

Procedure for the obtaining by means of MFE of the thermal fields, deformations and residual tensions in welded unions

Yenei García Rodríguez¹ y José Burgos Sola²

¹*Centro de Investigaciones de Soldadura, Facultad de Ingeniería Mecánica.*

Telf: (53-42) 281586. Ye@uclv.edu.cu

²*Asesor de Postgrado. Telf: (53-42) 281517. Joseb@uclv.edu.cu*

*Universidad Central Marta Abreu de Las Villas. Carretera a Camajuani Km 5 ½
Santa Clara, Villa Clara, Cuba*

Abstract

The following work shows the steps to keep in mind through a procedure designed to apply the simulation of the welding by means of Methods of Finite Elements (MEF). The caused fields of temperatures for the welding were based on the properties of steel ASTM A-36, under conditions of strong constraint in unions to ends as in unions in T. takes in consideration aspects of the transfer of heat in state transient, as well as the variation of the properties of the material in function of the temperature (not lineal). They are shown in the results displacements, deformations and residual stress obtained in the simulation.

Key words: Methods of Finite Elements, simulation, modelling, fields of temperatures, residual stress, welded unions.

Procedimiento para la obtención mediante MEF de los campos térmicos, deformaciones y tensiones residuales en uniones soldadas

Resumen

El siguiente trabajo muestra los pasos a tener en cuenta a través de un procedimiento diseñado para aplicar la simulación de la soldadura mediante Métodos de Elementos Finitos (MEF). Los campos de temperaturas provocados por la soldadura se basaron en las propiedades de juntas de acero A-36, en condiciones de fuerte embridamiento o rigidez, tanto en uniones a topes como en uniones en T. Se toma en consideración aspectos de la transferencia de calor en estado transiente, así como la variación de las propiedades del material en función de la temperatura (no lineal). Se muestran en los resultados desplazamientos, deformaciones y tensiones residuales obtenidos en la simulación.

Palabras clave: Métodos de Elementos Finitos, simulación, modelado, campos de temperaturas, tensiones residuales., uniones soldadas.

1. Introducción

La reparación por soldadura, puede llegar a determinar 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 que simplemente requiera aplicar soldadura para recuperar las partes dañadas, lo cual en función del tipo de servicio y como consecuencia de la propia reparación, puede ocasionar daños superiores en un futuro si no es realizada adecuadamente.

Cuando las fallas de servicio en equipos industriales o de proceso ocurren 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.

El Centro de Investigaciones de Soldadura (CIS), de la Universidad Central de las Villas (UCLV) en Cuba, orienta sus estudios a un posible análisis a través del Método de los Elementos Finitos (MEF), llevando a cabo la simulación de reparación de grietas por soldadura, evitando técnicas de ensayo y error, lo cual traería como consecuencia que bajaran considerablemente los riesgos y costos de reparación, para un equipo de gran tamaño y dimensiones.

La atención de varios investigadores de los últimos años, como E. Bonifaz, J. Hong, entre otros [1-5] se han dirigido al análisis y modelación de los esfuerzos residuales provocados por la soldadura, producto del calor no uniformemente distribuido en la junta, el efecto de la contracción y como consecuencia las deformaciones mediante métodos computacionales como son los MEF, con el fin de obtener resultados más exactos y precisos. La actualidad de la presente investigación y su importancia, determina el presente y futuro a seguir en el campo de las reparaciones y diseño de estructuras de grandes dimensiones, acompañadas de alto embridamiento, el cual caracteriza la posibilidad de las juntas soldadas de moverse o no libremente. Este grado de rigidez o embridamiento no solamente está relacionado con la sujeción mecánica externa o el peso de la estructura si no además, con aquellas zonas que no alcanzan calentamientos excesivos

y que actúan como barreras, impidiendo la libre dilatación-contracción, aumentando considerablemente el estado tensional.

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 solo un aspecto de carácter técnico elemental, sino que su objetivo se convierte en analizarlas para evitarlas o al menos disminuirlas al valor menos perjudicial, para su consideración en los diseños de ingeniería [6, 7].

2. Análisis de las Etapas del MEF

En las construcciones metálicas obtenidas mediante la aplicación de soldadura, 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, etc., debido al calentamiento no uniforme que se manifiesta durante la realización de la junta en el cordón y zonas próximas al mismo [8]. Al emplear una fuente de calor móvil fuertemente concentrada, como puede ser un arco eléctrico, ocurren procesos físico-químicos, estructurales y termodeformacionales de diversa índole que provocan el surgimiento de tensiones residuales, particularmente en el cordón y en la Zona Afectada por el Calor (ZAC).

