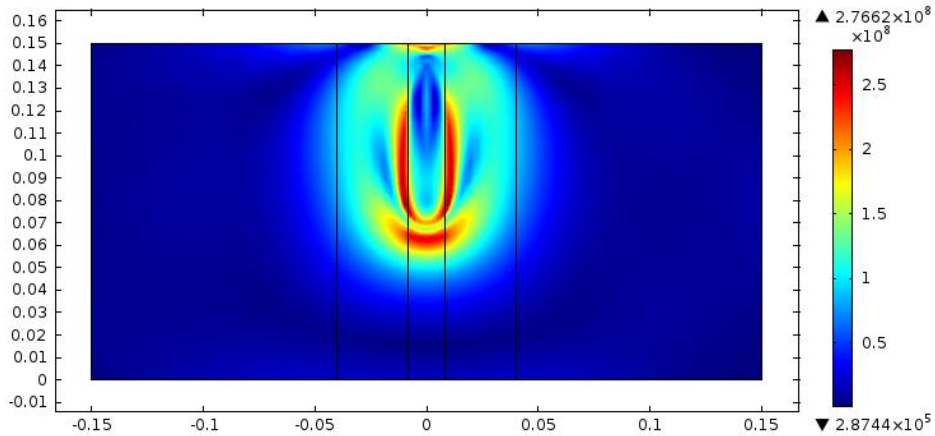


Figura 3.50. Distribución de los esfuerzos de Von Mises [Pa] para un tiempo de 17s. Caso 4.

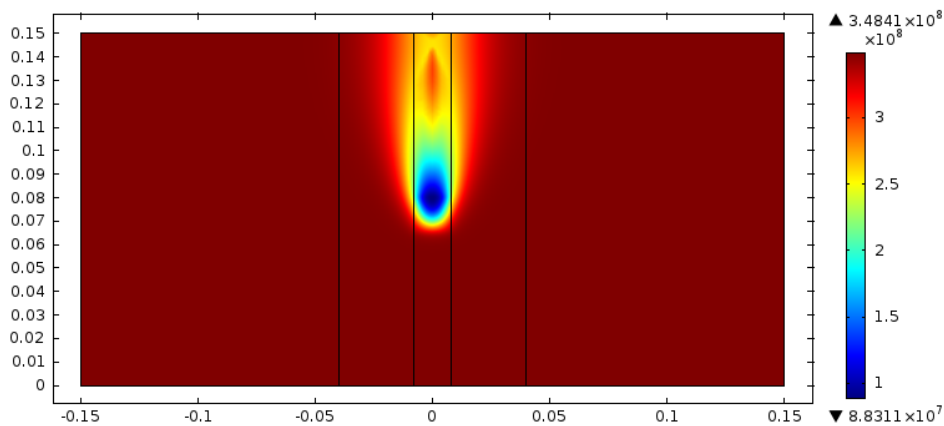


Figura 3.51. Resistencia a la cedencia [Pa] para un tiempo de 17s. Caso 4.

Podemos ver cómo se comportan los esfuerzos durante el calentamiento en la Figura 3.52 donde se muestra la fuente de calor y los esfuerzos producidos en y a tensión. En la Figura 3.53 se muestra la misma componente pero esta vez a compresión. Puede notarse que debido a la expansión térmica que están sufriendo los elementos calentados y a la restricción que ejercen los elementos circundantes que están a una temperatura inferior,

el área calentada está a compresión. Mientras que los esfuerzos que los rodean están a tensión.

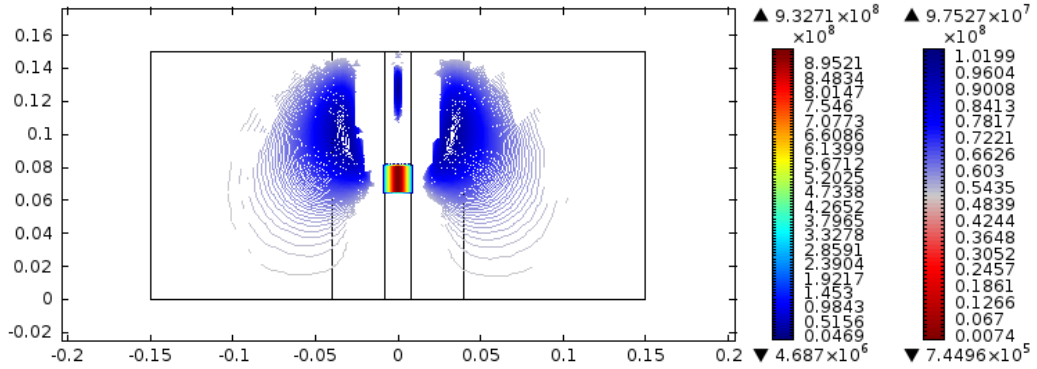


Figura 3.52. Fuente de calor [W/m^3] y componente en y del tensor de esfuerzos a tensión [Pa] respectivamente en $t=17s$.

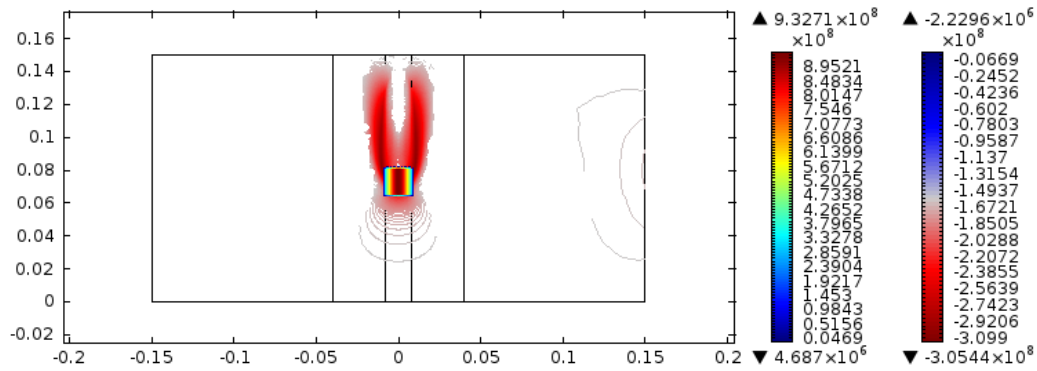


Figura 3.53. Fuente de calor [W/m^3] y componente en y del tensor de esfuerzos a compresión [Pa] respectivamente en $t=17s$.

Los esfuerzos residuales obtenidos son mayores en la zona donde hubo deformación plástica (Figura 3.54) debido al endurecimiento por deformación.

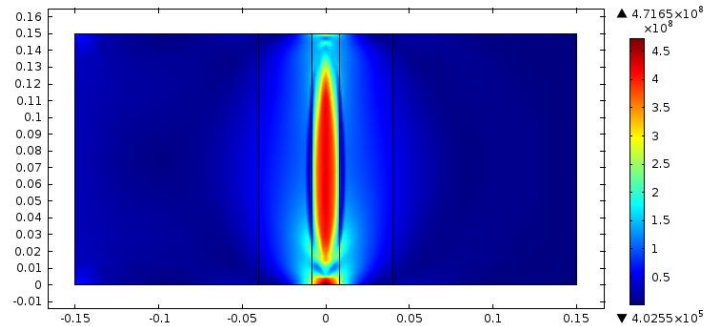


Figura 3.54. Distribución de los esfuerzos de Von Mises para un tiempo de 220s.

Nuevamente la región afectada por la plasticidad corresponde a la sección donde se aplicó el calor y a sus inmediaciones (Figura 3.55)

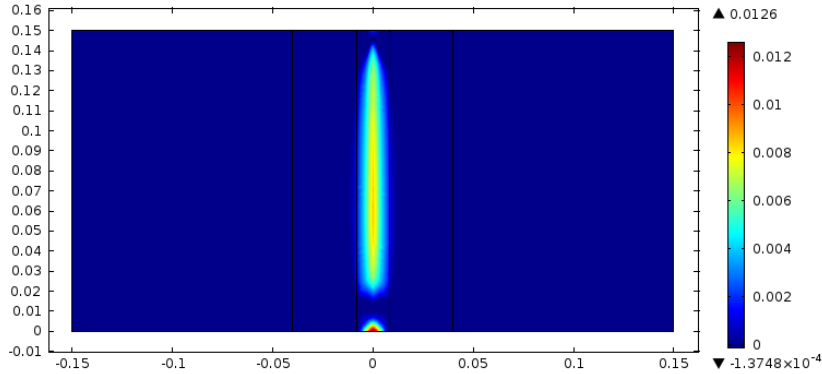


Figura 3.55. Deformación plástica efectiva tras finalizar el estudio. Caso 4.

En la Figura 3.56 se presentan las componentes del tensor de esfuerzos a lo largo de una línea. A diferencia de los estudios con fuente de calor estática, se observa cierta influencia del esfuerzo cortante σ_{xy} los cuales pasan de compresión a tensión y de tensión a compresión. La influencia de esta componente se debe al comportamiento de la fuente de calor, pues en este caso, la fuente es más pequeña y es móvil, esto produce que las expansiones no sean a lo largo de los ejes x , y y z , sino que esta vez, trata de expandirse en todas direcciones, dando lugar a esfuerzos cortantes.

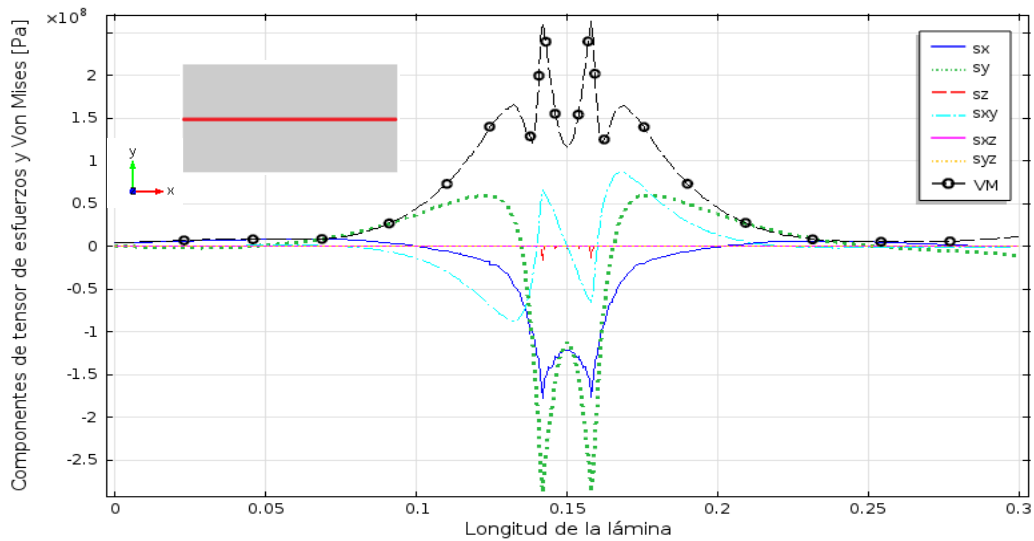


Figura 3.56. Componentes del tensor de esfuerzos y esfuerzo de Von Mises a lo largo de una línea a los 17s. Caso 4

Conforme el material se va enfriando el aporte que tiene la componente cortante disminuye, ya que la temperatura comienza a homogenizarse a lo largo del eje x

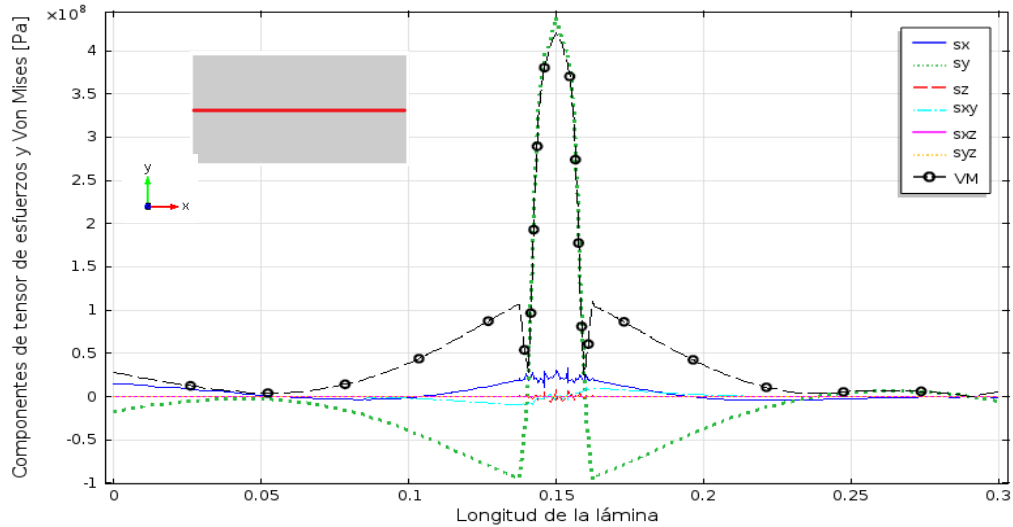


Figura 3.57. Componentes del tensor de esfuerzos y esfuerzo de Von Mises a lo largo de una línea al término del estudio. Caso 4

3.5 Caso 5: Influencia de las condiciones ambientales

Como se ha mencionado en capítulos anteriores siempre es recomendable simplificar cada problema, por esta razón, hay estudios donde se analiza la influencia que tiene el incluir o no los efectos producidos por la convección y radiación en procesos termo-mecánicos. No siempre se pueden despreciar estos efectos, por ello resulta de interés saber en dónde tiene menos impacto, de esta forma, la alteración en la solución del problema será mínima.

