

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**SIMULACIÓN DE LA DEFLEXIÓN EN JUNTAS
SOLDADAS POR GMAW DE UN HIERRO DULCE,
UTILIZANDO LA TÉCNICA DE ELEMENTOS FINITOS**

PRESENTADO POR:

RAÚL ALEXANDER RÍOS GONZÁLEZ

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, FEBRERO DE 2015

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :

ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO

SECRETARIA GENERAL :

DRA. ANA LETICIA ZA VALETA DE AMAYA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO :

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

SECRETARIO :

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

DIRECTOR :

ING. RIGOBERTO VELÁSQUEZ PAZ

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO MECÁNICO

Título :

**SIMULACIÓN DE LA DEFLEXIÓN EN JUNTAS
SOLDADAS POR GMAW DE UN HIERRO DULCE,
UTILIZANDO LA TÉCNICA DE ELEMENTOS FINITOS**

Presentado por :

RAÚL ALEXANDER RÍOS GONZÁLEZ

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

DR. Y M.SC. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ

San Salvador, febrero de 2015

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

DR. Y M.SC. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ

DEDICATORIA

A:

Mi madre:

Dora González

Abuelos:

Concepción Palacios de González

y

Félix González;

Tíos:

Antonio González

y

Sonia Palacios;

Hermano y primos.

Raúl Alexander Ríos González

AGRADECIMIENTOS

A Dios porque siempre ha estado conmigo dándome sabiduría, inteligencia y ayuda en todas las etapas de mi vida y carrera.

A mi madre: Dora González, por todos los esfuerzos y sacrificios que ha realizado para darme el apoyo que he necesitado en toda mi vida.

A mis abuelos: Concepción Palacios y Félix González, porque siempre han estado conmigo y me han apoyado.

A mis tíos: Antonio González y Sonia Palacios, ya que siempre que he necesitado su ayuda han estado en disposición de brindármela.

A mis primos por brindarme asistencia cuando he requerido.

A todo los docentes que han contribuido en mi formación académica.

A mi asesor Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz por ayuda y asesoría muy satisfactoria durante la elaboración de mi Trabajo de Graduación.

A la Escuela de Ingeniería Mecánica por permitirme utilizar equipos necesarios durante el desarrollo de mí Trabajo de Graduación y al personal de la Unidad Productiva Metal Mecánica que colaboraron con sus conocimientos en la utilización de algunos equipos.

A todos mis compañeros y amigos de la Escuela de Ingeniería Mecánica y de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador, por permitirme compartir momentos de estudio y ocio durante toda mi carrera.

A todas aquellas personas que de una u otra forma han contribuido al desarrollo de este Trabajo de Graduación.

Raúl Alexander Ríos González

SIMULACIÓN DE LA DEFLEXIÓN EN JUNTAS SOLDADAS POR GMAW DE UN HIERRO DULCE, UTILIZANDO LA TÉCNICA DE ELEMENTOS FINITOS

Alumno: Raúl Alexander Ríos González

Docente Asesor: Dr. y M.Sc. Jonathan A. Berríos Ortiz.

RESUMEN

Se ha realizado una simulación mediante el software Abaqus/CAE 6.12 versión estudiantil que utiliza la técnica de elementos finitos, de las deflexiones en juntas soldadas de hierro dulce aplicando el proceso de Soldadura por Arco con Protección Gaseosa (GMAW), cuyos resultados se compararon con datos experimentales utilizando tres anchos de placas de 25.4, 50.8 y 76.2 mm, manteniendo constante el espesor de 2.97 mm, y la longitud de 152.4 mm. Además, para cada condición de junta soldada se prepararon tres juntas con el fin de obtener los promedios de las deflexiones. También, se realizó un análisis metalográfico con el fin de constatar la zona afectada térmicamente. Finalmente, se ha diseñado una guía de laboratorio de simulación de deflexiones en juntas soldadas utilizando el software Abaqus/CAE 6.12 versión estudiantil. Se concluye que los resultados de la simulación y los experimentales no difieren significativamente en los valores de deflexiones, y que con la guía desarrollada de simulación se pueden reproducir los resultados obtenidos.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	1
1. MARCO TEÓRICO.....	3
1.1. Generalidades.....	3
1.1.1. Energía de aportación en un proceso de soldadura.....	4
1.1.2. Zonas en una junta soldada.....	6
1.1.3. Estructura metalográfica de una junta soldada	7
1.1.4. Propiedades de los metales	9
1.2. Deflexiones y esfuerzos residuales.....	10
1.2.1. Deflexiones en juntas soldadas.....	11
1.2.2. Esfuerzos residuales.....	12
1.3. Método de elementos finitos y software de simulación.....	13
1.4. Estudio de casos de simulación.....	16
1.5. Modelo matemático de elementos finitos de una junta soldada.....	21
2. DISEÑO Y EJECUCIÓN DEL EXPERIMENTO	25
2.1. Diseño de las juntas a soldar.....	25
2.2. Condiciones de frontera y parámetros del equipo de GMAW durante el proceso de soldadura	28
2.3. Proceso de soldadura de las placas	29
2.4. Análisis metalográfico	32
3. PROCESO DE SIMULACIÓN.....	32
3.1. Planteamiento de la simulación	33
3.2. Análisis en abaqus.....	33
3.3. Consideraciones de la simulación respecto al proceso de soldadura real	34
3.4. Sistema de unidades	35

	Pág.
3.5. Elaboración del modelo 3D.....	36
3.6. Mallado del modelo.....	39
3.7. Condiciones de frontera.....	41
3.8. Condiciones del proceso	42
3.9. Representación de resultados preliminares de la simulación	43
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	50
4.1. Tratamiento de los resultados de la simulación.....	50
4.1.1. Perfiles de temperatura.....	52
4.1.2. Deflexiones.....	57
4.2. Resultados experimentales de las deflexiones.....	62
4.3. Resultados del análisis metalográfico.....	65
4.4. Análisis de resultados	69
CONCLUSIONES.....	72
RECOMENDACIONES.....	74
REFERENCIAS.....	76
ANEXOS.....	78
Anexo A: Guía de instalación de Abaqus/CAE 6.12 Student Edition y plugin Abaqus Welding Interface.....	78
Anexo B: Guía de laboratorio: Simulación de la deflexión en juntas soldadas utilizando Abaqus/CAE.....	86
Anexo C: Guía de Generación de datos para elaboración de perfiles térmicos de juntas soldadas simuladas mediante Abaqus/CAE 6.12 Student Edition.....	118

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Fig. 1.1. Esquema de las zonas y líneas características de una junta soldada [4].	6
Fig. 1.2. Estructura granular típica de una junta soldada en procesos de soldadura por arco [5]	8
Fig. 1.3. Diagrama de la historia térmica y tamaño de grano de regiones de una junta soldada de acero de bajo carbono [1].	8
Fig. 1.4. Esquema de deflexión de una junta soldada [8].	12
Fig. 1.5. Distribución de esfuerzos residuales en una junta soldada [8].	13
Fig. 1.6. Resultados reportados por Bullón, Acosta, Franco, y Valverde en el 2007 de la simulación realizada: (a) Temperaturas a 65 segundos de iniciado el proceso, (b) Esfuerzos residuales resultantes, y (c) Deformaciones Resultantes [14].	18
Fig. 1.7. Resultados reportados por Matus en el 2013, de la simulación realizada: (a) Efecto instantáneo del primer cordón de soldadura (a 38 s), (b) Desplazamientos verticales producto de la primera pasada, y (c) Esfuerzos a 50 s [15].	19
Fig. 1.8. Resultados reportados por Berrio, Vanegas y Serna en el 2008, durante la simulación realizada: (a) Representación del calentamiento secuencial, (b) Enfriamiento secuencial, y (c) Representación de esfuerzos en X secuencial [16].	20
Fig. 1.9. Elemento de malla tridimensional de elementos finitos esquemático utilizado para el planteamiento matemático de elementos finitos del proceso el análisis térmico.	22
Fig. 1.10. Volumen de control utilizado para el planteamiento matemático de elementos finitos del proceso durante el análisis mecánico.	23
Fig. 1.11. Volumen de control alejado del cordón de soldadura utilizado para el planteamiento matemático de elementos finitos del proceso durante el análisis térmico.	24
Fig. 2.1. Bisel y espaciado entre placas utilizado para juntas en V [1].	26
Fig. 2.2. Esquema en 3D de las placas para obtener las juntas a soldar.	27
Fig. 2.3. Vistas de las placas utilizadas para las juntas soldadas: (a) 25.40 mm, (b) 50.80 mm y (c) 76.20 mm.	27
Fig. 2.4. Equipo de GMAW utilizado durante la obtención de las juntas soldadas.	29
Fig. 2.5. Placas preparadas y ubicadas para realizar los puntos de soldadura en cada extremo.	30

	Pág.
Fig. 2.6. Placas unidas mediante puntos de soldadura antes de iniciar el proceso de soldadura.....	30
Fig. 2.7. Realización del cordón de soldadura de la junta.....	30
Fig. 2.8. Juntas soldadas con placas de 25.4 mm de ancho.....	31
Fig. 2.9. Juntas soldadas con placas de 50.8 mm de ancho.....	31
Fig. 2.10. Juntas soldadas con placas de 76.4 mm de ancho.....	31
Fig. 3.1. Modelo en 3D de la junta de 25.4 mm elaborado en Autodesk Inventor 2013 (version estudiantil).....	37
Fig. 3.2. Modelo de la junta de 50.8 mm importado a Abaqus/CAE.....	37
Fig. 3.3. Secciones de material asignadas a la junta.....	38
Fig. 3.4. Mallado utilizado en junta con placas de 25.4 mm de ancho: (a) Vista frontal de la junta y (b) Modelo 3D.....	39
Fig. 3.5. Mallado utilizado en junta con placas de 50.8 mm de ancho: (a) Vista frontal de la junta y (b) Modelo 3D.....	40
Fig. 3.6. Mallado utilizado en junta con placas de 76.2 mm de ancho: (a) Vista frontal de la junta y (b) Modelo 3D.....	40
Fig. 3.7. Área del modelo donde se ha aplicado la condición de frontera para simular el punto de soldadura que se le coloco a la junta antes de iniciar el proceso de soldadura.....	41
Fig. 3.8. Representación de resultados preliminares del análisis térmico en junta soldadas con placas de 25.4 mm de ancho: (a) Flujo de calor a 39 s de iniciado el proceso de soldadura y (b) Temperaturas de la junta a 65 s de iniciado el proceso.....	44
Fig. 3.9. Representación de resultados preliminares de deflexiones en la junta con placas de 25.4 mm de acho, al finalizar el proceso de soldadura.....	45
Fig. 3.10. Representación de resultados preliminares de análisis térmico en junta con placas de 50.8 mm de ancho: (a) Flujo de calor a un tiempo de 52 s de iniciado el proceso y (b) Temperaturas de la junta a un tiempo de 91 s de iniciado el proceso.....	46
Fig. 3.11. Representación de resultados preliminares de deflexiones en la junta con placas de 50.8 mm de ancho, al finalizar el proceso de soldadura.....	47
Fig. 3.12. Representación de resultados preliminares de análisis térmico en junta con placas de 76.2 mm de ancho: (a) Flujo de calor a un tiempo de 65 s de iniciado el proceso y (b) Temperaturas de la junta a un tiempo de 65 s de iniciado el proceso.....	48
Fig. 3.13. Representación de resultados preliminares de deflexiones en la junta con placas de 76.2 mm de ancho, al finalizar el proceso de soldadura.....	49

Fig. 4.1. Ubicación de líneas de análisis de la junta utilizadas para la presentación de resultados de la simulación: (a) Líneas de la superficie superior e inferior de la junta ubicados sobre Plano A perteneciente a la cara frontal de la junta, paralelas al plano XY, (b) Líneas de la superficie superior e inferior de la junta ubicados sobre Plano B, perteneciente al centro de la junta paralelas al plano YZ, y (c) Líneas de la superficie superior e inferior de la junta ubicados sobre Plano C, ubicadas en la línea de fusión a lo largo de la junta.....	51
Fig. 4.2. Curvas de perfiles térmicos en la cara frontal de las juntas soldadas (Plano A), a 13s de iniciado el proceso de soldadura.....	55
Fig. 4.3. Curvas de perfiles térmicos en la línea de fusión de las juntas soldadas a lo largo del eje Z (Plano C), a 13s de iniciado el proceso de soldadura.....	56
Fig. 4.4. Curvas de los desplazamientos promedio en la cara frontal de la junta (Plano A), finalizado el proceso de soldadura.....	60
Fig. 4.5. Curvas de los desplazamientos promedio al centro del cordón de soldadura, a lo largo del eje Z (Plano B), finalizado el proceso de soldadura.....	61
Fig. 4.6. Calibrador Vernier utilizado para realizar las mediciones utilizadas para determinar las deflexiones.....	62
Fig. 4.7. Colocación de cada una de las juntas para medir las deflexiones en las esquinas.....	63
Fig. 4.8. Colocación de cada una de las juntas para medir las deflexiones a lo largo de la junta.....	64
Fig. 4.9. Muestra metalográfica preparada para realizar el estudio.....	65
Fig. 4.10. Fotomicrografías obtenidas de las regiones en la frontera del cordón de soldadura y el metal base de la junta: (a) Regiones a detallar de la junta soldada, (b) Detalle A, a 100X; (c) Detalle B, a 100x; (d) Detalle C, a 100x; (e) Detalle D, a 100x; (f) Detalle E, a 100x; y (g) Detalle F, a 100x.....	66
Fig. 4.11. Fotomicrografías obtenidas de las regiones en la frontera de l cordón de soldadura y el metal base de la junta: (a) Detalle E, a 500X; (b) Detalle E, a 200x; (c) Detalle G, a 100x; (d) Detalle G, a 200x; (e) Detalle G, a 500x; (f) Detalle H, a 500x; (g) Detalle I, a 500x; (h) Detalle J a 100x, (i) Detalle H, a 100x; y (j) Detalle I, a 100x.....	67
Fig. 4.12. Mosaicos de fotomicrografías de las zonas de la junta observada en el microscopio óptico a 100x.....	68

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1. Intervalo de valores de EBA para algunos proceso de soldadura por arco [4].	5
Tabla 1.2. Rendimiento de algunos procesos de soldadura por arco [4].	5
Tabla 2.1. Parámetros de control del equipo de GMAW para realizar el proceso de soldadura de placas de espesores de hasta 3.17 mm (1/8 pulg) [17].	28
Tabla 3.1. Unidades utilizadas para los distintos parámetros requeridos para la simulación en Abaqus.	36
Tabla 3.2. Propiedades del material base (hierro dulce) [6].	37
Tabla 3.3. Propiedades del material de aporte (electrodo ER-70S6) [6].	38
Tabla 4.1. Valores de temperaturas en la cara frontal de la junta con placas de 25.4 mm de ancho a 13s de iniciado el proceso de soldadura (plano A).	52
Tabla 4.2. Valores de temperaturas en la línea de fusión de la junta con placas de 25.4 mm de ancho a 13s de iniciado el proceso de soldadura (plano C).	52
Tabla 4.3. Valores de temperaturas en la cara frontal de la junta con placas de 50.8 mm de ancho a 13s de iniciado el proceso de soldadura (plano A).	53
Tabla 4.4. Valores de temperaturas en la línea de fusión de la junta con placas de 50.8 mm de ancho a 13s de iniciado el proceso de soldadura (plano C).	53
Tabla 4.5. Valores de temperaturas en la cara frontal de la junta con placas de 76.2 mm de ancho a 13s de iniciado el proceso de soldadura (plano A).	54
Tabla 4.6. Valores de temperaturas en la línea de fusión de la junta con placas de 76.2 mm de ancho a 13s de iniciado el proceso de soldadura (plano C).	54
Tabla 4.7. Valores de las deflexiones en la cara frontal de la junta (plano A). con placas de 25.4 mm de ancho finalizado el proceso de soldadura.	57
Tabla 4.8. Valores de las deflexiones al centro de la junta (plano B) de la junta con placas de 25.4 mm de ancho finalizado el proceso de soldadura.	57
Tabla 4.9. Valores de las deflexiones en la cara frontal de la junta (plano A). con placas de 50.8 mm de ancho finalizado el proceso de soldadura.	58
Tabla 4.10. Valores de las deflexiones al centro de la junta en el plano B, de la junta con placas de 50.8 mm de ancho finalizado el proceso de soldadura.	58
Tabla 4.11. Valores de las deflexiones en la cara frontal de la junta (plano A). con placas de 76.2 mm de ancho finalizado el proceso de soldadura.	59
Tabla 4.12. Valores de las deflexiones al centro de la junta (plano B) de la junta con placas de 76.2 mm de ancho finalizado el proceso de soldadura.	59
Tabla 4.13. Valores de desplazamiento vertical en los extremos de cara frontal de cada una de las juntas de placas de 25.4 mm de ancho (plano A).	63

	Pág.
Tabla 4.14. Valores de desplazamiento vertical en los extremos de cara frontal de cada una de las juntas de placas de 50.8 mm de ancho (plano A).....	63
Tabla 4.15. Valores de desplazamiento vertical en los extremos de cara frontal de cada una de las juntas de placas de 76.2 mm de ancho (plano A).....	63
Tabla 4.16. Valores de deflexiones a 76.2 mm de distancia perpendicular a la cara frontal de la junta con placas de 25.4 mm de ancho (Plano B).....	64
Tabla 4.17. Valores de deflexiones a 76.2 mm de distancia perpendicular a la cara frontal de la junta con placas de 50.8 mm de ancho (Plano B).....	64
Tabla 4.18. Valores de deflexiones a 76.2 mm de distancia perpendicular a la cara frontal de la junta con placas de 50.8 mm de ancho (Plano B).....	64

LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

- A_s : Área transversal del cordón de soldadura
- ASTM: Sociedad Americana de Ensayos de Materiales.
- AWS: Sociedad Americana de Soldadura.
- c : Calor específico.
- CAE: Ingeniería Asistida por Computadora
- E : Módulo de elasticidad del material.
- EBA: Energía Bruta Aportada.
- ENA: Energía Neta Aportada.
- GMAW: Soldadura por Arco con Protección Gaseosa.
- GTAW: Soldadura por arco de Tungsteno con Protección Gaseosa.
- h : Coeficiente de Convección con el Ambiente.
- I : Corriente del arco
- MAG: Soldadura por Arco con Protección de Gas Activo.
- MEF: Método de Elementos Finitos.
- MIG: Soldadura por Arco con Protección de Gas Inerte.
- η_p : Rendimiento del proceso de soldadura.
- η_t : Rendimiento Térmico.
- Q : Calor aportado.
- SAW: Soldadura por Arco sumergido.
- SMAW: Soldadura Eléctrica con Electrodo Revestido.
- t : Tiempo de fusión del electrodo durante el cual se aporta calor a la pieza.
- T_f : Temperatura de fusión del material.
- T_m : Temperatura máxima dentro de la ZAT.
- T_o : Temperatura inicial del material base.
- U : Voltaje de soldadura
- v : Velocidad de avance de la soldadura.
- ZAT: Zona Afectada Térmicamente.
- α : Coeficiente de dilatación térmica lineal.
- ΔT : Diferencia de temperaturas.
- δ : Deflexiones
- ρ : Densidad.
- σ_t : Esfuerzos por gradiente térmico.
- ν : Coeficiente de Poisson del material.

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, los procesos de soldadura son muy esenciales industrialmente, dado que éstos son comúnmente utilizados en la fabricación de estructuras metálicas y además se ha expandido sus usos a otras áreas como en ingeniería civil, fabricación de elementos mecánicos, también actualmente se brinda mantenimiento a componentes estructurales metálicos mediante procesos de soldadura, entre otros.

Existen muchos problemas relacionados con los procesos de soldaduras; por ejemplo, comúnmente la pieza sometida a estos procesos genera esfuerzos residuales y como consecuencia de dichos esfuerzos las piezas soldadas presentan deflexiones, además al ser procesos que someten a la pieza soldada a un calentamiento y luego a un enfriamiento, disminuye la resistencia mecánica en las zonas afectadas térmicamente de los metales base.

Debido a lo anterior, es de gran importancia predecir las deflexiones en una junta soldada para la elaboración de nuevos diseños de estructuras metálicas y elementos mecánicos, ya que de esta manera se diseñaran más eficientemente nuevos elementos metálicos que incluyan soldaduras, evitando problemas inesperados durante la fabricación de éstos a causa de las deflexiones en las piezas que se someten a los procesos de soldadura y ahorrando el tiempo que se consumiría en solucionarlos.

Por lo tanto, en este trabajo de graduación de simulación de la deflexión en juntas soldadas mediante el proceso de Soldadura por Arco con Protección Gaseosa (GMAW) de un hierro dulce, utilizando la técnica de elementos finitos está orientado para que en un futuro pueda ser utilizado de manera didáctica como una base para la realización de prácticas de laboratorio de simulación de deflexiones en juntas soldadas y además, su utilización para futuros proyectos de investigación. En el marco teórico se describe el comportamiento de las deflexiones en juntas soldadas, así mismo se ha complementado la investigación realizando un estudio de casos de simulación los cuales orientan algunos pasos a seguir para realizar un adecuado análisis de datos; a partir de

lo anterior se plantea el diseño del experimento, donde se presenta el diseño geométrico de las juntas soldadas, la preparación de las piezas a soldar indicando el proceso que se llevó a cabo para elaborarlas, y además; se indican las condiciones bajo las que se realizó, lo cual conduce a la definición de algunos parámetros que se deben considerar para el posterior diseño de la simulación donde se detallan los aspectos generales durante su ejecución incluyendo desde la elaboración del modelo CAD, el mallado de elementos finitos, condiciones de frontera y consideraciones durante la simulación, donde finalizado el análisis, se realiza la presentación de resultados de la simulación utilizando curvas de perfiles térmicos y de deflexiones en las juntas soldadas y los resultados experimentales, así como un análisis metalográfico realizado a una de las juntas soldadas para sustentar resultados y al final se presenta una guía de laboratorio de simulación de deflexiones en juntas soldadas, en la cual se detallan los pasos principales que se deben seguir para simular deflexiones en una junta soldada utilizando Abaqus/CAE 6.12 Student Edition.

1. MARCO TEÓRICO

Para realizar el estudio de deflexiones en juntas soldadas mediante el proceso de Soldadura por Arco con Protección Gaseosa (GMAW), se debe conocer la información teórica que describe dicho proceso, la cual servirá para realizar el modelado de las juntas soldadas.

En este capítulo se presenta información teórica para iniciar el estudio de la simulación mediante elementos finitos, de las deflexiones en juntas soldadas por GMAW en el cual se incluyen las ecuaciones matemáticas que relacionan los efectos del cambio de temperatura en el material debido a la realización del proceso de soldadura, lo cual genera las deflexiones durante dicho proceso; así también, se presenta una introducción al Método de los Elementos Finitos (MEF); antecedentes del método, su utilización e importancia en ingeniería y las limitaciones que conlleva dicho método; así mismo, se realiza un estudio de casos de simulación de deflexiones y/o esfuerzos residuales presentando algunos aspectos relevantes de cada uno de ellos.

1.1. GENERALIDADES

Los distintos tipos de soldadura por arco eléctrico son los procesos de más amplia aceptación, ya que son más económicos para unir metales. En este tipo de proceso de soldadura se selecciona un electrodo adecuado, se sujeta el cable de tierra a la pieza de trabajo y se ajusta la corriente para hacer producir el arco; en seguida se mueve el electrodo a lo largo de las líneas de unión de las piezas que han de soldar, dando suficiente tiempo para que el calor funda el metal de manera adecuada [1].

El proceso GMAW es un proceso de soldadura por arco eléctrico; es definido por la Sociedad Americana de Soldadura (AWS) como un proceso de soldadura por arco, donde la fusión se produce por calentamiento con un arco entre un electrodo de metal de aporte continuo y la pieza, donde la protección

del arco se obtiene de un gas suministrado en forma externa, el cual protege el metal líquido de la contaminación atmosférica y ayuda a estabilizar el arco [2]. Dicha atmósfera protectora está compuesta en ocasiones por un gas activo el cual es comúnmente bióxido de carbono y en ocasiones un gas inerte como Argón o Helio [1]. El proceso GMAW tiene ciertas ventajas con respecto a otros procesos de soldadura por arco entre los cuales están: Mayor eficiencia y menores deformaciones en la junta, arco autorregulable y mayor limpieza en el cordón de soldadura y en la superficie de la junta soldada [3].

Un parámetro importante a considerar cuando se realiza la simulación de la deflexión en una junta soldada es la energía de aportación o flujo de calor que aporta el proceso de soldadura a la pieza de trabajo ya que éste influirá de manera significativa en las deformaciones por dilatación térmica. También, se deben tomar en cuenta las propiedades de los metales que se soldarán, las zonas que se identifican en una junta soldada y los cambios en la estructura metalográfica que se presentan en ésta con respecto al metal base.

1.1.1. ENERGÍA DE APORTACIÓN EN UN PROCESO DE SOLDADURA

Se refiere al flujo de calor que se genera durante el proceso de soldadura. Esta energía, comúnmente llamada Energía Bruta Aportada (EBA) se expresa en función de los parámetros del arco eléctrico de la soldadura en unidades de Joule (J), la cual se presenta en la ecuación 1.1 [4].

$$EBA = U \cdot I \cdot t \quad (1.1)$$

donde:

U: Voltaje de soldadura, V;

I: Corriente del arco, A; y

t: Tiempo de fusión del electrodo durante el cual se aporta calor a la pieza, s.

Si se expresa la EBA por unidad de longitud de soldadura, J/cm; la ecuación resultante se presenta en la ecuación 1.2 [4].

$$EBA = \frac{U \cdot I \cdot 60}{v} \quad (1.2)$$

donde:

v: Velocidad de avance de la soldadura, cm/min.

En la Tabla 1.1, se presenta los intervalos de valores de la EBA para algunos procesos de soldadura por arco [4].

Tabla 1.1. Intervalo de valores de EBA para algunos proceso de soldadura por arco [4].

Proceso de soldadura	EBA, kW/cm
Soldadura Eléctrica con Electrodo Revestido (SMAW)	5 – 30
Soldadura por Arco de Tungsteno y Protección Gaseosa (GTAW)	3 – 20
Soldadura por Arco con Protección Gaseosa (GMAW)	5 – 30

No obstante, la Energía Neta Aportada (ENA) que recibe la pieza durante la operación de soldadura se expresa mediante la ecuación 1.3 [4].

$$ENA = n_p \cdot EBA \quad (1.3)$$

donde:

n_p : Rendimiento del proceso de soldadura.

Normalmente los intervalos de rendimiento varían según el proceso de soldadura. En la Tabla 1.2, se presentan los rendimientos de algunos procesos de soldadura por arco [4].

Tabla 1.2. Rendimiento de algunos procesos de soldadura por arco [4].

Proceso	n_p
Soldadura Eléctrica con Electrodo Revestido (SMAW)	0.75 – 0.80
Soldadura por Arco con Protección Gaseosa (GMAW)	MIG 0.70 – 0.90 MAG
Soldadura por Arco de Tungsteno y Protección Gaseosa (GTAW)	0.65

1.1.2. ZONAS EN UNA JUNTA SOLDADA

Para realizar la simulación de las deflexiones en una junta obtenida por GMAW, es importante conocer la composición química tanto del metal base como también del aportado y las temperaturas a que se someten durante la soldadura, las cuales tienen una decisiva influencia sobre la microestructura, y como consecuencia, en el comportamiento del conjunto soldado desde los puntos de vista mecánico y frente a la corrosión [4]. En la Fig. 1.1 se presentan las zonas y líneas características de la junta soldada [4].

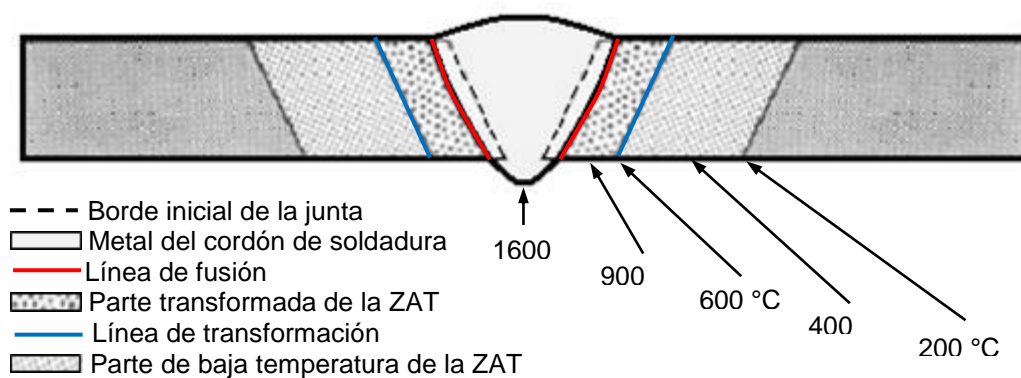


Fig. 1.1. Esquema de las zonas y líneas características de una junta soldada [4].

Metal base: Es el metal de la junta no afectado por el proceso de soldadura, cuya composición química y estructura corresponden completamente a las propias del metal a soldar [1].

Metal del cordón de soldadura: Es el metal fundido por la operación de soldadura y cuya composición química y estructura corresponden a las proporcionadas por la fusión del metal de aporte y del metal base [5].

Zona afectada térmicamente: Es la zona del metal base que ha permanecido expuesto durante cierto tiempo a un intervalo de temperaturas en el que se pueden producir cambios de la microestructura [5].

La predicción e interpretación de los cambios metalúrgicos que sufre el metal base cercano a la soldadura, pasa por el cálculo de la temperatura máxima que el material puede llegar a alcanzar en cada punto. Así, la ecuación 1.4 rige dicho fenómeno [4].

$$\frac{1}{T_m - T_0} = \frac{4.13 \cdot \rho \cdot c \cdot e \cdot Y}{ENA} + \frac{1}{T_f - T_0} \quad (1.4)$$

donde:

T_m : Temperatura máxima en °C, ya sea dentro de la ZAT o en el metal base, en un punto situado a una distancia Y en mm, desde la línea de fusión;

T_0 : Temperatura inicial del material base, °C;

T_f : Temperatura de fusión del metal depositado, °C;

ENA: Energía Neta Aportada, J/mm;

ρ : Densidad del metal base, g/mm³;

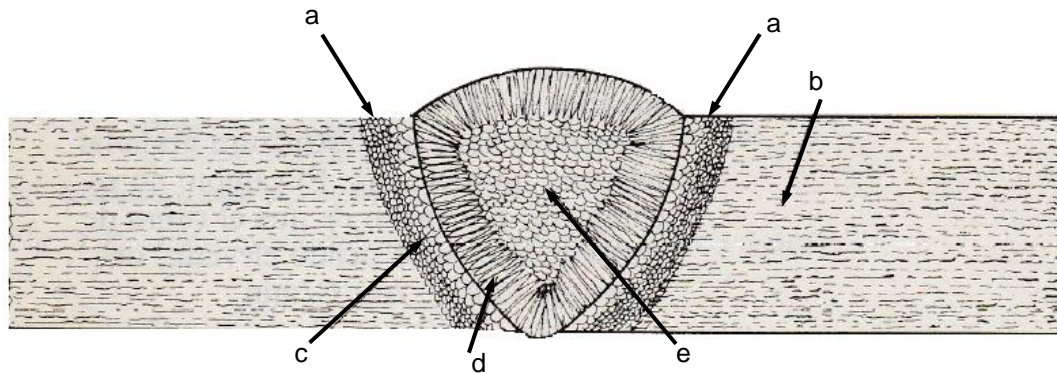
c : Calor específico del metal base, J/g·°C;

e : Espesor de la placa, mm; y

Y : Distancia del punto a la línea de fusión en mm, el cual permite calcular el ancho de la ZAT.

1.1.3. ESTRUCTURA METALGRÁFICA DE UNA JUNTA SOLDADA

Es importante identificar la estructura metalográfica que se identifica en una junta soldada. En la Fig. 1.2 se presenta la estructura granular típica que se obtiene en procesos de soldadura por arco en general en acero dulce [5]. En la Fig. 1.3 se presenta un diagrama que relaciona el tamaño de grano con las temperaturas alcanzadas en una junta soldada de acero de bajo carbono [1].



- a: Zona afectada térmicamente.
- b: Metal base.
- c: Crecimiento de grano.
- d: Granos columnares
- e: Pequeños granos equiaxiales.

Fig. 1.2. Estructura granular típica de una junta soldada en procesos de soldadura por arco [5].

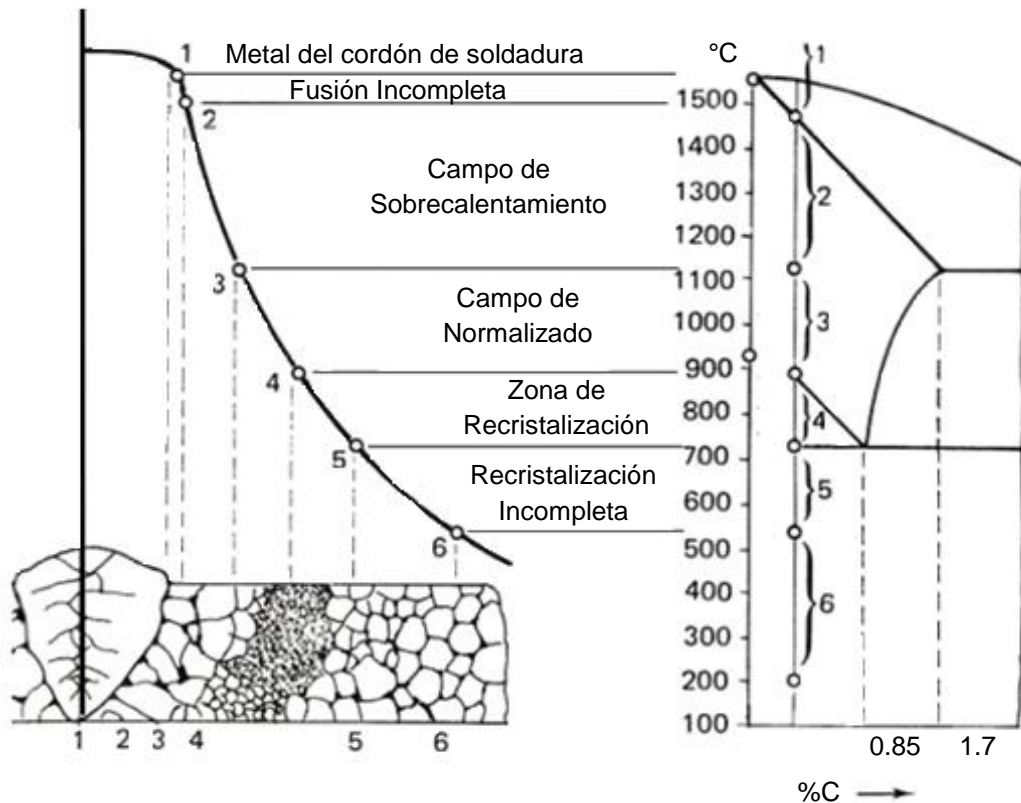


Fig. 1.3. Diagrama de la historia térmica y tamaño de grano de regiones de una junta soldada de acero de bajo carbono [1].

1.1.4. PROPIEDADES DE LOS METALES

Para continuar con el estudio de las deflexiones en juntas soldadas llevadas a cabo mediante el proceso GMAW, se deben considerar conceptos de importancia relacionados con los metales a soldar [1]. Entre ellos están:

- a) Resistencia mecánica,
- b) Elasticidad,
- c) Ductilidad,
- d) Fragilidad,
- e) Tenacidad,
- f) Dureza, y
- g) Propiedades térmicas.

Entre las propiedades térmicas de mayor importancia para este estudio, son la conductividad térmica, el coeficiente de dilatación térmica, la fusibilidad, y el calor de fusión. De ellas, los más importantes son la conductividad térmica y el coeficiente de dilatación térmica, ya que dichos parámetros controlan las deformaciones de la pieza de trabajo durante el proceso de soldadura [1].

La conductividad térmica es una medida de la rapidez a la que fluye el calor por el interior de un metal. Según la ley de Fourier, la cantidad de calor depende del tiempo, del área, de la longitud, de la diferencia de temperaturas, y de la conductividad térmica [1 y 7]. La ecuación matemática que describe el proceso es:

$$Q = K \cdot A \cdot \frac{dT}{dL} \quad (1.5)$$

donde:

K: Conductividad térmica del metal, W/m·K

A: Área transversal de la pieza, m²

dL: Diferencial de longitud de la pieza, m

dT: Diferencial de temperaturas de la pieza, K

1.2. DEFLEXIONES Y ESFUERZOS RESIDUALES

Para realizar la simulación de deflexiones y esfuerzos residuales en juntas soldadas, se debe considerar primeramente la dilatación térmica. Ésta es el aumento en las dimensiones de un cuerpo, debidas a un cambio de su temperatura. El coeficiente de dilatación lineal es la relación entre el cambio de longitud de un metal, ocasionado por calentamiento en una unidad de temperatura, y su longitud original [1]. La ecuación matemática que describe el comportamiento del proceso de dilatación térmica es la siguiente [8]:

$$\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T \quad (1.6)$$

donde:

ΔL : Cambio de longitud del material, mm;

α : Coeficiente de dilatación térmica lineal, $1/^\circ\text{C}$;

L_0 : Longitud inicial de la pieza, mm; y

ΔT : Diferencia de temperaturas, $^\circ\text{C}$.

Además, del coeficiente de dilatación térmica lineal, también existe un coeficiente de dilatación volumétrica. Este coeficiente es ~3 veces el coeficiente de dilatación térmica lineal [1].

Como se presentó anteriormente, la distribución de temperatura de un proceso de soldadura juega un papel muy importante en el estudio de las deformaciones de un elemento soldado. Seguidamente, dichas deformaciones causan deflexión y esfuerzos térmicos. Considerando el caso de una placa plana uniforme, al realizar un embridamiento de a la misma en sus extremos para evitar la dilatación longitudinal, y luego durante la realización de un proceso de soldadura, la temperatura aumenta y como consecuencia se produce una deflexión de la pieza en dirección vertical, lo cual genera esfuerzos residuales de compresión por gradiente térmico en dicha pieza debido a la

dilatación térmica ocasionada por la alta temperatura del proceso de soldadura [9]. Para el caso de esfuerzos por gradiente térmicos, la ecuación matemática que describe el fenómeno se presenta en la ecuación 1.7 [9].

$$\sigma_t = -\frac{\alpha \cdot \Delta T \cdot E}{1-\nu} \quad (1.7)$$

donde:

σ_t : Esfuerzos por gradiente térmico, Pa;

α : Coeficiente de dilatación térmica, $1/^\circ\text{C}$;

E: Módulo de elasticidad del metal, Pa; y

ν : Coeficiente de Poisson del material, mm/mm.

1.2.1. DEFLEXIONES EN JUNTAS SOLDADAS

Cuando la pieza de trabajo se somete a un proceso de soldadura, en la zona de fusión del metal se alcanzan temperaturas elevadas. Para el caso de procesos de GMAW se alcanzan temperaturas de $\sim 1600^\circ\text{C}$. Esto provoca una dilatación térmica volumétrica [5].

Al producirse la dilatación térmica debido al gradiente térmico existente en la zona afectada por calor, se genera una deflexión en la zona del cordón de soldadura. La deflexión generada se debe a que el efecto de la dilatación térmica del metal en conjunto con la gravedad harán que el metal busque un estado de esfuerzos residuales mínimos; por lo tanto, éste se deflectará aproximadamente de la forma en que se presenta en la Fig. 1.4 [1 y 8].

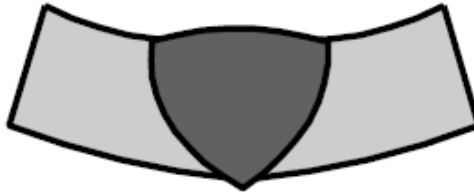


Fig. 1.4. Esquema de deflexión de una junta soldada [8].

1.2.2. ESFUERZOS RESIDUALES

Cuando en la pieza de trabajo se producen deformaciones no uniforme a lo largo de la pieza, causadas por procesos de fabricación o condiciones de servicio, esta desarrolla esfuerzos residuales. Estos son esfuerzos que permanecen en el material o componente en ausencia de cargas externas. Así, en el caso de los esfuerzos residuales producidos por gradientes térmicos, se desarrollan procesos de expansiones y contracciones locales que generan deformación no uniforme [10].

Siempre que se realice la unión de dos piezas mediante soldadura, el cordón de soldadura y una zona contigua están sometidos a esfuerzos de tracción longitudinal de un valor elevado, estando a esfuerzos de compresión el resto de la pieza según se presenta en la Fig. 1.5. Los esfuerzos, especialmente los esfuerzos de tracción; favorecen la aparición de discontinuidades y la generación de fisuras [8].

Para el cálculo de los esfuerzos residuales, se debe tomar en consideración el ciclo completo de carga y descarga del elemento (en el caso de soldadura, el ciclo térmico) como una superposición de una carga positiva (acción de carga) sobre una carga negativa (acción de descarga) [10].

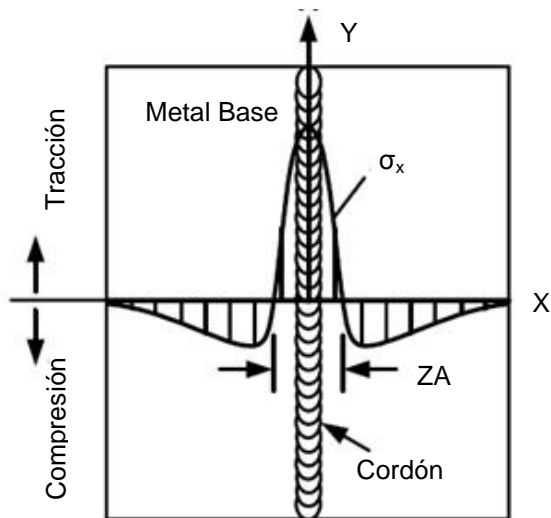


Fig. 1.5. Distribución de esfuerzos residuales en una junta soldada [8].

Normalmente los esfuerzos residuales se pueden determinar numéricamente teóricamente mediante el método de los elementos finitos mediante la utilización de algún software.

1.3. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS Y SOFTWARE DE SIMULACIÓN

Este es un método numérico para la solución de problemas de ingeniería, comúnmente utilizado para la resolución de problemas de alto grado de complejidad de matemáticas aplicadas, así como las fisicomatemáticas ya que la gran mayoría de problemas que se presentan en estas áreas, comúnmente involucran geometrías complejas, cargas no distribuidas y determinación de las propiedades de los materiales, por lo que generalmente no es posible obtener alguna solución analítica directamente de expresiones matemáticas [11].

El desarrollo de un algoritmo de elementos finitos para resolver un problema definido mediante ecuaciones diferenciales y condiciones de frontera requiere en general las siguientes etapas:

- 1) El problema debe reformularse en forma variacional, es decir se deben recopilar todos los parámetros que varían con la ubicación espacial del punto de análisis [11].
- 2) El dominio de variables independientes (usualmente un dominio espacial para problemas dependientes del tiempo) debe dividirse mediante una partición en subdominios, llamados elementos finitos. Asociada a la partición anterior se construye un espacio vectorial de dimensión finita, llamado espacio de elementos finitos. Siendo la solución numérica aproximada obtenida por elementos finitos una combinación lineal en dicho espacio vectorial [11].
- 3) Se obtiene la proyección del problema variacional original sobre el espacio de elementos finitos obtenido de la partición. Esto da lugar a un sistema con un número finito de ecuaciones, aunque en general con un número elevado de ecuaciones incógnitas. El número de incógnitas será igual a la dimensión del espacio vectorial de elementos finitos obtenido y, en general, cuanto mayor sea dicha dimensión tanto mejor será la aproximación numérica obtenida [11].
- 4) El último paso es el cálculo numérico de la solución del sistema de ecuaciones [11].

Los pasos anteriores permiten construir un problema de cálculo diferencial en un problema de álgebra lineal. Dicho problema en general se plantea sobre un espacio vectorial de dimensión no finita, pero que se puede resolver aproximadamente encontrando una proyección sobre un subespacio de dimensión finita, y por lo tanto con un número finito de ecuaciones (aunque en general el número de ecuaciones será elevado típicamente de miles o incluso centenares de miles). La discretización en elementos finitos ayuda a construir un algoritmo de proyección sencillo, logrando además que la solución por el método de elementos finitos sea generalmente exacta en un conjunto finito de puntos. Estos puntos coinciden usualmente con los vértices de los elementos finitos o puntos destacados de los mismos. Para la resolución concreta del

enorme sistema de ecuaciones algebraicas en general pueden usarse los métodos convencionales del álgebra lineal en espacios de dimensión finita [11].