Un análisis de la soldadura mediante MEF, requiere que el proceso se analice de forma transiente y no lineal, ya que el mismo depende del tiempo y de la variación de las propiedades del material con respecto a la temperatura. El carácter transiente, 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; además de curvas de temperaturas que relacionadas con las propiedades del material caractericen la no linealidad del proceso, teniendo en cuenta en el análisis la termo-dependencia de las propiedades del material base. La mayoría de los sistemas de programas de elementos finitos, tienen una estructura común y realizan tareas similares. La diferencia consiste en el grado de automatización, la calidad de solución y el empleo

del graficado; en la Figura 1 se muestra esta estructura general.

En la primera etapa o fase, se incluye todo el trabajo que requiere la preparación del modelo de cálculo y la adecuación de los datos de este modelo. Esta parte es la más voluminosa y trabajosa y es en la que se pueden cometer un gran número de errores si no se trabaja con cuidado, por lo que consume en algunos casos del 60 al 80 % del tiempo total del análisis. En esta etapa o fase de Pre-procesamiento, el modelo es construido completamente por la computadora interactivamente con el usuario, utilizando técnicas gráficas de generación de mallas. El grado de automatización del Pre-procesamiento, distingue a un programa de elementos finitos y es lo que mayor valor comercial aporta al mismo. En la etapa o fase de proceso de cálculo se forma y resuelve el sistema de ecuaciones algebraicas y resultantes del MEF; requiriéndose para ello, altas velocidades y memoria de gran capacidad en la máquina computadora.

Por último la fase de Post procesamiento, se refiere a las etapas de análisis de resultados del cálculo; aquí en esta fase se emplean intensamente los gráficos, con el objetivo de simplificar la interpretación de resultados. Por ejemplo, en el caso de la modelación del proceso de soldadura los gráficos de resultados pueden mostrar la pieza deformada, la distribución de tensiones, los desplazamientos máximos y mínimos, los campos de temperaturas mediante el empleo de isotermas de diferentes colores, el enfriamiento de una pieza a temperatura ambiente, después de realizar los pases de soldadura de forma general en los resultados. La herramienta utilizada en este trabajo para la modelación, que es el Cosmos/M, oferta alternativas de presentación como tipos de gráfico, tipos de tablas, visualización, animación, etc.

Para obtener un resultado positivo en las tres fases se debe tener cierto dominio del programa utilizado, con el objetivo de lograr un mínimo de error, resultados confiables y disminuir los tiempos de cálculos y el costo computacional [9].

3. Modelo de Cálculo por Elementos Finitos

Un cuerpo sólido que va a ser analizado mediante MEF es dividido en pequeñas regiones, por

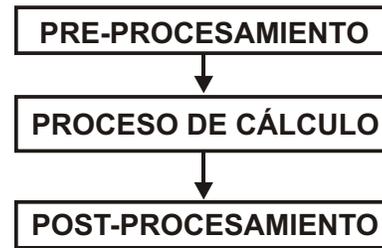


Figura 1. Estructura general de un programa de Elementos Finitos.

ejemplo, triangulares, rectangulares, cuadriláteros, etc., denominados **Elementos Finitos**. Estos elementos se conectan entre sí a través de puntos, generalmente situados en los vértices de los elementos y son denominados **nodos**. Al conjunto de elementos con sus nodos se denomina **Malla de los Elementos Finitos**. Esta malla, más todos los datos que describen el problema, se conoce como **Modelo de Cálculo por Elementos Finitos** [9].

Los elementos pueden ser lineales, triangulares, cuadriláteros, etc., en dependencia del tipo de grupo que se escoja (Plane D, Shell, Solid, etc.); es recomendable para un análisis tridimensional de la soldadura, escoger el grupo perteneciente a sólidos (Solid), 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 [9, 10]. Además en estos elementos se representan de una forma más completa en el espacio (3D) los esfuerzos o tensiones. Por otro lado para representar la soldadura de múltiples pasadas en el plano (2D) con metal depositado generalmente se escoge el grupo Plane 2D o Shell, con elementos cuadriláteros de cuatro nodos o triangulares de tres nodos.

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, lo que implicaría un gran consumo de tiempo y ser propenso a errores por cálculos analíticos convencionales [10].