El estudio realizado en esta sección tiene como objetivo dar a conocer la influencia de la convección y radiación en un proceso termo-mecánico. Para ello se define el Caso 5 donde se retoma el Caso 3 y se le aplica convección y radiación.

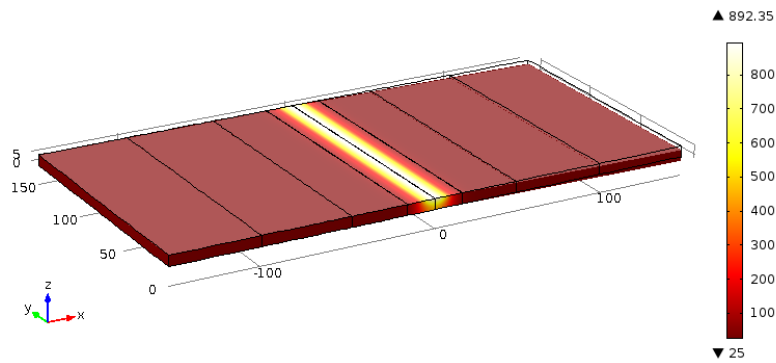


Figura 3.58. Distribución de la temperatura sobre la lámina para un tiempo de 3.2s. Caso 5

La Figura 3.58 muestra la distribución de temperaturas para un tiempo de 3.2s y comparando con la Figura 3.33 se observa una ligera diferencia aproximadamente de 5°C , sin embargo, comparando en un tiempo de 220s (Figura 3.59 y Figura 3.34) nos damos cuenta que la diferencia es de aproximadamente 15°C . Como era de esperarse, hay una mayor influencia en la etapa de enfriamiento, ya que durante el calentamiento la tasa de calor que entra es mayor que la que sale.

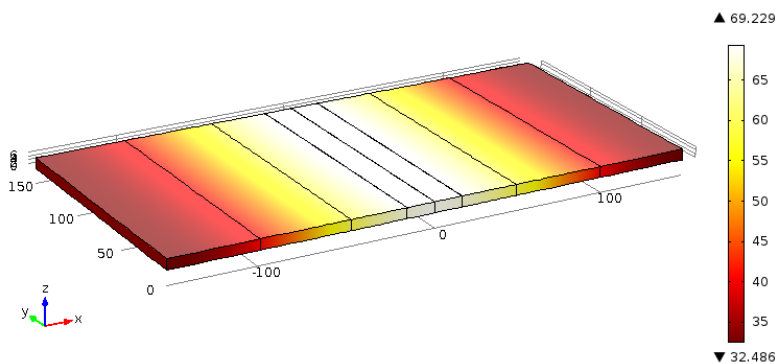


Figura 3.59. Distribución de la temperatura sobre la lámina para un tiempo de 220s. Caso 5

El historial de la temperatura se observa en la Figura 3.60 y como ya se había mencionado antes, hay una diferencia al finalizar el estudio de aproximadamente 16°C .

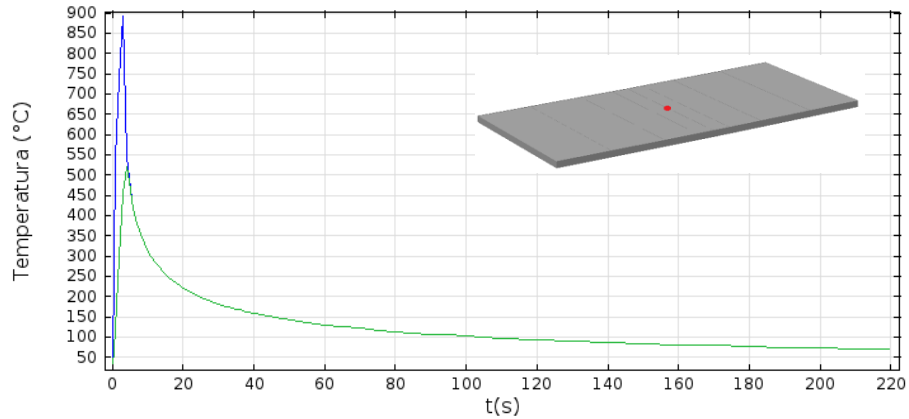


Figura 3.60. Temperatura contra tiempo en los puntos medios superior e inferior. Caso 5.

Comparando burdamente los esfuerzos máximos a los 3.2s (Figura 3.36 y Figura 3.61) no se nota una diferencia notable, sin embargo, se incrementa un poco cuando se compara al finalizar el estudio (Figura 3.62) pues aquí hay una diferencia de aproximadamente 20MPa. La Figura 3.63 muestra la deformación plástica efectiva y se observa que la región dónde se aplica el calor es la que alcanza plasticidad.

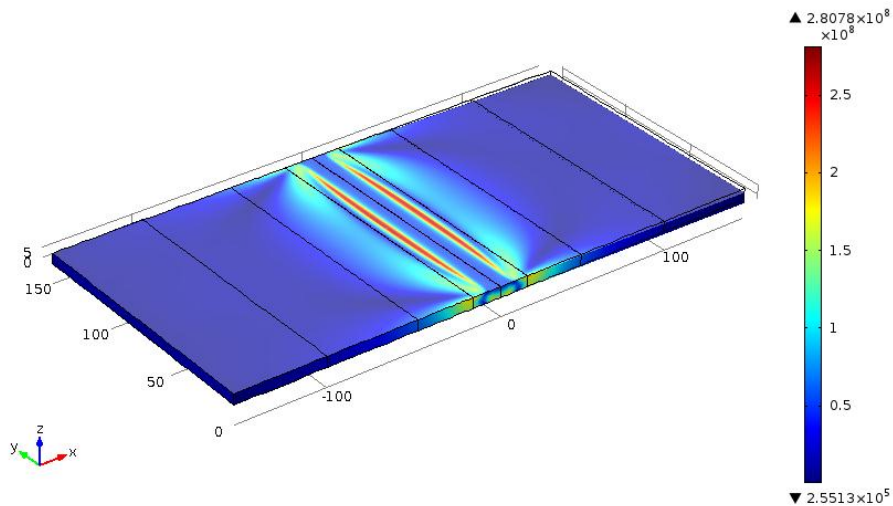


Figura 3.61. Distribución del esfuerzo de Von Mises sobre la lámina para un tiempo de 3.2s. Caso 5.

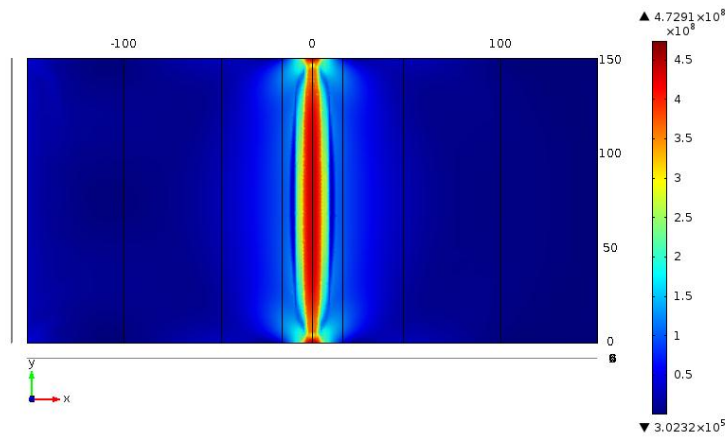


Figura 3.62. Distribución del esfuerzo de Von Mises sobre la lámina para un tiempo de 220s. Plano x - y . Caso 5.

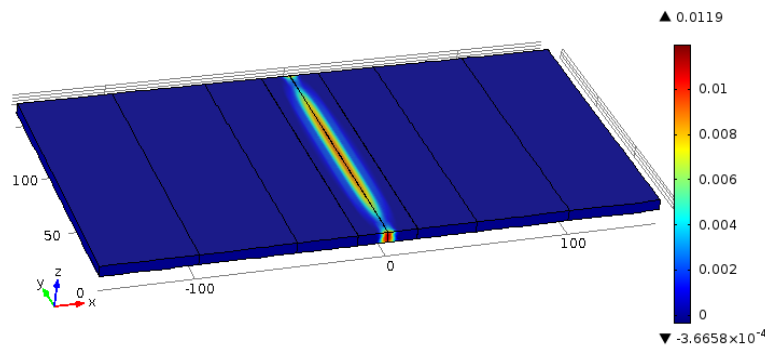


Figura 3.63. Deformación plástica efectiva al finalizar el estudio. Caso 5

Como era de esperarse las componentes del tensor de esfuerzos durante el calentamiento (Figura 3.64) muestran las mismas características que en el Caso 3, ya que en el calentamiento la tasa de calor es muy superior al que sale.

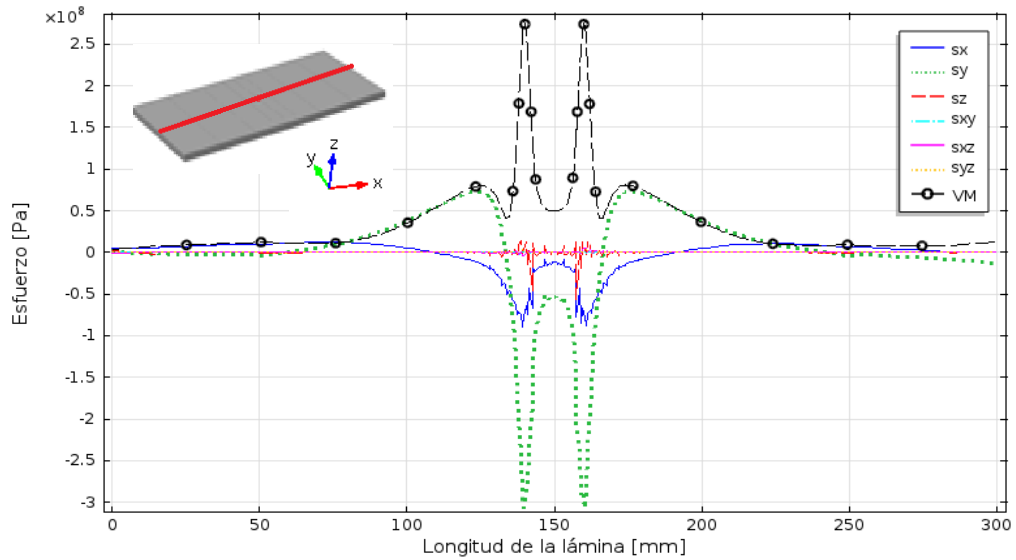


Figura 3.64. Componentes de tensor de esfuerzo y esfuerzo de Von Mises para un tiempo de 3.2s sobre una línea transversal a la fuente. Caso 5.

Al finalizar el estudio tampoco se muestra un efecto considerable (Figura 3.65).

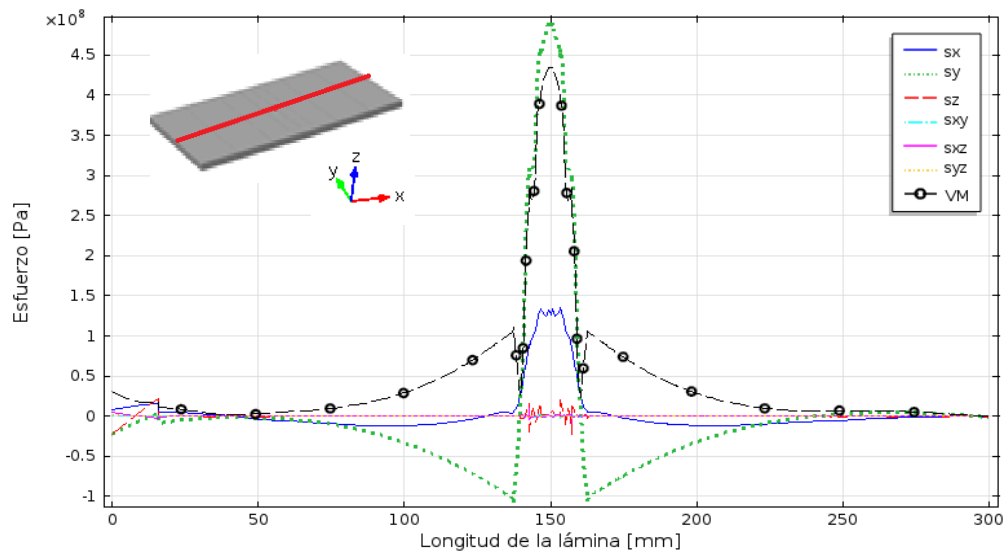


Figura 3.65. Componentes de tensor de esfuerzo y esfuerzo de Von Mises tras finalizar el estudio sobre una línea transversal a la fuente. Caso 5.

