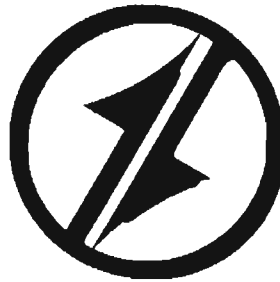


CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN DE MATERIALES

DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



**SIMULACION DEL PROCESO DE SOLDADURA SMAW
PARA ACEROS AL CARBONO**

POR

ING. ALEJANDRO HERNÁNDEZ BRIONES

MONOGRAFÍA

**EN OPCION COMO ESPECIALISTA EN TECNOLOGÍA DE
LA SOLDADURA INDUSTRIAL**

SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO, FEBRERO DEL 2008

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



**SIMULACION DEL PROCESO DE SOLDADURA SMAW
PARA ACEROS AL CARBONO**

POR

ING. ALEJANDRO HERNÁNDEZ BRIONES

MONOGRAFÍA

**EN OPCION COMO ESPECIALISTA EN TECNOLOGÍA
DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL**

SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO, DE FEBRERO DEL 2008

Corporación Mexicana de Investigación en Materiales, S.A. de CV.

Gerencia de Desarrollo del Factor Humano

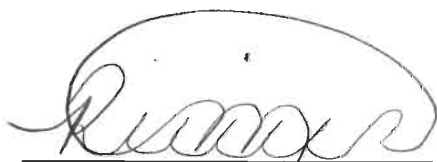
División de Estudios de Postgrado

Los miembros del Comité Tutorial recomendamos que la monografía "Simulación del proceso de soldadura SMAW para aceros al carbono", realizada por el alumno Alejandro Hernández Briones con número de matrícula 06-ES039 sea aceptada para su defensa como Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial.

El Comité Tutorial



Tutor Académico
M.C. Gabriel García Cerecero



Tutor en Planta
Ing. Roberto Méndez



Asesor
Dr. Benjamin Vargas Arista



M.C. Claudia A. González Rodríguez
Coordinador de Postgrado

INDICE

1. Síntesis.....	1
2. Objetivo.....	3
3. Justificación.....	4
4. Alcance.....	5
5. Generalidades de los sistemas CAD-CAM-CAE	
5.1. Introducción.....	6
5.2. Información en un sistema CAD.....	8
5.3. Modelado paramétrico de piezas.....	9
5.4. Sistemas de Manufactura e Ingeniería.....	9
5.5. Ventajas al implementar un sistema CAD/CAM/CAE.....	11
6. El proceso de Soldadura SMAW	
6.1. Introducción.....	12
6.2. Electrodos.....	13
6.2.1. Clasificación de los electrodos.....	14
6.2.2. Clasificación de electrodos por el revestimiento.....	15
6.3. Factores a considerar.....	17
6.4. Puntos a verificar para la calidad en la soldadura.....	18

7. Revisión bibliográfica del Sysweld	
7.1. Introducción al uso de Sysweld.....	19
7.2. Elementos de un diseño y evaluación por elemento finito	20
7.3. Desarrollo de un proyecto en Sysweld.....	25
7.3.1. Modelado de la geometría.....	27
7.3.2. Propiedades de los materiales.	29
7.3.3. Aplicaciones de carga.	28
7.3.4. Modelado del proceso	29
7.3.5. Técnicas de modelado	30
7.4. Uso del asistente (Welding Wizard) de Sysweld.....	31
8. Desarrollo de un procedimiento	
8.1. Introducción	37
8.2. Importancia de la simulación.....	38
8.3. Procedimiento general para la simulación de soldadura.....	40
8.4. Ejemplos de uniones mediante el proceso SMAW.....	52
9. Conclusiones	55
10. Bibliografía.....	57
11. Resumen autobiográfico.....	59

LISTADO DE CONCEPTOS

- 1) 2D. Dibujo en dos dimensiones trazado en el plano x,y.
- 2) 3D. Dibujo en tres dimensiones trazado en el plano x,y,z.
- 3) CAD (Computer Aided Design). Diseño asistido por computadora.
- 4) CAE (Computer Aided Engineering). Ingeniería asistida por computadora.
- 5) CAM (Computer Aided Manufacturing). Manufactura asistida por computadora.
- 6) FEM (Finite Elements Method). Método numérico para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales mediante la división del cuerpo, estructura o dominio en una serie de subdominios.
- 7) IGES (Initial Graphics Exchange Specification). Especificación para intercambio inicial de gráficos, define un formato básico de datos que permite el intercambio digital de información entre sistemas de diseño asistido por computadora CAD.
- 8) LGA (Local Análisis) Análisis de componentes.
- 9) MBA (Macro Bead Analysis) Análisis de macro gotas.
- 10) MRA (Mesh Refinement Analysis) Análisis de refinamiento de malla.
- 11)RSW (Resistance Spot Welding). Proceso que involucra la unión de dos o más piezas de metal en un área determinada mediante la aplicación de calor y presión.
- 12)SSA (Steady State Analysis). Análisis de estado estable.
- 13)SMAW (Shielded Metal Arc Welding). Soldadura de arco por electrodo revestido.
- 14)TNA (Transient Numerical Analysis). Análisis numérico transitorio.
- 15)WELDING WIZARD. Asistente de soldadura. Modulo que facilita la captura de datos a utilizar para el proceso de simulación.

1.

SINTESIS

Aunque las técnicas de CAD en 2D dan soporte a varios procesos de diseño y fabricación de productos, los rápidos avances de hoy en día en la tecnología de hardware y software ofrecen una oportunidad ideal para que los fabricantes migren del CAD en 2D al CAD en 3D. Estos sistemas permiten no sólo el diseño del producto, sino que también la simulación y prueba de funcionamiento antes de su fabricación física, por lo que se conocen como aplicaciones de ingeniería asistida por computadora (CAE – Computer Aided Engineering). [Alcalde, Diego & Artacho, 2004]

El presente trabajo define un procedimiento para la simulación mediante el uso del programa **SYSWELD**, el cual está enfocado a la simulación de procesos de soldadura y tratamientos térmicos en materiales metálicos.

El programa ofrece las metodologías de solución por elementos finitos para simular la fabricación de piezas que incluyan diversos procesos de soldadura. Aunque ofrece una interfase para crear partes geométricas o estructuras, esto no es muy sencillo, por lo cual se recomienda trabajar con otros programas del tipo CAD para mayor rapidez.

La compañía ESI Group ofrece un programa llamado Visual Mesh para generar una pieza y aplicarle una malla de puntos, compatible con Sysweld.

Las mallas mas comunes son del tipo NASTRAN© (.nas), PAMCRASH© (.pc) o ANSYS (.db).

El programa simula generalmente los procesos de soldadura por puntos (Spot -Welding), Láser, Micro alambre (GMAW), Soldadura por resistencia (RSW – Resistance Spot Welding), soldadura por arco de tungsteno con gas (GTAW), así como la soldadura por electrodo revestido (SMAW), tema de esta monografía.

El uso adecuado del mallado, y la correcta introducción de variables a utilizar, habrá de permitir una simulación exitosa para el proceso de soldadura SMAW.

2. OBJETIVO

Desarrollar un procedimiento para realizar una simulación del proceso de soldadura de electrodo revestido (SMAW – Shielded Metal Arc Welding) mediante un software de simulación como SYSWELD.

Así mismo, conocer las variables que intervienen en el proceso de soldadura SMAW: Tipo y propiedades del metal base, electrodo recomendado, longitud de arco eléctrico o la velocidad correcta al aplicar la soldadura, entre otras.

3.

JUSTIFICACIÓN

Antes de que un nuevo producto pase a la fase de producción, generalmente se realizan pruebas del prototipo para garantizar que el rendimiento del producto cumpla con las expectativas del cliente. Algunas pruebas sólo requieren simples modelos físicos, mientras que otras, como las pruebas de integridad estructural, es posible que necesiten la producción de prototipos físicos completamente funcionales.

Los prototipos completamente funcionales son caros, se demora bastante en fabricarlos y además, amplían los ciclos de desarrollo de los productos, especialmente cuando se necesitan varios prototipos. [Alcalde, Diego & Artacho, 2004]

La simulación permite eliminar muchos costos derivados del desarrollo de prototipos y sus pruebas, con un alto grado de exactitud al permitir realizar diversos análisis, pruebas a partes o componentes, incluso ensambles para conocer su funcionamiento, sus características físicas y químicas.

4.

ALCANCES

Definir un procedimiento a seguir y conocer los parámetros requeridos para llevar a cabo el proceso de soldadura SMAW mediante Sysweld. Las simulaciones tienen una larga trayectoria en la capacitación de aptitudes prácticas y su popularidad se está incrementando cada vez más. Los posibles alcances en la implementación de un software de simulación son:

1. La seguridad, ya que se eliminan situaciones de riesgo al no conocer las características del proceso.
2. La simplicidad, facilidad y compresión de tiempo que se logran con la versión "virtual" de la capacitación.
3. Contar en forma conveniente y convincente del manejo de variables que en forma real no se pueden controlar o regular tan fácilmente.
4. La descripción de las variables que intervienen en el proceso de soldadura SMAW y su importancia en la simulación.

5.

GENERALIDADES DE LOS SISTEMAS CAD-CAM-CAE

5.1. INTRODUCCIÓN.

En la actualidad, no es posible hablar del proceso de diseño sin hacer referencia al uso de aplicaciones de computadora que faciliten el diseño geométrico de las piezas del producto en forma precisa. El *diseño asistido por computadora*, abreviado **CAD (Computer Aided Design)**, se trata básicamente de una base de datos de entidades geométricas (puntos, líneas, arcos, etc.) con la que se puede operar a través de una interfase gráfica. Permite diseñar en dos o tres dimensiones mediante geometría alámbrica, esto es, puntos, líneas, arcos, giros, superficies y sólidos para obtener un modelo numérico de un objeto o conjunto de ellos. La figura 5.1. muestra un ejemplo de la interfase de este tipo de programas. [Alcalde, Diego & Artacho, 2004]

Se denomina herramientas de diseño asistido a un conjunto de herramientas que permiten el diseño asistido por computadora: **CAD**, la *manufactura asistida por computadora (CAM - Computer Aided Manufacturing)* y la *ingeniería asistida por computadora (CAE - Computer Aided Engineering)*. Dichas herramientas han sido implementadas en los ámbitos científico e industrial en los últimos 10 años.

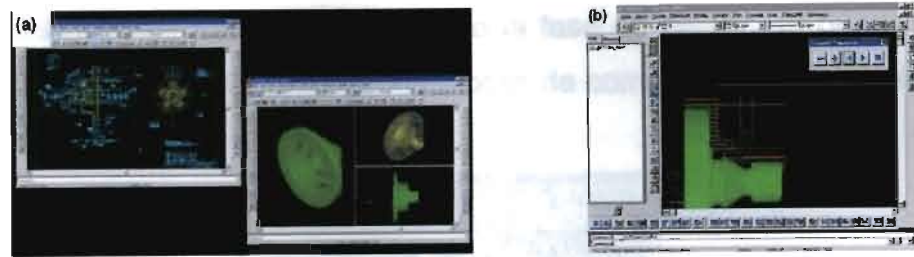


Figura 5.1. (a) Software CAD para modelar piezas (Diseño) y (b) Software CAM para generar trayectorias de herramientas a partir de una pieza (Manufactura) [Alcalde, Diego & Artacho, 2004]

Inicialmente estos programas se limitaban a pequeñas aplicaciones centradas en el dibujo técnico en dos dimensiones que venían a sustituir el tradicional tablero de dibujo, ya que ofrecía ventajas para la reproducción y conservación de los planos y reducía el tiempo de dibujo, permitiendo además usar elementos repetitivos y agilizar los cambios.

Sus comienzos se vieron frenados por estar destinados a un grupo de usuarios muy reducido ya que requerían de un hardware muy potente; por no hablar de la resistencia de muchos profesionales a adoptar estas tecnologías.

Pero su potencial, el incremento de potencia del hardware y la importancia de las empresas que los usaban, permitieron que poco a poco estas herramientas alcanzaran las tres dimensiones. Se incluyeron curvas complejas, superficies y sólidos; hasta llegar a los complejos sistemas asociativos y paramétricos que permiten realizar todo el diseño de un automóvil o un avión, someterlos a pruebas de choque, temperaturas, etc.

Se pudieron elaborar prototipos para pruebas y posteriormente la elaboración de productos mediante la programación y control de las máquinas. La figura 5.2. muestra un ejemplo de la simulación del proceso de maquinado.

Todo ello en tiempos mínimos y sin aumentar el costo de fabricación.

Actualmente estos sistemas están conectados a los sistemas de gestión y producción de tal forma que ya desde la fase de diseño se puede saber el costo del producto final, controlar los stocks de componentes y materiales para su fabricación.

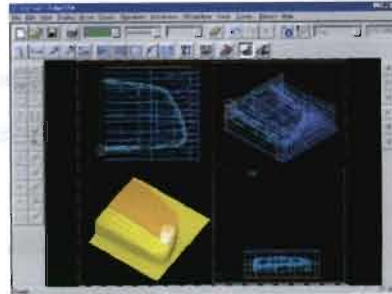


Figura 5.2. Simulación del proceso de maquinado: algunos programas incluyen relieves y acabados, así como el análisis de resistencia del material. [Alcalde, Diego & Artacho, 2004]

5.2. INFORMACIÓN EN UN SISTEMA CAD.

La capacidad productiva y el rendimiento de los equipos de diseño presentan las siguientes características:

1. Capacidades de diseño 3D en forma más rápida y en aplicaciones directas (visualización, sombreado, operaciones de unión o substracción y la simulación)
2. Ensamble de piezas
3. Asociatividad de los dibujos 2D y 3D
4. Ingeniería inversa
5. Desarrollo de productos mediante el diseño cooperativo o concurrente (vía Intranet e Internet)

Los programas CAD tienden a integrarse con los sistemas CAM/CAE para fabricación e ingeniería de tal manera que formen parte de la automatización integrada en los procesos industriales y pasen a convertirse en un medio de acceso y gestión de la información. [ESI Group, 2007]

5.3. MODELADO PARAMÉTRICO DE PIEZAS.

Es posible empezar a modelar una pieza sin conocer en forma exacta sus dimensiones ni sus características definitivas, también es posible establecer ciertas relaciones geométricas entre los elementos del modelo. El software CAD es paramétrico; es decir, trabaja con las dimensiones de la pieza: al modificar alguna característica o medida de la pieza, ésta habrá de actualizarse en forma automática. La filosofía del diseño por computadora es el siguiente:

- a) Trabajar con diversas partes que componen el producto final. En cada una de ellas se establecen los parámetros o valores individuales a manejar, pudiendo actualizarlos posteriormente.
- b) Las piezas se montan en un módulo de ensamble. En dicho módulo se puede verificar la existencia de interferencias entre piezas y el funcionamiento del ensamble.
- c) Realizar en forma adicional análisis que la pieza requiera (esfuerzos, desgaste, etc.) así como la simulación de funcionamiento y presentación realista.

