



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA  
UNIDAD ZACATENCO

**SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

## “DIFERENTES TÉCNICAS DE MODELADO NUMÉRICO PARA UNIONES POR SOLDADURA”

### TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA**

PRESENTA:

**ING. JUAN ATONAL SÁNCHEZ**

DIRECCIÓN DE TESIS:

DR. GUILLERMO URRIOLAGOITIA SOSA  
DRA. BEATRIZ ROMERO ÁNGELES



## **Agradecimientos**

---

---

A Dios por darme la oportunidad de disfrutar todo lo que tengo, y la oportunidad de luchar por lo que no tengo. Por darme la oportunidad de ser feliz a lado de mi familia, y por sufrir a lado de ellos. Por darme la oportunidad de conocer a personas extraordinarias a quienes puedo llamar amigos. Por darme la bendición de un día mas y poder luchar por una oportunidad.

A mis padres por estar siempre conmigo, que a pesar de todo nunca dejaron de confiar en mí.

Al Dr. Guillermo Urriolagoitia Sosa, que con quien tengo muchos desacuerdos, pero siempre tiene la empatía para soportarme, y que a pesar de muchas discusiones siempre encuentra palabras para orientarme.

A la Dra. Beatriz Romero Ángeles, por darme la oportunidad de desarrollar este trabajo de tesis.

Al pueblo de México, que quienes a través de CONACyT me apoyaron para el desarrollo de este trabajo.

Al Instituto Politécnico Nacional, por permitirme ser parte de esta gran institución, que ha cambiado mi vida durante más de 10 años..... Politécnico por convicción no por circunstancias, Orgullosamente Politécnico.

Ing. Juan Atonal Sánchez

**Resumen**

La soldadura es un proceso de fabricación en donde se realiza la unión de dos o más piezas de un material, usualmente logrado a través de la coalescencia (fusión), en la cual las piezas son soldadas fundiéndolas, se puede agregar un material de aporte (metal o plástico), que al fundirse, forma un charco de material fundido entre las piezas a soldar (el baño de soldadura) y, al enfriarse, se convierte en una unión fija a la que se le denomina cordón. En la industria metalúrgica, el 90% de las estructuras armadas se unen con soldadura, de tal modo que el estudio de este proceso tiene gran importancia para las industrias.

Las simulaciones numéricas basadas en el Método de los Elementos Finitos (*MEF*) son muy usadas como herramientas para la predicción de distorsiones y esfuerzos residuales tras un proceso de soldeo.

Este trabajo presenta la metodología implementada en un análisis acoplado termo mecánico de 2 placas sobrepuestas de acero dulce. En la simulación se emplea un software comercial basado en *MEF* (Ansys). Se desarrolla la modelación 3D no lineal transitoria del proceso de soldadura.

Durante la simulación térmica se utilizó el elemento SOLID70, se declararon las propiedades físicas termo dependientes y se indujo el flujo de calor volumétrico como carga al modelo y la convección como pérdida de calor del sistema, además se declaró la temperatura ambiente y la temperatura de las placas antes de iniciar el proceso.

La simulación estática estructura se llevó a cabo a partir del modelo generado en la corrida térmica, utilizando en este caso el elemento SOLID45. Se declararon las propiedades mecánicas termo dependientes del acero dulce y las respectivas restricciones, así como las cargas térmicas obtenidas del análisis térmico, obteniendo en este último, los esfuerzos residuales.

**Abstract**

Welding is a manufacturing process where the union of two or more pieces of a material is done, usually achieved through coalescence (fusion) in which the parts are welded by melting, you can add a filler (metal or plastic), which melts it forms a pool of molten material between the workpieces (the weld) and, upon cooling, becomes a fixed connection which is called cord. In the metal industry 90% of the armed structures are welded together so that the study of this process is of great importance for industry.

Numerical simulations based on the Finite Element Method (*MEF*) are widely used as tools to predict distortions and residual stresses after welding process.

This paper presents the methodology implemented in thermo mechanical coupled analysis of two overlapping plates of mild steel. In commercial software simulation based on *MEF* (Ansys) it is used. Nonlinear transient welding process develops 3D modeling.

The SOLID70 element used for the thermal simulation, dependent thermo physical properties were declared and flow volume heat and load the model and the convection heat loss from the system was induced in addition the ambient temperature and the temperature of the declared plates before starting the process.

The static structure simulation was conducted on the model generated in the thermal runaway, using in this case the SOLID45 element. Dependent thermo mechanical properties of mild steel and the respective restrictions, as well as thermal loads obtained from thermal analysis, obtaining in the latter declared residual stresses.

<b>Índice general</b>	
<b>Resumen</b>	<b>i</b>
<b>Abstract</b>	<b>ii</b>
<b>Índice general</b>	<b>iii</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>vii</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>x</b>
<b>Simbología</b>	<b>xi</b>
<b>Objetivos</b>	<b>xiv</b>
<b>Justificación</b>	<b>xv</b>
<b>Capítulo I.- Método de los Elementos Finitos</b>	<b>1</b>
I.1.- Métodos numéricos	2
I.2.- Método de los Elementos Finitos ( <i>MEF</i> )	2
I.3.- Breve historia sobre el Método de los Elementos Finitos	3
I.4.- Formulación del Método de los Elementos Finitos	5
I.4.1.- Condiciones de convergencia	6
I.4.2.- Tipos de elementos	6
I.4.2.1.- Elementos triangulares	7
I.4.2.2.- Elementos rectangulares	9
I.4.3.- Nodos	11
I.4.4.- Grados de libertad	12
I.5.- Tipos de análisis	12
I.6.- Aplicación del <i>MEF</i> en sistemas computacionales	12
I.6.1.- Preprocesador	13
I.6.2.- Procesador (Solucionador)	13
I.6.3.- Posprocesador	14
I.7.- Planteamiento del problema	14
I.8.- Sumario	15
I.9.- Referencias	15
<b>Capítulo II.- Diferentes técnicas de procesos de soldadura</b>	<b>19</b>
II.1.- Soldadura	20

---

II.2.- Breve historia de la soldadura	20
II.3.- Técnicas de soldadura	22
II.3.1.- Soldadura manual con electrodos revestidos (MMA y SMAW)	22
II.3.1.1.- Ventajas	22
II.3.1.2.- Desventajas	23
II.3.2.- Soldadura semiautomática con hilo sólido (GMAW)	23
II.3.2.1.- Ventajas	24
II.3.2.2.- Desventajas	25
II.3.3.- Soldadura por arco bajo gas protector de tungsteno (GTAW)	25
II.3.3.1.- Ventajas	26
II.3.3.2.- Desventajas	26
II.3.4.- Soldadura con arco de plasma PAW	26
II.3.4.1.- Ventajas	27
II.3.4.2.- Desventajas	27
II.3.5.- Soldadura arco sumergido SAW	27
II.3.5.1.- Ventajas	28
II.3.5.2.- Desventajas	29
II.4.- Esfuerzos residuales	29
II.4.1.- Esfuerzo residual	29
II.4.2.- Esfuerzo residual por soldadura	30
II.5.- Simulación de procesos de soldadura por Método de los Elementos Finitos	31
II.5.1.- Diferentes técnicas de soldaduras analizadas con <i>MEF</i>	32
II.5.1.1.- Diferentes tipos de apoyo	32
II.6.- Guía de modelado	34
II.6.1.- Guía general	34
II.6.2.- Representación nodal y de elementos de diferentes uniones soldadas	34
II.6.2.1.- Modelado de una soldadura de sección transversal tipo <i>Chaflán</i> , con elementos inclinados	34
II.6.2.2.- Modelado de una soldadura de sección transversal tipo <i>chaflán</i> , con dos elementos	35
II.6.2.2.1.- Modelado de una soldadura tipo <i>chaflán</i> en placas	35

---

sobrepuestas	
II.6.2.3.- Modelado de soldadura en placas sobrepuestas por láser	36
II.7.- Sumario	37
II.8.- Referencias	37
<b>Capítulo III.- Análisis térmico transitorio utilizando el MEF</b>	<b>40</b>
III.1.- Soldadura con GAP y sin GAP	41
III.2.- Zona afectada por temperatura (ZAT)	41
III.3.- Método de los Elementos Finitos aplicado a la transferencia de calor	43
III.4.- Tipos de análisis térmicos	45
III.5.- Análisis térmico transitorio de dos placas de acero dulce utilizando el MEF	47
III.5.1.- Geometría y dimensionamiento de las placas	47
III.5.2.- Propiedades físicas termo dependientes del acero dulce	47
III.5.3.- Tipo de elemento y discretizado	51
III.5.4.- Cargas y condiciones de frontera	52
III.5.5.- Paso de carga en función del tiempo	54
III.6.- Resultados	54
III.7.- Sumario	57
III.8.- Referencias	58
<b>Capítulo IV.- Análisis estructural utilizando el MEF para la determinación de esfuerzos residuales después de un proceso de soldadura</b>	<b>59</b>
IV.1.- Esfuerzos residuales	60
IV.2.- Clasificación de origen de esfuerzos residuales	60
IV.2.1.- Métodos mecánicos	60
IV.2.2.- Métodos térmicos	60
IV.2.3.- Procesos de manufactura	60
IV.2.4.- Métodos químicos	61
IV.3.- Clasificación de esfuerzos residuales	61
IV.4.- Esfuerzos residuales por soldadura	61
IV.4.1.- Origen de esfuerzos residuales por soldadura	63

<b>Índice general</b>	<b>vi</b>
IV.5.- Análisis estructural para la determinación de esfuerzos residuales después de un proceso de soldadura utilizando el <i>MEF</i>	<b>64</b>
IV.5.1- Geometría y dimensionamiento de las placas	<b>64</b>
IV.5.2 - Propiedades mecánicas termo-dependientes del acero dulce	<b>65</b>
IV.5.3- Tipo de elemento y discretizado	<b>66</b>
IV.5.4- Cargas y condiciones de frontera	<b>67</b>
IV.6.- Resultados	<b>70</b>
IV.7.- Sumario	<b>75</b>
IV.8.- Referencias	<b>75</b>
<b>Conclusiones</b>	<b>76</b>
<b>Recomendaciones para trabajos futuros</b>	<b>78</b>



## Índice de Figuras

<b>Figura I.1.-</b> Sistema continuo a un modelo discreto (malla)	<b>6</b>
<b>Figura I.2.-</b> Elemento triangular	<b>8</b>
<b>Figura I.3.-</b> Elemento triangular lineal, cuadrático y cúbico	<b>8</b>
<b>Figura I.4.-</b> Elemento rectangular de 4 nodos	<b>10</b>
<b>Figura I.5.-</b> Elemento cuadrático de 8 nodos	<b>11</b>
<b>Figura I.6.-</b> Menú del preprocesador	<b>13</b>
<b>Figura I.7.-</b> Menú del Solucionador	<b>13</b>
<b>Figura I.8.-</b> Menú del Preprocesador	<b>14</b>
<b>Figura II.1.-</b> Soldadura manual con material de aporte	<b>22</b>
<b>Figura II.2.-</b> Soldadura tipo MIG y MAG	<b>24</b>
<b>Figura II.3.-</b> Soldadura tipo TIG	<b>25</b>
<b>Figura II.4.-</b> Soldadura con arco de plasma.	<b>27</b>
<b>Figura II.5.-</b> Soldadura tipo arco sumergido	<b>28</b>
<b>Figura II.6.-</b> Distribución de esfuerzos residuales en una unión soldada	<b>31</b>
<b>Figura II.7.-</b> Apoyo tipo <i>Chaflán</i>	<b>32</b>
<b>Figura II.8.-</b> Apoyo tipo placa sobrepuesta	<b>33</b>
<b>Figura II.9.-</b> Apoyo tipo placa sobrepuesta con láser	<b>33</b>
<b>Figura II.10.-</b> Apoyo tipo soldadura sobrepuesta manual	<b>33</b>
<b>Figura II.11.-</b> Representación nodal y de elementos cuadráticos	<b>34</b>
<b>Figura II.12.-</b> Elementos para soldadura tipo <i>chaflán</i>	<b>35</b>
<b>Figura II.13.-</b> Elementos para soldadura sobrepuesta	<b>36</b>
<b>Figura II.14.-</b> Primer modelo simplificado para placas sobrepuestas	<b>36</b>
<b>Figura II.15.-</b> Segundo modelo simplificado para placas sobrepuestas	<b>36</b>
<b>Figura II.16.-</b> Modelo de soldadura por láser	<b>37</b>
<b>Figura III.1.-</b> Existencia de un GAP después del proceso de soldadura	<b>41</b>
<b>Figura III.2.-</b> Zona afectada por la temperatura	<b>41</b>
<b>Figura III.3.-</b> Subdivisiones del ZAT	<b>42</b>
<b>Figura III.4.-</b> Representación del ángulo y pie de la soldadura	<b>43</b>
<b>Figura III.5.-</b> Cuerpo sujeto a transferencia de calor	<b>44</b>
<b>Figura III.6.-</b> Acero revestido con latón (deformaciones no uniformes)	<b>46</b>

<b>Índice de Figuras</b>	<b>viii</b>
<b>Figura III.7.- Geometría de simulación</b>	<b>47</b>
<b>Figura III.8.- Calor específico dependiente de la temperatura</b>	<b>49</b>
<b>Figura III.9.- Densidad dependiente de la temperatura</b>	<b>50</b>
<b>Figura III.10.- Conductividad térmica dependiente de la temperatura</b>	<b>50</b>
<b>Figura III.11.- Asignación de las propiedades térmicas para el acero dulce</b>	<b>51</b>
<b>Figura III.12.- Geometría SOLID70</b>	<b>51</b>
<b>Figura III.13.- Discretizado de placas</b>	<b>52</b>
<b>Figura III.14.- Perfil de distribución de temperaturas en cada paso de tiempo durante el proceso de soldadura</b>	<b>55</b>
<b>Figura III.15.- Distribución de la temperatura nodal al término del proceso</b>	<b>55</b>
<b>Figura III.16.- Distribución de temperaturas, a) 0.7092s, b) 1.418s, c) 2.128s y d) 2.837s</b>	<b>56</b>
<b>Figura III.17.- Incremento y decremento de temperatura para cuatro pasos de tiempo</b>	<b>57</b>
<b>Figura IV.1.- Isotermas de soldeo</b>	<b>62</b>
<b>Figura IV.2.- Distribución de esfuerzos residuales en una unión soldada.</b>	<b>63</b>
<b>Figura IV.3.- Esquema general del análisis de acople secuencial mediante el <i>MEF</i></b>	<b>64</b>
<b>Figura IV.4.- Coeficiente de dilatación térmica</b>	<b>65</b>
<b>Figura IV.5.- Módulo de elasticidad</b>	<b>65</b>
<b>Figura IV.6.- Esfuerzo de cedencia</b>	<b>66</b>
<b>Figura IV.7.- Elemento SOLID45</b>	<b>67</b>
<b>Figura IV.8.- Temperaturas nodales en 3.0024 segundos</b>	<b>68</b>
<b>Figura IV.9.- Temperaturas nodales en 150 segundos</b>	<b>68</b>
<b>Figura IV.10.- Temperaturas nodales en 700 segundos</b>	<b>69</b>
<b>Figura IV.11.- Temperaturas nodales en 900 segundos</b>	<b>69</b>
<b>Figura IV.12.- Esfuerzos residuales longitudinales (Pa)</b>	<b>70</b>
<b>Figura IV.13.- Distribución de esfuerzos longitudinales</b>	<b>71</b>
<b>Figura IV.14.- Esfuerzos residuales transversales (Pa)</b>	<b>71</b>
<b>Figura IV.15.- Distribución de esfuerzos transversales</b>	<b>72</b>
<b>Figura IV.16.- Distribución de esfuerzos longitudinales a partir de la parte superior a inferior de las placas, sobre la línea de soldadura</b>	<b>72</b>
<b>Figura IV.17.- Distribución de esfuerzos transversales a partir de la parte superior a inferior de las placas, sobre la línea de soldadura</b>	<b>73</b>

---

<b>Figura IV.18.-</b> Esfuerzos longitudinales a través de la línea del cordón de soldadura	<b>73</b>
<b>Figura IV.19.-</b> Distribución de Esfuerzos de Von Mises (Pa)	<b>74</b>
<b>Figura IV.20.-</b> Esfuerzos de Von Mises en los puntos superiores, medios e inferiores, a una distancia de 12.3 mm sobre la línea de acción.	<b>74</b>

**Índice de Tablas**

<b>Tabla III.1.-</b> Diámetros de electrodos para materiales de bajo contenido de carbono	<b>48</b>
<b>Tabla III.2.-</b> Propiedades térmicas	<b>49</b>
<b>Tabla III.3.-</b> Parámetros de soldadura	<b>53</b>
<b>Tabla III.4.-</b> Parámetros del proceso de soldadura MIG	<b>54</b>

## Simbología

MEF	– Método de los Elemento Finitos
APDL	– Ansys Parametric Design Language
$\pi$	– $\pi = 3.1416$
F	– Fuerza puntual
$\sigma$	– Esfuerzo normal
$n$	– Número de términos de un polinomio
$p$	– Grado del polinomio
$N_i^*(\xi, \eta)$	– Funciones de la Lagrange
$\xi, \eta$	– Coordenadas paramétricas
$nen$	– Número de nodos del elemento
$\sum_{i=1}^n$	– Sumatoria de desplazamiento del nodo $i$
$\sum_{i=1}^4$	– Sumatoria de funciones Lagrangianas
$x, y$	– Ejes rectangulares
$i, j, k$	– Nodos de un elemento triangular
$\varphi$	– Ángulo de rotación
$u^e, v^e$	– Desplazamiento de un punto cualquiera sobre $u, v$
$u, v$	– Desplazamientos nodales
$u_i, v_i$	– Desplazamientos del nodo $i$
$N_i$	– Numero de nodo
$x_i, y_i$	– Coordenadas del nodo $i$
$\alpha$	– Alfa
GMAW	– Soldadura semiautomática con hilo sólido
MIG	– Gas inerte de metal
MAG	– Gas activo de metal
SMAW	– Soldadura manual con electrodos revestidos
MMA	– Soldadura manual de metal por arco
GTAW	– Soldadura por arco bajo gas protector con electrodo no consumible
TIG	– Gas inerte de tungsteno

---



---

PAW	– Soldadura con arco de plasma
SAW	– Soldadura por arco sumergido
$\sigma_x$	– Esfuerzo axial
$\sigma_y$	– Esfuerzo longitudinal
$L_w$	– Longitud del elemento de soldadura
$t_1, t_2$	– Espesor de placas
$\frac{L_w}{\sqrt{2}}$	– Longitud de garganta de soldadura
ZAT	– Zona afectada por temperatura
ZGG	– Zona de grano grande
ZGF	– Zona de grano fino
ZGI	– Zona de grano intercrítico
ipm	– Pulgadas por minuto
$S1$	– Superficie específica del volumen
$S2$	– Superficie general del volumen
$q_x, q_y, q_z$	– Flujos de calor conducidos por unidad de área
$\theta$	– Temperatura del cuerpo
$k_x, k_y, k_z$	– Conductividades térmicas de los ejes (x, y, z)
$q^B$	– Calor generado por unidad de volumen
$\theta_e$	– Temperatura ambiente
$k_n$	– Conductividad térmica del cuerpo
$n$	– Denota la dirección de la normal a la superficie
$q^s$	– Ingreso de flujo de calor en la superficie del cuerpo
$\rho$	– Densidad
$C_p$	– Calor específico
$k$	– Conductividad térmica
$W$	– Watts
$Q$	– Intensidad de calor introducido al sistema
$\eta$	– Eficiencia del proceso de soldadura GMAW
$V$	– Voltaje
$I$	– Corriente

---



---

<i>UX,UY,UZ</i>	– Desplazamientos sobre los ejes ( x, y, z)
<i>I,J,K,L,M,</i>	– Nodos de un elemento cubico
<i>N,O,P</i>	

**Objetivo general**

El objetivo principal de este trabajo es presentar la metodología para el análisis numérico termo-mecánico, para la predicción de esfuerzos residuales que se presentan después de un proceso de soldadura.

**Objetivos particulares**

- Estudio de las diferentes técnicas de soldadura.
- Estudio de diversas metodologías basadas en elemento finito, aplicadas al estudio de procesos de soldadura.
- Realización de un análisis térmico transitorio
- Realización de un análisis estructural para la estimación de los esfuerzos residuales



**Justificación**

Hoy en día dentro de las empresas, dedicadas a la producción de diversos artículos, que tienen como fin satisfacer la necesidad de un grupo específico de personas, se ven forzados a implementar nuevas herramientas que mejoren sus procesos de producción.

Una de estas herramientas utilizadas hoy en día por diversas empresas, son software de Diseño Asistido por Computadora (CAD), específicamente el software basado en el Método de los Elementos Finitos (*MEF*). El *MEF* tiene gran aplicación dentro de las industrias durante el proceso de diseño, en reingeniería, y procesos de manufactura, entre otros campos de aplicación, ya que permite evaluar los diferentes parámetros y condiciones, sin necesidad de hacer un gran número de ensayos, algo que para las aplicaciones industriales es muy importante.

Dentro de la manufactura hay una gran serie de productos que se obtienen mediante diversos procesos que involucran la zona de deformación plástica de los materiales, estos procesos son llevados a cabo en su gran mayoría por la industria metal mecánica, la cual busca obtener eficiencia, altas tasas de producción, baja generación de piezas rechazadas, buenos terminados superficiales, mejoras de las propiedades mecánicas del material, entre otras. Se busca dar una respuesta al estudio del comportamiento mecánico de diferentes tipos de materiales bajo la acción de diferentes procesos de manufactura, por lo cual las herramientas computacionales basadas en el *MEF* son una opción adecuada a la búsqueda de esta respuesta o predicción del comportamiento mecánico de los materiales.

Uno de los procesos de manufactura más estudiados es la soldadura, este es un proceso de unión de materiales en el cual se funden las superficies de contacto de dos o más partes mediante la aplicación conveniente de calor o presión. La integración de las partes que se unen mediante soldadura se denomina un ensamble soldado. Los esfuerzos residuales generados por un proceso de soldadura se producen por las distintas distribuciones de temperatura y el enfriamiento de la unión. Los esfuerzos residuales son identificados como uno de los factores influyentes en el deterioro de las partes soldadas, por lo que es de suma importancia determinar estos esfuerzos y predecir su comportamiento para garantizar su óptimo funcionamiento.

# Capítulo I



# Método de los Elementos Finitos



### I.1.- Métodos numéricos

Desde la aparición del hombre como sociedad, se ha enfrentado a problemas a los cuales en un gran número de ocasiones le ha dado soluciones de manera empírica. Sin embargo, ciertas civilizaciones se dieron a la tarea de encontrar explicaciones más exactas a estos problemas. Con lo cual, se inició la resolución de estos problemas mediante hipótesis y así con el uso de la ciencia generar soluciones exactas o aproximadas, fundamentadas en conocimiento con bases científicas [I.1].

Para la solución de ciertos problemas y basándose en las matemáticas, aparecen los métodos numéricos. Un método numérico es un procedimiento para obtener la solución de un problema matemático, casi siempre de manera aproximada, realizando cálculos aritméticos y lógicos [I.2]. La historia de análisis numérico surge desde los tiempos antiguos. Los *Babilonios*, 2000 años a. C. compusieron tablas matemáticas [I.3]. Algunos tipos de métodos utilizados para la resolución de problemas son [I.4]:

- Método de *Gräeffe*.
- Método de *Laguerre*.
- Método de *Bernoulli*.
- Método de *Horner*.
- Método de *Householder*.
- Método de *Newton-Raphson* especializado para polinomios.
- Método de *Richmond* especializado para polinomios.
- Método modificado de *Richmond*.
- Método de *Newton-Horner*.
- Método de *Richmond-Horner*.
- Método de *Jenkins-Traub*.
- Método de los Elementos Finitos.

### I.2.- Método de los Elementos Finitos (MEF)

El método de los elementos finitos (MEF), es un procedimiento numérico el cual es usado para la resolución de problemas multi-físicos en el área de la Ingeniería [I.5]. Esta herramienta matemática permite estudiar el comportamiento de diversas estructuras al ser sometidas a

diferentes tipos de cargas (estáticas o dinámicas), o fenómenos físicos como campos electromagnéticos, temperaturas, fluidos, etc. El estudio de estas estructuras abarca distintos tipos de materiales tales como [I.6]:

- Elásticos.
- Plásticos.
- Elasto-plásticos.
- Elástico-visco-plásticos.

El *MEF* permite realizar un modelo matemático de cálculo del sistema real, más fácil y económico de modificar que un prototipo. Sin embargo, no deja de ser un método aproximado de cálculo debido a las hipótesis básicas del método. Los prototipos, por lo tanto, siguen siendo necesarios, pero en menor número, ya que el primero puede acercarse bastante a un diseño óptimo [I.7].

### **I.3.- Breve historia sobre el Método de los Elementos Finitos**

Aunque el concepto de los elementos finitos es *nuevo*, este está basado en métodos de discretización y aproximación. Los cuales se entienden como dividir un continuo en un número finito, y así mediante un proceso matemático obtener resultados aproximados del problema [I.8]. El empleo de métodos de discretización y aproximación numérica para encontrar soluciones a problemas ingenieriles o físicos es conocido desde la antigüedad. Los egipcios empleaban métodos de discretización y aproximación geométrica para determinar el volumen de las pirámides [I.9]. *Arquímedes* (287-212 a.C.) empleaba el mismo método para calcular el volumen de todo tipo de sólidos o superficies de áreas. En oriente, también aparecen métodos de aproximación para realizar cálculos, entre estos el matemático chino *Lui Hui* (300 d.C.) empleaba un polígono regular de 3072 lados para calcular longitudes de circunferencias con lo que conseguía una aproximación al número  $\pi$  (*Pi*) de 3.1416 [I.10].

Mientras que *Leonard Euler* (1707-1783) desarrolla un método de diferencias finitas, con el cual determina cambios en las variables dependientes en intervalos finitos de tiempo [I.11]. *George Green* (1793-1841), en 1828 publica *An Essay on the Application of Mathematical Analysis to the Theories of Elasticity and Magnetism*, desarrolla la teoría del potencial, o función potencial,

en la cual se desarrollan tres identidades del Teorema de *Green*, utilizado para la resolución de problemas electrostática y magnetismo. Posteriormente para el desarrollo de problemas acústicos, elásticos, dilatación entre otros [I.12 y I.13]. *Carl Friedrich Gauss* (1777-1855) publicó *Fundamental Theorem of Algebra*, donde desarrolla el método de los mínimos cuadrados [I.14].