Cuando se compara el historial de la distorsión angular (Figura 3.43 y Figura 3.66) no se observa un cambio apreciable.

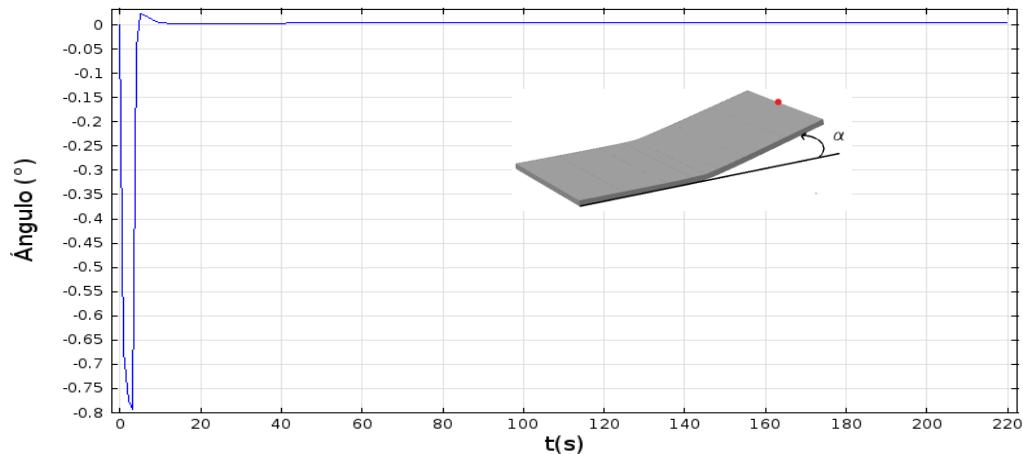


Figura 3.66. Distorsión angular contra tiempo para el Caso 5.

3.6 Análisis de resultados

Como se observa en la Tabla 3.2 las temperaturas en los Casos 1 y 3 están muy acordes, ya que la fuente de calor aplicada en cada caso, fue sobre la frontera. En los Casos 2 y 4 el calor fue aplicado sobre el volumen, y como se puede observar, las temperaturas máximas son muy similares, pero muy debajo de las temperaturas máximas obtenidas en los casos 1 y 3. Estos resultados nos dan una idea clara en cuanto a la variación de temperaturas, ya que, aunque fue la misma cantidad de energía depositada, el tiempo, la intensidad y la forma de aplicarse no fue igual. El efecto de la intensidad se puede notar entre los Casos 1 y 3 contra los Casos 2 y 4, dado que en estos últimos casos se despreja la distribución de temperatura sobre el espesor de la lámina. Por lo tanto, la temperatura obtenida no representa la temperatura a la superficie, pero sí la temperatura promediada sobre el espesor de la lámina. Si consideramos la temperatura inferior en los Casos 1 y 3 se puede concluir que las temperaturas obtenidas en los casos 2 y 4 son equivalentes a los obtenidos en Casos 1 y 3.

Comparando las temperaturas a lo largo del tiempo (Figura 3.67. Comparación de las temperaturas en el punto central superior a través del tiempo para los casos con fuentes estáticas. se observa la diferencia que existe entre aplicar el calor sobre un volumen y la frontera.

Tabla 3.2. Temperaturas medidas en el punto medio de la lámina para cada uno de los casos.

Caso	T_{\max} (°C)	T_{final} (°C)
1	912.6	81
2	624.85	81
3	897	85
4	583.25	83
5	892	69

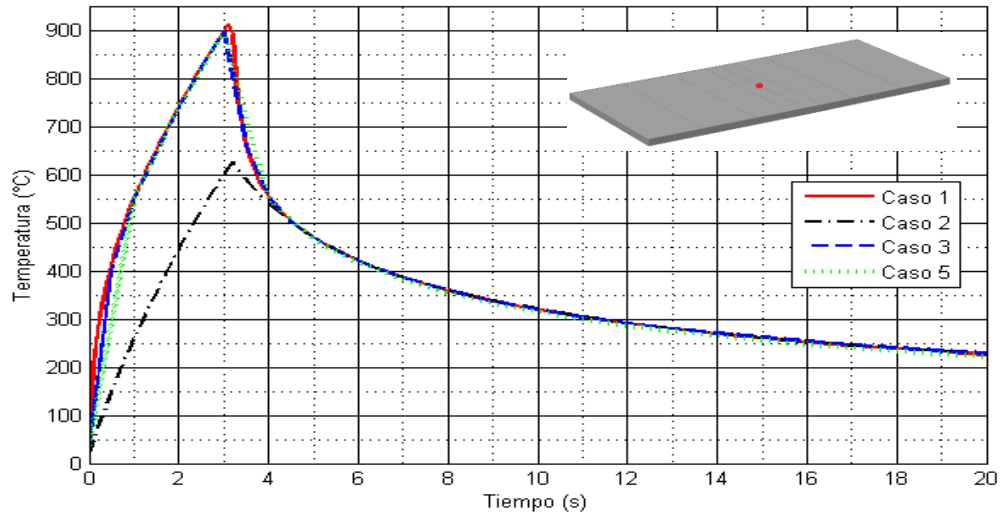


Figura 3.67. Comparación de las temperaturas en el punto central superior a través del tiempo para los casos con fuentes estáticas.

También podemos observar el efecto en la temperatura cuando incluimos convección y radiación. En la Tabla 3.2 se aprecia que existe poca influencia cuando la fuente de calor está pasando por el punto de estudio, ya que el calor que entra (debido a la fuente de calor) es muy superior al que sale (convección y radiación) por lo que este término de pérdida de calor no tiene una contribución notable. Una vez que el haz ha pasado el comportamiento de la temperatura se ve ligeramente alterado (Figura 3.68), ya que, la influencia de la fuente se reduce considerablemente a medida que ésta se aleja del punto de interés. Por tanto el efecto de la convección y radiación puede llegar a tener gran

importancia en la etapa de enfriamiento si la remoción de calor debida a la convección es elevada (convección forzada).

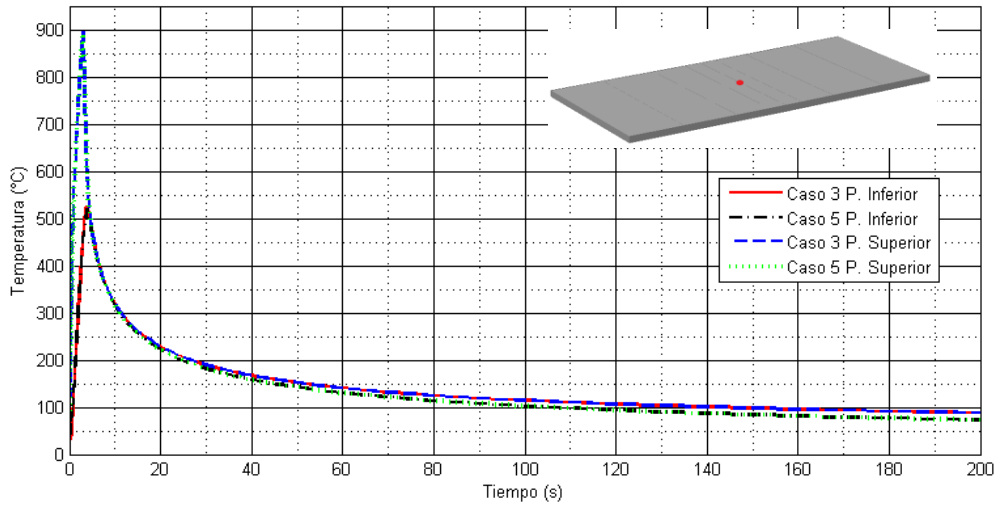


Figura 3.68. Comparación de la temperatura para los Casos 3 y 5.

Comparando las componentes en x e y del tensor de esfuerzo (Figura 3.69 y Figura 3.70) podemos observar que la componente en y tiene mayor influencia. En general podemos decir que tienen la misma tendencia, además los esfuerzos son del mismo orden. En la Figura 3.71 se aprecia mejor la diferencia existente entre los estudios.

En cuanto a la deflexión angular final, se observa que prácticamente no existe, esto se debe a que el calor aplicado sobre la lámina se aplica sobre toda una franja simultáneamente haciendo que toda la lámina se flexione uniformemente y sin nadie que la restrinja. Una vez que se retira la fuente, la lámina trata de regresar a su posición inicial, sin embargo, el gradiente de temperatura se ha reducido, al punto que su deflexión angular resulta muy pequeña.

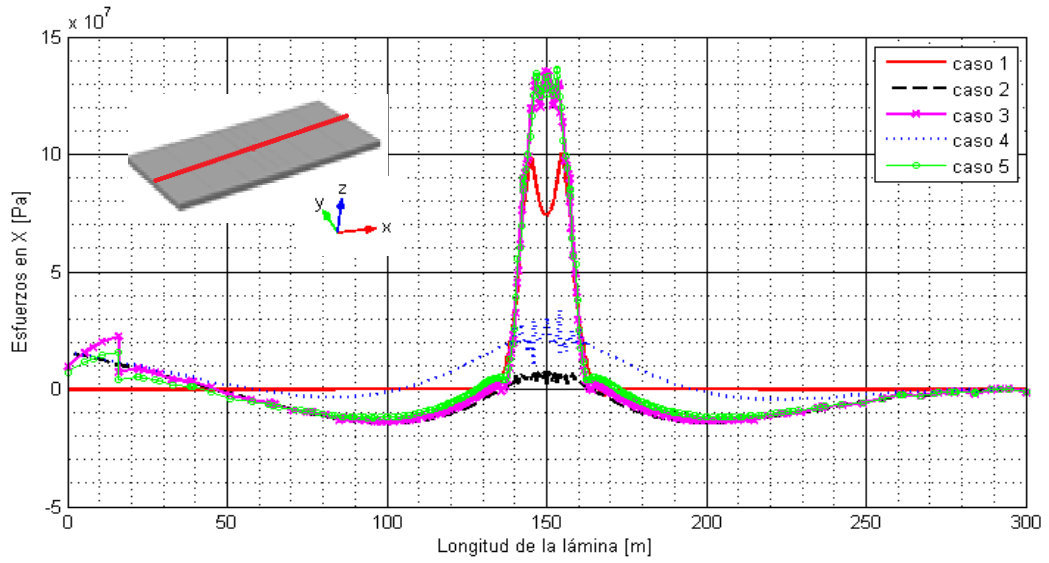


Figura 3.69. Componente en x del tensor de esfuerzo.

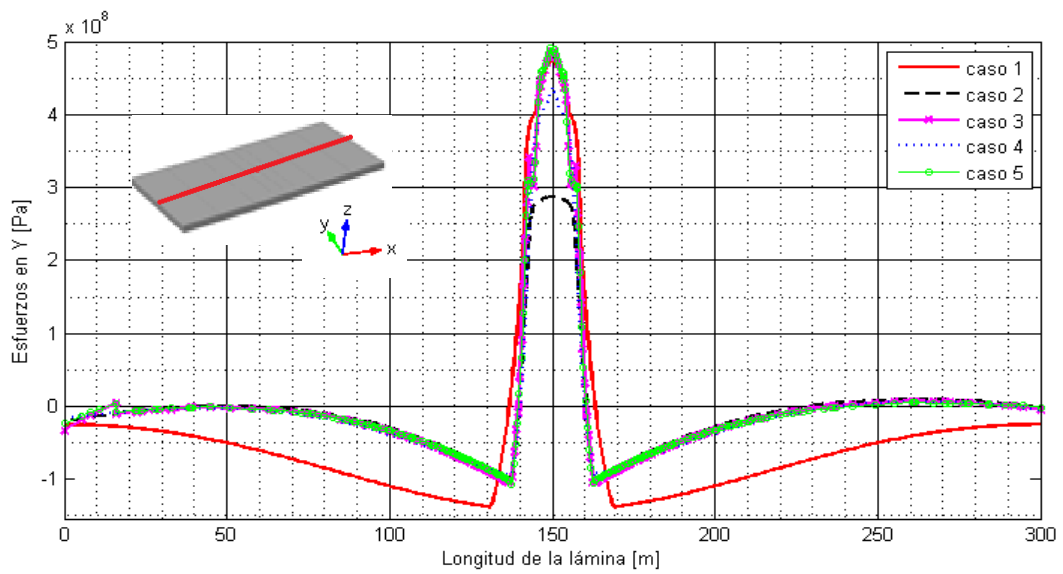


Figura 3.70. Componente en y del tensor de esfuerzo.