5.4. SISTEMAS DE MANUFACTURA E INGENIERÍA.

Cuando un diseño involucra piezas de responsabilidad que deben realizar alguna tarea bajo cargas, verificar el funcionamiento de un mecanismo en condiciones de trabajo, o simular ciclos de servicio; se suele recurrir a programas de cálculo y análisis mecánico. La ventaja de un sistema que disponga de estos módulos ya integrados facilita el proceso de manufactura completo. *Pro/Engineer* dispone de un módulo de análisis mecánico llamado *Pro/Mecánica* y *Pro/FEM*, *Unigraphics* dispone de *UG/FEA* y de *UG/Scenario for Motion+*, *SolidWorks* trabaja con *Working Model* y *COSMOS*, así como *AutoCAD* trabaja con *Easy Kinematics*. [Cross & Trecker, 2003]

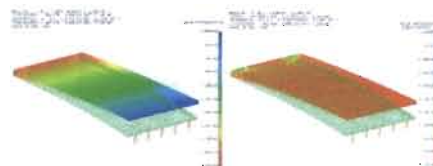
Este tipo de programas se emplea fundamentalmente para:

- a) Analizar la pieza estructuralmente y comprobar su funcionalidad en condiciones de servicio.
- b) Determinar el material adecuado para la pieza, dadas las cargas.
- c) Analizar los esfuerzos en distintas posiciones, determinando la necesidad o no de redimensionar o reforzar las zonas críticas.

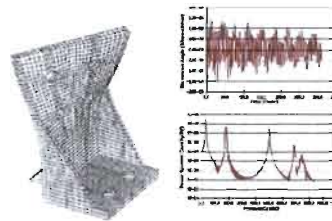
Los tipos de análisis por su clasificación son:

- ✓ *Análisis Estáticos / Dinámicos*
- ✓ *Análisis Lineales / No lineales*
- ✓ *Análisis Producto / Proceso / Producción*

En la figura 5.3. se muestran algunos ejemplos de tipos de análisis que se pueden realizar.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.3. Ejemplos de análisis y simulaciones posibles mediante sistemas CAE: (a) Análisis estático, (b) Análisis dinámico y (c) Simulación de procesos.[Cross & Trecker, 2003]

Es necesario pasar la geometría creada en el entorno CAD al sistema CAM/CAE. Esto se lleva a cabo mediante la conversión a un formato común de intercambio de información gráfica, como por ejemplo IGES.

Usualmente se trabaja con el **método de elemento finito**, siendo necesario mallar la pieza en pequeños elementos. Este método permite la búsqueda de una solución aproximada lo suficientemente válida. Así, se puede determinar que grosor de material es necesario para resistir cargas de impacto especificadas en normas, o bien conservando un grosor, analizar el comportamiento de materiales con distinto índice de dureza. Otra aplicación importante de estos sistemas es el diseño de moldes, el maquinado y la variación de temperaturas durante el proceso. [Cross & Trecker, 2003]

5.5. Ventajas al implementar un sistema CAD/CAM/CAE.

Al implementar un sistema que integre el proceso de diseño y manufactura se obtienen las siguientes ventajas:

- 1. Disminución del ciclo de producción*
- 2. Integración de la ingeniería en las áreas de diseño, análisis y fabricación*
- 3. Incrementa la productividad*
- 4. Disminuye tiempos de dirección de procesos*
- 5. Planificación eficiente y control de calidad*
- 6. Mejora el control de procesos productivos*
- 7. Mayor precisión y rapidez durante la creación de diseños*

6.

EL PROCESO DE SOLDADURA SMAW

6.1. INTRODUCCIÓN.

El proceso **SMAW** (*SHIELDED METAL ARC WELDING*) o mejor conocido como soldadura por electrodo revestido, emplea el paso de un arco eléctrico a través de un electrodo metálico y el material a soldar. Este arco eléctrico produce el calor necesario para fundir el material base y al aporte originándose la mezcla de ambos en estado líquido que al solidificarse formarán el cordón de soldadura.

Como todos los metales al calentarse, este queda expuesto al ambiente y tiende a oxidarse, por lo cual a este electrodo se le coloca un revestimiento químico, el cual dará propiedades específicas a la soldadura y formará una nube protectora contra el medio ambiente; al solidificarse el fundente, este protegerá al metal sólido de enfriamientos bruscos, así como de contaminaciones por absorción de gases. [García Sánchez, 2007]

La soldadura de electrodo revestido es, por mucho, la más ampliamente usada de los diferentes procesos de soldadura de arco. Emplea el calor del arco para fundir el metal base y la punta del electrodo consumible. En la figura 6.1. se muestra el proceso de soldadura: observe las áreas que conforman el metal base y como se ve afectada la zona por el calor.

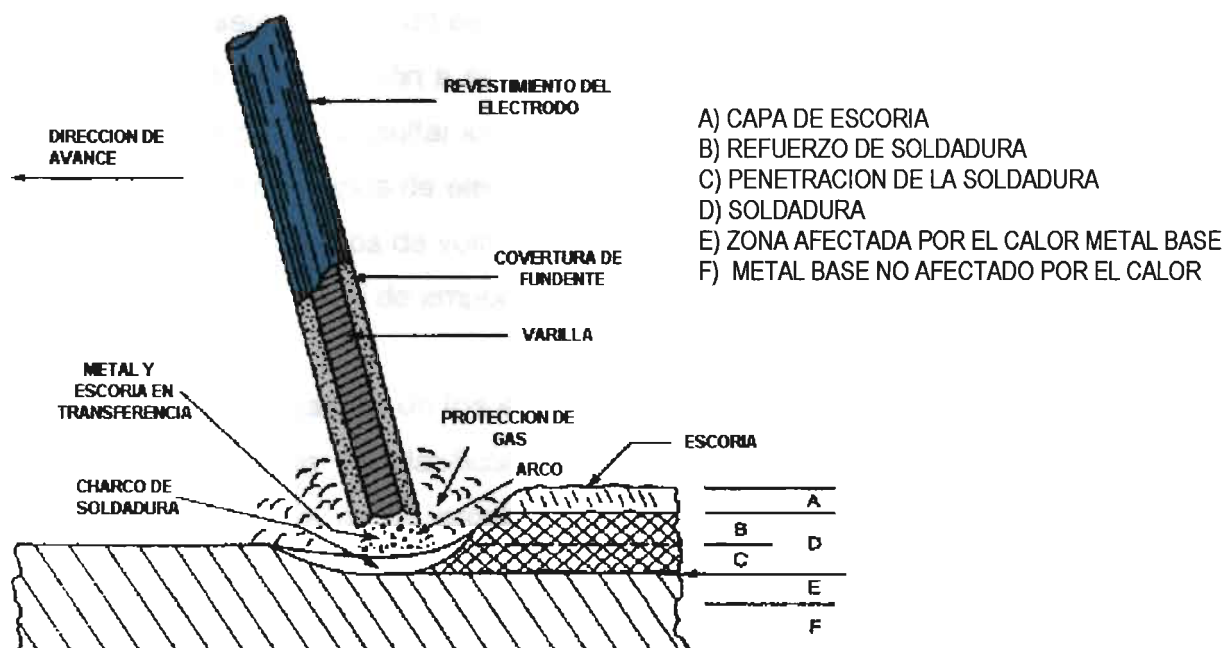


Figura 6.1. Depósito de soldadura por electrodo revestido. [García Sánchez, 2007]

6.2. ELECTRODOS.

Un electrodo es un conductor el cual uno de sus extremos cambia a medio de transmisión. Si a un conductor se le aumenta el paso de corriente se calienta y se funde, al fundirse se desprende en pequeñas gotas que una vez lejos del conductor se solidifican. Si estas gotas se depositan en otro metal se unirán a éste formando una soldadura. En la soldadura casi siempre el material del electrodo es del mismo tipo del metal base, pero en otros casos son diferentes.

Los electrodos son una mezcla de diferentes elementos metálicos y no metálicos que darán características especiales a la aleación. Los principales elementos de aleación son: Cromo, Fósforo, Molibdeno, Hidrógeno, Níquel, Silicio, Tungsteno, Oxido, Hierro, Manganeso, Vanadio, Carbono, Titanio, Azufre, Niobio, Aluminio y Cobalto. [Yancey R. & Khurana, 2003]

Para la selección de un electrodo, es necesario tomar en cuenta muchos aspectos como la proporción a emplear, sus características, entre otros; por lo que es recomendable consultar los catálogos de cada fabricante.

Los tamaños y tipos de electrodos para soldadura de electrodo revestido definen los requerimientos de voltaje del arco dentro de un rango global de 16 a 40 V y los requerimientos de amperaje dentro de un rango global de 20 a 550 A.

6.2.1. Clasificación de los electrodos.

Los electrodos se clasifican de acuerdo a su resistencia, al tipo de posición al soldar y a las propiedades del material de revestimiento. La nomenclatura general es EXXXX. [García Sánchez, 2007]

El primer y segundo dígitos indican la resistencia mínima a la tensión en ksi del metal depositado. Por ejemplo: el electrodo **E60XX** tiene una resistencia mínima a la tensión de 62,000 PSI (425 MPa).

El tercero o cuarto dígito indican la posición del electrodo a ser usado en la soldadura. Vea la tabla 6.1.

Tabla 6.1. Dígitos indicando la posición del electrodo a ser utilizado.

[Yancey R. & Khurana, 2003]

Clasificación	Posiciones
EXX1X	Plana, horizontal, vertical y sobre cabeza
EXX2X	Plana, horizontal –filete
EXX4X	Plana, horizontal, vertical descendente y sobre cabeza

El cuarto o quinto dígito indica la corriente, características o tipo de recubrimiento del electrodo.

Otros tipos de electrodos son clasificados de diferente manera, vea la tabla 6.2., la cual enlista las especificaciones de recubrimientos de metal de aporte para SMAW por la AWS.

Tabla 6.2. Especificación AWS para metal de aporte de electrodos recubiertos usados en SMAW. [Yancey R. & Khurana, 2003]

Designación	Título
A 5.1	Electrodo para aceros al carbono
A 5.3	Electrodo para aluminio y aleaciones de aluminio
A 5.4	Electrodo para aceros inoxidable
A 5.5	Electrodo recubiertos para soldadura de arco aceros baja aleación
A 5.6	Electrodo recubiertos para soldadura de arco cobre y aleaciones de cobre
A 5.11	Electrodo de soldadura para níquel y aleaciones de níquel
A 5.13	Electrodo y varilla de soldadura sólidos superficiales
A 5.15	Electrodo y varilla de soldadura para hierro gris
A 5.21	Electrodo y varilla de soldadura compuestos superficiales

6.2.2. Clasificación de electrodos por el revestimiento.

Los electrodos por su revestimiento conservan o aumentan las propiedades del depósito a realizar. Esto se debe al tipo de componentes de que este compuesto el revestimiento y el porcentaje de estos; sin embargo, todos poseen elementos en común.

Algunas características que aporta el revestimiento a la soldadura son: penetración, presentación, polaridad, mayor velocidad de depósito, evitar el chisporroteo, evitar la oxidación inmediata, mayor estabilidad del arco, entre otras.

Los electrodos se clasifican por su revestimiento en cinco tipos: Tipo Celulósico, Base Rutilo, Bajo Hidrógeno, Oxido de Hierro y Polvo de Hierro. [Yancey R. & Khurana, 2003]

1. Tipo Celulósico. Este electrodo contiene en su revestimiento 45% de celulosa. El arco eléctrico del electrodo calienta el recubrimiento descomponiendo la celulosa en CO, CO₂ y vapor de agua. Poseen otros elementos como bióxido de titanio que es formador de escoria, ferro-manganeso como desoxidante o reductor, asbesto como formador de arco y escoria, silicato de potasio como liga de compuestos y purificador y silicato de sodio como liga de compuestos.

Este tipo de electrodo forma poca escoria siendo principalmente usado en soldadura vertical descendente y altas penetraciones, efecto causado por la capa gaseosa del recubrimiento, el electrodo presenta un cordón poco vistoso por su tipo irregular y alto chisporroteo.

Su uso se debe a cordones donde es necesario obtener doble acabado (piezas que no pueden soldar por ambos lados) por ejemplo en tuberías en el cordón de fondeo y posiciones difíciles.

Son excelentes para soldar aceros con más del 0,25% de carbono.

2. Base de Rutilo. Se destacan por su tipo de acabado y facilidad de manejo, su escoria se remueve fácilmente y en algunos casos sola. Su contenido de hidrógeno es alto y no requiere un proceso de exactitud.

El nombre del electrodo es propiamente incorrecto ya que el contenido de rutilo es principalmente un bióxido de titanio. Por este tipo de revestimiento se presta el electrodo para corregir fallas en el tipo de preparación. Este electrodo se utiliza en trabajos de serie y de pocos requerimientos.

3. Bajo Hidrógeno. Este tipo de electrodo produce las soldaduras de más alta calidad debido a su bajo contenido de carbono e hidrogeno. Como elementos componentes del revestimiento tiene:

- Carbonato de Calcio: Da una reacción básica a la escoria, absorbe y neutraliza impurezas del azufre.
- Fluorita: Neutraliza las impurezas del fósforo de tipo ácido que son perjudiciales.
- Manganeso. Liga el azufre evitando los sulfuros y proporciona elasticidad a los depósitos.

Se utiliza este tipo de electrodos en aceros con alto contenido de carbono (0.25%), tal es el caso de estructuras y en construcción rígida.

4. Oxido de Hierro. Este electrodo se caracteriza por su tipo de escoria líquida (propicia para soldar en vertical descendente) y su alta velocidad de depósito y limpieza.

Posee un alto contenido de manganeso como agente reductor y liga impurezas con la asistencia de silicatos formadores de escoria.

5. Polvo de Hierro. Contiene un 50% en el revestimiento, logrando hacer depósitos de 2.5 veces el alma del electrodo. Este electrodo fue hecho para competir con los procesos semiautomáticos en la industria; el tipo de electrodos más usados son el 7018 (bajo hidrógeno) y 7024 (parecido al 7014).

6.3. FACTORES A CONSIDERAR.

Existen algunos factores que es importante considerar para una correcta selección del electrodo: el diámetro correcto, el tipo de corriente apropiada, definiendo amperaje, voltaje y la longitud de arco, la longitud de arco y el efecto que se tiene, la velocidad de avance y el ángulo de aplicación.