*Walter Ritz* (1878–1909), fue el primero en formalizar el Método de los Elementos Finitos. Él propuso que las frecuencias de las líneas espectrales de los átomos podían ser expresadas por diferencias entre un relativamente pequeño número de *elementos*. *Ritz* desarrolló la formulación matemática del *MEF*, con base en el cálculo variacional. El método de *Ritz*, es también conocido como variacional o formulación clásica [I.15], *Lord Rayleigh* (1842-1919) y *Walter Ritz* establecieron la aplicación del método variacional conocido como método *Rayleigh-Ritz* a problemas de sólidos elásticos [I.16]. *Boris Grigorievich Galerkin* (1871-1945) desarrolla un método de integración aproximada de ecuaciones diferenciales conocido como el método de *Galerkin*, incorporó el cálculo matricial al Método de los Elementos Finitos. Así como, publicó su Método de Elementos Finitos en 1915. También conocido como método de *Bubnov-Galerkin* [I.17].

El desarrollo de los elementos finitos tal y como se conocen hoy en día comienza en 1940, en el área de la Ingeniería estructural con los trabajos de *Hrennikoff* y *McHenry*, quienes a partir del uso de líneas en una dimensión representaron elementos como vigas para el cálculo de esfuerzos en sólidos con sección transversal continua [I.18].

En 1943, el matemático *R. Courant* añadió una variación para la solución de esfuerzos, cuya idea era dividir un continuo en regiones triangulares, para así realizar una aproximación por medio de estos triángulos [I.19]. El método de flexibilidad y fuerza fue desarrollado en 1947 por *Levy* y en 1953 desarrolló el método de rigidez y desplazamiento. Con lo que se podría dar solución a análisis estáticos de estructuras de aeronaves, pero debido a la complejidad de estos métodos se tuvo que esperar a computadoras para la resolución de estos problemas mediante estos métodos [I.20].

En la década de los 50`s y 60`s se desarrollaron diversos tipos de análisis para dar solución a diversos problemas. En 1954 *Argyris* y *Kelsey* desarrollan análisis estructural por matrices

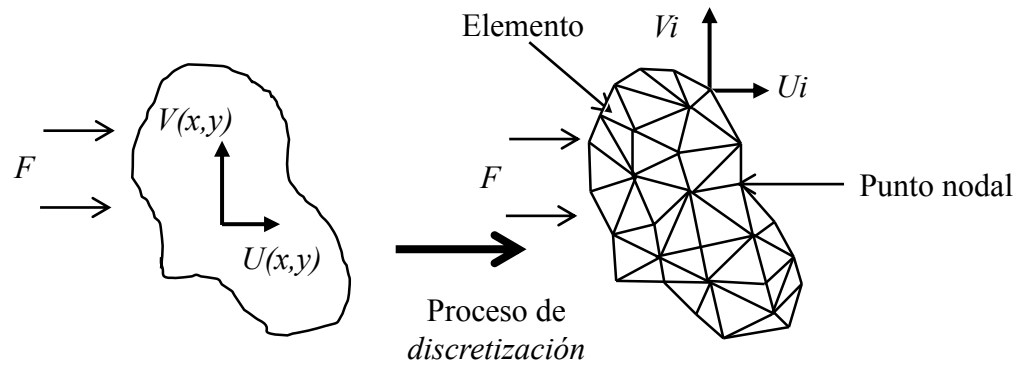
utilizando métodos energéticos, *Turner* en 1956 realiza los primeros análisis en cuerpos de 2 dimensiones y logra la implementación de matrices de rigidez para la determinación de armaduras. En 1961, *Melosh* desarrolla la matriz de rigidez para placa rectangular considerando elementos de flexión. En 1961, *Martin* realiza análisis de problemas tridimensionales con matrices rígidas tetraédricas. Para que *Galagher* en 1962 y *Argyris* en 1964, complementan las matrices tetraédricas para el estudio de sólidos [I.21].

Los trabajos realizados hasta entonces se enfocaron en el análisis de problemas mecánicos de deformación elástica, desplazamientos cortos y concentración de esfuerzos bajos, con condiciones de carga estática y materiales elásticos. Con trabajos como los de *Galagher* en 1964 se desarrollan trabajos de deflexiones grandes, análisis térmicos y modelación de materiales no lineales. En 1968 *Zienkiewics* complemento estos trabajos y realizo métodos para problemas visco elásticos [I.22].

Con los modelos matemáticos a través de métodos energéticos se obtuvieron modelos más confiables, fueron introducidos métodos dinámicos y se exploraron los campos de flujo de fluidos y conducción de calor. En la década de los 70`s con los métodos de masa residual empezaron los trabajos para la determinación de campos magnéticos. En la década de los 80`s con la mejora de equipos de cómputo la aplicación del *MEF* tuvo un gran auge, debido a la rápida evolución de las computadoras. Hoy en día el método de los elementos finitos es ampliamente utilizado, en aplicaciones industriales, aeronáutica, en el área aeroespacial, en el área automotriz, en aplicaciones nucleares, y en mecánica de fluidos entre otras. Un gran número de programas de computadora basados en Métodos de Elementos Finitos han aparecido desde entonces algunos como; *IDEAS*, *SAMCEF*, *NASTRAN*, *ABAQUS*, *FIDAP*, *MARC*, *Ansys*, *ADINA*, *LSDYNA*, *ASTER* y *CASTEM* [I.23 y I.24].

#### **I.4.- Formulación del Método de los Elementos Finitos**

La base del *MEF* consiste en la representación de un continuo formado por subdivisiones. Es decir un dominio dividido en subdominios, conocidos como elementos finitos [I.25]. Estos elementos están conectados por nodos o puntos nodales en los cuales tenemos los valores de las incógnitas y estos son aproximaciones. La Figura I.1 muestra el proceso de *discretización* del continuo la cual es conocida como malla [I.26]. Sí la *discretización* del continuo es más fina esta converge a una solución más exacta.



**Figura I.1.-** Sistema continuo a un modelo discreto (malla)

**I.4.1.- Condiciones de convergencia de la *discretización***

Para obtener una solución más próxima a la realidad cuando se afina la malla, disminuyendo el tamaño de los elementos se deben cumplir con una serie de condiciones [I.27]:

- Los elementos deben ser lo suficientemente pequeños para que cualquier punto del dominio de la estructura estudiada este siempre dentro del elemento.
- Cualquier malla (*discretización*) debe estar dentro de las mallas que se construyan más afinadas.
- Las funciones de interpolación o de forma (Ecuación I.1 y I.2) deben continuar siendo las mismas esto es, deben continuar con la misma forma dentro del proceso de afinamiento de la malla.

$$u = \sum_{i=1}^n u_i N_i(x, y) \tag{I.1}$$

$$v = \sum_{i=1}^n v_i N_i(x, y) \tag{I.2}$$

Las cuales son las ecuaciones para determinar los desplazamientos nodales.

**I.4.2.- Tipos de elementos**

Un elemento se entiende como una representación matemática, la cual genera una matriz de rigidez teniendo entre cada elemento una interacción entre sus grados de libertad correspondientes en cada nodo [I.28]. El tipo de elementos utilizados en el análisis a realizar esta

en función de la geometría, para la cual se generara la malla. El tipo de análisis que se debe ejecutar y en ocasiones a la experiencia del usuario. La formulación básica de los elementos parte de la geometría de triángulos y rectángulos, derivando a elementos tetraédricos y hexaédricos [I.29].

El mallado con elementos triangulares es más apropiado para geometrías complejas, o con rangos de longitudes de flujo grandes. Esto debido a que se requiere un menor número de elementos para su solución. Para geometrías no tan complejas los elementos rectangulares ofrecen más ventajas que los elementos triangulares. Una ventaja que presentan los elementos rectangulares sobre los triangulares es que permiten mayores relaciones de aspecto, ya que tener un gran número de relaciones en elementos triangulares genera dificultades y errores en la convergencia y exactitud del problema [I.30].

#### I.4.2.1.- Elementos triangulares [I.28 y I.31]

Si se considera un triángulo de tres nodos. Los desplazamientos de un punto cualquiera del elemento se pueden expresar en función de los desplazamientos nodales (Ecuación I.3 y I.4).

$$u^e = N_1^e u_1^e + N_2^e u_2^e + N_3^e u_3^e \quad \text{I.3}$$

$$v^e = N_1^e u_1^e + N_2^e u_2^e + N_3^e u_3^e \quad \text{I.4}$$

Los tres nodos del elemento definen una variación lineal del campo de desplazamientos que se describen con la Ecuación I.5 y I.6.

$$u^e = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y \quad \text{I.5}$$

$$v^e = \alpha_4 + \alpha_5 x + \alpha_6 y \quad \text{I.6}$$

Estos campos de desplazamientos deben coincidir en los nodos con las correspondientes incógnitas nodales (Ecuación I.7, I.8 y I.9).

$$u_1^e = \alpha_1 + \alpha_2 x_1 + \alpha_3 y_1 \quad \text{I.7}$$



$$u_2^e = \alpha_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 y_2 \tag{I.8}$$

$$u_3^e = \alpha_1 + \alpha_2 x_3 + \alpha_3 y_3 \tag{I.9}$$

Donde  $x_i, y_i$  son las coordenadas del nodo  $i$ .

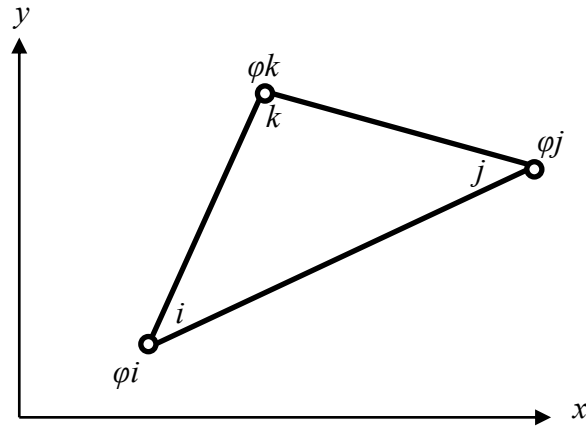


Figura I.2.- Elemento triangular

Los elementos triangulares (Figura I.2) permiten que se usen polinomios completos para definir las funciones de forma. Los coeficientes polinomiales que intervienen en un polinomio completo vienen dados por el triángulo de *Pascal*. Así, un polinomio de grado  $p$  debe incluir todos los coeficientes de las primeras  $(p+1)$  filas. El número  $n$  de términos de un polinomio completo de grado  $p$  es  $n = (p+1)(p+2)/2$ . Así se tiene los puntos nodales correspondientes a funciones de forma polinómicas completas de primer, segundo y tercer grado.

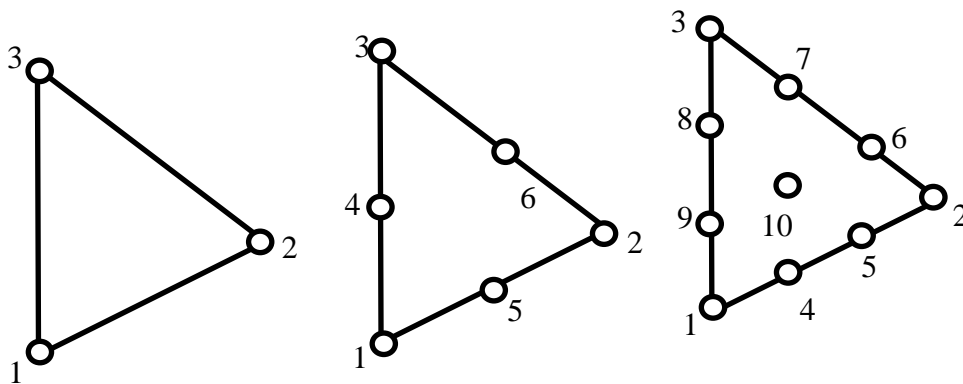


Figura I.3.- Elemento triangular lineal, cuadrático y cúbico

Las funciones de forma para el triángulo lineal se representan en la Ecuación 1.10.

$$N_1 = \xi_1 \quad N_2 = \xi_2 \quad N_3 = \xi_3 \quad \text{I.10}$$

Las funciones de forma para el triángulo cuadrático están dadas por la Ecuación I.11 y I.12.

$$N_1 = \xi_1(2\xi_1 - 1) \quad N_2 = \xi_2(2\xi_2 - 1) \quad N_3 = \xi_3(2\xi_3 - 1) \quad \text{I.11}$$

$$N_4 = 4\xi_1\xi_2 \quad N_5 = 4\xi_2\xi_3 \quad N_6 = 4\xi_1\xi_3 \quad \text{I.12}$$

Las Ecuaciones I.13, I.14, I.15 y I.16 representan las funciones de forma para el triángulo cúbico.

$$N_1 = \frac{1}{2}\xi_1(3\xi_1 - 1)(3\xi_1 - 2) \quad N_2 = \frac{1}{2}\xi_2(3\xi_2 - 1)(3\xi_2 - 2) \quad N_3 = \frac{1}{2}\xi_3(3\xi_3 - 1)(3\xi_3 - 2) \quad \text{I.13}$$

$$N_4 = \frac{9}{2}\xi_1\xi_2(3\xi_1 - 1) \quad N_5 = \frac{9}{2}\xi_1\xi_2(3\xi_2 - 1) \quad N_6 = \frac{9}{2}\xi_3\xi_2(3\xi_2 - 1) \quad \text{I.14}$$

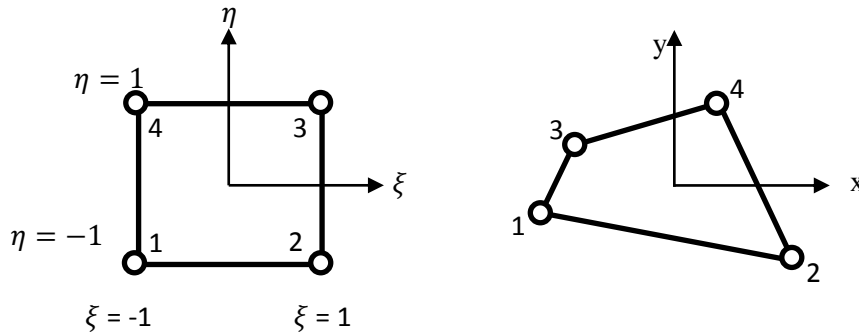
$$N_7 = \frac{9}{2}\xi_3\xi_2(3\xi_3 - 1) \quad N_8 = \frac{9}{2}\xi_3\xi_1(3\xi_3 - 1) \quad N_9 = \frac{9}{2}\xi_3\xi_1(3\xi_1 - 1) \quad \text{I.15}$$

$$N_{10} = 27\xi_1\xi_2\xi_3 \quad \text{I.16}$$

#### I.4.2.2.- Elementos rectangulares [I.28, I.31 a I.33]

Los elementos rectangulares parten de la formulación isoparamétrica, la cual es utilizada para generar muchos tipos de elementos. Hoy en día la gran mayoría de los programas comerciales de elementos finitos utiliza elementos basados en esta formulación debido a que tienen una mayor precisión. Esta formulación está basada en realizar un cambio de coordenadas debido a lo cual es necesario replantear las integrales sobre los elementos, las cuales se vuelven más complejas para evaluar analíticamente, por lo que se debe recurrir a integrarlas numéricamente en forma aproximada. Los elementos rectangulares (Figura I.4) son más eficientes que los elementos triangulares para la misma cantidad de grados de libertad, sin embargo tienen escasa capacidad para modelar geometrías complejas. La formulación isoparamétrica permite generar elementos

con lados curvos o no rectangulares lo que tiene obvias ventajas para el modelado de geometrías de formas arbitrarias y bordes curvos.



**Figura I.4.-** Elemento rectangular de 4 nodos

Para formular elementos isoparamétricos deben usarse sistemas de coordenadas naturales. Si se considera la generación de un elemento cuadrado de cuatro nodos a una forma cuadrilátera arbitraria. Una forma posible de definir la geometría del cuadrilátero consiste en emplear funciones de forma definidas sobre el cuadrado para interpolar las coordenadas de los vértices del cuadrilátero (Ecuación I.17 y I.18).

$$x = \sum_{i=1}^4 N_i^*(\xi, \eta)x_i \tag{I.17}$$

$$y = \sum_{i=1}^4 N_i^*(\xi, \eta)y_i \tag{I.18}$$

Donde  $N_i^*(\xi, \eta)$  son las funciones de forma *Lagrangianas*, que expresadas usando las coordenadas paramétricas  $\xi, \eta$ , se definen por las Ecuaciones I.19, I.20, I.21 y I.22.

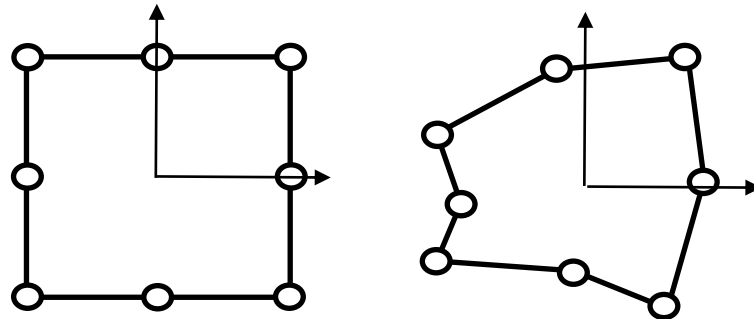
$$N_1^* = \frac{1}{4}(1 - \xi)(1 - \eta) \tag{I.19}$$

$$N_2^* = \frac{1}{4}(1 + \xi)(1 - \eta) \tag{I.20}$$

$$N_3^* = \frac{1}{4}(1 + \xi)(1 + \eta) \tag{I.21}$$

$$N_4^* = \frac{1}{4}(1 - \xi)(1 - \eta) \quad \text{I.22}$$

También es posible utilizar funciones cuadráticas para reproducir bordes curvos:



**Figura I.5.-** Elemento cuadrático de 8 nodos

En este caso se tienen dos posibilidades de elementos cuadráticos, de 8 (Figura I.5) ó de 9 nodos, según si se considera o no el nodo central. El elemento de 9 nodos es llamado *Lagrangiano* pues sus funciones de forma son productos de polinomios de *Lagrange*. El elemento de ocho nodos se obtiene combinando las funciones de forma del elemento de cuatro nodos con funciones de nodos intermedios modificados y es llamado *Serendípito* [I.34]. Ahora se debe considerar la Ecuación I.23 para encontrar la variación de una función  $u$  sobre el elemento distorsionado.

$$u = \sum_{i=1}^{nen} N_i(\xi, \eta)u_i \quad \text{I.23}$$

Donde  $nen$  es el número de nodos del elemento donde se han especificado valores nodales  $u_i$ .

### I.4.3.- Nodos

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 *mall*a [I.35]. Los nodos son una localización en el espacio, en cual se considera que existen ciertos grados de libertad y acciones del sistema físico. Los nodos asociados con el elemento se muestran como  $i, j, k$ , etc., y los elementos están conectados a los nodos en la secuencia y orientación de entrada para cada tipo de elemento [I.36].

#### **I.4.4.- Grados de libertad**

Las ecuaciones generadas que gobiernan el continuo, también controlarían a los elementos generados en la *discretización*, así se puede pasar de un continuo con grados de libertad infinitos, a un número finito de grados de libertad, los cuales dependen de cada tipo de elemento utilizado para el análisis y estos son modelados para su análisis por sistema de ecuaciones algebraicas lineales o no lineales [I.37]. Así cada tipo de elemento tiene ciertos grados de libertad, que constituyen las incógnitas nodales primarias que serán determinadas durante el análisis [I.38]. Estos grados pueden ser de desplazamiento, rotaciones, temperaturas, presiones, tensiones, etc., obteniendo como resultado esfuerzos, deformaciones, flujos de calor, temperaturas, velocidades, etc., [I.28].

#### **I.5.- Tipos de análisis**

Existen diferentes aplicaciones del método de elementos finitos, que dependen del tipo de análisis a realizar:

- Mecánicos estructurales (estáticos y dinámicos).
- Flujo de fluidos.
- Transferencia de calor (conducción, convección, radiación).
- Varios fenómenos eléctricos y magnéticos.
- Vibraciones mecánicas

#### **I.6.- Aplicación del *MEF* en sistemas computacionales**

Actualmente existen diversos software basados en el Método de los Elementos Finitos, teniendo entre ellos una metodología muy similar para la resolución de problemas diversos en Ingeniería. Los programas de cómputo que trabajan con el *MEF* dividen su metodología en base a tres procesadores, donde en cada uno de ellos se definen parámetros para simular las condiciones a las cuales está sometido el fenómeno a analizar. Los procesadores son conocidos como:

- Preprocesador
- Procesador ( Solucionador)
- Postprocesador

### I.6.1.- Preprocesador

La Figura I.6 muestra el menú del Preprocesador, donde se define el tipo de elemento para generar la malla, así como las propiedades del material, espesores, masas y momentos de inercia, además de lo anterior es este submenú se desarrolla los pasos para la generación del modelo. En Ansys Parametric Design Language (APDL) para modelar el prototipo a diferencia de otros programas de cómputo se comienza por la generación de puntos seguidos de líneas, áreas y finalmente volúmenes, es un proceso que requiere de mucha concentración puesto que se trabaja sobre un sistema cartesiano ya definido, aunque se puede trabajar en un cilíndrico o esférico de acuerdo a las necesidades que se presente para la elaboración del prototipo.

Además de las ventanas y menús desplegados también se disponen de herramientas gráficas para la visualización de entidades del modelo.

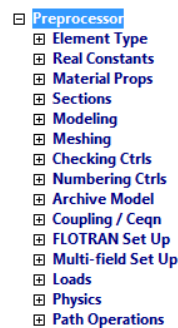


Figura I.6.- Menú del Preprocesador

### I.6.2.- Procesador (Solucionador)

Aquí se definen condiciones de frontera y tipo de análisis a realizar (Figura I.7), sin en cambio se puede llevar a cabo en el preprocesador la definición de las cargas y condiciones de frontera. En esta etapa el prototipo se soluciona de acuerdo a los parámetros establecidos para la simulación del problema.

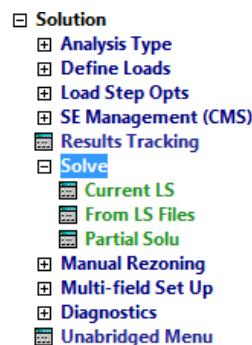


Figura I.7.- Menú del Solucionador

### I.6.2.- Posprocesador

Es la etapa final en donde se despliegan los resultados de acuerdo a condiciones dadas anteriormente, aquí podemos visualizar de forma gráfica o en listado los efectos que se generaron después de ser sometido bajo la influencia de agentes externos, la Figura I.7 muestra las herramientas dentro del Posprocesador.



Figura I.7.- Menú del Posprocesador

### I.7.- Planteamiento del problema

La soldadura es uno de los principales procesos de fabricación dentro de la industria manufacturera, este proceso es usado para la unión de materiales utilizados en diversas estructuras, tales como automotrices, tuberías, recipientes a presión, edificios, puentes entre otro gran número de estructuras metal mecánicas. Sin embargo, durante el proceso de soldadura se generan calentamientos y enfriamientos, los cuales producen deformaciones térmicas en el material de aporte y en las regiones del metal base que se encuentran cercanas al cordón de soldadura. Durante el calentamiento, se producen deformaciones plásticas no-uniformes, los cuales se presentan principalmente en el material de la soldadura. La deformación plástica no-uniforme que se produce en la estructura soldada conduce a los esfuerzos residuales y la distorsión de la pieza. Un nivel alto de esfuerzos residuales de tensión cerca del cordón de soldadura puede inducir fractura frágil, agrietamiento debido esfuerzos de corrosión y reducción de la resistencia a la fatiga. Los esfuerzos residuales de compresión en el metal de base situados a cierta distancia de la soldadura pueden disminuir sustancialmente el esfuerzo crítico al pandeo. Los principales efectos de la distorsión son la pérdida de la tolerancia en los componentes soldados y la deformación de los elementos estructurales, que reducen la capacidad de transferir las cargas aplicadas. Por lo tanto, la estimación de la magnitud y distribución de los esfuerzos residuales y la distorsión inducidos por la soldadura son necesarios para determinar diseños más

seguros y de mejor calidad. Por ello la predicción de estos fenómenos es de suma importancia dentro de la industria en las fases de diseño, previo a la fase de producción de diversos productos. En el presente trabajo se pretende la predicción de los esfuerzos residuales que se generan tras un proceso de soldadura, dicha estimación se realizara aplicando una metodología basada en un software (Ansys), el cual está basado en el Método de los Elementos Finitos.

### I.8.- Sumario

En este capítulo se habló de métodos numéricos, específicamente del Método de los Elementos Finitos (*MEF*), desde sus usos en la antigüedad hasta las aplicaciones que tienen hoy en día. Existen bastantes programas de cómputo que solucionan virtualmente los problemas ingenieriles dadas las especificaciones y los ambientes en que se desarrollan, las condiciones de frontera, así como las cargas soportadas y demás parámetros como: temperatura, peso específico, aceleración, etc., se definen en el Preprocesador aunque algunas de ellas pueden definirse en el Procesador (Solucionador). Estos parámetros son de gran importancia para encontrar el punto de convergencia durante la solución y visualizar el comportamiento mecánico que se genera bajo la influencia de agentes externos en el Posprocesador. La metodología empleada para la solución de estos análisis es muy parecida en cada paquete de simulación numérica, en esta ocasión solo se mencionó un poco del software Ansys (APDL).