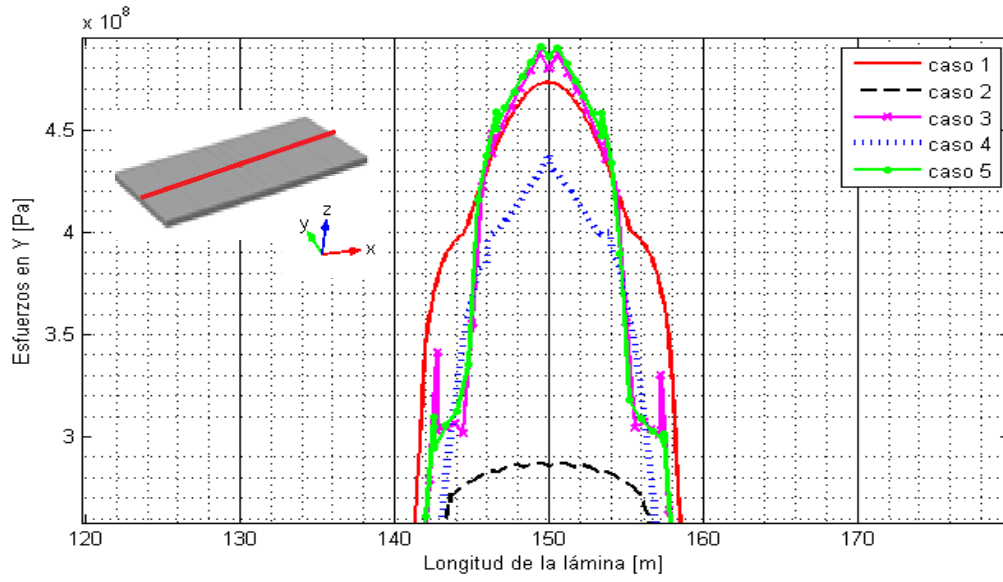


Figura 3.71. Componente en y del tensor de esfuerzo (acercamiento).

4 SIMULACIÓN DEL PROCESO DE FORMADO LÁSER

4.1 Planteamiento del problema

Después del estudio del proceso de formado con modelos simplificados, en este capítulo se estudia el proceso de formado láser con el modelo más completo: un modelo 3D con una fuente móvil. El mallado consistió en 34202 elementos tetraédricos de orden cuadrático y se resolvieron 213364 grados de libertad. El mallado utilizado se muestra en la Figura 4.1, donde se puede apreciar el refinado utilizado en el plano X-Y, así como también se refinó a lo largo del espesor Figura 4.2.

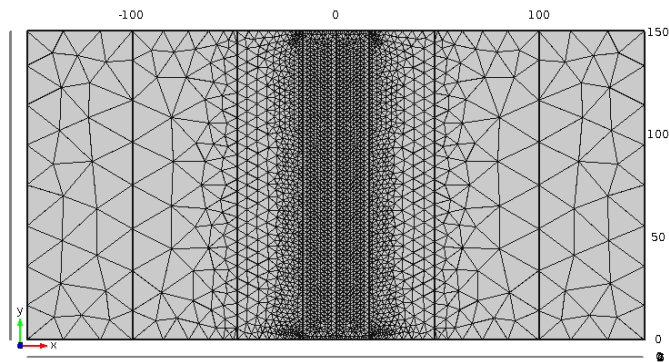


Figura 4.1. Mallado utilizado para la simulación.

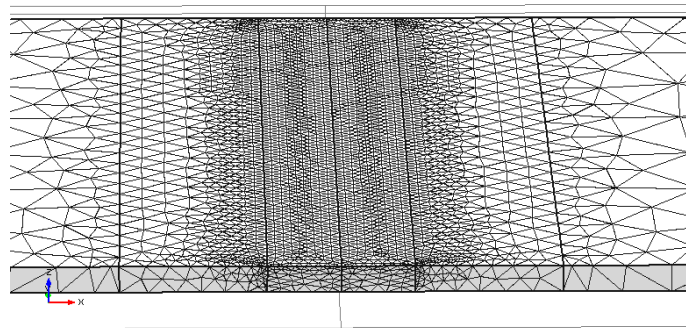


Figura 4.2. Vista 3D del mallado.

El calor aplicado debido a la fuente a través del tiempo se muestra en la Figura 4.3 y se puede observar que es de aproximadamente 1045W muy de acorde al valor esperado de 1050W. La Figura 4.4 muestra un acercamiento que deja ver oscilaciones en dicho valor, éstas se deben al desplazamiento de la fuente de calor, ya que al desplazarse aplica el calor cada vez sobre elementos distintos.

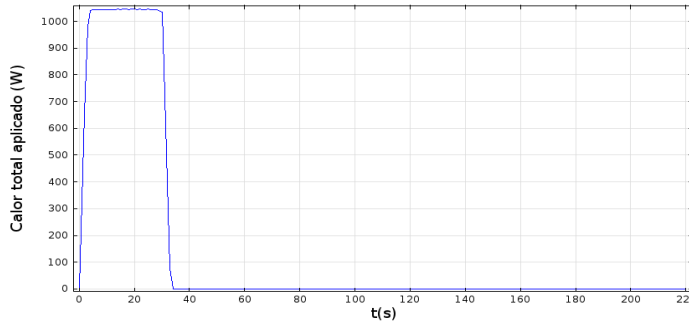


Figura 4.3. Calor aplicado a la lámina [W] a través del tiempo [s]

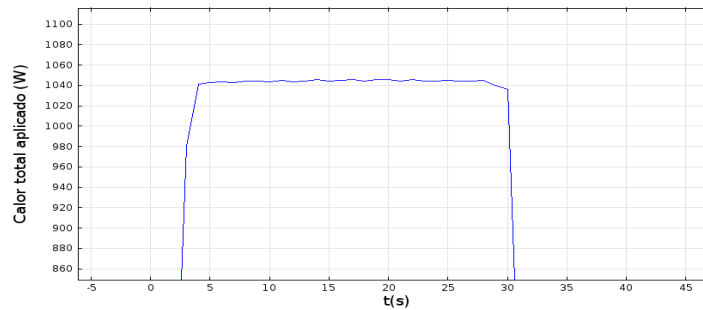


Figura 4.4. Calor aplicado a la lámina [W] a través del tiempo [s] (acercamiento).

4.2 Análisis de resultados

La Figura 4.5 muestra la distribución de temperatura para un tiempo de 17s, que está muy acorde a las temperaturas obtenidas en los Casos 1, 3 y 5, ya que la forma de aplicación también es sobre la frontera, aunque el valor es ligeramente reducido. Sin embargo, esta reducción también se ha observado entre los Casos 2 y 4, donde existe una diferencia entre el calentamiento de toda la línea a la vez o con una fuente móvil. En el caso de la fuente móvil existe un flujo de calor en la dirección longitudinal que no existe cuando se aplica la fuente sobre toda la línea y esta diferencia puede explicar la diferencia en la temperatura máxima obtenida.

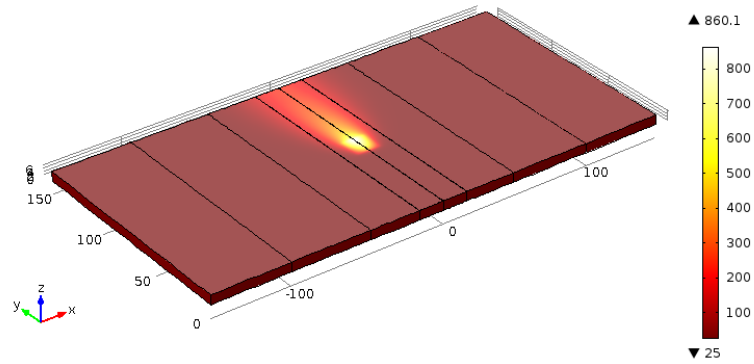


Figura 4.5. Distribución de la temperatura [°C] sobre la geometría para un tiempo de 17s

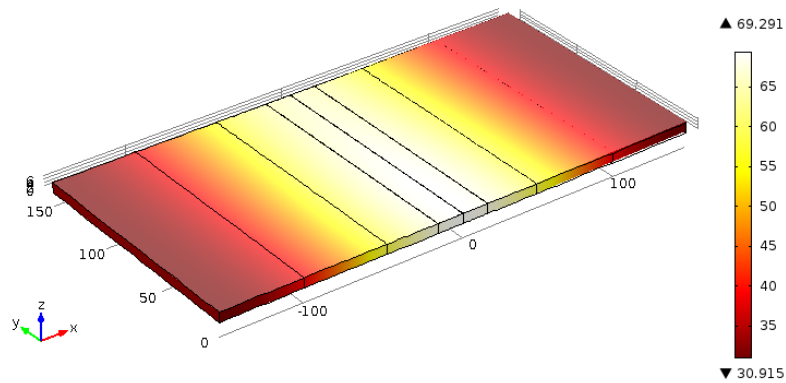


Figura 4.6. Distribución de la temperatura [°C] sobre la geometría para un tiempo de 220s

La temperatura máxima al finalizar el estudio se puede apreciar en la Figura 4.6. El valor es muy cercano al obtenido en el Caso 5 en la sección 3.5, ya que en ambos se aplica enfriamiento por convección y radiación.

Durante el calentamiento observamos que los esfuerzos (Figura 4.7) no son iguales a los calculados en los estudios previos, esto se esperaba, ya que no se resolvió el mismo problema, sin embargo, si se observa una gran semejanza en cuanto al comportamiento con el Caso 4.

Con las Figura 4.8-Figura 4.11 podemos verificar qué partes de la lámina se encuentran a tensión o compresión cuando el haz láser se mueve por ella. En la Figura 4.8 se grafica la componente en x del tensor de esfuerzos que está a tensión. Los esfuerzos a compresión para esta misma componente los observamos en la Figura 4.9. Puede verificarse que la zona que está más caliente está sometida a esfuerzos de tipo compresivo, ya que los

alrededores restringen su movimiento de expansión. Por otra parte las regiones que están más frías tratan de contener la expansión, por lo tanto, quedan a tensión.

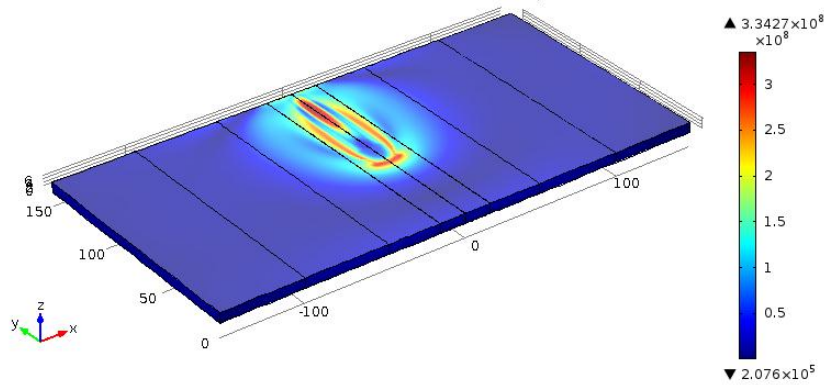


Figura 4.7. Distribución de los esfuerzos de Von Mises sobre la geometría para un tiempo de 17s

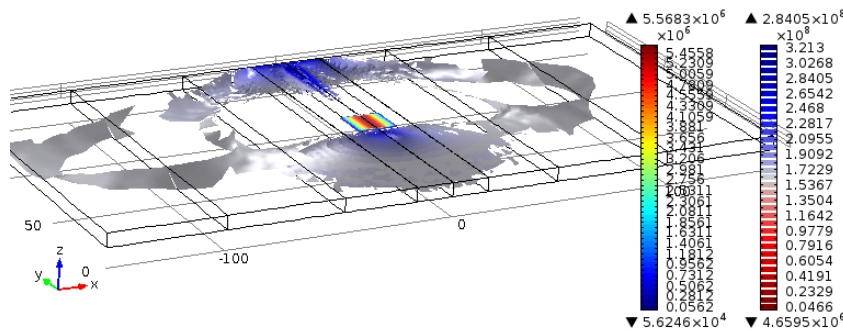


Figura 4.8. Iso-superficies para la fuente de calor $[W/m^2]$ y la componente en x del tensor de esfuerzos (tensión) $[Pa]$ respectivamente para $t=17s$.

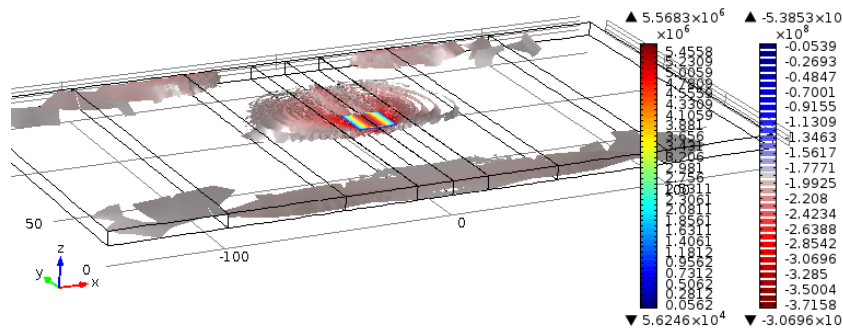


Figura 4.9. Iso-superficies para la fuente de calor $[W/m^2]$ y la componente en x del tensor de esfuerzos (compresión) $[Pa]$ respectivamente para $t=17s$.