3.1. Criterios de convergencia

Cuando se realice un modelo, 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; este es un factor que debe garantizar, que los resultados del cálculo no dependan de la densidad del mallado [4, 9,10].

Como método de solución aproximada se puede plantear entonces que los paquetes MEF, posibilitan encontrar las magnitudes desconocidas (incógnitas) en determinados puntos y con determinada cercanía a la solución exacta, precisión que, como se ha mencionado, mejora con el aumento del número de elementos, tal y como se muestra en la Figura 2; donde se puede apreciar que, cuando se aumenta el número de elementos (aumentando a densidad de mallado), la solución por MEF se acerca más a la solución exacta de fenómeno que se representa.

Como se puede observar en la figura a anterior, la solución obtenida mediante MEF se acercará más a la solución exacta, siempre que se aumente el número de elementos que conformará el mallado del modelo. A este estudio previo, como se ha referido anteriormente, se le denomina análisis de la convergencia. En el caso de la modelación de la transferencia de calor en la soldadura, se debe analizar el mismo modelo con varias densidades de malla, hasta encontrar los rangos de temperaturas, más exactas y precisas, así como el valor de las deformaciones y tensiones en los nodos deseados.

Es de suma importancia tener presente que se debe ajustar la malla hasta una densidad requerida, de manera que no se utilicen elementos más pequeño que lo necesario, evitando así aumentar el costo computacional, la complejidad de las ecuaciones y el tiempo de cálculo [10].

También cuando se realiza el análisis de convergencia en la simulación del proceso de soldadura, como por ejemplo en uniones a tope, es usual dividir el modelo en varios volúmenes. Debido a que la temperatura, los esfuerzos y las 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 y de la ZAC, la cual en los procesos de soldadura por arco eléctrico presenta un ancho que oscila entre 2 y 4 mm (0.078"-0.157"), para reducir los costos computacionales sin sacrificar la exactitud (Figura 3) [10]. De igual forma, se selecciona finalmente aquel modelo que aporte una solución lo más exacta posible al análisis efectuado, por ejemplo, para obtener historias térmicas y tensiones, en nodos dentro del cordón y en la Zona Afectada por el Calor.

De manera que al construir el modelo geométrico se deben tener presente:

- ¿Cómo representar el comportamiento físico del problema?
- ¿Qué tipo de elementos utilizar?
- ¿Cuántos elementos utilizar?
- ¿Cómo construir la malla?
- ¿Dónde debe ser la malla fina y dónde gruesa?

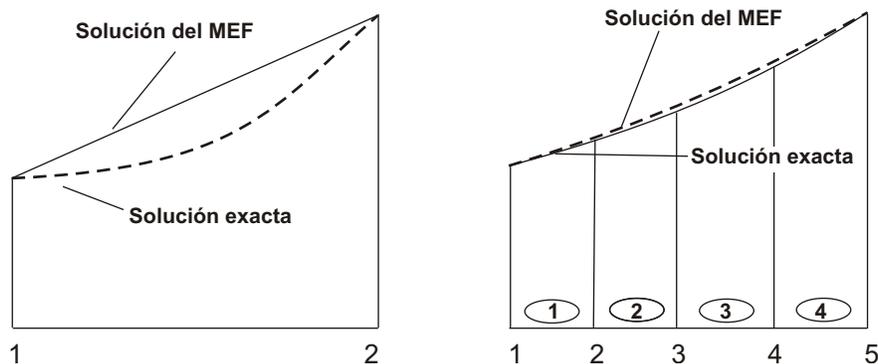


Figura 2. Forma de solución del Método de los Elementos Finitos.

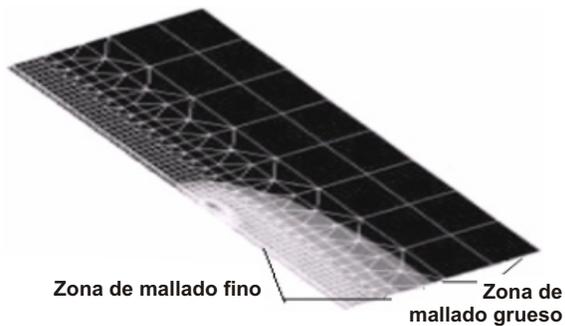


Figura 3. Diferencia de mallado para lograr mayor precisión en la zona del cordón y la ZAC.