### I.9.- Referencias

- 1.- Pérez-de Laborda, A., *Estudios Filosóficos de Historia de la Ciencia*, Ed. Ediciones y encuentro, pp 19-21, 2005.
- 2.- Steiner, E., *Matemáticas para las Ciencias Aplicadas*, Ed. Reverté, pp 503-504, 2005.
- 3.- Seminario-Vásquez, R., *Métodos Numéricos para la Ingeniería*, Ed. UNAL, pp 2-17, 2001
- 4.- De Castro, C. A., *Métodos Numéricos Básicos para Ingeniería*, ED. CRC, pp 1-37, 2008.
- 5.- Simón L. y Monzón J. M., *Identificación y Ajuste Paramétrico de una Maquina Trifásica de Inducción Magnética Usando Algoritmos Genéticos*, Pepper, Departamento De Ingeniería Eléctrica, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, España, 2010.
- 6.- Díes-Cascón-Sagrado, J. y Bueno-Hernández, F., *Ingeniería de Presas; Presas de Fábrica*, Universidad de Cantabria, pp 465, 2001.
- 7.- Frías-Valero, E., *Aportaciones al Estudio de las Máquinas Eléctricas de Flujo Axial Mediante a la Aplicación del Método de los Elementos Finitos*, Tesis de Doctorado,



- Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica de Catalunya, pp 111-113, 2004.
- 8.- Medina R., Salas M., Luco R. y Bertram V., *Análisis de las Estructuras Navales Mediante el Método de Elementos Finitos*, Universidad Austral de Chile, Síntesis tecnológica Vol.2 No. 1, Valdivia, Mayo,2005.
  - 9.- Moreno-Robles, J., *Los Elementos Finitos en la Ingeniería Geotécnica*, Universidad Católica de Valparaíso, Chile, pp 8, 2006.
  - 10.- Oliveria R., *La Versión p del Método de los Elementos Finitos en Mecánica Lineal de Fractura*, Centro de Cálculo, Facultad de Ingeniería, Revista Internacional de Métodos Numéricos para Calculo y Diseño en Ingeniería, Vol. 6, pp 136-146, Montevideo Uruguay, 1990.
  - 11.- Bedford, A. and Fowler, W., *Dinámica; Mecánica para Ingeniería*, Ed. Prentice Hall, 5ª Edición, pp 129, 2007.
  - 12.- Maxwell, J. C., *Escritos Científicos*, Ed. Consejo superior de investigaciones científicas, pp 46, 1997.
  - 13.- Collette, J. P., *Historia de las Matemáticas*, Volumen 2, Ed. Siglo XXI editores, 3ª Edición, pp 336-337, 1993.
  - 14.- Bertomeu-Sánchez, J. R. y García-Belmar, A., *Abriendo las Cajas Negras; Colección de Instrumentos Científicos de la Universitat de Valencia*, No. 10, pp 24, 2003.
  - 15.- Bautista-González, E. J., *Modelación Computacional de la Probabilidad de Falla de un Anclaje Superior en un Puente*, Tesis de Maestría de donde, pp 14, 2011.
  - 16.- Márquez-Cardozo, C. J., *Caracterización Fisiológica, Físico-Química, Reológica, Nutraceútica, Estructural y Sensorial de la Guanábana*, Tesis Doctoral de donde, pp 95, 2009.
  - 17.- Anh N. D., and Elishakoff I., *A New View of The Bubnov-Galerkin Method In The Linearization Context*, Pepper, Institute of Mechanics, Hanoi Vietnam, and Florida Atlantic University, Boca Raton, USA, Vietnam Journal of Mechanics, VAST, Vol. 34, pp 1-6, 2012.
  - 18.- Prados-Privado, M., *Diseño a Fatiga de Implantes Dentales de Titanio Mediante Elementos Finitos Probabilistas*, Ed. Universidad Pontificia Comillas Madrid, pp 21, 2013.
  - 19.- Molina-Rodríguez, J. C., *Análisis Estructural con Elementos Finitos*, Tesis de Maestría Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Escuela de Graduados, Universidad Autónoma de Nuevo León, pp 3-4. 1992.

- 20.- Babuška. I. and Strouboulis. T., *The Finite Element Method and its Reliability*, Ed. Oxford University Press, 1ª Edición, pp 1-2, 2001.
- 21.- Jiménez P. M., *Análisis y Optimización con Iteración de Dummy, de la Carrocería del Automóvil “Turbolare SAND CAD” de Tecnología SA de CV, Impacto Frontal Empleando el Método de Elementos Finitos en ALGOR FEA, Mediante la Simulación de Eventos Mecánicos*, Tesis de Licenciatura, Ingeniería Mecánica, Universidad de las Américas Puebla, pp 22-27, Mayo,2004.
- 22.- Zienkiewicz, O. C., *El Método de los Elementos Finitos*, Ed. Reverte, 3ª Edición, pp 2-4, 1979.
- 23.- Huebner. K. H., Dewhirst. D. L., Smith. D. E. and Byrom. T. G., *The Finite Element Method for Engineers*, Ed. John Wiley & Sons, Inc., 4ª Edición, pp 5-10, 2001.
- 24.- Dhatt, G., Lefrançois, E. and Touzot, G., *Finite Element Method*, Ed. ISTE Ltd, 1ª Edición, pp 2-3, 2012.
- 25.- Gabaldón-Castillo, F., *Método de los Elementos Finitos. Formulación de Problemas Lineales 1D*, Ed. Universidad Técnica Nacional, pp 4-6, 2007.
- 26.- Hormaza V., Amezua E., Avilés R. y Hernández A., *Un Método de Regularización de Mallas de Elementos Finitos en Modelos Tridimensionales Sólidos*, Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, Vol. 11, No. 3, pp 401-401, 1995.
- 27.- Fornóns, J., *El Método de los Elementos Finitos en la Ingeniería de Estructuras*, Ed. Universidad Politécnica de Barcelona, pp 88-90, 1982.
- 28.- *Ansys User’s Guide*, ANSYS, Inc release 10.0.
- 29.- Linero-Segrera D. L., *Elementos Finitos*, Ed. Universidad de Colombia, pp 25-35, 2010.
- 30.- Prieto-López R., *Análisis y Optimización de Componentes Magnéticos Mediante Técnicas de Elementos Finitos*, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid, XIV Jornadas de ASEPUMA y II Encuentro Internacional,1998.
- 31.- Celigüeta -Lizarza J. T., *Método de los Elementos Finitos para Análisis Estructural*, Escuela Superior de Ingenieros de San Sebastián, Campus Tecnológico de la Universidad de Navarra, 4ª Edición, Ed. Tecnum, pp 2-72, 2011.
- 32.- D. W. and Heinrich, J. C., *Finite Element Methods; Basic Concepts and Applications; Basic Concepts and Thermal Sciences*, Pepper, Ed. Hemisphere Publishing Corporation, pp 103-128, 1992.
- 33.- Liu, G. R. and Quek, S., *The Finite Element Method; A Practical Course*, Ed. Butterworth Heineman, 2ª Edición, pp 520-533, 2013.

- 
- 34.- Wilhelm-Juvenal, B. M., *Elementos Híbridos de Trefftz para el Análisis de Losas*, Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería Civil, Sección de Posgrado, Universidad Nacional De Ingeniería, pp 78-83, 2011.
- 35.- Huebner. K. H., *The Finite Element Method for Engineers*, Ed. John Wiley & Sons, 4<sup>a</sup> Edición, pp 144, 2001.
- 36.- Montes-De La Torre, R., *Análisis Mediante el Método de Elementos Finitos de la Barra Estabilizadora de un Camión*, Tesis de qué, Escuela Politécnica Superior Área de Ingeniería Mecánica, Universidad Carlos Iii de Madrid, pp 43-44, 2010.
- 37.- Otero-Pereiro, L. L., *Aprendiendo sobre el Método de los Elementos Finitos*, Ediciones Mecánicas, Ingeniería Mecánica 3, pp 7-8, 2006.
- 38.- Rao, S. S., *The Finite Element Method in Engineering*, Ed. Elsevier Butterworth-Heinemann, 4<sup>a</sup> Edición, pp 84-85, 2005.

# **Capítulo II**

## **Diferentes técnicas de procesos de soldadura**



## II.1.- Soldadura

La soldadura es una técnica que puede ser definida como el proceso de unión de dos o más materiales (metal o termoplásticos) [II.1], por la fundición de estos mediante la aplicación de calor y/o presión, pudiendo agregar un material de relleno fundido. Este proceso se logra uniendo los miembros mediante la agitación de las moléculas en sus uniones por calor, hasta que se funden en conjunto. Cuando se remueve la fuente de agitación los miembros quedan unidos permanentemente [II.2].

## II.2.- Breve historia de la soldadura

Los orígenes de la soldadura remontan desde la época antigua alrededor del año 1000 a.C., donde los herreros soldaban los metales calentándolos y al aplicarles una fuerza producida por un golpe estando los metales superpuestos se obtenía una soldadura por forjado [II.3]. Obteniendo fabricación de armas, herramientas y otros implementos. Esta técnica de forja fue utilizada hasta el *Siglo XIX*.

En 1800 el científico inglés *Sir Humphrey Davy* establece las bases tecnológicas para la soldadura moderna, realizando dos importantes descubrimientos; el arco eléctrico y el gas acetileno [II.4]. *Davy* observó que se podía generar un arco eléctrico mediante el uso de dos electrodos de Carbón. Sin embargo, no fue sino hasta mediados del *Siglo XIX*, cuando se pudo generar la corriente eléctrica suficiente para mantener la soldadura con arco. Fue el ruso *Nikolai Benardos* quien en un laboratorio en Francia inventó un generador eléctrico, obteniendo una serie de patentes para el proceso de soldadura con arco de Carbón (una en Inglaterra en 1885 y otra en Estados Unidos en 1887) [II.5]. A finales de ese siglo, la soldadura con arco de Carbón se había convertido en un proceso comercial muy popular para unir metales.

Un cambio importante en la soldadura por arco fue establecido por el estadounidense *Charles Coffin* en 1892, ya que la soldadura con arco de Carbón desarrollada por *Benardos* era muy limitada. Por lo que generando *Coffin* un proceso de soldadura con arco eléctrico utilizando un electrodo de metal. Teniendo como principal innovación que el electrodo agregase un relleno de metal a la unión soldada. Lo cual no se realizaba con el proceso de *Benardos*. Después se concibió la idea de recubrir el electrodo de metal (para proteger el proceso de soldadura de la atmósfera) [II.3 y II.6].

Entre los años 1885 – 1900, fueron desarrolladas varias técnicas de soldadura por resistencia, las cuales fueron establecidas por *E. Thompson*. Éstas eran la soldadura de puntos y la de costura, dos métodos de unión que se usan ampliamente en la actualidad en el procesamiento de láminas de metal. En 1900 se inventa el electrodo recubierto con el cual se obtenían resultados más estables. Asimismo, aparece el soplete con el cual se genera una nueva técnica de soldadura a base de la quema de Acetileno mezclada con Oxígeno. La aparición de la corriente eléctrica alterna en 1917 dio mejoras en procesos de soldadura [II.5 y II.7].

Entre los años 1920 y 1945 durante las dos *Guerras Mundiales* los procesos de soldadura tuvieron un impulso definitivo. Debido a la necesidad de reparaciones rápidas y fiables. Las diferentes fuerzas militares se dieron a la tarea de determinar cuáles de los varios procesos nuevos de soldadura serían en su momento las mejores opciones. El primer barco construido por proceso de soldadura, fue desarrollado por los británicos usando básicamente la soldadura por arco, el *Fulagar*, con un casco enteramente soldado [II.3 y II.8].

Varias técnicas fueron apareciendo a mediados del *Siglo XX*. En 1930 la soldadura de perno tubo gran aceptación dentro de procesos de fabricación de naves y en la construcción de estructuras metálicas. Asimismo, la soldadura de arco sumergido fue inventada el mismo año, técnica que hasta la fecha sigue siendo usada. La soldadura de arco de gas de Tungsteno fue perfeccionada en 1941. En 1948 aparece la soldadura por arco metálico con gas, obteniendo así procesos de soldadura rápida de materiales no ferrosos. La soldadura de arco metálico blindado fue desarrollada durante los años 1950, usando un fundente de electrodo consumible cubierto y se convirtió rápidamente en el más popular proceso de soldadura de arco metálico. En 1957, debutó el proceso de soldadura por arco con núcleo fundente, en el que el electrodo de alambre auto blindado podía ser usado con un equipo automático, resultando en velocidades de soldadura altamente incrementadas, y ése mismo año fue inventada la soldadura de arco de plasma. A finales de la década de los 50 aparece la soldadura por electro escoria, y en 1961 la soldadura por electro gas. Una de las técnicas más recientes consiste en la soldadura con rayo de electrones, dicha técnica aparece en el año de 1958, con la cual se pueden desarrollar soldaduras más profundas y estrechas, debido a la generación de una fuente de calor concentrada, con la invención del láser en 1960, se originó la soldadura por rayo láser, la cual empezó su utilización décadas más tarde, esta última ha demostrado ser útil en la soldadura automatizada de alta velocidad, cabe señalar que estos dos últimos procesos continúan teniendo un elevado costo

debido al equipo que se necesita para su desarrollo, trayendo consigo la limitación del uso de estas técnicas [II.3 y II.9].

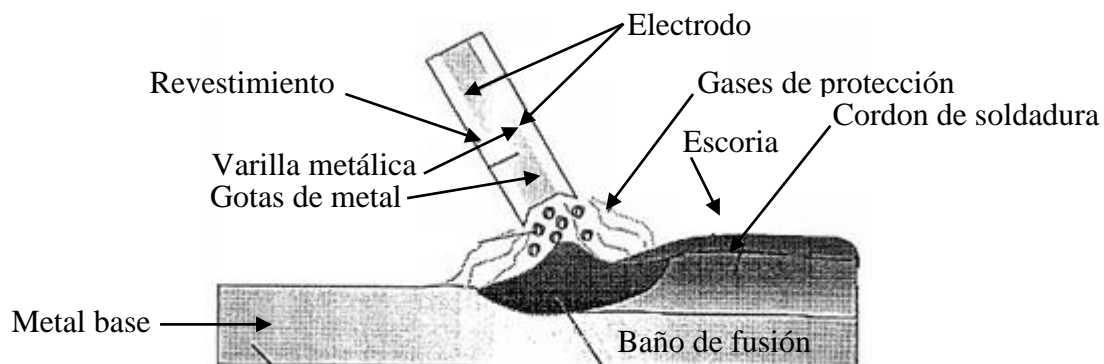
### II.3.- Técnicas de soldadura

La evolución y expansión de la producción en diversas áreas de la industria ha sido constante, esto ha traído como consecuencia la evolución y la mejora en la calidad de diversas técnicas de soldadura [II.10].

#### II.3.1.- Soldadura manual con electrodos revestidos (MMA y SMAW)

La soldadura por arco con electrodos revestidos es una técnica en la que la fusión del metal. Es generada debido al calor producido por un arco eléctrico establecido entre el extremo de un electrodo y el metal base de la unión a soldar (Figura II.1). En esta técnica existe un material de aportación que se obtiene por la fusión de un electrodo, el cual se funde en pequeñas gotas. Así como, se genera una protección la cual se obtiene por la descomposición del recubrimiento en forma de gases y en forma de escoria líquida, la cual durante su solidificación flota en el baño de fusión [II.11]. Nominaciones para la soldadura por arco con electrodos revestidos:

- SMAW, *Shielded Metal Arc Welding*.
- MMA, *Manual Metal Arc Welding*.



**Figura II.1.-** Soldadura manual con material de aporte

##### II.3.1.1.- Ventajas [II.12]

- El equipo para este proceso es relativamente sencillo, no muy caro y portátil.

- El metal de aportación y los medios para su protección durante el proceso proceden del propio electrodo revestido. No se necesita protección adicional mediante gases auxiliares o fundentes granulares.
- Es menos sensible al viento y a las corrientes de aire que los procesos por arco con protección gaseosa. Sin embargo, el proceso debe emplearse siempre protegido del viento, lluvia y nieve.
- Se puede emplear en cualquier posición, en lugares abiertos y en lugares cerrados, incluso con restricciones de espacio. No requiere conducciones de agua de refrigeración ni tuberías o botellas de gases de protección, por lo que puede emplearse en lugares relativamente alejados de la fuente de corriente.
- Es aplicable para una gran variedad de espesores, en general mayores de 2 mm.
- Es aplicable a la mayoría de los metales y aleaciones de uso normal.

#### **II.3.1.2.- Desventajas [II.12]**

- Es un proceso lento, por la baja tasa de deposición, y por la necesidad de retirar la escoria, por lo que en determinadas aplicaciones ha sido desplazado por otros procesos.
- Requiere gran habilidad por parte del soldador.
- No es aplicable a metales con bajo punto de fusión, como plomo, estaño, zinc y sus aleaciones, debido a que el intenso calor del arco es excesivo para ellos. Tampoco es aplicable a metales de alta sensibilidad a la oxidación como el Ti, Zr, Ta y Nb, ya que la protección que proporciona es insuficiente para evitar la contaminación por oxígeno de la soldadura.
- No es aplicable a espesores inferiores a 2 mm.
- La tasa de deposición es inferior a la obtenida con procesos con hilo continuo.
- El proceso no resulta productivo para espesores mayores de 38 mm.

#### **II.3.2.- Soldadura semiautomática con hilo sólido (GMAW) [II.13 y II.14]**

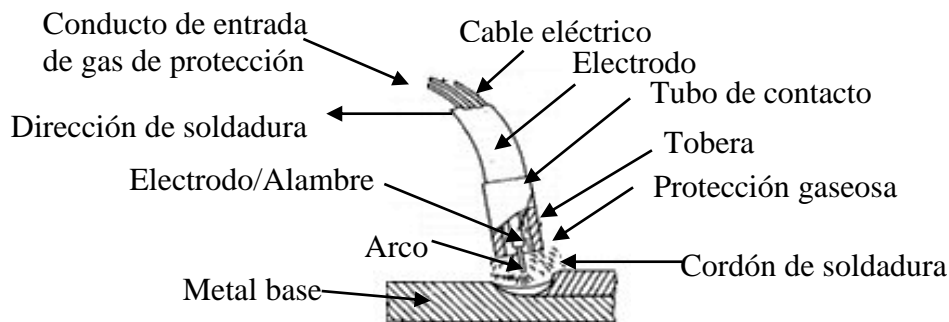
Es la técnica de soldadura eléctrica por arco metálico con protección de gas (GMAW), conocida como procesos MIG/MAG, en este proceso el calor necesario para la fusión es generado por un arco que se establece entre un electrodo consumible y las piezas a soldar (Figura II.2). Durante este proceso el electrodo (alambre sólido) va siendo alimentado de manera continua y consumiéndose conforme se deposita. La protección se obtiene íntegramente de los gases



suministrados simultáneamente con el metal de aporte, este flujo de gas es aportado por la boquilla de la pistola, es decir que el electrodo, arco, metal fundido y zonas adyacentes del metal base quedan protegidas de la contaminación de los gases atmosféricos. Existen dos clasificaciones en este proceso, en función del tipo de gas protector:

- MIG, *Metal Inert Gas*, el cual emplea protección de un gas inerte o mezcla de gases inertes (Helio, Argón, etc).
- MAG, *Metal Active Gas*, el cual emplea dióxido de carbono o mezcla de CO<sub>2</sub> con gases inertes.

Este proceso, puede trabajar en modo semiautomático y automático, siendo fácilmente adaptado para su utilización con robot. Eligiendo el consumible y gas de protección adecuados, pueden soldarse con este proceso todos los metales y aleaciones utilizados comercialmente.



**Figura II.2.- Soldadura tipo MIG y MAG**

### II.3.2.1.- Ventajas [II.14]

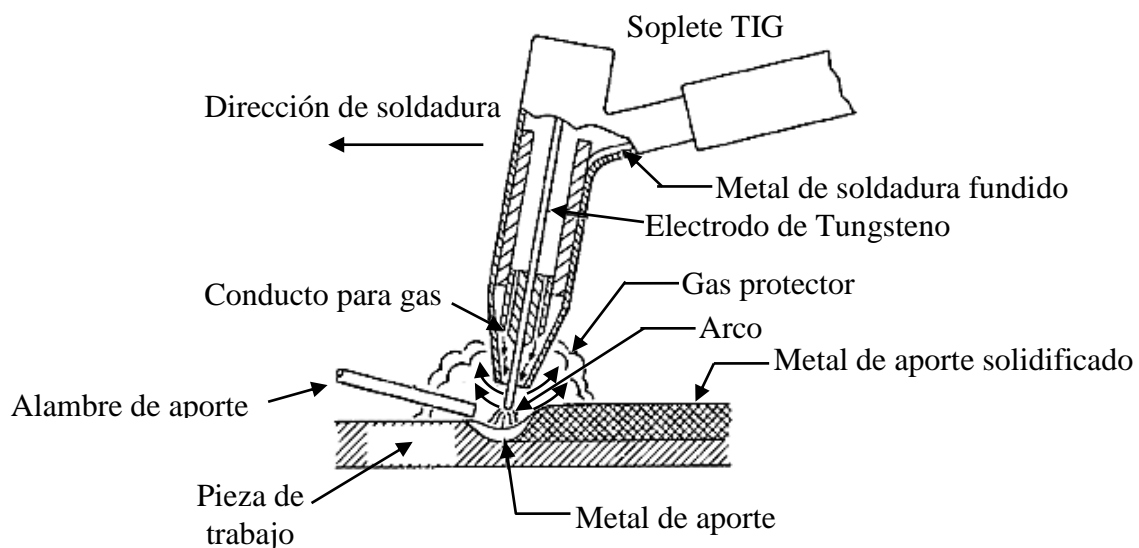
- Puede utilizarse para soldar cualquier tipo de material.
- El electrodo es continuo, por lo que se aumenta la productividad al no tener que cambiar de electrodo y la tasa de deposición es más elevada. Se pueden conseguir velocidades mucho más elevadas que con el electrodo recubierto (SMAW).
- Se puede realizar el proceso en cualquier posición.
- Se pueden realizar soldaduras largas sin que existan empalmes entre cordones, evitando así las zonas de peligro de imperfecciones.
- No se requiere eliminar la escoria ya que no existe.

### II.3.2.2.- Desventajas [II.14]

- El equipo de este proceso es más costoso, complejo y menos transportable que el de SMAW.
- Es difícil de utilizar en espacios restringidos, requiere conducciones de gas y de agua de refrigeración, tuberías, botellas de gas de protección, por lo que no puede emplearse en lugares relativamente alejados de la fuente de energía.
- Es sensible al viento y a las corrientes de aire, por lo que su aplicación al aire libre es limitada.

### II.3.3.- Soldadura por arco bajo gas protector de tungsteno (GTAW) [II.15 y II.16]

El proceso de soldadura por arco bajo gas protector con electrodo no consumible, también llamado *TIG* (Tungsten Inert Gas) por sus siglas en inglés, utiliza la energía generada por el arco eléctrico que se establece entre un electrodo no consumible y la pieza a soldar, durante el proceso un gas inerte protege el baño de fusión (Figura II.3). El material de aportación, cuando se utiliza, se aplica por medio de varillas. Este tipo de soldadura es más limpia que otras técnicas, y de mejor calidad, ya que durante el proceso no se producen escorias. De este modo, se elimina la posibilidad de inclusiones en el metal depositado y no necesita limpieza final. La soldadura TIG puede ser utilizada para soldar casi todo tipo de metales y puede hacerse tanto de forma manual como automática.



**Figura II.3.- Soldadura tipo TIG**

**II.3.3.1.- Ventajas [II.16]**

- Proceso adecuado para unir la mayoría de los metales.
- Arco estable y concentrado.
- Aunque se trata de un proceso esencialmente manual, se ha automatizado para algunas fabricaciones en serie.
- No se producen proyecciones.
- No se produce escoria.
- Produce soldaduras lisas y regulares.
- Se puede utilizar con o sin metal de aporte, en función de la aplicación.
- Puede emplearse en todo tipo de uniones y posiciones.
- Alta velocidad durante el proceso en espesores por debajo de 3 mm y 4 mm.
- Se pueden conseguir soldaduras de gran calidad.
- Permite un control excelente de la penetración en la pasada de raíz.
- No requiere el empleo de fuente de energía excesivamente caras.
- Permite el control independiente de la fuente de energía y del metal de aportación.

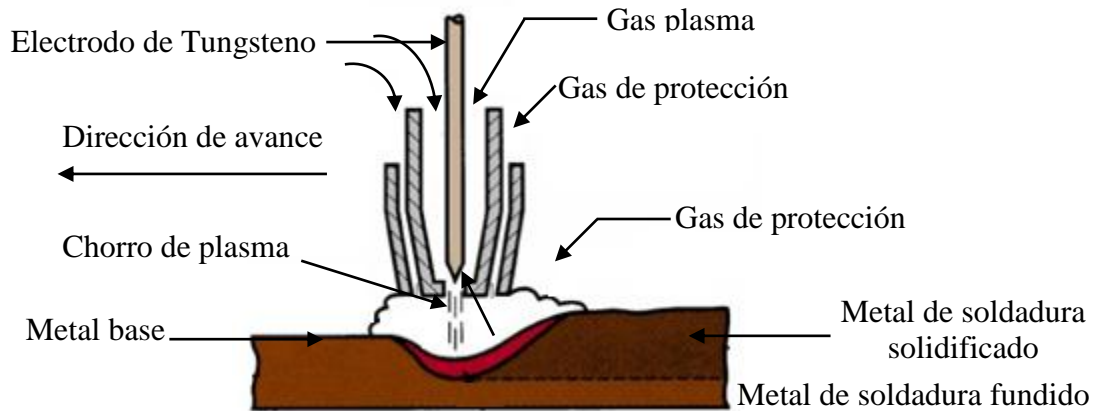
**II.3.3.2.- Desventajas [II.16]**

- La tasa de deposición es menor que la que se puede conseguir con otros procesos de soldeo.
- Su aplicación manual exige, en general, gran habilidad por parte del soldador.
- No resulta económico para espesores mayores de 10 mm.
- En presencia de corrientes de aire puede resultar difícil conseguir una protección adecuada de la zona de soldadura.

**II.3.4.- Soldadura con arco de plasma PAW [II.17 y II.18]**

El proceso de soldadura con arco de plasma PAW (Plasma Arc Welding) tuvo sus inicios en la década de los 60, en dicho proceso el plasma genera un arco concentrado el cual es dirigido al área de soldeo (Figura II.4). Técnicamente este proceso utiliza los mismos principios que la soldadura TIG, sin embargo tanto la generación de energía así como las temperaturas, son mayores en esta técnica, esto es debido a que el estado plasmático es obtenido cuando un gas es calentado a una temperatura suficiente para conseguir su ionización, separando así el elemento en iones y electrones. La mayor ventaja del proceso PAW es que su zona de impacto es dos o tres

veces inferior en comparación a la soldadura TIG, por lo que se convierte en una técnica óptima para soldar metal de espesores pequeños.



**Figura II.4.- Soldadura con arco de plasma**

#### II.3.4.1.- Ventajas [II.18]

- Buena estabilidad del arco.
- Mejor control de la penetración que otros procesos de soldadura por arco.
- Altas velocidades de avance.
- Excelente calidad de soldadura.
- Puede ser usado en la mayoría de los metales.

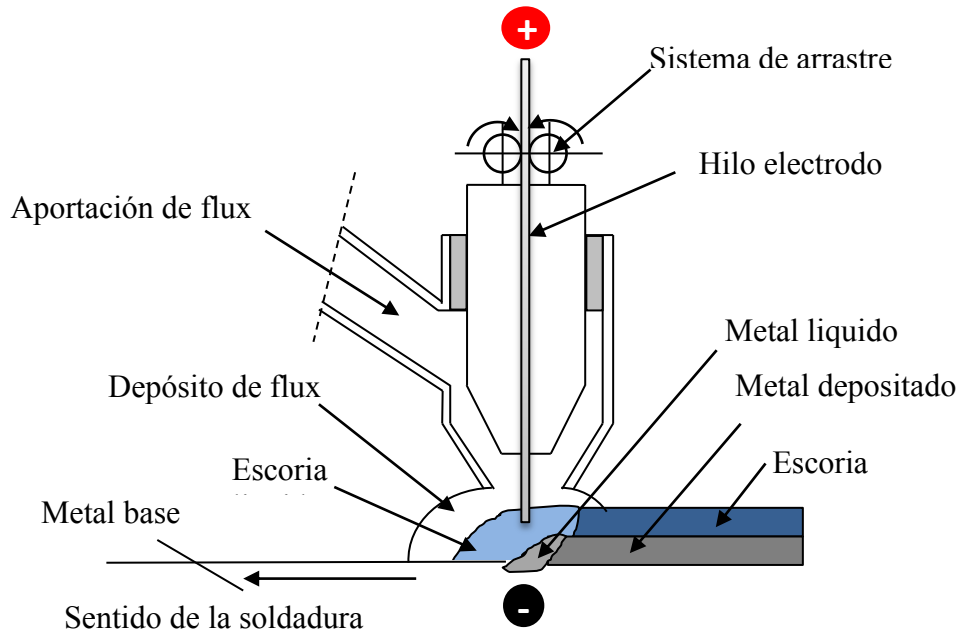
#### II.3.4.2.- Desventajas [II.18]

- Alto costo del equipo.
- Mayor tamaño de la boquilla que otros procesos de soldadura.
- Tendencia a restringir el acceso a ciertas juntas.