Podemos hacer lo mismo con la componente en y del tensor de esfuerzos. De la misma forma separamos los esfuerzos a compresión y tensión, Figura 4.10 y Figura 4.11 respectivamente. Se observa que la zona más afectada por los esfuerzos está en las cercanías del haz y que conforme se va alejando de la zona dañada los efectos disminuyen.

yen. La estela que va dejando la fuente al pasar por la lámina, pasa de estar en compresión a tensión, por lo tanto solo existirá compresión durante el calentamiento, y durante el enfriamiento pasa a estar en tensión.

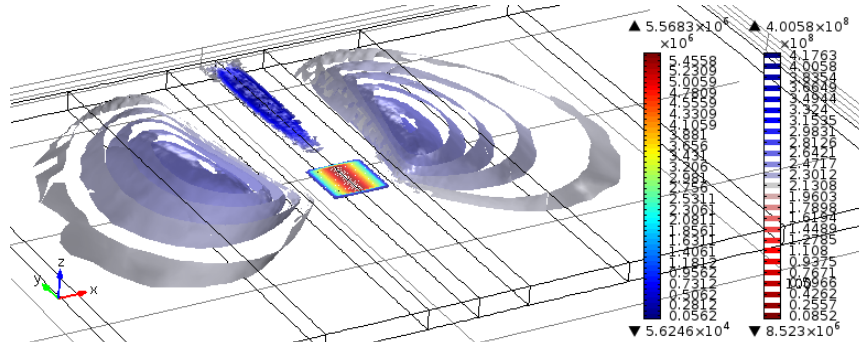


Figura 4.10. Iso-superficies para la fuente de calor [W/m^2] y la componente en y del tensor de esfuerzos [Pa] respectivamente para $t=17\text{s}$.

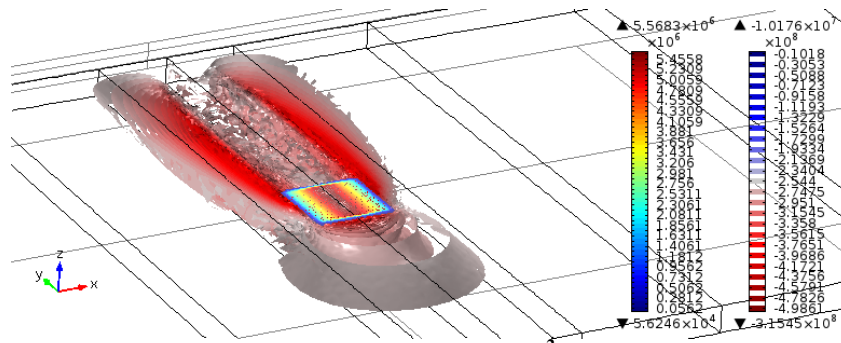


Figura 4.11. Iso-superficies para la fuente de calor [W/m^2] y la componente en y del tensor de esfuerzos [Pa] respectivamente para $t=17\text{s}$.

Ahora pasemos a analizar el tensor de deformación plástica y cómo se comporta mientras el haz está pasando por la lámina. La magnitud que se alcanza en cada caso, nos da una idea de donde se están produciendo los mayores esfuerzos (recordando que a mayor deformación menor esfuerzo y a menor deformación más esfuerzo). Verificando para las Figura 4.12-Figura 4.14, notamos que en la componente en z se presentan las mayores deformaciones y en la componente y se encuentran las menores deformaciones. Por lo tanto se espera que los esfuerzos sean acordes con estos resultados, proporcionando los mayores esfuerzos en la componente en y y los menores esfuerzos en la componente z (que es lo que se ha observado en los estudios del capítulo anterior).

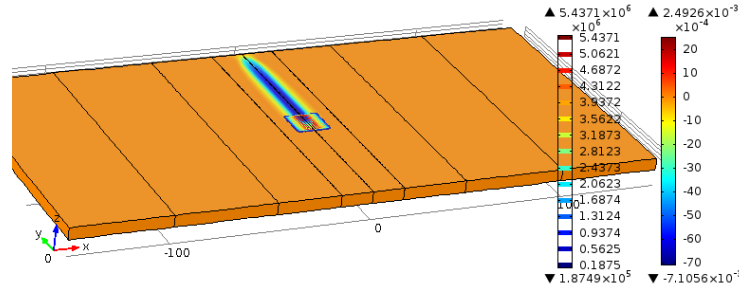


Figura 4.12. Fuente de calor [W/m²] y componente en x del tensor de deformación [mm/mm] respectivamente en $t=17s$.

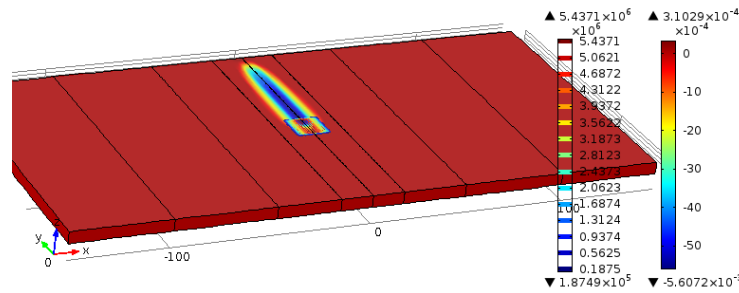


Figura 4.13. Fuente de calor [W/m²] y componente en x del tensor de deformación [mm/mm] respectivamente en $t=17s$.

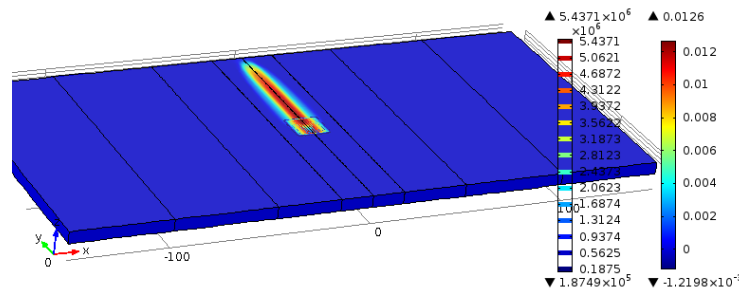


Figura 4.14. Fuente de calor [W/m²] y componente en x del tensor de deformación [mm/mm] respectivamente en $t=17s$.

Los esfuerzos de Von Mises tras finalizar el estudio se muestran en la Figura 4.15 y se verifica que los mayores esfuerzos están justo donde pasó el haz, así como también la deformación plástica producida (Figura 4.16).

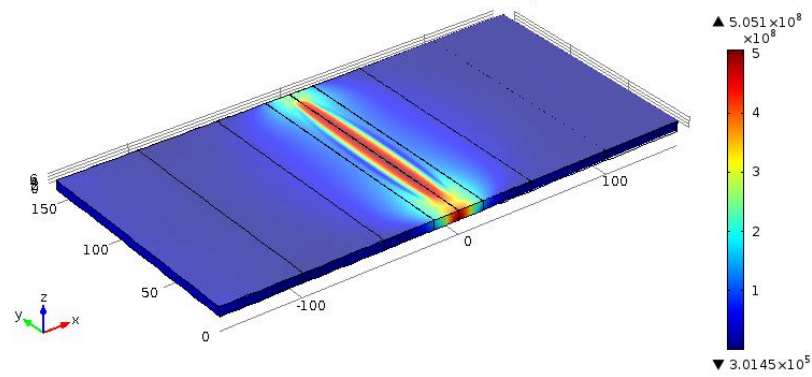


Figura 4.15. Distribución de los esfuerzos de Von Mises tras finalizar el estudio.

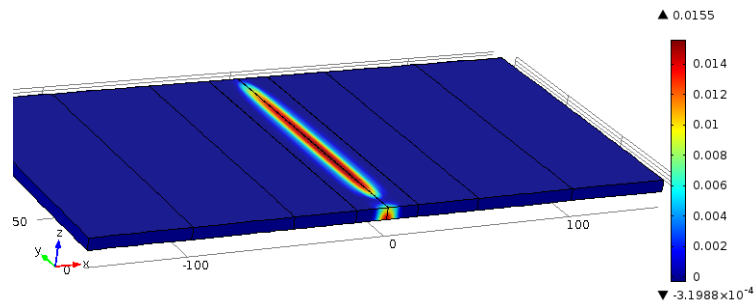


Figura 4.16. Deformación plástica efectiva sobre la geometría para el caso de formado láser.

4.3 Validación del modelo

4.3.1 Primer caso de validación

Para la validación de nuestro modelo se utiliza un artículo de Kyrsanidi et al., [32]. Las curvas que usaremos como validación del modelo son las que se muestran en la Figura 4.17.

Comencemos por evaluar el comportamiento de la temperatura a lo largo del tiempo (Figura 4.18) donde el máximo valor alcanzado es de 850 °C y la temperatura al final del estudio es de 65 °C. Los valores pico alcanzados corresponden a los obtenidos en el Capítulo 3 en los que el calor es aplicado sobre la frontera. El valor final de temperatura corresponde a la sección 3.5 donde también se aplica convección y radiación.

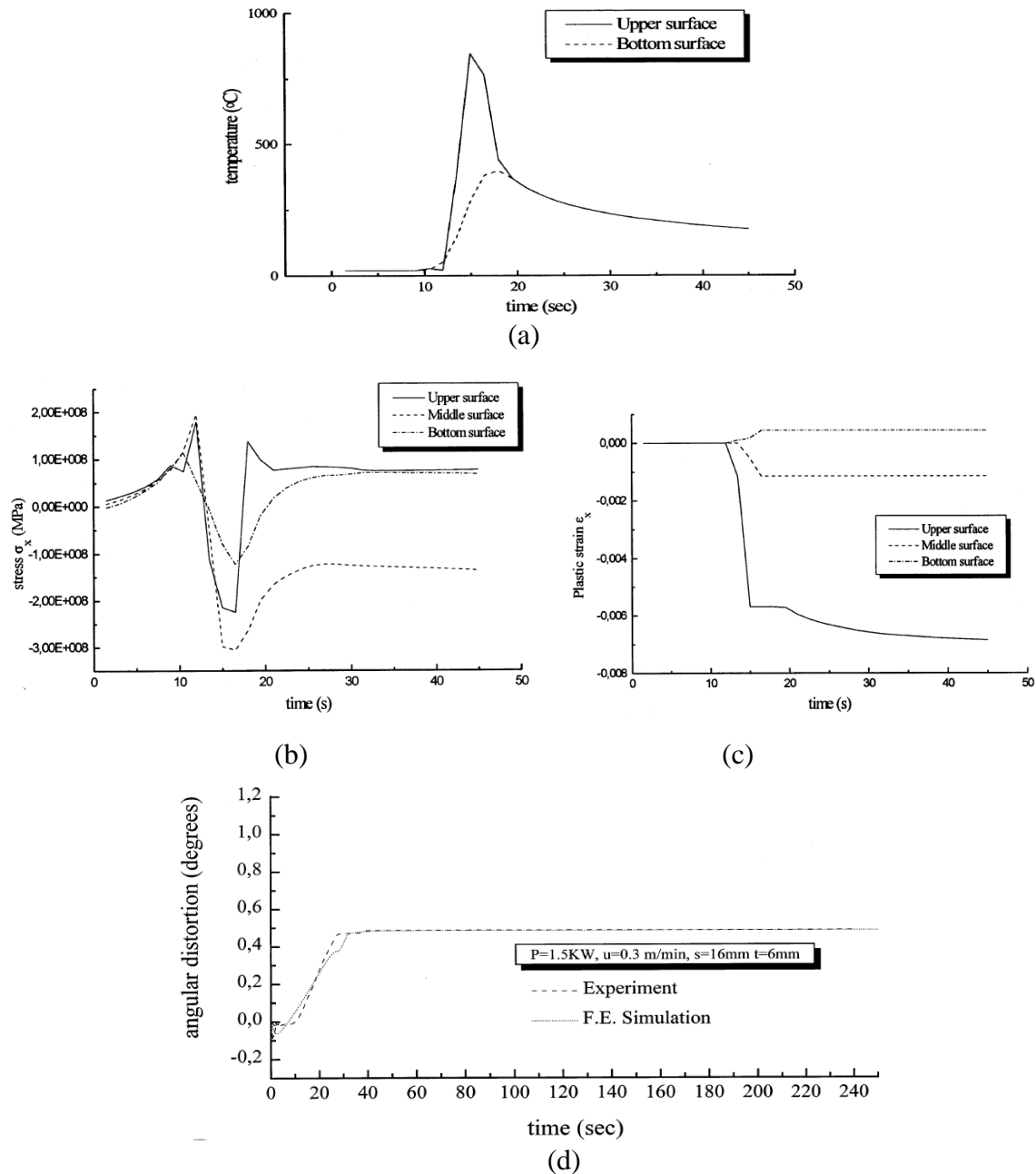


Figura 4.17. Curvas obtenidas de Kyrzanidi et al. [32], a) Temperatura contra tiempo para la cara inferior y superior, b) Componente en x del tensor de esfuerzos, c) Componente en x del tensor de deformaciones plásticas, d) Distorsión angular.