6.4. PUNTOS A VERIFICAR PARA LA CALIDAD EN LA SOLDADURA.

- Uso de máquinas, electrodos y accesorios de calidad.
- Conocer el tipo y propiedades del metal base.
- Selección del tipo de electrodo en base al uso final de la soldadura y la junta a emplear.
- Limpieza del material base (escorias, pintura, óxidos, grasas, entre otros).
- No soldar sobre fracturas o porosidad creadas por la soldadura anterior, primero remueva éstas.
- Cuando la abertura de raíz sea muy grande, primero repare ésta.
- Poner atención especial en el primer pase de penetración a raíz.
- Remover la escoria del cordón depositado anteriormente hasta que se vaya a realizar el paso siguiente sobre éste. En caso de haber paso siguiente, entonces hasta que este enfríe.
- Observar las dimensiones de la soldadura requerida y asegurarse de obtenerlas.
- Inspeccionar el trabajo inmediatamente, identificar si hay defectos y repararlos inmediatamente.
- Asegurarse que la apariencia de la soldadura sea la correcta, de lo contrario, reparar.

7.

REVISION BIBLIOGRAFICA DEL SYSWELD

7.1. INTRODUCCIÓN AL USO DE SYSWELD.

El diseño de piezas soldadas mediante el apoyo de la computadora busca minimizar o controlar la distorsión y por ende, disminuir los costos de fabricación. El control de los esfuerzos residuales a su vez, permite ampliar significativamente la vida útil de la pieza o estructura soldada. Se busca que un modelo diseñado en la computadora pueda:

- Eliminar la necesidad de correcciones costosas.
- Reducir el maquinado posterior.
- Minimizar el costo invertido en equipo.
- Mejorar la calidad.
- Permite evaluar el pre-maquinado si es necesario.

El control de esfuerzos residuales mediante un modelo puede:

- Reducir el peso de la pieza final.
- Mejorar la respuesta a la fatiga.
- Minimizar costos por servicios posteriores.

Sysweld es un programa desarrollado para los puntos anteriores.

Desarrollado por la compañía ESI Group, ofrece las metodologías de solución por elementos finitos para simular la fabricación de piezas que incluyan procesos de soldadura. Simula generalmente los procesos de soldadura por puntos (Spot -Welding), Láser, Micro alambre (GMAW), Soldadura por resistencia (RSW – Resistance Spot Welding), soldadura por arco de tungsteno con gas (GTAW), así como la soldadura por electrodo revestido (SMAW). [ESI Group, 2006]

Cuenta a su vez con un asistente para soldadura donde se usa una base de datos del material, descripción de la operación de soldadura, condiciones de unión y el establecimiento de algunos parámetros numéricos, permite generar una simulación exitosa.

Existen 2 simulaciones principales en el asistente (o Welding Wizard): Análisis termo-metalúrgico y Análisis mecánico. Sysweld simula todos los efectos físicos producidos por el calor de la soldadura. Observe la figura 7.1.

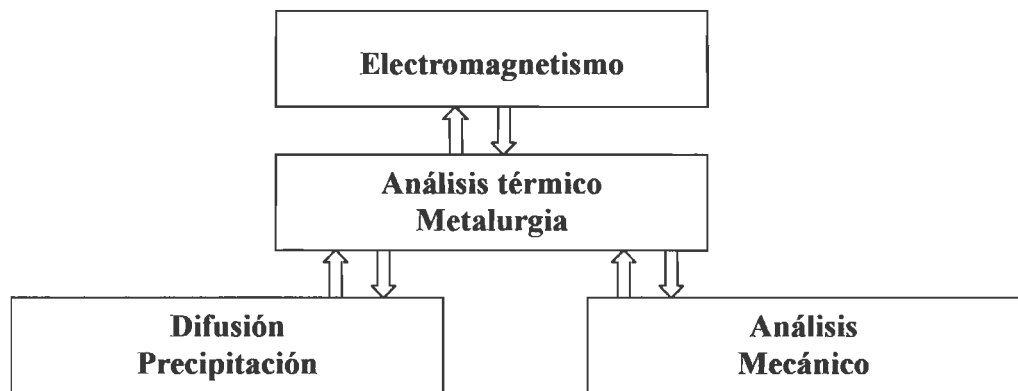


Figura 7.1. Efectos producidos por el proceso de soldadura. [ESI Group, 2007]

7.2. Elementos de un diseño y evaluación por elemento finito.

Un dibujo de ingeniería es un documento que comunica una descripción precisa de la parte (figura 7.2.). Esta descripción consiste en dibujos, palabras, números y símbolos. Juntos, estos elementos proveen información de la parte a todos los usuarios del dibujo. La información del dibujo de ingeniería incluye: [Alcalde, Diego & Artacho, 2004]

1. **Geometría** (Configuración, tamaño y forma de la parte).
2. **Tolerancias permisibles** para un funcionamiento apropiado.
3. **Relaciones críticas** de funcionamiento.
4. **Material**, tratamiento térmico, recubrimientos de la parte.
5. **Información de documentación** (número de parte, nivel de revisión).

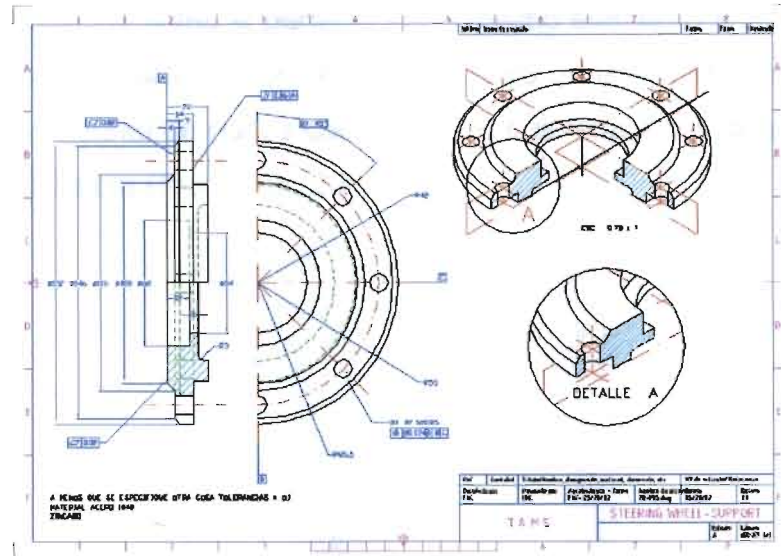


Figura 7.2. Lámina de pieza. La vista inferior muestra un corte y el material base [Alcalde, Diego & Artacho, 2004]

Existe una gran variedad de métodos cuyo objetivo es estimular la creatividad y la generación de ideas. Estos métodos actúan como un estímulo para generar ideas, soluciones y se basan en la analogía o la búsqueda de relaciones entre piezas o partes componentes. Esto permite evaluar la parte componente o el producto final para establecer los mejores métodos para su fabricación.

El método de análisis por elementos finitos.

El método de los elementos finitos (MEF en español o FEM en inglés) es un método numérico muy general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales muy utilizado en diversos problemas de ingeniería y física.

El método se basa en dividir el cuerpo geométrico, estructura o dominio (medio continuo) en una serie de subdominios no intersectantes entre sí denominados "elementos finitos". El conjunto de elementos finitos forma una partición del dominio también denominada discretización. Dentro de cada elemento se distinguen una serie de puntos representativos llamados "nodos". Dos nodos son adyacentes si pertenecen al mismo elemento finito; además, un nodo sobre la frontera de un elemento finito puede pertenecer a varios elementos. El conjunto de nodos considerando sus relaciones de adyacencia se llama "malla". [García Rodríguez, 2005]

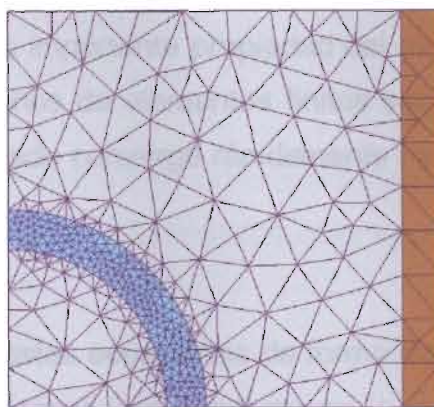


Figura 7.3. Malla 2D para una pieza, la malla es más densa alrededor del área que se desea analizar. [García Rodríguez, 2005]

Los cálculos se realizan sobre una malla o discretización creada a partir del dominio con programas especiales llamados generadores de mallas (como "Visual Mesh", también de la compañía ESI Group), en una etapa previa a los cálculos que se denomina pre-proceso. De acuerdo con estas relaciones de adyacencia o conectividad se relaciona el valor de un conjunto de variables incógnitas definidas en cada nodo y denominadas grados de libertad. El conjunto de relaciones entre el valor de una determinada variable entre los nodos se puede escribir en forma de sistema de ecuaciones lineales. La matriz de dicho sistema de ecuaciones se llama matriz de rigidez del sistema. El número de ecuaciones de dicho sistema es proporcional al número de nodos.

Típicamente el método de los elementos finitos se programa por computadora para calcular el campo de desplazamientos y, posteriormente, a través de relaciones cinemáticas y constitutivas las deformaciones y tensiones respectivamente, cuando se trata de un problema de mecánica de sólidos deformables o más generalmente un problema de mecánica de medios continuos.

El método de los elementos finitos es muy usado debido a su generalidad y a la facilidad de introducir dominios de cálculo complejos (en dos o tres dimensiones). Una importante propiedad del método es la convergencia; si se consideran particiones de elementos finitos sucesivamente más finas, la solución numérica calculada converge rápidamente hacia la solución exacta del sistema de ecuaciones.

La resolución de estas ecuaciones de forma discreta se realiza de forma iterativa hasta que se alcanza convergencia en la solución. Las herramientas que permiten realizar este proceso de forma eficiente se denominan herramientas de análisis por elementos finitos.

Existen herramientas de análisis por elemento finito de propósito general o multidisciplinar que permiten resolver varios problemas físicos como son: mecánica de fluidos, transmisión del calor, electromagnetismo, mecánica estructural, entre otras y las herramientas de análisis por elemento finito que se aplican a un problema físico específico.

Hay herramientas que permiten incluso acoplar dos problemas como es el caso del problema térmico y electromagnético. Es decir, la salida de un problema se emplea como entrada en el otro problema y viceversa, de forma iterativa.

Los pasos básicos para elaborar un proyecto mediante análisis por elemento finito son:

1. Geometría o estructura a estudiar,
2. Especificación del problema específico a estudiar,
3. Asignación de las propiedades físicas de los materiales y de contorno,
4. Aplicación de las cargas,
5. Mallado de la geometría,
6. Resolución del problema y
7. Análisis de la solución.

Sysweld provee una solución automática para problemas de soldadura, cubriendo todos los tópicos de matemáticas complejas y propiedades físicas de los materiales.

Dependiendo de la temperatura, fases y la proporción química de cada material a trabajar, se pueden determinar características metalúrgicas como:
[ASM, 2006]

1. Cambios microestructurales.
2. Difusión y precipitación de los componentes de la aleación.
3. Transformación de fases.
4. Deformación plástica.
5. Dureza.
6. Propiedades del material dependiendo de la temperatura.
7. Fases presentes.
8. Concentración de los elementos químicos del material.

7.3. DESARROLLO DE UN PROYECTO EN SYSWELD.

Para desarrollar un proyecto en Sysweld, existen varias consideraciones con los archivos a utilizar:

1. Para cálculos internos como tratamiento térmico o soldadura, el archivo de salida es del tipo .DAT.
2. Si es un registro de errores durante el cómputo, es del tipo .LOG.
3. Para cada cálculo Sysweld genera archivos diferentes, por ejemplo el archivo NAME_TRAN1000.TIT (conteniendo el resultado de todos los nodos) y NAME_DATA1000.TIT para cálculos y resultados obtenidos en cada nodo, por grupos o subgrupos evaluados.
4. Los archivos Postprocessing, usados comúnmente en la simulación de operaciones físicas, se generan como NAME_POST1000.fdb.
5. Comúnmente, cuando se usa el asistente y se tiene una prueba exitosa, se generan archivos automáticamente para propiedades térmicas y mecánicas resultantes.

La figura 7.4. muestra el ciclo de proceso al trabajar con el programa:

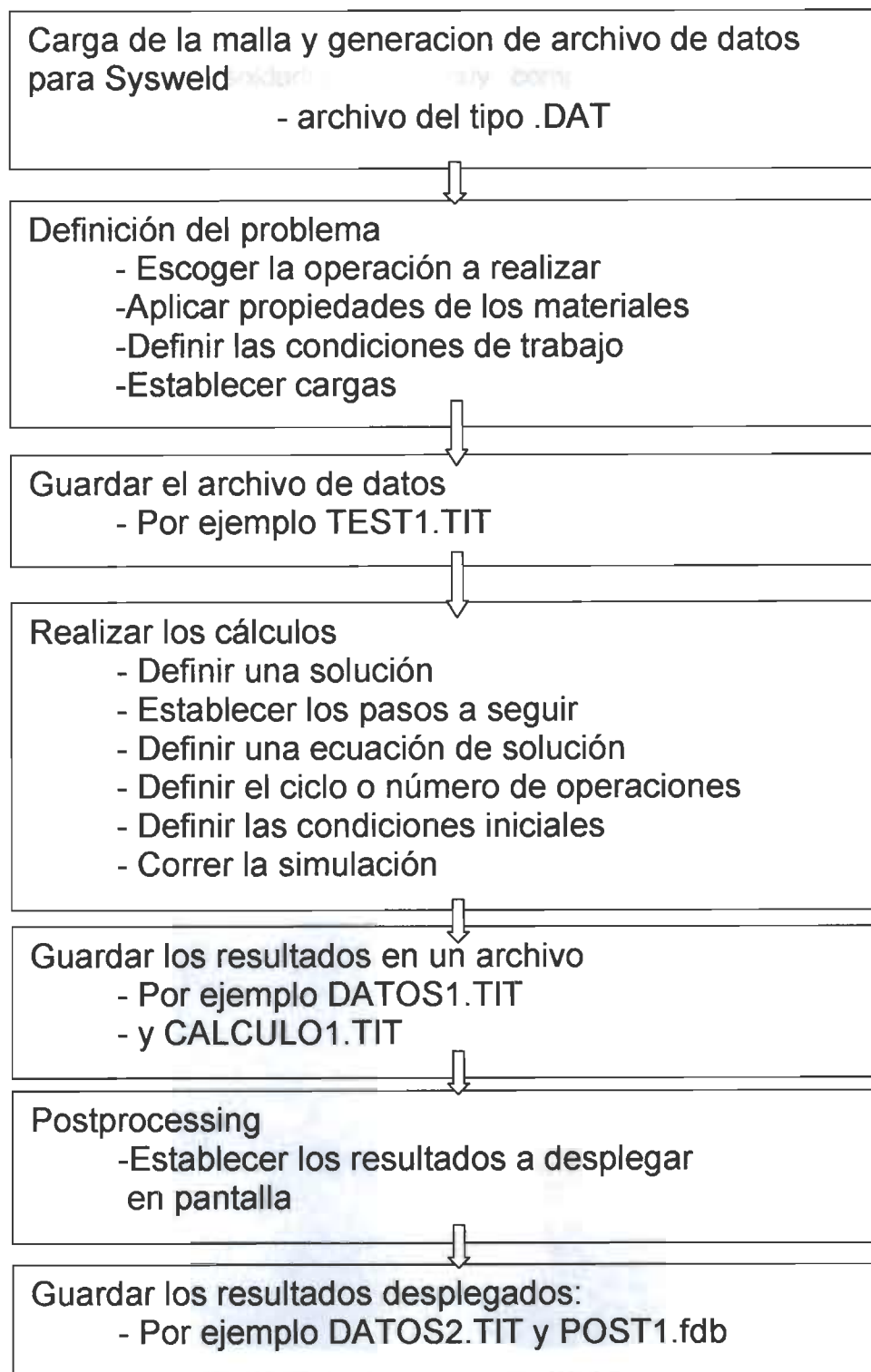


Figura 7.4. Secuencia de proceso al evaluar una pieza en Sysweld. [ESI Group, 2006]