- ¿Cuáles son las condiciones de contorno del problema y cómo representarlas?
- Y al chequear los resultados, analizar:
¿Qué tan confiables son resultados?

De igual forma al construir el modelo y chequearlo mediante el programa MEF (Run Check), se pueden obtener errores comunes como:

- Error en las propiedades del material.
- Uno o más nodos quedan desconectados del modelo.
- No hay soportes, o son insuficientes para evitar que el modelo se desplace como un cuerpo rígido o existen grandes diferencias de rigidez.
- Los elementos son del tipo incorrecto, unidades inconsistentes, entre otros.

De esta forma se puede volver a analizar el modelo y rectificar los errores que puedan presentarse, tal como la rigidez o restricción de los desplazamientos impuesta de forma incorrecta o elementos que escogidos que no pertenecen al modelo escogido, ya sea en el plano o tridimensional.

3.2. Procedimiento a seguir para la obtención mediante MEF de los campos térmicos, deformaciones y tensiones residuales en uniones soldadas

Estudios realizados por la autora así como información recopilada en su investigación, motivaron a que se creara un procedimiento general para la simulación de 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.

Para el modelado de cualquier problema debe definirse primeramente los parámetros geométricos o realización del dibujo a utilizar. Este puede ser importado desde otros programas de dibujos gráficos, como el Auto CAD, Mechanical Desktop, entre otros, pero también puede ser realizado por el propio programa MEF, siempre que se brinde esta opción, para facilitar el trabajo del usuario.

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 carga térmica asociada a las curvas de tiempo, 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 físicas y mecánicas del material sean termo dependiente; es decir que varíen con la temperatura en el análisis efectuado, así como representar adecuadamente el embridamiento o rigidez externas de las juntas, para de este modo obtener correctamente las deformaciones y tensiones residuales provocadas por los campos térmicos.

Se debe explotar siempre que sea posible la simetría del modelo, se puede analizar hasta un $\frac{1}{4}$ del modelo, si no varía ni el material, ni el espesor, ni las condiciones de carga y rigidez, ahorrando un considerable costo computacional ya que se disminuye el número de ecuaciones y matrices, sin llegar a limitar el área del cordón ni la ZAC [4, 9].

Para poder lograr la no linealidad del proceso y la característica termo dependiente de las propiedades (ver procedimiento) fue necesario, dado que el programa que se utilizó fue el Cosmos/M, relacionar curvas de temperaturas con el valor de las propiedades tanto físicas como mecánicas, en un rango determinado. Si se pretende hacer un modelo con características que se acerquen a la práctica, se deben variar las propiedades del material como, coeficiente de conductividad térmica lineal (K_X), tensión de fluencia (σ_f), calor específico (c) y módulo de elasticidad (E_X), en función de la temperatura, siendo entonces el sistema de ecuaciones no lineales. Esto se puede realizar, utilizando "Curvas de temperaturas" y

relacionando la propiedad del material con el número de la curva a la cual pertenece.

Al obtener las propiedades termo-dependientes en el MEF, automáticamente se pasa del análisis transiente lineal a transiente no lineal y se declaran las propiedades dependientes de las curvas de temperaturas creadas, tal y como se observa en la Tabla 1. El valor 1 que aparece en la tabla se refiere a que los valores de las propiedades de modulo de elasticidad, calor específico, conductividad térmica y tensión de fluencia pertenecen o varían en función de las curvas de temperaturas respectivas.

En la Figura 4 se puede apreciar la termo-dependencia de la tensión de fluencia (σ_f) del acero ASTM A36.

El procedimiento a seguir para análisis transiente no lineal de la soldadura mediante MEF se describe en la Figura 5.

3.3. Definición de la transmisión del calor por conducción

La mayoría de los análisis de soldadura mediante MEF han utilizado un marco de referencia material, llamado también marco de referencia

Tabla 1
Análisis transiente no lineal al lograr propiedades termo-dependientes

Etiqueta	Nombre	Temp/BH	Cr	Valor
1	EX		2 ←	1.000000e+000
1	NUXY		0	2.900000e-001
1	GXY		0	7.900000e+005
1	ALPX		0	1.500000e-005
1	DENS		0	8.000000e-006
1	C		4 ←	1.000000e+000
1	KX		3 ←	1.000000e+000
1	SIGYLD		1 ←	1.000000e+000
1	MPERM_R		0	1.000000e+000