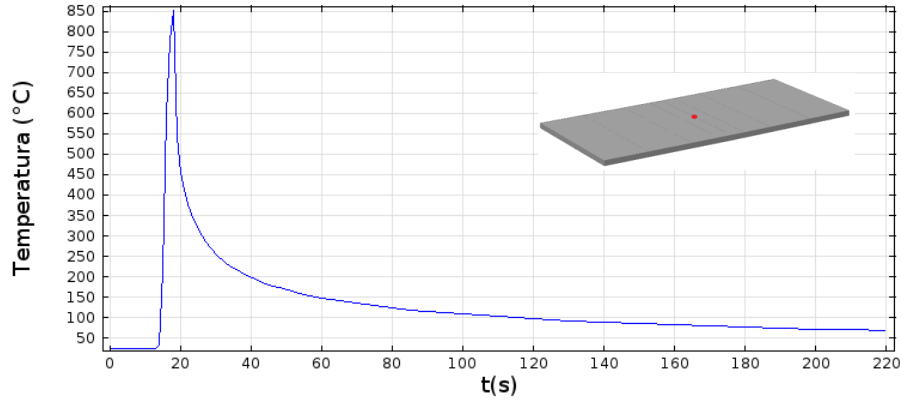


Figura 4.18. Temperatura [°C] contra a [s] medida en el punto central de la lámina.

La deflexión medida en el extremo con respecto al eje x y como varía durante el estudio se muestra en la Figura 4.19.

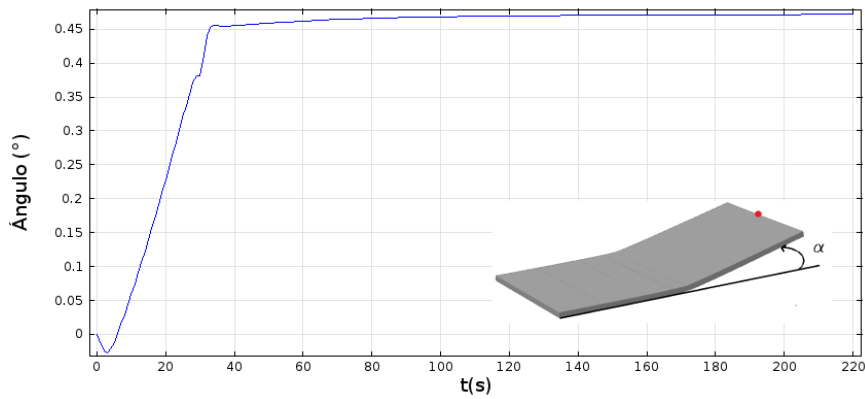


Figura 4.19. Comportamiento del ángulo de deflexión [°] con respecto al tiempo [s].

Como se puede apreciar en las Figura 4.18 y Figura 4.19, se reproduce el mismo comportamiento que el esperado (Figura 4.17). La distorsión final de la lámina sobre el plano x - z se observa en la Figura 4.20

En la realización de este trabajo se ha observado que es más común encontrar referencias que realicen estudios de esfuerzos residuales en procesos de soldadura, ya que en formado láser la mayoría de los estudios son dedicados a la distorsión final de la pieza, por esta razón se utiliza una referencia donde se lleva a cabo un análisis de esfuerzos residuales en procesos de soldadura por fusión [33]. El autor realiza una simulación de un proceso de soldadura por arco para unir dos placas de acero a tope (Figura 4.21),

entre los estudios que realiza en su tesis, se presentan los resultados que conciernen a los esfuerzos residuales.

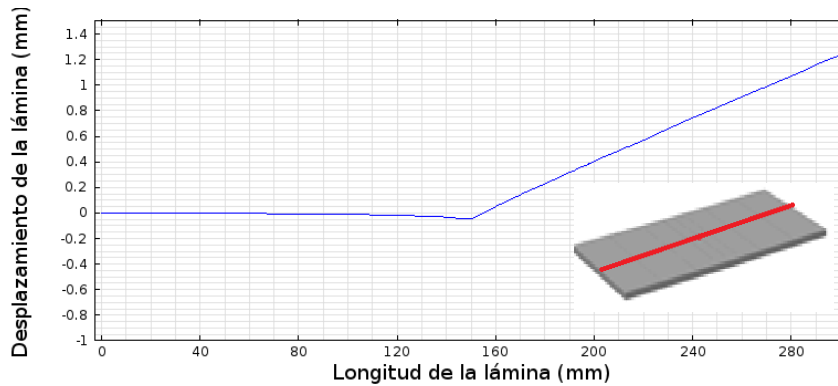


Figura 4.20. Distorsión final de la lámina sobre el plano $x-z$.

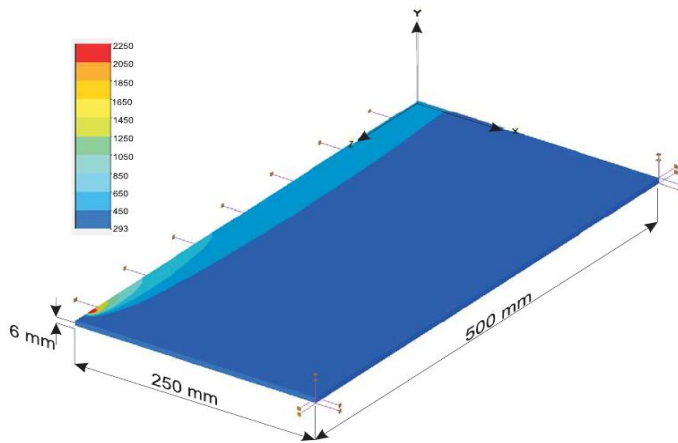


Figura 4.21. Campo de temperatura a los 100s del proceso [33].

La intención de mencionar estos resultados es la de comparar con los obtenidos en este trabajo, sin embargo, solo es posible verificar el comportamiento, pues son dos problemas distintos pero muy parecidos en cuanto a la naturaleza de la física y la forma de modelarse.

La Figura 4.22 muestra los esfuerzos residuales transversales en el proceso de soldadura mencionado. Comparando con la Figura 4.23, (nótese que el eje y de la referencia corresponde a nuestro eje z y viceversa) se observa que el comportamiento tanto para los

esfuerzos en x y z de la referencia corresponden a los reportados aquí así como también los esfuerzos longitudinales (Figura 4.24 y Figura 4.25)

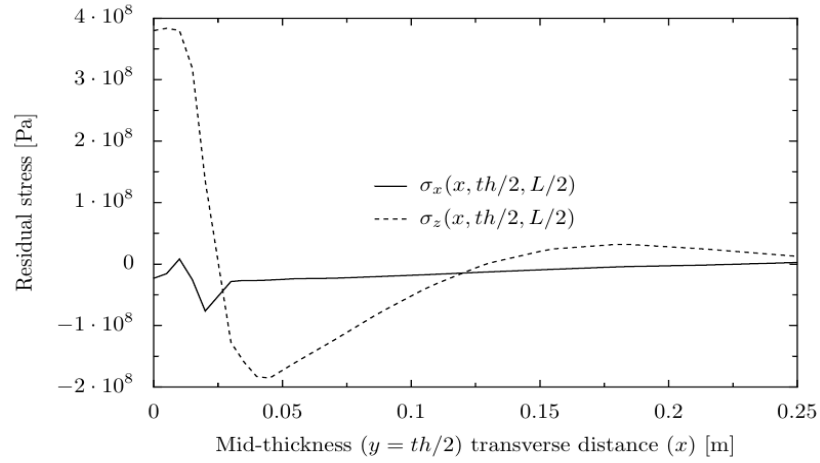


Figura 4.22. Distribución de esfuerzos residuales transversales en $t=300s$ [33].

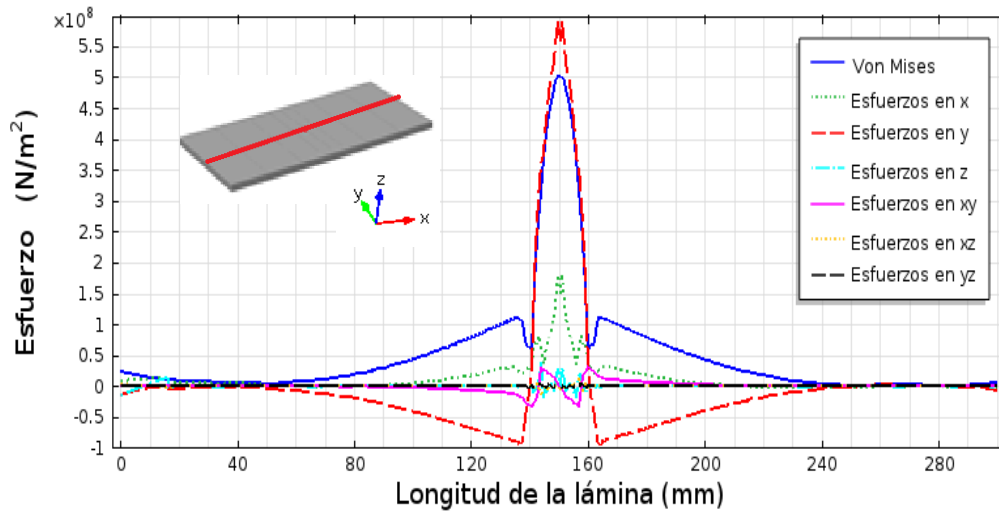


Figura 4.23. Esfuerzos transversales sobre la lámina.

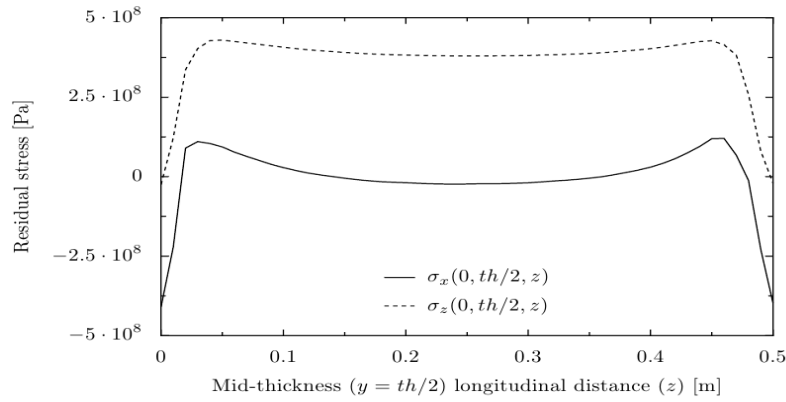


Figura 4.24. Esfuerzos residuales longitudinales en $t=300s$ [33].

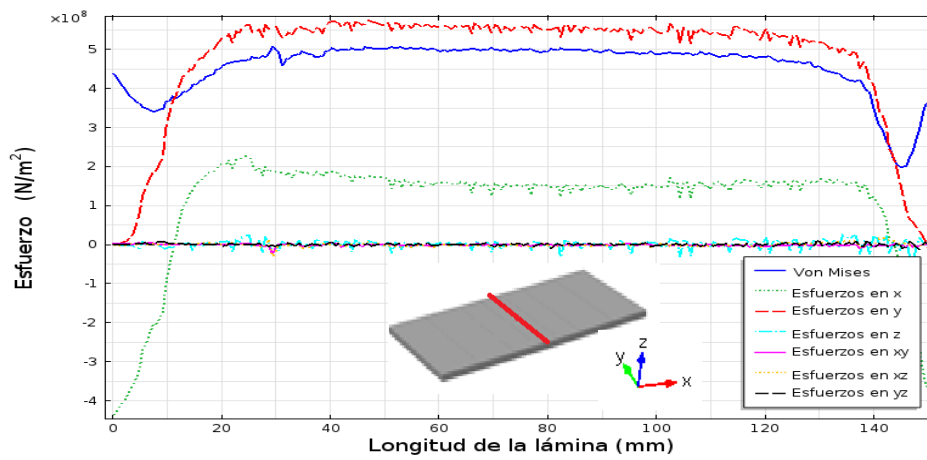


Figura 4.25. Esfuerzos longitudinales sobre la lámina.

Otra de las curvas presentadas por Kyrsanidi et al., [32] corresponde a la componente en x del tensor de deformación plástica en tres puntos Figura 4.26.

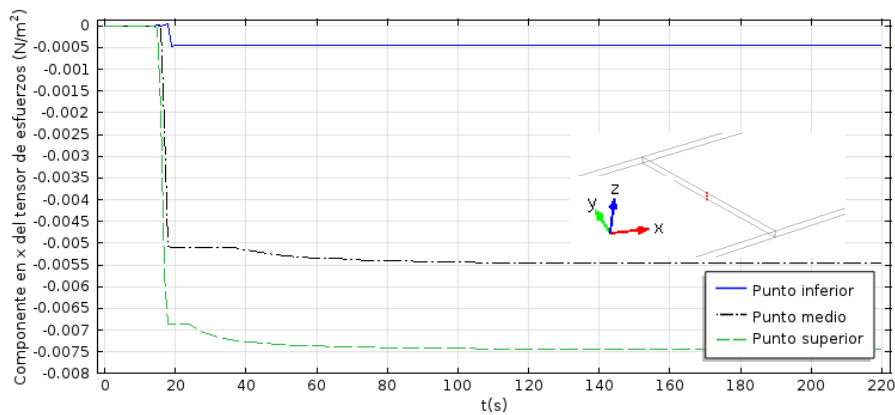


Figura 4.26. Componente en x del tensor de deformación plástica medido en el centro de la lámina para tres puntos de interés.