7.3.1. Modelado de la geometría.

Los procesos de soldadura son muy complejos, ya que conllevan interacciones térmicas, metalúrgicas y mecánicas. Para tener un buen resultado en la simulación se requiere considerar los siguientes aspectos para la geometría a utilizar:

- Sysweld requiere que la pieza se maneje por nodos (Malla).
- Dependiendo de la estructura, los nodos se organizan por grupos.
- El método de discretización permite realizar cálculos con mayor precisión.
- Se puede interactuar con Visual Mesh para obtener un dibujo en 2D o 3D, en malla de alambre, de las formas de los diferentes objetos en los que se pretenden resolver las ecuaciones de campo.

La figura 7.5. muestra una malla en dos dimensiones para el proceso de soldadura SMAW. Se puede observar que donde se tiene una mayor concentración de nodos es la parte donde se habrá de realizar el análisis.

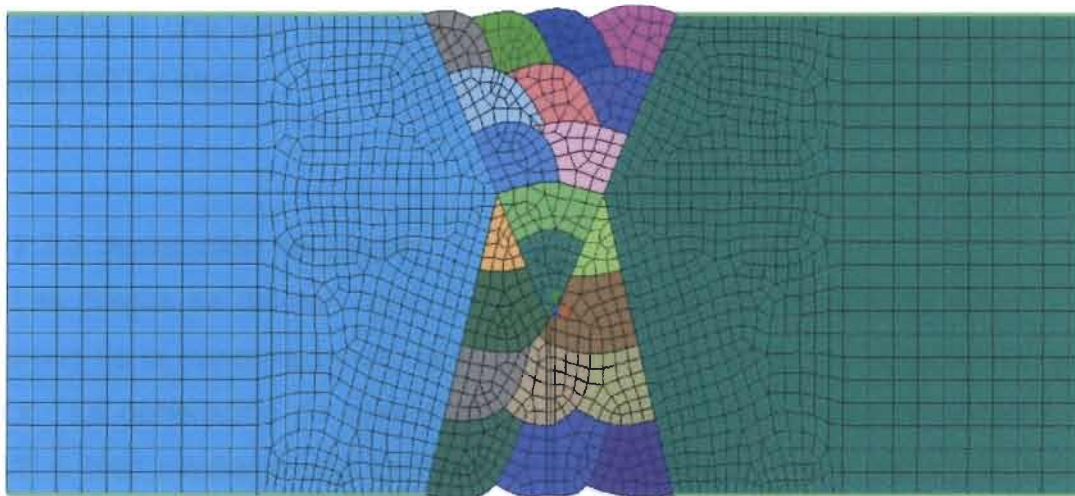


Figura 7.5. Muestra de una malla 2D típica. [ESI Group, 2006]

7.3.2. Propiedades de los materiales.

Es necesario establecer las propiedades termo-físicas tales como la conductividad térmica, la densidad y el calor específico, se asignan a cada uno de los objetos que se han generado en la fase de definición de la geometría. [ESI Group, 2006]

Suele manejarse una base de datos de propiedades de materiales, de forma que la asignación de propiedades térmicas se realice de forma más cómoda. Las propiedades típicas requeridas para simulación y que son dependientes de la temperatura, son: [ASM, 2006]

- a) Propiedades térmicas: conductividad, coeficiente de dilatación térmica, densidad, capacidad de calor específico o punto de fusión.
- b) Propiedades mecánicas: Módulos de elasticidad, datos de endurecimiento por deformación, entre otros.
- c) Propiedades metalúrgicas: Diagramas CCT y curvas de austenización.

Sysweld puede presentar diversas graficas y de acuerdo a los datos suministrados y una vez terminada la simulación: Fases de transformación, diagramas CCT y otros.

7.3.3. Aplicación de cargas.

Las cargas se definen como las fuentes activas de campo. El ejemplo mas común es la transmisión del calor, y la fuente de campo es la generación de calor. La generación de calor suele expresarse o bien mediante un valor neto [W] o bien mediante una densidad de generación de calor [W/m^3]. Si se asigna una densidad de generación de calor, ésta suele expresarse en función de las variables de espacio.

7.3.4. Modelado del proceso.

Con la finalidad de representar la fuente de calor, Sysweld usa un modelo de conductividad térmica (thermal conductivity model).

Es un modelo matemático que representa solamente 2 aspectos de la fuente de calor: la composición del metal base dependiendo de su formulación y la distribución del calor al ir aplicando el material de aporte.

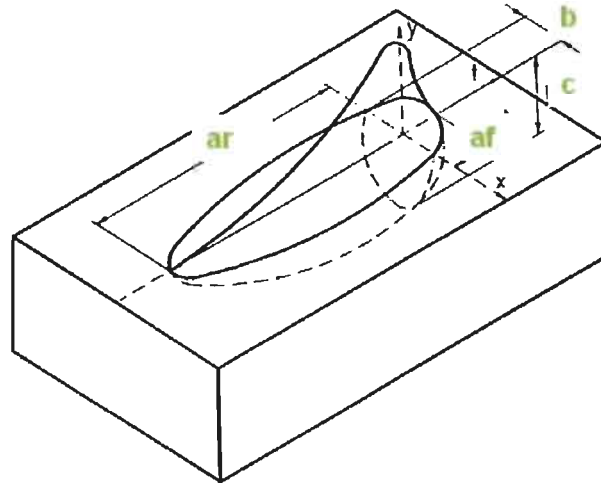


Figura 7.6. Modelo típico de conductividad, usualmente usado en procesos que involucran depósito de material: (ar) longitud del charco de soldadura, (b) radio del cordón de soldadura, (c) profundidad de la zona afectada por el calor, (d) zona afectada por el calor.

[ESI Group, 2006]

Es de gran importancia tomar en cuenta la transferencia de calor de la fuente a la pieza de trabajo y la zona fundida del metal base, conocida como solidus. Se debe poner también especial atención en la simulación termomecánica de tensiones y distorsiones que también son efectos producidos por el calor de la soldadura.

Al simular tensiones y distorsiones del metal base o pieza trabajada, se requiere que la energía térmica administrada en la práctica sea efectivamente la introducida en el componente durante la simulación, ya que esto le dará más precisión al diseño.

Esta energía puede ser llevada por medio del movimiento en el área de solidus en el componente o por medio de una transferencia analítica de la fuente de calor.

7.3.5. Técnicas de modelado.

La simulación mediante Sysweld ofrece diversos cálculos y la exactitud dependerá del tipo de técnica o método de modelado a utilizar. La selección de la técnica de modelado depende de:

1. Exactitud esperada de la simulación
2. Análisis de deformación: predictivo, minimización del grado de deformación o la tensión
3. Tamaño del modelo
4. Número de pasadas de soldadura y número de componentes del ensamble
5. Paso sencillo o múltiple al aplicar la soldadura

A continuación se mencionan las principales técnicas:

1. Análisis numérico transitorio TNA (Transient Numerical Analysis). Requiere de una fina discretización de la malla y el tamaño del modelo puede incrementarse exponencialmente según el número de pasadas y componentes del ensamble. Los resultados de la simulación muestran la temperatura, fases, la tensión y la deformación plástica.

2. Análisis de estado estable SSA (Steady State Analysis). Se requiere de una malla muy fina y la aplicación de la fuente de calor en algunos puntos específicos de la malla. Se utiliza en la soldadura de juntas, en pases largos y sencillos.

3. Análisis de macro gotas MBA (Macro Bead Analysis) Esta técnica es temporal y no usa el método de la fuente de calor en movimiento. Se utilizan ciclos termales para el calor que se aplica (Heat Input). Se aplica una capa de material de aporte entero o bien, en depósitos pequeños en secuencia.

4. Análisis de componentes LGA (Local Analysis). la junta de soldadura se evalúa en forma separada. Los efectos del componente local se aplican entonces a todo el ensamble para establecer su comportamiento.

5. Análisis de refinamiento de malla MRA (Mesh Refinement Analysis). Esta técnica es temporal y utiliza una fuente de calor en movimiento. Un corte de la malla es programado para moverse a través de la fuente de calor y refinar los nodos de la malla alrededor de la fuente de calor cuando es requerido.

7.4. USO DEL ASISTENTE (WELDING ADVISOR).

El programa cuenta con una interfase amigable conocida como Welding Advisor, que permite una metodología intuitiva y un proceso paso a paso para alimentar los datos requeridos para la simulación. Una vez que se define y se almacena un proyecto (parámetros de la pieza, proceso y material) pueden ser intercambiados fácilmente e iniciar el proceso de simulación.

Se pueden generar así mismo, dos simulaciones sucesivamente: el análisis termometalúrgico y el análisis mecánico. Puede simular una soldadura de paso con o sin depósito de material. A continuación se listan las opciones básicas a complementar para la generación del proyecto mediante el uso del asistente.

INICIO DE SESION. [6]

Para iniciar el asistente, en la pantalla principal de Sysweld se activa el menú "Application". Observe la figura 7.7.

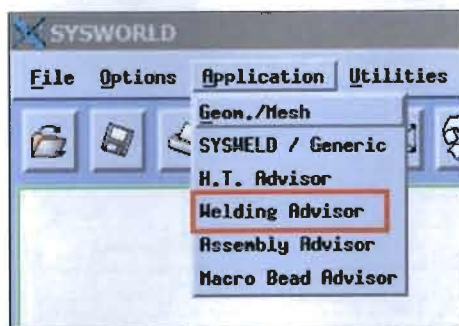


Figura 7.7. Inicio del asistente de soldadura. [ESI Group, 2006]

Sysweld provee una solución automática para problemas de soldadura, cobertura de materiales, relaciones matemáticas complejas y problemas físicos de materiales. Considera la temperatura, fases, proporción de elementos químicos, térmicos, evalúa la microestructura y comportamiento mecánico.

Para el modelado de un proceso de soldadura, se recomienda seguir los siguientes pasos:

1. Preparación de la malla y grupos mediante un programa CAD, como el Virtual Mesh, o trabajar con la pantalla básica de modelado del software. Observe la figura 7.8.

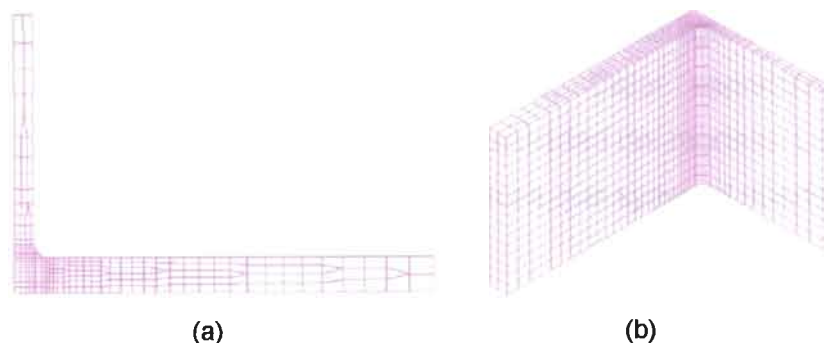


Figura 7.8. Modelado: (a) 2D y (b) 3D en un software de diseño. [ESI Group, 2006]

2. Definir el proyecto en el asistente (figura 7.9.). Datos del proyecto: Referencia o nombre del proyecto y título del proyecto. Estos datos se almacenan en un archivo de proyecto.



Figura 7.9. Cuadro de diálogo del Welding Wizard para la introducción de datos. [ESI Group]

3. Es necesario revisar la ventana de diálogo para la introducción de datos: la definición de los Drivers (controladores). Es un panel con varias opciones: Grupos (Groups), Datos del material (Material DB), Funciones a utilizar (Functions DB) y opciones de la malla (Mesh). Estos se explican a continuación.
- Grupos (Groups). Un grupo es una entidad que contiene un conjunto de nodos homogéneos.
 - Datos del material (Material DB). La base de datos del material es única en cada proyecto, pero puede incluir un número arbitrario de materiales. Aquí se definen las propiedades térmicas, mecánicas y metalúrgicas del material: Fases metalúrgicas a considerar, Conductividad térmica, Densidad, Calor específico, Entalpía, Reacción a la temperatura y plasticidad del modelo. La figura 7.10. muestra un ejemplo de las graficas que sysweld puede generar.