#### II.3.5.- Soldadura arco sumergido SAW [II.18 y II.19]

Similar a la soldadura MIG, la soldadura por arco sumergido ó SAW (Submerged Arc Welding) implica la formación de un arco entre el electrodo y la pieza de trabajo. Este proceso utiliza un fundente para generar escoria y gases de protección y para añadir elementos de aleación al baño de soldadura, por lo tanto, no se requiere de gas de protección (Figura II.5). Se Puede colocar una capa fina de polvo fundente sobre la superficie de la pieza de trabajo.

El hilo y el metal base se funden bajo una capa de flux (agente de limpieza, agente químico), esta capa protege al metal de soldadura de contaminación y concentra el calor en el interior de la unión. El flux que se ha fundido nada a través del baño de soldadura, desoxidando y limpiando el metal depositado, así formando una escoria de protección, que cubre y mantiene el nuevo cordón de soldadura.



**Figura II.5.-** Soldadura tipo arco sumergido

### II.3.5.1.- Ventajas [II.19]

- Las uniones pueden ser preparadas en V con poca profundidad debido a la elevada penetración del proceso.
- Los procesos de soldadura pueden realizarse a altas velocidades debido a la elevada intensidad con que se opera en la mayoría de las aplicaciones.
- No es necesario proteger al operador de la máquina de la emisión de radiación, ya que el arco se encuentra sumergido en el fundente, evitándose además las salpicaduras del metal fundido.
- El fundente actúa como un desoxidante protegiendo el arco y aportando elementos de aleación al cordón en el caso de emplear fundentes aleados.
- Cordones en acabado uniforme.
- Permite la utilización de distintas técnicas que contribuyen para el aumento de la productividad (múltiples alambres, adición de polvillo de Hierro, etc.).

- Proceso estable con poco humo y salpicaduras.
- Alta productividad.
- Muy bajo riesgo de grietas por Hidrogeno.

#### **II.3.5.1.- Desventajas [II.19]**

- Muchas soldaduras requieren algún tipo de respaldo para evitar la perforación del metal base.
- Este proceso conlleva un tiempo de preparación mayor que otros.
- Con este sistema generalmente se sueldan piezas a partir de los 5 mm de espesor.
- La posición de soldadura está restringida a plana y horizontal.
- Equipos muy costosos.

#### **II.4.- Esfuerzos residuales**

El esfuerzo puede ser definido como la intensidad ocasionada por un agente externo, que actúa sobre la sección transversal de un elemento, y obteniendo una resistencia a un cambio en la forma del elemento. El esfuerzo se define en términos de fuerza por unidad de área [II.20].

##### **II.4.1.- Esfuerzo residual [II.21 a II.23]**

Son esfuerzos internos existentes en el volumen de un elemento o material en ausencia de un agente externo tales como fuerzas (incluyendo la gravedad) u otra fuente de esfuerzos, como por ejemplo un gradiente térmico, estos esfuerzos son derivados de las acciones de los procesos de fabricación, de ensamblaje, de tratamientos térmicos o de procesos en que existe una aplicación de calor no uniforme.

Estos esfuerzos tienen su origen en casi todos los procesos mecánicos, donde se generan por la irreversibilidad de las deformaciones plásticas al interior del material, mientras que los térmicos aparecen por las restricciones de elementos externos a la dilatación térmica libre o por calentamiento no uniforme. Es decir que son causados por:

- Deformaciones plásticas no uniformes.
- Gradientes térmicos pronunciados (soldadura, tratamientos térmicos).

Por lo general se consideran tres tipos de esfuerzos residuales de acuerdo con la distancia sobre la cual pueden ser absorbidos. Esfuerzos residuales macroscópicos. Son de naturaleza de largo alcance y se extienden sobre varios granos del material. Esfuerzos residuales tipo micro esfuerzos estructurales. Abarcan la distancia de un grano o parte de uno, y pueden presentarse en tres fases diferentes y tener características físicas distintas.

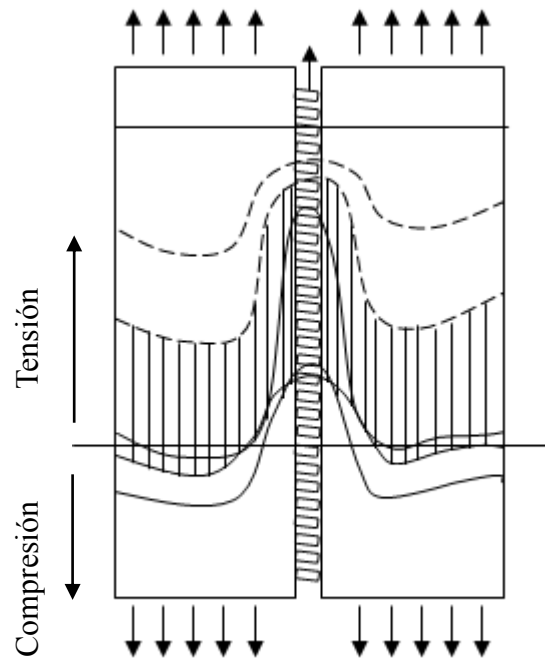
Esfuerzos residuales por consecuencia de deformaciones elásticas y/o plásticas no-homogéneas sobre una escala macroscópica o microscópica. Sin importar el origen de estos esfuerzos la consecuencia es la misma, disminuyen la capacidad de carga de las estructuras. Los esfuerzos residuales pueden ser introducidos a lo largo de la vida útil de la estructura por procedimientos de instalación o montaje, por sobrecargas ocasionales, por efectos de asentamiento del suelo o estructuras subterráneas, o por cargas muertas que pueden llegar a ser parte integrante de la estructura.

#### **II.4.2.- Esfuerzo residual por soldadura [II.21 a II.23]**

Un proceso de soldadura genera esfuerzos residuales en un material (Figura II.6), y estos tienen gran importancia por sus consecuencias en el posterior comportamiento de servicio del material. Estos esfuerzos residuales son originados durante el proceso de soldadura como consecuencia de dilataciones y contracciones que se originan por el calentamiento en una zona de un material, asimismo por cambios dimensionales causados por diversas transformaciones microestructurales. Entonces se puede entender como la suma de diversos factores que interactúan entre sí para dar como consecuencia la aparición de estos esfuerzos:

- Expansión impedida y contracción resultante de una distribución de temperatura no-homogénea.
- Efectos de enfriamiento rápido.
- Transformaciones de fase.

Los efectos residuales dependen de la temperatura de transformación determinada por el diagrama tiempo-temperatura-transformación del material y la velocidad de enfriamiento. Así mismo de la composición química en la zona, otro aspecto importante es la resistencia a la cedencia dependiente de la temperatura local y el grado de rigidez del material.



**Figura II.6.-** Distribución de esfuerzos residuales en una unión soldada

### II.5.- Simulación de procesos de soldadura por el Método de los Elementos Finitos [II.24]

El método *Seam Weld Fatigue Analysis* fue desarrollado particularmente para analizar láminas de acero delgadas automotrices soldadas de espesores de 1 a 3 mm, las cuales son estructuras de gran aplicación en la industria automotriz.

El método es similar al *Método Estándar S-N*, pero con algunas características especiales para tratamientos con soldadura.

El método fue desarrollado originalmente para estructuras soldadas con láminas delgadas, modeladas y analizadas con *NASTRAN* usando elementos *CQUAD4*. (El trabajo final está descrito en “Fatigue Life Prediction of MAG- Welded Thin- Sheet Structures”, por *Mikael Fermér, Magnus Andréasson and Bjorn Frodin*. SAE Technical Paper 982311). Como lo describió *Fermér*, el método *grid point forces* del *MEF* fue utilizado para calcular los esfuerzos generados en la raíz de la soldadura. Este método fue desarrollado para generar una malla controlada de mejor calidad comparado con otros métodos estándares, esto se logró utilizando elementos cúbicos de *Nastran*. El método cúbico describe el esfuerzo en cada nodo del elemento, desplazamientos y rotación de los nodos. Aunque los esfuerzos obtenidos en otro *software*



basados en *MEF* podrían ser semejantes, existía gran variación entre los resultados, esto debido por el método utilizado para la resolución del sistema, además los resultados mejoraban al utilizar elementos cuadráticos. En la versión 6.0 los desplazamientos y rotaciones opcionales pueden ser utilizados para la determinación de esfuerzos en los elementos de la soldadura. Para utilizar esta opción las fuerzas nodales y desplazamientos deben estar habilitadas en el *MEF*.

### II.5.1.- Diferentes técnicas de soldaduras analizadas con *MEF* [II.24]

La soldadura puede ser clasificada en función de su geometría, el proceso por el cual la unión ha sido soldada y el modo de falla de la soldadura. Dentro de la norma *nCodeDT* especifica como deben ser asignadas los diferentes tipos de grupos de soldadura, esto de acuerdo al tipo de análisis de falla. Hoy en día dentro de los softwares basados en el *MEF* los tipos de soldadura han sido separados y agrupados de acuerdo a lo anterior.

#### II.5.1.1.- Diferentes tipos de apoyo [II.24]

- *Fillet*, un *chaflán* de soldadura une a dos placas a cierto ángulo (máximo a  $90^\circ$ ), y esta puede ser creada utilizando un proceso de soldadura MIG y MAG. En este tipo de geometría la falla se presenta de manera común en la raíz de la soldadura y a pie de la soldadura. Estas son las zonas a evaluar la falla la cual se presenta por fatiga. Cabe señalar que es poco probable que la falla se presente en la garganta de la soldadura, sin embargo esta puede presentarse si el proceso de soldadura es de mala calidad o por un cordón de soldadura muy delgado (Figura II.7).

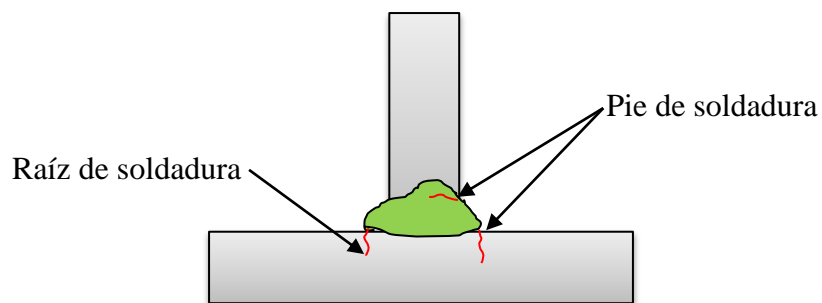
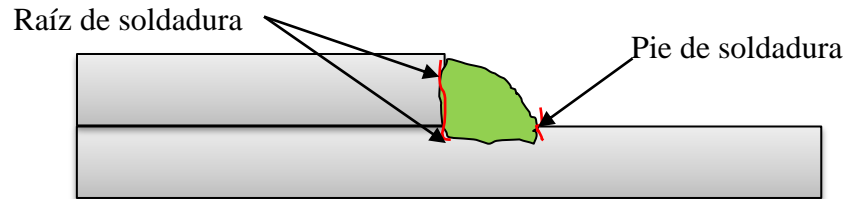


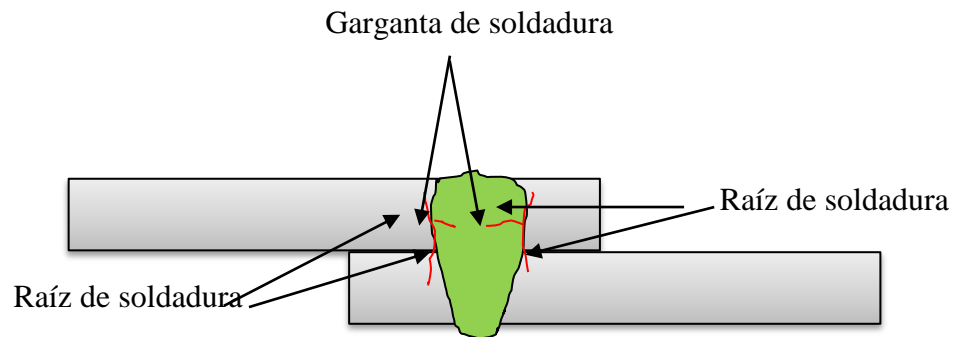
Figura II.7.- Apoyo tipo *Chaflán*

- *Overlap*, una soldadura sobrepuesta es similar a una soldadura de tipo *chaflán (fillet)*, excepto que las placas a unir son paralelas y las zonas de falla son perpendiculares a las placas, generándose en el pie y en la raíz de la soldadura (Figura II.8).



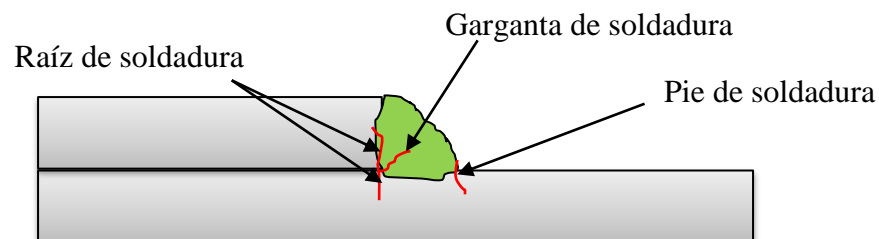
**Figura II.8.-** Apoyo tipo placa sobrepuesta

- *Laser overlap*, en el caso de la soldadura sobre puesta por láser, la falla inicia su propagación en la raíz de la soldadura. Otro posible modo de falla es la presentación de grietas iniciada dentro de la garganta de la soldadura (Figura II.9).



**Figura II.9.-** Apoyo tipo placa sobrepuesta con láser

- *Laser edge overlap*, este tipo de soldaduras son realizadas manualmente y muy similar a la soldadura sobrepuesta (*overlap*) la principal diferencia son las pequeñas dimensiones del cordón de soldadura, la falla se presenta en la raíz, en el pie y en la garganta de la soldadura, siendo esta ultima la de mayor posibilidad donde se inicie la falla (Figura II.10).



**Figura II.10.-** Apoyo tipo soldadura sobrepuesta manual

## II.6.- Guía de modelado [II.24]

Para obtener resultados de análisis por fatiga en un margen aceptable es necesario basarse en una guía de modelado en un software con base en *MEF*. Existen guías generales y algunas que son específicas de soldadura para diferentes tipos de soldadura, cuando usamos elementos *Shell*.

### II.6.1.- Guía general [II.24]

Las estructuras a analizar deben ser malladas o discretizadas predominando elementos cuadriláteros de 4 nodos (CQUAD4 o equivalente) representando los medios planos de las láminas de metal, la malla alrededor de la soldadura debe ser regular, con elementos de aproximadamente 5 mm de tamaño, los elementos triangulares en las proximidades deben de ser evitados. Los elementos representan el cordón de la soldadura y son usados para identificar la soldadura, y estos elementos deben ser puestos en unidades con propiedades únicas para cada soldadura o tipo de soldadura. En adición los elementos de soldadura deben de ser alineados de tal manera que representen al tipo de soldadura simulada. Anteriormente se recomendaba cerrar con los elementos el fin de la soldadura, sin embargo cuando se usa *MEF* para la determinación de esfuerzos, se simplifica para obtener estos, teniendo una representación del modelo más fácil. Cuando generamos una malla con elementos cuadráticos es favorable para simular con los elementos que la soldadura está cerrada (Figura II.11).

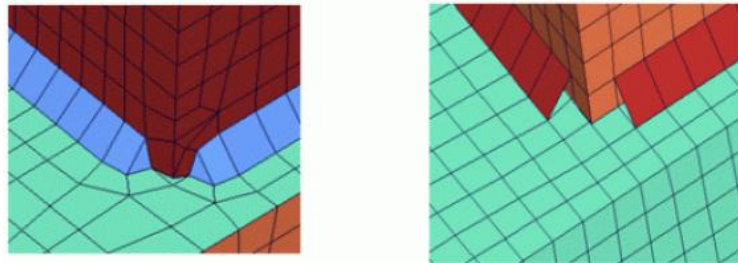


Figura II.11.- Representación nodal y de elementos cuadráticos

### II.6.2.- Representación nodal y de elementos de diferentes uniones soldadas [II.24]

#### II.6.2.1.- Modelado de una soldadura de sección transversal tipo *Chaflán*, con elementos inclinados

- Los elementos de la soldadura tienen diferentes propiedades a los elementos de las placas.
- La dirección de la normal de los elementos que representan la soldadura, tienen sentido hacia afuera como se muestra en la Figura II.12.

- Los nodos de los elementos de la soldadura, están alineados con el sentido del pie de la soldadura.
- La longitud  $L_w$ , se determina por las dimensiones del pie de soldadura, teniendo:

$$L_w = t_1 + t_2 \quad \text{II.1}$$

- El espesor de los elementos que representan la soldadura deberán representar el espesor de la garganta:

$$\frac{L_w}{\sqrt{2}} \quad \text{II.2}$$

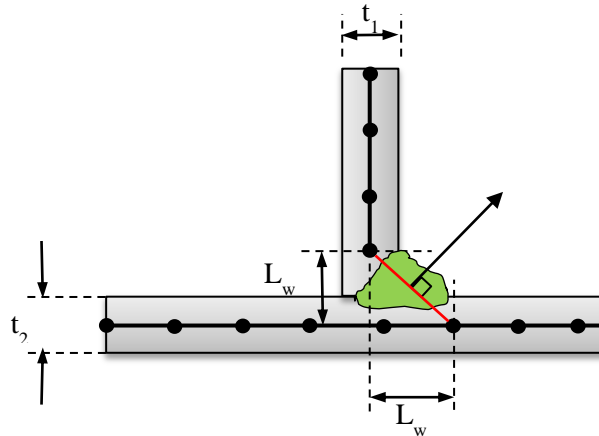


Figura II.12.- Elementos para soldadura tipo *chaflán*

### II.6.2.2.- Modelado de soldadura de sección transversal tipo *chaflán*, con dos elementos

- Modelar los elementos de la soldadura, de tal forma que queden alineados como se muestra en la figura. Esta orientación es indispensable para identificar el pie y la raíz de la soldadura.
- Un elemento de soldadura de espesor  $L_w/(2\sqrt{2})$  o  $0.35(t_1+t_2)$  es recomendado.

#### II.6.2.2.1.- Modelado de una soldadura tipo *chaflán* en placas sobrepuestas

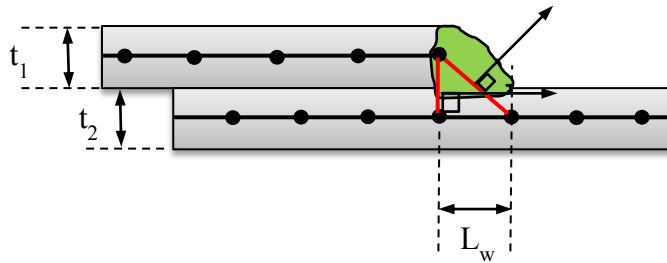
Longitud  $L_w$ :

$$L_w = t_1 + t_2 \quad \text{II.3}$$

El espesor del elemento es aproximadamente:

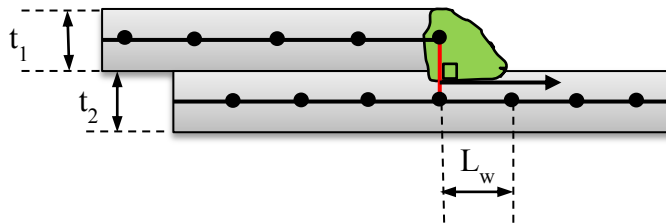
$$0.27(t_1 + t_2)$$

II.4

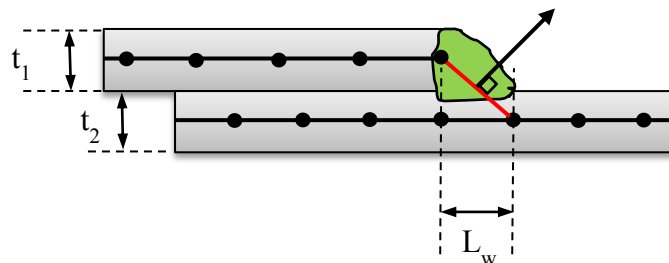


**Figura II.13.-** Elementos para soldadura sobrepuesta.

El modelo anterior puede ser simplificado reemplazando los dos elementos rígidos por uno solo. Este método es más susceptible para modelar soldadura láser con placas sobrepuestas, debido a que permite el cálculo de la fatiga en la garganta de la soldadura, ya que solo se requiere un elemento rígido para la determinación de esfuerzos en la garganta de la soldadura.



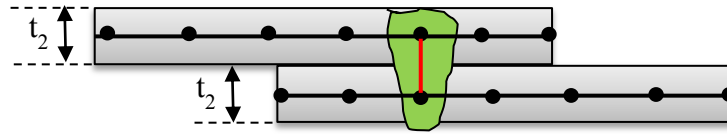
**Figura II.14.-** Primer modelo simplificado para placas sobrepuestas



**Figura II.15.-** Segundo modelo simplificado para placas sobrepuestas

### II.6.2.3.- Modelado de soldadura en placas sobrepuestas por láser

Para la soldadura sobrepuesta por láser, el espesor de los elementos de soldadura representa el ancho de la misma. El ancho de la soldadura deberá ser 90 % del espesor de la placa más delgada, pero por ninguna circunstancia menor que 1 mm.



**Figura II.16.-** Modelo de soldadura por láser

## II.7.- Sumario

En este capítulo se estudió el concepto de soldadura, así como la evolución que ha tenido desde su aparición hasta nuestros días. Dicha evolución ha ido de la mano con el desarrollo de la industria, donde la soldadura ha tenido gran repercusión en diferentes procesos de manufactura y desarrollo tecnológico, como en la industria automotriz, entre varias otras, dando como resultado la aparición de diferentes técnicas para diversos procesos donde debido a diferentes condiciones de trabajo las técnicas han ido desarrollándose en distintas maneras de aplicación. También se realizó el estudio de la generación de los esfuerzos residuales, tras la aplicación de un proceso de soldadura, así mismo se menciona una metodología de trabajo para el desarrollo de los análisis numéricos dentro del *MEF*.

## II.8.- Referencias

- 1.- Jeffus, L., *Soldadura; Principios y Aplicaciones*, 5ª Edición, Ed. Paraninfo, pp 5, 2009.
- 2.- Hamrock, B. J., Jacobson, B. O., y Schmid, S. R., *Elementos de Máquinas*, 1ª Edición, Ed. McGraw-Hill, pp 701, 2000.
- 3.- Orozco-Roldán, F. R., y López-Gálvez, C., *Soldadura en Atmósfera Natural*, 1ª Edición, Ed. Paraninfo, pp 30, 2013.
- 4.- Gurstelle, W., *Remaking History*, Ed. Make, Vol. 20, pp 166, 2010.
- 5.- Molera-Solá, P., *Soldadura Industrial; Clases y Aplicaciones*, Ed. Productica, pp 9-13, 1992.
- 6.- Groover, M. P., *Fundamentos de Manufactura Moderna*, 3ª Edición, Ed. McGraw-Hill, pp 690, 2007.
- 7.- Rowe, R., and Jeffus, L., *Manual de Soldadura GMAW (MIG-MAG)*, 1ª Edición, Editorial Paraninfo, pp 1-7, 2008.
- 8.- Esquivel-Hernández, L. A., *Proceso de Soldadura por el Método de Resistencia para la Manufactura de Chasis en la Industria Automotriz*, Tesis de Licenciatura, ESIME Azcapotzalco, Instituto Politécnico Nacional , pp 4-8, 2009.

- 9.- García-Rosas, J. A., y Berlanga-Rojas, M. A., *Manual de Soldaduras Especiales, Selección y Método de Aplicación para el Área Metalmecánica*, Tesis de licenciatura, ESIME Azcapotzalco, Instituto Politécnico Nacional, pp 39-40, 2008.
- 10.- Giachino, J. W., and Weeks, W., *Técnica y Práctica de la Soldadura*, 5ª Edición, Ed. Reverte, pp 1, 2007.
- 11.- Mancheño-Pérez M., y Fernández-López C., *Manual de Prácticas de Soldadura con Electrodo Revestido*, 1ª Edición, Ed. Paraninfo, pp 23-33, 2012.
- 12.- Menéndez-Díez, F., *Higiene Industrial; Manual para la Formación del Especialista*, 10ª Edición, Ed. Lex Nova, pp 507-508, 2009.
- 13.- Guivernau, J. M., *Procesos de Soldadura Aplicados en la Construcción Naval*, Tesis de Ingeniería, Universitat Politècnica de Catalunya, Facultat de Nàutica de Barcelona, pp 68-69, 2011.
- 14.- E. Niebles, E., y G. Arnedo, W., *Procedimientos de Soldadura y Calificación de Soldadores: una Propuesta de Enseñanza y Guía de Aplicación para la Industria*, Universidad Autónoma del Caribe, Pepper, Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería Mecánica, Información tecnológica. Vol.20, No.3, 2009.
- 15.- Maury-Ramírez, H., Niebles-Núñez, E. E., y Torres-Salcedo, J., *Diseño para la Fabricación y Ensamble de Productos Soldados; Un Enfoque Metodológico y Tecnológico*, Ed. Uninorte, pp 132-138, 2009.
- 16.- Martín-Navarro, J., Gómez-Morales, T., García-Jiménez, J. L., Àgueda-Casado, E. y Gonzalo-Gracia, J., *Elementos Fijos*, 5ª Edición, Ed. Parafino, pp 180-186, 2010.
- 17.- Kalpakjian, S., and Schmid, S. R., *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*, 4ª Edición, Ed. Prentice Hall, pp 789-791, 2002.
- 18.- Molera-Solà, P., *Soldadura Industrial; Clases y Aplicaciones*, 1ª Edición, Editorial Marcombo S.A., pp 30-32,41, 1992.
- 19.- Hernández-Riesco G., *Manual del Soldador*, 18ª Edición, Editorial Cesol, pp 384, 2007.
- 20.- Gere, J. M., *Mecánica de Materiales*, 6ª Edición, Ed. Thompson, pp 6-16, 2006.
- 21.- Rubio-González, C., *Análisis de Esfuerzos Residuales en Uniones Soldadas por el Método del Contorno*, Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, X Congreso Internacional de Innovación y Diseño Basado en Simulación por Computadora, pp3-10, 2010.
- 22.- Mejía, I., Maldonado, C., Bedolla, A., y García, Ch. J., *Esfuerzos Residuales Generados en la Soldadura de Placas de Acero Inoxidable AISI 304 Mediante el Proceso SMAW*, CANAMET, pp 1-2, 2006.