La componente en x del tensor de esfuerzos es mostrada en la Figura 4.27 para tres puntos de interés y se observa una gran concordancia con los resultados obtenidos por Kyrsanidi et al., [32] (Figura 4.17). Se puede notar un incremento en los esfuerzos cuando el haz láser pasa por el punto y conforme se aleja la fuente los esfuerzos se reducen. La deformación plástica provoca que los esfuerzos no lleguen a cero una vez retirada la carga térmica, como se puede apreciar los esfuerzos ya no tienen un cambio importante en su valor después de $t=35s$ (para ese punto), podemos decir que ese valor se aproximará al de los esfuerzos residuales.

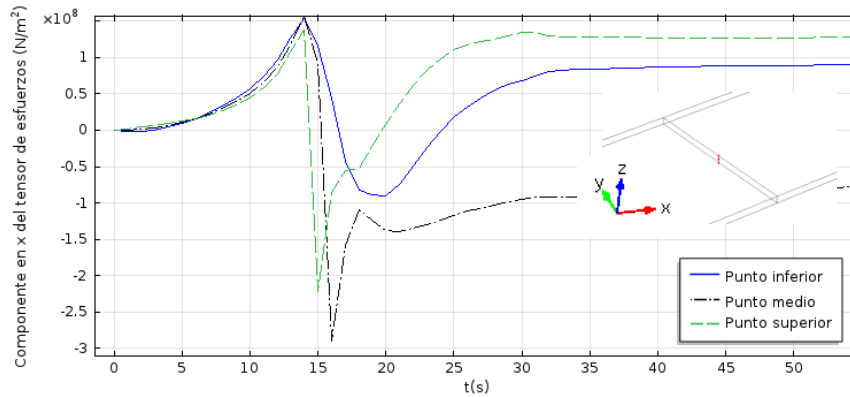


Figura 4.27. Componente en x del tensor de esfuerzos sobre los tres puntos medios indicados.

Para tener más certeza en cuanto a las curvas en comparación se tomaron puntos discretos de las gráficas de la referencia y mediante una interpolación lineal fueron graficadas junto a los datos obtenidos para este trabajo. Comparemos primeramente las temperaturas obtenidas (recordemos que son medidas en el punto medio superior Figura 4.10.y para este caso se agrega la del punto medio inferior) contra los datos reportados por Kyrsanidi et al., [32], dicha comparativa la podemos encontrar en la Figura 4.28. Se puede notar que existe una gran congruencia entre las dos simulaciones, sin embargo se puede notar una ligera discrepancia entre las temperaturas del punto inferior. Kyrsanidi et al., [32] lleva a cabo la medición experimental del ángulo en cuestión, así como también da los datos obtenidos por simulación, estos datos son graficados con los obtenidos en la Figura 4.29. Como se puede observar los resultados de las simulaciones son muy congruentes, por otra parte, los resultados experimentales muestran un comportamiento diferente durante la aplicación de la fuente de calor, aun con esta ligera

variación Kyrsanidi et al., [32] argumenta que los datos experimentales y los obtenidos mediante simulación son muy buenos, esto es cierto si solo consideramos la distorsión final, ya que las pendientes de ambas curvas son muy distintas.

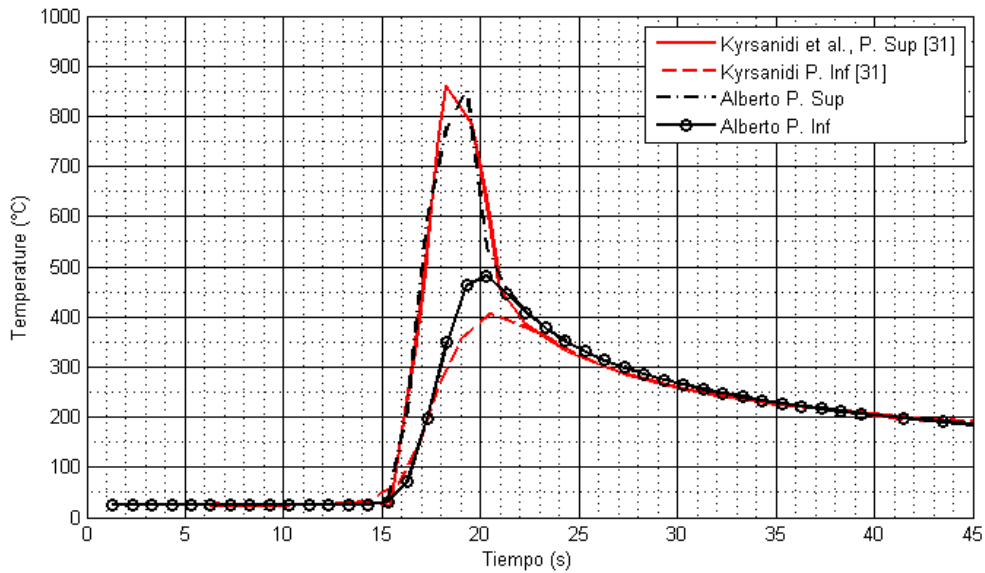


Figura 4.28. Comparación de las temperaturas con la referencia [32].

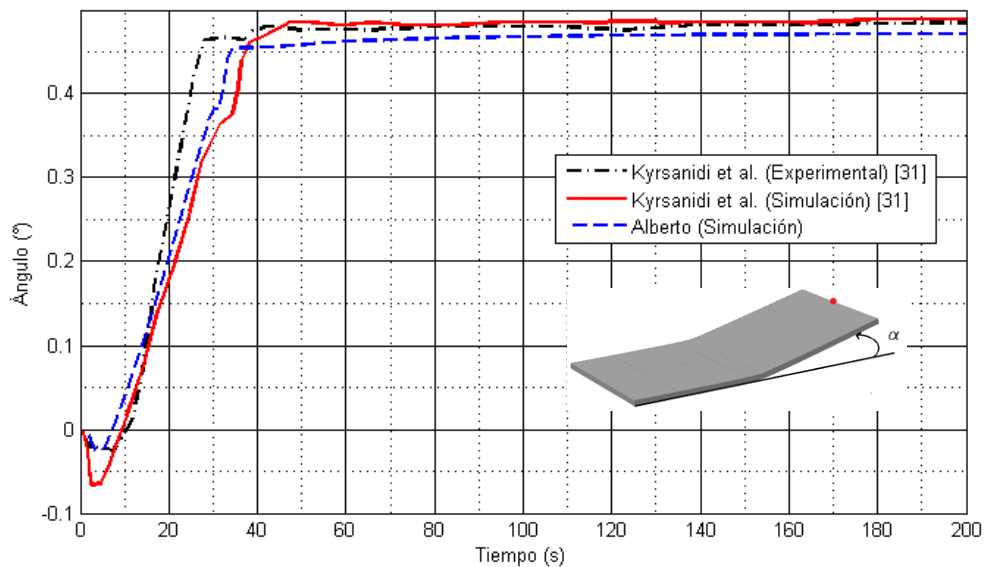


Figura 4.29. Comparación del ángulo de deflexión con el caso de referencia [32]. Primer caso de estudio.

4.3.2 Segundo caso de validación

El segundo caso de validación consiste en algunas modificaciones a los parámetros del primer caso de validación. Los cambios son los siguientes:

Potencia de la fuente de calor: 3kW

Velocidad del haz: 0.6m/min.

Espesor de la lámina: 4mm.

Con este nuevo parámetro se tuvo que modificar el mallado obteniéndose 132042 elementos tetraédricos cuadráticos y se resolvieron 777068 grados de libertad.

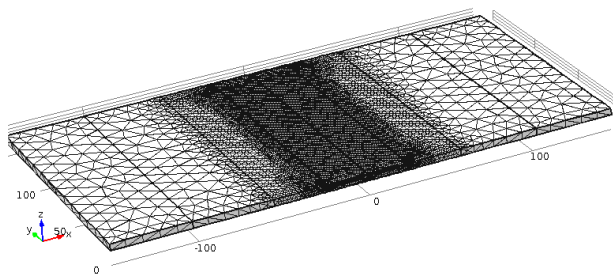


Figura 4.30. Mallado para el segundo caso de validación.

Para este caso de validación solo se cuenta con la curva de la distorsión angular Figura 4.31

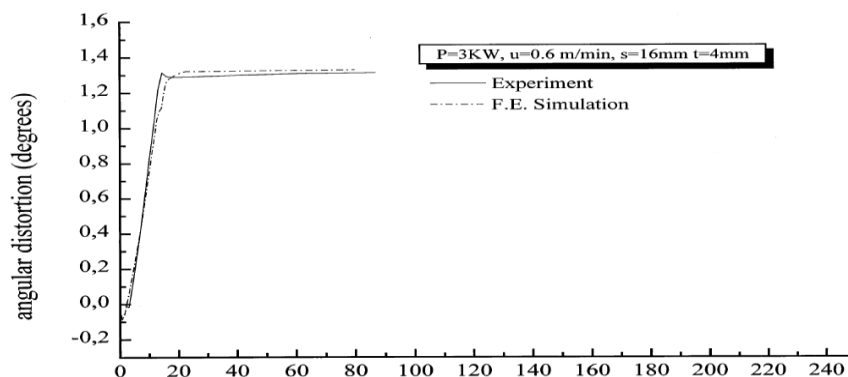


Figura 4.31. Distorsión angular a través del tiempo. Segundo caso de validación. Kyrzanidi et al. [32].

Se observa que la distorsión final es muy parecida a los resultados obtenidos por Kyr-sanidi et al., [32] sin embargo cabe mencionar que ninguna puede aproximar fielmente el comportamiento medido (el cual también puede tener errores), a pesar de ello se consi-dera que ambos resultados son buenos y que pueden describir adecuadamente el proceso estudiado.

Uno de los puntos fuertes en el modelo desarrollado para este trabajo es que en este segundo caso de validación se observa que el modelo aquí presentado describe de mejor forma la evolución del proceso, tanto la pendiente de la curva (etapa de calentamiento) como la distorsión producida en los primeros segundos de estudio pues la deflexión de Kyr-sanidi et al., [32] es exagerada.

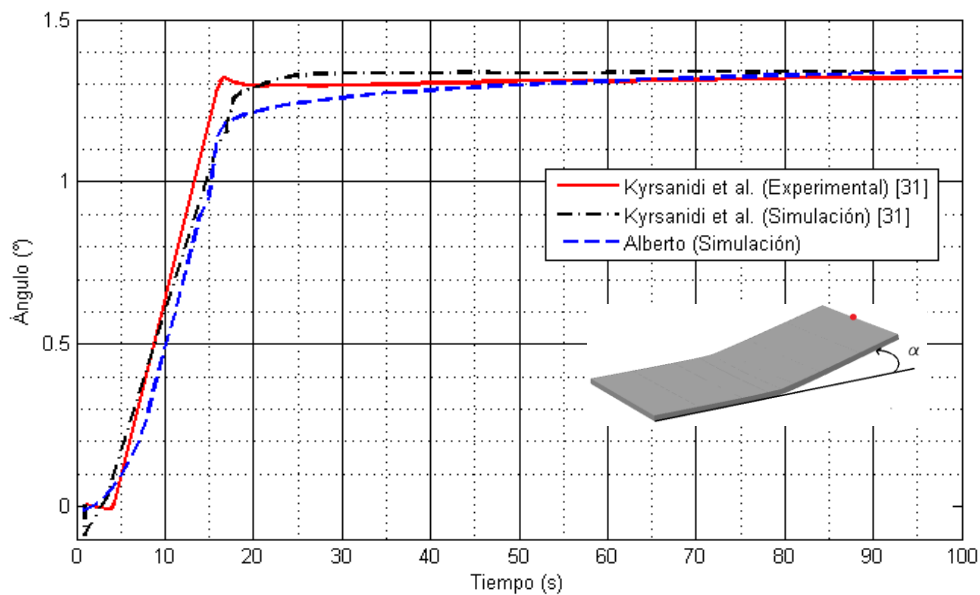


Figura 4.32. Comparación del ángulo de deflexión con el caso de referencia [32]. Segundo caso de validación.

CONCLUSIONES

La formación de esfuerzos residuales, agrietamientos y la distorsión final producida son las principales preocupaciones en procesos termo-mecánicos, ya que de ello dependen las características finales de los productos. De aquí el gran interés por desarrollar modelos predictivos que puedan ayudar en etapas tempranas de diseño de componentes o de los procesos de fabricación determinando los parámetros óptimos en cada uno.

Con las simulaciones computacionales se obtiene un mejor entendimiento de todos los factores involucrados en la generación de esfuerzos térmicos, los esfuerzos residuales y las deformaciones en los diferentes procesos, a partir de lo cual, se pueden implementar mejoras o incluso nuevas propuestas.