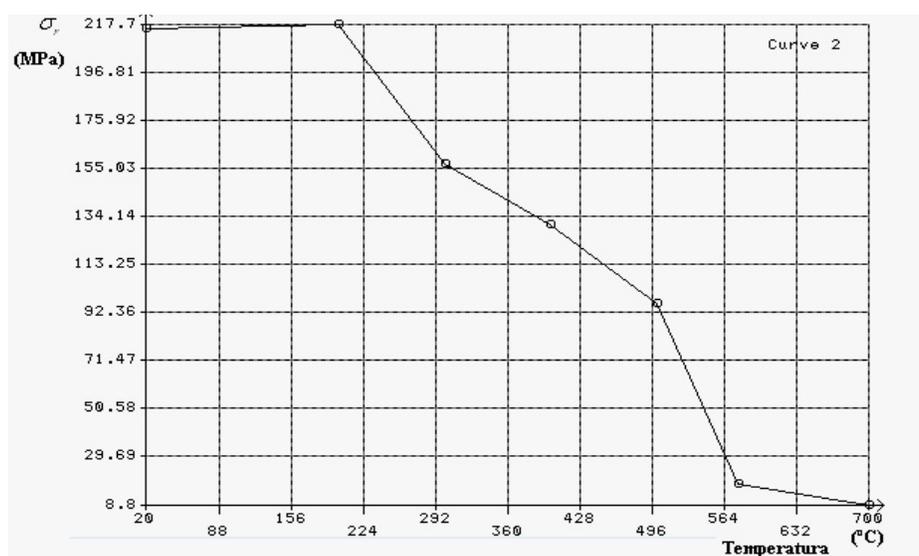


Figura 4. Forma que adopta la curva de tensión de fluencia (σ_f) del acero ASTM A36 en función de la temperatura.