- 23.- García-Jacomino, J. L., Burgos-Sola, J., Cruz-Crespo, A., Álvarez-Luna, M., y García-Arteaga, J., *Reducción de Esfuerzos Residuales en Uniones Soldadas Usando Tratamiento con Explosivo*, Ingeniería, Vol. 12, No. 1, pp 5-12, 2008.
- 24.- HBM United Kingdom Limited, *Design Life Theory Guide*, pp 225-238, 2013.



# Capítulo III



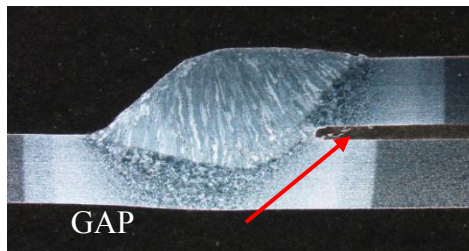
## Análisis térmico transitorio utilizando el MEF



### III.1.- Soldadura con GAP y sin GAP

Como se mencionó en el capítulo anterior existen diferentes técnicas de soldadura para llevar a cabo la unión de materiales. Durante el proceso de soldadura los materiales a unir sufren un cambio en sus propiedades mecánicas, esto debido a un diferencial de temperatura el cual puede llegar a fundir el material y formar una sola pieza, dicha unión puede ser llevada a cabo con o sin aporte de material.

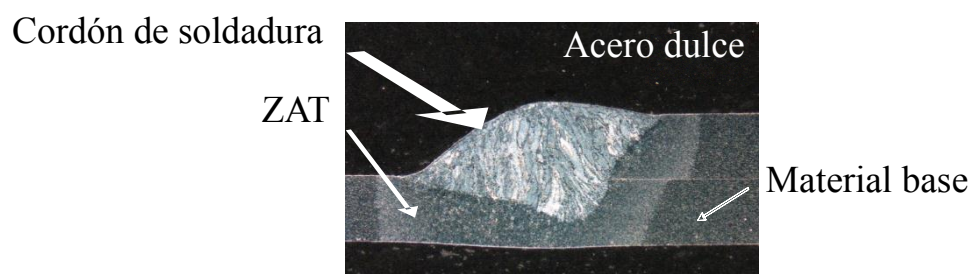
La unión de uno o dos materiales diferentes se realiza de tal forma que no exista ninguna holgura entre estos, a esta holgura o separación se le conoce como GAP (Figura III.1). La importancia de la existencia de los GAP, es que estas disminuyen la resistencia a la fatiga, por lo cual durante un proceso de unión se tratan de evitar la aparición del GAP, cabe mencionar que dichas separaciones u holguras actúan como concentradores de esfuerzos, y estas aparecen en uniones de placas sobrepuestas.



**Figura III.1.-** Existencia de un GAP después del proceso de soldadura (American Iron Steel Institute and AET Integration)

### III.2.- Zona afectada por temperatura (ZAT)

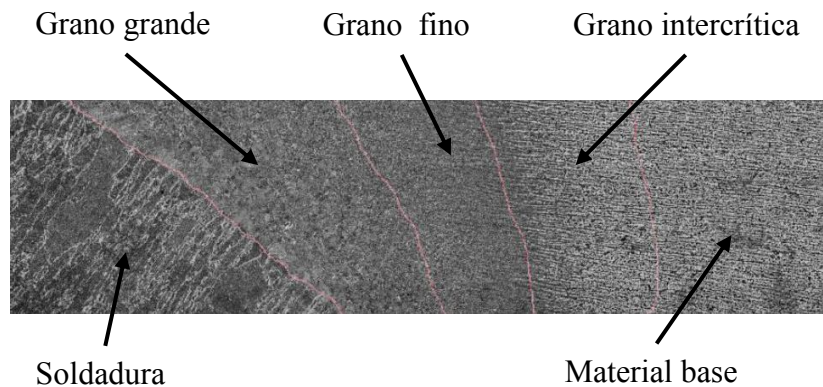
Durante el proceso de soldadura el área cercana a la unión es afectada por el diferencial de temperatura, a dicha área se le conoce como Zona afectada por temperatura (ZAT), en la cual los materiales sufren un cambio estructural modificando sus propiedades mecánicas (Figura III.2.).



**Figura III.2.-** Zona afectada por temperatura (American Iron Steel Institute and AET Integration)

La zona afectada por la temperatura es la parte más importante para el estudio de propagación de grietas durante un proceso de soldadura, es de vital interés observar las transiciones graduales entre las subdivisiones del ZAT (Figura III.3), las cuales se dividen en tres:

- Grano grande (ZGG)
- Grano fino (ZGF)
- Grano intercrítico (ZGI). [III.1]



**Figura III.3.-**Subdivisiones del ZAT [III.1]

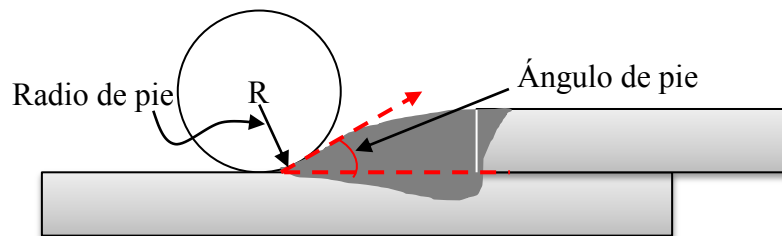
Existen aspectos durante el proceso de soldadura que se deben considerar, así como la segregación térmica de la soldadura después de la transformación tras el enfriamiento:

- Las temperaturas máximas en la zona afectada por la temperatura (ZAT) pueden ser mucho mayores que la temperatura necesaria para la transformación de ferrita en austenita que se presenta durante el proceso. Los cambios de temperatura se dan en pocos segundos [III.2].
- El gradiente de temperatura en la ZAT es muy prolongada, lo que complica el problema de estudiar las transformaciones en la ZAT durante el proceso de soldadura.
- Durante la solidificación de la soldadura de aleación y la impureza algunos elementos tienden a segregarse ampliamente en las regiones intercelulares en las condiciones de enfriamiento rápido.

- La solidificación del metal de soldadura se acompaña de contracción, y las condiciones isotérmicas causan deformaciones. Los ciclos térmicos que actúan en metal someten al material a cambios mecánicos al mismo tiempo [III.3].

La geometría del cordón de soldadura así como el ZAT depende tanto del voltaje y la velocidad de desplazamiento con la cual se genera la soldadura. Estudios realizados por la AISI demostraron que un menor y mayor ángulo de pie del cordón aumentan el rendimiento a la fatiga [III.4]. En general los aceros dulces sometidos a pruebas tuvieron la tendencia a producir mayores ángulos de pie y menores radios a comparación de un Acero DP780, durante una velocidad de desplazamiento de 45 a 70 pulgadas por minuto (ipm). La Figura III.4 muestra la representación del radio de pie y ángulo de pie.

Altas velocidades de desplazamiento y voltaje provocan diferencias entre un Acero dulce y un DP780, y bajas velocidades de desplazamiento y voltaje dan una similitud entre dichos materiales.



**Figura III.4.-** Representación del ángulo y pie de la soldadura

### **III.3.- Método de los Elementos Finitos aplicado a la transferencia de calor [III.5]**

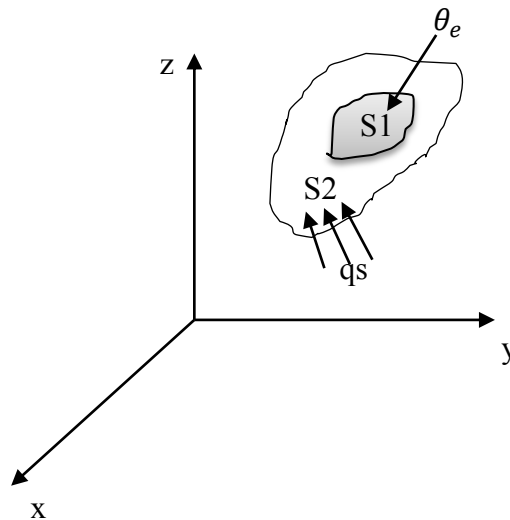
El método de los elementos finitos ha sido generalmente aplicado desde el punto de vista estructural, sin embargo los avances en este campo han logrado incluir la transferencia de calor para lo cual se desarrollaron dos tipos de análisis térmicos, uno “estable”, que no considera al tiempo como un factor en el análisis y el otro tipo es el análisis “transitorio”, en que las condiciones son variables en tiempo.

Para el caso del análisis térmico se requiere crear un modelo discreto de las partes a analizar, para tal se procede a una división de la geometría en un número finito de elementos, que a su vez están definidos por nodos, y de esta manera se pueden establecer las respuestas que ha generado cada elemento unido a otro a través de sus nodos. El método requiere solucionar ecuaciones

matriciales relativamente grandes, dependiendo de la cantidad de elementos en los cuales se ha dividido el modelo en estudio. De esta forma se resuelven las incógnitas que describen el comportamiento en todo el modelo analizado.

Lo primero que se debe hacer es considerar las ecuaciones diferenciales y variaciones que rigen las condiciones de transferencia de calor. Dichas ecuaciones proveen la base para la solución de elementos finitos de un problema de transferencia de calor.

Las ecuaciones que gobiernan la transferencia de calor son las siguientes, y se consideran para un cuerpo tridimensional como se muestra en la Figura III.5.



**Figura III.5.-** Cuerpo sujeto a transferencia de calor

En el análisis de las condiciones en las cuales se produce la transferencia de calor, se asume que el material obedece a la *Ley de Fourier* de conducción de calor:

$$q_x = -k_x \frac{\partial \theta}{\partial x} ; \quad q_y = -k_y \frac{\partial \theta}{\partial y} ; \quad q_z = -k_z \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad \text{III.1}$$

Donde  $q_x$ ,  $q_y$  y  $q_z$  son los flujos de calor conducidos por unidad de área,  $S1$  corresponde a una superficie específica del volumen y  $S2$  es la superficie general del volumen,  $\theta$  es la temperatura del cuerpo, y  $k_x$ ,  $k_y$  y  $k_z$  son las conductividades térmicas correspondientes a los ejes principales  $(x, y, z)$ .

Considerando el equilibrio de flujo de calor en el interior del cuerpo se obtiene:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) = -q^B \quad \text{III.2}$$

Donde  $q^B$  es el tipo de calor generado por unidad de volumen. En las superficies del cuerpo las siguientes condiciones deben ser satisfechas:

$$\theta_{s1} \Big| = \theta_e \quad \text{III.3}$$

$$k_n \frac{\partial \theta}{\partial n} \Big|_{s2} = q^s \quad \text{III.4}$$

Donde  $\theta_e$  es la temperatura ambiente,  $k_n$  es la conductividad térmica del cuerpo,  $n$  denota la dirección de la normal a la superficie y  $q^s$  es el ingreso de flujo de calor en la superficie del cuerpo.

#### III.4.- Tipos de análisis térmicos

El software basado en el *MEF* (APDL) soporta dos tipos de análisis térmicos:

Análisis térmico en estado estable.- En este tipo de análisis se determina la distribución de temperatura nodal y otras cantidades térmicas, bajo condiciones de carga estable, es decir, la carga no es afectada en función del tiempo.

El análisis térmico en estado estable puede ser del tipo lineal o no lineal.

- Lineal.- Las propiedades del material se mantienen constantes durante el análisis.
- No lineal.- Las propiedades del material varían respecto a la temperatura.

Análisis térmico transitorio.- Determinan la distribución de temperatura y otras cantidades térmicas, bajo cargas que varían en función del tiempo. Los ingenieros comúnmente realizan análisis estructurales con los datos de salida obtenidos del análisis térmico, para evaluar los esfuerzos térmicos.

Un análisis térmico calcula la distribución de temperatura y cantidades térmicas relacionadas a un sistema o componente, tales como:

- La distribución de temperatura
- Flujo térmico
- Gradiente térmico
- Cantidad de calor ganado o perdido

La simulación térmica en elementos finitos juega un rol importante en aplicaciones ingenieriles, incluyendo máquinas de combustión interna, turbinas, sistemas de tuberías y algunos componentes electrodomésticos.

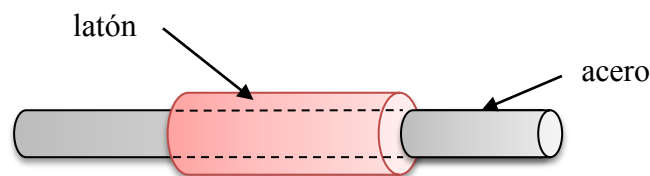
En algunos casos los ingenieros obtienen esfuerzos y deformaciones térmicas con los resultados del análisis térmico, a este tipo de simulaciones se les llama análisis acoplados.

Solo algunos paquetes de ANSYS como ANSYS Multiphysic, ANSYS Mechanical, ANSYS Profesional y ANSYS FOLTRAN pueden realizar análisis térmicos. La paquetería de ANSYS maneja las tres principales formas de transferencia de calor que son:

- Convección
- Conducción
- Radiación

Cuando una estructura se expone a un diferencial de temperatura ( $\Delta T$ ) tiende a expandirse o contraerse, esto depende a:

- Las restricciones a la que se somete la estructura.- Esto implica el control de las deformaciones y por ello la estructura se somete a esfuerzos debido a que no fluye libremente.
- Contacto con otro material diferente al de la estructura.- El estar en contacto con otro tipo de material (Figura III.6.) con diferentes propiedades térmicas causara en la estructura deformaciones no uniformes.

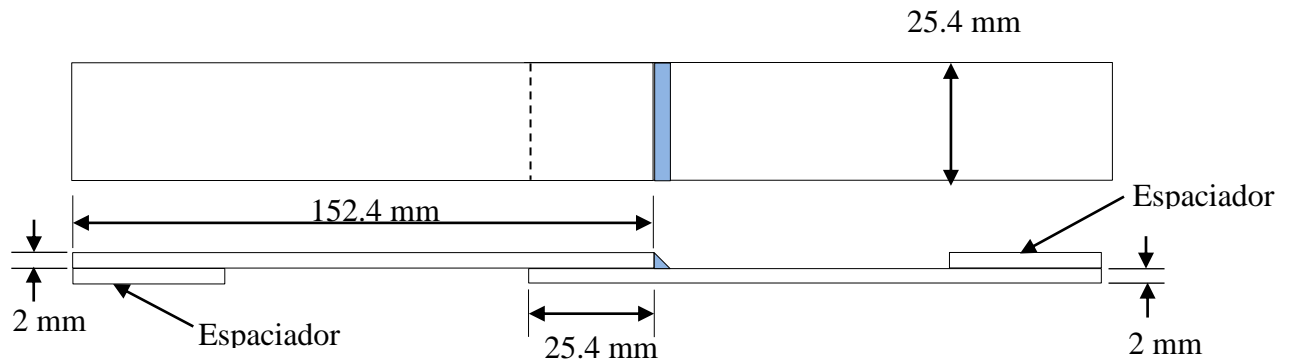


**Figura III.6.- Acero revestido con Latón (deformaciones no uniformes)**

### III.5.- Análisis térmico transitorio de dos placas de Acero dulce utilizando el *MEF*

#### III.5.1.- Geometría y dimensionamiento de las placas

Como se menciona en el Capítulo II existen diferentes tipos de soldaduras y tipos de posición para el soldeo de placas, la realización de esta investigación se desarrolló simulando el proceso de soldadura tipo SMAW o MIG sobre dos placas sobrepuestas de Acero dulce, con las dimensiones mostradas en la Figura III.7.



**Figura III.7.- Geometría de simulación**

#### III.5.2.- Propiedades físicas termo dependientes del acero dulce

Como se mencionó anteriormente, los análisis térmicos son de 2 tipos, en este trabajo se realizó un análisis de tipo térmico transitorio, por lo que es indispensable contar con las propiedades termo dependientes del Acero dulce.

Los programas basados en el método de los elementos finitos, permiten tener en cuenta la no linealidad que representa el comportamiento termo-dependiente de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales, a partir de la creación de las denominadas “curvas de temperatura”. También puede establecerse dentro de las condiciones del problema, la intensidad de la disipación del calor por convección desde la superficie del modelo al medio ambiente e incluso la transferencia de calor por radiación. Sin embargo, mientras más curvas de temperaturas son introducidas al programa de elementos finitos es necesario más recursos computacionales para la resolución del problema [III.6].

Además cabe mencionar que un problema para este tipo de análisis, es la dificultad para determinar las propiedades del material en función de la temperatura, especialmente en el rango



de altas temperaturas. Por lo que en el análisis térmico transitorio se consideraron las propiedades termo-dependientes físicas fundamentales del Acero dulce, tales como la conductividad térmica ( $\lambda$ ) y calor específico ( $c$ ). Se empleó un electrodo ER70 S-6 de 1.2 mm de acuerdo a la normativa de la Sociedad Americana de Soldadura (AWS), para dos placas de acero de bajo contenido de carbono y baja aleación [III.7].

La aplicación del electrodo ER70 S-6 es utilizado para soldar acero dulce en toda posición, mediante proceso MIG/MAG usando anhídrido carbónico (CO<sub>2</sub>) o mezcla AGAMIX20. Utilizado en estructuras en general, maquinarias, bastidores de autos, puentes, muelles, torres, etc., por lo que es el indicado para la realización del proceso de soldadura. Algunos diámetros utilizados para el proceso de soldeo se presentan en la Tabla III.1.

Cabe mencionar que el depósito de metal no se simuló en los análisis realizados.

Proceso MIG/MAG (GMAW)	Diámetro de electrodo (mm)	Amperaje (I)	Voltaje (V)
Corto circuito	0.8	90-110	15-21
	0.9	90-110	16-22
	1.0	100-120	17-22
	1.2	100-130	17-22

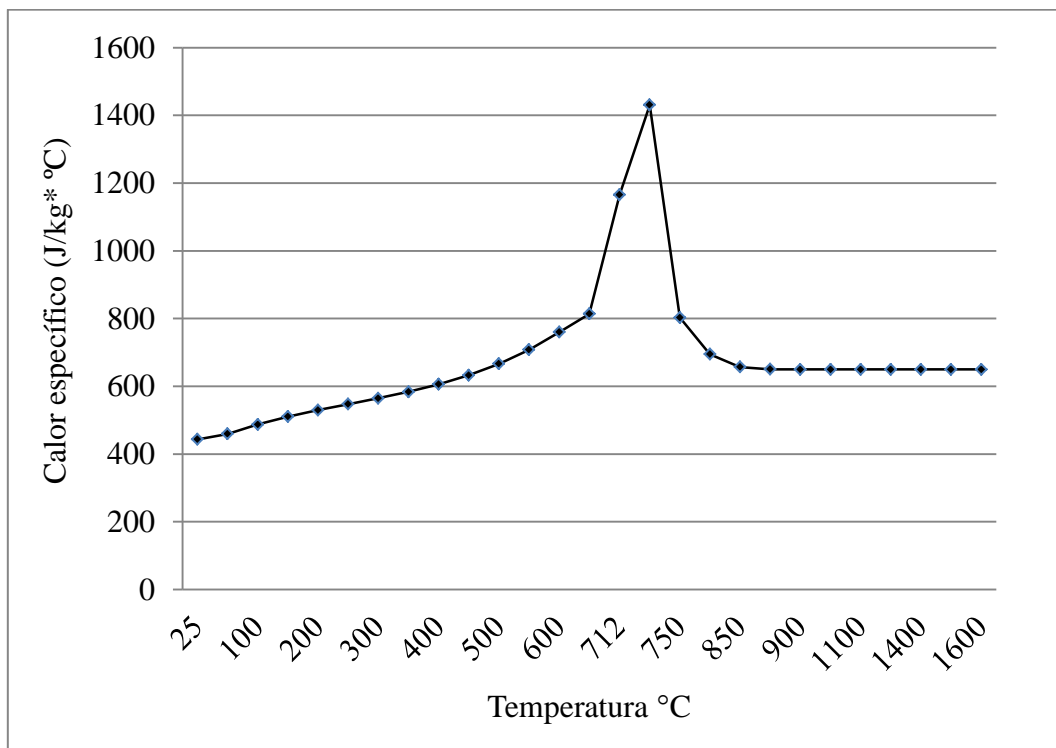
**Tabla III.1.-**Diámetros de electrodos para materiales de bajo contenido de carbono

La Sociedad Americana de Metales (ASM) Handbook, Volumen 1, proporciona algunas propiedades físicas dependientes de la temperatura, pero que solo llegan a los 700 grados centígrados, lo cual no es suficiente puesto que durante el proceso de soldadura el material alcanza temperaturas alrededor de los 1430 a 1530 °C [III.8].

Aunque algunas propiedades físicas dependientes de la temperatura se proporcionan en libros de texto (Tabla III.2) aún se requiere de datos a temperaturas elevadas. Con datos obtenidos de la ASM y otras fuentes se corroboraron estas propiedades con el fin de obtener las adecuadas.

**Tabla III.2.-** Propiedades térmicas [III.9]

Material	Propiedades a varias temperaturas (300 °C)			Propiedades a varias temperaturas			
	$\rho(\text{kg/m}^3)$	$C_p(\text{J/kg}^* \text{ }^\circ\text{C})$	$k(\text{W/m}^* \text{ }^\circ\text{C})$	$k/ C_p$			
				400	600	800	1000
Aceros al carbón	7854	434	60.5	56.7	48.0	39.2	30.0
Simple al carbón (Mn≤1%,Si≤0.1%)				487	559	685	1169



**Figura III.8.-** Calor específico dependiente de la temperatura

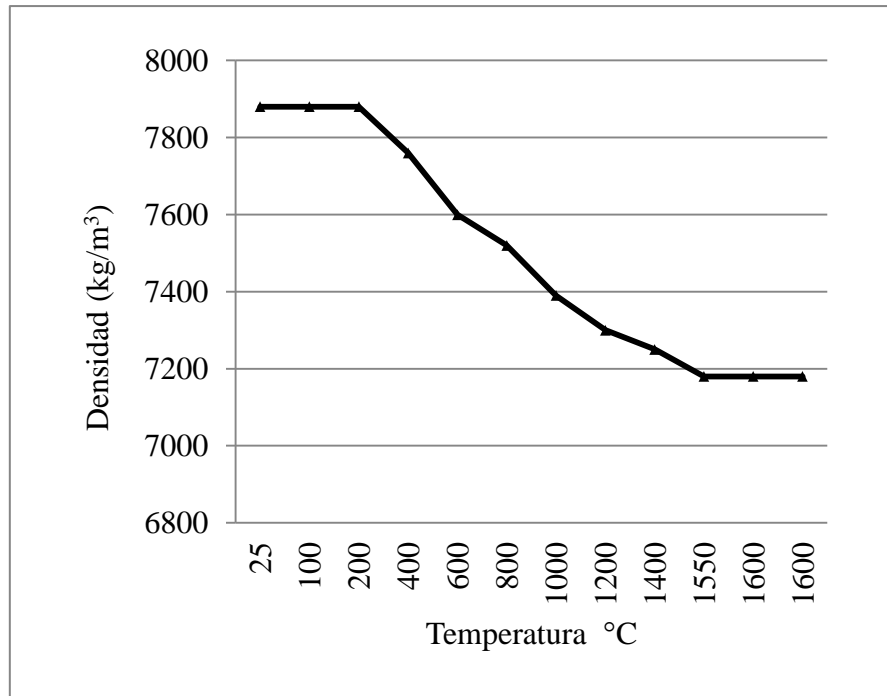


Figura III.9.- Densidad dependiente de la temperatura

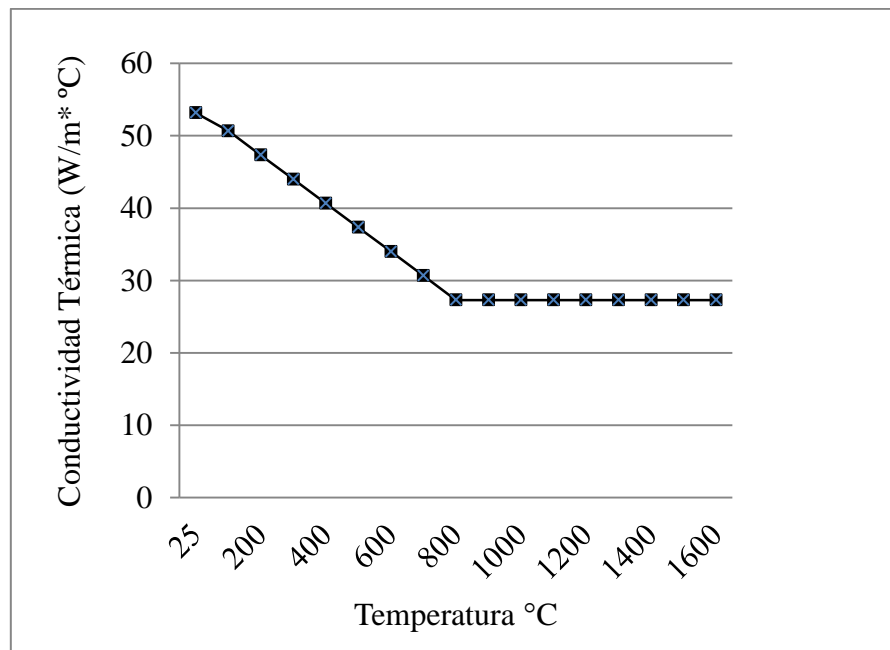


Figura III.10.- Conductividad térmica dependiente de la temperatura

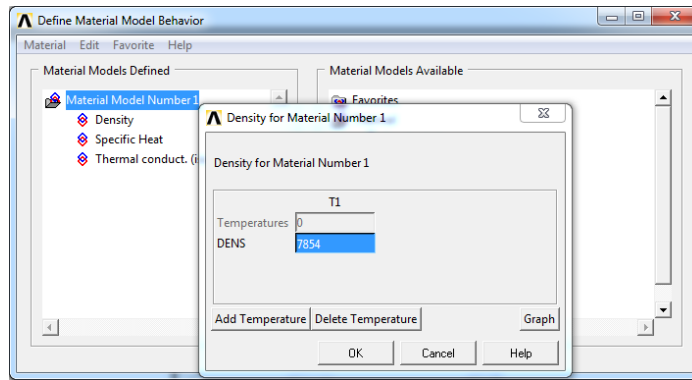


Figura III.11.- Asignación de las propiedades térmicas para el acero dulce

**III.5.3.- Tipo de elemento y discretizado**

Para el análisis térmico se utilizó el elemento SOLID70 (Figura III.12), ya que el elemento tiene ocho nodos en cada elemento con un solo grado de libertad, temperatura en cada nodo. Es un elemento de bajo orden pero utilizado por varios autores dándoles datos confiables. Es adecuado para un análisis térmico en 3D, en estado estable o transitorio. El elemento también puede compensar el flujo de calor de transporte masivo de un campo de velocidad constante. Por otra parte, este elemento tiene la libertad de acoplarse a un análisis estructural posterior, para ello solo se debe cambiar por un elemento estructural equivalente como el SOLID45 o SOLID90 [III.10].