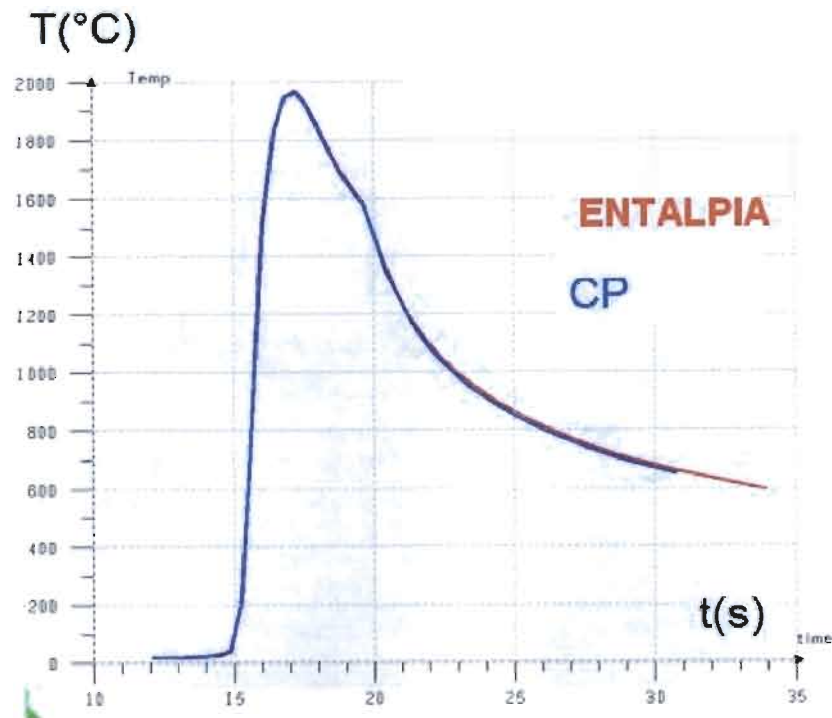


Figura 7.10. Ejemplo de una grafica generada por sysweld para ciclos térmicos utilizando un calor específico. [ESI Group, 2006]

- c. Funciones a utilizar (Functions DB). Aquí se definen la fuente de calor y el coeficiente térmico para los diferentes procesos de soldadura.
 - d. Malla (Mesh). La malla es el modelo a cargar para iniciar el proyecto.
4. Ejecutar la operación Postprocessing (cálculos) para la evaluación de resultados. Este panel es usado para definir el tipo de simulación: permite definir la malla (2D, 3D o 2D con rotación en algún eje), las propiedades del material, la intensidad de la fuente de calor a utilizar o si la pieza esta fija o libre (modo *clamping*). La figura 7.11. muestra como realizar las operaciones de cálculo, y la figura 7.12 muestra como dar de alta las opciones de material.

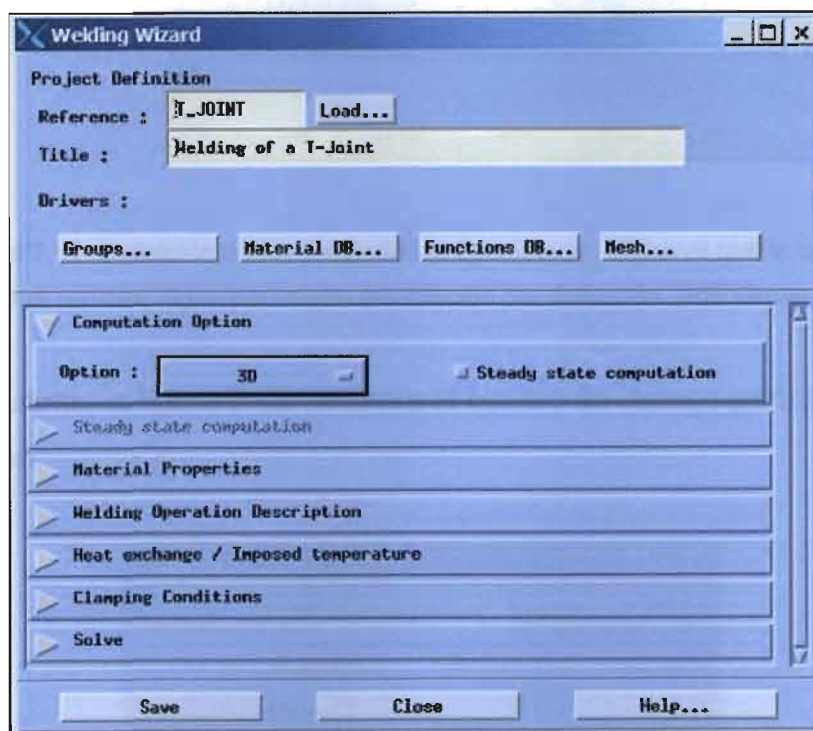


Figura 7.11. Cuadro de dialogo del Welding Wizard para los cálculos a realizar.

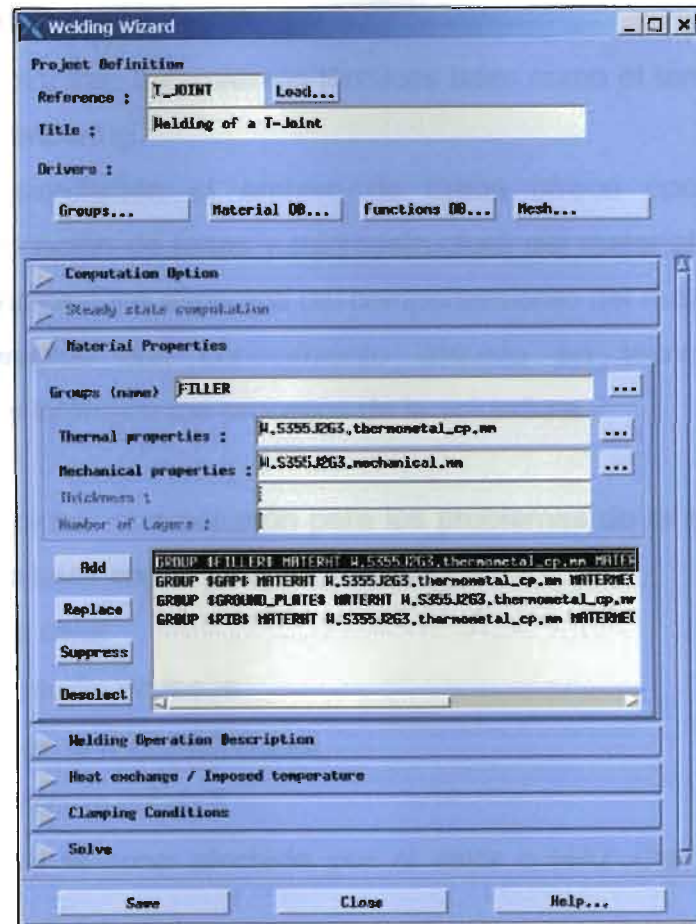


Figura 7.12. Definición de las propiedades del material. Observe que la opción **...** permitirá cambiar algún parámetro establecido por definición. [ESI Group, 2006]

Por último, la figura 7.13. muestra el cuadro de diálogo para llevar a cabo la simulación.

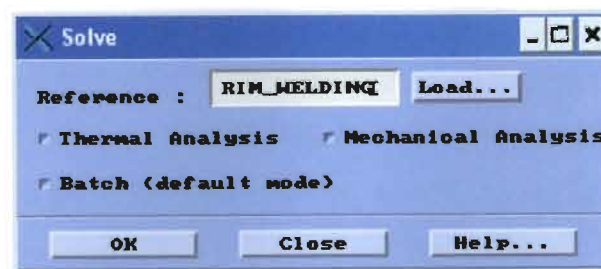


Figura 7.13. La opción "Solve" permite visualizar los resultados obtenidos de acuerdo al tipo de análisis. [ESI Group, 2006]

COMENTARIOS.

Se pueden simular los tratamientos térmicos tales como el templeado, el martenpering o el austenpering.

Terminada la simulación el archivo de datos ofrece opciones de temperaturas, transformación de fases y microestructura del material utilizado. El Welding Wizard considera los aspectos del comportamiento del material, esto permite a los ingenieros con conocimiento limitado en tecnología de modelación, controlar y optimizar los procesos de la soldadura.

Sysweld proporciona una solución para los problemas de la soldadura, considerando aspectos tales como: [Reyes A., 2007]

- Fuente de calor
- Transformación de fases
- Cambios en la microestructura
- Transformación plástica
- Efectos en la zona afectada por el calor o HAZ (heat affected zone)

8.

DESARROLLO DE UN PROCEDIMIENTO

8.1. INTRODUCCIÓN.

La fabricación de piezas que requieren procesos de soldadura o la reparación de piezas por soldadura puede llegar a motivar la eliminación de áreas o zonas de metal con algún tipo de defecto y sustituirlo por material sano. También, puede ocurrir que el proceso de reparación sea tan sencillo como que simplemente requiera aplicar soldadura para sellar; lo cual, en función del tipo de servicio y como consecuencia en la propia reparación, puede ocasionar daños mayores en un futuro.

Cuando las fallas de servicio en equipos industriales o de proceso se presentan por la presencia de grietas en paredes, éstas deben ser caracterizadas por su origen y deben ser cuidadosamente evaluadas.

Como parte del análisis para la solución mediante reparación de objetos industriales, que por sus dimensiones, ubicación y complejidad fundamentalmente, son reparables solo in situ en el mismo lugar, como es el caso de equipos de grandes dimensiones, como pueden ser contenedores de amoníaco, recipientes a presión, calderas de vapor, etc.

Se hace necesario entonces el establecer un cierto grado de conocimiento de "lo que puede ocurrir" cuando se concluya una reparación; es decir, si la aplicación de la soldadura como proceso de reparación es confiable, o las consecuencias de que el equipo falle antes de su puesta en servicio.

Numerosos especialistas en la producción industrial, han tenido serias dificultades en poder cuantificar sistemáticamente tanto las deformaciones como los esfuerzos residuales en estructuras grandes de paredes gruesas y en paneles de paredes delgadas. Llegar a conocerlas no es sólo un aspecto de carácter técnico elemental, sino que su objetivo se convierte en analizarlas para evitarlas o al menos disminuirlas y evitar así un accidente que resulte fatal. [Goicolea & García, 2006]

8.2. IMPORTANCIA DE LA SIMULACIÓN.

En la recuperación de piezas por ejemplo, está presente la posibilidad en mayor o menor grado de la pérdida de la forma geométrica de la estructura, la no coincidencia de bordes, desplazamientos apreciables, y otros, debido al calentamiento no uniforme que se presenta durante la realización de la junta en el cordón y zonas próximas al mismo. Al emplear una fuente de calor móvil fuertemente concentrada, como puede ser un arco eléctrico (proceso SMAW) ocurren procesos físico-químicos, estructurales y termo-mecánicos que provocan el surgimiento de tensiones residuales, particularmente en el cordón y Zona Afectada por el Calor.

Se desea desarrollar un procedimiento que considere como opción viable el uso de software de simulación y que este, a su vez, utilice el método de análisis por elementos finitos con la finalidad de analizar el proceso de forma transitoria y no lineal, ya que el mismo depende del tiempo y la variación de las propiedades del material con respecto a la temperatura, requiere tener en cuenta curvas de tiempo que puedan caracterizar la traslación del foco de calor, a partir de los parámetros del régimen y tipo de proceso de soldadura empleado.

La mayoría de las aplicaciones basadas en elementos finitos, tienen una estructura común y realizan tareas similares. La mayor diferencia entre ellas consiste en el grado de automatización, la calidad de solución y la interfase gráfica. Por sus características y el tipo de datos manejados, Sysweld es una opción viable para este tipo de análisis.

Los elementos pueden ser lineales, triangulares, cuadriláteros, etc., en dependencia del tipo de grupo que se escoja, (Plano de trabajo en 2D o Sólido). Para un análisis tridimensional de la soldadura, es recomendable escoger el grupo perteneciente a sólidos, ya que implicaría emplear elementos hexagonales tridimensionales (también llamados tipo "ladrillos") de 8-20 nodos que tienen las áreas de sus caras bien uniformes y resultan ideales para la aplicación del calor o carga térmica de forma discretizada. Además en estos elementos se representan de una forma más completa los esfuerzos o tensiones en el espacio 3D.

Como cada uno de los elementos que conforman el modelo, interactúan con sus vecinos, la determinación del comportamiento global del cuerpo requiere la solución de un gran número de ecuaciones simultáneas, afortunadamente el sistema resultante de ecuaciones puede ser resuelto con facilidad mediante las computadoras aplicando técnicas de álgebra matricial.

Los cálculos de matrices de gran tamaño debido a la cantidad de nodos que conforman la malla y a sus respectivos grados de libertad, serían extremadamente complicados, lo que implicaría un gran consumo de tiempo y ser propenso a errores por cálculos analíticos convencionales.

Criterios de convergencia. Cuando se realice un modelo que requiera de exactitud en los resultados, se debe recurrir al análisis de la convergencia para seleccionar el tamaño correcto de los elementos en el mallado y de este modo obtener el mínimo de error en los resultados.

La convergencia define que al refinar progresivamente la malla, la solución numérica se aproxima, tanto como se desee, a la solución exacta. Observe la figura 8.1.

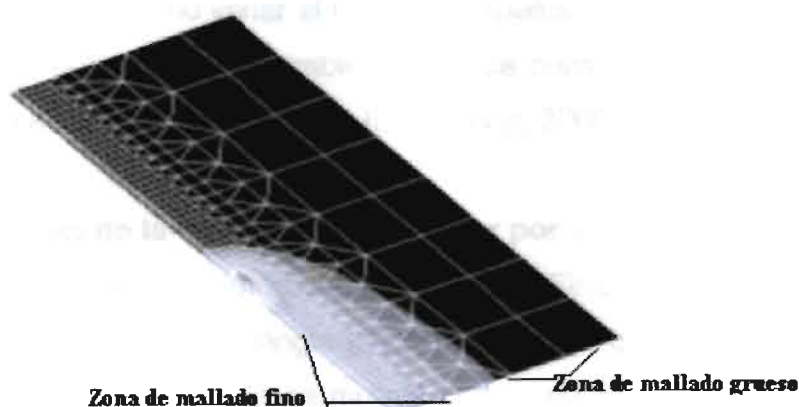


Figura 8.1. Diferencia de mallado para lograr mayor precisión en la zona del cordón de soldadura y la zona afectada por el calor. [G.F. & Sanzi, 2007]

Debido a que la temperatura, esfuerzos y deformaciones cambian muy rápidamente cerca del cordón, resulta útil utilizar una malla fina cercana al cordón de soldadura para lograr exactitud y resolución. Sin embargo, se prefiere una malla gruesa en aquellos sitios alejados del cordón para reducir los costos computacionales sin sacrificar la exactitud.

8.3. PROCEDIMIENTO PARA LA SIMULACIÓN DE SOLDADURA.

Este procedimiento general de soldadura se basa en la transferencia de calor en la soldadura y la obtención de tensiones residuales en reparaciones de uniones soldadas en estructuras o recipientes de grandes dimensiones. Un diseño geométrico correcto implica un adecuado modelo físico, ya que desde aquí se parte para elegir la forma de los elementos, las densidades de mallas y a su vez introducir en el caso específico de la modelación de la soldadura, la fuente de calor utilizada, aspecto esencial para lograr la traslación del foco térmico según sea la velocidad de soldadura.