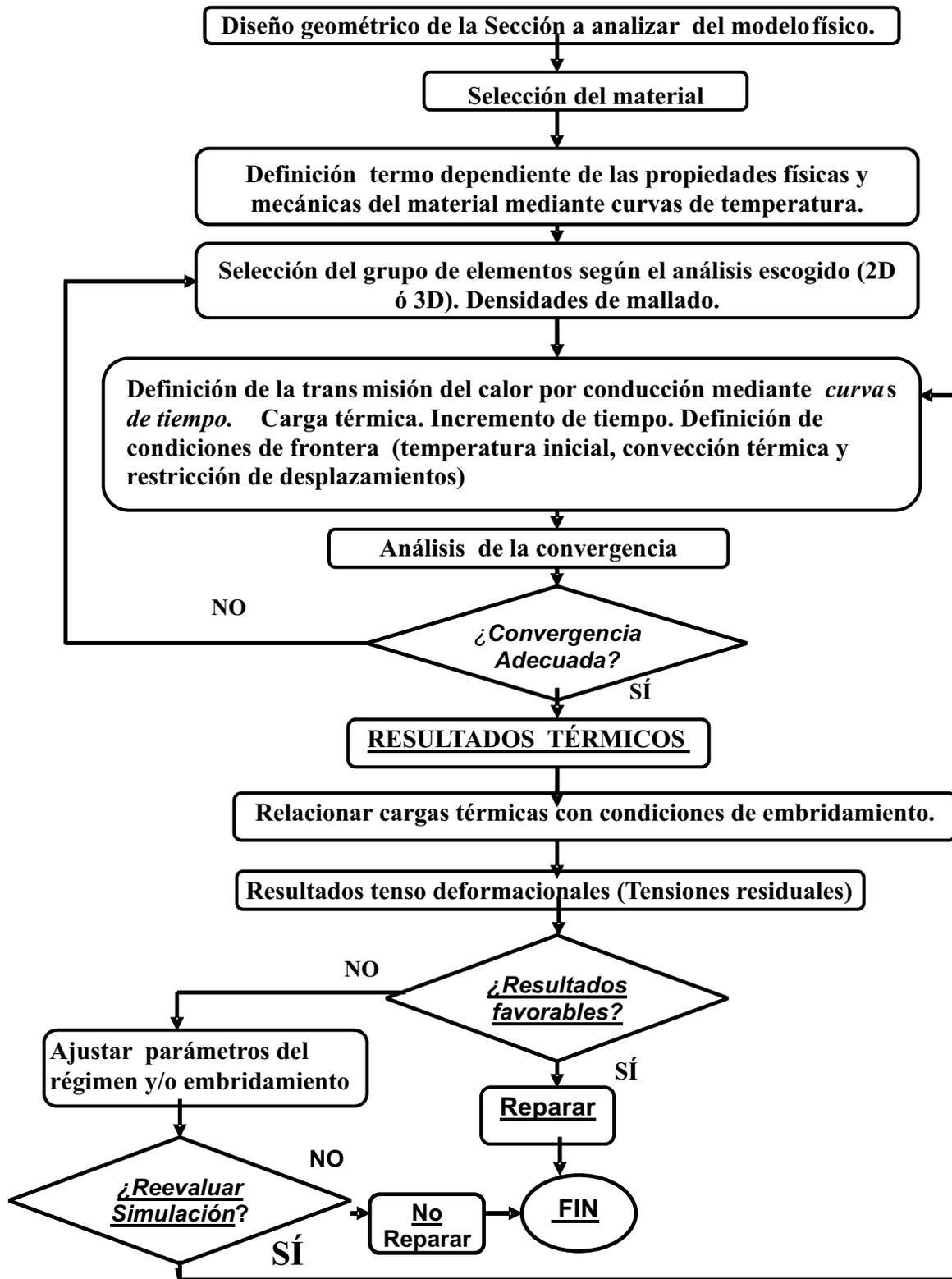


Figura 5. Procedimiento para la obtención mediante MEF de campos térmicos y tensiones residuales.

lagrangiano, en el cual el calor transmitido desde la fuente de calor hacia la pieza se mueve como una función del tiempo [4].

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 describirá de forma discreta a partir de "Curvas de tiempo" (ver procedimiento en la Figura 5) y no continua, 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 de la cantidad de elementos que se encuentran en la longitud de soldadura a analizar.

Se debe utilizar la entrada de calor por elementos, ya que de estudios e investigaciones, se ha derivado que la mejor opción para el análisis de flujo de calor en soldadura, es aplicando el calor mediante elementos, para ello es necesario conocer bien la orientación de las caras de los elementos, específicamente para el análisis tridimensional.

Los pasos para simular una adecuada traslación de la fuente de calor, son los siguientes:

1. Se identificarán todos los elementos que se encuentren en la trayectoria de desplazamiento del foco térmico, el orden que tiene y por tanto su número.
2. Se conocerá la orientación de las caras de todos los elementos de la trayectoria.
3. Se tendrá el valor del flujo de calor a aplicar por cada cara del elemento.
4. Se seleccionará las caras a utilizar de cada elemento para aplicar el flujo de calor proveniente de la fuente térmica de soldadura.

Además en este paso se necesita conocer: Tipo de proceso de soldadura utilizado, este dato brinda los valores de I , V_a , η , necesarios para obtener la carga térmica (*Heat input*), donde I , V_a , η : Corriente, Voltaje y Eficiencia del proceso de soldadura empleado respectivamente.

También se debe tener presente el valor del coeficiente de convección, se puede tomar por ejemplo para ambientes controlados sin turbulencia, $5\text{ W/m}^2\text{ K}$ ($5\text{ J/sm}^2\text{C}$) para las superficies externas y laterales que están en contacto con el aire circundante y para la superficie inferior la cual se encuentra entre una película de aire y la mesa de trabajo, el coeficiente de convección puede ser de $9\text{ W/m}^2\text{ K}$ ($9\text{ J/sm}^2\text{C}$) [10]. Del mismo modo se puede desprestigiar o no la conducción del calor por radiación, según sea el caso. Luego de obtener los resultados térmicos, se asocian las cargas térmicas al régimen de embridamiento o rigidez de las juntas mediante la restricción de los desplazamientos, paso indispensable para lograr los desplazamientos, deformaciones y tensiones residuales. En el caso de no obtener adecuados valores de tensiones residuales se puede tratar de ajustar parámetros del régimen tecnológico, tal como disminuir calor de entrada: disminuyendo la intensidad de corriente, aumentando la velocidad de soldadura; precalentamiento inicial y/o disminuir las condiciones de rigidez siempre que sea posible y volver a reevaluar la simulación para determinar finalmente si se decide reparar. En las figuras siguientes se muestran dos tipos de uniones, Ejemplo 1: Unión a tope (Figura 6 y 7) y Ejemplo 2: unión en T (Figura 8) de aceros ASTM A-36 con espesores de 12 mm, realizados por proceso manual por arco eléctrico (SMAW) con corriente de 120 A, voltaje