El desarrollo moderno del método de elementos finitos comenzó en la década de 1940 en el campo de la mecánica estructural con el trabajo de Hrennikoff, McHenry y Newmark, quienes emplearon una malla de elementos lineales (varillas y vigas) para solucionar problemas relacionados con el cálculo de esfuerzos en sólidos continuos. Básicamente el método de elementos finitos es una técnica numérica que convierte el dominio de una estructura continua en valores discretos [12].

Existen algunos errores que son inevitables del método de análisis por elementos finitos. Estos errores son:

- a) Errores Computacionales: Estos se deben a errores de redondeo provenientes de los cálculos de puntos flotantes de la computadora y de las formulaciones de los esquemas de integración numérica que se utilizan. La mayoría de los códigos comerciales de elemento finito se concentran en reducir estos errores y, en consecuencia, el analista por lo regular se interesa en los factores relacionados con los valores discretos [12].
- b) Errores de conversión directa: La geometría y distribución del desplazamiento de una estructura real varía continuamente. Mediante el uso de un número finito de elementos para modelar la estructura introduce errores al igualar la geometría y distribución del desplazamiento debido a las limitaciones matemáticas inherentes a los elementos [12].

En la actualidad existe una gran diversidad de software computacional tanto libre como versiones con licencia comercial, que facilitan la utilización del método de elementos finitos para resolver problemas, uno de estos software es Abaqus, el cual está destinado para resolver una gran diversidad de problemas relacionados con ciencia e ingeniería y se basa en el método de elementos finitos. Además, Abaqus posee una extensa librería que permite al usuario realizar desde análisis lineales, hasta análisis complejos en geometrías en 3D [13]. El software posee una versión estudiantil la cual se puede descargar del sitio web de *3ds Simulia Academics*.

1.4. ESTUDIO DE CASOS DE SIMULACIÓN

A continuación se ha realizado una recopilación de diversos artículos acerca de casos en los que se han estudiado sobre deflexiones y esfuerzos residuales en juntas soldadas para tener una base con el fin de tomar en consideración algunas consideraciones durante la ejecución del proceso de simulación.

Bullón, Acosta, Franco, y Valverde en el 2007 [14] reportaron simulaciones de esfuerzos residuales y deflexiones de dos juntas a tope mediante GMAW, el material que utilizaron fue acero DILLIDUR 400V de 6 mm de espesor, como condición de entorno una temperatura ambiente de 30 °C y además, las láminas se embridaron en sus extremos durante la realización del cordón de soldadura. Durante la simulación utilizaron el software Solidworks empleando fuentes puntuales de temperatura a lo largo del cordón para realizar el modelado; la primera simulación se realizó a nivel térmico para obtener resultados de temperaturas en función del tiempo, y luego a partir de dichos resultados realizaron un análisis mecánico para obtener los esfuerzos y deformaciones en la junta. Los resultados obtenidos de los esfuerzos residuales y temperaturas se presentan en la Fig. 1.6. Según los datos del estudio los esfuerzos residuales máximos a compresión son de 689 MPa y las deformaciones de 0.018 mm/mm las cuales ocurrieron mayormente en los extremos de las juntas y en base a esto concluyeron que los resultados son aceptables con base a la hipótesis que plantearon inicialmente donde se considera que las deformaciones son consecuencia directa de la relación directa existente entre la dilatación causada por gradiente térmico del material y los esfuerzos producidos en una junta soldada.

Matus en el 2010 [15], reportó simulaciones de esfuerzos residuales mediante GMAW de planchas de 6 mm de espesor de acero ASTM A-131-82-B (Acero para casco de Buque) utilizando el software SAMCEF mediante

elementos finitos y como condición de entorno una temperatura ambiente de 30 °C; el modelado se realizó en dos etapas, la primera utilizando un análisis térmico con una temperatura máxima de 3800 °C en el arco producido sobre el cordón de soldadura y la segunda etapa realizando el enfriamiento de la junta y obteniendo a partir de un análisis mecánico los esfuerzos residuales resultantes. Los resultados se presentan de forma gráfica en la Fig. 1.7; de la primera pasada la máxima deflexión que se obtuvo fue de 0.3 mm y en la segunda de 4.8 mm concluyendo que la simulación dio resultados aceptables al ser comparados con los resultados experimentales del estudio realizado.

Berrio, Vanegas y Serna en el 2012 [16], reportaron una evaluación de las distorsiones de juntas soldadas a tope de un hierro dulce, para el experimento utilizaron el proceso de GMAW en placas de espesor de 6.35 mm; la temperatura del ambiente durante el experimento fue de 26.5 °C y según la simulación que realizaron, la temperatura máxima en el cordón de soldadura fue de 2836 °C; el software utilizado fue ANSYS utilizando un método secuencial de diferencias finitas. El estudio fue realizado en dos etapas realizando primero el análisis térmico transitorio y luego a raíz de los resultados obtenidos en este; se realizó un análisis mecánico para obtener las distorsiones en las juntas; durante el análisis térmico se evaluó tanto el calentamiento como el enfriamiento secuencial para obtener a partir de este la zona afectada térmicamente. Los resultados se presentan en la Fig. 1.8. Se concluyó que el modelo térmico secuencial es representativo ya que predice el ciclo térmico del material aproximándose a la realidad tanto en el calentamiento como en el enfriamiento. Además, se concluye que los resultados son aceptables como una primera aproximación al estudio pero no son representativos de la realidad ya que las deflexiones que obtuvieron fueron del orden de 0.01 mm, despreciables comparadas a las mediciones que realizaron experimentalmente.

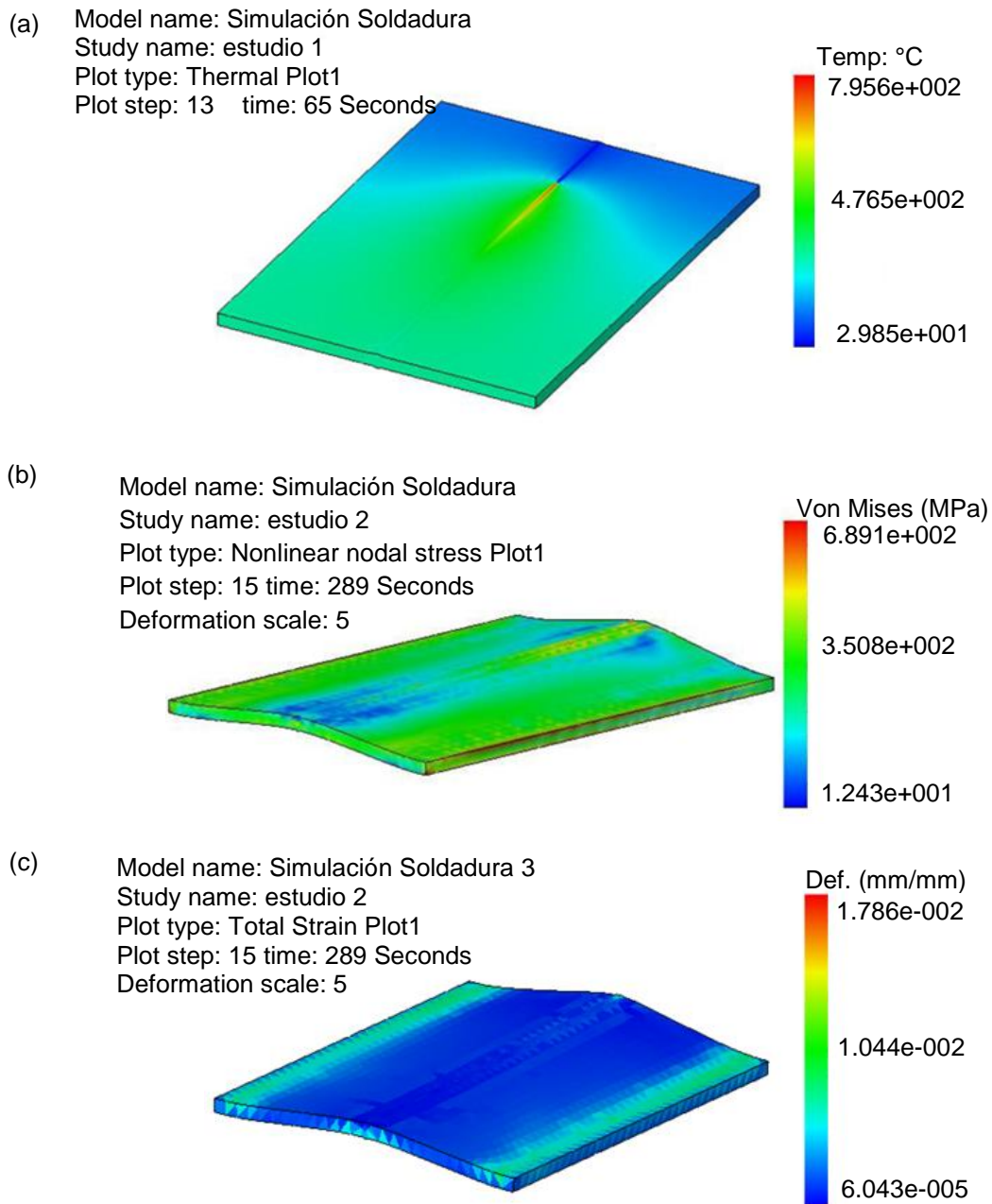


Fig. 1.6. Resultados reportados por Bullón, Acosta, Franco, y Valverde en el 2007 de la simulación realizada: (a) Temperaturas a 65 segundos de iniciado el proceso, (b) Esfuerzos residuales resultantes, y (c) Deformaciones Resultantes [14].

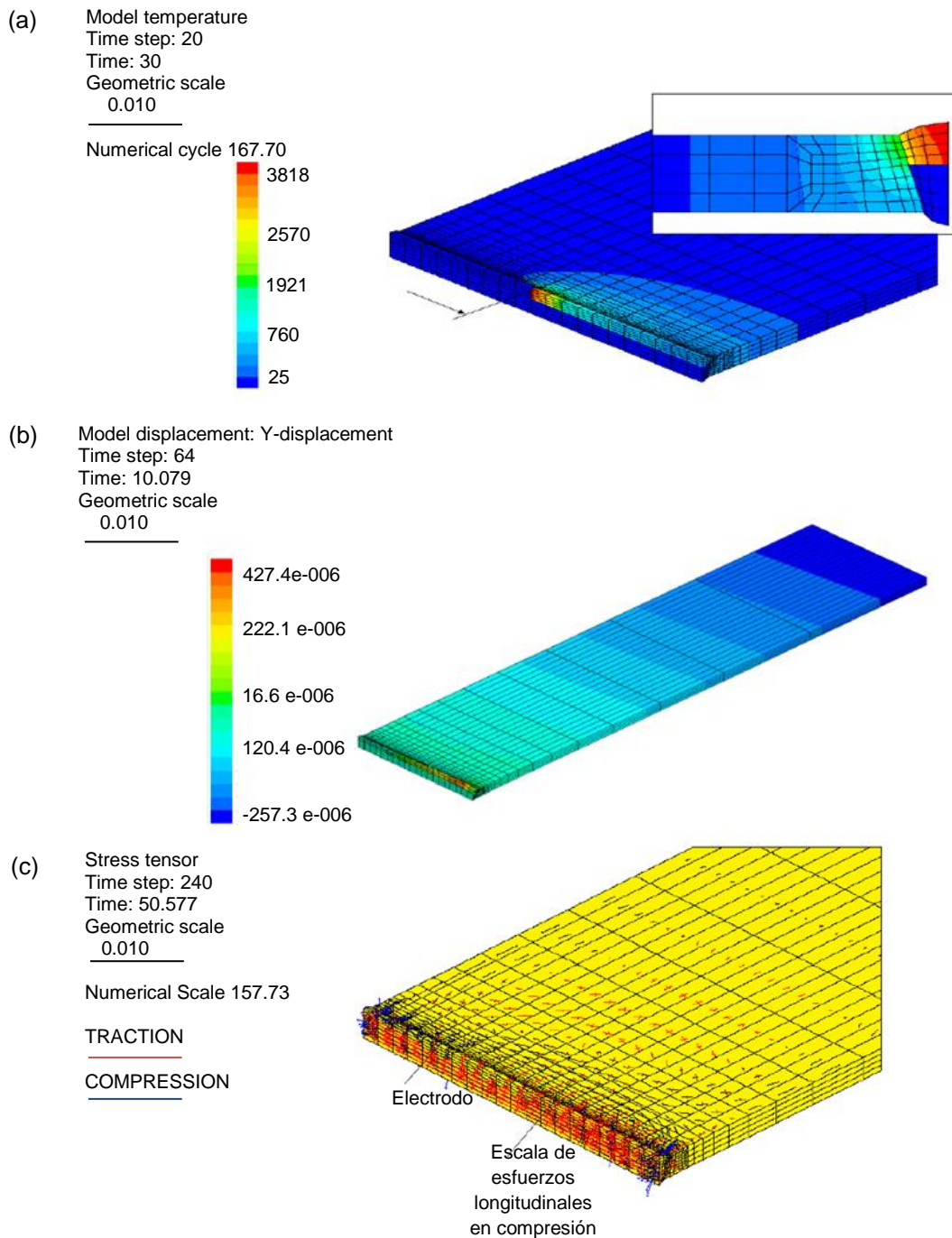
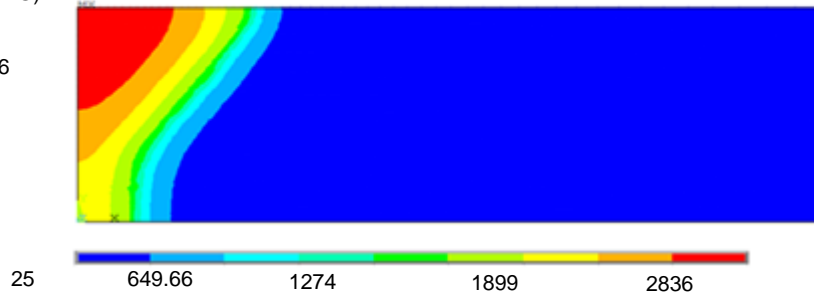


Fig. 1.7. Resultados reportados por Matus en el 2010, de la simulación realizada: (a) Efecto instantáneo del primer cordón de soldadura (a 38 s), (b) Desplazamientos verticales producto de la primera pasada, y (c) Esfuerzos a 50 s [15].

(a) NODAL SOLUTION

ANSYS

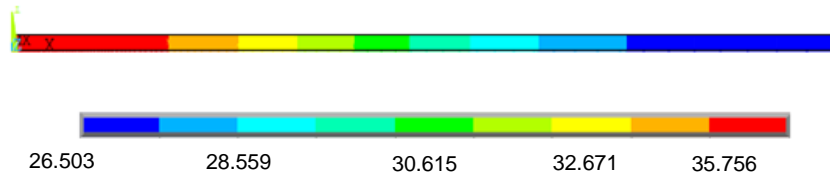
STEP = 4
SUB = 1
TIME = 0.8
TEMP (AVG)
RSYS = 0
SMN = 25
SMX = 2836



(b) NODAL SOLUTION

ANSYS

STEP = 107
SUB = 1
TIME = 1790
TEMP (AVG)
RSYS = 0
SMN = 26.503
SMX = 35.756



(c) NODAL SOLUTION

ANSYS

STEP = 107
SUB = 1
TIME = 107
SX (AVG)
RSYS = 0
DMX = 1.161×10^{-3}
SMN = -0.252×10^8
SMX = 0.251×10^8

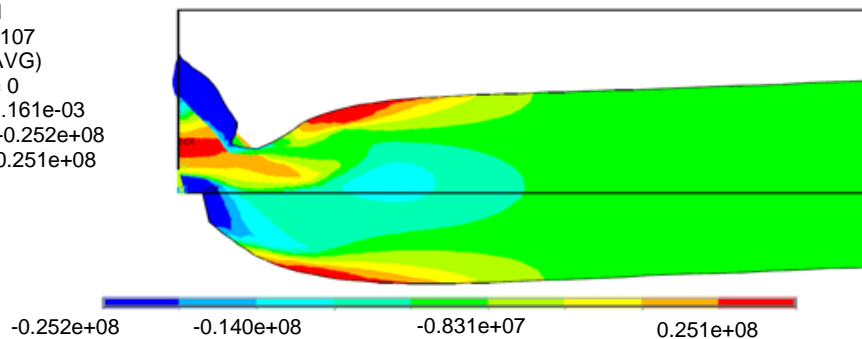


Fig. 1.8. Resultados reportados por Berrio, Vanegas y Serna en el 2012, durante la simulación realizada: (a) Representación del calentamiento secuencial, (b) Enfriamiento secuencial, y (c) Representación de esfuerzos en X secuencial [16].

1.5. MODELO MATEMÁTICO DE ELEMENTOS FINITOS DE UNA JUNTA SOLDADA

La realización de un modelo matemático para el cálculo de deflexiones en una junta soldada es un proceso muy complejo de describir, por tanto comúnmente se plantea un análisis de deformaciones, ya que las deflexiones están directamente ligadas a las deformaciones de la pieza. A continuación se realiza un planteamiento matemático básico del cálculo de los perfiles térmicos y deformaciones de una junta soldada, con el fin de realizar una introducción de los conceptos que se deben de considerar para el proceso de soldadura mediante elementos finitos para tener una idea de lo que el software realiza durante la solución de los análisis. Como se describió anteriormente existe una relación directa entre las deformaciones y el cambio de temperatura en la junta, traducida directamente en dilatación térmica; por lo tanto, se realizará el planteamiento del modelo térmico para luego plantear el modelo mecánico del proceso. En el modelo térmico se somete una placa a un ciclo de calentamiento – enfriamiento, por lo cual se debe someter a un proceso de solución transitoria [15]. En la Fig. 1.9 se presenta un elemento tridimensional de malla de elementos finitos a utilizar para la realización del análisis en los elementos donde incide el flujo de calor de la antorcha del equipo de soldadura durante la elaboración del cordón, las letras m, n, l, indican los nombres de algunos nodos del elemento de malla (algunos nombres de nodos no se visualizan debido a la ubicación de estos en el esquema presentado).

En el modelo únicamente se considera los procesos de transferencia de calor por conducción y convección, por lo cual la relación matemática que se utilizará durante el calentamiento de la junta es la ecuación 1.8 [15]. La resolución de esta ecuación diferencial se lleva a cabo utilizando las condiciones de frontera de cada uno de los nodos del elemento tridimensional de malla.

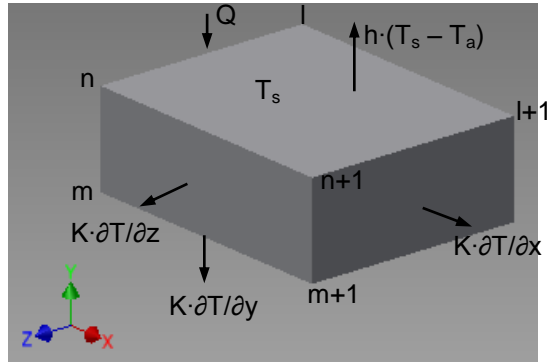


Fig. 1.9. Elemento de malla tridimensional de elementos finitos esquemático utilizado para el planteamiento matemático de elementos finitos del proceso el análisis térmico.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q + h(T_s - T_a) = 0 \quad (1.8)$$

donde:

Q: Flujo de calor aportado por el equipo de soldadura o ENA, kW

En el caso del enfriamiento de la junta, cuando la antorcha del equipo de soldadura ya no aporta calor directamente en el volumen de control se utiliza la ecuación 1.9 y al igual que para la resolución de la ecuación 1.8, a resolución de esta ecuación diferencial se lleva a cabo utilizando las condiciones de frontera de cada uno de los nodos del elemento tridimensional de malla.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) + h(T_s - T_a) = \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.9)$$

h: Coeficiente de convección con el ambiente, W/m²·K

T_s: Temperatura de la superficie del volumen de control, K

T_a: Temperatura del ambiente, K

El planteamiento mecánico del modelo relaciona la solución térmica del análisis con las deformaciones en el volumen de control. Para ello se utilizará la Fig. 1.10 en donde se presentan las direcciones de las deformaciones.

Así, al resolver la ecuación 1.8 (de calentamiento) para ΔT en las direcciones X, Y y Z utilizando las condiciones de frontera de cada uno de los nodos del elemento tridimensional de malla presentado en la Fig. 1.9, se puede continuar con el desarrollo de las deformaciones máximas en las tres direcciones [15]; planteando la relación matemática para la dirección X se tiene la ecuación 1.10.

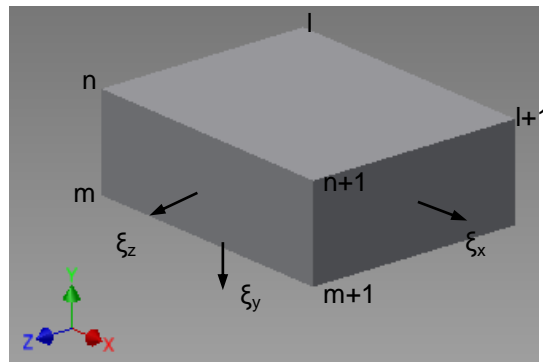


Fig. 1.10. Volumen de control utilizado para el planteamiento matemático de elementos finitos del proceso durante el análisis mecánico.

$$\xi_x = \alpha \cdot \Delta T_x \quad (1.10)$$

En la Fig. 1.11 se presenta el caso de un volumen de control de una zona de la junta soldada alejada del cordón. Así, al igual que en el volumen de control utilizado donde está siendo aplicado el flujo de calor de la antorcha del equipo de soldadura, en el modelo únicamente se considera los procesos de transferencia de calor por conducción y convección, por lo cual la relación matemática que se utilizará durante el calentamiento de la junta cuando la fuente de calor está produciendo un calentamiento sobre el cordón es la ecuación. 1.11 [15].

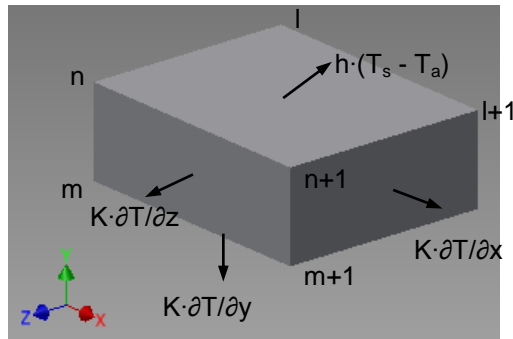


Fig. 1.11. Volumen de control alejado del cordón de soldadura utilizado para el planteamiento matemático de elementos finitos del proceso durante el análisis térmico.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) + h(T_s - T_a) = 0 \quad (1.11)$$

En el caso cuando la antorcha del equipo de soldadura ya no suministra un flujo de calor a la junta, al igual que para el caso anterior, se utiliza la ecuación 1.9 con las condiciones de frontera de cada uno de los nodos del elemento tridimensional de malla. Ya que el análisis de las deformaciones para este caso es igual En la Fig. 1.10 se indican las direcciones de las deformaciones en el volumen de control alejado del cordón de soldadura.

El planteamiento para el análisis mecánico de este caso es igual al análisis mecánico realizado al volumen de control que involucra el flujo de calor aplicado directamente a él, las direcciones de las deformaciones se presentan en la Fig. 1.11. Al resolver la ecuación 1.11 (de calentamiento) para ΔT en las direcciones X, Y y Z utilizando las condiciones de frontera de cada uno de los nodos del elemento tridimensional de malla, se continua con el desarrollo de las deformaciones máximas en las tres direcciones. Planteando para la dirección Y se presenta la ecuación 1.12.

$$\xi_y = \alpha \cdot \Delta T_y \quad (1.12)$$

Luego que se ha recopilado toda la información teórica necesaria que describe el proceso, incluyendo conceptos básicos relacionados con el Método de Elementos Finitos, y la realización de un estudio de casos de simulación para tener una base con el fin de tomar algunas consideraciones durante la simulación; se procede en el siguiente capítulo a la realización del diseño y ejecución del experimento.

2. DISEÑO Y EJECUCIÓN DEL EXPERIMENTO

En este capítulo se presenta el diseño y ejecución del experimento con el objetivo de recopilar la información necesaria para realizar la simulación de las deflexiones y corroborar los resultados obtenidos durante la misma. El experimento consiste en llevar a cabo la soldadura de juntas a tope mediante el proceso GMAW para luego realizar la medición de las deflexiones. A lo largo del capítulo se presenta el diseño de éstas, las propiedades de los metales, la preparación de la pieza previo a la realización del proceso de soldadura y las condiciones del entorno bajo las que se realizara el proceso de soldadura para ser considerados en simulación.

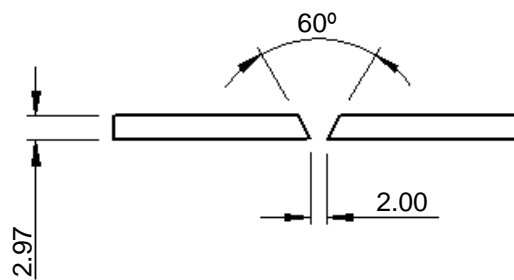
2.1. DISEÑO DE LAS JUNTAS A SOLDAR

Para realizar el proceso de soldadura de las placas, estas requerirán una preparación previa para llevarla a las dimensiones correspondientes que se necesitan para que se puedan soldar correctamente.

Las dimensiones en bruto de la lámina que se adquirió para la realización de los experimentos son de 2.00 x 1.00 m. Se utilizó una guillotina hidráulica, con la cual la lámina se cortó a aproximadamente a las dimensiones que se requieren; utilizando una lima plana se procedió a escuadrar las placas para obtener las dimensiones establecidas con un buen acabado lateral y terminado

esto se procedió a la realizar el bisel a cada placa. El bisel se preparó utilizando un esmeril de banco con el cual se colocó las placas a un ángulo apropiado y se realizó el proceso de esmerilado hasta obtener el bisel requerido, luego de este proceso se utilizó un cepillo de alambre para limpiar cualquier impureza que pueda tener el material como óxidos y se limpiaran con solvente para remover aceites.

Se prepararán tres condiciones de juntas soldadas a tope con placas de 152.4 mm de largo, 2.97 mm de espesor y 25.4, 50.2 y 76.4 mm de ancho respectivamente; además, para cada condición de material se prepararán tres juntas soldadas con el fin de calcular un valor promedio de las deflexiones obtenidas para cada condición de juntas soldadas. Dado que todas las juntas soldadas tienen el mismo espesor de metal base y se soldó el mismo tipo de junta, a estas placa correspondientes a cada junta se les realizó un bisel en V a 60° y se utilizó un espaciamiento entre placas de 1.59 mm (1/16 pulg) tal como se presenta en la Fig. 2.1 [1]. En la Fig. 2.2 se presenta un esquema en 3D del diseño final de las placas para obtener las juntas a soldar. En la Fig. 2.3 se presentan los esquemas de las placas a utilizar para cada junta a soldar.



Unidades en mm

Fig. 2.1. Bisel y espaciamiento entre placas utilizado para juntas en V [1].

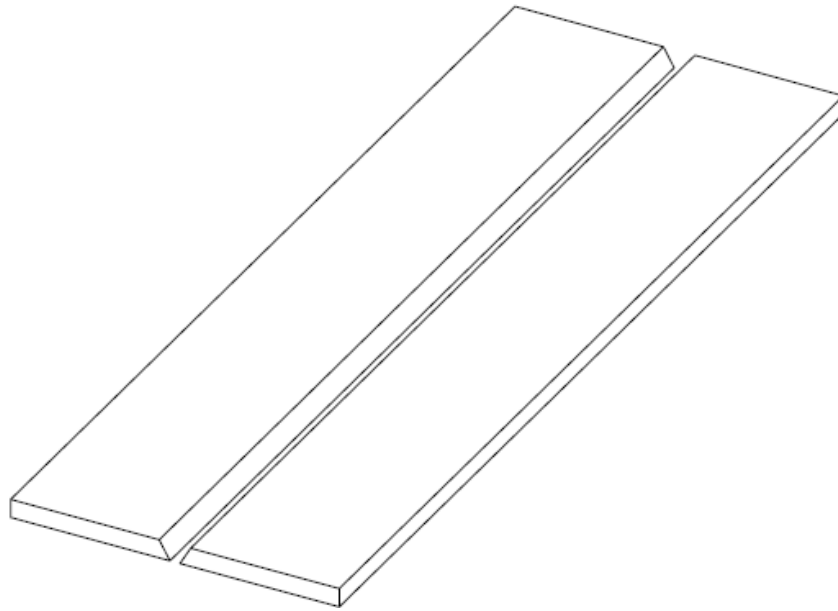


Fig. 2.2. Esquema en 3D de las placas para obtener las juntas a soldar.

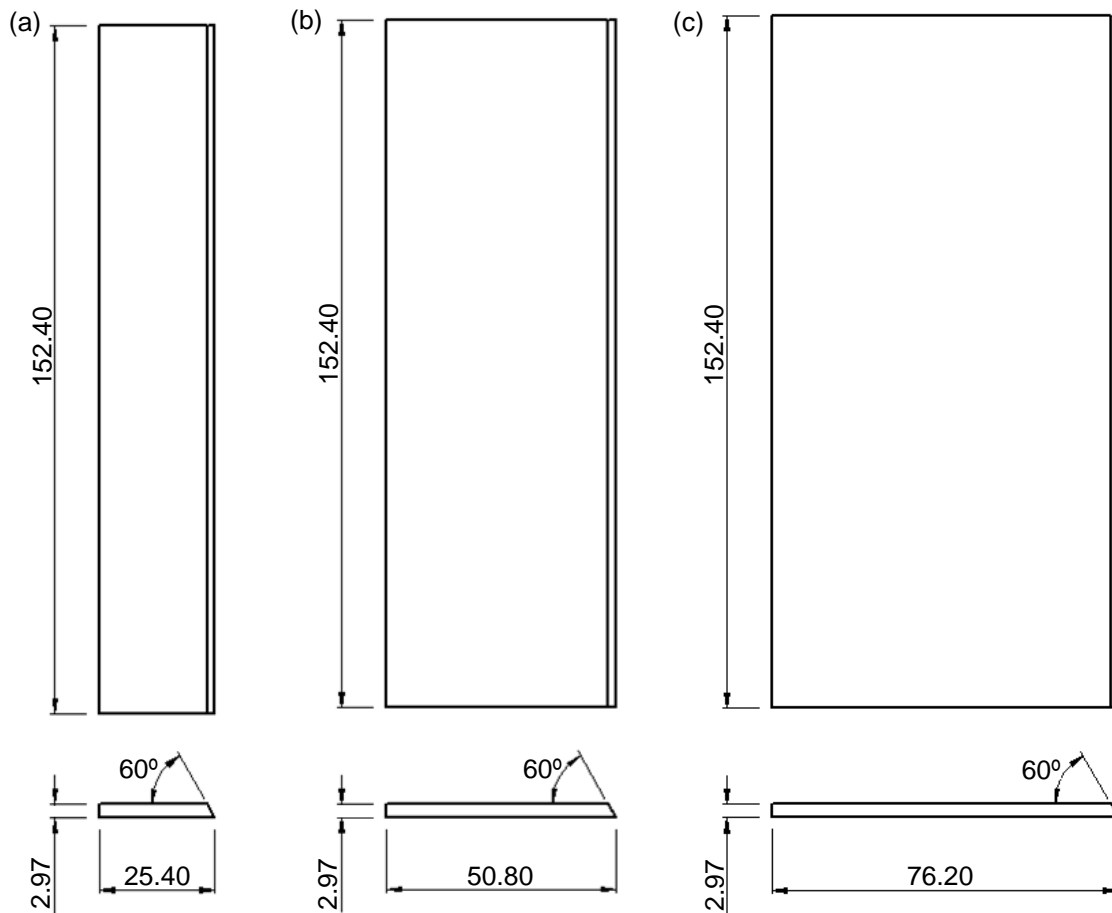


Fig. 2.3. Vistas de las placas utilizadas para las juntas soldadas: (a) 25.40 mm, (b) 50.80 mm y (c) 76.20 mm.

2.2. CONDICIONES DE FRONTERA Y PARÁMETROS DEL EQUIPO DE GMAW DURANTE EL PROCESO DE SOLDADURA

Durante el proceso de soldadura se tienen una serie de condiciones de frontera y parámetros del equipo de GMAW, que se usaron para obtener resultados lo más apegados al proceso real. Estos parámetros y condiciones de frontera son los que intervienen directamente durante el proceso de soldadura. Las condiciones de frontera que se utilizaron son:

- a) Temperatura ambiente. Está determinada por las condiciones ambientales propia del local para la fecha del año en que se realizaron las Juntas soldadas. Así, para lo cual se tienen ~ 27 °C.
- b) Temperatura de soldadura. Para procesos de GMAW la temperatura que se alcanza en el cordón de soldadura durante el proceso es de ~ 1600 °C, esta se considera constante para espesores de placa delgados como el que se utilizara y además al mantener constante la velocidad de soldadura [5].
- c) Velocidad de depositación del metal. Esta tiene un efecto significativo durante el proceso de soldadura de las placas ya que determina la penetración adecuada del cordón de soldadura obtenido y la cantidad de calor aportada, para procesos de GMAW, normalmente está entre 2 y 4 mm/s [14].

Entre otras de las condiciones anteriormente presentadas, durante el proceso de fabricación de las juntas soldadas se colocaron puntos de soldadura en los extremos de los biselados de las placas con el fin de evitar que por el efecto de dilatación térmica, el espaciamiento entre placas aumente. En el mismo sentido, los parámetros que se utilizaron en el equipo de GMAW se presentan en la Tabla 2.1 [17].

Tabla 2.1. Parámetros de control del equipo de GMAW para realizar el proceso de soldadura de placas de espesores de hasta 3.17 mm (1/8 pulg) [17].

Diámetro Alambre, mm	Voltaje, V	Velocidad del alambre, m/min	Flujo de gas protector, l/min	Polaridad
0.6	16	1.3	6	Inversa

En la Fig. 2.4 se presenta el equipo de GMAW que se utilizó para llevar a cabo la fabricación de las juntas soldadas. Además, se indican los controles para el ajuste de los parámetros. En este equipo de GMAW para obtener los parámetros del equipo que se presentaron en la Tabla 2.1 el selector de control de velocidad del alambre se colocó en la posición 80%, el selector de voltaje se colocó en 4 y el flujo de gas protector se colocó en 6 l/s.



Fig. 2.4. Equipo de GMAW utilizado durante la obtención de las juntas soldadas.

2.3. PROCESO DE SOLDADURA DE LAS PLACAS

A partir de las placas preparadas (biseladas), estas se colocaron como se presenta en la Fig. 2.5 para realizarles los puntos de soldadura en cada uno de sus extremos, ajustando los parámetros del equipo de soldadura tal como se indicó en el apartado anterior. Así, éstas quedaron como se especifica en la Fig. 2.6; luego se realiza el cordón de soldadura en dirección de izquierda a derecha lo cual es lo recomendado para placas de espesores delgados en procesos GMAW según se presenta en la Fig. 2.7 [5].



Separación entre
placas: 2 mm

Fig. 2.5. Placas preparadas y ubicadas para realizar los puntos de soldadura en cada extremo.



Fig. 2.6. Placas unidas mediante puntos de soldadura antes de iniciar el proceso de soldadura.

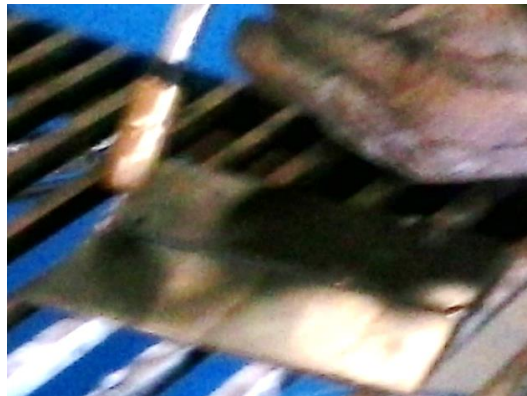


Fig. 2.7. Realización del cordón de soldadura de la junta.

En la Fig. 2.8 se presenta una fotografías de las tres juntas soldadas con placas de 25.4 mm de ancho que se obtuvieron para realizar la medición de las deflexiones.

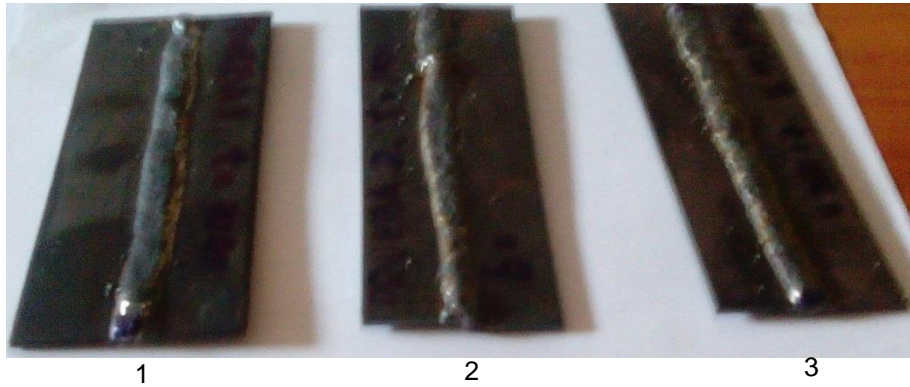


Fig. 2.8. Juntas soldadas con placas de 25.4 mm de ancho.

En la Fig. 2.9 se presentan las tres juntas soldadas con placas de 50.8 mm de ancho que se obtuvieron para realizar la medición de las deflexiones.

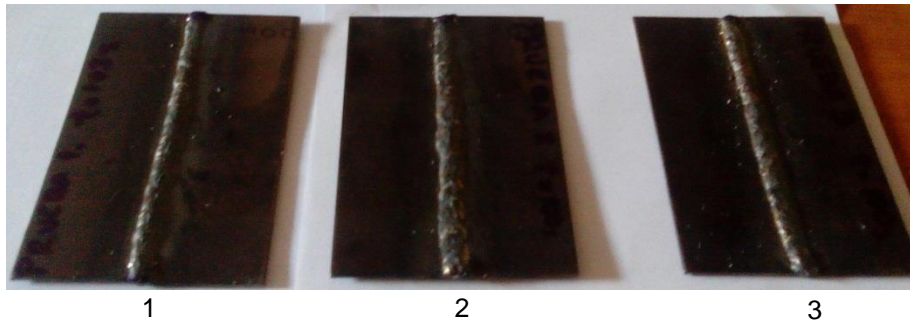


Fig. 2.9. Juntas soldadas con placas de 50.8 mm de ancho.

En la Fig. 2.10 se presentan las tres juntas soldadas con placas de 76.4 mm de ancho que se obtuvieron para realizar la medición de las deflexiones.

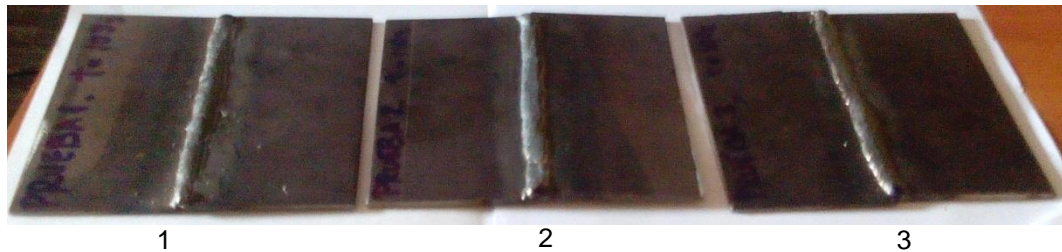


Fig. 2.10. Juntas soldadas con placas de 76.4 mm de ancho.

2.4. ANÁLISIS METALOGRÁFICO

Con el fin de verificar algunas respuestas del análisis del estudio de la simulación, se preparó una muestra metalográfica con la cual se podrá registrar la zona afectada térmicamente por el proceso de soldadura. Ésta se obtendrá de una junta soldada la cual incluyó el cordón de soldadura, la zona afectada térmicamente y metal base; luego se preparó para su observación en el microscopio óptico y el respectivo registro mediante fotos con el fin de contrastar con los resultados de la simulación.

Luego que se ha definido completamente el experimento, indicando los parámetros que lo definen: por ejemplo: las propiedades de los metales, la preparación de la pieza previo a la realización del proceso de soldadura y las condiciones del entorno bajo las que se realizará el proceso de soldadura para ser considerados en simulación; además, de la presentación de esquemas de las placas indicando sus dimensiones geométricas, se procede al planteamiento del proceso de simulación, en el cual se definen todos los parámetros a considerar durante la simulación para obtener resultados adecuados.

3. PROCESO DE SIMULACIÓN

En este capítulo se presenta el planteamiento del problema para realizar la simulación mediante Abaqus/CAE, la selección del módulo a utilizar en Abaqus para el análisis, la exposición de las consideraciones hechas durante el planteamiento de la simulación con respecto al proceso real, el diseño de la misma la cual es realizada mediante elementos finitos considerando: el sistema de unidades utilizado, creación del modelo 3D, propiedades de los materiales importantes en la simulación, condiciones de frontera, tipo y tamaño de la malla de elementos finitos y las condiciones del proceso.

3.1. PLANTEAMIENTO DE LA SIMULACIÓN

Se analizarán tres juntas soldadas mediante GMAW, las placas son de hierro dulce de longitud y espesor constante y tres diferentes anchos de placa. La simulación se realizó planteando el proceso de soldadura mediante el cual se alcanza una temperatura de ~ 1600 °C en el cordón de soldadura durante el proceso de soldadura; el primer suceso que se debe tomar en cuenta es que mediante el equipo de GMAW se transfiere una cantidad de energía en forma de calor considerable, la cual eleva rápidamente la temperatura del metal en el punto donde se está creando el cordón y como consecuencia mediante transferencia de calor por conducción la temperatura de todo el metal base se incrementa de la misma forma a un valor inferior que la temperatura de fusión del metal, el cual es menor en la medida se aleja del cordón de soldadura; los valores de temperatura que alcanza el resto del metal base en la zona cerca del cordón dependen directamente del área lateral de la junta y además de las condiciones del ambiente donde se realiza el proceso de soldadura. Considerando la transferencia de calor por convección al ambiente y que además el proceso de GMAW es más eficiente durante la ejecución de una soldadura debido a las velocidades de depositación del material de aporte cuando se elabora el cordón, el efecto de calentamiento – enfriamiento de la pieza se producirán esfuerzos residuales por gradiente térmico que a la vez estos al liberarse producirán pequeñas deformaciones en la pieza, por lo tanto el orden de la simulación a realizar será primero un estudio térmico – transitorio de la junta durante el proceso de soldadura y a partir de este un estudio del comportamiento mecánico de la junta para obtener las deflexiones.

3.2. ANÁLISIS EN ABAQUS

Abaqus posee diversos módulos para realizar diferentes tipos de análisis mediante elementos finitos entre los cuales se listan [13]:

- Abaqus/Standard, un programa de uso general de elementos finitos.
- Abaqus/CFD, un programa específico para realizar simulaciones mediante elementos finitos de modelos que están en contacto con fluidos en movimiento.
- Abaqus/CAE, un entorno interactivo para crear modelos de elementos finitos, presentar análisis Abaqus, monitorear y diagnosticar los puestos de trabajo, y evaluar los resultados.

La simulación se ejecutará utilizando Abaqus/CAE en el módulo Abaqus/Standard ya que es el más adecuado para realizar combinaciones de análisis térmicos transitorios con análisis mecánicos; así mismo, dentro de este módulo Abaqus posee diversas librerías para resolver problemas de transferencia de calor de diferentes características, y se estima que el más adecuado es un análisis térmico de esfuerzo totalmente acoplado el cual resuelve simultáneamente las deformaciones causadas por los cambios de temperatura de un metal [13].