En el presente trabajo se realizaron modelos simplificados que ayudaron a la comprensión de un proceso de formado láser, dejando claro que modelos 2D, son capaces de representar, en buena forma, ciertas características de interés, tales como las temperaturas y las gradientes que se obtiene en la pieza de trabajo y los esfuerzos en la dirección longitudinal. Sin embargo, no son capaces de predecir adecuadamente la deformación angular de la lámina. Para predecir la deformación angular se obtuvo un modelo 3D más completo capaz de ser comparado con datos experimentales y simulaciones numéricas reportados en la literatura.

A continuación se presentan de manera más específica las conclusiones puntualizadas:

- Los resultados de temperaturas obtenidos en los casos simplificados (Capítulo 3) y el Caso 3D más completo (Capítulo 4) son muy parecidos, sin embargo, es claro que aquellos casos en los que no se considera el efecto del espesor (Caso 2 y 4) la temperatura es considerablemente inferior (Tabla 3.2 y Figura 3.67). Por lo tanto se concluye que solo aquellos casos en los que se aplica el calor sobre la

frontera pueden describir adecuadamente la temperatura y el gradiente sobre el espesor que es responsable para la flexión de la lámina.

- La Figura 3.70 (Sección 3.6) y la Figura 4.23 (Sección 4.3) muestran que los esfuerzos finales en la dirección longitudinal (que es la componente que más aporta al esfuerzo equivalente de Von Mises) en todos los modelos están en el mismo orden de magnitud. Por ello puede concluirse que en cuanto a esfuerzos residuales en esta dirección los casos simples nos dan una idea muy acertada de los obtenidos en un caso 3D. Se observa que los casos 3D con fuente de calor fija y transiente, así como también el modelo 2D con fuente móvil son los que mejor aproximan al caso más completo. Comparando entre los dos modelos 2-D con fuentes fijas y móviles respectivamente, se observa que la fuente móvil tiende a generar esfuerzos mayores que el modelo similar con fuente fija.
- La dominancia de los esfuerzos en la dirección longitudinal sobre los demás componentes se puede explicar con la restricción que brinda el resto de la lámina en contra de la deformación en la dirección longitudinal, mientras que los esfuerzos transversales son la causa de la deformación angular y por lo tanto se relevan al estar la lámina libre para deformarse en el plano de la sección transversal.
- Se observó que la distorsión angular obtenida en los casos simplificados no es capaz de representar a la del caso experimental. Esto se debe al calentamiento uniforme sobre toda la línea de calentamiento, ya que, al no haber una restricción, la lámina puede flexionarse libremente en la dirección contraria a la dirección de la fuente durante la etapa de calentamiento alcanzando una gran deflexión, la cual se elimina poco después al emparejarse la temperatura sobre el espesor de la lámina. Esto, no es acorde a la observada en el caso 3D con la fuente móvil.
- En el Capítulo 4 (fuente móvil 3-D) se observó que el calentamiento desfasado con una fuente móvil es esencial para lograr una flexión neta permanente. El calentamiento desfasado causa que la flexión en la dirección contraria a la fuente sea limitada por la restricción que ejerce el material circundante que está a una temperatura más baja provocando deformaciones plásticas en la zona más caliente. Una vez que el gradiente térmico ha sido eliminado la deformación plástica se

mantiene y da origen a esfuerzos de tensión en la superficie calentada lo cual ocasiona la flexión hacia la fuente de calor.

- Se comprueba que los esfuerzos residuales no sufren una gran alteración si se consideran o no efectos de convección y radiación, esto debido a que la salida de calor es despreciable en comparación con la fuente de calor del láser.
- Los resultados obtenidos en el estudio de formado láser (Capítulo 4) son bastante cercanos a los obtenidos por Kyrsanidi et al., [32]. Las ligeras discrepancias observadas en las comparaciones son atribuidas a la falta y ambigüedad en algunos de los datos del material y las ecuaciones constitutivas empleadas. Sin embargo, las suposiciones realizadas en este trabajo han mostrado una gran congruencia con los resultados numéricos y experimentales de la referencia.
- Se puede notar en las Figura 4.29 y Figura 4.32 que el modelo de Kyrsanidi et al., [32] no describe fielmente la deflexión que sufre la lámina durante los primeros instantes, así como tampoco la rapidez con la que se flexiona la lámina en comparación con sus propios resultados experimentales. Por otra parte el modelo presentado en este trabajo representa de mejor forma la deflexión que sufre la lámina en los primeros momentos de calentamiento, así como también la rapidez en la deflexión en la Figura 4.32.

Trabajo futuro

La mejora en los modelos es algo que siempre se busca, ya que ello permitirá una mejor descripción de todos los fenómenos presentes y por lo tanto, mejores resultados. Esto implica considerar más efectos de los diferentes fenómenos ocurridos.

En particular parece interesante estudiar los fenómenos que ocurren durante el formado láser cuando existen múltiples pasadas o bien en procesos de soldadura multi-capa. Dado que el material es calentado varias ocasiones a un nivel moderado a alto. Estas zonas demandan una extensión del modelo con fenómenos adicionales, tales como:

- Efectos de deformación plástica dependiente de la razón de deformación, tales como son la viscoplasticidad y la termoplasticidad (“creep”),
- Efectos de recuperación del material, tal como es el recocido y la recristalización,

- Efectos de la formación de la microestructura y el flujo plástico relacionado con la transformación de fase.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] W. Cheng y I. Finnie, *Residual Stress Measurement and the Slitting Method*, Springer Science+Business Media, LLC, 2007.
- [2] T. M. Smith, P. Michaleris, E. W. Reutzel y B. Hall, «Finite element model of pulsed laser forming,» de *International Symposium on laser precision microfabrication*, 2012.
- [3] T. R. Hsu, A. W. Bertels, S. Banerjee y W. C. Harrison, *Theoretical basis for a transient thermal elastic-plastic stress analysis of nuclear reactor fuel elements*, Manitoba: Whiteshell Nuclear Research Establishment, 1976.
- [4] S. Kalpakjian y S. R. Schmid, *Manufacturing Engineering and Technology*, Fourth edition, Prentice-Hall Inc., 2002.
- [5] M. A. Gómez Botero, *Caracterización de las propiedades tribológicas de los recubrimientos duros*, Phd Thesis, Barcelona: Universidad de Barcelona, 2005.
- [6] J. Hofman, *Development of an Observation and Control System for Industrial Laser Cladding*, Phd Thesis, University of Twente, 2009.
- [7] B. S. Yilbas, S. Akhatar y S. Z. Shuja, *Laser Forming and Welding Process*, Switzerland: Springer International Publishing, 2013.
- [8] M. Geiger y F. Vollertsen, «The mechanism of Laser Forming,» *CIRP Anns*, vol. 42, pp. 301-304, 1993.
- [9] H. C. Jung, *A Study on Laser Forming Processes with Finite Element Analysis*, Phd Thesis, Christchurch, New Zeland: University of Canterbury, 2006.
- [10] L.-E. Lindgren, *Computational Welding Mechanics. Thermomechanical and microstructural simulations*, Woodhead Publishing Limited, 2007.
- [11] Y. Shi, H. Shen, Z. Yao y J. Hu, «Temperature gradient mechanism in laser forming of thin plates,» *Optics & Laser Technology*, vol. 39, pp. 858-863, 2006.
- [12] F. A. Kandil, J. D. Lord, A. T. Fry y P. V. Grant, *A review of residual stress measurement methods - A guide to technique selection*, Teddington Middlesex, UK: Crown, 2001.

- [13] T. Lassen y N. Récho, *Fatigue Life Analysis of Welded Structures*, ISTE Ltd., 2006.
- [14] C. E. Cross, «On the Origin of Weld Solidification Cracking,» de *Hot Cracking Phenomena in Welds*, Berlin, Springer-Verlag, 2005, pp. 3-18.
- [15] D. R. Askeland, *The Science and Engineering of Materials*, 3rd ed., PWS Publishing Company, 1998.
- [16] A. F. Bower, «Solid Mechanics,» [En línea]. Available: <http://solidmechanics.org/text/>. [Último acceso: 26 Diciembre 2012].
- [17] V. J. Papazoglou, *Analytical techniques for determining temperatures thermal strains and residual stress during welding*, Phd. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1981.
- [18] A. Barroso, J. Cañas, R. Picón, F. París, C. Méndez y I. Unanue, «Prediction of welding residual stresses and displacements by simplified models. Experimental validation,» *Materials and design*, vol. 31, pp. 1338-1349, 2009.
- [19] P. J. Withers y H. K. Bhadeshia, «Residual Stress Part 1- Measurement Techniques,» *Materials Science and Technology*, vol. 17, pp. 355-365, 2001.
- [20] J. A. Goldak, A. Chakravarti y M. Bibby, «A new finite element model for welding heat sources,» *Metallurgical Trans B*, vol. 15B, pp. 299-305, 1984.
- [21] T. Schenk, *Modelling of welding distortion: The influence of clamping and sequencing*, Phd. Thesis, Technique University of Delft, 2011.
- [22] J. A. Goldak y M. Akhlaghi, *Computational Welding Mechanics*, Springer Science+Business Media, Inc., 2005.
- [23] A. Suarez Díaz, *Thermomechanical And Metalurgical Modelling Of Laser Hardening And Laser Cladding Processes*, Phd. Thesis, University of Coruña, 2011.
- [24] L. E. Lindgren, «Finite element modeling and simulation of welding, Part 2: Improved material modeling,» *Journal of Thermal Stresses*, vol. 24, pp. 195-231, 2001.
- [25] O. C. Zienkiewicz y R. L. Taylor, *The Finite Element Method. Vol 2. Solid*

Mechanics. Fifth Edition, Butterworth-Heinemann, 2000.

- [26] H. Alberg y D. Berglund, «Comparison of plastic, viscoplastic, and creep models when modelling and stress relief heat treatment,» *Computer methods in applied mechanics and engineering*, pp. 5189-5208, 2003.
- [27] F. Dunne y N. Petrinic, *Introduction to Computational Plasticity*, Oxford University Press, 2005.
- [28] P. Ludwik, *Elemente der Technologischen Mechanik*, Berlín: Springer-Verlag, 1909.
- [29] T. Meinders y J. Huétink, *Solid Mechanics II. Plasticity, Reader*, University of Twente, 2012.
- [30] L. E. Lindgren, «Finite element modeling and simulation of welding, Part 1: Increased complexity,» *Journal of Thermal Stresses*, vol. 24, pp. 141-192, 2001.
- [31] A. K. Kyrsanidi, T. B. Kermanidis y S. G. Pantelakis, «An analytical model for prediction of distortion caused by the laser forming process,» *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 104, pp. 94-102, 2000.
- [32] A. K. Kyrsanidi, T. B. Kermanidis y S. G. Pantelakis, «Numerical and experimental investigation of the laser forming process,» *Journal Of Materials Processing Technology-Elsevier*, vol. 87, pp. 281-290, 1999.
- [33] A. A. Anca, *Computer simulation of steel thermomechanical processes at high temperatures*, Phd. Thesis, Santa Fe, Argentina: National University of Litoral, 2008.

ANEXOS

Las propiedades del material reportadas en la Tabla 3.1 son funciones derivadas a partir de los datos proporcionados por Papazoglou [17].

A.1. Propiedades mecánicas del material

θ	20	200	300	400	500	600	700	800	900	1,000	1,100	1,200	1,300	1,400	1,500
σ_{yv}	950	872	820	751	648	472	248	124	69	41	27.6	17.2	8.3	3.2	0
E	206	200	192	183	167	132	56.5	33.1	25.5	20	14.5	9.6	2.8	0.4	0
E_T	11	10.7	10.3	9.8	8.9	7	3	1.8	1.4	1.1	0.8	0.5	0.15	0.02	0
ν	0.300	0.320	0.331	0.342	0.353	0.364	0.374	0.385	0.396	0.407	0.418	0.429	0.440	0.451	0.462

Nomenclature

θ = Temperature ($^{\circ}\text{C}$)

σ_{yv} = Virgin Yield Stress (MPa)

E = Young's Modulus (MPa $\times 10^{-3}$)

E_T = Tangent Modulus (MPa $\times 10^{-3}$)

ν = Poisson's Ratio

A.2. Propiedades térmicas del material

θ	20	200	300	400	500	600	700	760	900	1,000	1,100	1,200	1,300	1,400	1,500
k	35.1	36.8	36.8	36.2	34.6	32.0	28.5	25.8	26.6	27.2	27.8	28.4	29.0	29.6	---
c	0.427	0.502	0.548	0.602	0.665	0.741	0.481	0.686	0.653	0.653	0.653	0.653	0.653	0.653	---
ρ	7.860	7.795	7.759	7.725	7.690	7.654	7.620	7.609	7.604	7.604	7.604	7.604	7.604	7.604	---
α	---	12.51	13.18	13.77	14.27	14.87	14.94	14.67	12.42	12.60	12.92	13.14	13.36	13.50	---

Nomenclature

θ = Temperature ($^{\circ}\text{C}$)

k = Thermal Conductivity (W/m. $^{\circ}\text{C}$)

c = Specific Heat (kJ/kg. $^{\circ}\text{C}$)

ρ = Density (kg/m³ $\times 10^{-3}$)

α = Average Thermal Expansion