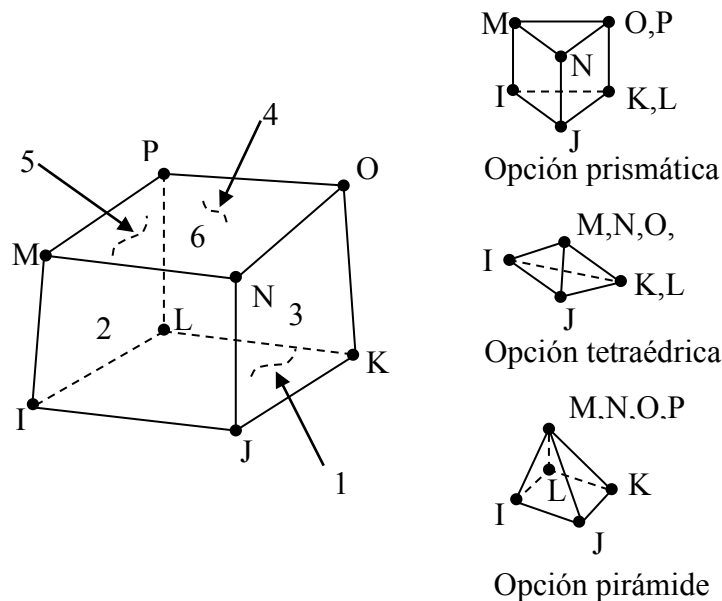
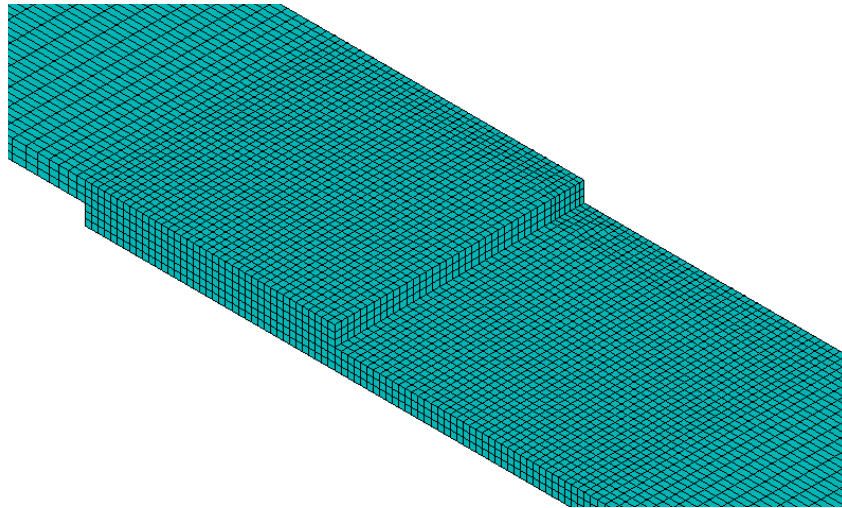


Figura III.12.-Geometría SOLID70

La discretización de las placas se realizó de tal forma que los elementos fueran lo mayor uniforme posible y que adquirieran un forma cubica para evitar posibles errores. Se asignó un tamaño de elemento de 0.6666 x 0.6666 x 0.6666 mm (Figura III.13) en la zona donde actuó el flujo de calor.



**Figura III.13.-Discretizado de placas**

#### **III.5.4.- Cargas y condiciones de frontera**

Durante un proceso de soldadura existen perdidas por convección y radiación, por lo que en este análisis solo se consideraron las perdidas por convección igual a  $15 \text{ W}^\circ\text{K}/\text{m}^2$  y no las de radiación, aunque se equilibró tomando en cuenta la eficiencia del proceso ( $\eta$ ) de soldadura GMAW que oscila entre 0,70 a 0,85.

La cantidad de calor introducida es de 1680 W lo cual representa el 100 % del calor total transferido a la pieza por el arco de soldadura y fue calculada a partir de Ecuación III.5.

$$Q = \eta * V * I \quad \text{III.5}$$

Dónde:

Q es la intensidad de calor introducido al sistema

$\eta$  es la eficiencia del proceso de soldadura GMAW

$V$  es el voltaje

$I$  es la intensidad de corriente

Se declaró la temperatura del medio y la temperatura de las placas de 25 °C.

**Tabla III.3.-** Parámetros de soldadura [III.4]

Geometría	Material	Corriente (I)	Voltaje (V)	Velocidad de desplazamiento (mm/s)	Angulo de antorcha (°)	Desplazamie nto del electrodo (mm)
Mejora de mecanizado	DP780	118	20.9	8.46	40	1.5
Mejora de mecanizado	Acero dulce	120	20.0	8.46	35	1.0
Mejora de mecanizado con GAP	DP780	118	18.7	8.46	40	0.0
Mejora de mecanizado con GAP	Acero dulce	120	20.0	8.46	35	0.0
Producción aceptable	DP780	280	19.7	26.54	45	0.0
Producción aceptable	Acero dulce	225	17.0	18.375	30	0.0
Mejora de producción	DP780	190	23.0	18.375	35	2.0
Mejora de producción	Acero dulce	170	17.5	14.29	30	1.0

En la Tabla III.3 muestra datos utilizados para el proceso de soldadura tipo MIG, además se observan diferentes variables para obtener una mejora de mecanizado, para la realización del análisis se tomó en cuenta los datos de mejora de producción.

Mencionado los parámetros anteriores necesarios para el análisis se tomaron los datos de mejora de mecanizado mostrados en la Tabla III.4 para la simulación del proceso de soldadura.

**Tabla III.4.-** Parámetros del proceso de soldadura MIG

Corriente (I) (Amperes )	Voltaje (V) (Volts)	Eficiencia ( $\eta$ ) %	Velocidad de desplazamiento (mm/s)
120	20	70	8.46

**III.5.5.- Paso de carga en función del tiempo [III.11]**

A pesar de haber declarado los coeficientes térmicos, es de gran importancia el conocer el tiempo en el cual el elemento va a estar sometido a un flujo de calor. Para obtener el paso tiempo al que fue sometido el elemento basta con aplicar la Ecuación III.6.

$$\text{Paso tiempo} = (\text{tiempo de soldadura}) / (\text{número de volúmenes durante el trayecto}) \quad \text{III.6}$$

El tiempo de soldadura para recorrer 25.4 mm es de 3.002 segundos y dividida entre 12 volúmenes a lo largo del trayecto de la soldadura es de 0.25016 segundos por cada 2.116 milímetros recorridos.

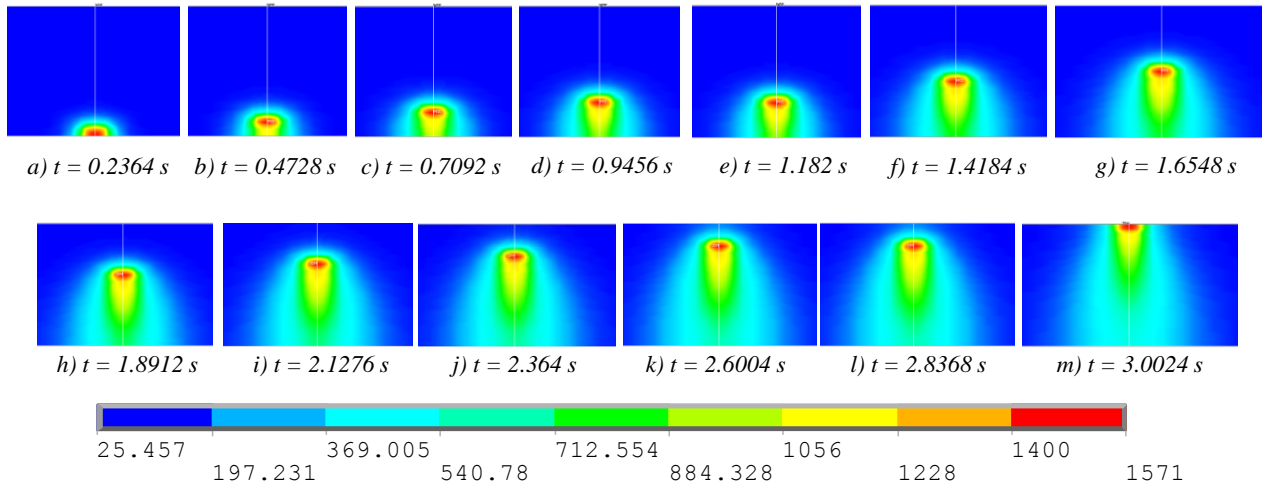
Los pasos de carga generados fueron 44 para la realización del análisis térmico transitorio y se designó subpasos automáticos con aplicación de carga del tipo Ramped.

Cabe señalar que el tiempo de inicio del proceso fue de 0.000001 segundo suficiente corto pero no nulo sin carga, para evitar posibles errores, como lo recomiendan ANSYS Inc. (2004).

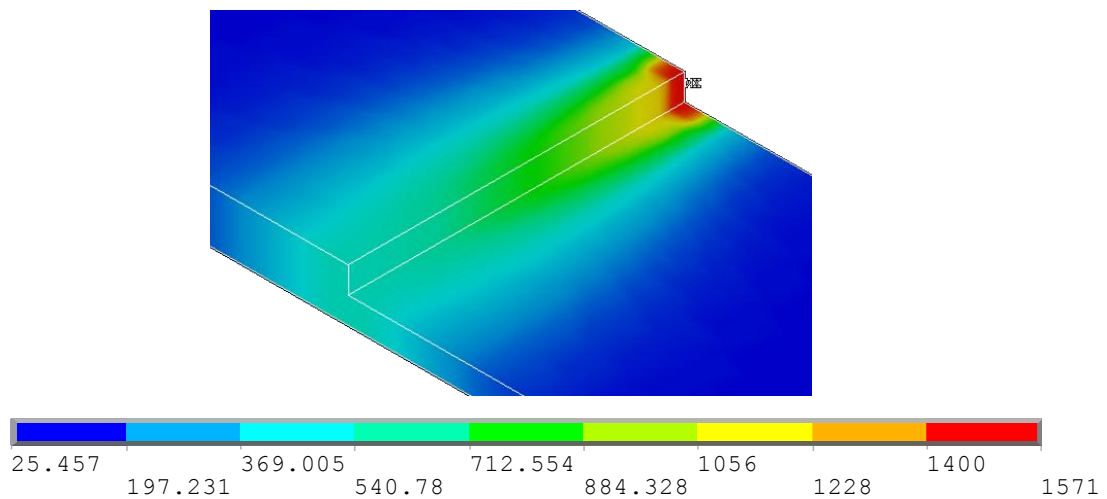
**III.8.- Resultados**

Los resultados se presentan desde el Posprocesador, donde se evalúa la respuesta encontrada en la etapa de solución. El procedimiento de obtención de resultados desde este Posprocesador requiere una lectura de resultados. En este punto se debe comprobar si se obtuvieron la cantidad de sub-pasos que se establecieron en la fase de solución, para luego proceder a seleccionar el último subpaso y su lectura. De esta forma se puede graficar la solución nodal donde se muestra la forma en que se ha producido la transferencia de calor a través de las paredes de las piezas en cuestión. Realizando esto se pueden establecer los nodos de interés, mediante los cuales se evaluará una respuesta en el Posprocesador historia/tiempo.

Los resultados obtenidos en la simulación del ciclo térmico en función de la posición y el tiempo son bastantes aproximados a los que se obtienen en un proceso real de soldadura. Como se puede observar en la Figura III.14, la simulación numérica solo nos permite obtener la historia térmica en cualquier punto del modelo geométrico en cualquier instante de tiempo.



**Figura III.14.-** Perfil de distribución de temperaturas en cada paso de tiempo durante el proceso de soldadura



**Figura III.15.-** Distribución de la temperatura nodal al término del proceso

En las Figura III.15 y III.16 se puede observar la distribución del flujo de calor volumétrico sobre las placas en un tiempo de 3.0024 segundos, así como la distribución de incremento y decremento



de la temperatura sobre la placa, en dicho tiempo, observándose el alcance de la temperatura de fusión requerida para la unión de las dos placas.

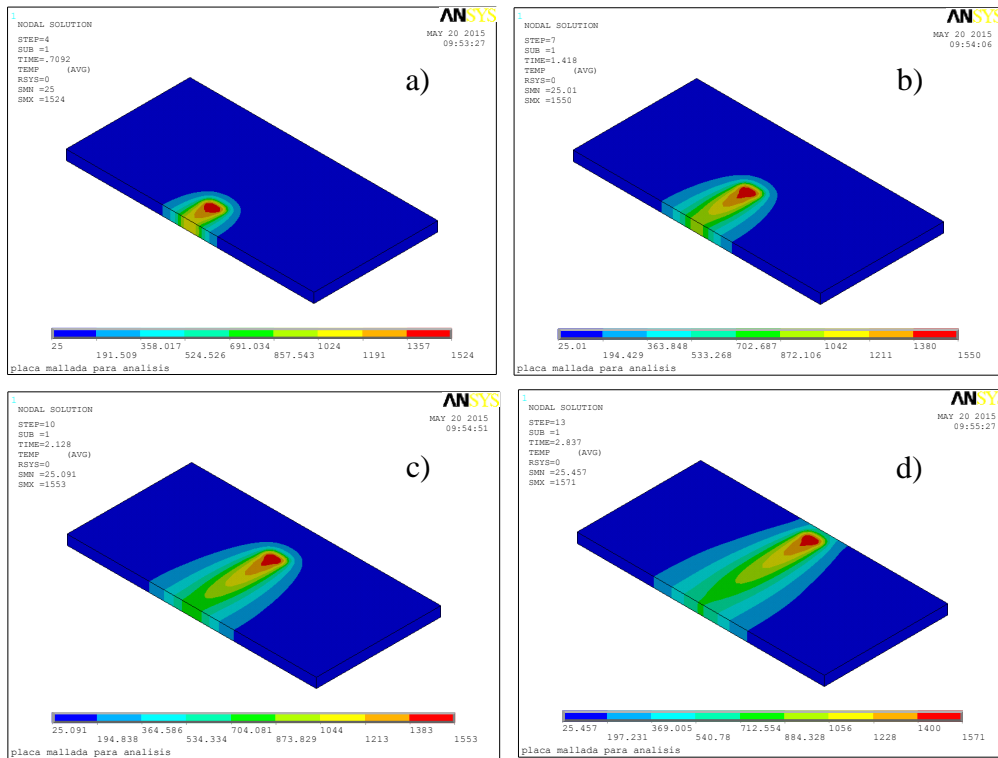
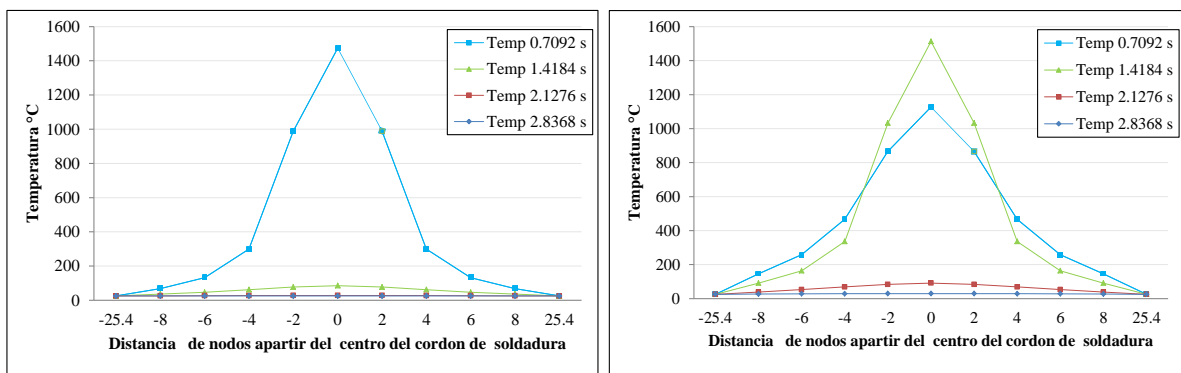


Figura III.16.- Distribución de temperaturas, a) 0.7092s, b) 1.418s, c) 2.128s y d) 2.837s

Como se puede observar en la Figura III.17 en incremento y decremento de la temperatura en los nodos ubicados en el centro de la línea de acción de la soldadura y en dirección del proceso, cambian respecto al tiempo. En las gráficas mostradas en la Figura III.17 se representa la posición de 4 nodos ubicados a las distancias Temp 0.7092 s= 6 mm, Temp 1.4184 s=12 mm, Temp 2.1276 s= 18mm y Temp 2.8368 s= 24mm, los cuales alcanzan una temperatura aproximada a 1550 °C cuando el flujo volumétrico es aplicado en ese punto.



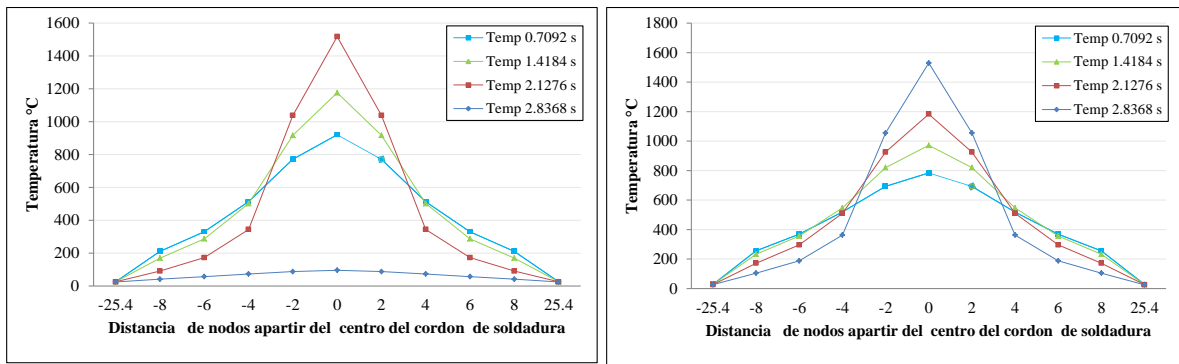


Figura III.17.- Incremento y decremento de temperatura para cuatro pasos de tiempo

### III.9.- Sumario

En esta sección se habló de la importancia que tiene el GAP en uniones por procesos de soldadura, los cuales afectan directamente a la resistencia a la fatiga de la estructura. Durante un proceso de soldadura por arco eléctrico el material sufre cambios estructurales cerca de la fuente calor, a esta zona se le llama zona afectada por la temperatura (ZAT), y esta se subdivide en tres zonas de acuerdo al tamaño del grano, grano grande, grano fino y grano intrínseco la cual es afectado por el voltaje, amperaje y velocidad de desplazamiento del equipo de soldeo.

Se mencionó que en algunos programas de cómputo comerciales se pueden desarrollar análisis térmicos, estos pueden ser del tipo estable o transitorio. En el tipo estable las propiedades del material no son afectadas por la temperatura y las cargas se consideran estables. En el tipo transitorio las propiedades físicas son afectadas por la temperatura, y las cargas están en función del tiempo. La metodología para desarrollar estos tipos de análisis son similares. Los resultados obtenidos son las temperaturas nodales, gradientes de temperatura, flujos térmicos y la pérdida o ganancia de calor.

Se hizo énfasis de que un análisis térmico se puede llevar a un estructural, para determinar los esfuerzos y distorsiones que se producen por un diferencial de temperatura. Para poder realizar el acople se debe seleccionar elementos tanto térmicos como estructurales que tengan los mismos nodos en cada elemento, esto con el fin de que la malla puede ser sustituida y garantizar que los nodos y elementos coincidan, si esto no se lleva a cabo no se podrá realizar el acople.

Por último se realizó un análisis térmico para observar que las temperaturas nodales cambian con el tiempo y como se distribuyen al término del proceso de soldadura.

**III.10.- Referencias**

- 1.- Fernández de Rucoba, D., *Optimización del diseño a fatiga de uniones soldadas a tope y su aplicación al dimensionamiento de soldaduras transversales de torres eólicas*, Ed. Universidad De Cantabria, pp 87, 2012.
- 2.- Larson, N. E., and Meredith, W. F., *Shielding gas selection manual*, Union Carbide Industrial gases technology corp., 1990, pp 11.
- 3.- ASM Handbook, *Welding, Brazing, And Soldering*, Volumen 6, 1993, pp. 179.
- 4.- Anderson, D., and Jack Sang, J. H., *Effects of Material Properties and Weld Geometry on Fatigue Performance of DP780 and Mild Steel GMAW LapJoints*, Ed, American Iron Steel Institute and AET Integration, pp 10.
- 5.- Salas, M., J. Pérez, P., y Sepúlveda, *Análisis Térmico de un Motor Marino Mediante el Método de Elementos Finitos*, Instituto de Ciencias Navales y Marítimas, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Austral de Chile.
- 6.- Ramos-Morales F., Duffus Scott A., Rodríguez-Pérez M., *Influencia de la termodependencia de las propiedades físicas del acero en la simulación por elementos finitos del proceso de soldadura*, Centro de Investigaciones de Soldadura. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia N.º 48. pp. 87-96. Junio, 2009.
- 7.- AWS A5.18/A5.18M An American National Standard, Specification for Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded, pp. 4, 2005.
- 8.- ASM Handbook, Volume 1, *Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys Section: Carbon and Low-Alloy Steels*, pp. 327-333, Sep. 2005.
- 9.- Cengel, Y. A., *Transferencia de calor*, Ed. McGraw-Hill Interamericana, 3ª edición, pp 844, 2007.
- 10.- ANSYS. *Thermal Analysis Guide* ,Increlease 12.0, 2009.
- 11.- Pérez-Cabrera A., *Metodología para evaluar con exactitud la recuperación parcial de forma del material Springback*, Ed. IPN, pp 202-208, 2012.

# Capítulo IV

**Análisis estructural  
utilizando el *MEF* para la  
determinación de esfuerzos  
residuales después de un  
proceso de soldadura**



### **IV.1.- Esfuerzos residuales**

Se considera a los esfuerzos residuales, como al estado de esfuerzos que existen en el volumen de un material en ausencia de un agente externo u otra fuente de esfuerzos. Estos esfuerzos pueden desarrollarse cuando los materiales o piezas se someten a una deformación plástica que no es uniforme a lo largo del volumen del material. [IV.1]

### **IV.2.- Clasificación del origen de los esfuerzos residuales [IV.2]**

Los principales métodos de inducción de esfuerzos residuales pueden ser divididos en cuatro principales grupos:

- Métodos mecánicos
- Métodos térmicos
- Procesos de manufactura
- Métodos químicos

#### **IV.2.1.- Métodos mecánicos**

Estos se basan en la aplicación de cargas externas, las cuales producen deformaciones plásticas, al retirar estas cargas producen esfuerzos residuales de tensión y compresión, ambos esfuerzos residuales están presentes con el fin de satisfacer las fuerzas internas y momentos para estar en equilibrio.

#### **IV.2.2.- Métodos térmicos**

Estos se originan por una deformación plástica a través de una expansión o contracción térmica no homogénea, la cual produce los esfuerzos residuales en la ausencia de cambio de fase. Los procesos térmicos utilizados en procedimientos para la fabricación de materiales incluyen fundición, forja, laminación en caliente, extrusión, moldeo por inyección, soldadura, templado y revenido, inducen una amplia variedad de esfuerzos residuales, que pueden ser beneficiosos o perjudiciales.

#### **IV.2.3.- Procesos de manufactura**

Las operaciones de procesos de manufactura como torneado, fresado, cepillado y las operaciones de abrasión, tales como la molienda, pulido y rectificado, pueden afectar significativamente la

resistencia a la fatiga. Todos estos métodos implican operaciones sobre la superficie del material, generando esfuerzos residuales que se presentan en la zona plástica y estos se producen de manera no uniforme.

#### **IV.2.4.- Métodos químicos**

Los esfuerzos residuales se generan por cambios de volumen en el material derivados de reacciones químicas, por ejemplo el nitrurado que produce esfuerzos de compresión en la zona de difusión y esto es debido a la precipitación del nitruro.

#### **IV.3.- Clasificación de esfuerzos residuales [IV.3]**

Estos pueden dividirse en tres grupos: macroscópicos, microscópicos y por consecuencia de deformaciones elásticas y/o plásticas no-homogéneas.

- Esfuerzos residuales macroscópicos.- son esencialmente constantes a lo largo de una longitud relativamente grande (bastante mayor a la del tamaño de grano). Estos esfuerzos tienen su origen en el procesado del material como por ejemplo en procesos de mecanizado, soldadura, aplicación de tratamientos térmicos, etc.
- Esfuerzos residuales microscópicos.- estos se encuentran a una escala mucho más pequeña, menor al tamaño del grano. Estos esfuerzos tienen su origen en la textura de los granos y en la anisotropía elástica y plástica. Este tipo esfuerzos residuales varían en la escala de un grano. Estos micro esfuerzos a menudo tienen su origen en la presencia de diferentes fases en un material.
- Esfuerzos residuales por consecuencia de deformaciones elásticas y/o plásticas no-homogéneas sobre una escala macroscópica o microscópica.

#### **IV.4.- Esfuerzos residuales por soldadura [IV.4]**

Como ya se había mencionado dentro de este tipo de proceso, la soldadura por fusión de materiales metálicos, en la cual se supera la temperatura de “liquidus” del material base y del material de aportación, es la más utilizada en la industria.

En este tipo de proceso requiere un alto aporte térmico, el cual permitirá superar la temperatura de fusión de los materiales a unir, generándose un aporte de energía el cual provocará un flujo de calor al material base. En los procesos de soldadura el aporte de energía está centralizado en una zona concreta (zona ZAT), en la cual se provoca una transferencia o disipación de calor. Esta transmisión de calor genera una distribución de temperaturas y un ciclo térmico característico en la unión soldada.

En este ciclo térmico es donde se originan los primeros cambios micro-estructurales, dando inicio a esfuerzos y deformaciones que se producen y que afectan al comportamiento mecánico estructural en la unión soldada. Los campos de distribución de temperaturas que se obtienen durante el proceso de soldadura y posterior a este son los que determinan los esfuerzos residuales y las deformaciones térmicas.