3.3. CONSIDERACIONES DE LA SIMULACIÓN RESPECTO AL PROCESO DE SOLDADURA REAL

Un proceso de soldadura real es un fenómeno que a nivel físico es muy complejo ya que intervienen muchas variables que afectan la calidad de la soldadura obtenida, entre las cuales se pueden citar la habilidad del soldador, el metal de aporte, el estado del equipo de soldadura, el diseño de la junta, el nivel de penetración obtenido, el porcentaje de dilución de la junta, entre otras; por lo tanto, se debe tomar en cuenta dichas consideraciones durante la ejecución de la simulación para alcanzar una máxima aproximación a una soldadura real; para la simulación se considerara que el rendimiento del proceso de transferencia de calor de la boquilla al cordón será del 95 %. Además, debido a que la mayor transferencia de calor durante el proceso se produce mediante los métodos de conducción en las placas y convección con el ambiente, para

mayor simplicidad no se tomará en cuenta la transferencia de calor por radiación; otro punto a considerar es que el cordón es completamente uniforme a nivel geométrico y también uniforme en sus propiedades mecánicas; otro punto a considerar es que si bien el proceso de GMAW transfiere calor a la pieza directamente, el proceso se simulará mediante fuentes de temperatura puntuales, ya que el calor que la boquilla transfiere a la pieza directamente eleva la temperatura de ésta en un punto a un nivel ligeramente superior a la de fusión del metal; por lo tanto, se considera que la temperatura alcanzada en la zona donde la boquilla del equipo de soldadura se encuentra en un momento determinado es constante. También, se considera que los metales de los cuales se compone la junta son isotrópicos y no se toma en cuenta la variación de algunas propiedades mecánicas con la temperatura; así mismo, se considera que el proceso es a presión constante. Otra consideración importante es que debido a que el software que se está utilizando es una versión estudiantil, éste esté limitado en algunas opciones como son el tamaño de los elementos finitos, los cuales a medida que son más pequeños agregan un mayor grado de aproximación al proceso real; así mismo, se toma en cuenta el proceso de adición de masa a la junta durante el proceso de soldadura, lo cual hace que el proceso que se está simulando sea más confiable.

3.4. SISTEMA DE UNIDADES

Es importante mencionar que Abaqus no cuenta con un sistema de unidades definido por lo cual el usuario debe ingresar los valores de las propiedades que se requieren en un sistema de unidades congruente. Debido al nivel de detalle que se utiliza para llevar a cabo la simulación, se requiere que para las dimensiones geométricas del modelo estén en unidades de milímetros; como consecuencia, se determinó que se deben ingresar las unidades de las demás propiedades que solicita Abaqus según se presenta en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Unidades utilizadas para los distintos parámetros requeridos para la simulación en Abaqus.

Propiedad	Unidades
Longitud	mm
Temperatura	°C
Densidad	N·s/mm ⁴
Conductividad térmica	J/(s·mm·°C)
Calor específico	J/(N·s ² ·mm·°C)
Coefficiente de dilatación térmica	1/°C
Coefficiente de transferencia de calor por convección	J/(s·mm ² ·°C)

3.5. ELABORACIÓN DEL MODELO 3D

Para realizar la simulación Abaqus requiere que se elabore un modelo 3D de la junta incluyendo la zona del metal base y el cordón de soldadura. El modelo puede ser elaborado en el mismo Abaqus o en un programa externo para luego ser importado; debido a la complejidad del modelo las tres juntas a simular son dibujadas en el software Autodesk Inventor 2013 (versión estudiantil), como marco de referencia se utiliza el sistema de coordenadas cartesianas. En la Fig. 3.1 se presenta como ejemplo el modelo elaborado de la junta de 25.4 mm en 3D, los modelos se han guardado en formato de archivos STEP ya que para importar un modelo 3D a Abaqus éste requiere que los archivos externos se encuentren en ese formato; en la Fig. 3.2 se presenta el modelo de la junta de 50.8 mm ya importado a Abaqus.

Luego de que el modelo de la junta ha sido creada y exportada a Abaqus se ha de ingresar las propiedades de los materiales que la componen, no se requiere una alta gama de propiedades para realizar la simulación sino únicamente un conjunto de propiedades útiles; para el caso dichas propiedades tanto del material base como del metal de aporte se presentan en las Tablas 3.2 y 3.3.

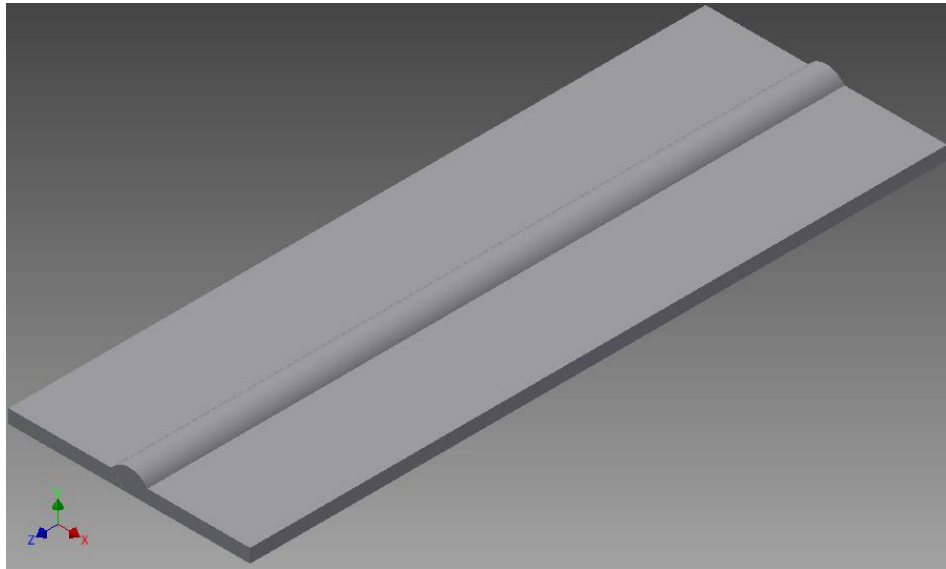


Fig. 3.1. Modelo en 3D de la junta de 25.4 mm elaborado en Autodesk Inventor 2013 (versión estudiantil).

Tabla 3.2. Propiedades del material base (hierro dulce) [6].

Propiedad	Valor
Esfuerzo de fluencia	170 MPa
Resistencia a la tracción	300 MPa
Módulo de Young	30 000 MPa
Densidad	$7.1 \cdot 10^{-9}$ N·s/mm ⁴
Coefficiente de Poisson	0.31
Conductividad térmica	0.075 J/(s·mm·°C)
Coefficiente de dilatación térmica	0.000011 1/°C
Calor específico	450000 J/(N·s ² ·/mm·°C)

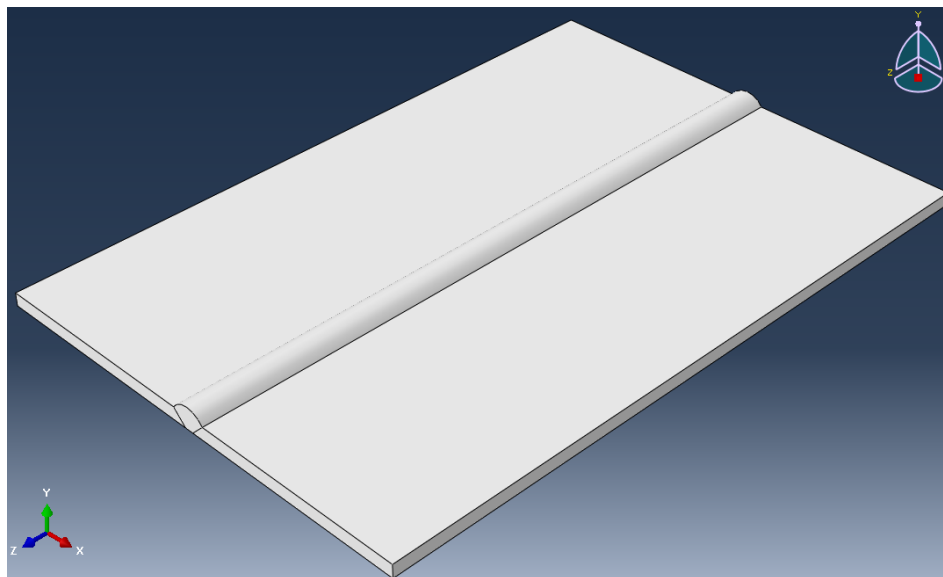


Fig. 3.2. Modelo de la junta de 50.8 mm importado a Abaqus/CAE.

Tabla 3.3. Propiedades del material de aporte (electrodo ER-70S6) [6].

Propiedad	Valor
Esfuerzo de fluencia	400 MPa
Resistencia a la tracción	480 MPa
Módulo de Young	30 000 MPa
Densidad	$7.1 \cdot 10^{-9}$ N·s/mm ⁴
Coefficiente de Poisson	0.31
Conductividad térmica	0.075 J/(s·mm·°C)
Coefficiente de dilatación térmica	0.000011 1/°C
Calor específico	450000 J/(N·s ² ·/mm·°C)

Luego que se han ingresado las propiedades de los materiales estos se deben asignar a cada región del modelo, esto se hace creando una sección del metal y asignando cada uno de los materiales a ésta; para el caso se han definido dos secciones: una para el material base y la otra para el cordón de soldadura, en la Fig. 3.3 se presenta un ejemplo de las secciones creadas en Abaqus para las juntas soldadas; luego que las secciones se crean y el metal se asigna a cada una de ellas, se debe crear una instancia como ensamblaje para posteriormente ejecutar el mallado de la junta.

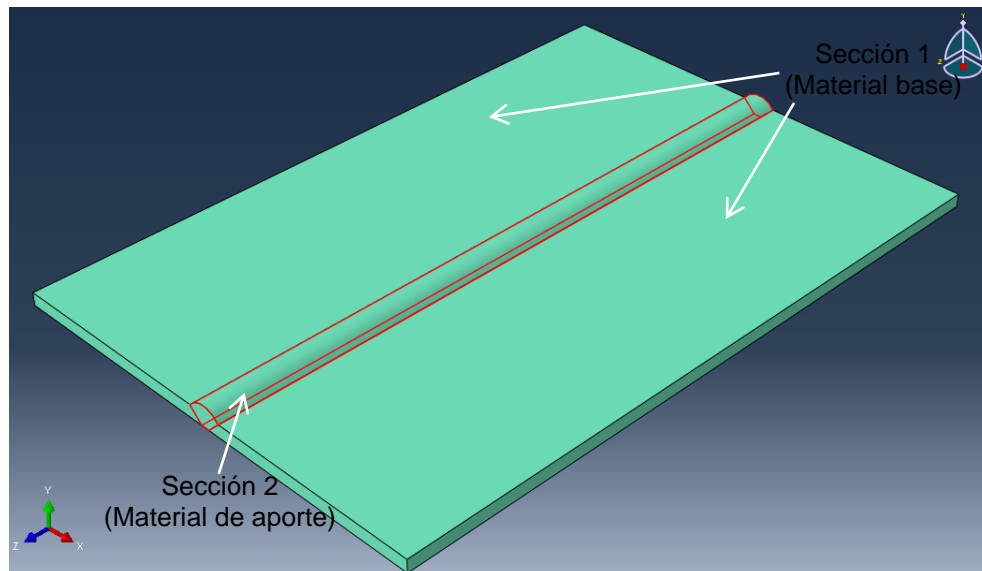


Fig. 3.3. Secciones de material asignadas a la junta.

3.6. MALLADO DEL MODELO

Un parámetro de vital importancia para obtener resultados confiables durante la simulación es el mallado de elementos finitos del modelo, el mallado que se utiliza debe ser lo más uniforme y fino posible; es decir, la distancia entre cada uno de los nodos debe ser la menor posible; debido a que se está utilizando una versión estudiantil de Abaqus, por lo cual solo se permite utilizar un máximo de 1000 nodos en cada uno de los modelos de juntas soldadas y por lo tanto, se ha adecuado el tamaño de cada uno de los elementos al modelo de tal manera que se utilice el máximo número de nodos permitidos y se obtengan buenos resultados de la simulación. Así, durante el modelo se han utilizado diferentes geometrías y tamaños de elementos de malla con tal de analizar con más detalle las zonas tanto del cordón de soldadura como también la afectada térmicamente. En las Figs. 3.4 – 3.6 se presentan los mallados que se han realizado para cada uno de los modelos de juntas que se simularán.

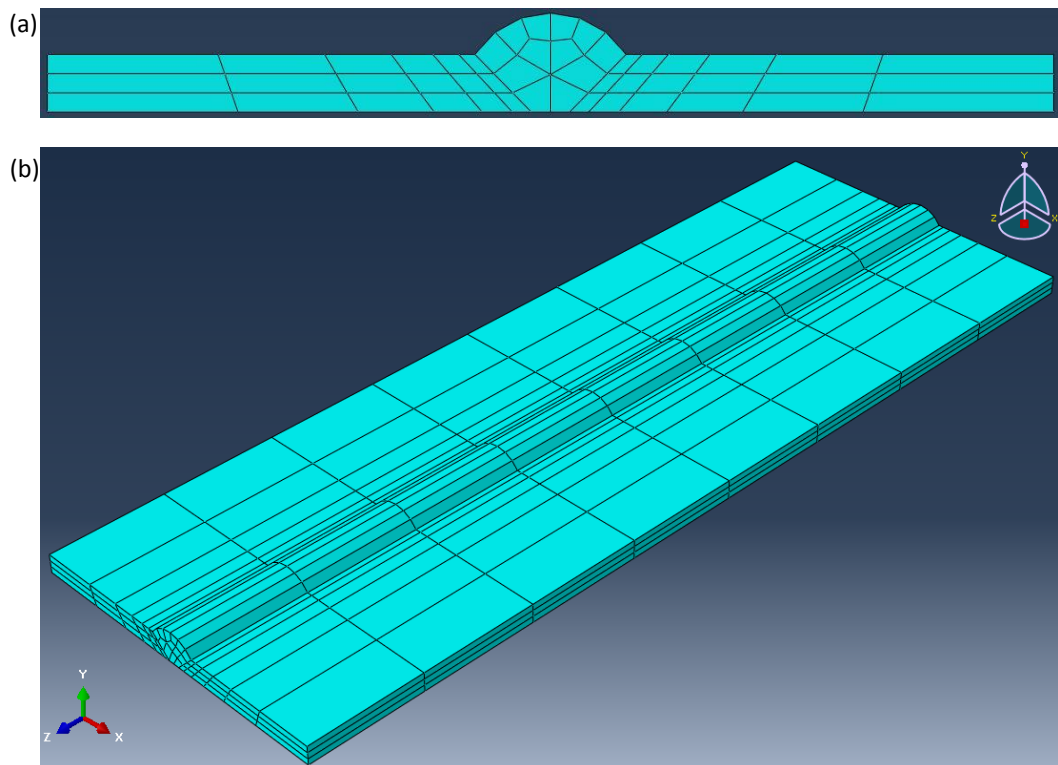


Fig. 3.4. Mallado utilizado en junta con placas de 25.4 mm de ancho: (a) Vista frontal de la junta y (b) Modelo 3D.

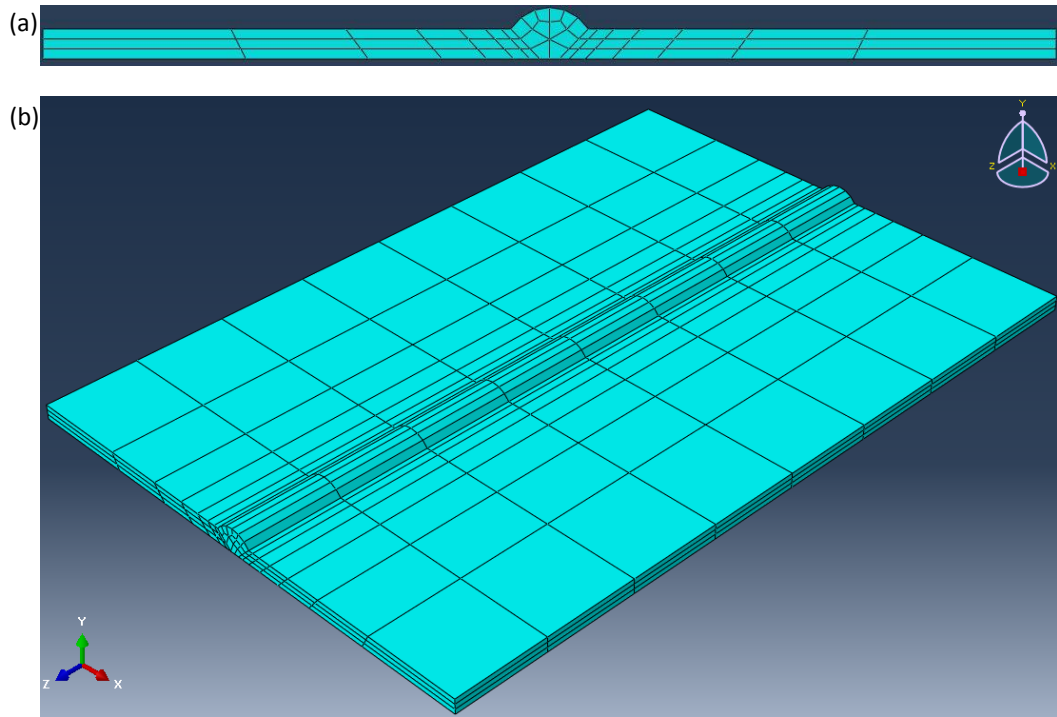


Fig. 3.5. Mallado utilizado en junta con placas de 50.8 mm de ancho: (a) Vista frontal de la junta y (b) Modelo 3D.

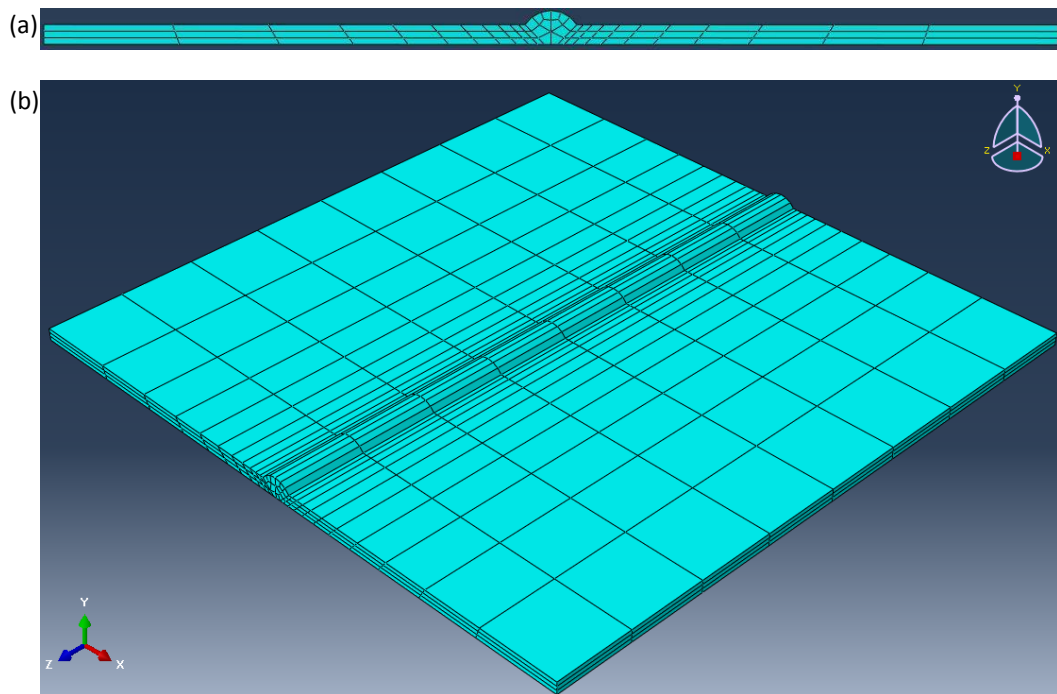


Fig. 3.6. Mallado utilizado en junta con placas de 76.2 mm de ancho: (a) Vista frontal de la junta y (b) Modelo 3D.

Además, el tipo de mallado es importante durante la realización del análisis, para este caso se ha utilizado una malla tipo *sweep* (barrido) y se debe de asignar la dirección de apilamiento de los elementos, la cual será la dirección transversal al plano frontal de la junta en dirección al eje Z negativo ya que es en donde se realiza el proceso de soldadura.

3.7. CONDICIONES DE FRONTERA

Es importante señalar las condiciones de frontera que tendrá el proceso tanto a nivel térmico como mecánico, ya que de la correcta definición de éstas, se obtendrán resultados confiables.

Para el caso de las condiciones de frontera mecánicas del proceso, la condición de frontera principal es que a la junta se le colocarán puntos de soldadura antes de iniciar el cordón como se presentó en la Fig. 2.6, por lo tanto para simular este comportamiento se ha colocado una restricción parcial de desplazamiento en la dirección de los ejes X y Z para la zona donde inicia el cordón de soldadura según se presenta en la Fig. 3.7.

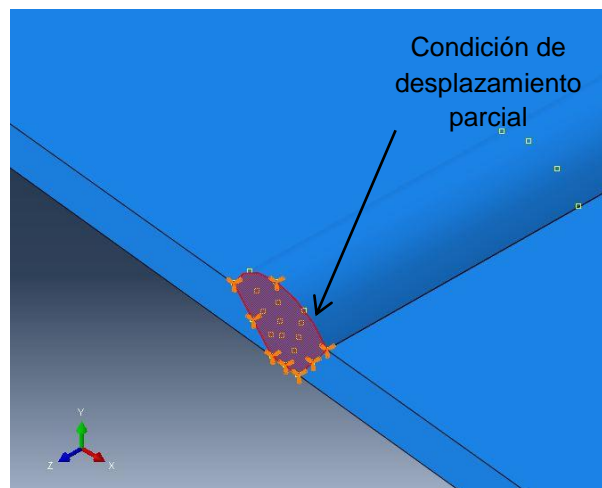


Fig. 3.7. Área del modelo donde se ha aplicado la condición de frontera para simular el punto de soldadura que se le colocó a la junta antes de iniciar el proceso de soldadura.

Entre las principales condiciones de frontera térmicas a las que se somete la junta están las superficies que tendrán transferencia de calor por convección con el ambiente durante el análisis. Para la simulación se asumirá que todas las superficies están en contacto con el ambiente durante la elaboración del cordón de soldadura, también se desprecia la transferencia de calor por radiación del entorno; la temperatura del ambiente durante la realización de las pruebas fue de ~ 27 °C, por lo tanto se utilizará esa temperatura como base; el valor del coeficiente de transferencia de calor por convección introducido a Abaqus es de $0.00025 \text{ J}/(\text{s}\cdot\text{mm}^2\cdot\text{°C})$, también, debido a que la temperatura de fusión del material es de ~ 1600 °C [1] y que se utilizó un proceso de GMAW para realizar el cordón de soldadura, se supondrá que la temperatura máxima que se alcanzó en éste será de ~ 1700 °C considerando valores de eficiencia en el proceso de transferencia de calor.

3.8. CONDICIONES DEL PROCESO

Luego de haber elaborado el mallado y definir las condiciones de frontera mecánicas del modelo, se deben configurar las condiciones del proceso de soldadura para iniciar la solución, para ello se utiliza el plugin Abaqus Welding Interface (AWI) de Abaqus, en el cual se introducen las condiciones de frontera térmicas del proceso, así como parámetros importantes como el tiempo que se tarda la elaboración del cordón de soldadura, que para este caso según se registró durante el experimento en promedio para la realización del cordón de soldadura correspondiente a una junta fue de ~ 100 s; para facilitar el análisis en el software el plugin subdivide el cordón en 8 partes iguales las cuales se crean en un tiempo de 13 s cada una de manera sucesiva hasta que el cordón es completado y de esta manera simular el proceso de soldadura. El software crea dos trabajos internos para analizar los cuales son un trabajo para el análisis térmico y otro para el análisis mecánico.

Al terminar la introducción de los parámetros del plugin AWI se envían los trabajos para que sean analizado por el software, primero se envía el análisis térmico y luego que éste ha sido analizado, se envía el análisis mecánico ya que este último depende directamente de los resultados del anterior.

Anexo a este documento se presentan tres guías de laboratorio; en el Anexo A, se presenta una Guía de instalación de Abaqus/CAE 6.12 Student Edition y Plugin Abaqus Welding Interface; En el Anexo B, se presenta una Guía de laboratorio: Simulación de la deflexión en juntas soldadas utilizando Abaqus/CAE; y en el Anexo C, se presenta una Guía de generación de datos para elaboración de perfiles térmicos de juntas soldadas simuladas mediante Abaqus/CAE 6.12 Student Edition.

3.9. REPRESENTACIÓN DE RESULTADOS PRELIMINARES DE LA SIMULACIÓN

Luego que se ha elaborado los modelos en 3D, se han introducido los parámetros y condiciones de frontera de la simulación a Abaqus, se procede a realizar el análisis para obtener los resultados de ésta. Así, en las Figs. 3.8 – 3.13 se presentan algunos resultados del análisis térmico durante la simulación para cada una de las placas.

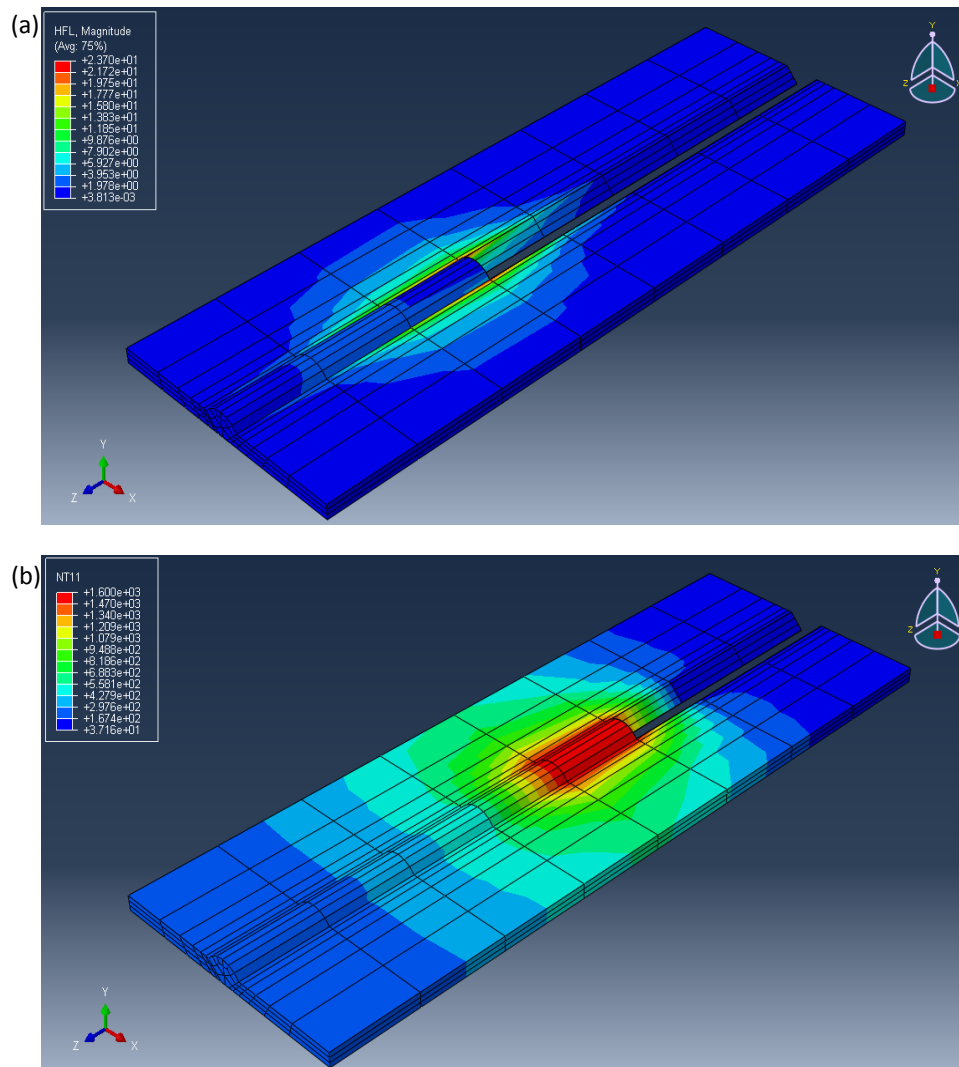


Fig. 3.8. Representación de resultados preliminares del análisis térmico en junta soldada con placas de 25.4 mm de ancho: (a) Flujo de calor a 39 s de iniciado el proceso de soldadura y (b) Temperaturas de la junta a 65 s de iniciado el proceso.

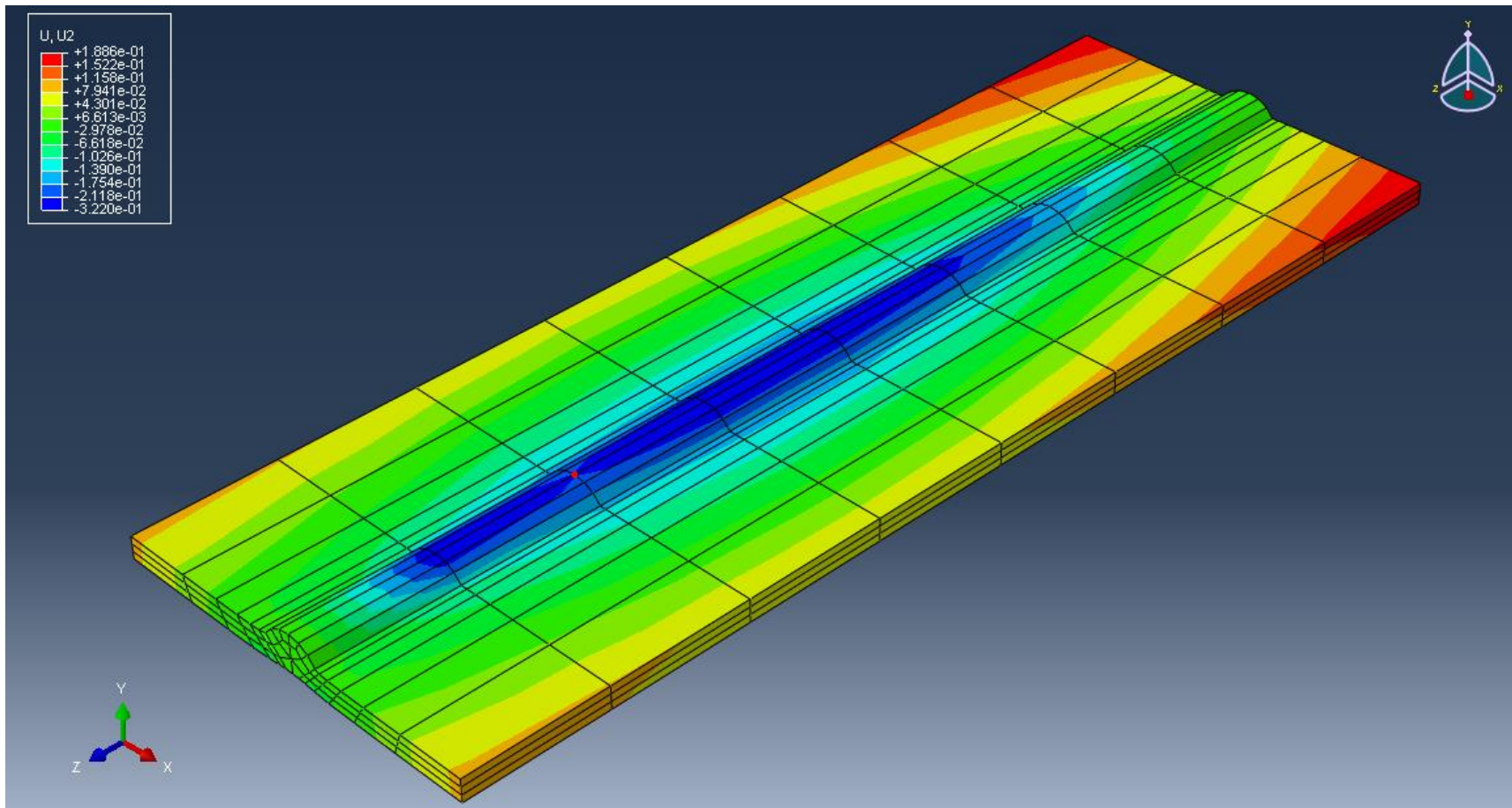


Fig. 3.9. Representación de resultados preliminares de deflexiones en la junta con placas de 25.4 mm de acho, al finalizar el proceso de soldadura.

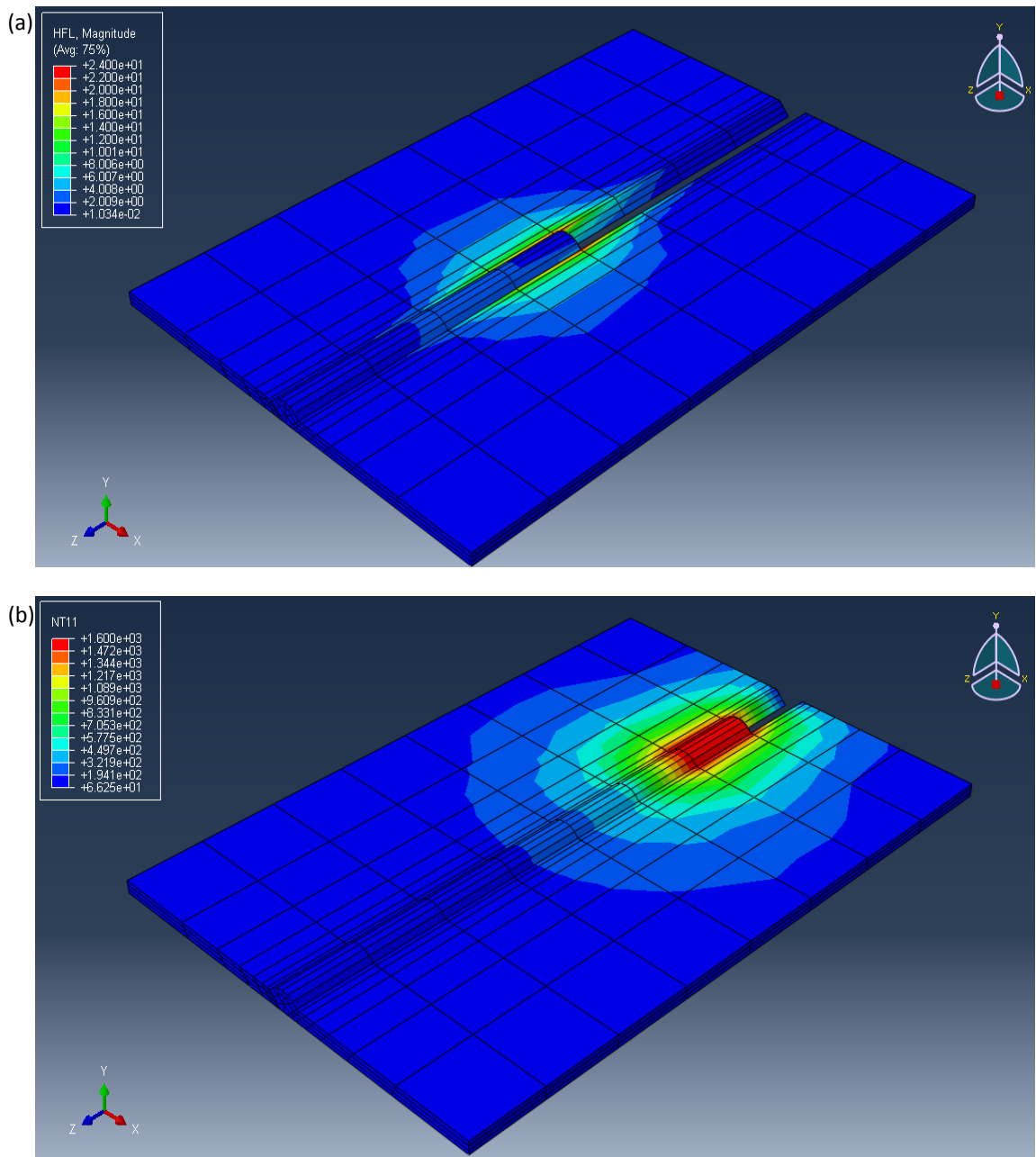


Fig. 3.10. Representación de resultados preliminares de análisis térmico en junta con placas de 50.8 mm de ancho: (a) Flujo de calor a un tiempo de 52 s de iniciado el proceso y (b) Temperaturas de la junta a un tiempo de 91 s de iniciado el proceso.

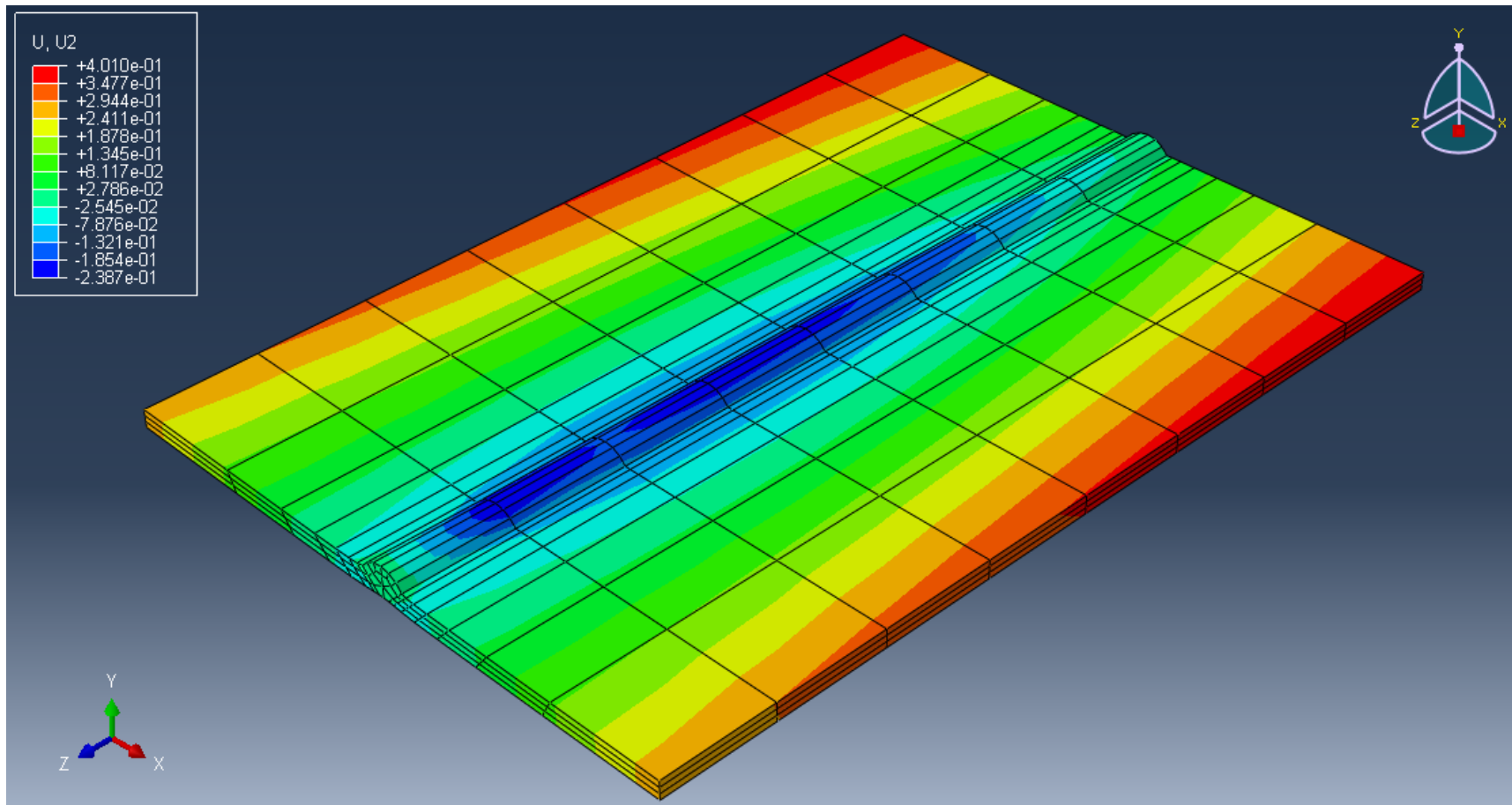


Fig. 3.11. Representación de resultados preliminares de deflexiones en la junta con placas de 50.8 mm de ancho, al finalizar el proceso de soldadura.

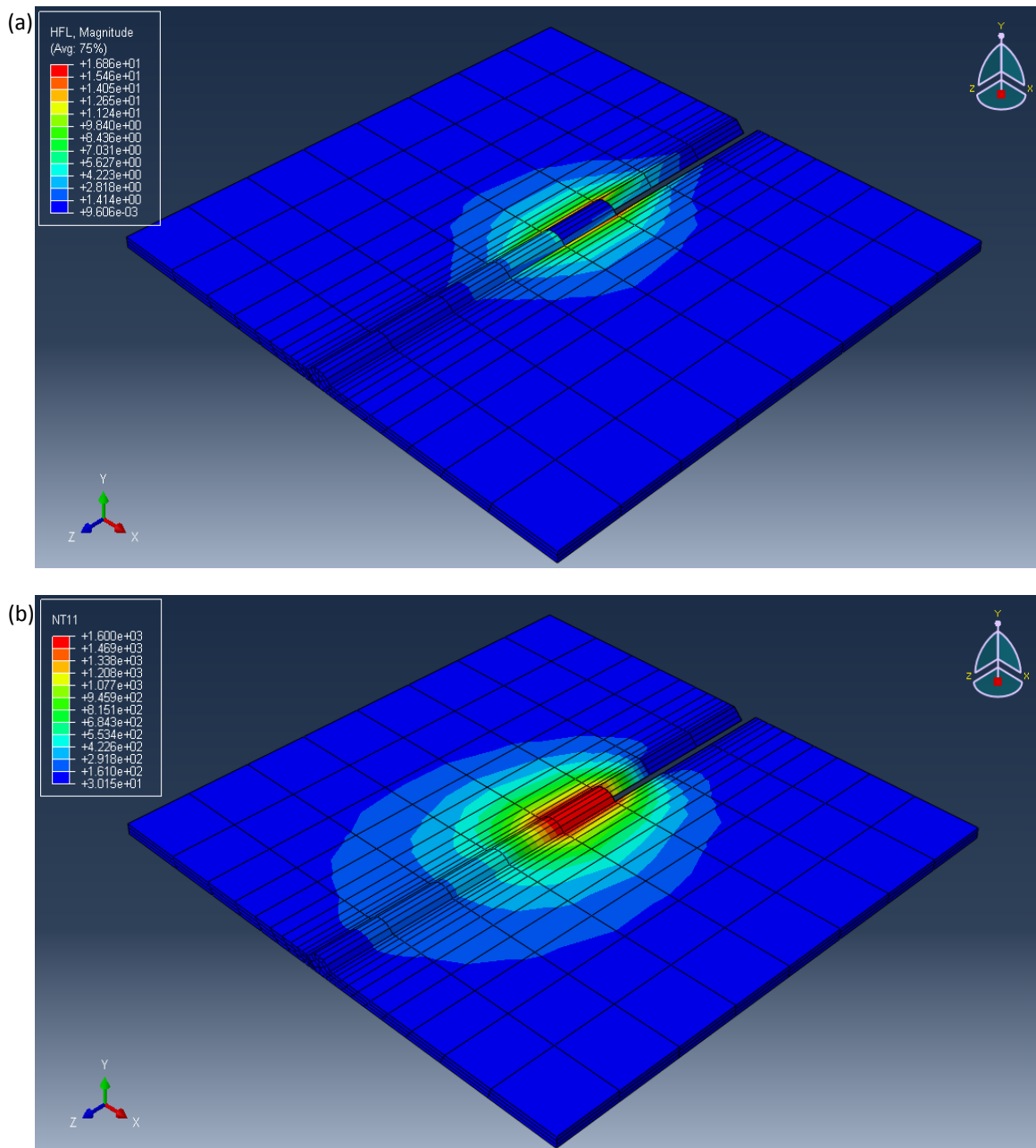


Fig. 3.12. Representación de resultados preliminares de análisis térmico en junta con placas de 76.2 mm de ancho: (a) Flujo de calor a un tiempo de 65 s de iniciado el proceso y (b) Temperaturas de la junta a un tiempo de 65 s de iniciado el proceso.