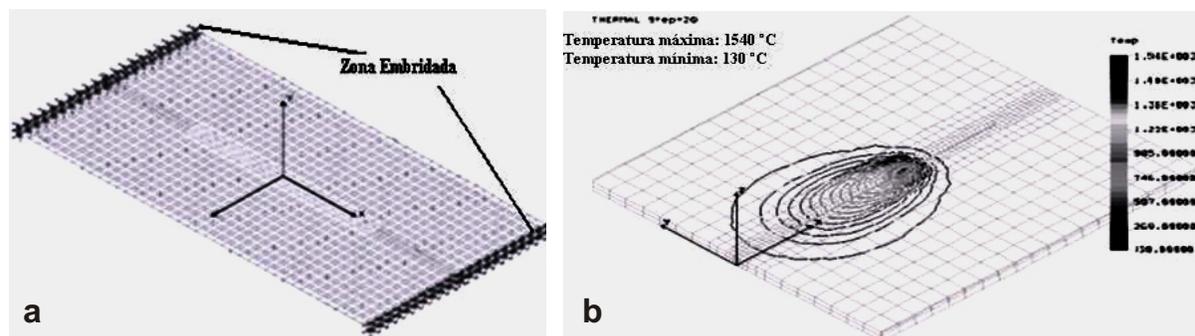


Figura 6. Modelo geométrico mediante MEF (a) y campos térmicos obtenidos (b).

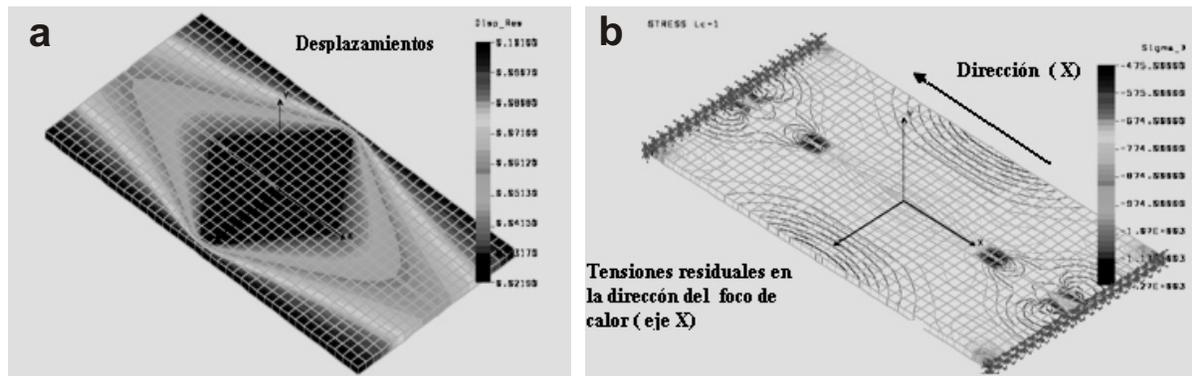


Figura 7. Desplazamientos obtenidos según la rigidez impuesta (a) y tensiones residuales en la dirección de soldadura (b).