Realizar una correcta simulación de la soldadura implica además lograr que las propiedades térmicas, metalúrgicas y mecánicas del material sean termo dependientes. Otro aspecto a tener en cuenta es que se debe buscar siempre que sea posible la simetría del modelo, se puede analizar la mitad y hasta $\frac{1}{4}$ del modelo, al no variar el material, espesor, o las condiciones de carga y rigidez, ahorrando un considerable tiempo de computo, ya que se disminuye el número de ecuaciones y matrices. [ESI Group, 2006]

Definición de la transmisión del calor por conducción. La mayoría de los análisis de soldadura mediante Elementos Finitos utilizan un marco de referencia denominado "Lagrangiano", en el cual el calor transmitido desde la fuente de calor hacia la pieza se mueve como una función del tiempo. En un proceso de soldadura el foco de calor se desplaza siguiendo una trayectoria que por comodidad, es conveniente hacerla coincidir con el eje del sistema de coordenadas, ya sea en 2D como en 3D.

Este movimiento en análisis por elementos finitos se describe de forma discreta a partir de "Curvas de tiempo" y no continuas, por lo que parecerá como que la fuente se detendrá determinado intervalo de tiempo finito en cada elemento de la trayectoria, debido a que está en función de la velocidad de recorrido y cantidad de elementos que se encuentran en la longitud de soldadura a analizar. [Yancey R. & Khurana, 2003]

La figura 8.2. muestra el procedimiento a utilizar mediante un diagrama de flujo de proceso.

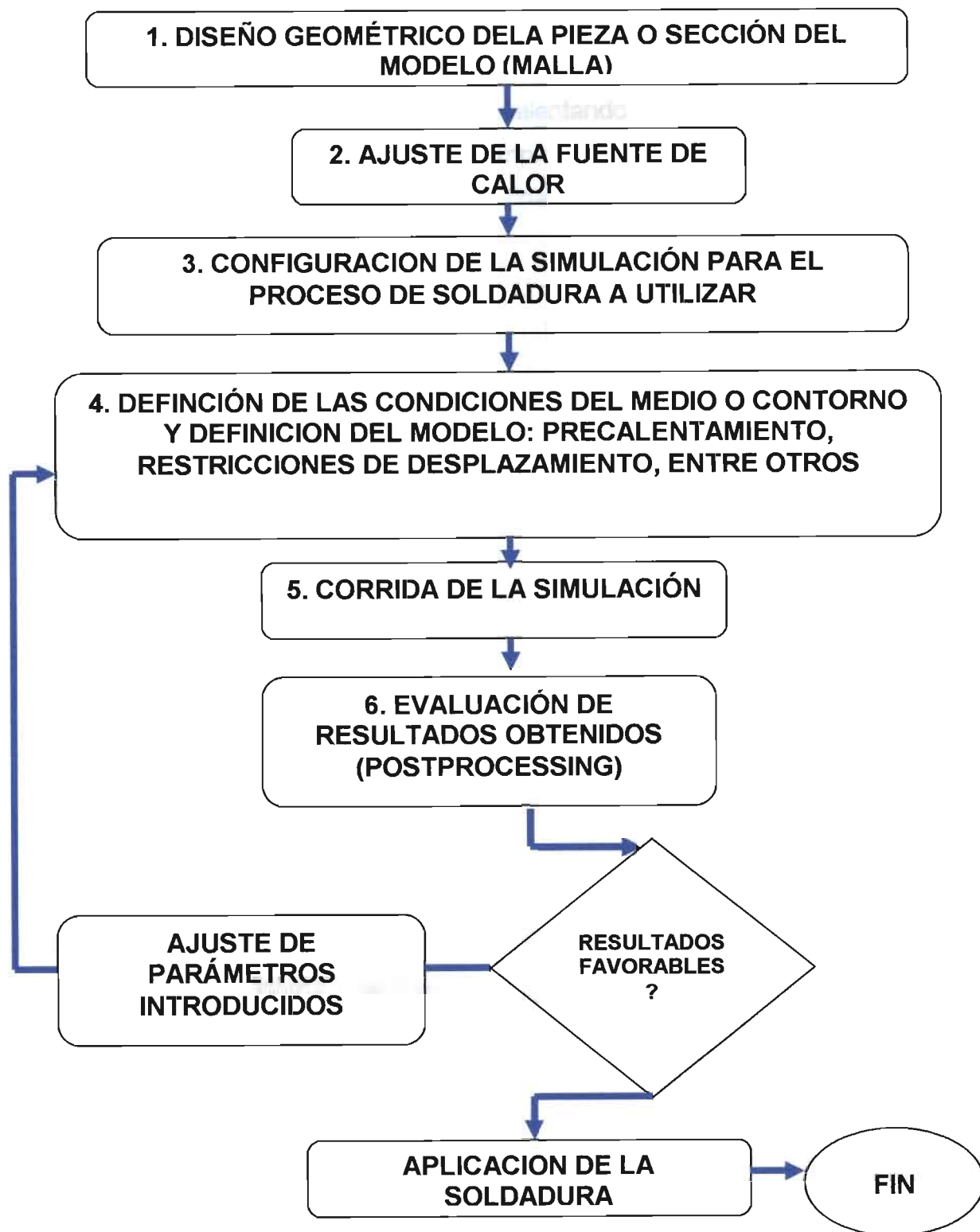


Figura 8.2. Procedimiento básico para la simulación mediante el uso de elementos finitos.

Luego de obtener los resultados térmicos, se puede manipular la entrada de calor (aumento o disminución) al modificar la intensidad de corriente, aumentando la velocidad de soldadura; precalentando al inicio el material y/o al disminuir las condiciones de rigidez siempre que sea posible y volver a reevaluar la simulación para determinar finalmente si se decide aplicar la soldadura por el proceso especificado.

REQUERIMIENTOS PARA UN ANALISIS TRANSITORIO.

Se pueden considerar básicamente seis pasos para un Análisis Numérico Transitorio:

1. Creación de la malla (Meshing)
2. Ajuste de la fuente de calor (Heat Input)
3. Definición del proceso (Welding Process Setup)
4. Chequeo del modelo (Model checking)
5. Corrida de la simulación (Solving) y por ultimo,
6. Análisis de resultados (Post-processing: despliegue de resultados)

Estos se explican brevemente a continuación.

1) Creación de la malla.

Se requieren dos mallas: una para el ajuste de la fuente de calor mediante un corte transversal de la junta de soldadura, y otra de la parte a soldar o ensamble.

El mallado deberá hacerse mediante elementos cuadráticos 2D, triangulares 2D o Hexagonales 3D. No se recomiendan tetraedros. Una vez que se elabora la malla, ésta se organizan por grupos, llevando los siguientes nombres:

- C1_3D (Grupo de elementos 2D)
- C2_3D (Grupo de elementos 2D)
- BEAD (Grupo de elementos 2D)
- SKIN (Grupo de elementos 1D)
- TRJ (Grupo de 1 Nodo)
- REF (Grupo de 1 Nodo)

Es importante mencionar que la malla se crea en el plano XY (donde $Z=0$). Se genera un archivo a usar antes de la preparación de la malla y otro después de la preparación de la malla; siguiendo la sintaxis **HSF_DATA1.ASC**. (Observar la figura 8.3.)

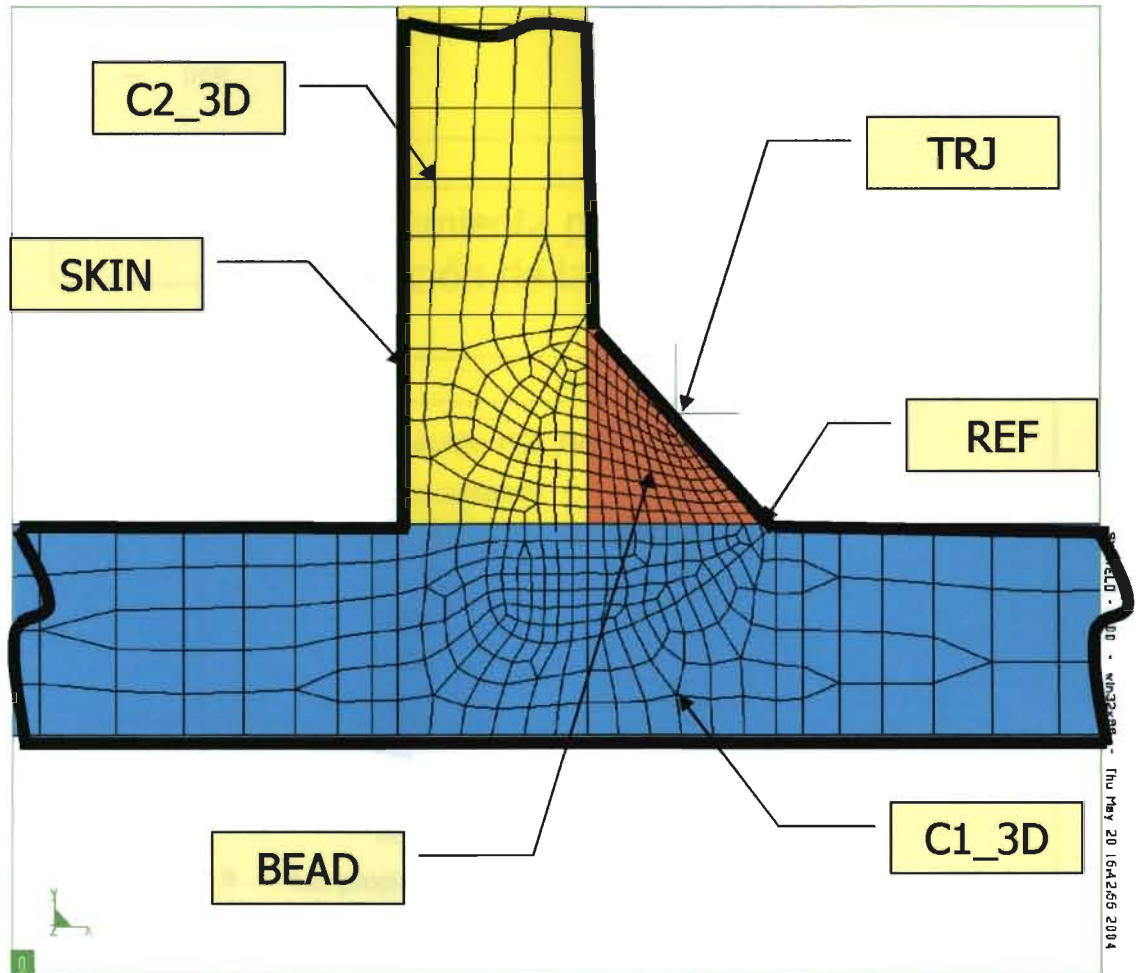


Figura 8.3. Malla inicial en 2D antes de la Preparación: HSF_DATA1.ASC [9]

A continuación se muestra el diagrama de flujo de la malla inicial y su preparación. (Observar la figura 8.4.)

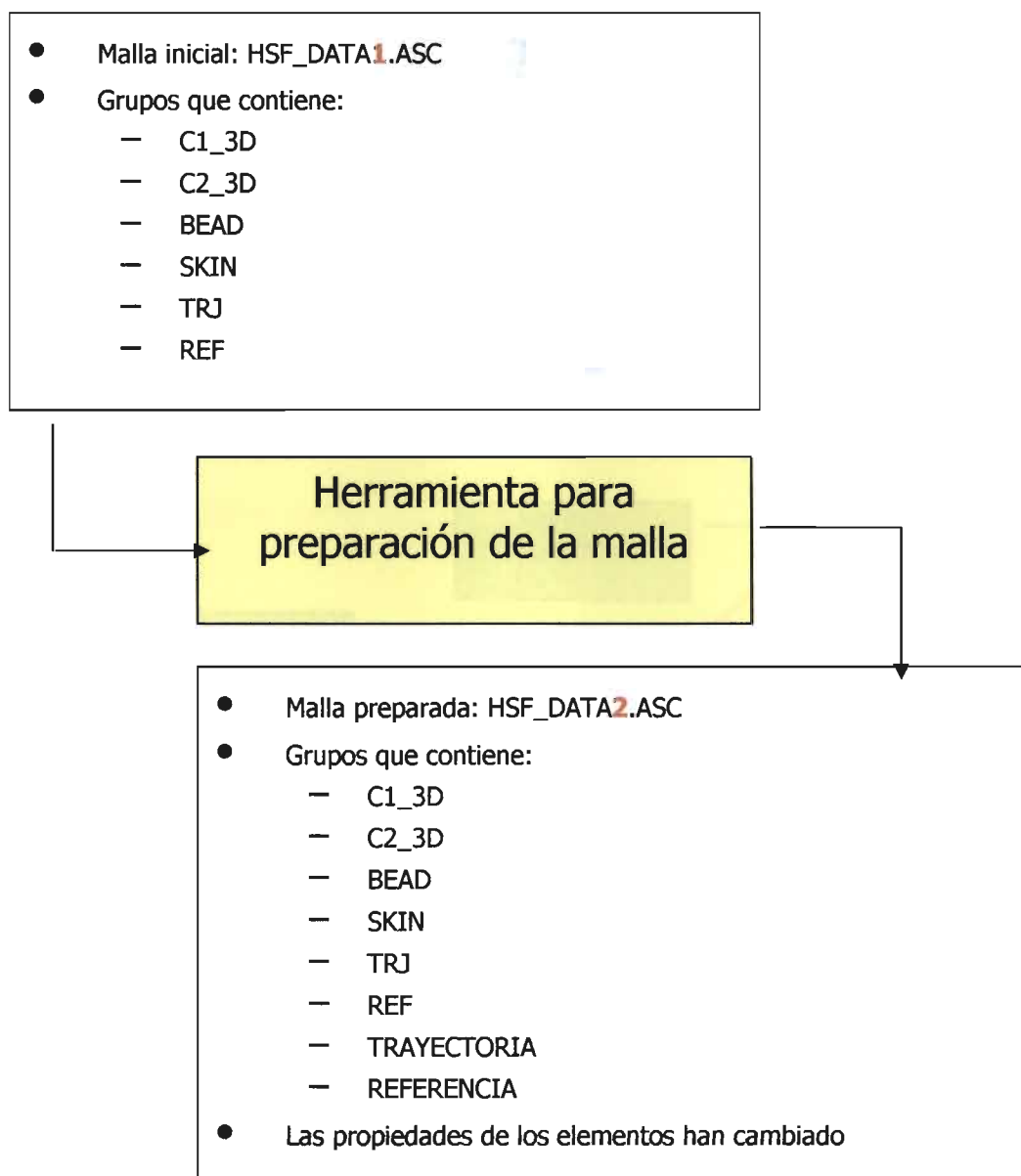


Figura 8.4. Diagrama esquemático para la preparación de la malla. [ESI Group, 2006]

Así mismo, la Figura 8.5. muestra un ejemplo de preparación de la malla en 3D, mostrando la trayectoria de soldado y la referencia existente entre nodos.