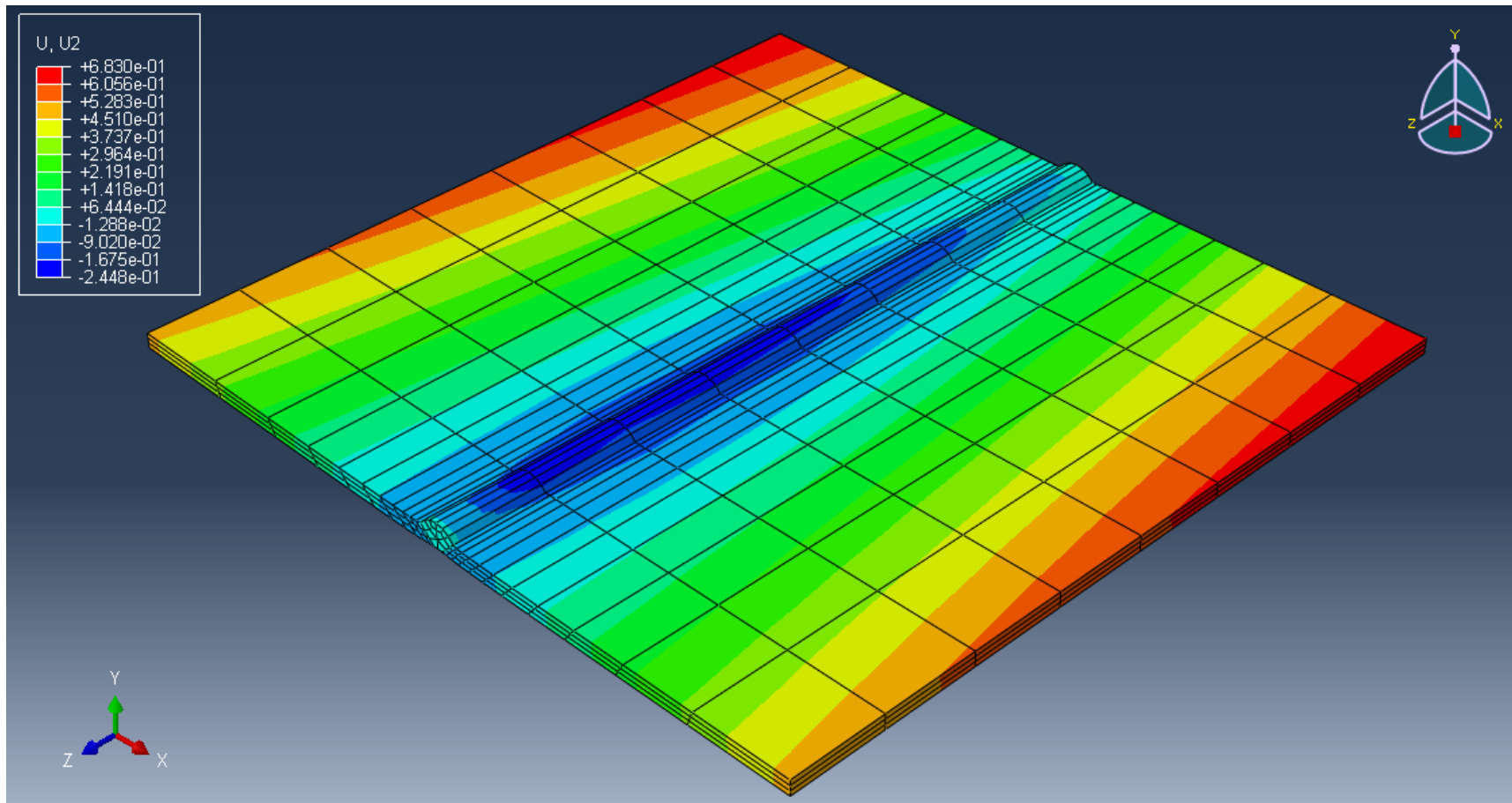


Fig. 3.13. Representación de resultados preliminares de deflexiones en la junta con placas de 76.2 mm de ancho, al finalizar el proceso de soldadura.

Luego que se han definido los parámetros de la simulación, tamaño de los mallados de elementos finitos, y las propiedades que se han introducido al software antes de la simulación. Luego, de realizar una presentación de resultados preliminares de ésta se presentan en el siguiente capítulo los resultados y análisis de resultados, especificando el tratamiento de los resultados de la simulación, y los resultados de las deflexiones medidas experimentalmente, así como los resultados del análisis metalográfico realizado para luego proceder con un análisis de dichos resultados.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Luego de realizada la simulación y presentar algunos resultados de la simulación en el capítulo anterior. En este capítulo se presenta el tratamiento de los resultados obtenidos de la simulación a nivel térmico y mecánico, así como los resultados obtenidos experimentalmente; se expone el método que se utilizó para medir la deflexión en las juntas soldadas y un análisis metalográfico elaborado a partir de fotomicrografías según se planteó en el capítulo dos, y a partir de lo anterior; se presenta un análisis de los resultados comparando los reportados por la simulación con las mediciones experimentales y la información teórica recopilada junto al estudio de casos.

4.1. TRATAMIENTO DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

A continuación se presentan el tratamiento de los resultados preliminares de la simulación de cada una de las juntas. En la Fig. 4.1 se presenta de manera esquemática la ubicación de líneas pertenecientes a las juntas sobre la malla de elementos finitos de cada junta soldada ubicadas en planos bidimensionales tanto en la superficie superior de la junta (líneas en color rojo), como en la superficie inferior de ésta (líneas en color amarillo) para la utilización de ellas durante el tratamiento de datos, presentando resultados tanto de

temperaturas como desplazamientos de algunos puntos ubicados sobre dichas líneas, para luego promediar los datos obtenidos y presentar curvas de perfiles térmicos y de desplazamientos promedios en los planos a los que pertenecen dichas líneas en la junta.

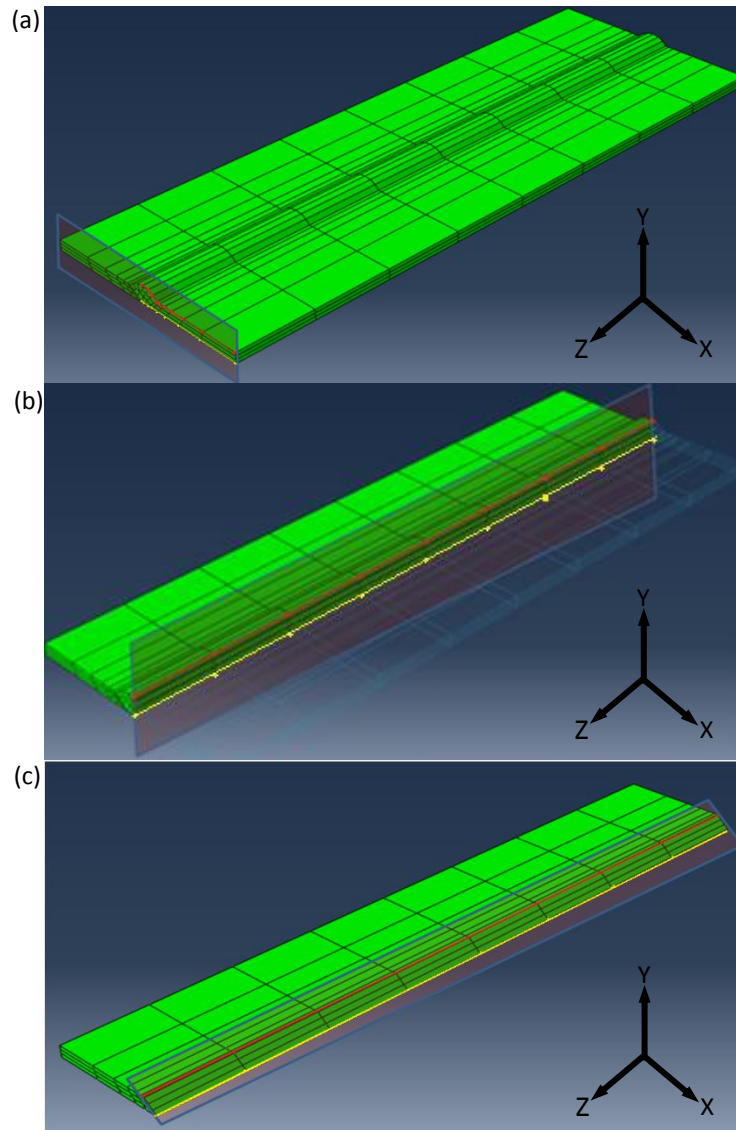


Fig. 4.1. Ubicación de líneas de análisis de la junta utilizadas para la presentación de resultados de la simulación: (a) Líneas de la superficie superior e inferior de la junta ubicados sobre Plano A perteneciente a la cara frontal de la junta, paralelas al plano XY, (b) Líneas de la superficie superior e inferior de la junta ubicados sobre Plano B, perteneciente al centro de la junta paralelas al plano YZ, y (c) Líneas de la superficie superior e inferior de la junta ubicados sobre Plano C, ubicadas en la línea de fusión a lo largo de la junta.

4.1.1. PERFILES DE TEMPERATURA

Se presenta a continuación datos de temperaturas reportados por Abaqus resultado de la simulación. En las Tablas 4.1 y 4.2 se presentan los datos de temperatura de la junta con placas de 25.4 mm de ancho sobre las líneas de análisis presentadas en la Fig. 4.1 en plano A y plano C respectivamente.

Tabla 4.1. Valores de temperaturas en la cara frontal de la junta con placas de 25.4 mm de ancho a 13s de iniciado el proceso de soldadura (plano A).

Distancia desde el centro de la junta, mm	Temperatura en línea superior de la junta, °C	Temperatura en línea inferior de la junta, °C	Temperatura Promedio, °C	Desviación Estándar, °C
0.00	1500.00	1499.12	1499.56	0.31
2.59	1462.14	1461.20	1461.67	0.33
4.78	1468.23	1358.24	1413.24	38.89
7.53	1170.91	1128.27	1149.59	15.08
10.28	764.42	908.57	836.50	50.97
13.02	626.75	752.71	689.73	44.54
18.52	514.61	520.16	517.38	1.96
21.27	465.83	467.54	466.69	0.60
24.01	417.05	414.93	415.99	0.75
26.40	368.26	362.31	365.29	2.11

Tabla 4.2. Valores de temperaturas en la línea de fusión de la junta con placas de 25.4 mm de ancho a 13s de iniciado el proceso de soldadura (plano C).

Distancia desde la cara frontal de la junta, mm	Temperatura en línea superior según plano C, °C	Temperatura en línea inferior según plano C, °C	Temperatura Promedio, °C
0.00	1500.00	1500.00	1500.00
18.95	1600.00	1600.00	1600.00
38.19	1600.00	1600.00	1600.00
57.31	118.39	118.39	118.39
76.34	82.88	82.88	82.88
95.38	29.90	29.90	29.90
114.40	29.36	29.36	29.36
133.42	28.94	28.94	28.94
152.40	27.20	27.20	27.20

En las Tablas 4.3 y 4.4 se presentan los datos de temperatura de la junta con placas de 50.8 mm de ancho sobre las líneas de análisis presentadas en la Fig. 4.1 en plano A y plano C respectivamente.

Tabla 4.3. Valores de temperaturas en la cara frontal de la junta con placas de 50.8 mm de ancho a 13s de iniciado el proceso de soldadura (plano A).

Distancia desde el centro de la junta, mm	Temperatura en línea superior de la junta, °C	Temperatura en línea inferior de la junta, °C	Temperatura Promedio, °C	Desviación Estándar, °C
0.00	1500.00	1500.00	1500	0.00
4.58	1364.20	1360.76	1362	1.22
9.85	930.10	916.20	923	4.91
15.13	602.30	600.90	602	0.49
20.41	365.92	362.38	364	1.25
25.68	246.25	241.79	244	1.58
30.96	135.10	128.30	132	2.40
36.24	97.08	100.871	99	1.34
41.51	80.41	81.8796	81	0.52
46.78	63.76	62.8885	63	0.31
51.80	47.10	43.8974	46	1.13

Tabla 4.4. Valores de temperaturas en la línea de fusión de la junta con placas de 50.8 mm de ancho a 13s de iniciado el proceso de soldadura (plano C).

Distancia desde la cara frontal de la junta, mm	Temperatura en línea superior según plano C, °C	Temperatura en línea inferior según plano C, °C	Temperatura Promedio, °C
0.00	1500.00	1500.00	1500.00
15.24	1600.00	1600.00	1600.00
30.48	682.28	682.28	682.28
45.72	58.25	58.25	58.25
60.96	57.76	57.76	57.76
76.20	40.62	40.62	40.62
91.44	27.60	27.60	27.60
106.68	27.43	27.43	27.43
121.92	26.87	26.87	26.87

En las Tablas 4.5 y 4.6 se presentan los datos de temperatura de la junta con placas de 25.4 mm de ancho sobre las líneas de análisis presentadas en la Fig. 4.1 en plano A y plano C respectivamente.

Tabla 4.5. Valores de temperaturas en la cara frontal de la junta con placas de 76.2 mm de ancho a 13s de iniciado el proceso de soldadura (plano A).

Distancia, mm	Temperatura en línea superior de la junta, °C	Temperatura en línea inferior de la junta, °C	Temperatura Promedio, °C	Desviación Estándar, °C
0.00	1500.00	1500.00	1500.00	0.00
2.92	1450.60	1442.40	1446.50	2.90
8.70	1054.47	1052.40	1053.44	0.73
14.96	702.30	700.45	701.38	0.65
21.23	450.40	448.10	449.25	0.81
24.36	332.10	329.45	330.77	0.94
27.49	225.60	220.10	222.85	1.94
33.76	180.50	178.40	179.45	0.74
36.89	130.10	128.50	129.30	0.57
40.02	90.42	88.40	89.41	0.71
43.15	71.30	70.83	71.06	0.17
46.29	50.91	57.64	71.06	2.38
49.42	45.92	46.13	54.27	1.69
52.55	40.93	34.62	43.53	1.84
58.82	32.14	31.59	33.38	0.88
65.08	30.85	30.91	31.22	0.26
68.21	30.21	30.23	30.56	0.25
71.35	29.56	29.55	29.89	0.23
74.48	28.92	28.87	29.23	0.22
77.61	28.28	27.50	28.57	0.21

Tabla 4.6. Valores de temperaturas en la línea de fusión de la junta con placas de 76.2 mm de ancho a 13s de iniciado el proceso de soldadura (plano C).

Distancia, mm	Temperatura en línea superior según plano C, °C	Temperatura en línea inferior según plano C, °C	Temperatura Promedio, °C
0.00	1500.00	1500.00	1500.00
19.13	1600.00	1600.00	1600.00
38.25	61.54	61.54	61.54
57.28	68.12	68.12	68.12
76.32	38.09	38.09	38.09
95.36	28.57	28.57	28.57
114.30	28.01	28.01	26.75
133.41	27.08	27.08	27.08
152.40	27.00	27.00	27.00

En la Fig. 4.2 y 4.3 se presentan las curvas de los perfiles térmicos en la cara frontal y en la línea de fusión a lo largo del eje Z de las tres juntas soldadas.

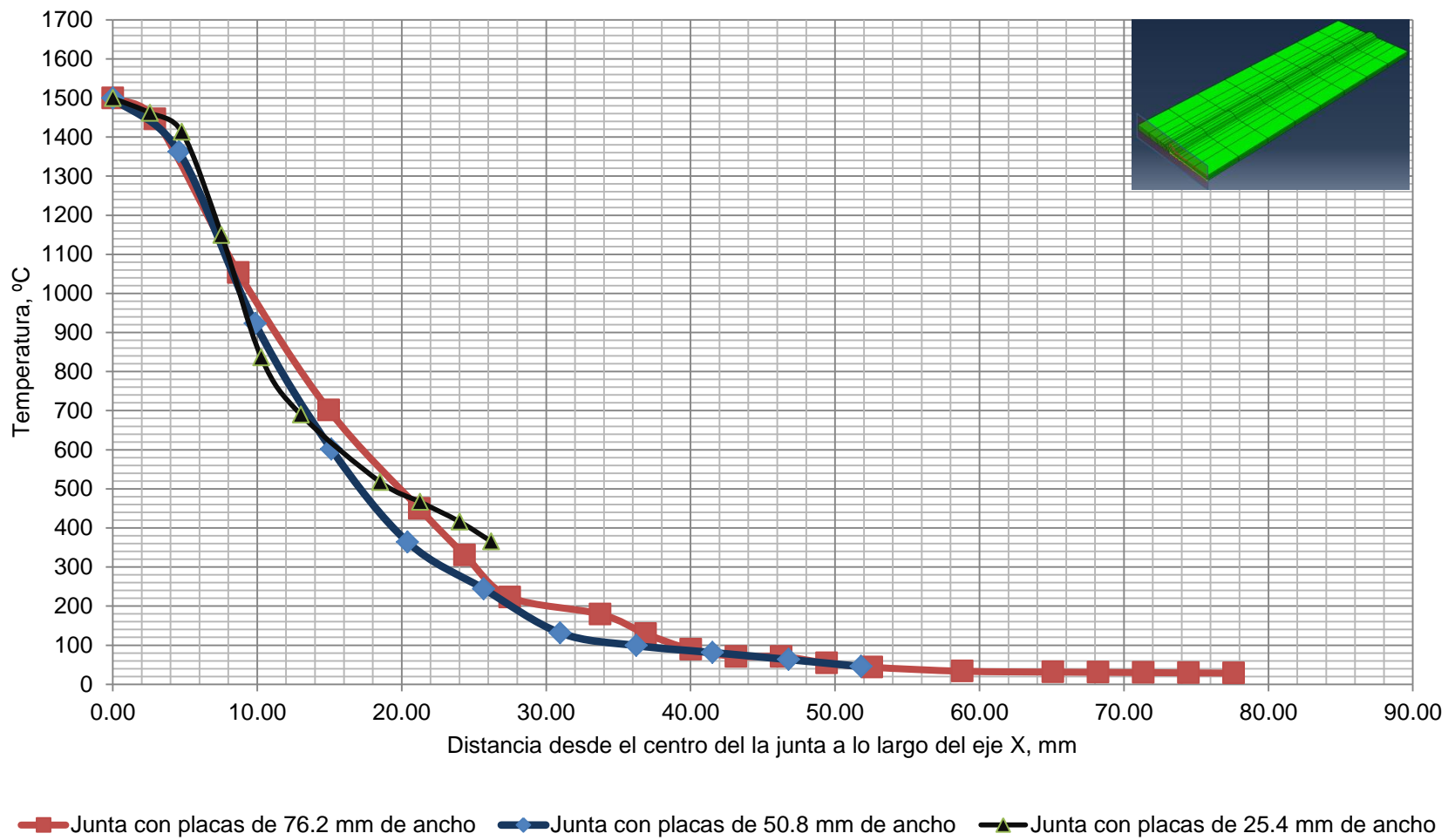


Fig. 4.2. Curvas de perfiles térmicos en la cara frontal de las juntas soldadas (Plano A), a 13s de iniciado el proceso de soldadura.

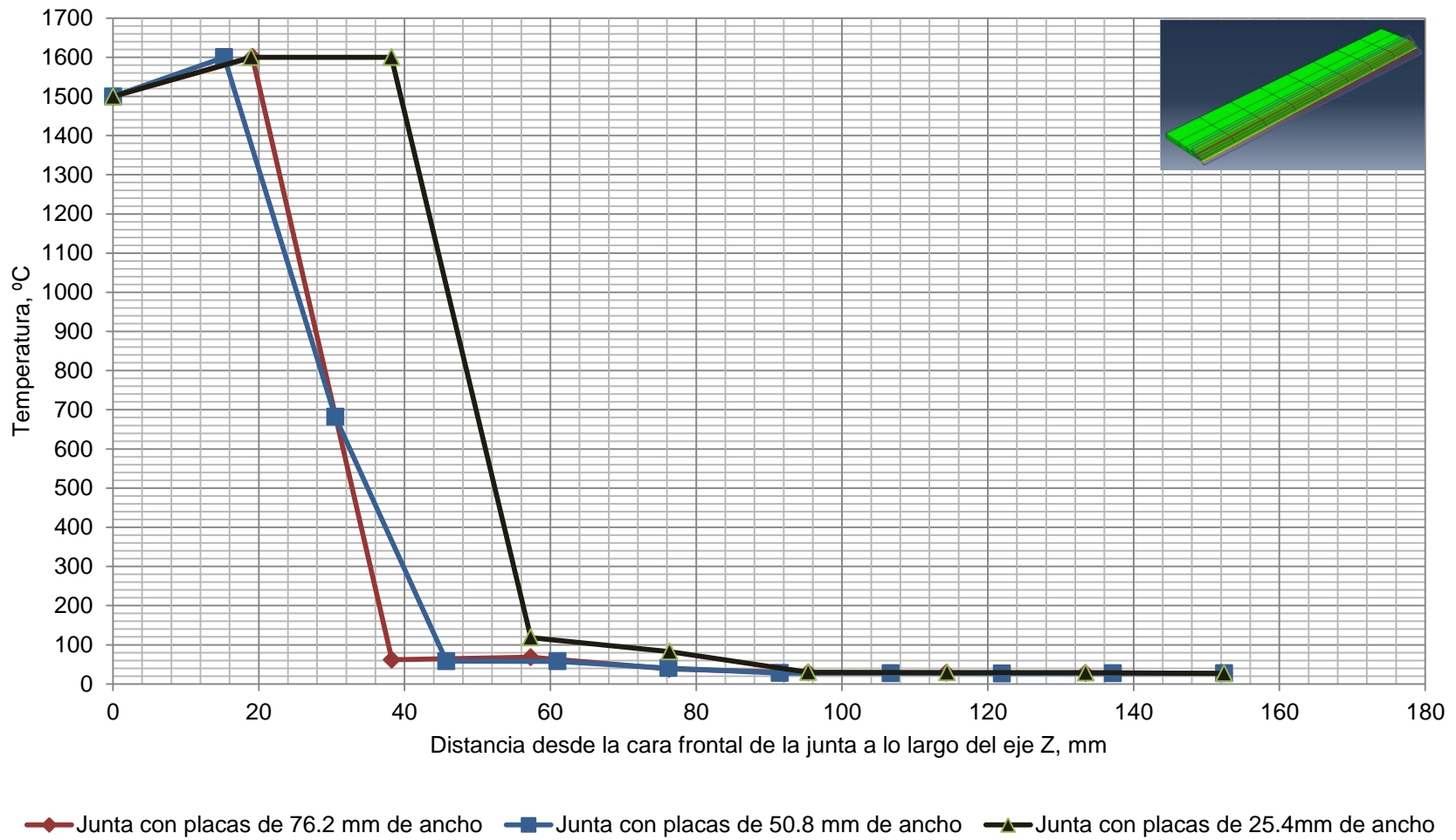


Fig. 4.3. Curvas de perfiles térmicos en la línea de fusión de las juntas soldadas a lo largo del eje Z (Plano C), a 13s de iniciado el proceso de soldadura.

4.1.2. DEFLEXIONES

Se presenta a continuación los datos resultados de la simulación de las deflexiones reportadas por Abaqus, las cuales para una mayor claridad se presentan en forma de los desplazamientos verticales que han sufrido los diferentes puntos de la junta finalizado el proceso de soldadura. En las Tablas 4.7 y 4.8 se presentan los datos de los desplazamientos existentes en la junta de la junta con placas de 25.4 mm de ancho sobre las líneas de análisis presentadas en la Fig. 4.1 en plano A y plano B respectivamente finalizado el proceso de soldadura.

Tabla 4.7. Valores de las deflexiones en la cara frontal de la junta (plano A). con placas de 25.4 mm de ancho finalizado el proceso de soldadura

Distancia desde la cara frontal de la junta, mm	Desplazamiento en línea superior de la junta, mm	Desplazamiento en línea inferior de la junta, mm	Desplazamiento promedio, mm	Desviación Estándar, mm
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.64	0.00	-0.04	-0.02	0.03
5.27	-0.01	-0.04	-0.03	0.02
7.91	-0.02	-0.02	-0.02	0.00
10.55	-0.01	-0.01	-0.01	0.00
13.19	0.00	0.00	0.00	0.00
15.83	0.02	0.02	0.02	0.00
18.47	0.04	0.04	0.04	0.00
21.11	0.07	0.07	0.07	0.00
23.75	0.09	0.09	0.09	0.00
26.40	0.12	0.12	0.12	0.00

Tabla 4.8. Valores de las deflexiones al centro de la junta (plano B) de la junta con placas de 25.4 mm de ancho finalizado el proceso de soldadura.

Distancia desde la cara frontal de la junta, mm	Desplazamiento en línea superior de la junta, mm	Desplazamiento en línea inferior de la junta, mm	Desplazamiento promedio, mm	Desviación Estándar, mm
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18.76	-0.14	-0.10	-0.12	0.03
37.76	-0.20	-0.15	-0.18	0.04
56.78	-0.29	-0.27	-0.28	0.01
75.81	-0.34	-0.32	-0.33	0.01
94.88	-0.21	-0.20	-0.21	0.01
113.96	-0.16	-0.11	-0.14	0.04
133.15	-0.08	-0.09	-0.08	0.01
152.40	0.00	0.00	0.00	0.00

En las Tablas 4.9 y 4.10 se presentan los datos de los desplazamientos en el eje Y, existentes en la junta de la junta con placas de 50.8 mm de ancho sobre las líneas de análisis presentadas en la Fig. 4.1 en plano A y plano B respectivamente finalizado el proceso de soldadura.

Tabla 4.9. Valores de las deflexiones en la cara frontal de la junta (plano A). con placas de 50.8 mm de ancho finalizado el proceso de soldadura

Distancia desde la cara frontal de la junta, mm	Desplazamiento en línea superior de la junta, mm	Desplazamiento en línea inferior de la junta, mm	Desplazamiento promedio, mm	Desviación Estándar, mm
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4.54	-0.01	-0.05	-0.03	0.02
9.78	-0.02	-0.02	-0.02	0.00
15.02	0.01	0.01	0.01	0.00
20.27	0.04	0.04	0.04	0.00
25.51	0.08	0.08	0.08	0.00
30.76	0.11	0.11	0.11	0.00
36.01	0.15	0.15	0.15	0.00
41.25	0.19	0.19	0.19	0.00
46.50	0.23	0.23	0.23	0.00
51.80	0.27	0.27	0.27	0.00

Tabla 4.10. Valores de las deflexiones al centro de la junta en el plano B, de la junta con placas de 50.8 mm de ancho finalizado el proceso de soldadura.

Distancia desde la cara frontal de la junta, mm	Desplazamiento en línea superior de la junta, mm	Desplazamiento en línea inferior de la junta, mm	Desplazamiento promedio, mm	Desviación Estándar, mm
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18.76	-0.12	-0.09	-0.11	0.02
37.76	-0.20	-0.15	-0.18	0.04
56.78	-0.24	-0.15	-0.19	0.06
75.81	-0.23	-0.16	-0.19	0.05
94.88	-0.21	-0.14	-0.18	0.05
113.96	-0.16	-0.11	-0.14	0.04
133.15	-0.08	-0.09	-0.08	0.01
152.40	0.00	0.00	0.00	0.00

En las Tablas 4.11 y 4.12 se presentan los datos de los desplazamientos existentes en la junta de la junta con placas de 25.4 mm de ancho sobre las líneas de análisis presentadas en la Fig. 4.1 en plano A y plano B respectivamente finalizado el proceso de soldadura.

Tabla 4.11. Valores de las deflexiones en la cara frontal de la junta (plano A). con placas de 76.2 mm de ancho finalizado el proceso de soldadura

Distancia desde la cara frontal de la junta, mm	Desplazamiento en línea superior de la junta, mm	Desplazamiento en línea inferior de la junta, mm	Desplazamiento promedio, mm	Desviación Estándar, mm
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.97	0.00	0.00	0.00	0.00
5.02	0.02	-0.05	-0.01	0.05
6.40	0.02	-0.06	-0.02	0.06
8.25	0.03	-0.05	-0.01	0.05
10.73	0.04	-0.03	0.01	0.04
14.05	0.05	0.00	0.03	0.03
18.51	0.08	0.04	0.06	0.03
24.50	0.11	0.09	0.10	0.02
32.55	0.15	0.14	0.15	0.01
43.38	0.21	0.20	0.21	0.01
57.96	0.22	0.22	0.22	0.00
77.20	0.23	0.24	0.24	0.01

Tabla 4.12. Valores de las deflexiones al centro de la junta (plano B) de la junta con placas de 76.2 mm de ancho finalizado el proceso de soldadura.

Distancia desde la cara frontal de la junta, mm	Desplazamiento en línea superior de la junta, mm	Desplazamiento en línea inferior de la junta, mm	Desplazamiento promedio, mm	Desviación Estándar, mm
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18.77	-0.10	-0.09	-0.09	0.01
37.78	-0.15	-0.12	-0.16	0.02
56.80	-0.20	-0.14	-0.17	0.04
75.82	-0.18	-0.15	-0.17	0.02
94.88	-0.14	-0.13	-0.14	0.01
113.94	-0.12	-0.08	-0.10	0.02
133.14	-0.05	-0.06	-0.05	0.00
152.40	0.00	0.00	0.00	0.00

En la Fig. 4.4 y 4.5 se presentan las curvas de los desplazamientos existentes en la cara frontal y en la línea de fusión a lo largo del eje Z de las tres juntas soldadas finalizado el proceso de soldadura.

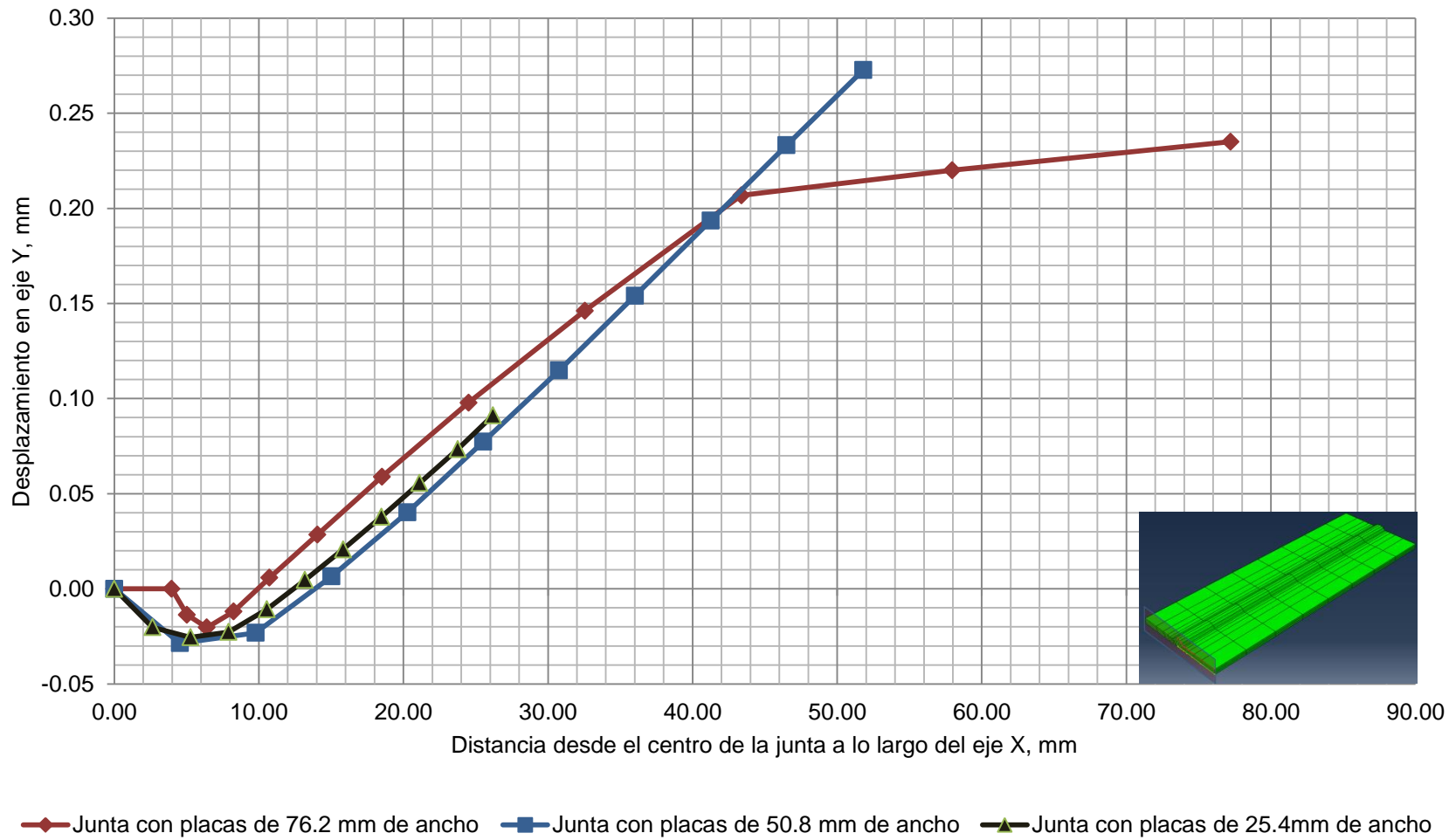


Fig. 4.4. Curvas de los desplazamientos promedio en la cara frontal de la junta (Plano A), finalizado el proceso de soldadura.

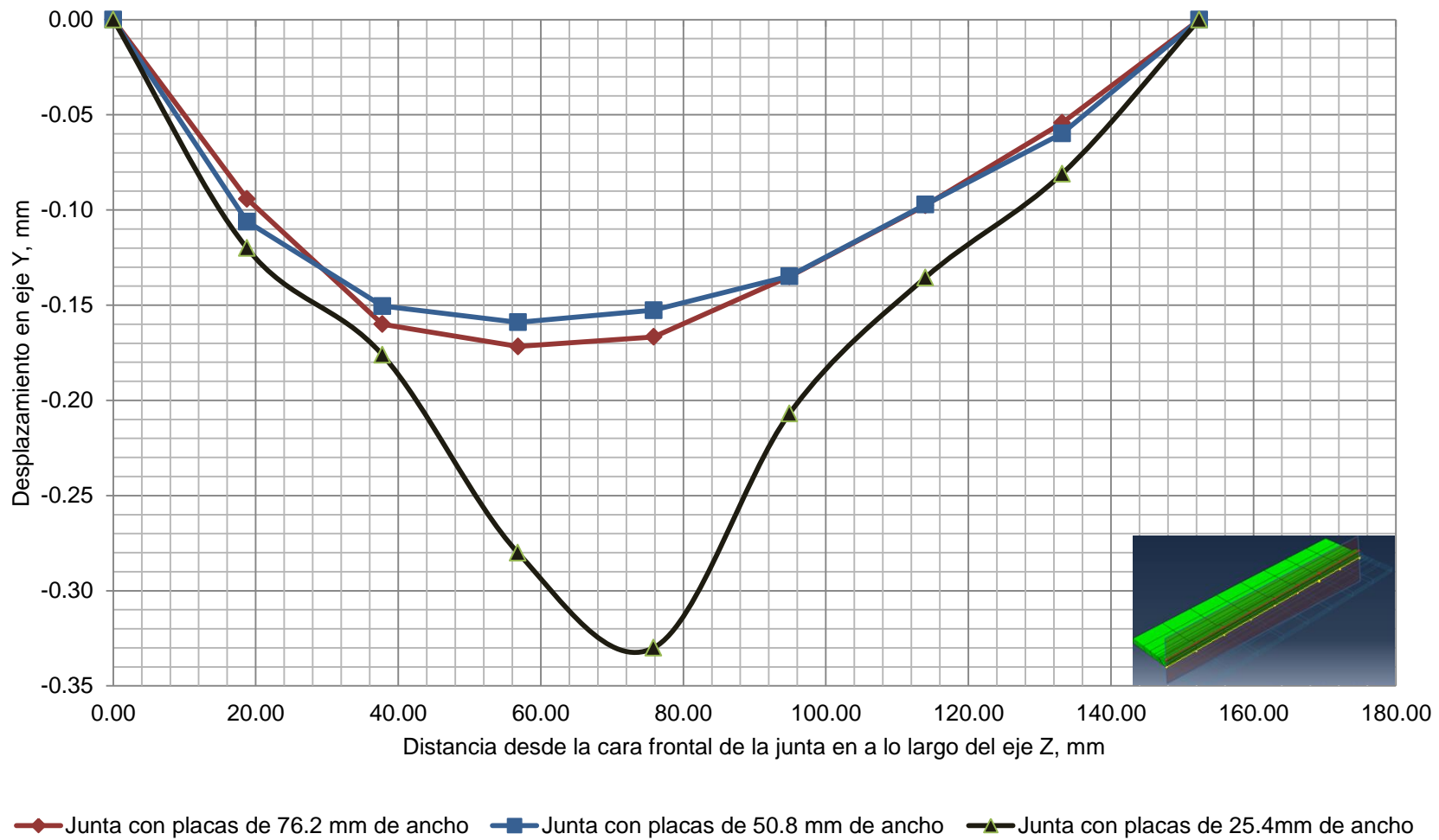


Fig. 4.5. Curvas de los desplazamientos promedio al centro del cordón de soldadura, a lo largo del eje Z (Plano B), finalizado el proceso de soldadura.

4.2. RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LAS DEFLEXIONES

A continuación se presentan los resultados que se obtuvieron al realizar las mediciones de las deflexiones de las juntas soldadas indicando los puntos donde se realizó la medición y explicando el método de medición utilizado. Para presentar uniformidad con los datos reportados de la simulación, se presentaran datos de desplazamientos verticales los cuales tienen dirección contraria a las deflexiones; así, la medición se realizó utilizando un calibrador vernier digital (ver Fig. 4.8), la medición del desplazamiento vertical en la esquina de la junta se realizó colocando ésta sobre dos placas planas de espesor conocido según se presenta en la Fig. 4.9, luego que se colocó, se midió la distancia X_f , y a esa distancia se le restó el espesor de las 3 placas planas sin soldadura, tal como se presenta en la ecuación 4.1. Se utilizó este método de medición debido a que los cordones de soldadura de las juntas sobresalían el plano inferior de las láminas, por tanto al utilizar este método se superaba este inconveniente sin que la lectura fuera modificada.



Fig. 4.6. Calibrador Vernier utilizado para realizar las mediciones utilizadas para determinar las deflexiones.

$$\delta = \frac{X_f - e}{2} \quad (4.1)$$

donde:

δ : Desplazamiento vertical, mm.

e : espesor de las 3 placas en conjunto, mm.

X_f : Distancia medida en la pieza para obtener el desplazamiento vertical, mm.

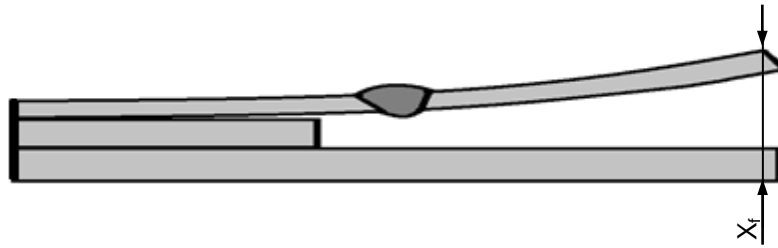


Fig. 4.7. Colocación de cada una de las juntas para medir las deflexiones en las esquinas.

El proceso de medición fue repetido para todas las juntas de los distintos anchos de placa; los resultados se presentan en las Tablas 4.13 – 4.15 en las cuales se presentan los valores de los desplazamientos verticales, tomando como punto de referencia el centro de la junta siendo el valor del desplazamiento vertical en ese punto cero.

Tabla 4.13. Valores de desplazamiento vertical en los extremos de cara frontal de cada una de las juntas de placas de 25.4 mm de ancho (plano A).

Junta	X_f , mm	Desplazamiento, mm	Promedio de los desplazamientos, mm	Desviación estándar, mm
Junta 1	9.40	0.245	0.292	0.05
Junta 2	9.48	0.285		
Junta 3	9.60	0.345		

Tabla 4.14. Valores de desplazamiento vertical en los extremos de cara frontal de cada una de las juntas de placas de 50.8 mm de ancho (plano A).

Junta	X_f , mm	Desplazamiento, mm	Promedio de los desplazamientos, mm	Desviación estándar, mm
Junta 1	9.13	0.11	0.15	0.03
Junta 2	9.25	0.17		
Junta 3	9.22	0.16		

Tabla 4.15. Valores de desplazamiento vertical en los extremos de cara frontal de cada una de las juntas de placas de 76.2 mm de ancho (plano A).

Junta	X_f , mm	Desplazamiento, mm	Promedio de los desplazamientos, mm	Desviación estándar, mm
Junta 1	7.46	-0.73	-0.68	0.05
Junta 2	7.54	-0.69		
Junta 3	7.65	-0.63		

Adicional a lo anterior, se calcularon los desplazamientos verticales a lo largo de las juntas soldadas a una distancia perpendicular a la cara frontal de la

junta de 76.2 mm. El proceso que se realizó fue primero colocar la junta sobre una placa plana de tal forma que una de las aristas laterales estuviera en contacto con ésta para medir la distancia Y_f según se presenta en la Fig. 4.10, luego para obtener el valor del desplazamiento vertical, se restó a la distancia Y_f el valor del espesor de ambas placas conjuntas. Los resultados se presentan en las Tablas 4.16 – 4.18 teniendo como referencia el valor del desplazamiento vertical en la cara frontal de la junta siendo éste de cero.

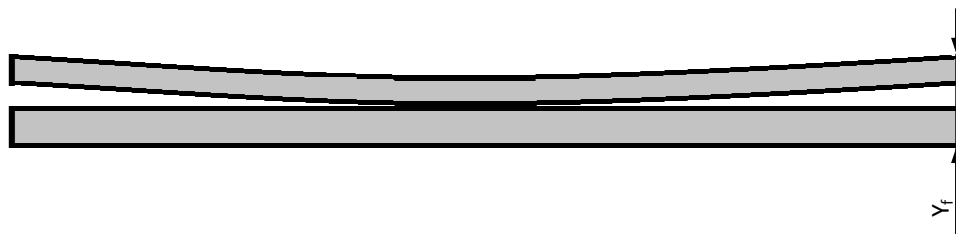


Fig. 4.8. Colocación de cada una de las juntas para medir las deflexiones a lo largo de la junta.

Tabla 4.16. Valores de deflexiones a 76.2 mm de distancia perpendicular a la cara frontal de la junta con placas de 25.4 mm de ancho (Plano B).

Junta	Y_f , mm	Desplazamiento, mm	Promedio de los desplazamientos, mm	Desviación estándar, mm
Junta 1	6.99	-1.05	-1.05	0.08
Junta 2	7.07	-1.13		
Junta 3	6.92	-0.98		

Tabla 4.17. Valores de deflexiones a 76.2 mm de distancia perpendicular a la cara frontal de la junta con placas de 50.8 mm de ancho (Plano B).

Junta	Y_f , mm	Desplazamiento, mm	Promedio de los desplazamientos, mm	Desviación estándar, mm
Junta 1	6.78	-0.84	-0.84	0.09
Junta 2	6.70	-0.76		
Junta 3	6.87	-0.93		

Tabla 4.18. Valores de deflexiones a 76.2 mm de distancia perpendicular a la cara frontal de la junta con placas de 50.8 mm de ancho (Plano B).

Junta	Y_f , mm	Desplazamiento, mm	Promedio de los desplazamientos, mm	Desviación estándar, mm
Junta 1	6.50	-0.56	-0.56	0.10
Junta 2	6.59	-0.65		
Junta 3	6.40	-0.46		

4.3. RESULTADOS DEL ANÁLISIS METALOGRÁFICO

A continuación se presentan las fotografías obtenidas a partir del estudio metalográfico que se realizó a una muestra obtenida de una de las juntas que se utilizaron durante la investigación para corroborar los resultados de la investigación identificando las zonas principales de la junta mediante los cambios de tamaño de grano. La muestra fue pulida hasta obtener un acabado tipo espejo y luego fue atacada con Nital. En la Fig. 4.9 se presenta la probeta que se preparó para realizar el estudio, de esa muestra, se observó en el microscopio óptico la junta que se encuentra en la parte superior, los materiales de la junta de hierro dulce y el cordón de soldadura. Así, durante la observación en el microscopio se visualizó primero la zona donde se estima esta la frontera entre el cordón de soldadura y el material base según se detalla en la Fig. 4.10 presentando fotomicrografías tomadas a un aumento de 100x y en la Fig. 4.11 se presentan diferentes fotomicrografías de algunos detalles con aumentos de 200 y 500x de la zona anterior y además se presenta la microestructura de la zona donde se estima se encuentra la frontera de la zona afectada por calor presentando fotomicrografías detallando la región con aumentos de 100, 200 y 500x; además, en la Fig. 4.12 se presenta un mosaico de las metalografías en su ubicación sobre la junta.