Durante el proceso de soldadura el material base es calentado por el aporte térmico del proceso de soldeo, generando temperaturas que se distribuyen uniformemente por el material, estas temperaturas van desde el punto de fusión alcanzado en la zona donde se genera o se pretende la unión del material base, hasta la temperatura inicial en las zonas no afectadas por el calor. Durante este proceso de soldadura se generan isoterma (Figura IV.1), la cuales representan de manera gráfica una línea en forma elíptica que une todos los puntos que tienen la misma temperatura en un determinado momento.

Cabe señalar que el tamaño y forma de estas isoterma están en función de la conductividad térmica del material base y de la velocidad de soldeo.

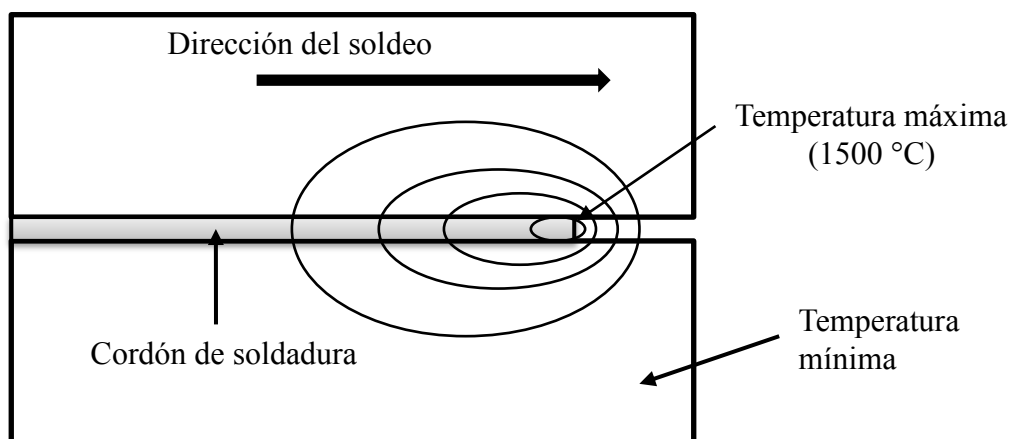
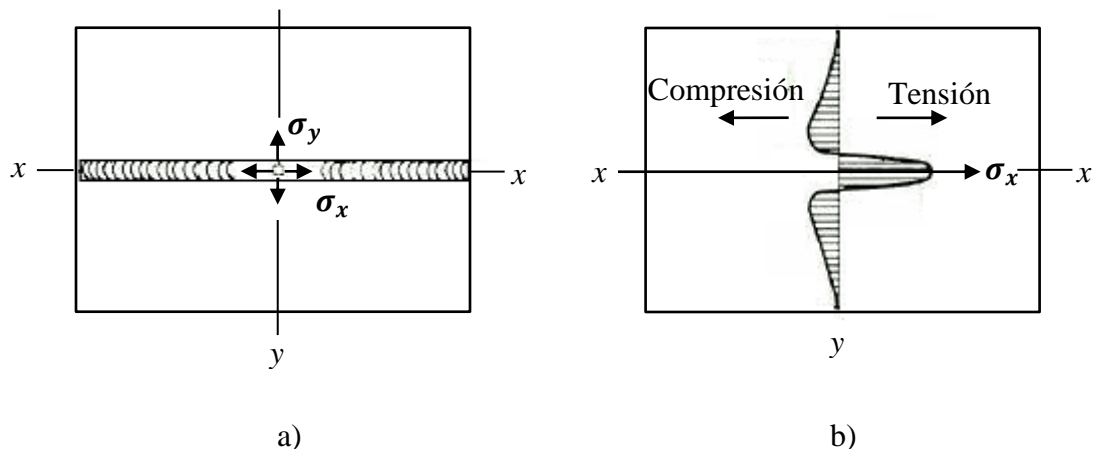


Figura IV.1.- Isoterma de soldeo

Durante los procesos de soldadura se produce una dilatación conforme se incrementa la temperatura, y a su vez se genera una contracción conforme el material base se enfría o alcanza un equilibrio térmico con la temperatura ambiente, obteniendo fuerzas internas de tracción y compresión. Teniendo como consecuencia que durante las diferencias de temperaturas, se presentan dilataciones y contracciones puntuales y temporales. Es importante resaltar que las deformaciones plásticas que se originan a temperaturas mayores a los 800° C terminan por causar deformaciones residuales en el material.

#### IV.4.1.- Origen de esfuerzos residuales por soldadura [IV.3]

Durante el proceso de solidificación el metal se contrae fuertemente, esto debido al cambio de estado de líquido a sólido. Este fenómeno es ocasionado a que el material en estado líquido tiene menor densidad que cuando está en estado sólido, por lo que el cordón de soldadura depositado se contrae durante la solidificación, generando así esfuerzos residuales iniciales por la solidificación. Durante el enfriamiento hasta alcanzar la temperatura ambiente se genera un incremento de los esfuerzos residuales por la contracción debida al efecto inverso a la dilatación térmica.



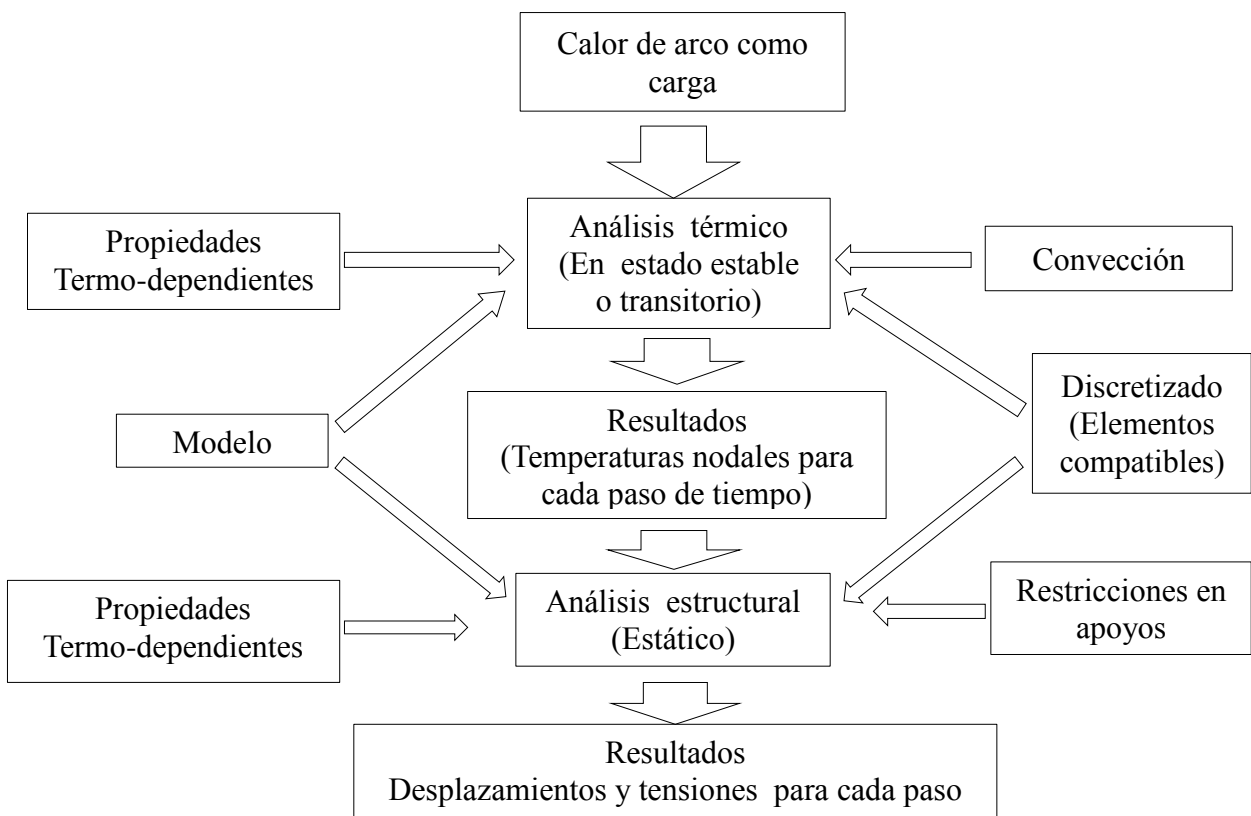
**Figura IV.2.-** Distribución de esfuerzos residuales en una unión soldada.

Los esfuerzos residuales tras un proceso de soleo se ilustran en la Figura IV.2 (a) y en (b) las distribución de esfuerzos a tensión y compresión, los cuales superan el límite elástico en algunos puntos de los cordones de soldadura y la fractura es en general frágil e intempestivo. La combinación de esfuerzos residuales en diferentes direcciones sobrecarga al acero y le producen una fisura sin la deformación normal que suele darse en un elemento sin esfuerzos residuales.



#### IV.5.- Análisis estructural para la determinación de esfuerzos residuales después de un proceso de soldadura utilizando el *MEF*

Para poder determinar los esfuerzos residuales en elemento finito por un proceso térmico, es necesario realizar un análisis acoplado entre el proceso térmico y uno estructural, teniendo que modificar el tipo de elemento utilizado en el análisis térmico (SOLID70), por un elemento compatible en sus nodos, con grados de libertad estructurales y que permita la obtención de los resultados térmicos para poder medir las deformaciones sufridas durante este proceso, por lo cual para este análisis acoplado se hace uso del elemento SOLID45 de Ansys 10. La Figura IV.3 muestra un diagrama de flujo de un proceso de acoplamiento térmico-estructural.



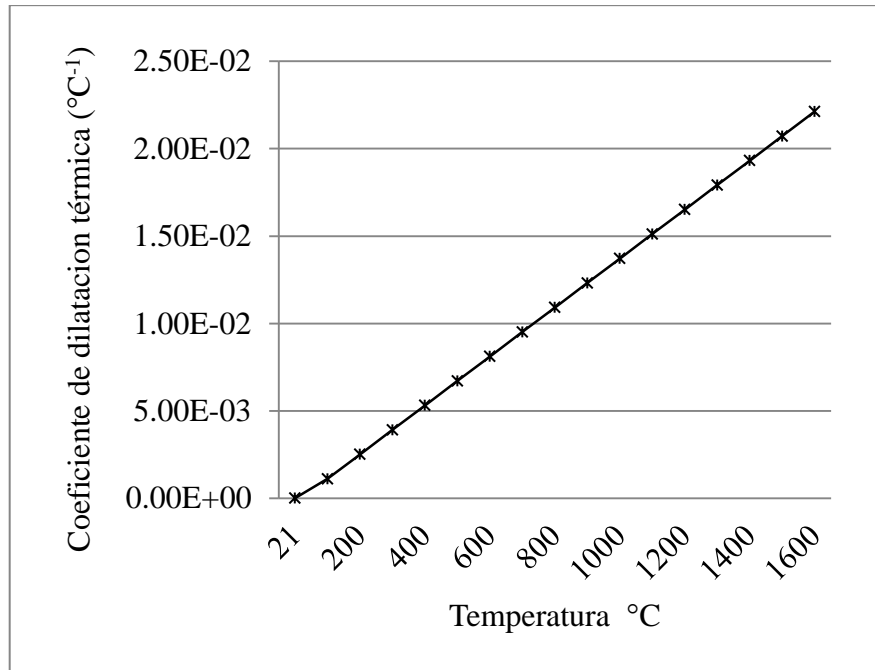
**Figura IV.3.-** Esquema general del análisis de acople secuencial mediante el *MEF*

##### IV.5.1.- Geometría y dimensionamiento de las placas

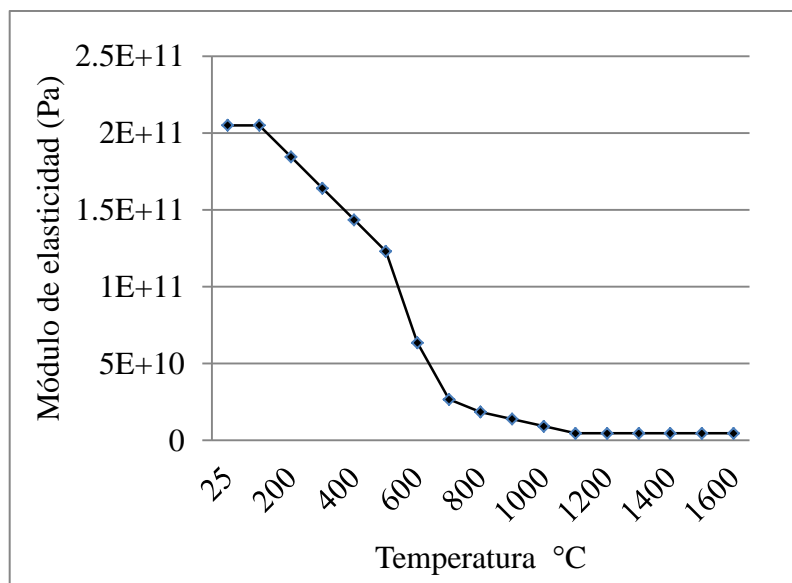
La geometría y dimensionamiento de las placas son las mismas que se utilizaron en el análisis térmico transitorio por lo que no se necesitan modelar nuevamente, solo se requiere abrir el archivo con extensión .db de Ansys para retomar la geometría.

**IV.5.2. - Propiedades mecánicas termo-dependientes del acero dulce**

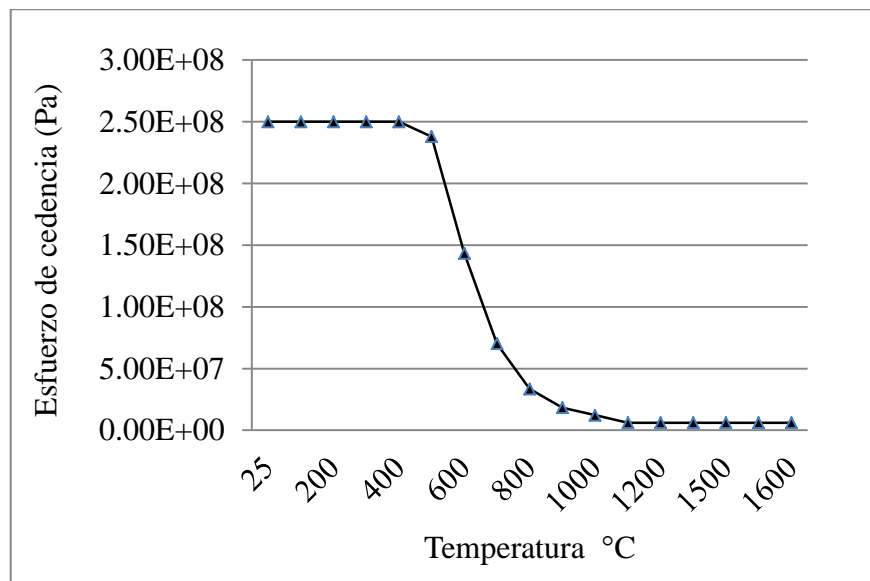
Las propiedades del material que se utilizan en este análisis estructural, siguen siendo termo-dependientes, estas propiedades son el Módulo de Young, esfuerzo de cedencia y el coeficiente de dilatación térmica, dichas propiedades se muestran en la Figura IV.4, IV.5 y IV.6.



**Figura IV.4.-** Coeficiente de dilatación térmica



**Figura IV.5.-** Módulo de elasticidad



**Figura IV.6.-** Esfuerzo de cedencia

Existen diferentes tipos de comportamientos mecánicos para los metales, como:

- Endurecimiento cinemático bilineal
- Endurecimiento cinemático multilíneal
- Endurecimiento isotrópico bilineal
- Endurecimiento isotrópico multilíneal

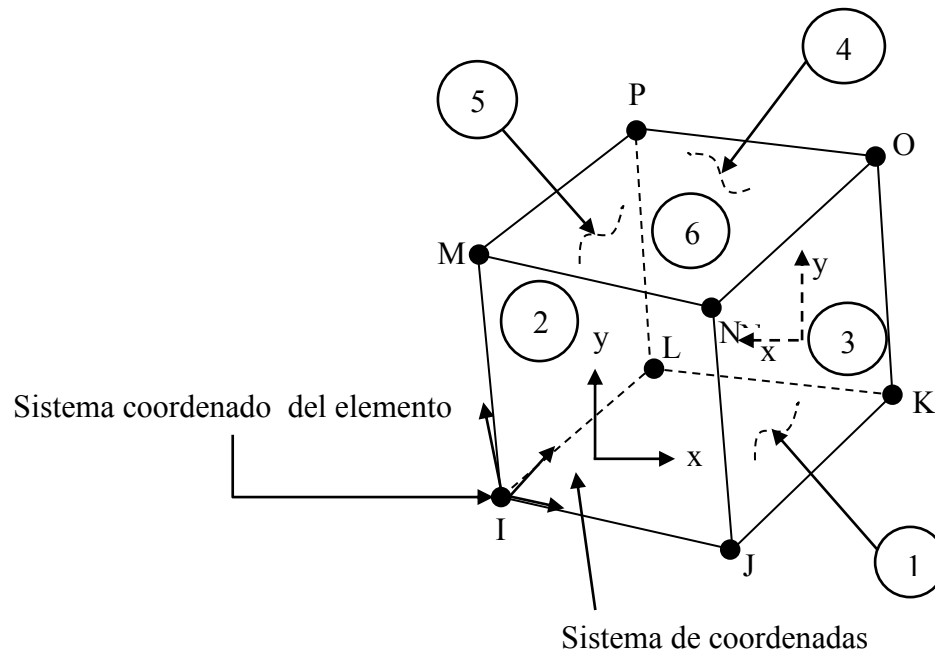
Se consideró un análisis bilineal por lo que el comportamiento del material fue endurecimiento isotrópico el cual acopla el criterio de esfuerzo de cedencia de Von Mises asumiendo un endurecimiento isotrópico por trabajo. Es adecuada para grandes deformaciones [IV.5].

#### **IV.5.3.- Tipo de elemento y discretizado**

Los elementos SOLID se utilizan en la discretización de cuerpos tridimensionales. El elemento SOLID45 está compuesto por ocho nodos por elemento (Figura IV.7). Cada uno de los nodos posee 3 grados de libertad, que corresponden a las tres direcciones de desplazamiento ( $UX, UY, UZ$ ).

El elemento básico tiene forma de hexaedro, pero puede utilizarse como prisma e incluso tetraedro, aunque este último no es recomendable. El elemento SOLID45 fue utilizado en el análisis estático estructural para el acoplamiento con el térmico (SOLID70), como se mencionó

anteriormente para llevar a cabo este análisis los elementos tienen que poseer los mismos nodos en cada elemento [IV.5].



**Figura IV.7.-** Elemento SOLID45 [IV.5]

Debido a la naturaleza de la geometría modelada en este análisis (3D), no se requieren constantes reales.

#### IV.5.4.- Cargas y condiciones de frontera

Asimismo se dieron de alta las propiedades mecánicas del acero dulce, como la Relación de Poisson, y la temperatura de referencia (25 °C)

Para todo análisis estructural se requieren de cargas físicas para poder generar deformaciones y obtener esfuerzos generados por las mismas. Para este análisis dichas cargas solo son las de temperatura que se generaron en el análisis térmico, por lo que no se requiere dar alguna otra condición adicional. Cabe destacar que en este análisis y dentro de las cargas de temperatura se consideró el enfriamiento del modelo en tiempo de 950 segundos para que el modelo alcanzara el equilibrio térmico, es decir llegar a la temperatura ambiente (25 °C).

Las Figuras IV.8, IV.9, IV.10 y IV.11 muestran la variación de la temperatura en los nodos localizados sobre la dirección de soldeo a Temp 0.7092 s= 6 mm, Temp 1.4184 s=12 mm, Temp

2.1276 s= 18 mm y Temp 2.8368 s= 24 mm, hasta la finalización del proceso. Se observa el ascenso y descenso de la temperatura en cada nodo durante el transcurso de los tiempos de 3.0024, 150, 700 y 900 segundos, apartir del inicio del proceso hasta llegar a la temperatura ambiente.

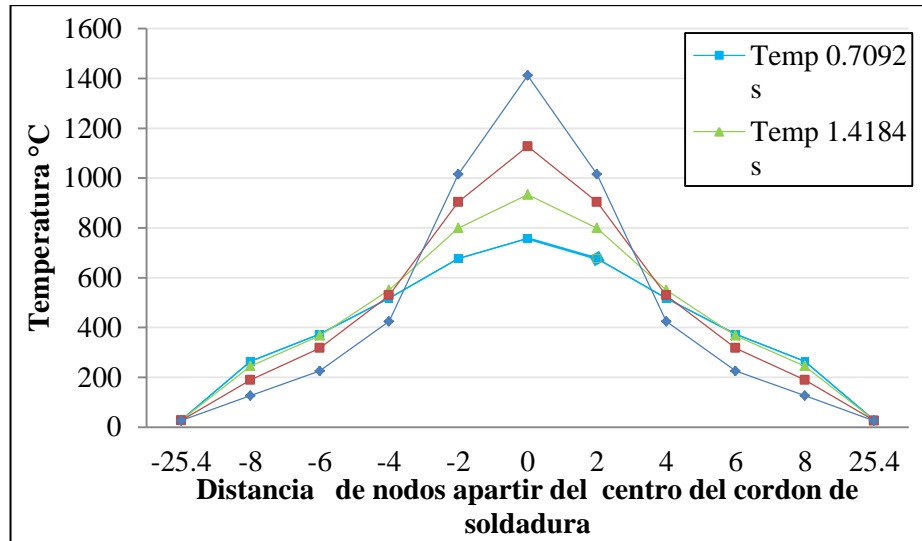


Figura IV.8.- Temperaturas nodales en 3.0024 segundos

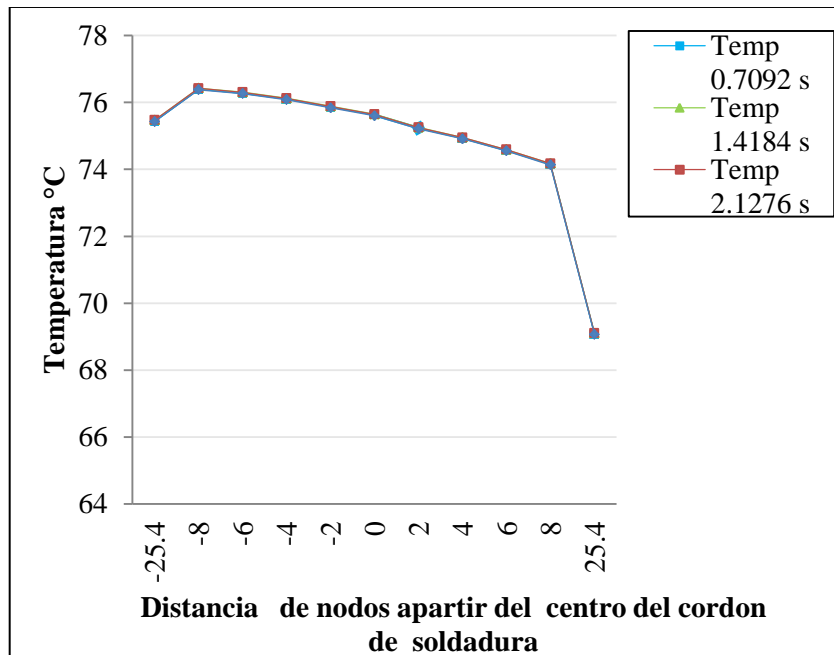


Figura IV.9.- Temperaturas nodales en 150 segundos

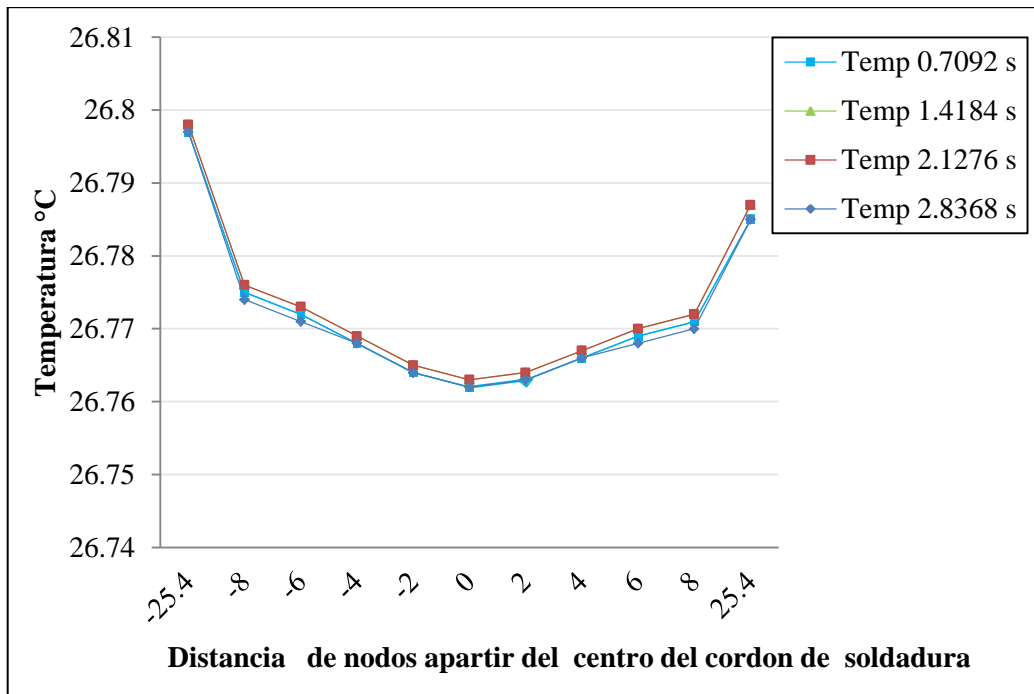


Figura IV.10.- Temperaturas nodales en 700 segundos

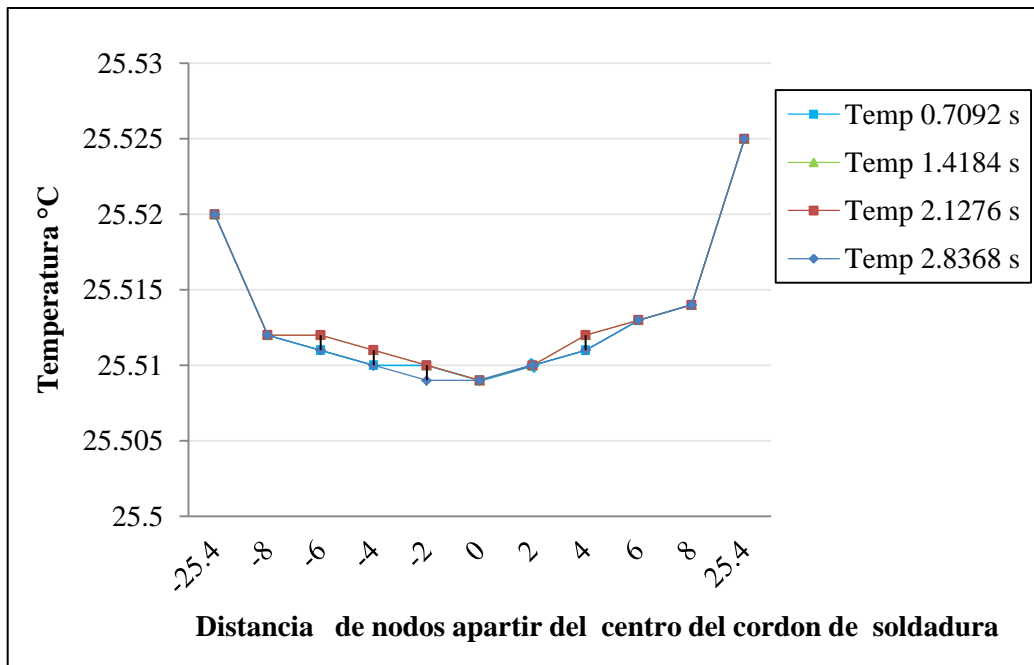


Figura IV.11.- Temperaturas nodales en 900 segundos

Para la determinación de esfuerzos generados en un cierto tiempo solo basta llamar y ejecutar las cargas obtenidas en el análisis térmico al modelo estructural, solucionar el problema y plotear los esfuerzos en ese paso de tiempo. La obtención del historial de esfuerzos en función del paso

de cargas generados se realiza al igual que el análisis térmico, con la diferencia en que el tiempo no afecta el resultado en cada paso.