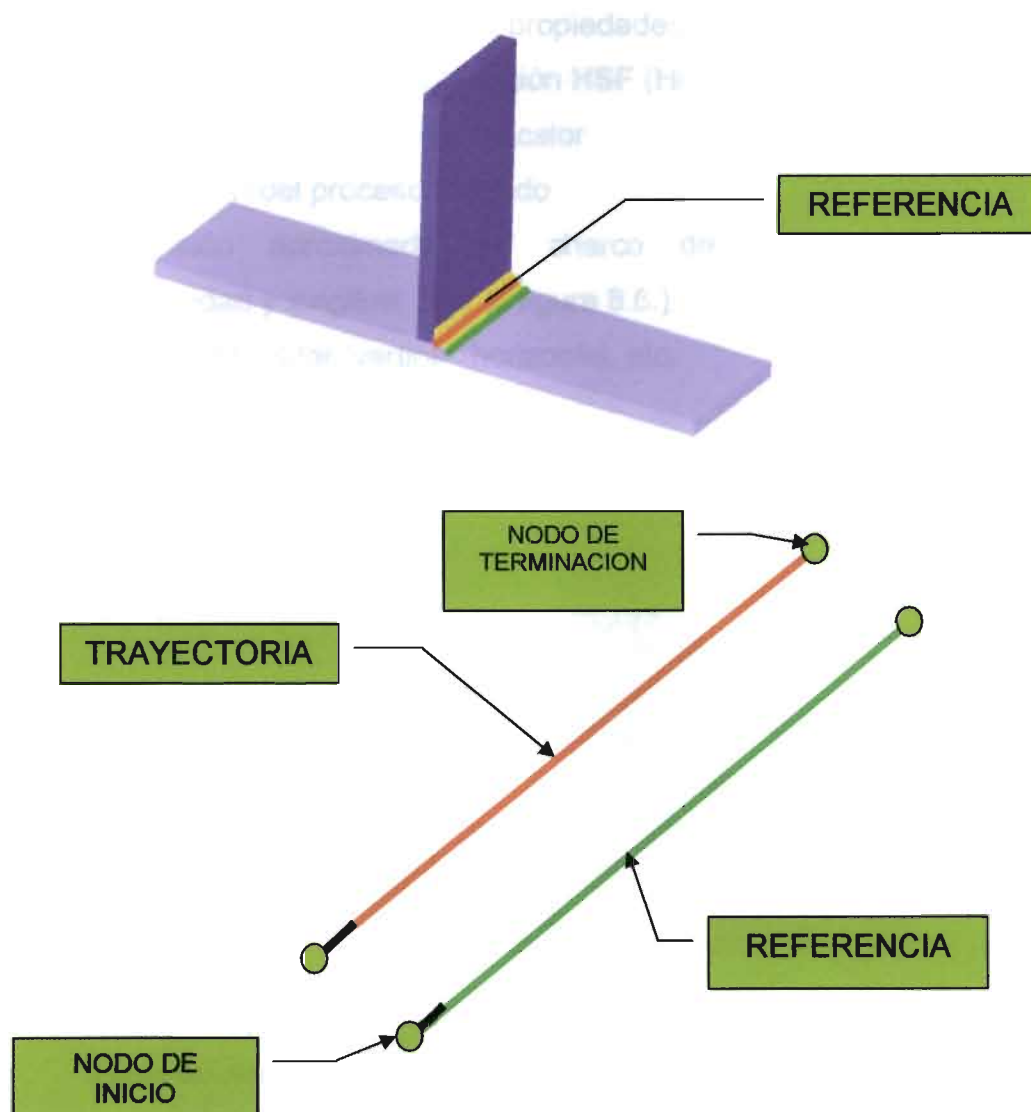


Figura 8.5. Ejemplo de una Malla 3D y su definición de nodos. [ESI Group, 2006]

2. Ajuste de la fuente de calor.

Como pre-requisito es necesario ajustar la Fuente de Calor (Head Input) al introducir la siguiente información:

- Sección de la malla preparada en 2D del tipo **HSF_DATA2.ASC**
- Datos del material ("Steel.mat"), conteniendo las propiedades térmicas, metalúrgicas y mecánicas para todos los componentes.

- Cabe mencionar que solo las propiedades térmicas y metalúrgicas serán usadas por la configuración **HSF** (Heat Source Functions)
- Base de datos de la fuente de calor
- Información del proceso utilizado
- Dimensión aproximada del charco de soldadura: ancho, profundidad y longitud. (Ver la figura 8.6.)
- Posición al soldar: vertical, horizontal, etc.
- Corriente requerida
- Voltaje
- Velocidad al soldar

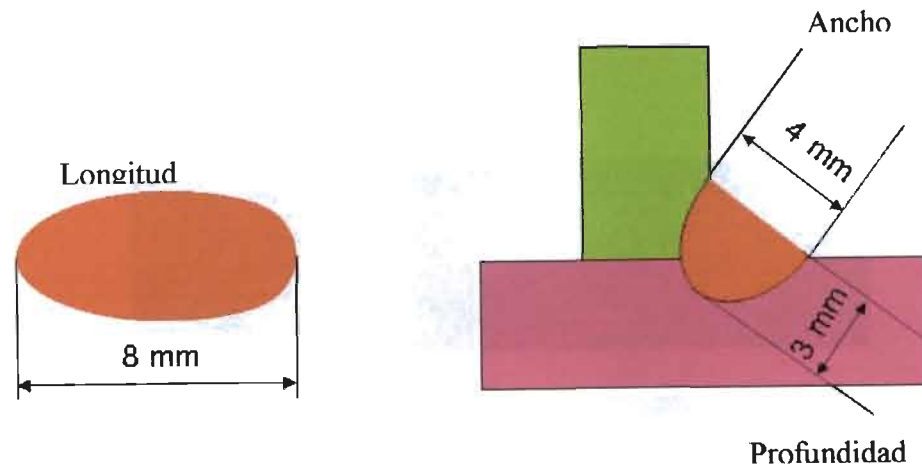


Figura 8.6. Información referente del charco de soldadura. [9]

En la figura 8.7. se muestra un ejemplo de los datos a utilizar para un acero alemán S355J2G3: composición química, transformación de fases y temperatura de fusión. En la sección 8.4 se explicarán algunas aplicaciones de soldadura mediante el proceso SMAW.



Figura 8.7. Información del material a utilizar: un acero S355J2G3. [García Rodríguez, 2005]

En las Figuras 8.8. y 8.9. se ilustran los pasos para la configuración de la fuente de calor a partir del Welding Advisor.

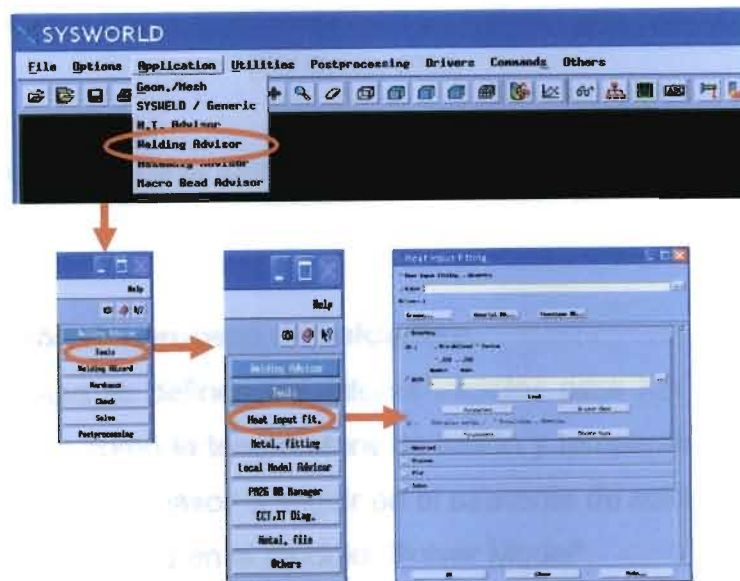


Figura 8.8. Configuración de los parámetros de la fuente de calor mediante el Asistente o "Welding Advisor". [ESI Group, 2006]

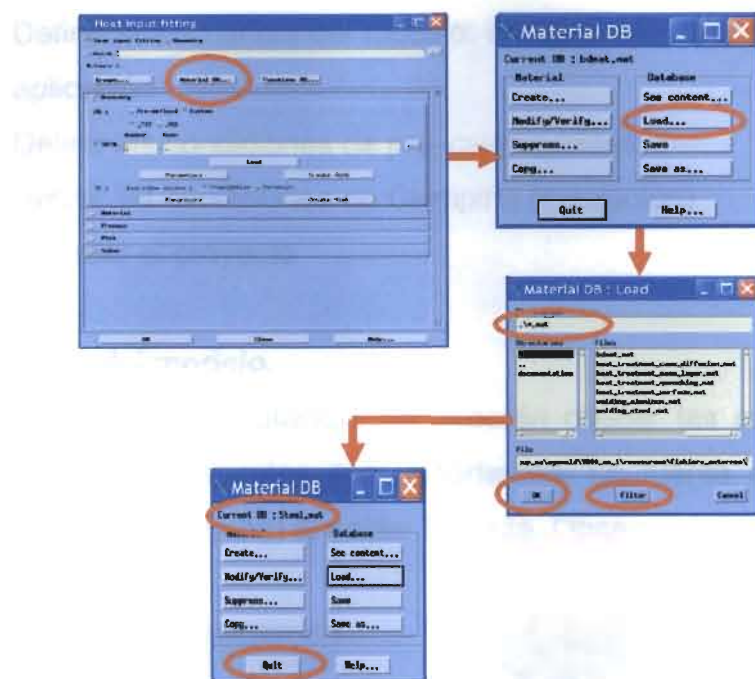


Figura 8.9. El Welding Advisor permite establecer las opciones para el material a trabajar.

[ESI Group, 2006]

La base de datos de la fuente de calor contiene los ajustes para un análisis transitorio.

3. Definición del proceso de soldadura.

En esta etapa se definen los valores iniciales para X,Y y Z; así mismo, algunos parámetros como la temperatura de fusión y temperatura en la HAZ. A continuación se listan los pasos a seguir en el asistente de soldadura:

1. Abrir Sysweld en el modulo "Solver Model"
2. Cambiar al asistente o "Welding Advisor"
3. Crear un nuevo proyecto
4. Cargar la base de datos del material
5. Establecer las funciones a utilizar
6. Cargar la malla que define el modelo
7. Definir el tipo de Simulación
8. Aplicar las propiedades del material: térmicas y mecánicas

9. Definir la secuencia del modelo: número de pasadas y tiempo de aplicación
10. Definir las condiciones de pre-calentamiento
11. Definir las condiciones de Clamping (o sujeción)
12. Guardar el proyecto

4. Chequeo del modelo.

Antes de correr la simulación, se deberán checar las condiciones del modelo a evaluar. Dos aspectos son importantes: La fuente de calor y las opciones de sujeción (Clamping) al soldar la pieza. Observar la figura 8.10.

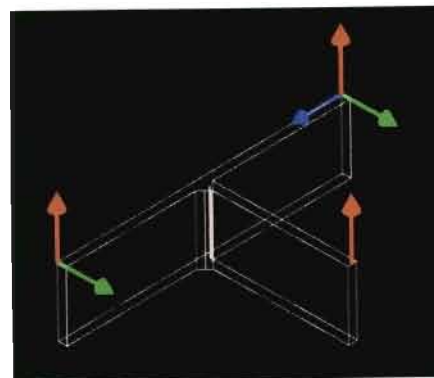
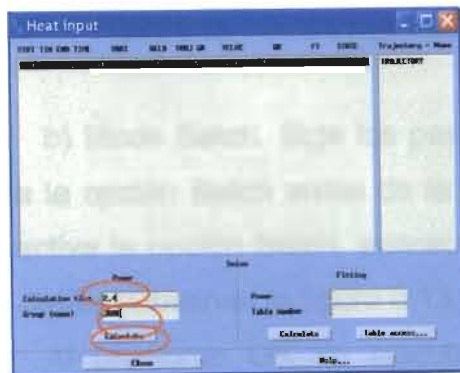


Figura 8.10. (a) Definición de parámetros para la fuente de calor y (b) establecimiento de los puntos de fijación de la pieza: es conveniente conocer la dirección del cordón de soldadura y el tiempo de proceso de soldadura. [ESI Group, 2006]

5. Corrida de la simulación.

Existen dos formas para ejecutar la simulación: (a) en modo interactivo al usar la interfase grafica, o bien, (b) en modo Batch al crear un listado de operaciones a realizar.

a) Modo interactivo (GUI – Graphic User Interface). Desde el Welding Advisor, seleccione Solve, y a continuación la opción Load. En files, seleccione el nombre sugerido: TEST.prj. Desactive la opción de Batch y presione OK para la corrida. Observar la figura 8.11.



Figura 8.11. Pasos a seguir para una corrida grafica. [ESI Group, 2006]

b) Modo Batch. Siga los pasos descritos en el inciso anterior, solo deje activa la opción Batch antes de la corrida. (Observar la figura 8.12.) Una vez que activa la opción Batch, aparece una pantalla del entorno Sysworld, active esta casilla (Observar la figura 8.13.).

Al presionar OK se ejecutará una ventana en MS-DOS, escriba la instrucción "READ TEST_SOLVE.DAT" e iniciara la corrida. El archivo donde se almacenan los resultados llevará el nombre "TEST_SOLVE.LOG".