Fig. 4.9. Muestra metalográfica preparada para realizar el estudio.

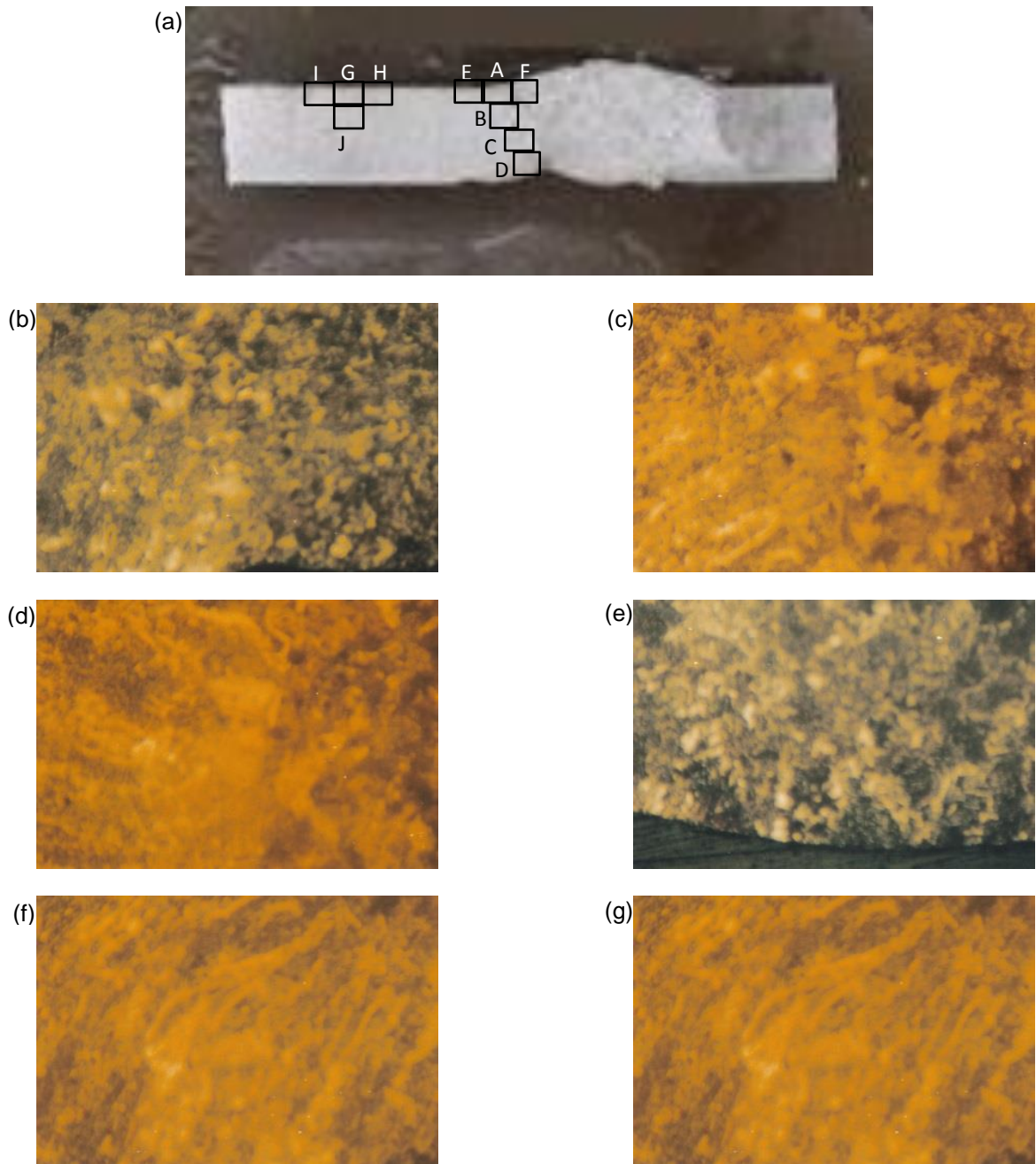


Fig. 4.10. Fotomicrografías Obtenidas de las regiones en la frontera del cordón de soldadura y el metal base de la junta: (a) Regiones a detallar de la junta soldada. (b) Detalle A, a 100X; (c) Detalle B, a 100x; (d) Detalle C, a 100x; (e) Detalle D, a 100x; (f) Detalle E, a 100x; y (g) Detalle F, a 100x.

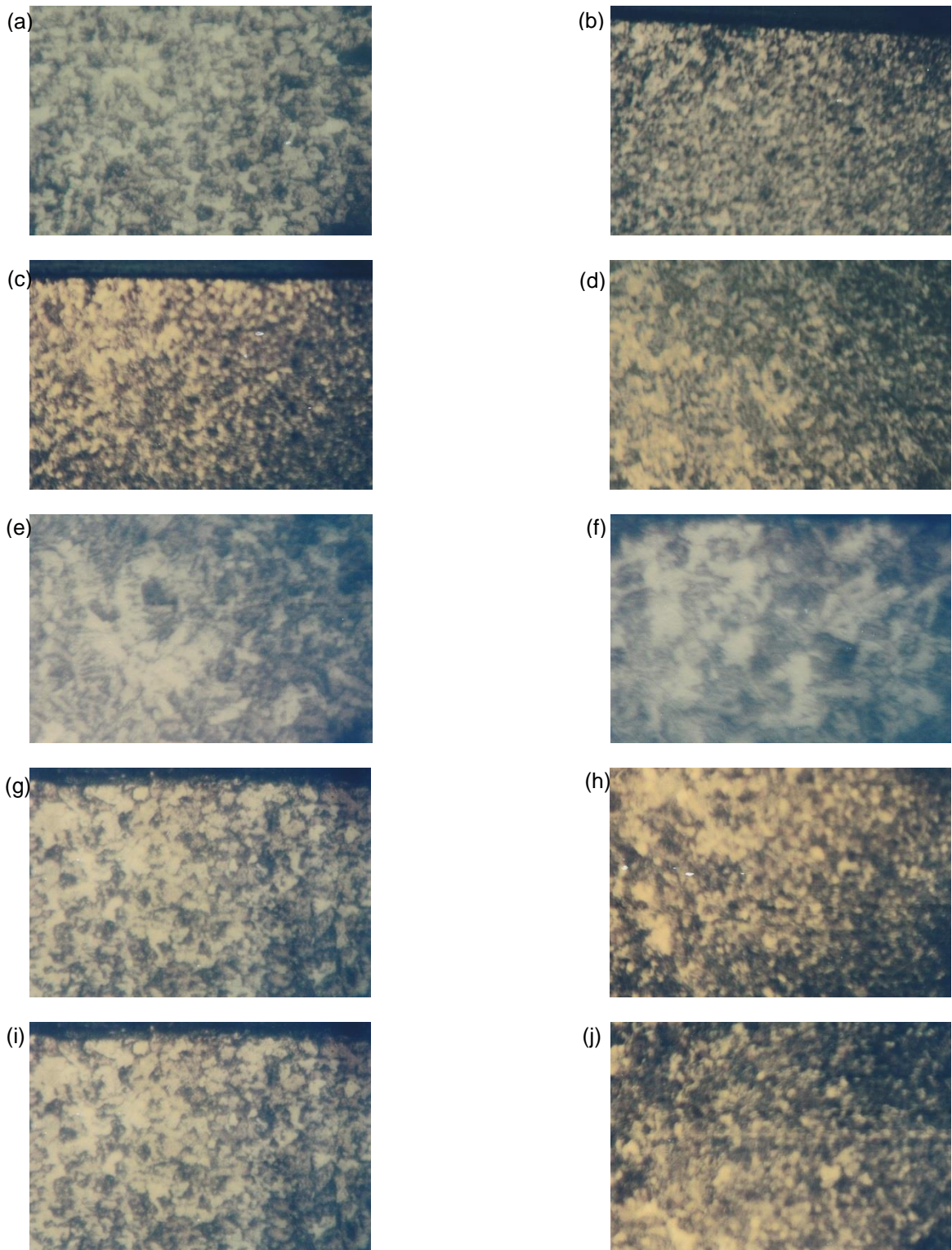


Fig. 4.11. Fotomicrografías Obtenidas de las regiones en la frontera del cordón de soldadura y el metal base de la junta: (a) Detalle E, a 500X; (b) Detalle E, a 200x; (c) Detalle G, a 100x; (d) Detalle G, a 200x; (e) Detalle G, a 500x; (f) Detalle H, a 500x; (g) Detalle I, a 500x; (h) Detalle J a 100x, (i) Detalle H, a 100x; y (j) Detalle I, a 100x.

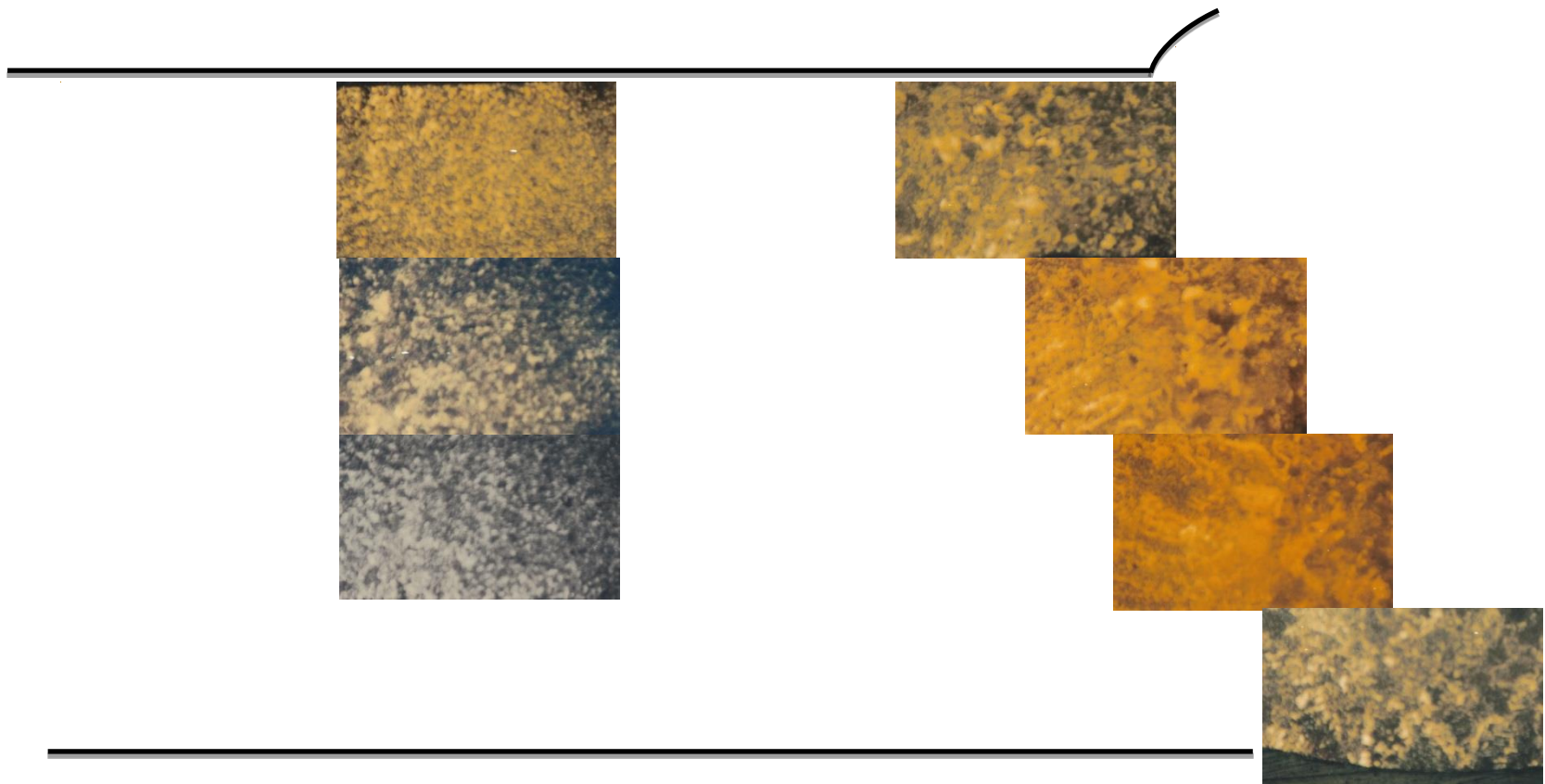


Fig. 4.12. Mosaico de fotomicrografías de las zonas de la junta observada en el microscopio óptico a 100x.

4.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados de la simulación y los experimentales se aproximan considerablemente siendo reportado por la simulación un desplazamiento vertical promedio máximo en la junta con placas de 25.4 mm de ancho igual a 0.12 mm en los extremos de la cara frontal de la junta y de 0.292 mm en promedio para las juntas fabricadas durante el experimento, observándose una diferencia de ~ 0.17 mm entre resultados; así mismo se reportó un desplazamiento máximo a lo largo de la junta de -0.33 mm en la simulación y de -1.05 mm en promedio de las juntas del experimento, observándose una diferencia de ~ 0.72 mm entre resultados.

En la junta con placas de 50.8 mm de ancho la simulación reportó un desplazamiento de 0.27 mm en promedio en los extremos de la cara frontal de la junta y un desplazamiento de 0.15 mm en promedio obtenido de las mediciones realizadas a la junta, existiendo una diferencia de ~ 0.12 mm entre resultados; así, también se reportó un desplazamiento máximo a lo largo de la junta de -0.19 mm en la simulación y de -0.84 mm en promedio de las juntas del experimento, observándose una diferencia de ~ 0.65 mm entre resultados.

En la junta con placas de 76.2 mm de ancho la simulación reportó un desplazamiento de 0.24 mm en promedio en los extremos de la cara frontal de la junta versus un desplazamiento de -0.68 mm en promedio obtenido de las mediciones realizadas a la junta, existiendo una diferencia de ~ 0.92 mm entre resultados; así, también se reportó un desplazamiento máximo a lo largo de la junta de -0.17 mm en la simulación y de -0.56 mm en promedio de las juntas del experimento, observándose una diferencia de ~ 0.39 mm entre resultados, siendo diferencias pequeñas entre los resultados de todas las placas comparadas a las dimensiones de la junta y además en la simulación se presentó un arqueado en la junta similar a la del caso de estudio de Berrio, Vanegas y Serna en el 2012 [16], ya que aunque si bien el modelo planteado por ellos fue bidimensional y no presento resultados concluyentes respecto a los valores de deflexión, al visualizar la simulación realizada en este trabajo de

graduación se verifica que la dirección en la deflexión que obtuvieron es en el mismo sentido.

Una de las causas por las que no se obtuvieron resultados con mayor grado de aproximación es que la versión del software utilizado para realizar la simulación es una versión estudiantil la cual para el caso, la malla de elementos finitos es limitada a un máximo de 1000 nodos y como consecuencia se tiene un menor número de datos con el que el programa realiza las iteraciones correspondientes del análisis matemático; otra causa que influyó a disminuir la exactitud de los datos reportados por la simulación pudo ser que durante la realización de las pruebas experimentales interviene la habilidad del soldador durante el proceso de soldadura ya sea por la altura del cordón de soldadura, la velocidad de soldadura no se mantiene constante, etc., condición que en la simulación no es posible considerar ya que si bien durante el análisis en el software se considera un porcentaje de rendimiento del proceso de soldadura, este trabaja con fuentes puntuales de temperatura desplazándose a lo largo de la junta cuando se va creando el cordón. Se constató que el software utiliza como punto máximo de temperatura la línea de fusión, lo cual en la realidad no es correcto ya que si bien la temperatura es elevada en ese sitio, el último punto donde el material solidifica es en la superficie del cordón, al centro de este; lo cual indica que en dicho lugar se encuentra la temperatura máxima al inicio del enfriamiento de la pieza.

Del análisis metalográfico se constata que a lo largo de la línea de fusión existe un cambio en la microestructura que se evidencia en la Fig. 4.12, donde se presenta un cambio en el tamaño de grano en el cordón de soldadura, siendo de mayor tamaño en la zona dentro de éste que en la ZAT, tal como se observa en la Fig. 1.2, lo que indica que durante el proceso de soldadura en el experimento, se alcanzaron temperaturas cercanas en ese punto a las expuestas en la Fig. 1.3. Otro detalle importante a destacar es que a medida se incrementa la distancia de la línea de fusión a un extremo de la junta, se observa un tamaño de grano menor presente en la ZAT, el cual al llegar a cierta distancia desde la línea de fusión, presenta un nuevo aumento en su tamaño

aunque en menor escala al tamaño de grano que se evidencia en el cordón de soldadura, por lo que se concluye que esta zona es la frontera entre la ZAT y el material base; esto constata los datos de las curvas de perfil térmico de la simulación ya que la temperatura cae a ciertos valores y como consecuencia existió menor o nulo crecimiento de grano, lo cual se observa en la Fig. 4.11 donde se tomaron fotomicrografías donde se estima se encuentra la frontera entre la ZAT y el metal base.

Luego de la presentación de los resultados tanto de la simulación como los experimentales; incluyendo el análisis metalográfico; y también de la presentación del análisis de resultados, a continuación se presentan las conclusiones y recomendaciones elaboradas a partir de la investigación.

CONCLUSIONES

Al finalizar el presente Trabajo de Graduación de Simulación de la deflexión en juntas soldadas por GMAW de un hierro dulce, utilizando la técnica de elementos finitos por medio de la utilización del software Abaqus/CAE, se puede concluir:

- 1) La simulación presentada se realizó exitosamente, mostrando un grado aceptable de aproximación con los datos obtenidos mediante las pruebas experimentales, existiendo pequeñas diferencias entre los valores de las deflexiones presentados por la simulación y los datos medidos de las juntas elaboradas durante la investigación.
- 2) Las temperaturas obtenidas mediante la simulación del proceso de soldadura utilizando Abaqus/CAE, fueron muy similares a las temperaturas que se pueden deducir tanto de la investigación realizada mediante el análisis metalográfico como también de la investigación teórica, se encuentran presentes en una junta durante la ejecución del proceso de soldadura; y además, la tendencia de las deflexiones que se obtuvo de la simulación versus los valores aproximados que se han medido de las juntas, y de los casos de estudio son muy similares.
- 3) La tendencia del arqueado presente en los resultados de la simulación, de las juntas soldadas con placas de 25.4 y 50.8 mm de ancho, comparada con el arqueado que presentaron las juntas soldadas experimentalmente de los mismos anchos de placa; exhibieron una misma tendencia, y aproximadamente el mismo valor, ya que en ambos casos se presentó un arqueado en forma de U en la cara frontal de las juntas y también se presentó esta tendencia a lo largo de las juntas, por tanto, se concluye que existe un alto grado de concordancia entre la simulación y el proceso real.

- 4) La tendencia del arqueo presente en los resultados de la simulación de las juntas soldadas con placas de 76.2 mm de ancho, en comparación con la tendencia del arqueo que presentaron las juntas soldadas experimentalmente, difirieron un poco, ya que para el caso de los resultados de la simulación se presentó un arqueo en forma de U en la cara frontal de las juntas, y en las juntas del experimento se presentó una tendencia de pandeo en forma de U invertida; probablemente debido al efecto del peso de las placas del experimento el cual es mayor en comparación a las juntas con placas de 25.4 y 50.8 mm de ancho lo cual se estima que generó una especie de brida en los extremos de la junta y como consecuencia se desvió la tendencia del arqueo de las juntas del experimento en la cara frontal. En cuanto a la tendencia de arqueo a lo largo de la junta, tanto los resultados de la simulación como los experimentales, reportaron un arqueo en forma de U. Por lo tanto, se concluye que si bien el grado de concordancia entre la simulación y el proceso real no es completo, los resultados tienen a presentar una buena aproximación.
- 5) La utilización de una versión estudiantil de Abaqus/CAE, si bien limitó en cierta manera los resultados de la simulación debido a las restricciones impuestas por el fabricante del sobre todo en el tamaño del mallado de la junta, fue de gran utilidad obteniéndose una primera aproximación a los valores de deflexiones y la tendencia de pandeo de una junta soldada muy confiable.

RECOMENDACIONES

Al finalizar el trabajo de graduación se elabora un listado de recomendaciones que se enlistan a continuación:

- 1) Verificar los resultados obtenidos utilizando software profesional con el fin de obtener el nivel de desviación de estos resultados debido a las limitantes del software estudiantil y, así, poder continuar utilizando versiones estudiantiles con el fin de aportar al proceso de aprendizaje de los estudiantes.
- 2) Antes de desarrollar la guía de laboratorio de simulación de deflexiones en juntas soldadas, verificar que las PC donde será instalado el software cumpla con los requisitos mínimos de utilización del programa para evitar errores durante la realización del análisis.
- 3) Con el fin de evitar resultados erróneos durante una simulación, para la utilización de la guía de laboratorio de simulación de deflexiones en juntas soldadas se debe verificar que la persona que la utilizará tenga conocimiento de lo que son procesos de soldadura y las características de estos ya que el software no reconoce si los datos ingresados a éste durante la simulación son válidos, ya que el software únicamente realiza el procesamiento de los datos y si se ingresa algún dato de entrada erróneo, el presentará resultados erróneos al finalizar la simulación.
- 4) Durante un proceso de simulación, utilizar mallados lo más simétricos y pequeños que el software permita usar durante los análisis, ya que de esta manera se aumenta el grado de precisión de resultados; ya que el software poseerá una mayor cantidad de datos y al ser simétrica la pieza, existirá un grado de uniformidad de los datos más adecuado durante la solución de los análisis térmico y mecánico.

- 5) Durante el tratamiento de datos, verificar que los puntos de la malla de los cuales se extraen los datos, sean de regiones donde la malla es lo más uniforme posible; además en un mismo plano de los elementos, crear diversos grupos de nodos de la malla para luego promediar resultados entre éstos y de esta manera, obtener resultados más precisos.

REFERENCIAS

- [1] Horwitz Henry (2008). *Soldadura: Aplicaciones y Practica*. Colombia. Bogotá. Editorial Alfa Omega. 1ra Edición, Sexta Reimpresión.
- [2] Velas Ramón (2012). *Tecnología de la Construcción Naval I*. Universidad Tecnológica del Perú. Perú.
- [3] Oygasa. *Manual del soldador*. El Salvador. San salvador. Distribuido por Infra de El Salvador. Recuperado de: <http://www.oygasa.com/attachments/article/45/manual%20del%20soldador.pdf> en 2014.
- [4] Reina, Manuel (2003). *Soldadura de los Aceros: Aplicaciones*. España, Madrid. Editado por WELD-WORK, S. L. 4ta Edición.
- [5] Timings R. (1985). *Tecnología de la Fabricación*. México. México D.F. Representaciones y servicios de ingeniería. Primera edición en español.
- [6] Budynas, Richard G. (2008). *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*. México. México D.F. Editorial McGraw Hill. Octava Edición.
- [7] Holman, J. P. (1999). *Transferencia de Calor*. México, México D.F. Editorial McGraw Hill. Octava Edición, Primera Edición en Español.
- [8] Kou Sindo (2002). *Welding Metallurgy*. EE. UU. New Jersey. Publicado por John Wiley & Sons, Inc. Segunda Edición.
- [9] Hibbeler, R.C (2006). *Mecánica de materiales*. México, Ciudad de México. Editorial Prentice Hall. 6ta Edición.
- [10] Kalpakjian, Serope (2002). *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*. México. México D. F. Editorial Pearson Educación. Primera Edición en Español.
- [11] Ciarlet P. (1978). *The Finite Element Method for Elliptic Problems*. Holanda, Ámsterdam.
- [12] Calister, William (1995). *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*. España, Barcelona. Editorial Reverte S.A. 3era Edición.
- [13] Uzcátegui, Maylett (2007). *Abaqus Programa de Elementos Finitos*. Venezuela, Mérida.

- [14] Bullón C., Acosta S., Franco R., y Valverde G (2007). Simulación de un proceso de soldadura mediante un modelo termo - mecánico considerando el efecto de esfuerzos residuales utilizando el método de los elementos finitos. Cusco, Perú. Realizado durante 8^{vo} Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica en Cusco, 23 al 25 de octubre de 2007.
- [15] Matus C. (2005) *Determinación de esfuerzos residuales en la soldadura GMAW de planchas de 6 mm de espesor de acero ASTM A-131-82-B*. Universidad de Concepción. Chile.
- [16] Berrio M., Vanegas N., y Serna P (2012). Evaluación de las distorsiones de contracción lateral de uniones soldadas a tope. *Revista Colombiana de Materiales* N. 3, Colombia, pp 25 – 41.

ANEXOS

ANEXO A: GUÍA DE INSTALACIÓN DE ABAQUS/CAE 6.12 STUDENT EDITION Y PLUGIN ABAQUS WELDING INTERFACE



**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
DEPTO. DE MATERIALES Y PROCESOS DE FABRICACIÓN
ASIGNATURA:**

GUÍA DE INSTALACIÓN DE ABAQUS/CAE 6.12 STUDENT EDITION Y PLUGIN ABAQUS WELDING INTERFACE

INTRODUCCIÓN

El software Abaqus/CAE dedicado a la simulación, realiza la misma mediante el Método de Elementos Finitos. A continuación se presenta una Guía de Instalación del Software.

I. INSTALACIÓN DE ABAQUS/CAE

A continuación se presentan los pasos para realizar la instalación de Abaqus/CAE 6.12 *Student Edition*:

- 1) Registrarse y descargar Abaqus/CAE 6.12 *Student Edition* del sitio web de *Simulia Academics* (<http://academy.3ds.com/software/simulia/abaqus-student-edition/>), verificando antes de la descarga si la versión del Windows instalado en la PC es de 32 o 64 bits.
- 2) Una vez descargado, dar doble clic en el archivo *Abaqus_6.12-2SE_win86_64.exe* como se presenta en la Fig. A1.

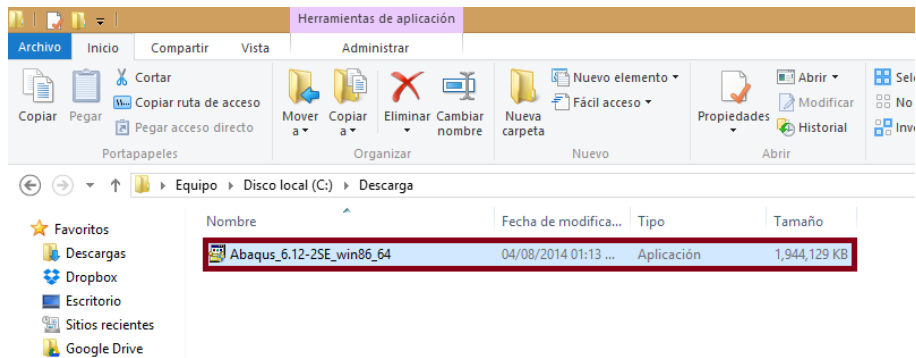


Fig. A1. Instalador de Abaqus/CAE 6.12 Student Edition.

3) En la ventana que se presenta dar clic en *Yes* según la Fig. A2.

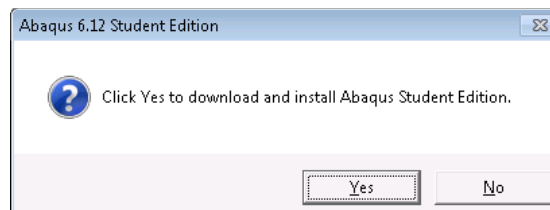


Fig. A2. Inicio de la instalación de Abaqus/CAE

4) Se presentarán dos ventanas sucesivamente, indicando el porcentaje de extracción de los archivos de Abaqus/CAE y de inicio del instalador respectivamente. Según la Fig. A3.

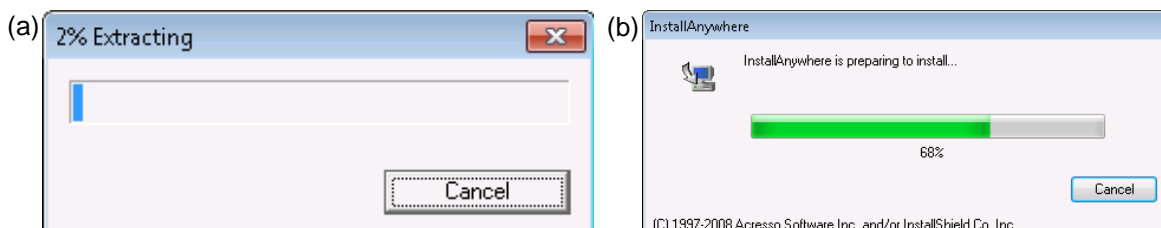


Fig. A3. Componentes de instalación de Abaqus/CAE: (a) Extracción de los archivos del instalador y, (b) Inicio del instalador de Abaqus/CAE.

5) En la ventana que se despliega, leer los términos de la licencia; luego dar clic en *I accept the terms of the Licence Agreement* y para finalizar, dar clic en *next* según se presenta en la Fig. A4.



Fig. A4. Ventana de términos de la licencia de Abaqus/CAE.

- 6) En la ventana que aparece, leer la información y luego dar clic en *next*, según se presenta en la Fig. A5.

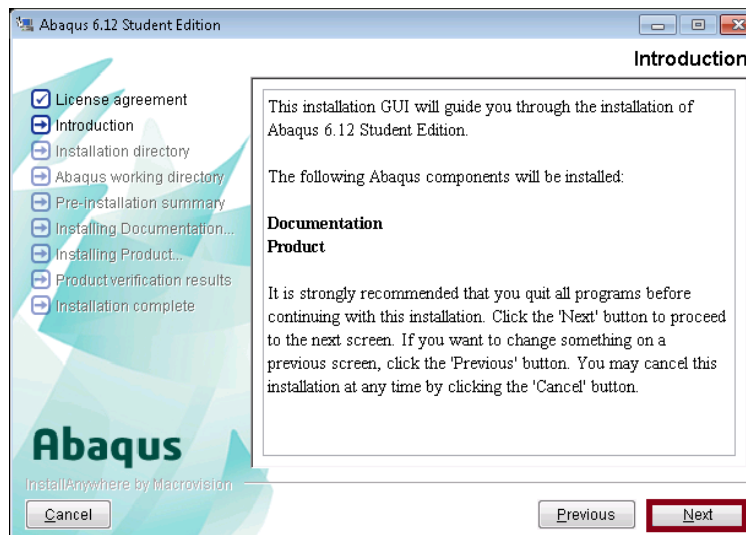


Fig. A5. Información de la documentación de Abaqus/CAE

- 7) En la ventana que se presenta dar clic en *next*, verificando previamente que en el campo *Please choose the Abaqus parent directory* se encuentre la dirección C:\SIMULIA según la Fig. A6.

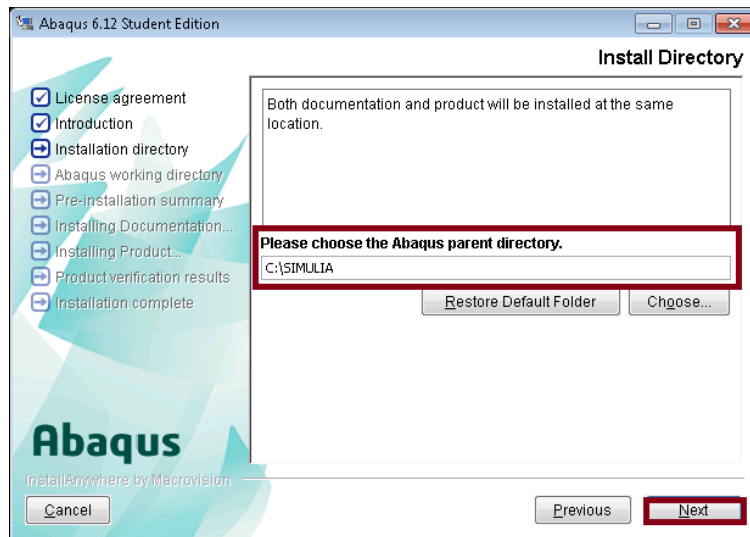


Fig. A6. Selección de la carpeta donde será instalado Abaqus/CAE

- 8) En la ventana que se despliega en pantalla, verificar que en el campo *Directory* se encuentre escrita la dirección C:\Users, según la Fig. A7

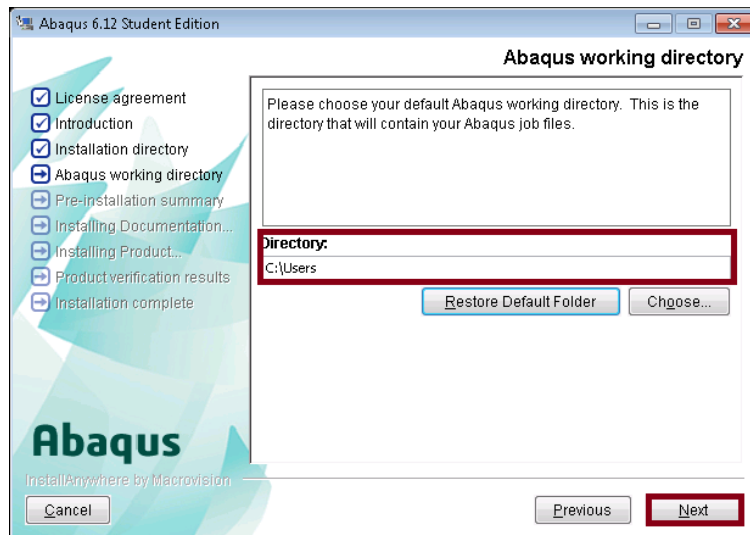


Fig. A7. Selección del directorio de los archivos temporales de Abaqus/CAE.

- 9) En la ventana que se presenta, dar clic en *Install*, según la Fig. A8, luego se presentarán las ventanas del progreso de instalación de cada uno de los componentes Abaqus/CAE según se presenta en la Fig. A9.

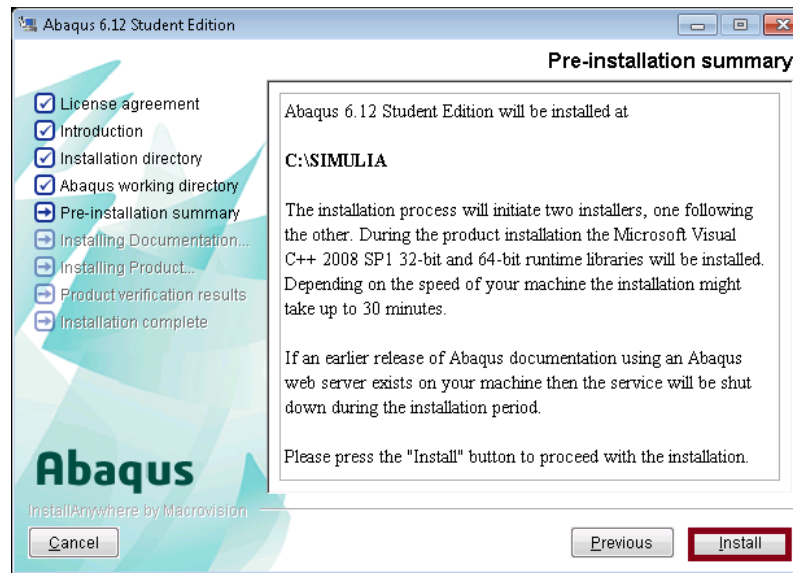


Fig. A8. Ventana de preinstalación de Abaqus/CAE.

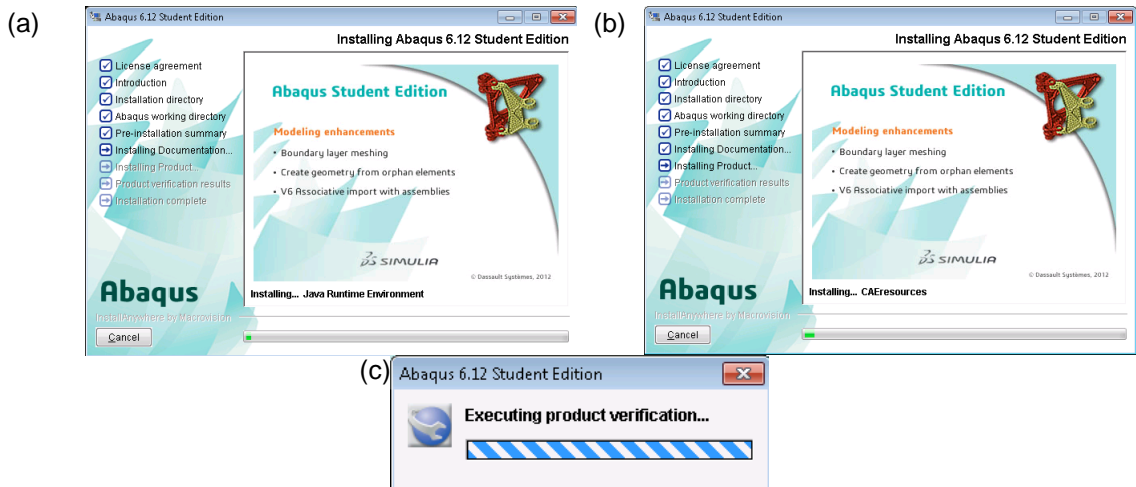


Fig. A9. Ventanas de progreso de la instalación de Abaqus/CAE: (a) Instalación de Java Runtime Environment, (b) Ventana de Instalación de recursos de Abaqus/CAE y, (c) Ventana de verificación del producto.

- 10) En la ventana que se despliega, verificar que todos los layer componentes se encuentren instalados correctamente, y luego dar clic en *next* según se presenta en la Fig. A10.

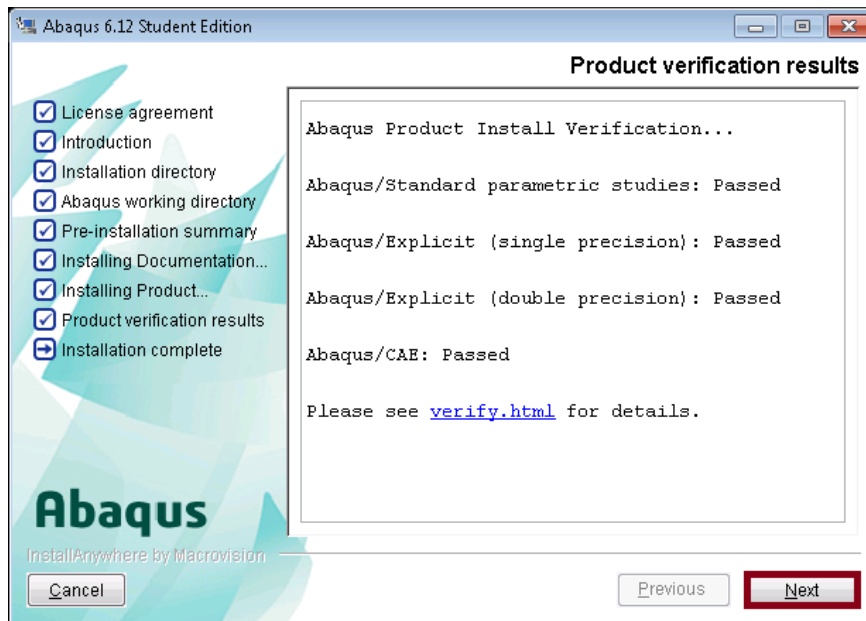


Fig. A10. Ventana de verificación de los componentes de Abaqus/CAE instalados.

- 11) En la ventana que se despliega, dar clic en *Done* según se presenta en la Fig. A11, para finalizar el proceso de instalación de Abaqus/CAE.

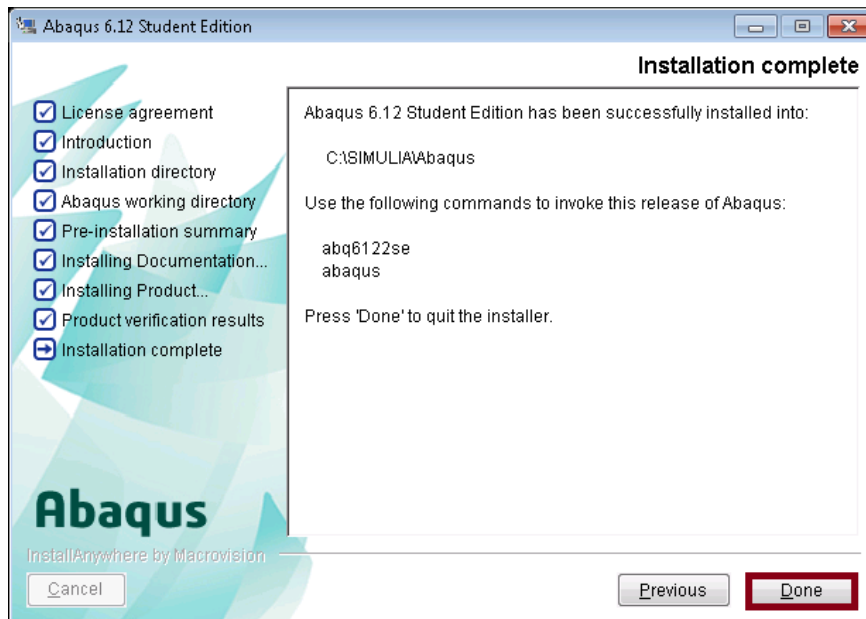


Fig. A11. Ventana de verificación de los componentes de Abaqus/CAE instalados.

II. INSTALACIÓN DEL PLUGIN ABAQUS WELDING INTERFACE

A continuación se presentan los pasos a seguir para realizar la instalación del Plugin *AWI* en *Abaqus/CAE 6.12 Student Edition*

- 1) Copiar la Carpeta *AWI*, en el directorio `C:\SIMULIA\Abaqus\6.12-2SE\code\python\lib\abaqus_plugins` según se presenta en la Fig. A12.

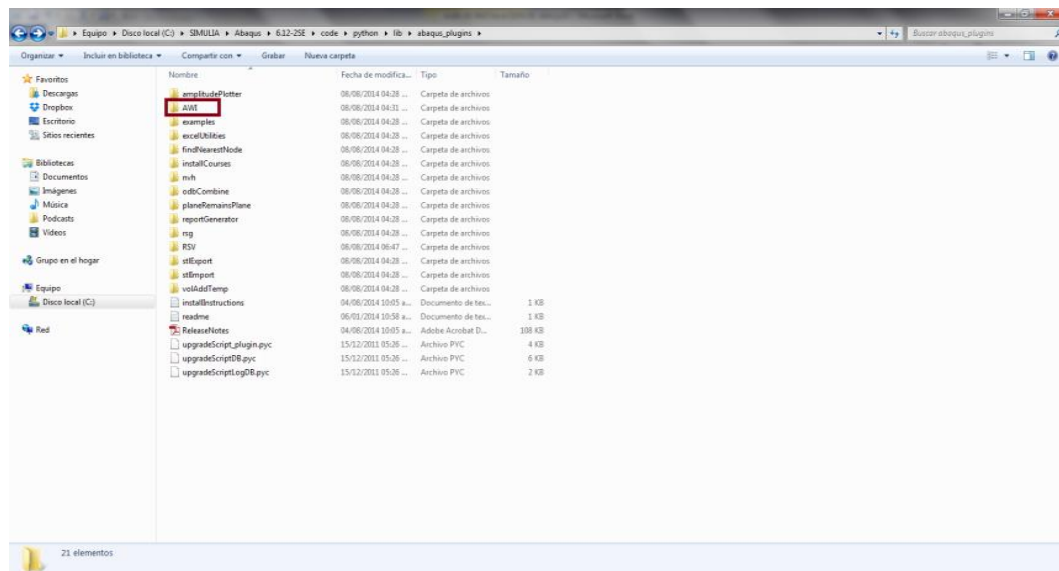


Fig. A12. Dirección del disco duro, dónde se debe copiar la carpeta *AWI*.