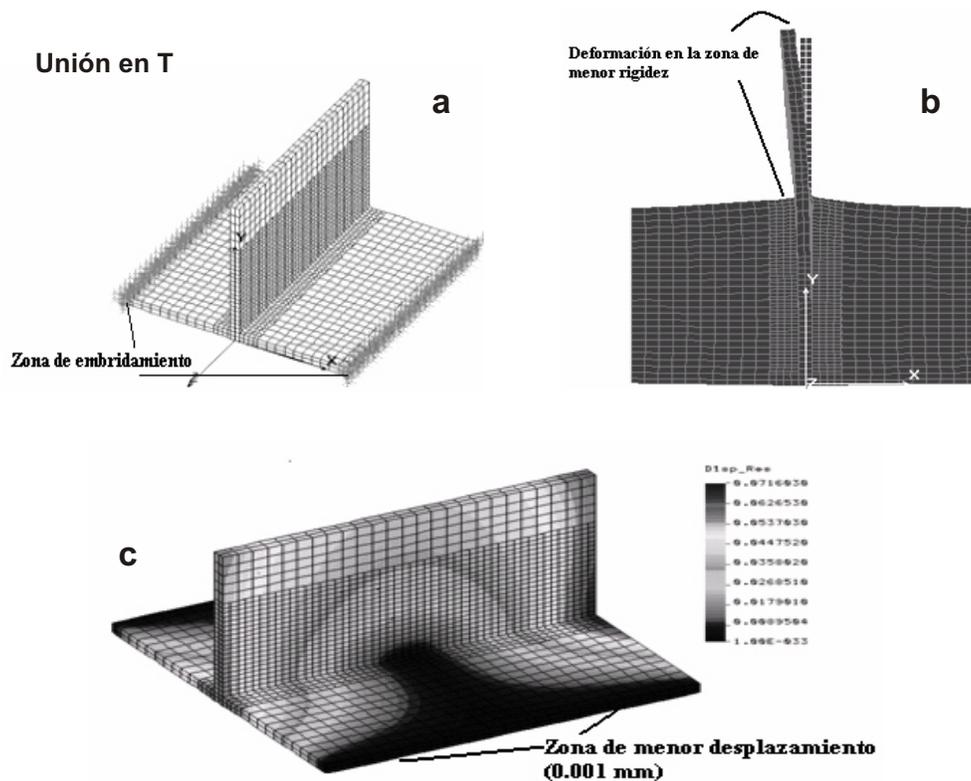


Figura 8. Modelo geométrico embridado mediante MEF (a), deformación (b) y desplazamientos (c).

de 22 V y se parte de la temperatura ambiente: 30°C.

4. Conclusiones

1. El procedimiento desarrollado a partir de la curvas de tiempo y de temperaturas permitió la modelación de los campos térmicos ajustados a parámetros reales de proceso SMAW, lográndose

relacionar los mismos con los desplazamientos para obtener tensiones residuales en juntas a topes y en T, de acero ASTM A-36, de 12 mm de espesor, sometidas a alto embridamiento.

2. El modelado mediante MEF del proceso de soldadura tridimensional 3D con elementos hexagonales de 8 nodos (Grupo: SOLID), asociados a las curvas de tiempos y de temperaturas permitió en ambos casos, representar el proceso

como transiente no lineal con resultados satisfactorios y similares a los registrados en la práctica y fuentes referenciadas.

3. Se lograron resultados muy cercano a los valores conocidos de la práctica y de las publicadas en fuentes referenciadas lo que permite su utilización con el fin de ajustes tecnológicos de diseño o en el campo de la metalurgia de la soldadura, ya que se basan en representación simulada de tiempo real.

Referencias bibliográficas

1. Bonifaz E.A. Finite Element Analysis of heat flow in single-pass arc welds. *Welding Journal*. 2000.
2. Berglund Daniel. Simulation of welding and stress Relief Heat Treating in the Development of Aerospace Components. University of Lulea Techniska. 2001
3. Frewin M. R. and D. A. Scott. Finite Element Model of Pulsed Laser Welding. Department of Materials Engineering, University of Wollongong, Wollongong NSW Australia. Supplement to the *Welding Journal*. January 1999.
4. Goldak J., Moashi Gu, Numerical Aspect of modelling weld. Moashigu, Carleton University. *ASM Handbook, Vol 6 Welding, Brazing and Soldering*. 1999.
5. Guyen N. T., A.Otha, Analytical solutions for transient temperature of semi finite body subject to 3D moving heat source. *Welding Journal*. 1999.
6. Yancey R., Ph D. Shushi Khurana, Including Weld Process Modeling in Structural and Durability Modeling. Product of development Conference. MSC Software. California. EWI, 2004.
7. Hong, J. H., Dong, P., and Tsai, C.L. Assessment of numerical Procedures for Residual Stress Analysis of Multipass Welds. *Welding Journal*. 1998. <http://www.ndt.net/publicat/bibliog/aws77n09.htm>
8. Maxunawa, A. Modelling of Heat and fluid flow in arc welding. *Proc Int. Trends in welding research ASM International*, 1992.
9. Ansys Incorporated. NATEC Ingenieros. Simulación térmica y mecánica mediante el MEF del proceso de soldadura multipasadas. 2003. <http://www.ccai.org.uk/Ansys-Inc.html>
10. García, Y., Bejar A. Obtención de los campos térmicos mediante el Método de los Elementos Finitos en las reparaciones por soldadura en equipo o estructuras metálicas de gran importancia. 25 Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales. Instituto Tecnológico de Saltillo, México. Noviembre 2003.

Recibido el 12 de Junio de 2006

En forma revisada el 12 de Febrero de 2007