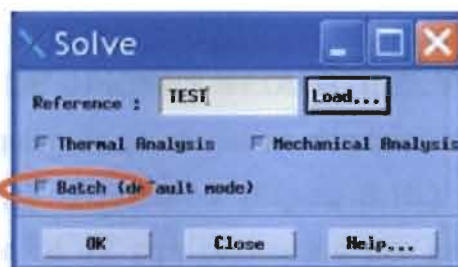


Figura 8.12. Active la casilla Batch para la corrida por lotes. [ESI Group, 2006]

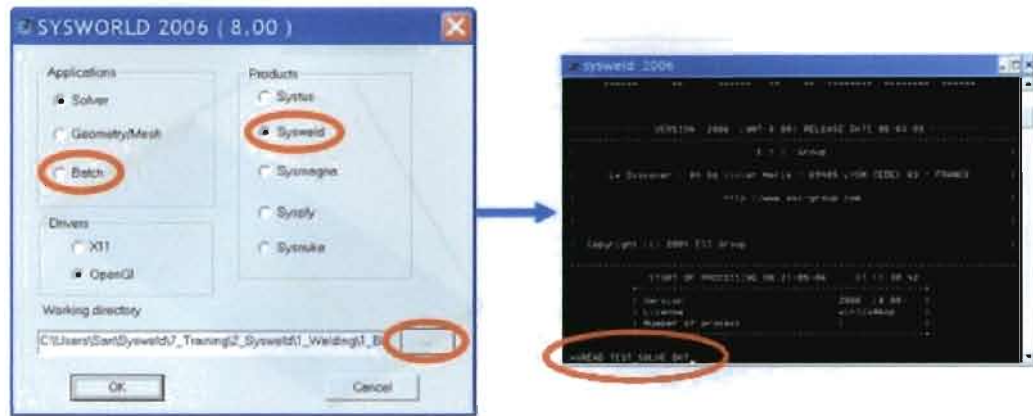


Figura 8.13. Simulación ejecutada en modo Batch o proceso por lotes en modo MS-DOS. [ESI Group, 2006]

6. Análisis de resultados.

Si los cálculos se realizaron satisfactoriamente, se crean los siguientes archivos: Para los resultados térmicos:

- TEST_V_DATA1000.TIT
- TEST_V_POST1000.fdb

Para los resultados mecánicos:

- TEST_V_DATA2000.TIT
- TEST_V_POST2000.fdb

8.4. EJEMPLOS DE UNIONES MEDIANTE EL PROCESO SMAW.

En las figuras siguientes se muestran dos tipos de uniones: Unión a tope (Figuras 8.14. y 8.15.), y unión en T (Figura 8.16.) de aceros ASTM A-36; ambos con un espesor de 12 mm realizados por proceso manual por arco eléctrico (SMAW) con corriente de 120 A, voltaje de 22 V y a partir de una temperatura ambiente de 30 °C. Observe que estos son los parámetros iniciales a definir en el inciso "DEFINICION DE LAS CONDICIONES DEL MEDIO O CONTORNO" del procedimiento antes mencionado.

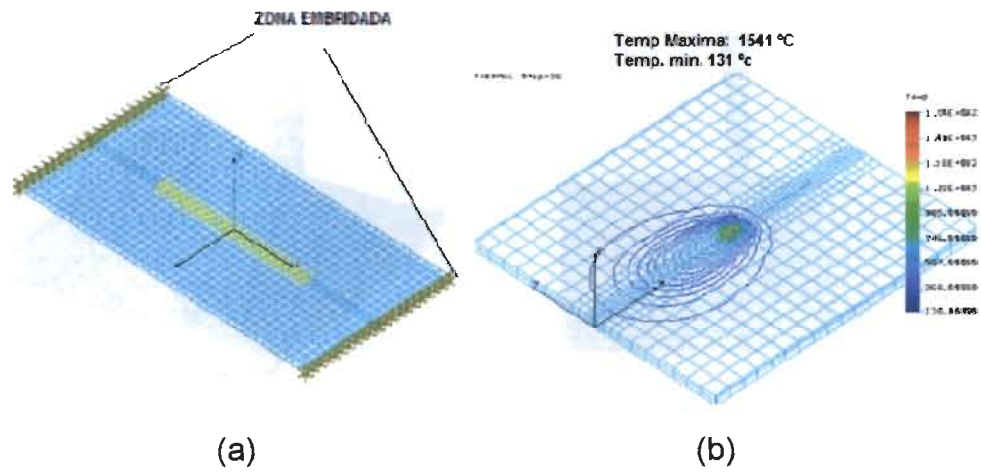


Figura 8.14. (a) modelo geométrico y (b) campos térmicos obtenidos mediante un análisis por elementos finitos. [García Rodríguez, 2006]

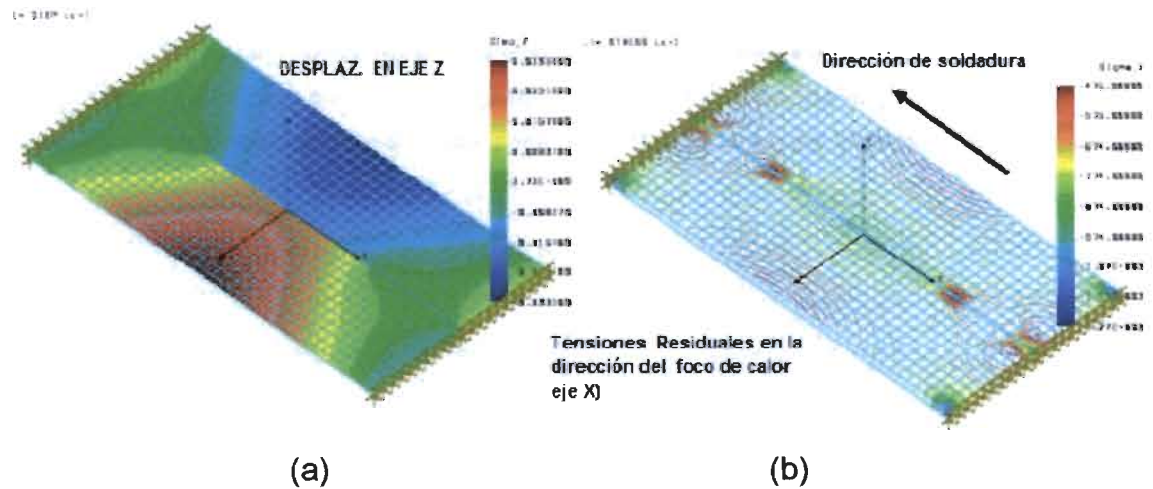


Figura 8.15. (a) Desplazamientos obtenidos según la rigidez impuesta y (b) tensiones residuales en la dirección de la soldadura, se considera una fuente de calor en movimiento. [García Rodríguez, 2006]

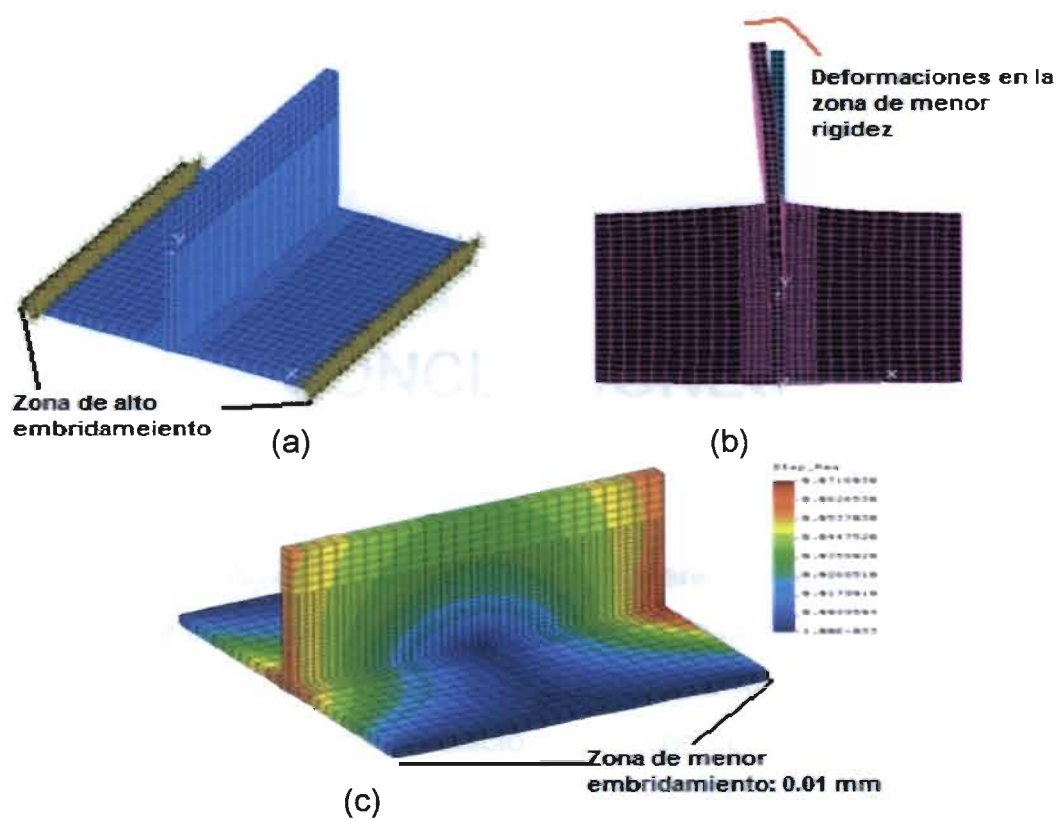


Figura 8.16. Unión en T: deformación y desplazamientos obtenidos. (a) zona de embridamiento o de mayor rigidez en la pieza, (b) mayor deformación en la zona con mayor temperatura y (c) zonas de menor embridamiento al existir poca concentración de calor. [García Rodríguez, 2006]

9.

CONCLUSIONES

En este trabajo se analizó el uso del software Sysweld para la simulación del proceso de soldadura SMAW y la elaboración de un procedimiento general.

La reparación por soldadura, puede llegar a motivar la eliminación de áreas o zonas de metal con el defecto y sustituirlo por material sano. También puede ocurrir que el proceso de reparación sea tan sencillo como que simplemente requiera aplicar soldadura para sellar, lo cual en función del tipo de servicio y como consecuencia en la propia reparación puede ocasionar daños superiores en un futuro.

Cuando las fallas de servicio en equipos industriales o de proceso se presentan por la presencia de grietas en paredes, estas deben ser caracterizadas por su origen y deben ser cuidadosamente evaluadas.

Como parte del análisis para la solución mediante reparación de objetos industriales, que por sus dimensiones, ubicación y complejidad fundamentalmente, son reparables solo "in situ", como es el caso de equipos de grandes dimensiones, como pueden ser esferas contenedoras de amoníaco, recipientes a presión como calderas de vapor, etc., se hace necesario establecer un cierto grado de conocimiento de "lo que puede ocurrir" cuando se concluya una reparación, es decir, si la aplicación de la soldadura como proceso de reparación es confiable, o si puede ser una expectativa desconocida que incluso ya, en la prueba de sobrecarga hidráulica falle el equipo antes de su puesta en servicio de modo catastrófico.

Por lo anterior, es muy importante el uso de la simulación de un proceso de soldadura mediante la computadora, al existir un ambiente ideal y mediante el manejo de diversas variables que intervienen en el proceso SMAW: corriente, amperaje, voltaje, longitud de arco y velocidad de avance.

Como todos los procesos de soldadura, en el SMAW se inducen deformaciones y tensiones de origen térmico en el componente, las cuales deben ser evaluadas ya que pueden comprometer la integridad estructural del equipo.

Es importante mencionar que en la simulación de un proceso de soldadura se requiere conocer las propiedades térmicas, mecánicas y metalúrgicas de los materiales involucrados. La simulación permite analizar los procesos de soldadura con todas sus variables para determinar las aplicables a cada material y proceso.

Mediante la simulación es posible determinar los esfuerzos residuales y distorsiones que se generarán durante el proceso de soldadura; así como también, determinar las medidas aplicables para minimizar estos efectos.

Sysweld es una excelente herramienta para la simulación de los procesos de soldadura, entre ellos el SMAW, ya que permite establecer las condiciones ideales para simular un proceso real.

Se comprobó la eficiencia del programa al revisar los diversos ensayos realizados mediante el método de elementos finitos.

10.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Alcalde Marzal Jorge, José A. Diego Mas, Miguel A. Artacho, DISEÑO DE PRODUCTO: MÉTODOS Y TÉCNICAS. Ed. Alfaomega. Año: 2004.
- [2] ASM International Publication, Applications of the Steels, 2006.
- [3] Cross Sr. Ralph, de la Cross & Trecker Corporation. AUTOMATIZACIÓN DE PROCESOS. Año: 2003.
- [4] ESI Group, Una solución para los procesos de soldadura, Año: 2007.
- [5] ESI Group, Manual básico de Visual Mesh (Visual Mesh tutorial). Año: 2006.
- [6] ESI Group, Manual básico de SYSWELD (Getting started). Año: 2006.
- [7] ESI Group, Manuales de referencia y guía del usuario para SYSWELD, Año: 2006.
- [8] ESI Group, Manual de referencia para el análisis transitorio (Transient Numeric Análisis). Año: 2006.

- [9] ESI Group, Manual de referencia para mallado, (Meshing for Best Results). Año: 2006.
- [10] G.F. Elvira y H.C. Sanzi, Artículo: Modelo computacional simplificado para evaluar la distribución térmica durante el proceso de soldadura. Año: 2007.
- [11] García Rodríguez Yenes, Procedimiento para la obtención mediante MEF de deformaciones y tensiones residuales en uniones soldadas. Año: 2005.
- [12] García Sánchez, Armando, Especialidad en Tecnologías de la Soldadura Industrial, COMIMSA. APUNTES DE LA MATERIA DE PROCESOS DE SOLDADURA. Año: 2007
- [13] Goicolea José Ma. & García Rodríguez Yenei, Ansys Incorporated, PROCEDIMIENTOS DE RECUPERACION DE PIEZAS. Año: 2006.
- [14] Reyes A., Especialidad en Tecnologías de la Soldadura Industrial, COMIMSA. APUNTES DE LA MATERIA DE METALURGIA DE LA SOLDADURA. Año: 2007.
- [15] Yancey R. & Khurana PROCESS OF WELDING , 2003

11.

RESUMEN AUTOBIOGRAFICO

Autor de la monografía: **ING. ALEJANDRO HERNANDEZ BRIONES.**

En opción como Especialista en Tecnologías de la soldadura Industrial.

Monografía de revisión bibliográfica del software de simulación Sysweld.

Se consultaron los manuales de referencia del software y el sitio de la compañía ESI Group en Internet, entre otros apuntes de la especialidad.

Datos personales:

- Nacido el 01 de Mayo de 1970 en Saltillo, Coahuila. México.
- Ingeniero Industrial y de Sistemas por parte de la Universidad Autónoma de Coahuila (1987-1992).
- Especialización de Procesos Industriales por parte del Tecnológico de Saltillo (2005 – 2006).

Experiencia Laboral:

- Manejo de Inventarios en agencia automotriz y la industria de ensamble.
- Coordinador de materiales en la industria alimenticia.
- Coordinador de Laboratorios de cómputo en CONALEP.
- Impartición de cursos al sector publico e iniciativa privada: IMSS, STPS, SCT, CONAGUA, ZF SACHS, MABE, NEMAK, entre otros.

- Centro de trabajo actual: Universidad Tecnológica de Coahuila como Maestro de Tiempo Completo de la Carrera de Procesos de Producción.
- Universidad del Valle de México como profesor de asignatura en las áreas de Ingeniería Industrial y de Manufactura.