- 2) Luego que la carpeta se encuentre en el directorio mencionado en el paso anterior, el *Plugin* se encontrará instalado correctamente.

REFERENCIAS

- Abaqus Student Edition Instalation Guide, Obtenido de: <https://software.3ds.com/StudentEdition/>
- Instalador de software *Abaqus/CAE 6.12 Student Edition*.

ANEXO B: GUÍA DE LABORATORIO: SIMULACIÓN DE LA DEFLEXIÓN EN
JUNTAS SOLDADAS UTILIZANDO ABAQUS/CAE



**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
DEPTO. DE MATERIALES Y PROCESOS DE FABRICACIÓN
ASIGNATURA:**

GUÍA DE LABORATORIO: SIMULACIÓN DE LA DEFLEXIÓN EN JUNTAS SOLDADAS UTILIZANDO ABAQUS/CAE

INTRODUCCIÓN

El software Abaqus/CAE está dedicado a la simulación, para la cual aplica el método de elementos finitos en la realización de los cálculos estructurales estáticos y dinámicos lineales y no lineales. Además, Abaqus en sus funciones posee una extensión mediante la cual permite realizar el análisis y simulación de juntas soldadas mediante el Plugin *Abaqus Welding Interface* (AWI), el cual permite calcular y simular de manera aproximada el comportamiento de una junta soldada de cualquier geometría que el usuario ingrese en cuanto a esfuerzos, deflexiones, temperaturas y flujo de calor en la junta soldada. A continuación se presentan los pasos necesarios para realizar un proceso de la simulación de las deflexiones en juntas soldada.

Nota: El tiempo estimado para desarrollar la práctica de laboratorio es de aproximadamente 6 horas.

I. ELABORACIÓN DE UN NUEVO PROYECTO

En este apartado se presentan los pasos para poder dar inicio a un nuevo proyecto de simulación en Abaqus/CAE. Estos son:

- 1) Al abrir el software Abaqus/CAE, se desplegará una pantalla, tal como la que se presenta en la Fig. B1.
- 2) En la ventana *Start Session* (iniciar sesión) dar clic en *With Standard/Explicit Model* según se presenta en la Fig. B2, esto creará un nuevo modelo en Abaqus/CAE.

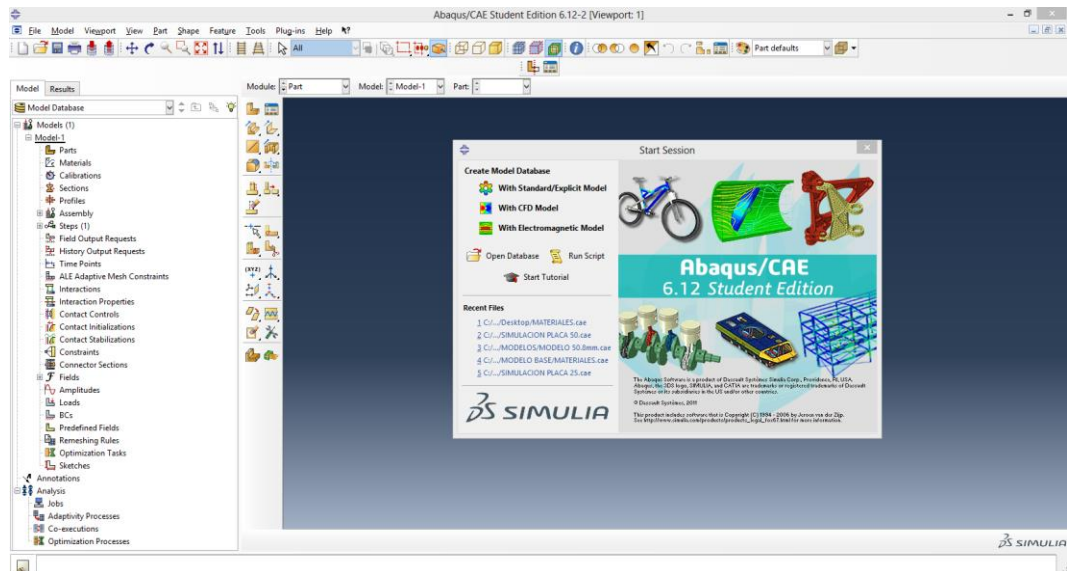


Fig. B1. Pantalla principal de Abaqus/CAE.

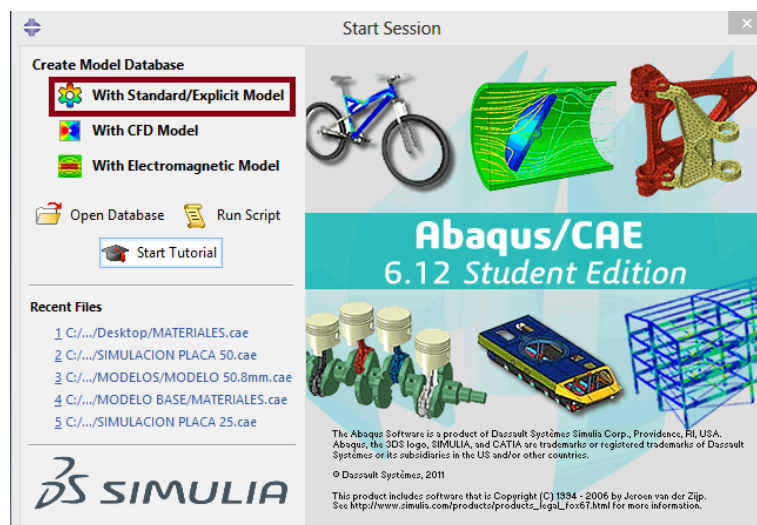


Fig. B2. Ventana de inicio de sesión de Abaqus/CAE,

II. IMPORTAR UN ELEMENTO GEOMÉTRICO

A continuación se presentan los pasos para realizar la importación de un modelo geométrico a partir de un archivo existente elaborado en un software CAD:

- 1) Realizar la importación del modelo geométrico para llevar a cabo el análisis; en el panel izquierdo (Fig. B3a) que aparece en la pantalla principal de

Abaqus dar clic derecho en *Parts* (partes) y luego en el menú contextual que aparece, dar clic en *Import* (importar) según se presenta en la Fig. B3b, se desplegará la ventana *Import Part* (importar parte).

- 2) En la ventana *Import Part* seleccionar el directorio donde se encuentre localizado el archivo a importar según se presenta en la Fig. B4, además en la opción *File Filter* (filtro de archivo) seleccionar los tipos de archivo STEP y luego seleccionar el modelo que se analizará, dar clic en OK.

Nota: Previamente los modelos geométricos deberán estar elaborados en un programa para realizar modelado como Autodesk Inventor o Solidworks, dichos archivos deben ser guardados en formato STEP para que puedan ser importados a Abaqus/CAE.

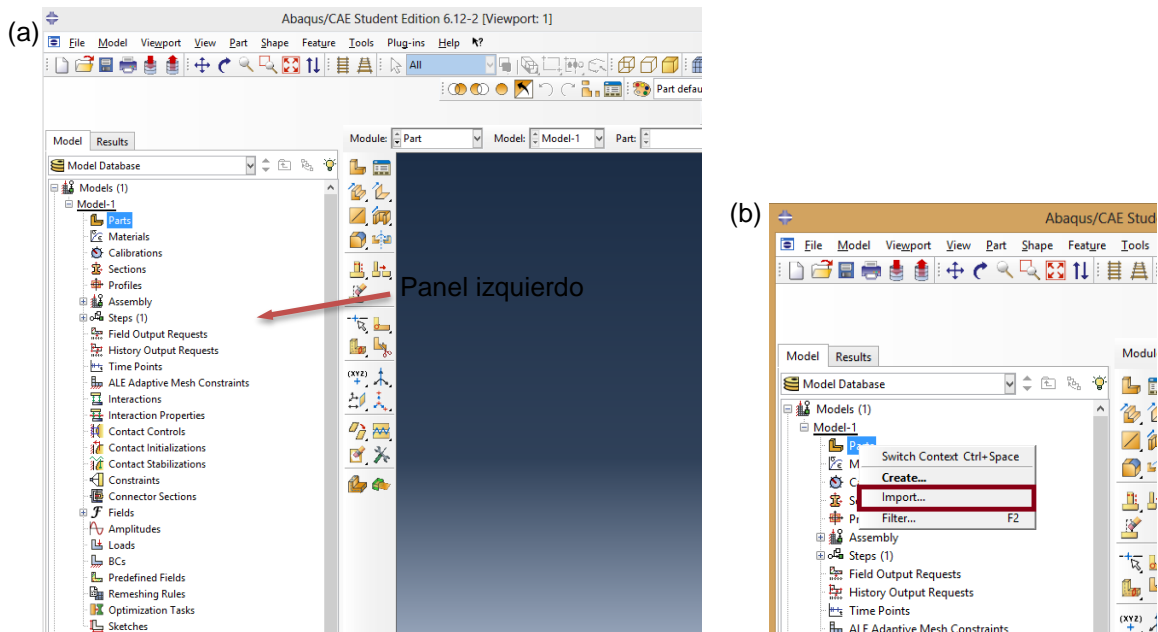


Fig. B3. Importación de un modelo geométrico para utilizarlo en una simulación: (a) Presentación del Panel izquierdo de Abaqus, y (b) Inicio de la importación de un modelo geométrico a Abaqus.

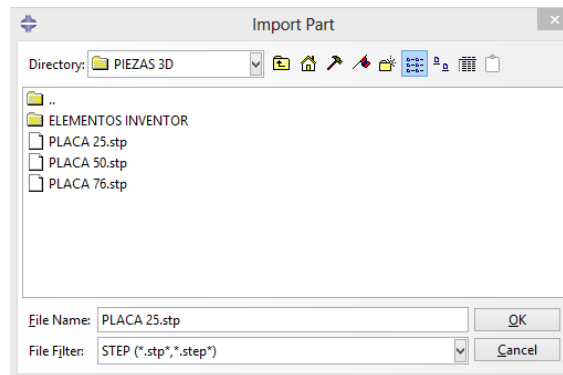


Fig. B4. Ventana para importar modelos geométricos a Abaqus.

- 3) Luego se desplegará una ventana en la cual configura algunos parámetros del modelo que se ha importado, en esta ventana en la pestaña *Name-Repair* en la sección *Part Filter* (filtro de parte) seleccionar *Import all parts* (importar todas las partes) y luego dar clic en *Combine into single part* (combinar en una parte), realizado esto se debe verificar que la opción *Retain intersecting boundaries* (conservar intersección de fronteras) esté activa según se presenta en la Fig. B5, finalizado esto dar clic en OK.

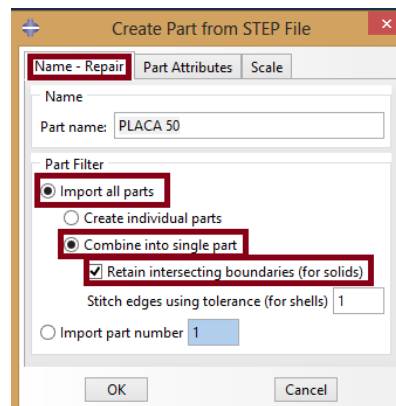


Fig. B5. Configuración de parámetros de un modelo geométrico importado a Abaqus.

- 4) Se desplegará el modelo en la ventana principal de Abaqus, según se presenta en la Fig. B6.

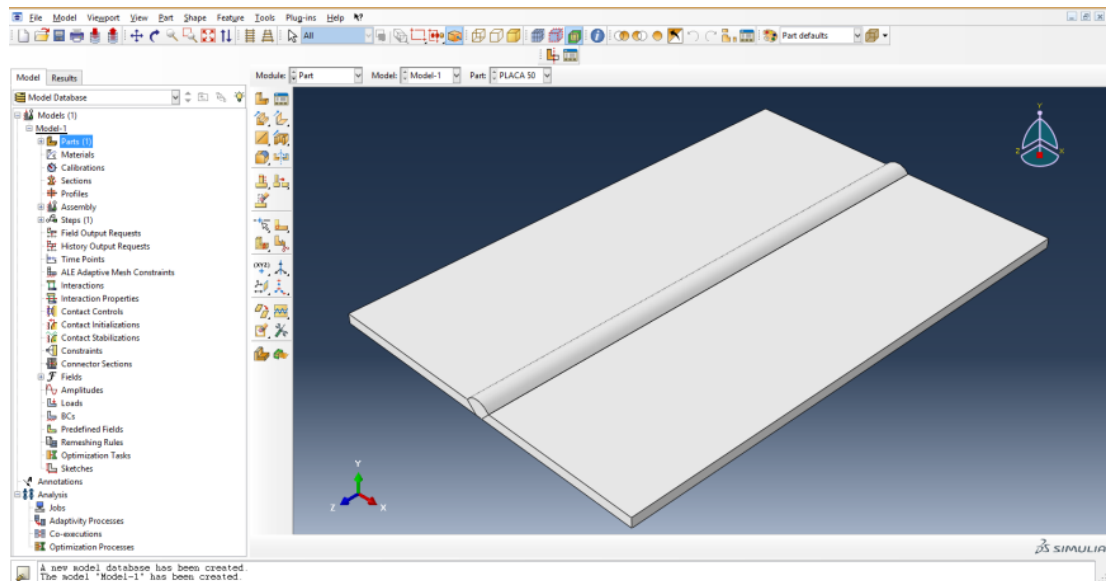


Fig. B6. Vista de un modelo geométrico importado a Abaqus.

III. DEFINICIÓN Y ASIGNACIÓN AL MODELO DEL MATERIAL BASE Y MATERIAL DE APORTE

En esta sección se presenta la manera cómo se define y se asigna un material a un elemento geométrico o región del elemento específico, Estos pasos son:

- 1) Definir los materiales que conforman cada una de las partes del modelo de la junta soldada. Para ello en el panel izquierdo dar clic derecho en *Materials* (materiales) y en el menú contextual que se despliega dar clic en *create* (crear) según se presenta en la Fig. B7.

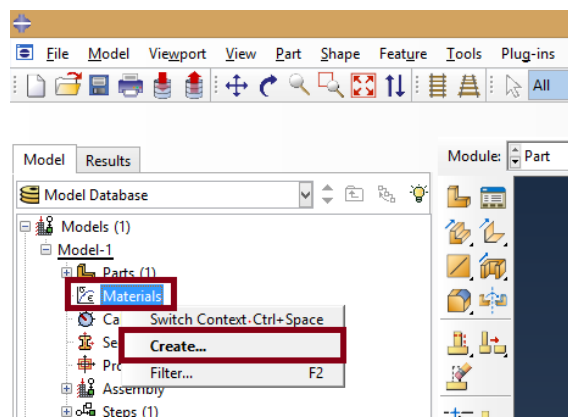


Fig. B7. Definir un material en Abaqus.

- 2) Luego se desplegará la ventana de edición de material de Abaqus, tal como se presenta en la Fig. B8. En el apartado *Name* (nombre) de esta ventana se deberá escribir el nombre del material que se definirá, para este caso se creará el material base que se utilizará en la soldadura.
- 3) En la misma ventana de edición de material se introducirán los valores de algunas propiedades del material, las cuales son necesarias para que Abaqus realice el análisis. Se introducirá el valor de densidad del material, para ello dar clic en el menú *General* seguido de lo cual se desplegará un submenú en el cual se deberá dar clic en *Density* (densidad) según la Fig. B9a, al realizar esto en la parte inferior de dicha ventana aparecerá un campo donde se debe introducir la densidad según se presenta en la Fig. B9b. Si se está utilizando unidades de longitud en mm, la densidad se debe introducir en unidades de $N \cdot s^2/mm^4$.

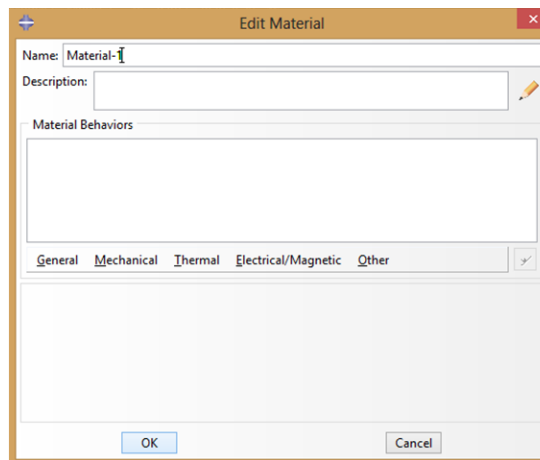


Fig. B8. Ventana de edición de un material.

- 4) A continuación se introducirá el módulo de Young del material, para hacerlo se deberá dar clic en el menú *Mechanical* luego en el listado que aparece dar clic sobre *elasticity* y luego en el submenú que aparecerá dar clic en *elastic* según se presenta en la Fig. B10a, aparecerán los campos para introducir datos, donde en el campo *Young's Modulus* se deberá introducir el valor del módulo de Young del material en unidades de MPa y en el campo *Poisson's Ratio* el valor del coeficiente de Poisson de dicho material según se presenta

en la Fig. B10b; los demás parámetros que aparecen en la ventana de edición de material para este apartado no se modificarán.

- 5) A continuación se introducirá el módulo de Young del material, para hacerlo se deberá dar clic en el menú *Mechanical* luego en el listado que aparece dar clic sobre *elasticity* y luego en el submenú que aparecerá dar clic en *elastic* según se presenta en la Fig. 10a, aparecerán los campos para introducir datos donde en el campo *Young's Modulus* se deberá introducir el valor del módulo de Young del material en unidades de MPa y en el campo *Poisson's Ratio* el valor del coeficiente de Poisson de dicho material según se presenta en la Fig. B10b; los demás parámetros que se presentan en la ventana de edición de material para este apartado no se modificarán.

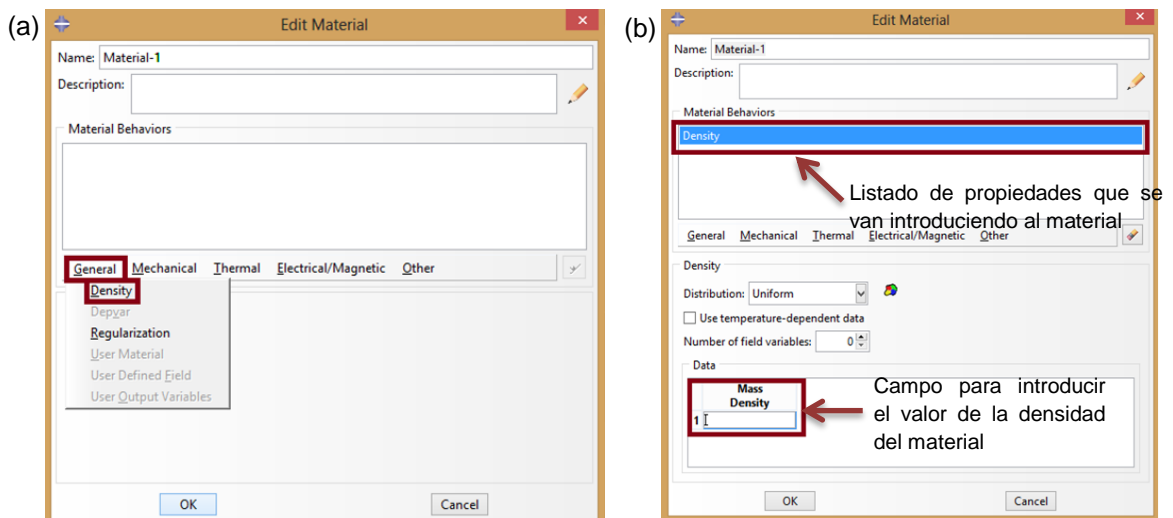


Fig. B9. Pasos para introducir una propiedad de un material en Abaqus: (a) Menú donde se encuentra la propiedad a introducir, y (b) Campo que se presenta en la ventana de edición de material para introducir el valor de densidad del material que se está creando.

- 6) A continuación se introducirá el valor del esfuerzo de fluencia del material, para hacerlo se deberá dar clic en el menú *Mechanical* luego en el listado que aparece clic sobre *plasticity* y luego en el submenú que aparecerá dar clic en *plastic* según se presenta en la Fig. B11a, aparecerán los campos para introducir datos donde en el campo *Yield Stress* se deberá introducir el valor del esfuerzo de fluencia del material en unidades de MPa y en el campo *Plastic Strain* el valor de la deformación a la que se inicia la fluencia

de dicho material según se presenta en la Fig. B11b; los demás parámetros que aparecen en la ventana de edición de material para este apartado no se modificarán.

- 7) A continuación se introducirá el valor del coeficiente de dilatación térmica del material, para hacerlo se deberá dar clic en el menú *Mechanical* luego en el listado que aparece dar clic sobre *Expansion* según se presenta en la Fig. B12a, aparecerán el campo para introducir datos donde en el campo *Expansion Coeff Alpha* se deberá introducir el valor del coeficiente de dilatación térmica del material según se presenta en la Fig. B12b; los demás parámetros que se presentan en la ventana de edición de material para este apartado no se modificarán.

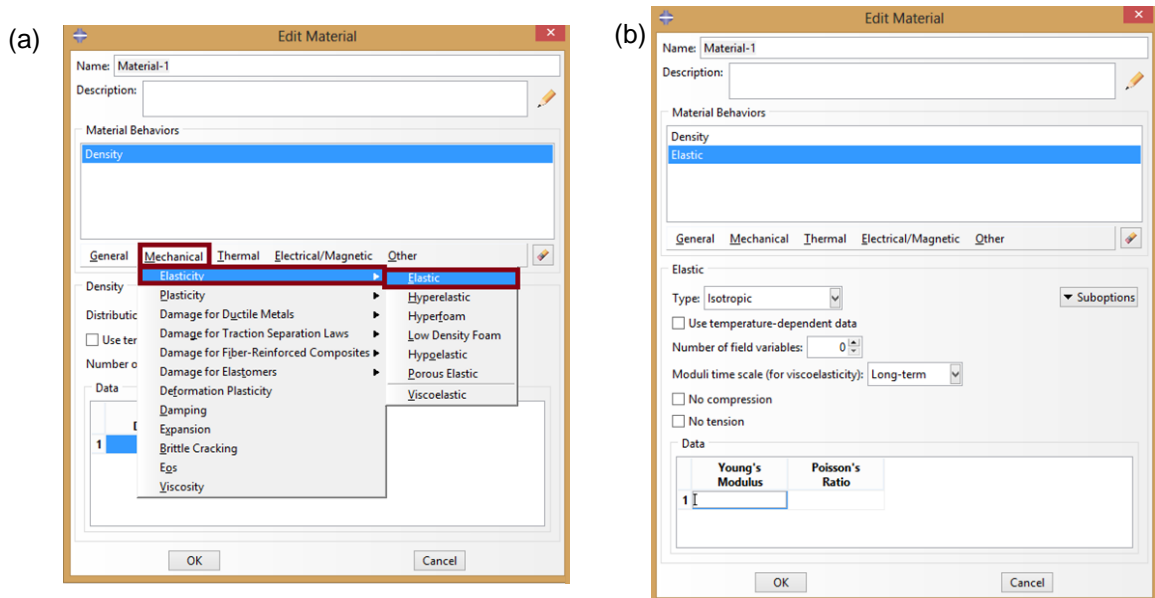


Fig. B10. Pasos para introducir el módulo de Young de un material: (a) Submenú donde se encuentra el parámetro a introducir, y (b) Campo que se presenta en la ventana de edición de material para introducir el valor del módulo de Young y el valor del coeficiente de Poisson del material que se está creando.

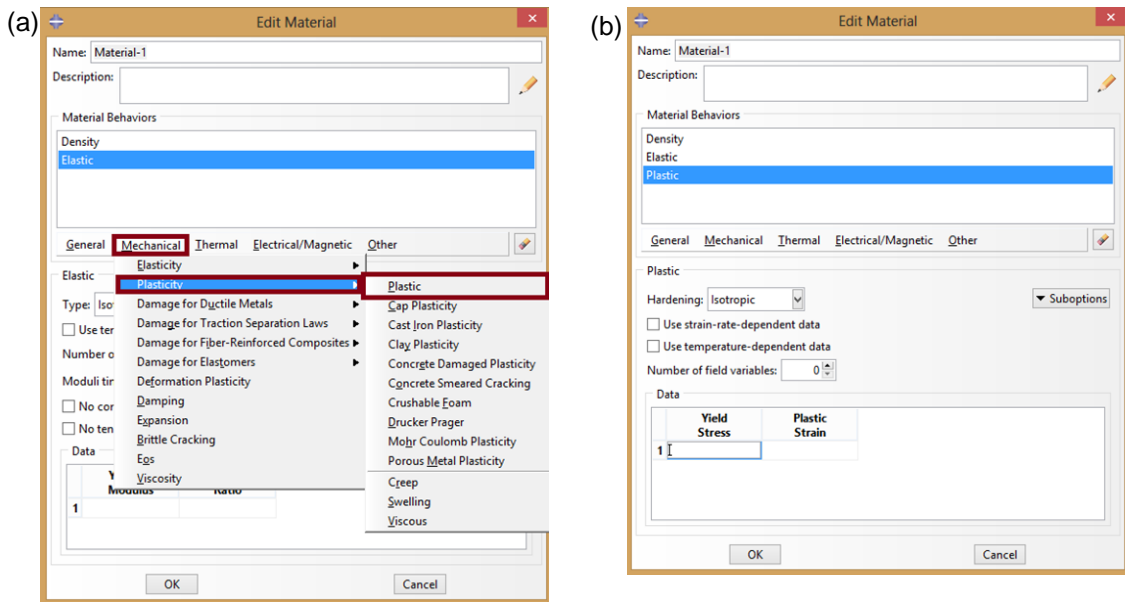


Fig. B11. Pasos para introducir el valor del esfuerzo de fluencia de un material: (a) Submenú donde se encuentra el parámetro a introducir, y (b) Campo que se presenta en la ventana de edición de material para introducir el valor del esfuerzo de fluencia y el valor al cual inicia la deformación plástica del material que se está creando.

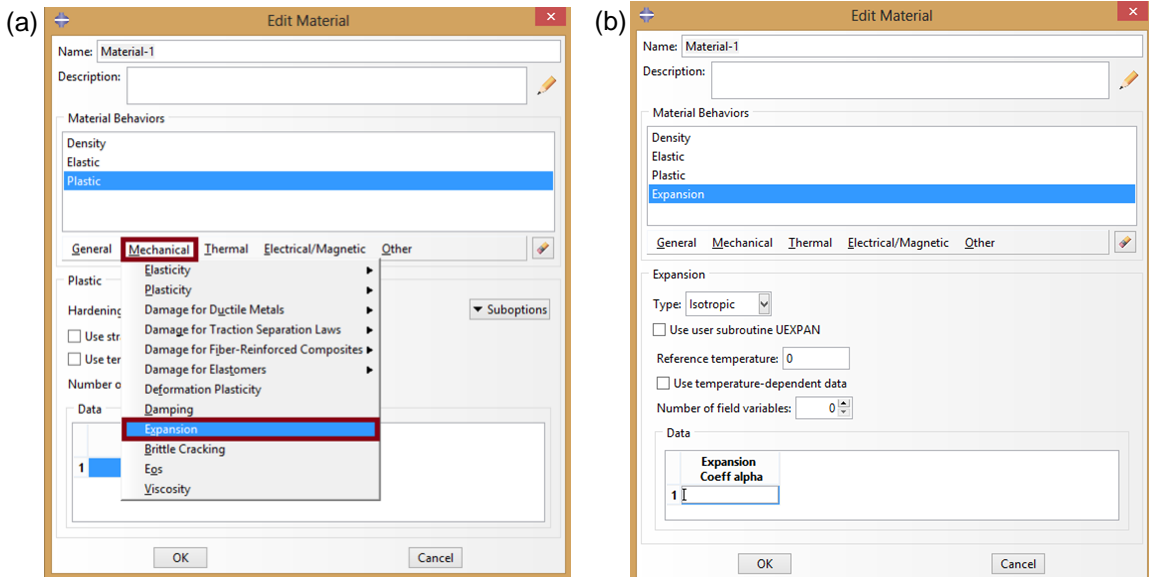


Fig. B12. Pasos para realizar la introducción del valor del coeficiente de dilatación térmica de un material: (a) Submenú donde se encuentra el parámetro a introducir, y (b) Campo que se presenta en la ventana de edición de material para introducir el valor del coeficiente de dilatación térmica del material que se está creando.

8) Introducir el valor de la conductividad térmica del material, para hacerlo se deberá dar clic en el menú *Thermal* luego en el listado que aparece clic sobre *Conductivity* según se presenta en la Fig. B13a, aparecerán el campo

para introducir datos, donde en el campo *Conductivity* se deberá introducir el valor de la conductividad térmica del material según se presenta en la Fig. B13b; los demás parámetros que aparecen en la ventana de edición de material para este apartado no se modificarán.

- 9) A continuación se introducirá el valor del calor específico del material, para hacerlo se deberá dar clic en el menú *Thermal* luego en el listado que aparece, dar clic sobre *Specific Heat* según se presenta en la Fig. B14a; aparecerán el campo para introducir datos, donde en el campo *Specific Heat* se deberá introducir el valor del calor específico del material según se presenta en la Fig. B14b; los demás parámetros que aparecen en la ventana de edición de material para este apartado no se modificarán.

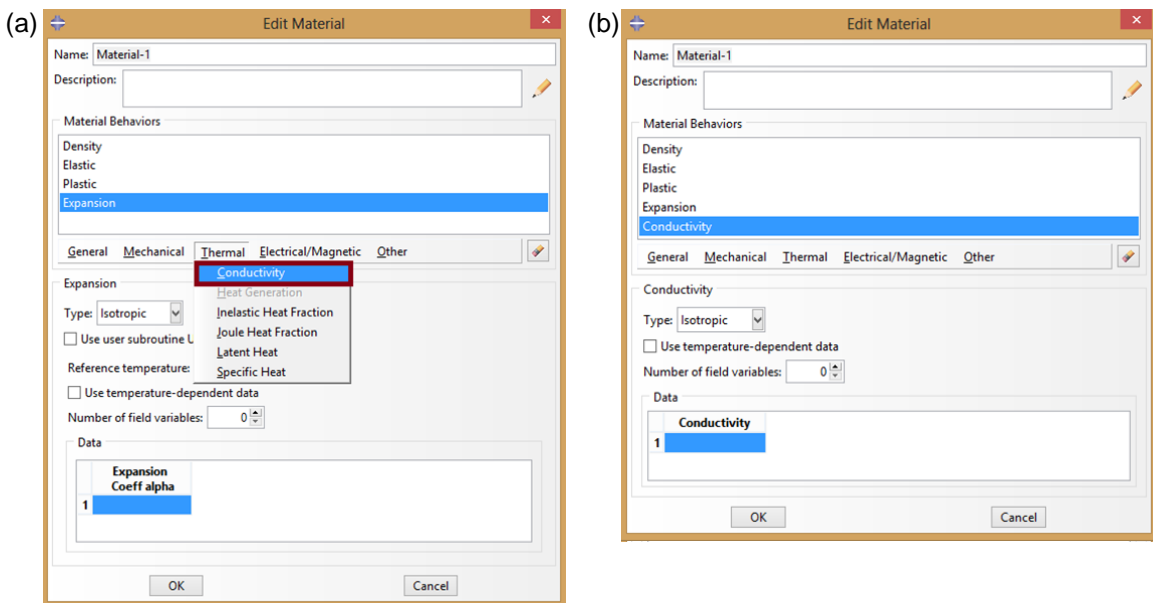


Fig. 13. Pasos para introducir el valor del coeficiente de dilatación térmica de un material: (a) Submenú donde se encuentra el parámetro a introducir, y (b) Campo que se presenta en la ventana de edición de material para introducir el valor del coeficiente de dilatación térmica del material que se está creando.

- 10) Luego de introducir las propiedades necesarias del material base, dar clic en el botón OK. Para definir el material de aporte se deberán repetir los pasos del 1 al 9 de esta sección con la diferencia de que en los campos

donde se introducen los valores de las propiedades del material, se introducirán los del material de aporte.

- 11) Luego de que los materiales tanto el base como el de aporte se encuentren definidos se procede a asignar a cada región del modelo geométrico su respectivo material, para ello Abaqus crea secciones que posteriormente se asignan a determinadas regiones del modelo geométrico, con lo cual a cada una de las secciones le asigna un material determinado. Para crear una sección primeramente en el panel izquierdo dar clic derecho en *Sections* y en el menú que aparece dar clic en *Create* según la Fig. B15a, aparecerá la ventana *Create Section*; en dicha ventana, sin modificar los valores predeterminados del programa dar clic en *Continue* según se presenta en la Fig. B15b, aparecerá la ventana *Edit Section*; en el apartado Material, seleccionar el material que se aplicará a dicha sección, en este caso el Material Base que se creó previamente según se presenta en la Fig. B15c, dejar las demás opciones como están y dar clic en OK. Repetir este pasó para crear una sección con el Material de Aporte.

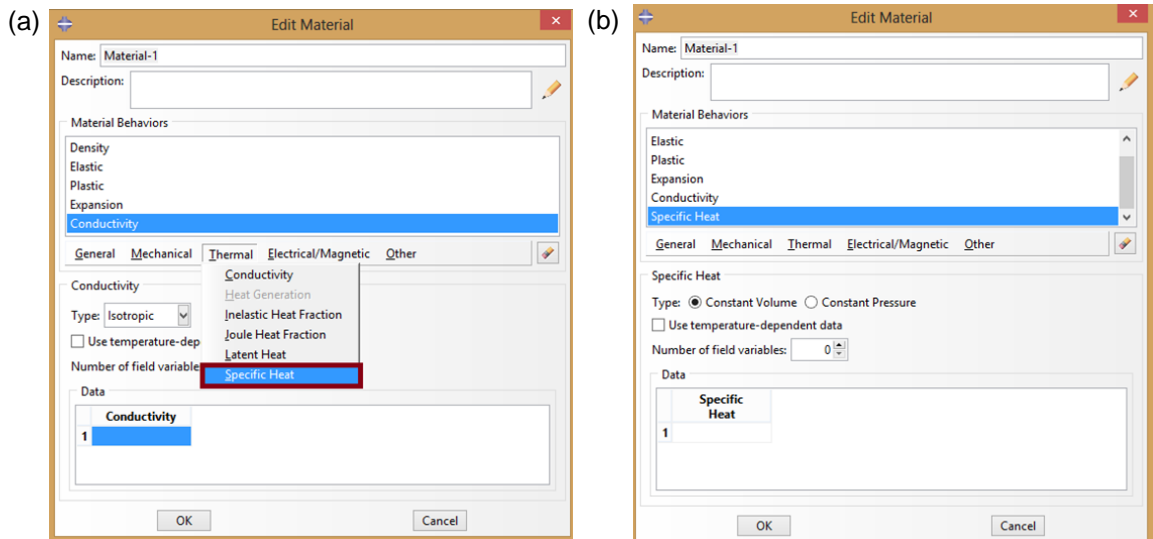


Fig. B14. Pasos para introducir el valor del calor específico de un material: (a) Submenú donde se encuentra el parámetro a introducir, y (b) Campo que se presenta en la ventana de edición de material para introducir el valor del calor específico del material que se está definiendo.

12) Luego que las secciones de los materiales base y de aporte han sido definidas, en el panel izquierdo, dar clic en el símbolo “+” que aparece a la izquierda de *Parts* para expandir el listado de partes, en este caso aparecerá el modelo que se importó previamente, luego dar clic en el signo “+” que aparece junto al nombre del modelo y se expandirá otra lista de opciones según se presenta en la Fig. B16, en esa lista que aparecerá dar clic derecho en *Section Assignments* y en el menú que aparecerá dar clic en *Create*.

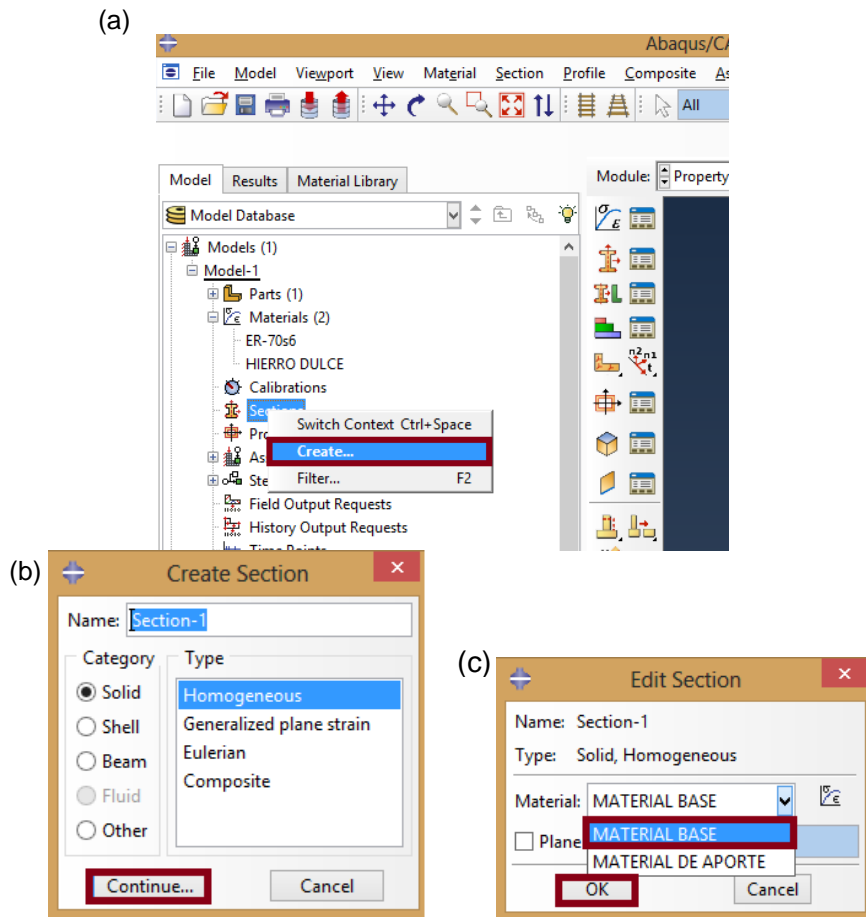


Fig. B15. Asignación de un material a una sección del elemento geométrico: (a) Creación de una nueva sección, (b) Definición del tipo de sección, y (c) Asignación del material a la sección.

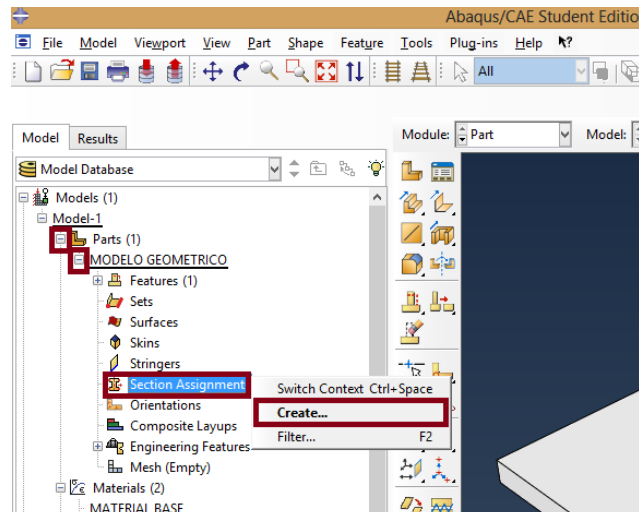


Fig. B16. Primer paso para asignar una sección a una región del modelo de la junta.

- 13) En la barra de estado de Abaqus aparecerá el mensaje *Select the regions to be assigned a section*, lo cual indica que se debe seleccionar las regiones de la junta a las que se asignará una sección en particular, en primera instancia se seleccionarán las regiones del material base, para ello se deberá mantener presionada la tecla *Shift* del teclado y dar clic sobre las regiones en el modelo geométrico que forman parte del metal base de la junta según se presenta en la Fig. B17. Luego de seleccionadas las regiones, en la barra de estado de Abaqus dar clic en el botón *Done*, realizado esto aparecerá la ventana *Edit Section Assignment* según se presentan en la Fig. B18a; en el campo *Section* seleccionar la sección que contiene el material base, en este caso la *Section-1*, al hacerlo en el campo *Material* aparecerá el nombre del material asignado a dicha sección; dar clic en *OK*. En la pantalla se presentará en color verde las regiones a las cuales fue asignada la sección según se presenta en la Fig. B18b. Repetir el paso para asignar el material de aporte a la región del cordón de soldadura.

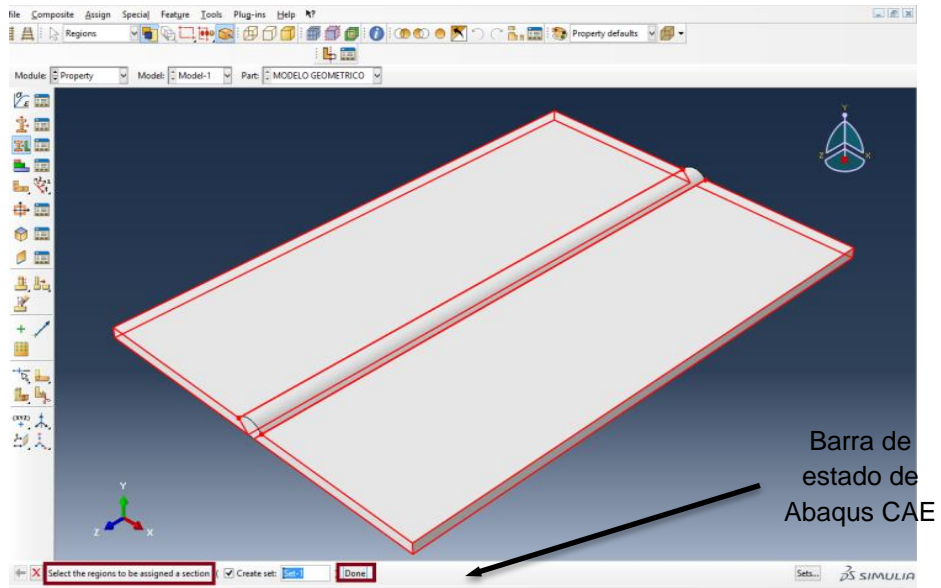


Fig. B17. Selección de las regiones a las que se asignará el material.

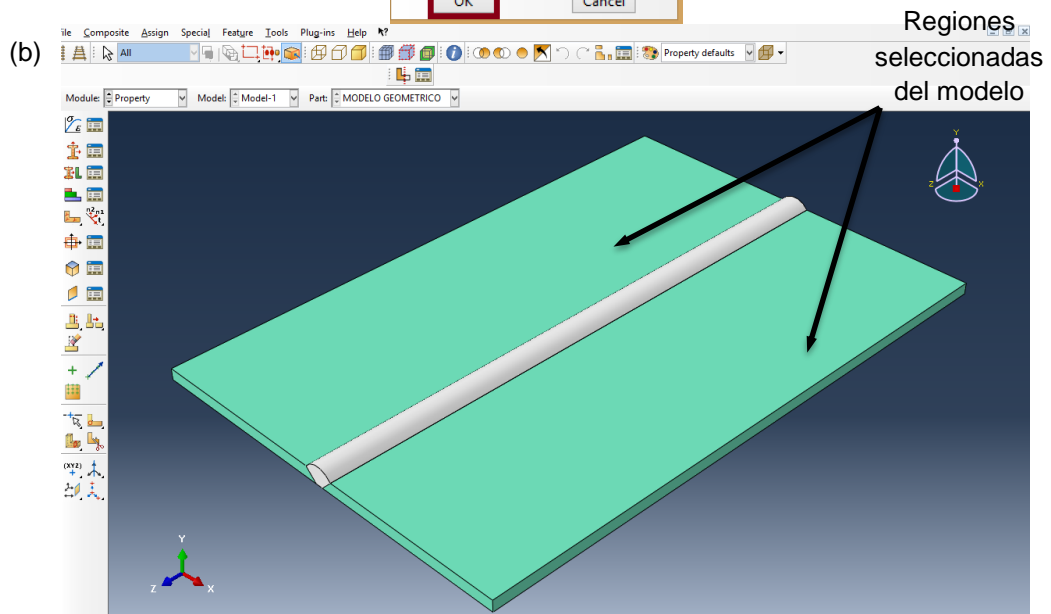
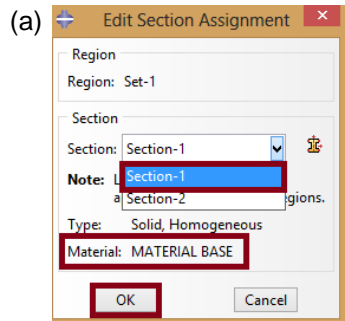


Fig. B18. Asignación de un material a una región de la junta soldada: (a) Pantalla de edición de la asignación de una sección a la región seleccionada, y (b) vista del modelo en pantalla cuando ya se ha asignado una región.