#### IV.6.- Resultados

En este análisis se determinaron los esfuerzos residuales generados por un aumento de temperatura no uniforme sobre el material, durante un proceso de soldadura para la unión de dos placas de acero. Los esfuerzos mostrados en la Figura IV.12 y IV.14, son longitudinales y transversales obtenidos de los nodos superiores de la placa de acero, los cuales se generaron al finalizar el análisis térmico-estructural. La Figura IV.13 muestra como los esfuerzos longitudinales van aumentando conforme aumenta la distancia desde el punto de inicio del proceso hasta un valor máximo situado en la parte central de la placa, y volviendo a decrecer hasta el punto final de la placa.

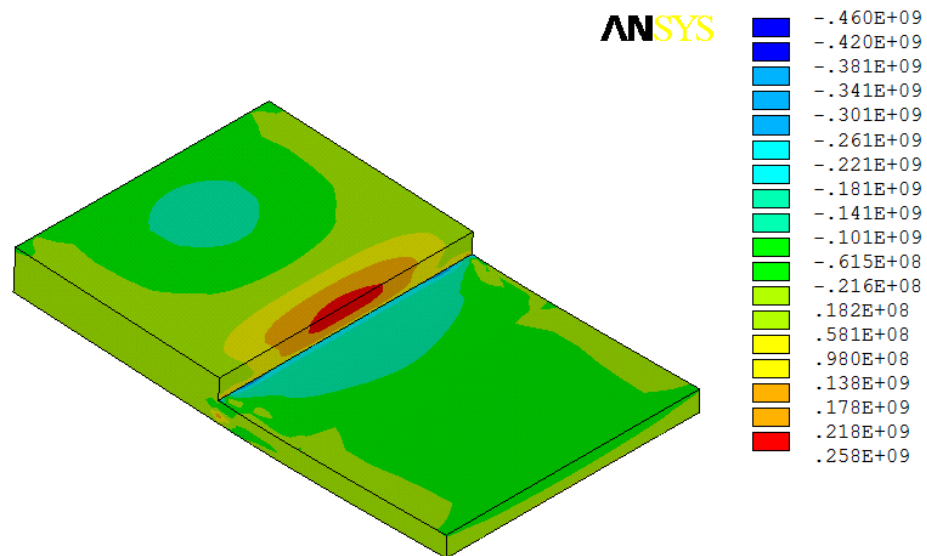


Figura IV.12.- Esfuerzos residuales longitudinales (Pa)

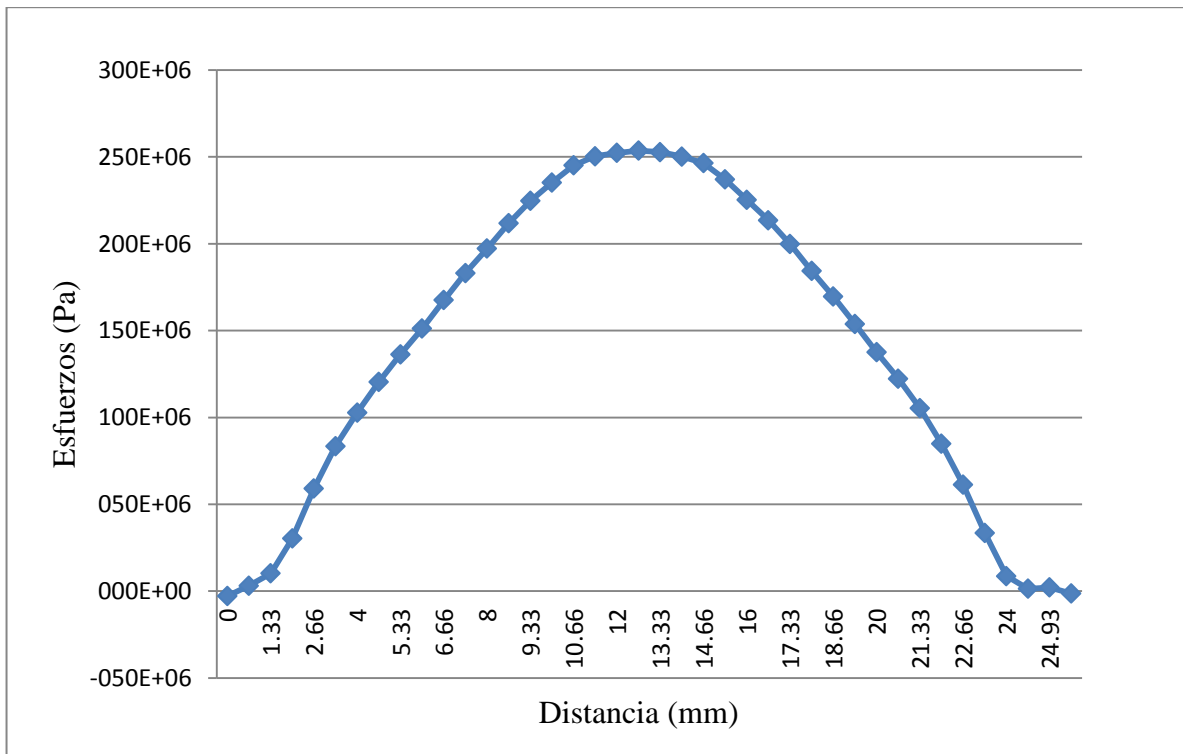


Figura IV.13.- Distribución de esfuerzos longitudinales

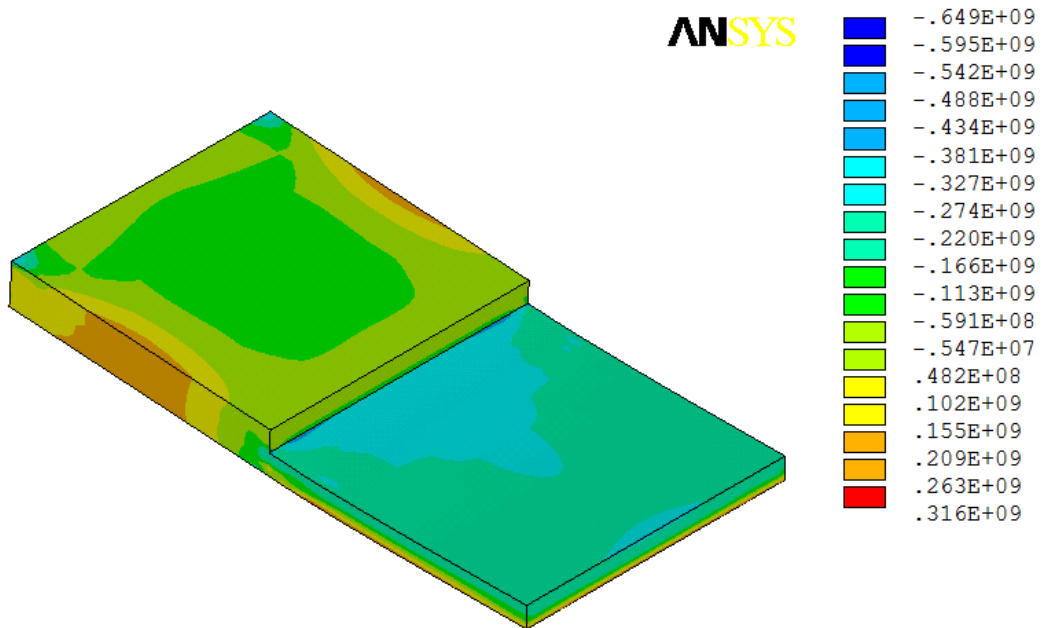
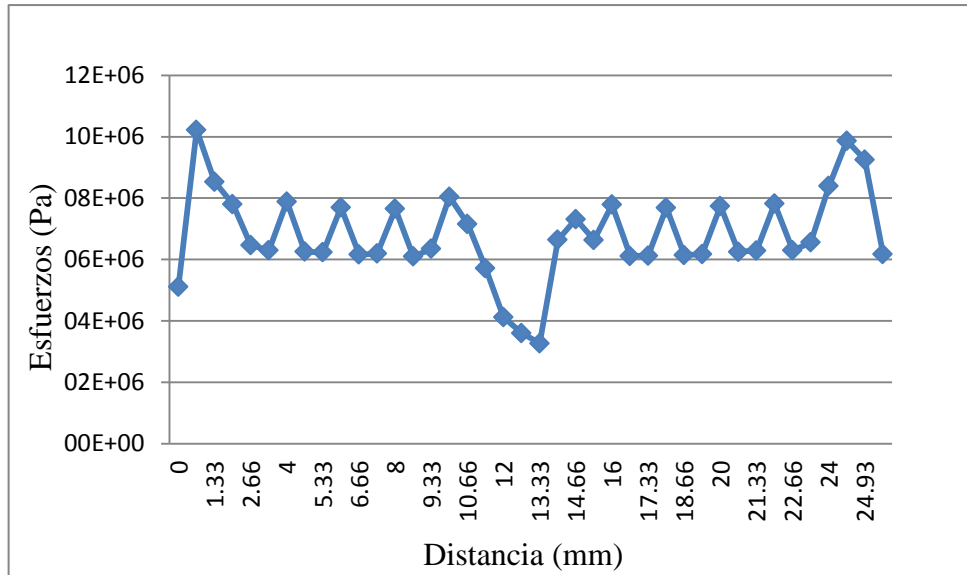


Figura IV.14.- Esfuerzos residuales transversales (Pa)

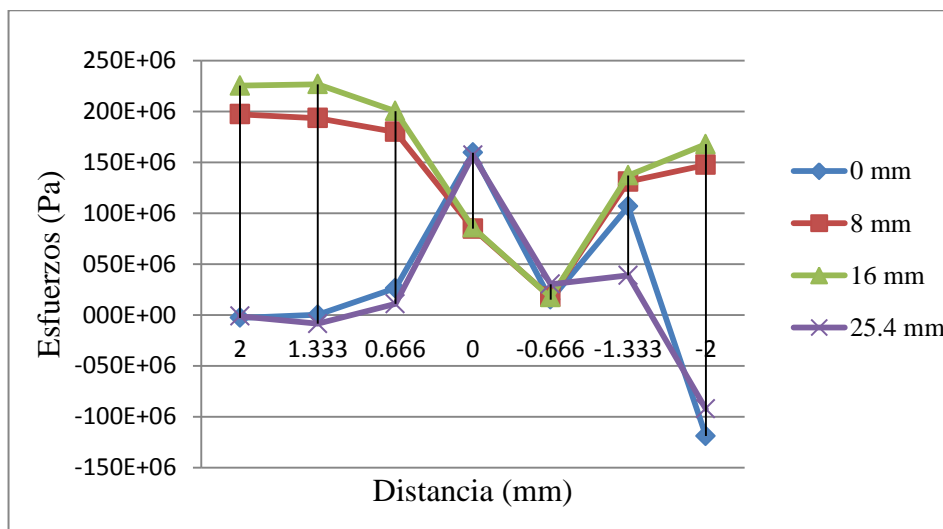




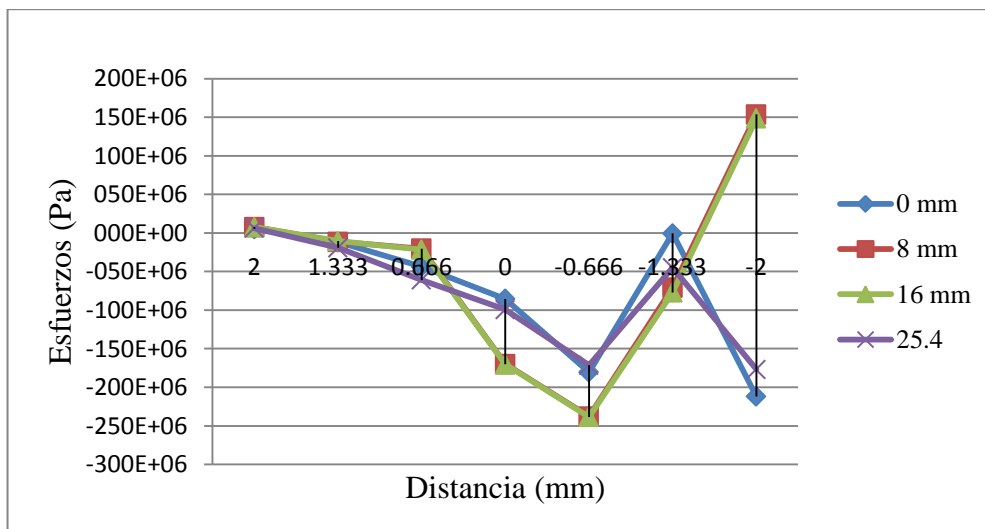
**Figura IV.15.-** Distribución de esfuerzos transversales

En la Figura IV.15 se observa las fluctuaciones de los esfuerzos transversales sobre los nodos establecido en la superficie de la placa de acero.

Como se observa en la Figura IV.16 y IV.17, los esfuerzos longitudinales y transversales son graficados para 4 distancias, 0, 8, 16 y 24.5 mm, tomando todos los nodos que se encuentran en dichas distancias.

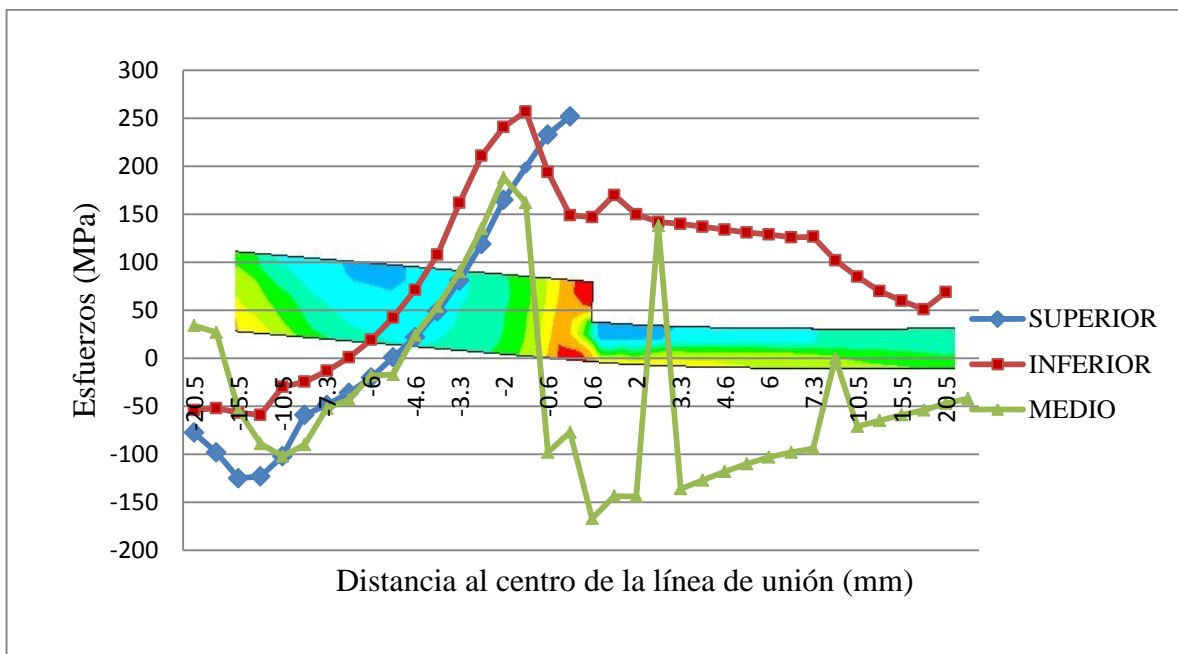


**Figura IV.16.-** Distribución de esfuerzos longitudinales apartir de la parte superior a inferior de las placas, sobre la línea de soldadura



**Figura IV.17.-** Distribución de esfuerzos transversales apartir de la parte superior a inferior de las placas, sobre la línea de soldadura

La Figura IV.18 muestras los esfuerzos longitudinales generados en la parte superior, media e inferior de las placas sobrepuestas sobre la línea de acción de la soldadura.



**Figura IV.18.-** Esfuerzos longitudinales a través de la línea del cordón de soldadura

Los esfuerzos hasta ahora vistos son esfuerzos transversales y longitudinales, en la Figura IV.19 y IV.20 se muestran los esfuerzos de Von Mises obtenidos en la parte superior, media e inferior de las placas, sobre la línea donde la soldadura realizo su recorrido.

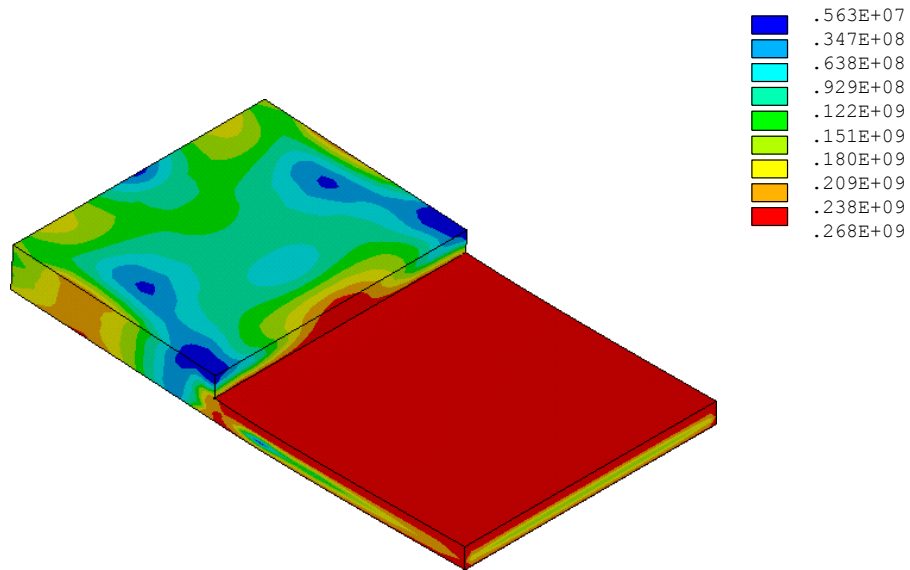


Figura IV.19.- Distribución de Esfuerzos de Von Mises (Pa)

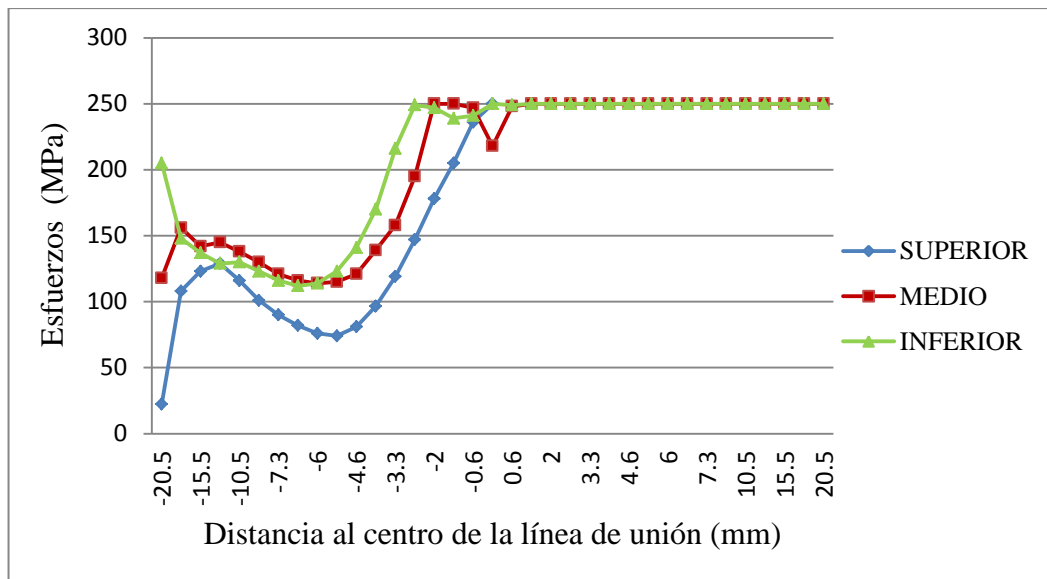


Figura IV.20.- Esfuerzos de Von Mises en los puntos superiores, medios e inferiores, a una distancia de 12.3 mm sobre la línea de acción.

#### IV.7.- Sumario

En este capítulo se describe la metodología usada para poder realizar el análisis acoplado entre un proceso térmico y un estructural, para determinar los esfuerzos que se generaran durante el proceso de soldeo. Un aspecto muy importante para realizar este tipo de acople fue que los elementos SOLID45 y SOLID70 posean el mismo número de nodos por cada elemento, aunque los grados de libertad en dichos elementos sean diferentes. Se tomaron en cuenta las propiedades termo dependientes del acero dulce, desde temperatura ambiente hasta el punto de fusión. Las condiciones de frontera en este análisis fueron las temperaturas nodales generadas en el análisis térmico transitorio y aplicadas como cargas térmicas en el análisis estructural, así como las restricciones sobre los ejes  $x$ ,  $y$  y  $z$  sobre las placas en las extremos de las mismas.

Solucionado el problema se graficaron los esfuerzos longitudinales, transversales y Von Mises en nodos de interés tras la aplicación de un flujo volumétrico sobre las placas, inducido por una fuente de energía.

#### Referencias

- 1.- Muratore, L. Borja., *Simulación Numérica del Proceso de Soldadura*, Universidad Politécnica de Catalunya, Tesis de maestría, pp 45, Julio 2011.
- 2.- Farag, S., and Nada, H., *Numerical Simulation of Residual Stress and Strain Behavior After Temperature Modification*, InTech, pp 217-220, 2012.
- 3.- Ramos-Gordillo V., *Análisis mediante Simulación del Efecto de las Reparaciones en las Tensiones Residuales de Soldeo*, Proyecto Fin de Carrera, Universidad Politécnica de Cartagena, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Naval y Oceánica, pp 14-15, Diciembre 2013.
- 4.- Djarot, B. D., *Residual stress analysis of pipeline girth Weld joints*, Thesis in Doctor of Philosophy, University of Wollongong, Mechanical Engineering Faculty of Engineering, pp 22-24, 2014.
- 5.- Ansys., *Structural Static Analysis*, Inrelease 12.0, 2009.

## Conclusiones

Hoy en día la resolución de problemas dentro del área ingenieril, requiere de herramientas que permitan la validez de los diseños ideados para satisfacer necesidades específicas, aunado a la reducción de costos y tiempos para los análisis del diseño final.

El Método de los Elementos Finitos (*MEF*) ha evolucionado hasta convertirse en la actualidad en una herramienta utilizada con mayor frecuencia en sistemas de cómputo. El implemento de esta formulación matemática en sistemas computacionales ha facilitado la simulación de sistemas simples o complejos que se someten a condiciones de carga y restricciones específicas, y poder predecir el comportamiento térmico, magnético, mecánico, etc., dando buenos resultados si se desarrolla una metodología adecuada para la simulación de algún proceso.

Este tema de investigación tuvo como objetivo el desarrollo de la simulación del proceso soldadura, para la determinación de los esfuerzos residuales. Los esfuerzos residuales se obtuvieron del acoplamiento de un análisis térmico a un estructural.

Los acoplamientos de dos ambientes diferentes simulados en APDL se realizan con éxito siempre y cuando la selección del elemento para cada caso posea el mismo número de nodos por cada elemento y estos a su vez se adapten a la geometría del elemento acoplado.

Los elementos utilizados en esta simulación fueron SOLID70 y SOLID45. Estos elementos son de bajo orden ya que poseen cuatro nodos por cada elemento, sin en cambio, han sido utilizados por varios autores de trabajos similares al desarrollado, dando buenos resultados. Existen elementos de alto orden que poseen 20 nodos por cada elemento que pueden ser utilizados, sin embargo por falta de recurso computacional no fue utilizado en esta simulación.

Las propiedades físicas y mecánicas termo-dependientes son de gran utilidad para desarrollar una simulación lo más cercana al comportamiento físico real, siempre y cuando estos datos sean tomados de fuentes confiables.

El análisis térmico- estructural realizado no es suficiente si no se realiza pruebas experimentales que garanticen la fiabilidad de la simulación, puesto que solo se desarrolló una metodología de simulación de soldadura descartando variantes en el fenómeno real.

Los esfuerzos residuales obtenidos en esta simulación son de tensión y compresión, observando que sobre la superficie de las placas la mayoría son de tensión, por lo que reduce la vida a la fatiga y la iniciación de grieta. Sin embargo con determinación de esfuerzos, se observa un panorama de la distribución de los mismo sobre las placas de acero dulce, y poder realizar las medidas necesarias, así como, de decidir si se debe implementar algún tratamiento para la disminución del campo de esfuerzos y evitar la falla durante su funcionamiento.

**Recomendaciones para trabajos futuros**

Las simulaciones numéricas has dado un gran paso para la solución de problemas difíciles de resolver por métodos tradicionales, sin embargo, la discretización utilizada en este trabajo fue la soportada por el sistema de cómputo disponible, por lo que se pretende realizar una discretización fina en sistemas de cómputo más dotados, para observar los cambios en los resultados y verificar la fiabilidad de estos.

En este trabajo se describe la metodóloga para un análisis térmico transitorio, acoplado a un estructural para la obtención de esfuerzos residuales, sin en cambio, los resultados obtenidos deben ser correlacionados con pruebas experimentales, las cuales se pretenden realizar más adelante.

Los parámetros definidos en esta simulación fueron establecidos con datos obtenidos de pruebas experimentales, pero se necesitan realizar más simulaciones variando la velocidad de desplazamiento de la fuente, tiempo de aplicación y flujo volumétrico para observar los cambios generados y compararlos con los datos experimentales obtenidos en posteriores trabajos.