IV. CREACIÓN DEL MALLADO DEL MODELO

A continuación se presentan los pasos a seguir para realizar el mallado de un modelo a analizar en Abaqus. Los pasos son los siguientes:

- 1) Antes de crear el mallado requerido para elementos finitos se deben realizar algunas operaciones para que la definición sea exitosa. Primeramente se definirán las superficies que tendrán transferencia de calor por convección durante el proceso de soldadura, en este caso todas las caras del modelo; para definir dichas superficies, en los menús que se desplegaron previamente en *Parts* en la zona del panel izquierdo, dar clic derecho en *Surfaces* y en el menú que se despliega dar clic en *create* según se presenta en la Fig. B19a; se desplegará la pantalla *Create Surface*, en ella, en el campo *Name* escribir un nombre para la superficie, o bien dejar el nombre predeterminado, luego dar clic en *Continue* según la Fig. B19b; en la barra de estado de Abaqus aparecerá un mensaje que dice *Select the regions for the surface* con lo cual con el puntero del mouse, dar clic en la esquina superior izquierda en el área de modelado y manteniendo el clic arrastrar el puntero por toda el área con lo cual se estará creando un recuadro en el cual el modelo deberá quedar dentro de ese recuadro blanco, y cuando esto suceda soltar el clic y se seleccionara la junta soldada según se presenta en las Fig. B20a y B20b. Luego dar clic en el botón *Done* de la barra de estado.

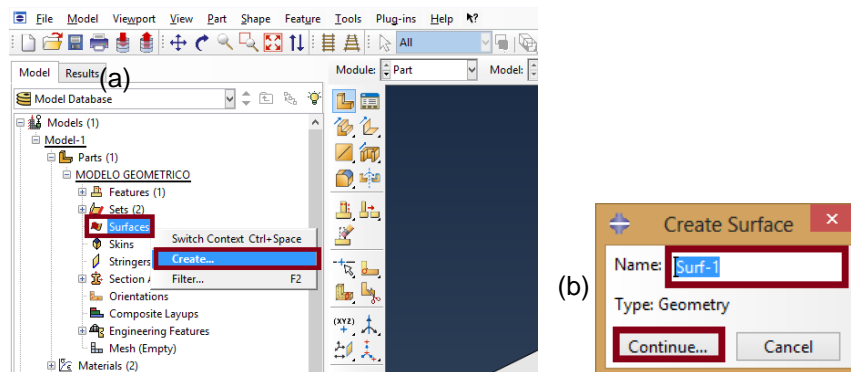


Fig. B19. Definición de superficies que tendrán transferencia de calor por convección durante el proceso de soldadura: (a) Primer paso para iniciar la definición de las superficies, y (b) Ventana donde se indicara el nombre de la superficie.

- 2) Una vez asignadas las superficies que tendrán transferencia de calor por convección, dar clic en el signo “+” que esta junto a *Assembly* en el panel izquierdo, se desplegarán otras opciones, dar clic derecho en la que dice *Instances*, y en el menú que se desplegará dar clic en *Create* según se presenta en la Fig. B21a, se desplegará la ventana *Create Instance*, en ella en la opción *Instance Type* seleccionar la opción *Dependent (Mesh on part)* y dar clic en el botón OK según se presenta en la Fig. B21b.

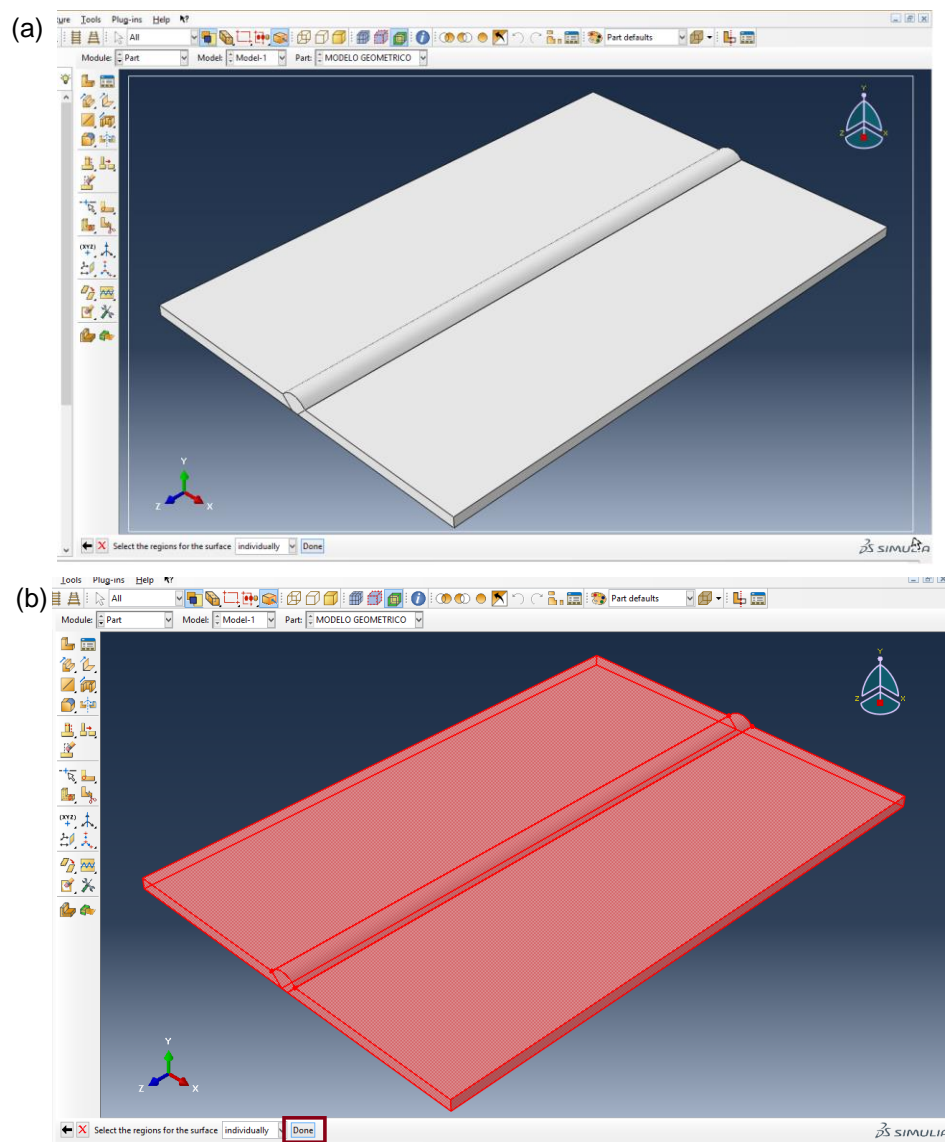


Fig. B20. Selección de elementos geométricos: (a) Recuadro que se presenta durante el arrastre del mouse con clic presionado para seleccionar la junta, y (b) Todas las superficies de la junta seleccionadas.

3) Luego de lo anterior se iniciará la creación del mallado de la junta. Para ello, en la lista que se encuentra bajo la barra de herramientas de Abaqus, en la opción *Module* cambiar el módulo de trabajo al módulo *Mesh* (malla); concluido lo anterior el panel de herramientas de Abaqus cambiará a las herramientas del módulo de mallado según se presenta en la Fig. B22.

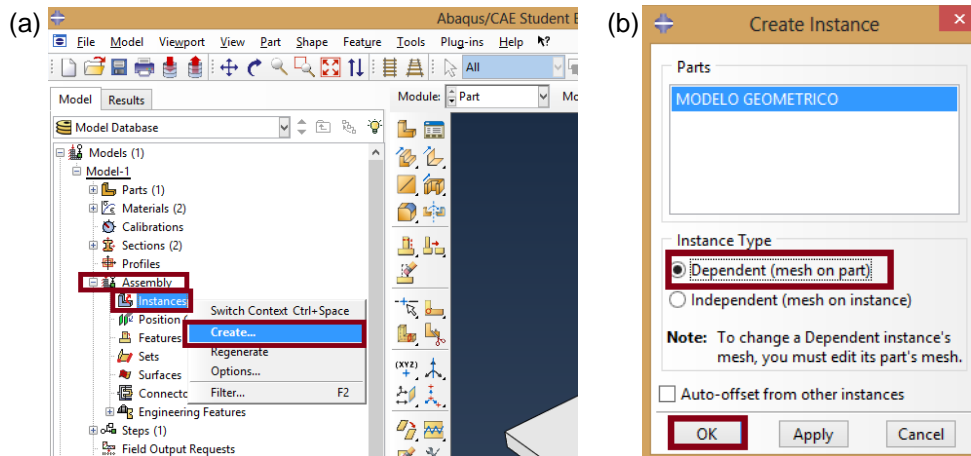


Fig. B21. Definición del modelo de la junta soldada como ensamble geométrico en Abaqus: (a) Primer paso para definir la junta como ensamble, y (b) Ventana para dar los parámetros del ensamble y poder iniciar el mallado de la junta.

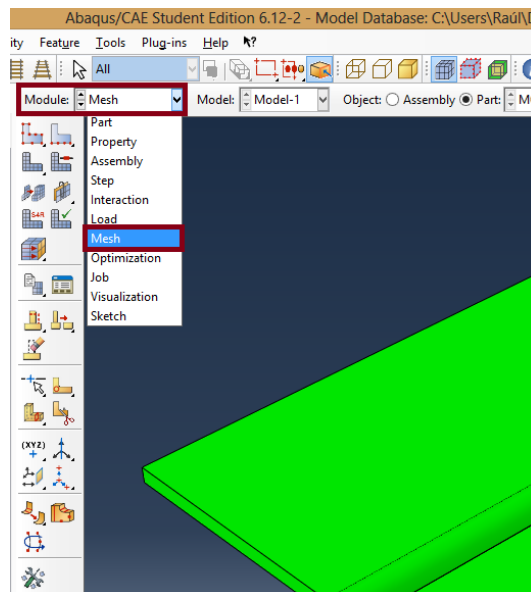


Fig. B22. Cambio al módulo de mallado en Abaqus.

- 4) Una vez creado el módulo de mallado, se procederá a realizar el mallado. Para ello, dar clic en la herramienta *Seed Part* del panel de herramientas de Abaqus según la Fig. B23a, se desplegará la ventana *Global Seed* en la cual se configurará el tamaño de la malla; en el campo *Approximate global size*, digitar el tamaño de la malla que se desea según la Fig. B23b. De manera predeterminada Abaqus utiliza un tamaño de 7.6 mm siendo una malla cuadrada la cual se adapta a la geometría del modelo. Luego de cambiar el tamaño dar clic en OK.

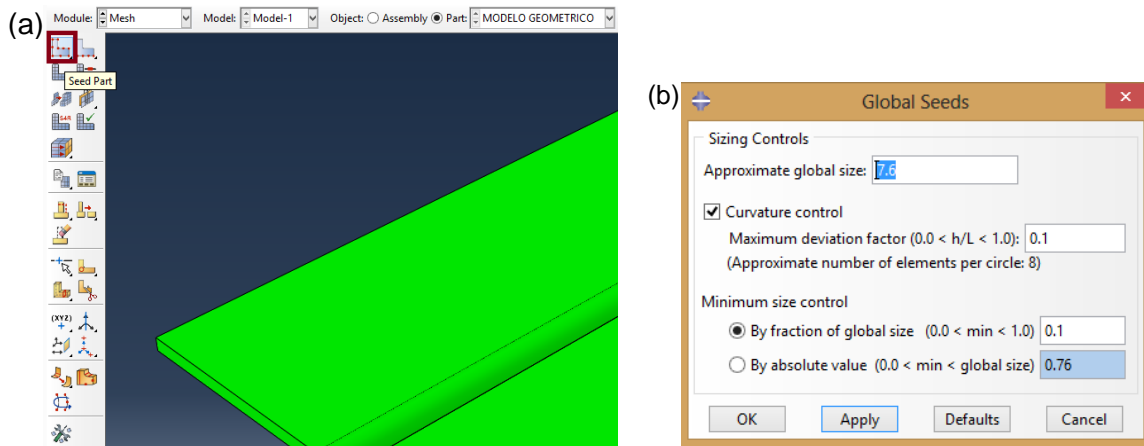


Fig. B23. Configuraciones iniciales de la creación del mallado en Abaqus: (a) Herramienta para definir el tamaño de la malla, y (b) Ventana para dar los parámetros del tamaño de la malla.

- 5) En el panel de herramientas, dar clic en la herramienta *Assign Mesh Controls* según la Fig. B24a, Abaqus solicitará que se seleccionen las regiones del modelo que se configurarán, seleccionar toda la junta con el mouse de la manera en que se hizo en el paso 1 de esta sección, y dar clic en *Done* en la barra de estado de Abaqus. Se desplegará la ventana *Mesh Controls*, en ella verificar que en el área *Element Shape* se encuentre seleccionada la opción *Hex*, y en el área *Technique*, seleccionar la opción *Sweep* según la Fig. B24b; dar clic en OK. El modelo geométrico cambiará de color verde a amarillo en la pantalla según se presenta en la Fig. B24c.
- 6) Luego de haber asignado los controles de mallado dar clic en la herramienta *Assign stack direction* (Asignar dirección de apilamiento) según la Fig. B25a,

en la barra de estado de Abaqus el programa solicitará las regiones a las que se asignará la configuración, con el mouse seleccionar todo el modelo y en la barra de estado dar clic en *done* según se presenta en la Fig. B25b; luego el programa solicitará una cara que sea transversal a la dirección de apilamiento, esto es la cara transversal donde inicia el cordón de soldadura. Seleccionar la cara frontal del cordón de la forma que se presenta en la Fig. B26 y dar clic en *Yes*, en la barra de estado de Abaqus.

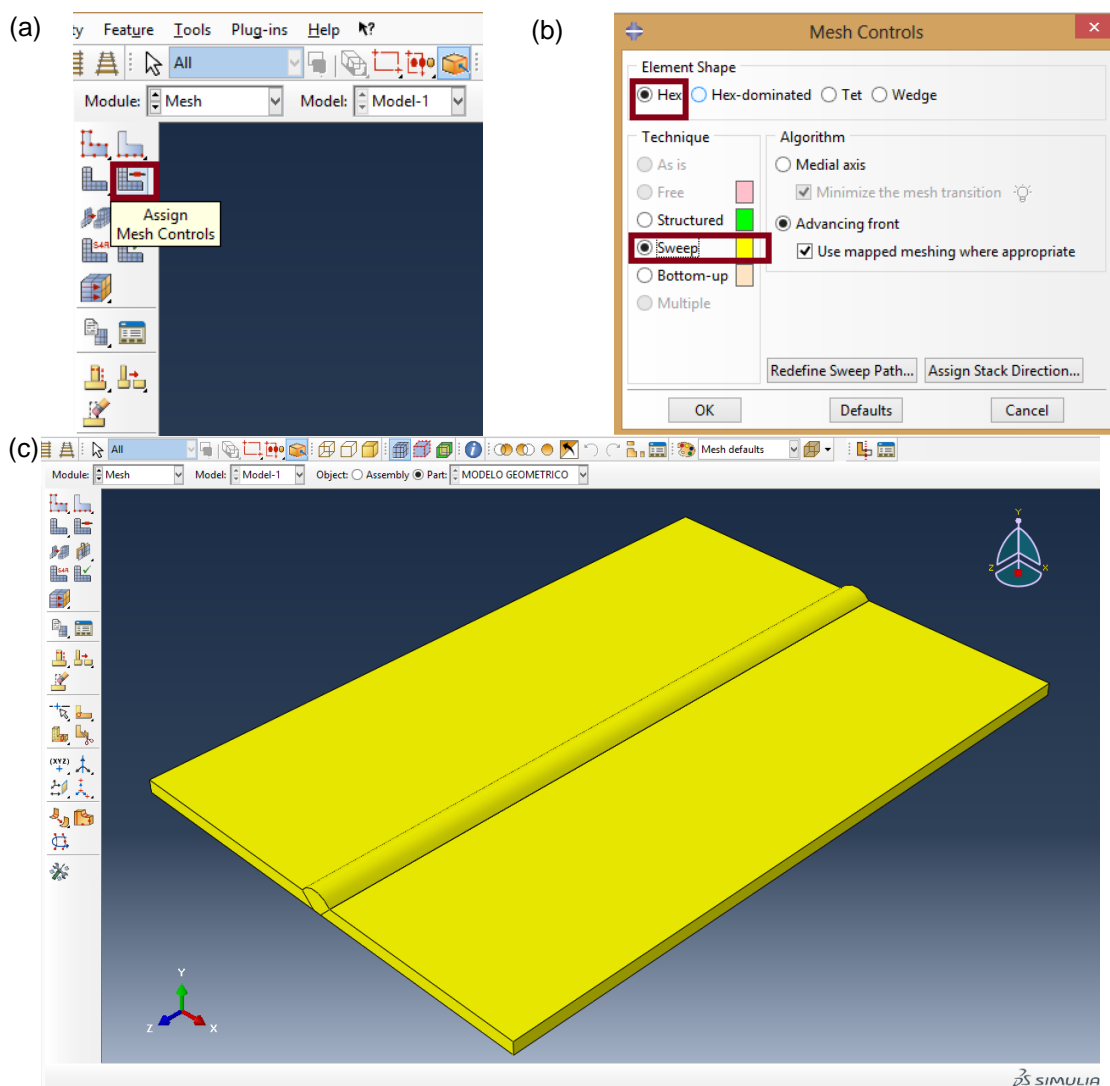


Fig. B24. Controles de mallado: (a) Herramienta para abrir la ventana de controles del mallado, (b) Ventana de controles de mallado, (c) Modelo al finalizar la configuración de controles de malla.

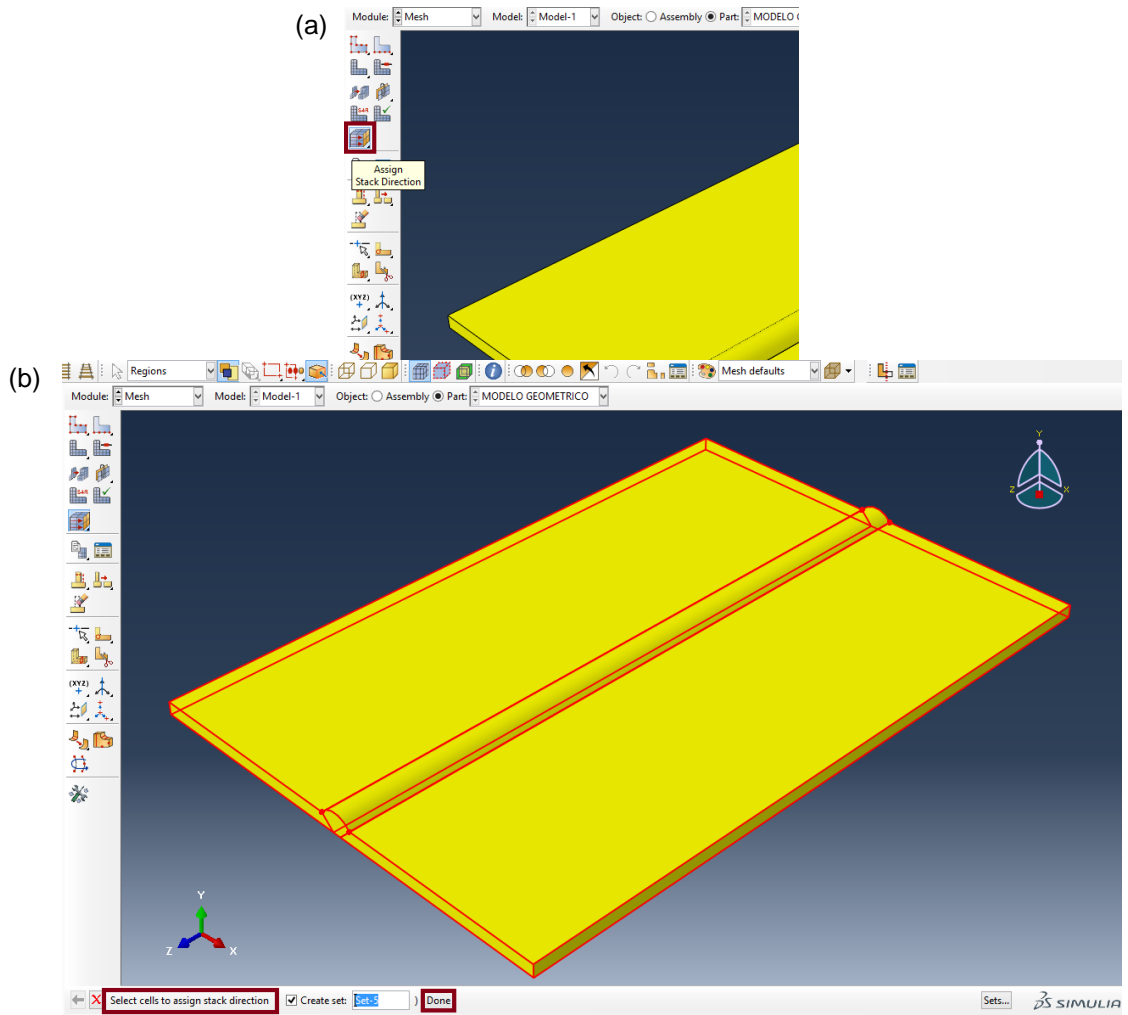


Fig. B25. Asignación de la dirección de apilamiento del mallado: (a) Herramienta para asignar la dirección de apilamiento, y (b) Selección de las regiones a configurar.

7) Luego que se han realizado las configuraciones anteriores se procede a crear el mallado, para ello en el panel de herramientas de Abaqus, dar clic en la herramienta *Mesh Part* según se presenta en la Fig. B27a, en la barra de estado el programa solicitará una confirmación, dar clic en *Yes* y automáticamente se creará la malla la cual se mostrará según la Fig. B27b.

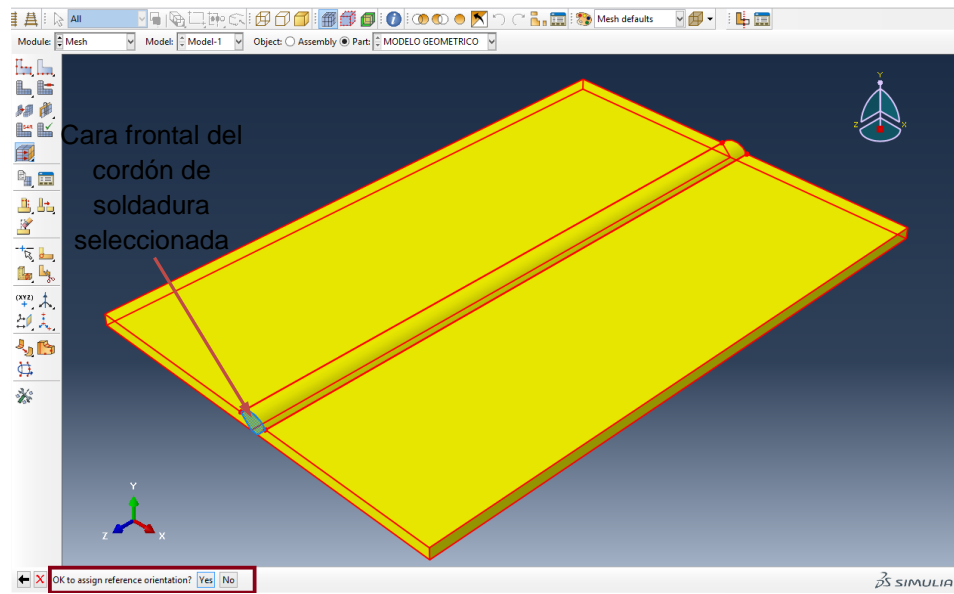


Fig. B26. Selección de la cara transversal del cordón de soldadura para realizar apilamiento de elementos de mallado.

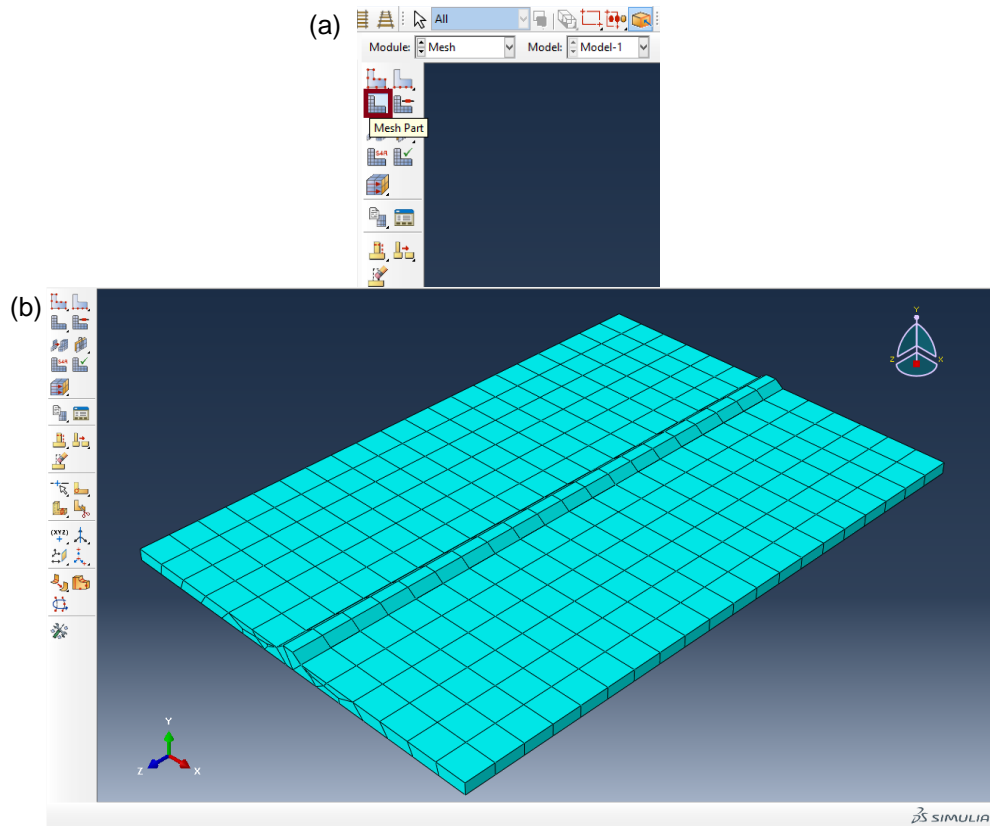


Fig. B27. Pasos finales para la creación del mallado de un modelo en Abaqus: (a) Herramienta crear malla, y (b) Visualización del modelo con la malla creada.

V. CONFIGURACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA SOLDADURA

Para configurar los parámetros de la soldadura realizada se utilizará el Plugin *Abaqus Welding Interface (AWI)*. Los pasos a realizar son los siguientes:

- 1) Activar el plugin AWI, para ello dar clic en la barra de menú en *Plug-ins*, se desplegará una lista; en ésta dar clic en *Abaqus Welding Interface* con lo cual se activara el Plugin, y aparecerá una nueva pestaña en el panel izquierdo según se presenta en la Fig. B28, dar clic sobre el triángulo invertido de colores que aparece abajo del nombre de la pestaña para que se visualicen los cambios del modelo.

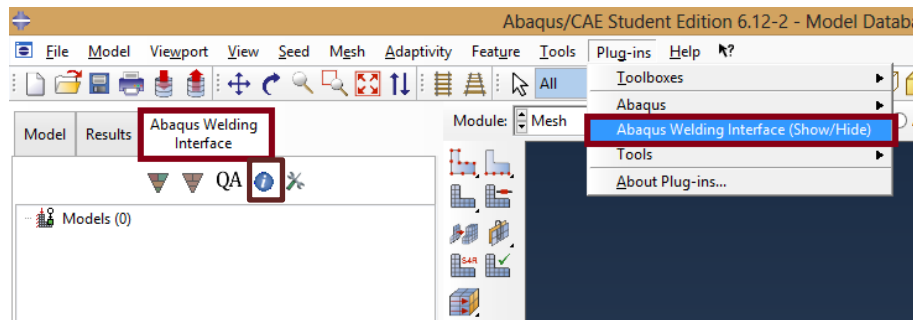


Fig. B28. Activación del Plugin Abaqus Welding Interface de Abaqus.

- 2) El siguiente paso a realizar es dar clic derecho sobre *Models* en el panel izquierdo y en el menú contextual que aparece dar clic en *Create* según la Fig. B29a. Se desplegará la ventana *Weld Model*, en ella, en el campo descripción que es opcional, se puede colocar una descripción acerca de la soldadura que se está simulando, en el campo *Heat – Transfer Model Name* seleccionar el modelo geométrico que se ha creado, en el campo *Part Name* seleccionar la parte que se exporto de la lista; en el campo *Unit System* dejar el campo como se encuentra. En el campo *Base material*, dar clic en *sets*, y en la ventana que aparecerá seleccionar el *set-1* que son las regiones del material base, en el campo *Base Material Name*, de la lista seleccionar el material base de la junta; en el campo *Initial Temperature*, digitar la temperatura inicial a la que se encontrará la junta, sea esta la temperatura ambiente o una temperatura previa a la que fue calentado el

material antes de iniciar la soldadura en las unidades que se estén utilizando. En el campo *Stefan – Boltzmann constant*, digitar la constante de Stefan – Boltzmann según el sistema de unidades que se esté utilizando y en el campo *Absolute Zero* digitar la temperatura de cero absoluto del sistema de unidades que se esté utilizando (-273.15 °C para el SI). Luego dar clic en OK según la Fig. B29b.

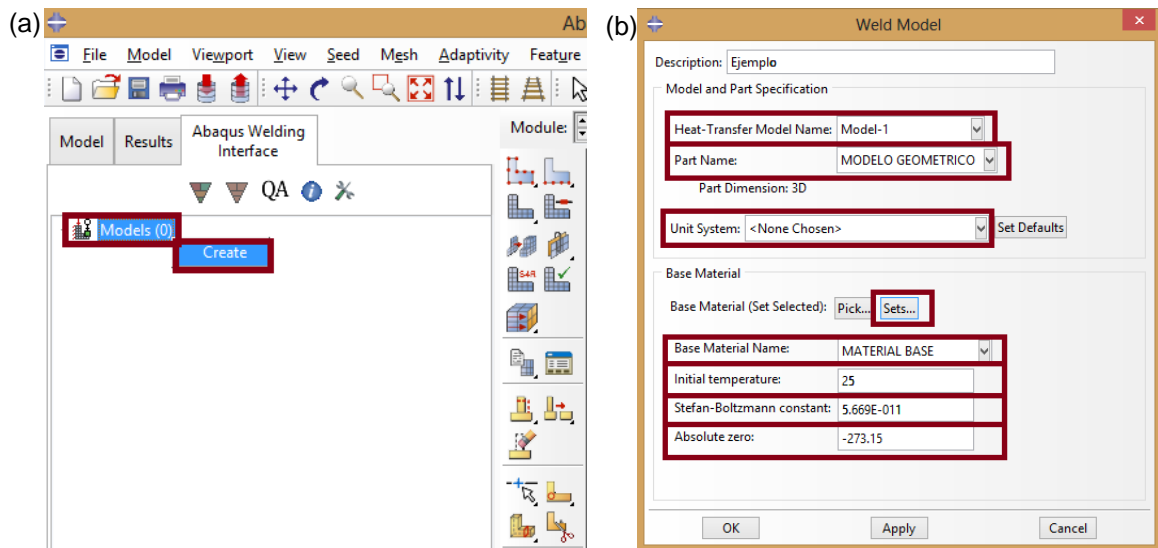


Fig. B29. Configuración inicial de la soldadura a simular: (a) Pasos para crear una nueva configuración, y (b) Ventana del modelo de soldadura.

3) En el árbol de tareas aparecerán otras opciones luego del paso anterior, dar clic derecho en la *Welds* y en el menú contextual que aparece dar clic en *Create* según la Fig. B30a. Se desplegará la ventana *Weld Attributes 3D* en la cual en el campo *Weld Name* se deberá escribir el nombre que se le dará al cordón de soldadura, en el campo *Weld Material Name* seleccionar el material del cordón de soldadura. Además, en el campo *Weld Material Initial melt Temperature* digitar la temperatura de fusión del material de aporte, y en el campo *Target Torch heat up temperature* digitar la temperatura que alcanzará el proceso de soldadura que se utilizará para realizar los cordones de soldadura según se presenta en la Fig. B30b, luego dar clic en OK; en la pantalla aparecerá la ventana *3D Bead Creation*, en el campo *Chunking method* seleccionar la opción *Element extrusión by Cell Face* según la Fig.

B30c y luego dar clic en *Continue*; concluido lo anterior Abaqus solicitará la cara frontal donde iniciará el cordón de soldadura, con el mouse dar clic sobre la cara frontal del cordón y luego en la barra de estado dar clic en *Done* según se presenta en la Fig. B30d. En la pantalla aparecerá el modelo en color verde y se presentarán los tramos del cordón que Abaqus generó.

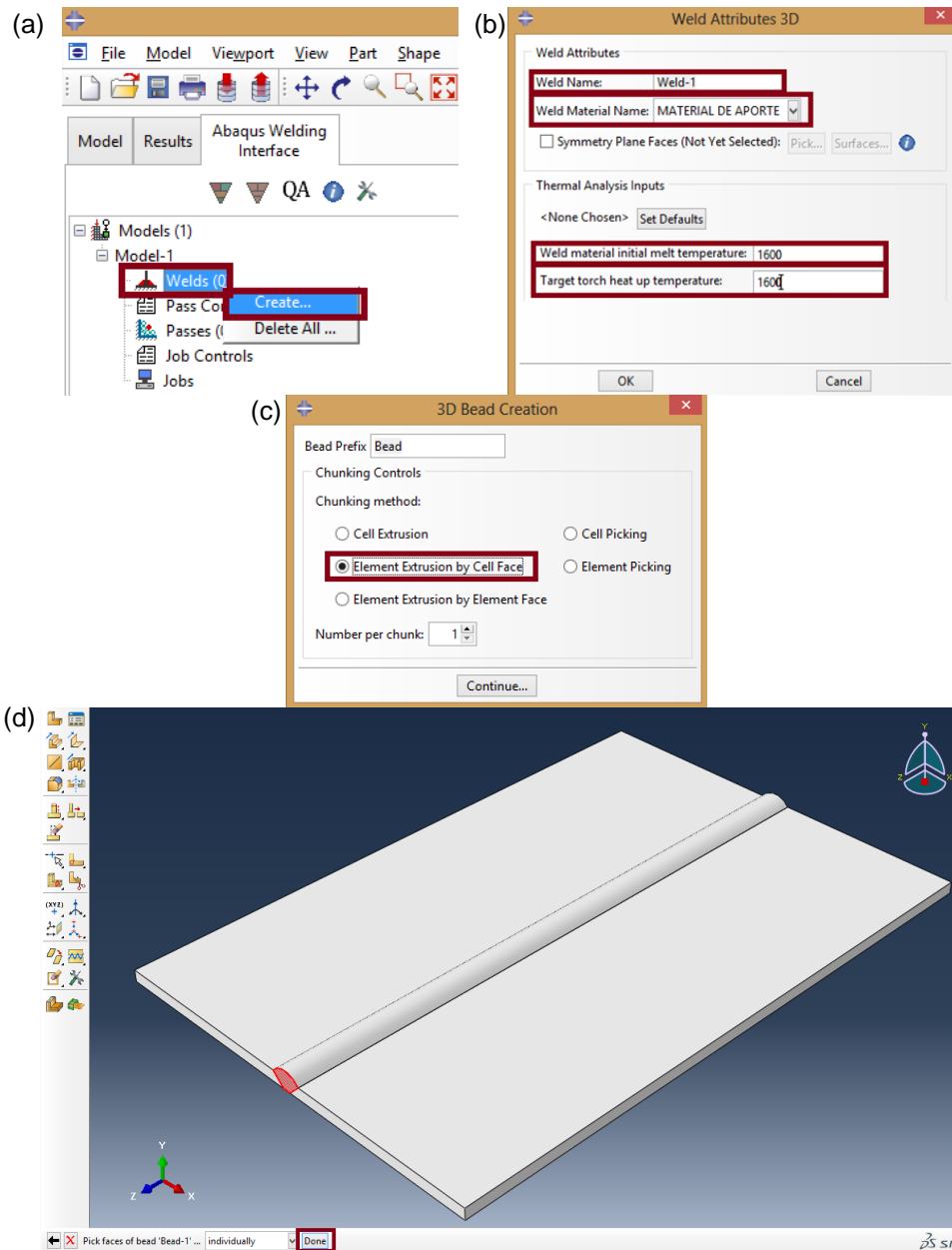


Fig. B30. Configuración de los cordones de soldadura: (a) Pasos para crear una nueva configuración, (b) Ventana de atributos del cordón de soldadura, (c) Ventana de creación del cordón, y (d) selección de la cara frontal del cordón.

- 4) En el panel izquierdo, dar clic derecho en *Pass Controls* y en el menú contextual que aparece dar clic en *Edits Controls* para iniciar la configuración del proceso de soldadura según se presenta en la Fig. B31, en la cual se desplegará la ventana *Pass Step Controls 3D*; en la pestaña *Apply Torch Step*, en el campo *Time Period* digitar el período de tiempo en el cual el proceso de soldadura se tarda en crear una sección del cordón dividiendo el tiempo total de creación del cordón entre el número de elementos que Abaqus dividió el cordón en el paso anterior y en el campo *Max Allow Temp Change* digitar un valor de 200 lo cual es recomendado por Simulia según la Fig. B32a. En la pestaña *Film Properties* dar clic en el signo “+” que aparece de color verde y en el campo *Region* para la región que se agregó verificar que éste sea la superficie que se configurada durante la creación del modelo geométrico en *Parts*; en el campo *Film Coefficient* digitar para todas las regiones el valor del coeficiente de transferencia de calor por convección y en el campo *Sink Temp* digitar la temperatura inicial de la junta antes del proceso de soldadura según se presenta en la Fig. B32b. En la pestaña *Radiation Properties*, En el campo *Emissivity* digitar para ambas regiones el valor de emisividad (normalmente 0.9 o 1) y en el campo *Ambient Temperature* digitar la temperatura ambiente del entorno según la Fig. B32c y dar clic en OK.

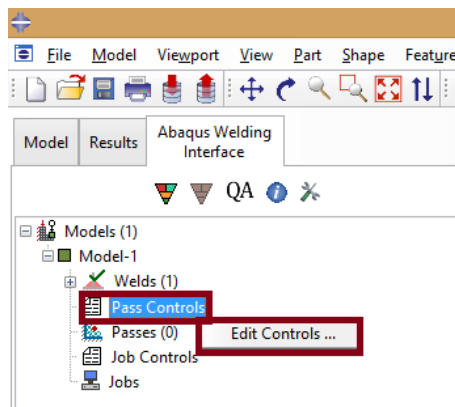


Fig. B31. Apertura de controles de cordón de soldadura.

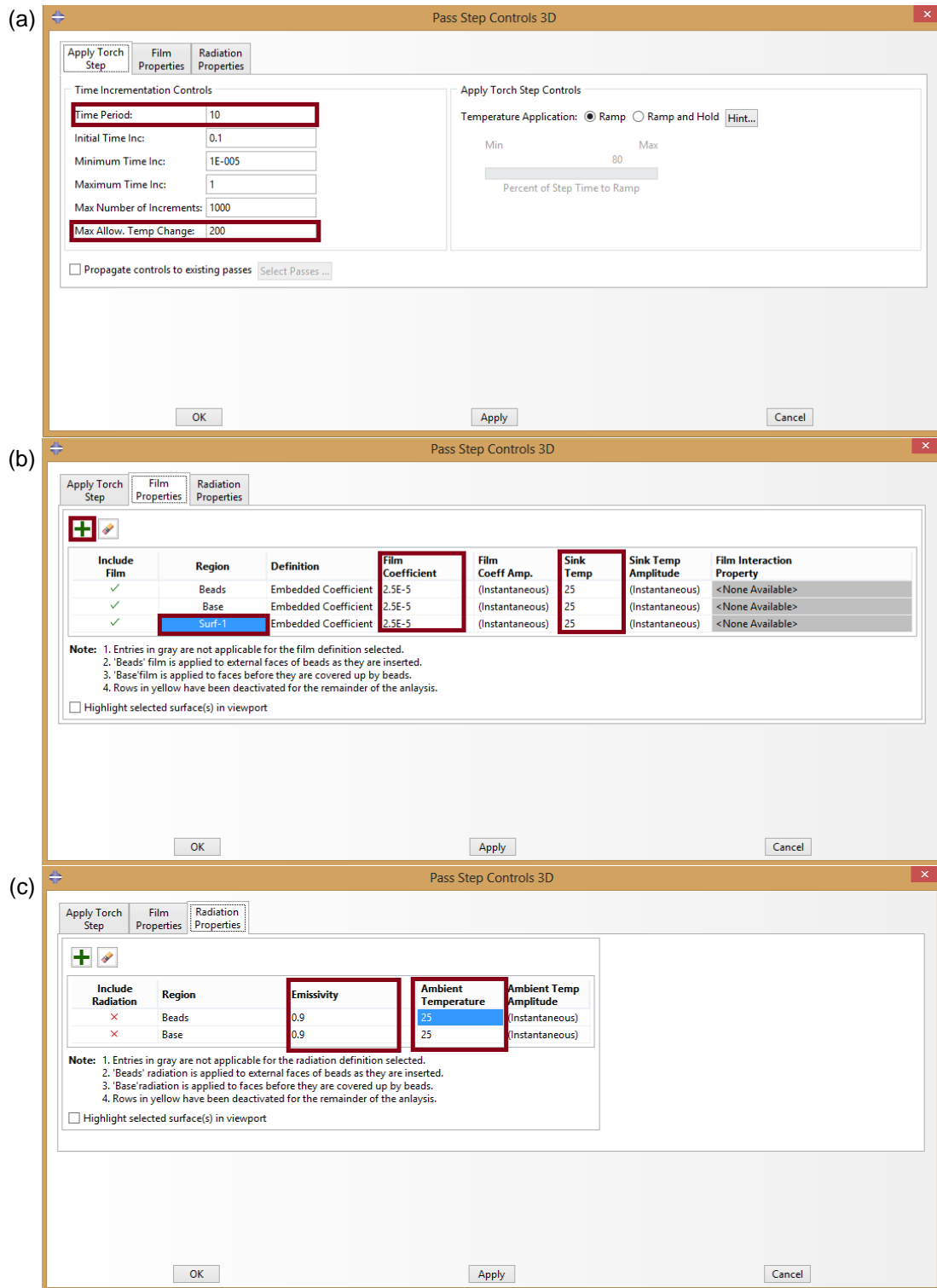


Fig. B32. Configuración de los parámetros del proceso de soldadura: (a) Configuraciones generales del proceso, (b) Configuración de los parámetros de transferencia de calor por convección, y (c) Configuración de los parámetros de transferencia de calor por radiación.

- 5) En el panel izquierdo dar clic derecho en *Passes* y en el menú contextual que aparece dar clic en *Manager* según la Fig. B33a, se desplegará la ventana *Pass Manager 3D*; en el campo *Selection Type* verificar que este seleccionado *Automatic*, luego dar clic en el botón “>>” de la ventana y verificar que en el campo *Pass Names* aparezca un listado, estos serán los tramos del cordón de soldadura que se simularán, y luego dar clic en *Dismiss* según la Fig. B33b.

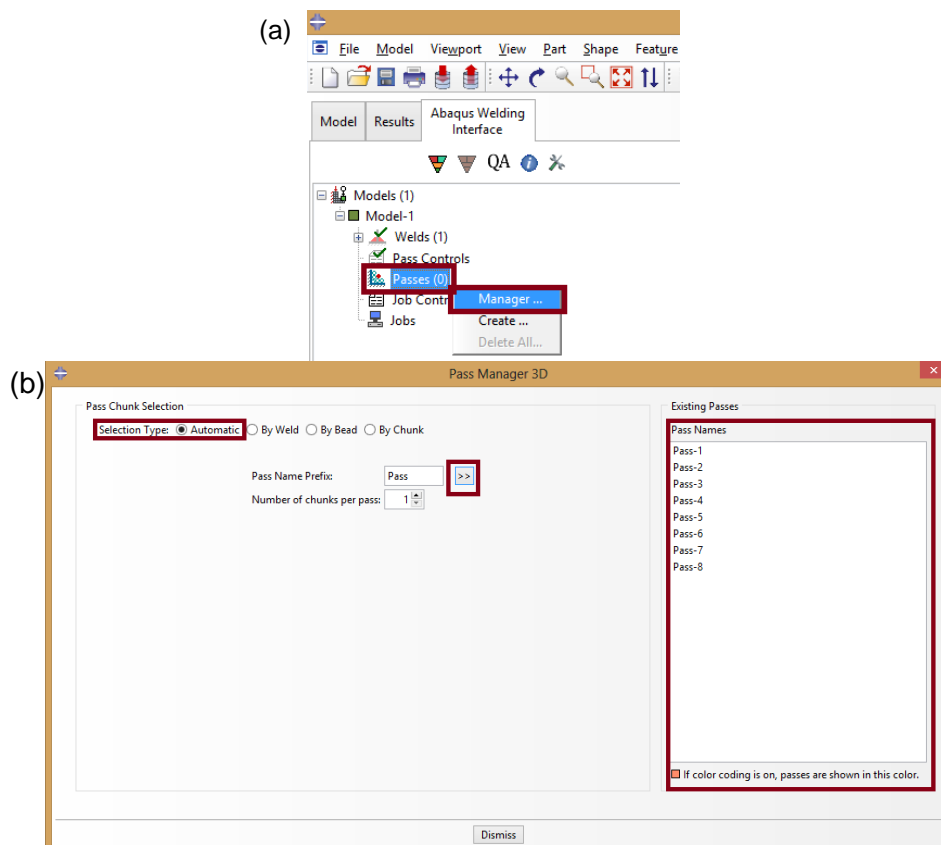


Fig. B33. Pasos para la configuración de los tramos o subdivisiones del cordón de soldadura: (a) Inicio de la configuración, y (b) Ventana de configuración de los parámetros.

- 6) En el panel izquierdo dar clic derecho sobre *Job Controls* y en el menú contextual que aparece dar clic en *Edit*, se desplegará la ventana *Job Controls* según la Fig. B34a; en el campo *Heat – Transfer job name*, escribir el nombre que se le dará al análisis de transferencia de calor, y en el campo

Stress Analysis job name escribir un nombre que se le dará al análisis Mecánico; verificar que el campo *Override existing heat – transfer element assignments* se encuentre activo y así mismo que en el campo *Heat Formulation* se encuentre chequeado la opción *Convection/Diffusion* y dar clic en OK según la Fig. B34b.

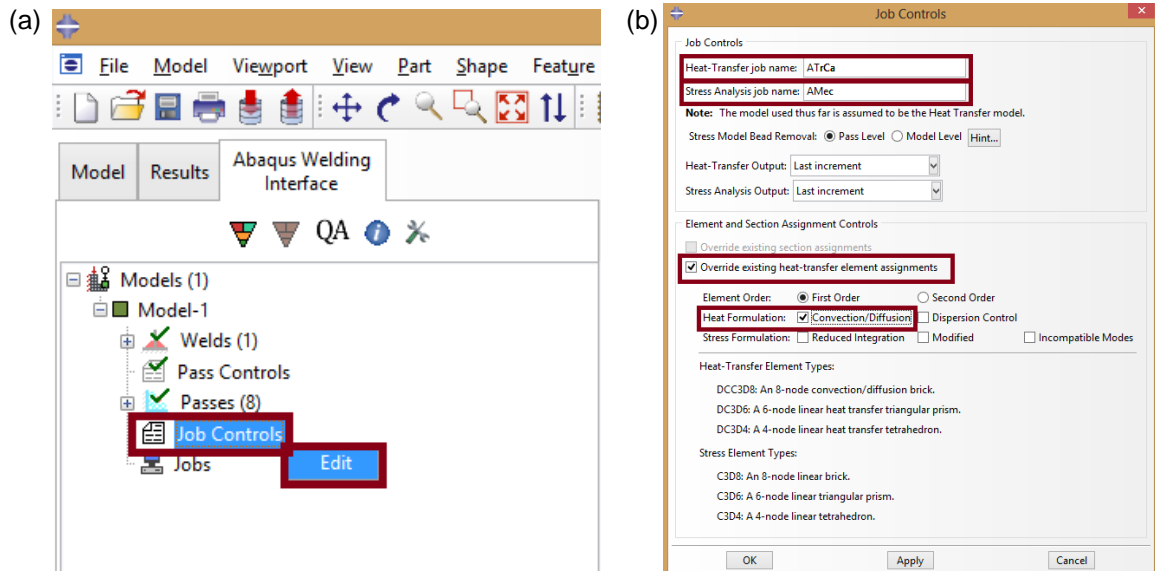


Fig. B34. Configuración del análisis que realizará Abaqus: (a) Inicio de la configuración, y (b) Ventana de los controles de los análisis de transferencia de calor y análisis mecánico.

7) En el panel izquierdo dar clic derecho sobre *Jobs* y en el menú contextual que aparece dar clic en *Generate Models* según la Fig. B35 y en la ventana que aparece dar clic en OK, esto generará los *Job* (Trabajos) en Abaqus para ser analizados posteriormente.

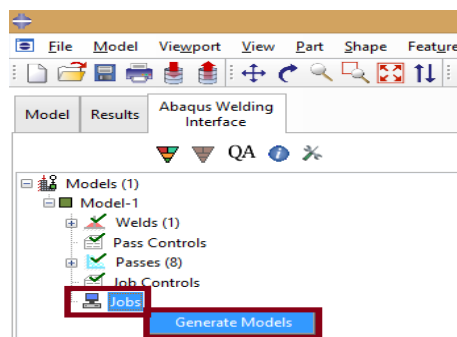


Fig. B35. Generación de los modelos de análisis para ser presentados en Abaqus.

VI. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

En este apartado se presenta la forma en que se muestran los resultados en Abaqus. Los pasos para ello son:

- 1) En el panel izquierdo dar clic en la pestaña *Model*, en ella, en la opción *Job*, dar clic en el signo “+” que se encuentra junto a ella para desplegar los elementos de análisis que fueron generados en el apartado anterior tanto el análisis de transferencia de calor como el análisis mecánico con los nombres que se les asignaron anteriormente según la Fig. B36a; luego dar clic derecho en el análisis de transferencia de calor y en el menú contextual que aparecerá, dar clic en *Submit* según la Fig. B36b, al hacerlo comenzará el análisis de transferencia de calor y junto al nombre del *Job* se mostrará el porcentaje de análisis de éste; al completarse dicho análisis, repetir este proceso para el análisis mecánico.

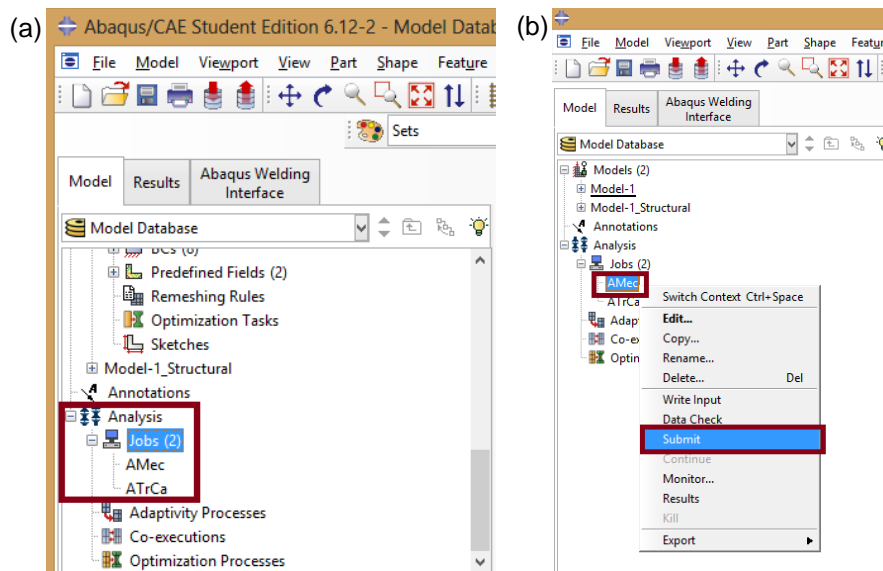


Fig. B36. Ejecución del análisis de transferencia de calor y análisis mecánico: (a) localización del *Job* para la realización de la simulación, y (b) Ejecución del análisis.

- 2) Luego de realizados los dos análisis se procede a verificar los resultados, para ello, en el panel izquierdo dar clic derecho sobre el nombre del análisis

mecánico y en el menú contextual que se presenta dar clic en *Results* según la Fig. B37a, al realizarlo se presentará una pantalla con los resultados, en el panel de herramientas, dar clic en el botón *Plot Contours on deformed shape* para que se presenten los resultados del análisis mecánico según la Fig. B37b; para cambiar entre resultados de esfuerzos, deformaciones, transferencia de calor y temperaturas; en la barra de herramientas estándar, se puede variar entre estos de la como se presenta en la Fig. 38a y B38b.

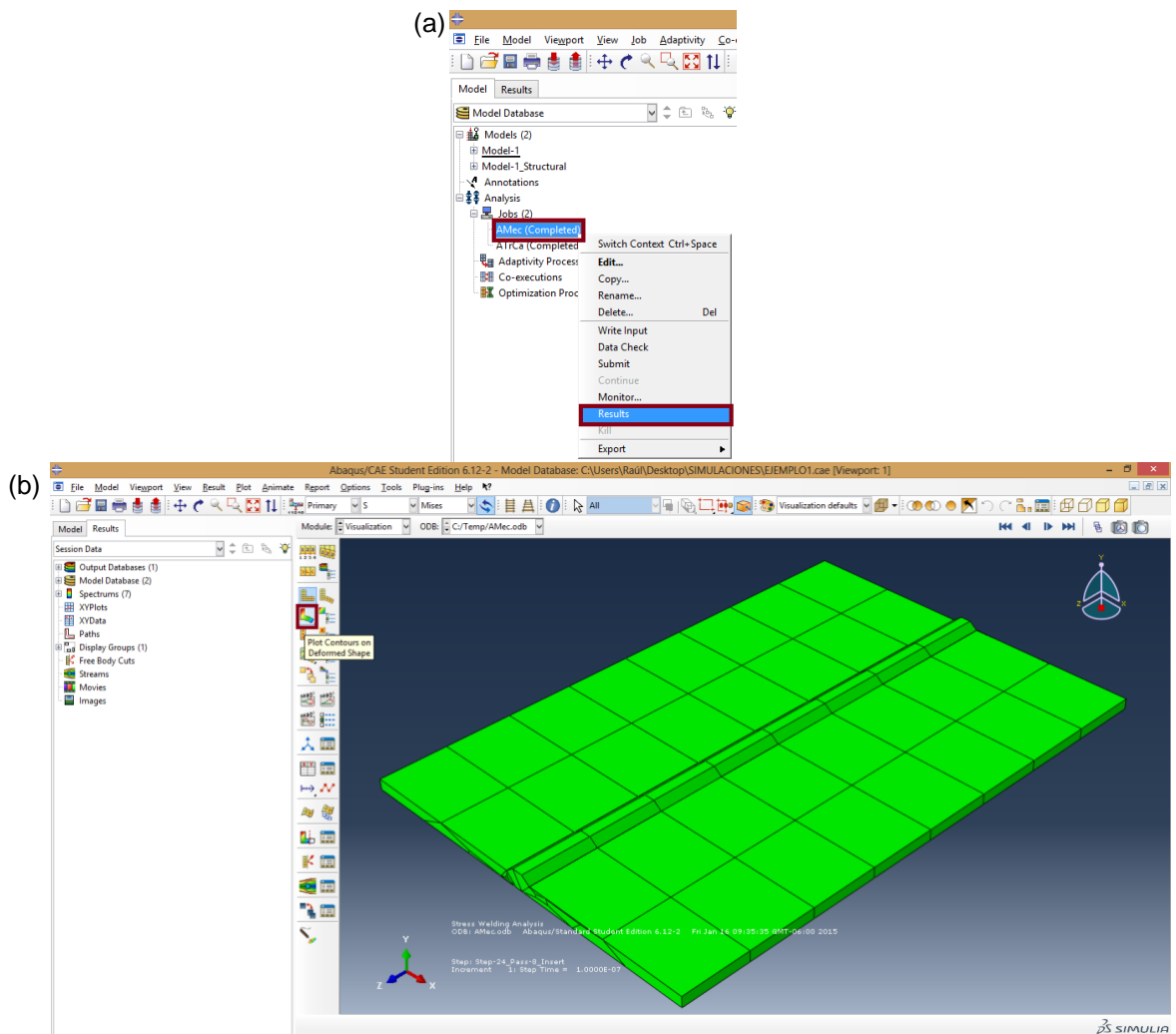


Fig. B37. Presentación de resultados de la simulación: (a) Apertura de los resultados, y (b) Ventana de resultados iniciales.

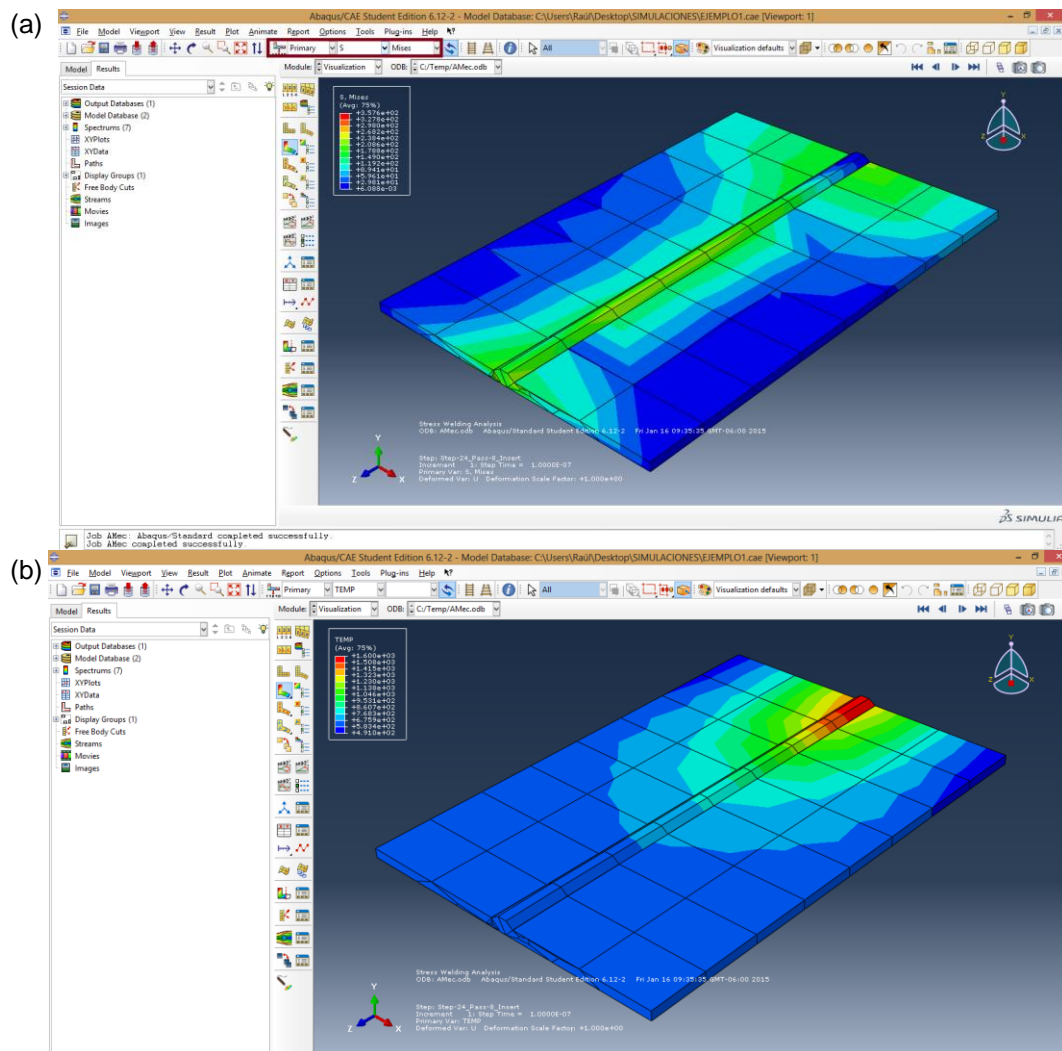


Fig. B38. Vista de la ventana de resultados: (a) Resultados del análisis de esfuerzos, y (b) Resultados de Temperaturas durante el proceso de soldadura.

Nota: Posteriormente se pueden seguir haciendo análisis más complejos de juntas soldadas a medida el usuario se vaya familiarizando con Abaqus.

REFERENCIAS

- 3ds. (2014). *Dassault Systemes*. Obtenido de <http://www.3ds.com>
- Software: Simulia Abaqus/CAE 6.12 Student Edition

ANEXO C: GUÍA DE GENERACIÓN DE DATOS PARA ELABORACIÓN DE
PERFILES TÉRMICOS DE JUNTAS SOLDADAS SIMULADAS
MEDIANTE ABAQUS/CAE 6.12 STUDENT EDITION



**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
DEPTO. DE MATERIALES Y PROCESOS DE FABRICACIÓN
ASIGNATURA:**

**GUÍA DE GENERACIÓN DE DATOS PARA ELABORACIÓN DE PERFILES
TÉRMICOS DE JUNTAS SOLDADAS SIMULADAS MEDIANTE
ABAQUS/CAE 6.12 *STUDENT EDITION***

INTRODUCCIÓN

El procesamiento de los datos de análisis tanto térmico como mecánico, y de los resultados preliminares obtenidos mediante Abaqus/CAE, es de gran importancia ya que algunos resultados se pueden presentar en forma gráfica; por ejemplo: de perfiles térmicos. Así, a continuación se presentan los pasos a seguir para la generación de una matriz de datos que puede ser exportada a un software externo que permita un adecuado tratamiento de éstos.

I. APERTURA DE RESULTADOS DEL ANÁLISIS TÉRMICO

A continuación se presentan los pasos a seguir para la apertura de los resultados del análisis térmico en Abaqus/CAE:

- 1) Abrir el archivo donde se ha realizado la simulación en Abaqus/CAE.
- 2) En el panel izquierdo, en la categoría *Jobs*, dar clic derecho sobre el *Job* generado donde se procesaron los datos del análisis térmico y luego dar clic en *Results* según se presenta en la Fig. C1.

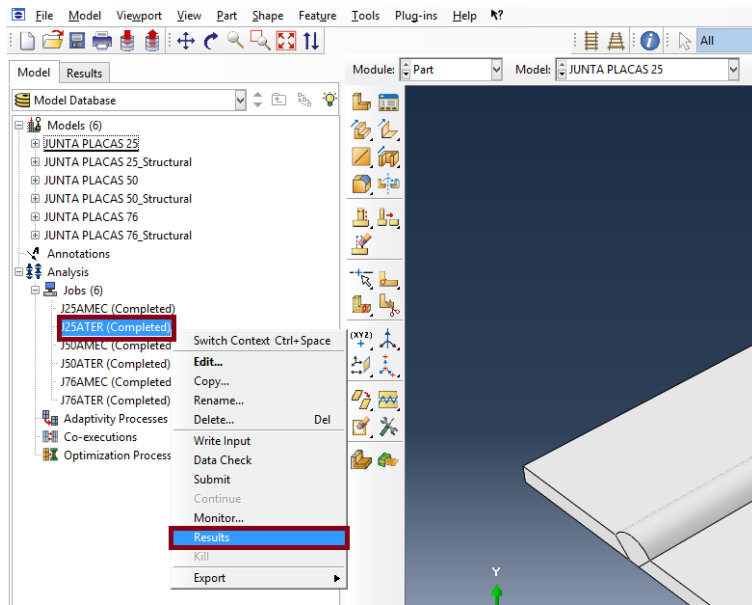


Fig. C1. Pantalla para abrir resultados de simulación luego del procesamiento de datos por parte de Abaqus/CAE

3) Se abrirá el módulo *Visualization* según se presenta en la Fig. C2. En el panel izquierdo, dar clic en el signo “+” junto a *Output Databases*, esto desplegará el listado de los *Jobs* analizados; dar doble clic sobre el *Job* del análisis térmico, como se presenta en la Fig. C3 para abrir la base de datos generada por Abaqus/CAE.

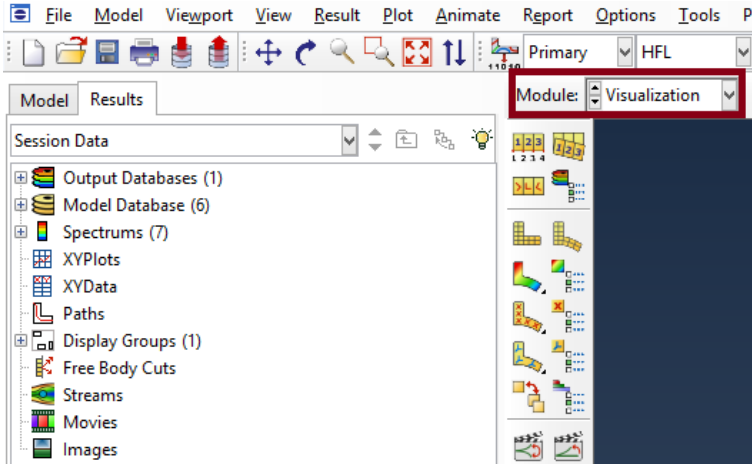


Fig. C2. Módulo *Visualization* de Abaqus/CAE donde se presentan los resultados del análisis térmico.

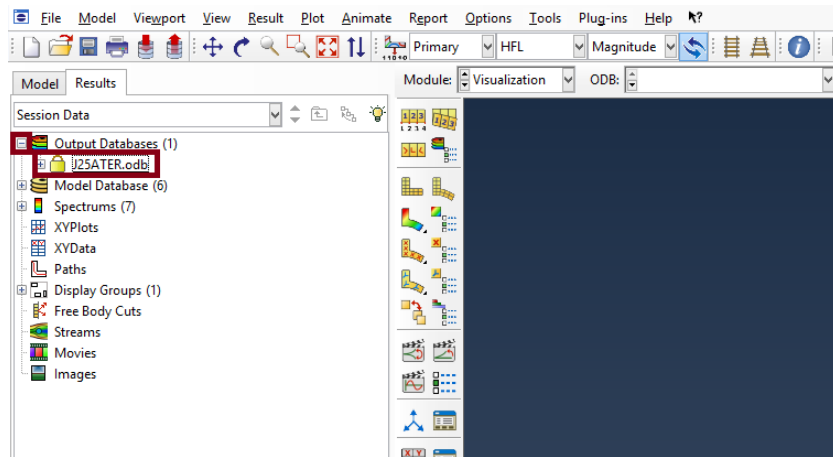


Fig. C3. Apertura de la base de datos de los resultados de análisis térmico.

- 4) En la barra de herramientas estándar, cambiar los resultados de Flujo de calor (HFL) por los datos NT11 los cuales son los valores de temperaturas según se presenta en la Fig. C4; luego, se desplegará una pantalla donde se presentarán los datos de temperatura en forma gráfica como se presenta en la Fig. C5.

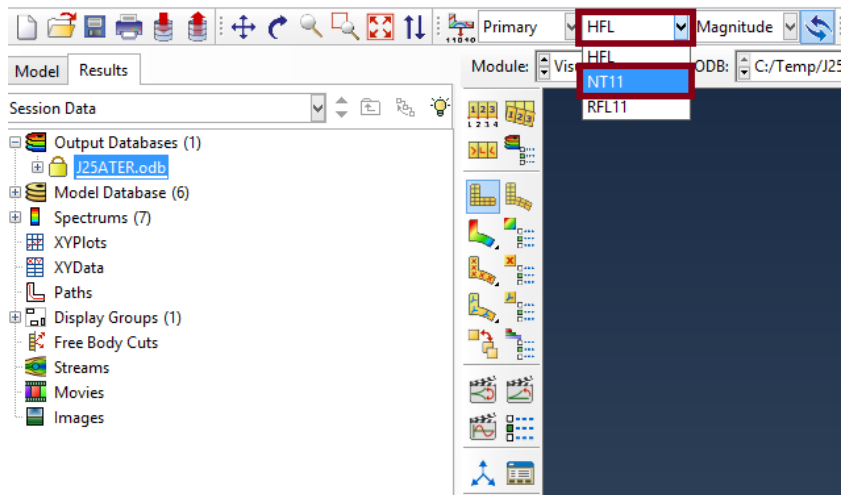


Fig. C4. Cambio de resultados presentados en pantalla por resultados de temperaturas.

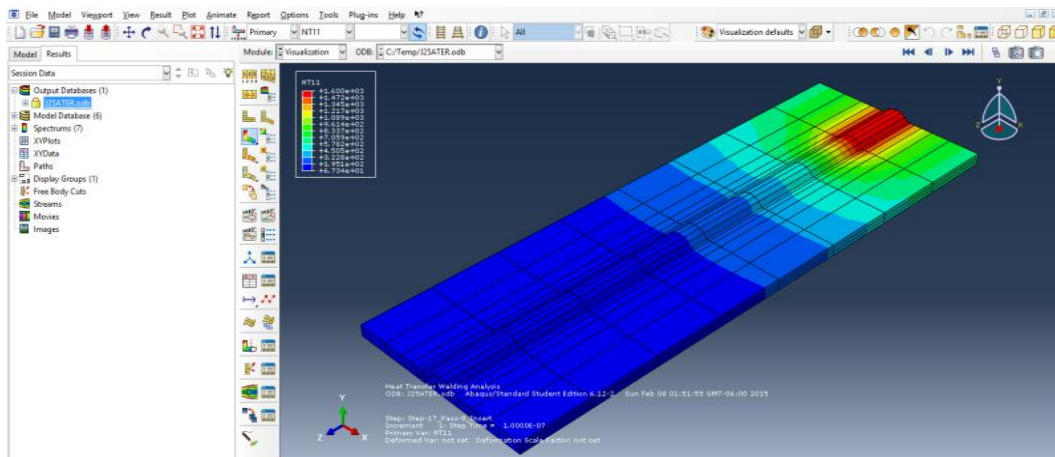


Fig. C6. Visualización de resultados de temperaturas.

II. DEFINICIÓN DE LOS PUNTOS DE INTERÉS DEL MODELO PARA OBTENER DATOS

A continuación se presenta la definición de los puntos a los que se requiere conocer los valores de temperatura y utilizarlos para la elaboración de perfiles térmicos:

- 1) Una vez presentados los resultados de temperatura en pantalla, en el panel izquierdo dar clic derecho en *Paths* y en el menú contextual que aparece en pantalla, dar clic en *Create*, según se presenta en la Fig. C6.

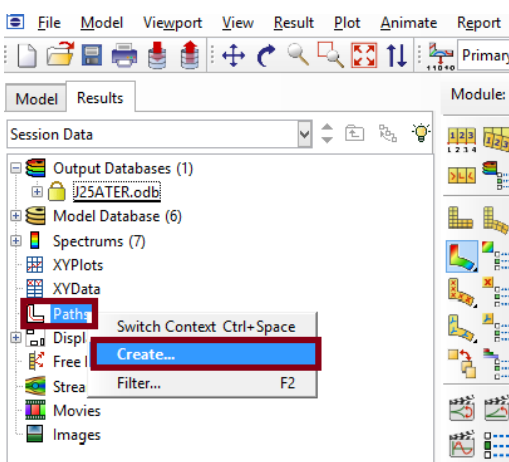


Fig. C6. Definición de puntos de interés para extraer datos.

- 2) En la ventana que se despliega, en el campo *Name* escribir el nombre que se le asignará al grupo de puntos, verificar que en el campo *Type* se encuentre seleccionada la opción *Node list* y luego dar clic en *Continue* según se presenta en la Fig. C7.

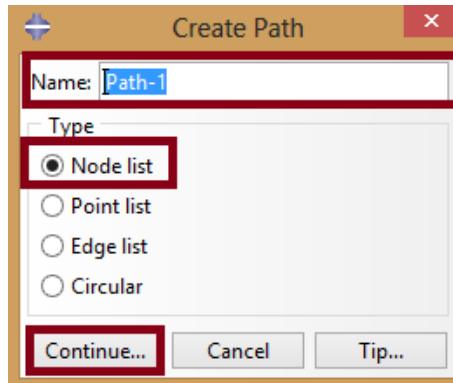


Fig. C7. Ventana *Create Path* de Abaqus.

- 3) Se desplegará la ventana *Edit Node List Path*, en ella dar clic en *Add Before* según se presenta en la Fig. C8.

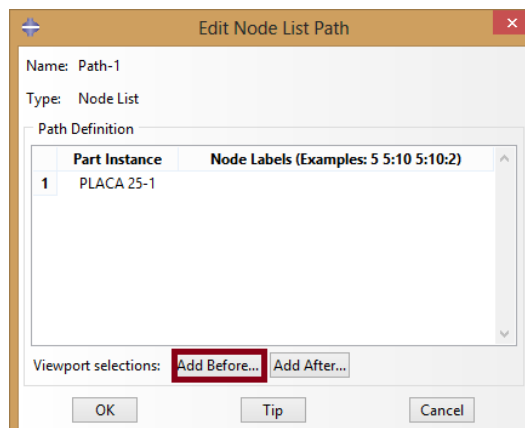


Fig. C8. Ventana *Edit Node List Path* de Abaqus.

- 4) En la ventana del modelo, seleccionar los puntos de interés del elemento dando clic sobre cada uno de ellos y luego dar clic en el botón *Done* de la barra de estado, de la manera que se presenta en la Fig. C9.

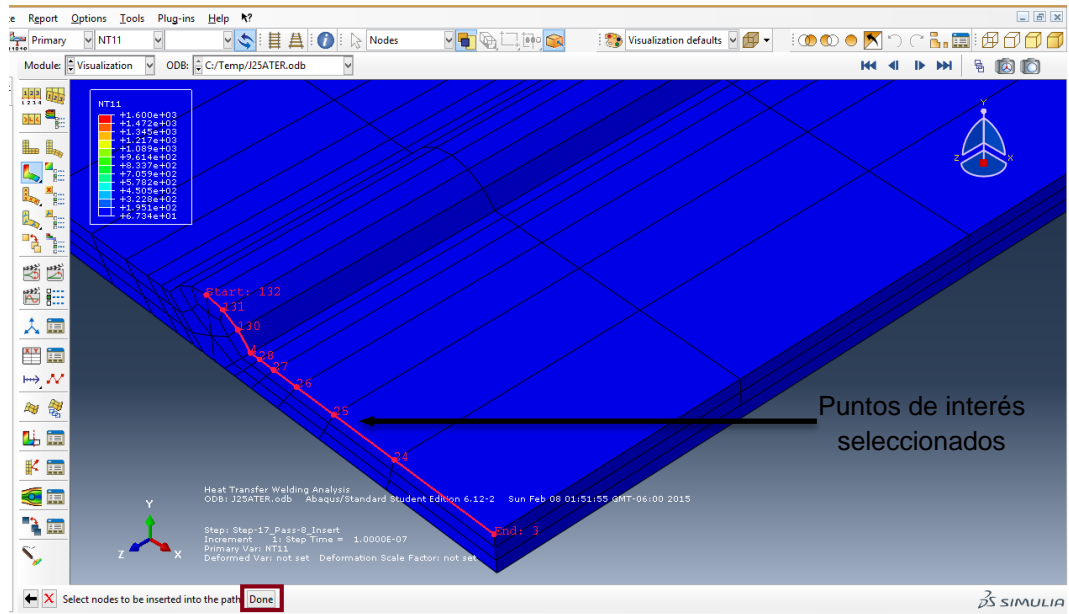


Fig. C9. Selección de puntos de interés del modelo.

- 5) Se desplegará nuevamente la ventana *Edit Node List Path* con nuevos datos en el campo *Node Labels*, en ella dar clic en *Ok* según se presenta en la Fig. C10.

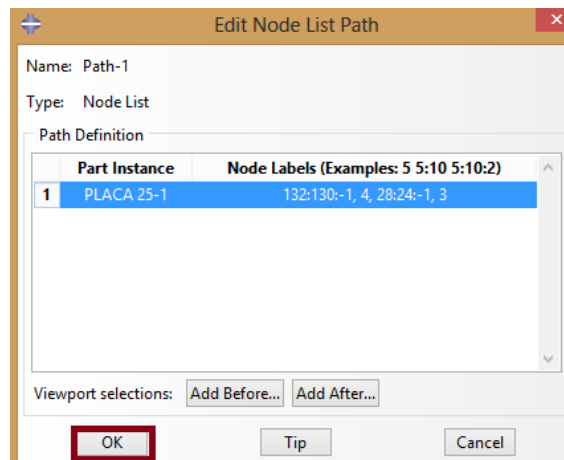


Fig. C10. Ventana *Edit Node List Path* de Abaqus con puntos o nodos de interés seleccionados.

III. GENERACIÓN DE LA MATRIZ DE DATOS DE TEMPERATURAS PARA ELABORACIÓN DE PERFILES TÉRMICOS

Luego de definidos los puntos de interés, se procede a la generación de la matriz de datos de cada uno de los puntos de interés. Los pasos se enlistan a continuación:

- 1) En el panel de herramientas de Abaqus, dar clic en el botón *Create XY Data* según se presenta en la Fig. C11.

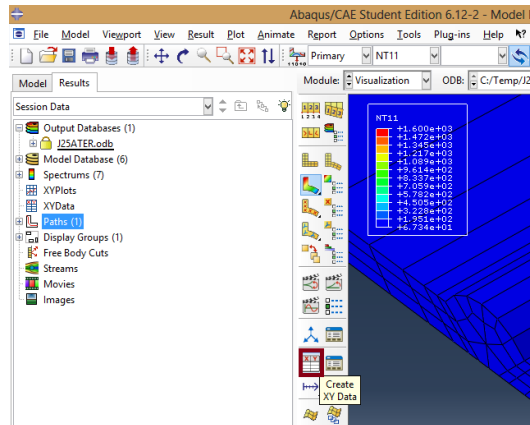


Fig. C11. Inicio de la generación de la matriz de datos para elaboración de perfiles térmicos.

- 2) Se desplegará la ventana *Create XY Data*, en ella seleccionar la opción *Path* y dar clic en el botón *Continue* según se presenta en la Fig. C12.

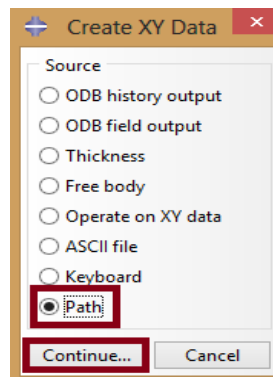


Fig. C12. Ventana *Create XY Data* de Abaqus/CAE.

- 3) Se desplegará la ventana *XY Data from Path*, primeramente verificar que se encuentre seleccionado el *Path* que se creó previamente, y luego dar clic en el botón *Step/Frame* según se presenta en la Fig. C13.

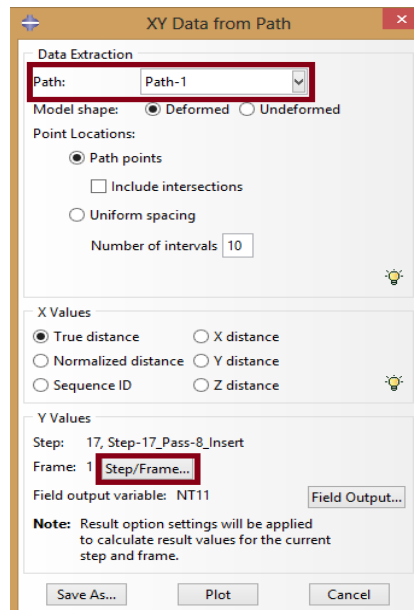


Fig. C13. Ventana *XY Data from Path* de Abaqus/CAE.

- 4) En la ventana que se despliega, seleccionar el *step* que contenga el *Pass* para el cual se desean los datos de temperaturas; es decir, el tiempo transcurrido desde el inicio de la simulación para el cual se desean los datos y luego dar clic en *OK* según se presenta en la Fig. C14.

Nota: El tiempo transcurrido desde el inicio de la simulación al *Pass* seleccionado dependerá de la definición realizada para los intervalos de tiempo definidos previamente en el *plugin AWI* durante la formulación de la simulación.

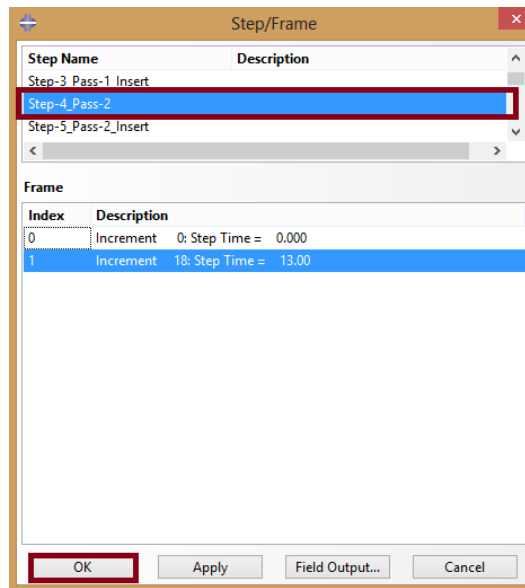


Fig. C14. Ventana *Step/Frame* de Abaqus/CAE para indicar el transcurrido desde el inicio de la simulación para el que se desea la matriz de datos.

- 5) Nuevamente se presentará en pantalla la ventana *XY Data from Path*, una vez que se ha seleccionado el *step* para el que se desean los datos, en la sección *X-Values* de dicha ventana, verificar que se encuentre seleccionado el eje coordenado en el cual se encuentra ubicados el grupo de puntos de interés (eje X para el ejemplo presentado) y luego dar clic en *Save As* según la Fig. C15.

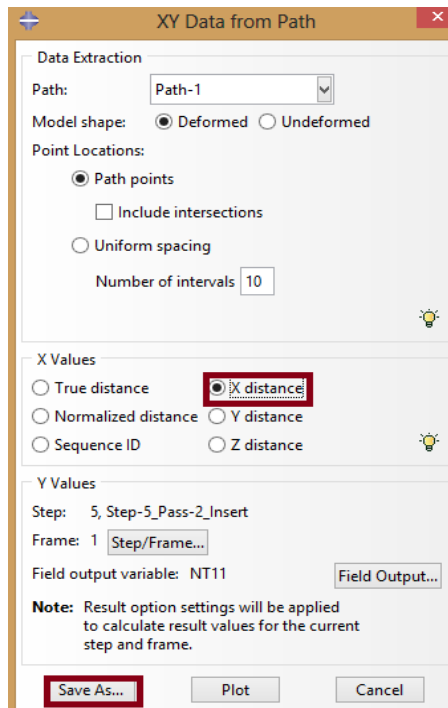


Fig. C15. Configuraciones finales en la ventana *XY Data from Path* de Abaqus/CAE.

- 6) Se desplegará una ventana solicitando el nombre que se le asignara a la matriz de datos generada, en el campo *Name* escribir el nombre de esta y luego dar clic en *OK* según se presenta en la Fig. C16.

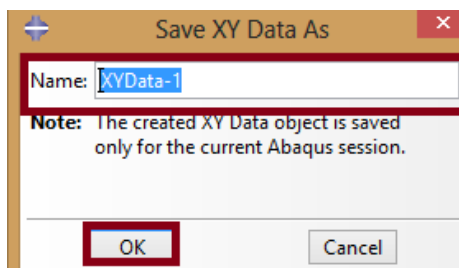


Fig. C16. Asignación del nombre a la matriz de datos generada.

- 7) Se desplegará nuevamente la ventana *XY Data from Path*, en ella dar clic en *Cancel* según se presenta en la Fig. C17.

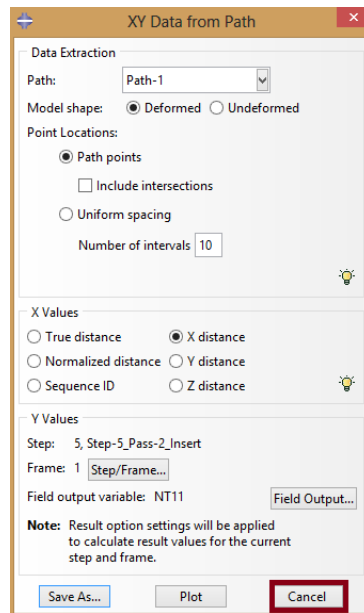


Fig. C16. Pasos finales para la generación de la matriz de datos de temperaturas.

- 8) En el panel izquierdo, dar clic en el signo “+” junto a XYData y luego en la lista que se despliega, dar clic derecho sobre el nombre de la matriz de datos que se generó anteriormente, y en el menú contextual que aparece dar clic en *Edit* según se presenta en la Fig. C17.

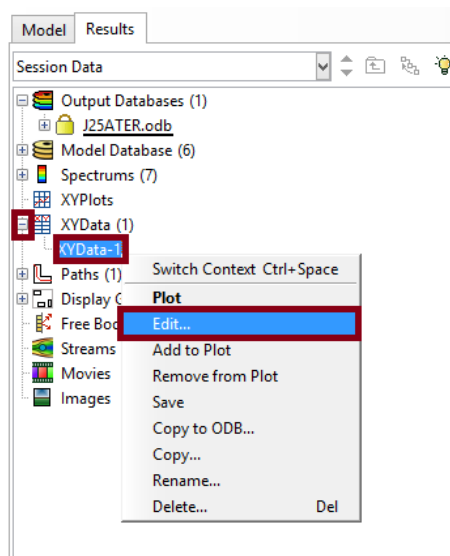


Fig. C17. Apertura de la matriz de datos generada.

9) Se desplegará una ventana donde se presentarán los datos de temperaturas de los puntos de interés para el step seleccionado según se presenta en la Fig. C18a. Para exportar estos datos a un programa externo como Microsoft Excel y elaborar los perfiles térmicos, seleccionar las celdas manteniendo presionado el botón izquierdo del mouse desplazándose entre ellas, según se presenta en la Fig. C18b y luego para copiarlas presionar la combinación de teclas Control + C en el teclado y una vez copiados los datos, dar clic en el botón OK para salir de la matriz de datos.

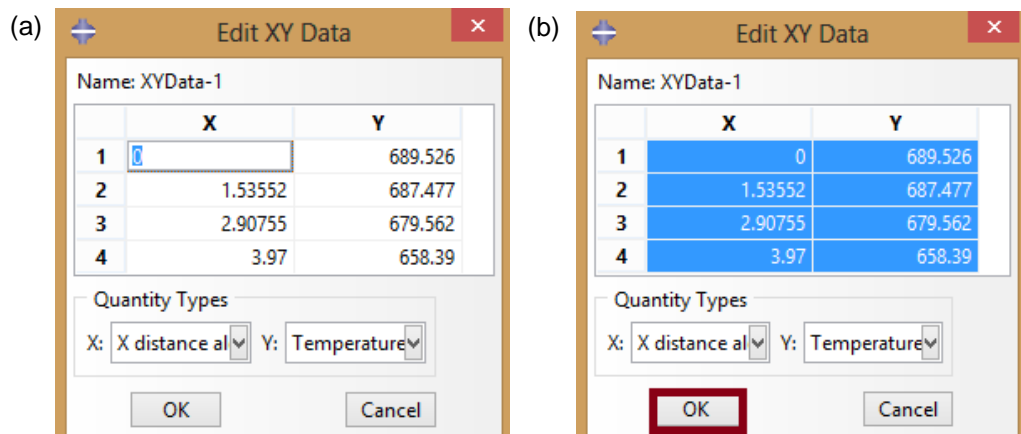


Fig. C18. Presentación de la matriz de datos de los puntos de interés: (a) Ventana de la matriz de datos y, (b) Celdas de datos seleccionadas para copiarlas y pegarlas posteriormente en otro software para elaborar los perfiles térmicos como Microsoft Excel.

REFERENCIAS

- Software: Simulia Abaqus/CAE 6.12 Student Edition.