ESTUDIO DEL FLUJO DE CALOR POR APLICACIÓN DE SOLDADURA PROCESO (GMAW) PARA LÁMINAS CALIBRE #11 ASTM A-36

MANUEL ORLANDO CARREÑO MARTINEZ

UNIVERSIDAD LIBRE DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESPECIALIZACIÓN DE SOLDADURA

BOGOTÁ

2018

ESTUDIO DEL FLUJO DE CALOR POR APLICACIÓN DE SOLDADURA PROCESO (GMAW) PARA LÁMINAS CALIBRE #11 ASTM A-36

MANUEL ORLANDO CARREÑO MARTINEZ

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE ESPECIALISTA EN SOLDADURA

INGENIERO JORGE ENRRIQUE ZAMBRANO PAYARES

UNIVERSIDAD LIBRE

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESPECIALIZACIÓN EN SOLDADURA

BOGOTÁ

2018

CONTENIDO

CONTENIDO 3

LISTA DE TABLAS 8

LISTA DE FIGURAS 9

LISTA DE GRÁFICAS 10

INTRODUCCIÓN 11

1. ANTECEDENTES 12

2. DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA 14

3. JUSTIFICACIÓN 15

4. OBJETIVOS 16

4.1 OBJETIVO GENERAL 16

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 16

5. MARCOS REFERENCIALES 17

5.1 MARCO TEÓRICO 17

5.1.1 Soldadura (MIG/MAG ó GMAW) 17

5.1.2 Flujo de calor en los procesos de soldadura 18

Figura 1: Conducción de calor a través de una pared 18

Figura 2: Representación esquemática del movimiento de la fuente de calor en una placa 20

Figura 3: Estado transitorio y cuasi-estacionario para un proceso de soldadura 20

Figura 4. Pérdidas presente en un proceso de soldadura por arco eléctrico 21

Figuras 5a y 5b. flujo de calor unidimensional y penetración total de la soldadura. 5b. ... 24

Penetración parcial de la soldadura. 24

Figura 6. Representación esquemática de la distribución de calor en placa delgada. Solución del modelo de placa delgada propuesto por Rosenthal [5 26

Figura 7. Representación de la distancia r en función de la velocidad de avance y tiempo. 27

5.1.4 Modelo de Cálculo por Elementos Finitos 28

Figura 8. Representación de la distancia r en función de la velocidad de avance y tiempo. 28

5.1.4.1 Criterios de convergencia.....29

Figura 9. Malla de elemento finito (mitad simétrica) para análisis numérico de la temperatura de campo en una placa plana durante la unión por soldadura (longitud de la soldadura IW)30

5.1.5 Enfoque Térmico de las simulaciones en Ansys® 30

5.1.5.1 Simulaciones témicas en Ansys®.....30

5.1.5.2 Estrategia de simulación en Ansys Multiphysiscs. 31

La figura 10. Secuencia detallada de la estrategia de simulación 32

figura 11. Curvas de carga vs tiempo 33

5.1.5.3 Construcción de modelo.....34

5.1.5.4 Aplicación de cargas para obtener la solución.....34

5.1.5.5 Definición del Tipo de análisis 34

5.1.5.6 Establecer las condiciones iniciales del análisis 35

5.1.5.7 Especificar la opción de Load Step o escalón de carga.....35

5.1.5.8 Definición de la estrategia tiempo-escalamiento Time-Stepping.....35

6. ALCANCE Y LIMITACIÓN 39

7. DESARROLLO METODOLÓGICO 40

7.1 Material Base 40

7.2 Clasificación Material Base 41

7.3 Espesor Material Base 41

7.4 Temperatura de Precalentamiento 42

7.4.1 Cálculo de carbón equivalente (CE) 43

7.4.2 Clasificación de la zona acero 43

Figura 12. Zona de clasificación de los aceros. 43

7.4.3 Cálculo por el método de control de hidrógeno 44

7.4.4 Clasificación susceptibilidad 44

7.4.5 Agrupación del índice de susceptibilidad 45

7.4.6 Cálculo de la Temperatura mínima de precalentamiento e Inter-pases. 46

7.5 Temperatura de inter-pases 46

7.6 Enfriamiento 47

7.7 PHWT, Tratamiento térmico post-soldadura. 47

7.8 Dimensión Junta, posición soldeo y simbología 47

Figura 13. Dimensión junta y símbolo de soldadura. 48

7.9 Selección del proceso GMAW 48

Figura 14. Esquema proceso GMAW 49

7.9.1 Transferencia por corto circuito [16] 49

7.10 Material de aporte 50

7.10.1 Clasificación Metal Aporte 51

7.10.2 Espesor Metal Aporte[18] 51

7.11 Gas de protección 52

7.12 Tipos de Amperajes [18] 53

7.13 Plan de Soldadura 54

8. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS 57

8.1. Equipos 57

Figura 15.Termometro digital de cuatro canales. 57

Figura 16.Termocupla tipo K 58

8.2 Fases de investigación 58

8.2.1 Geometría del modelo 58

Figura 17. Arreglo de termocuplas. 59

8.2.2 Metodología para el análisis térmico mediante ANSYS 60

Figura 18. Arreglo Mesh modelo. 61

Figura 19. Solución modelo 65

8.3 Ensayo experimental del modelo 66

Figura 20. Montaje de termocuplas. 66

9. RESULTADOS 69

9.1 Historial de temperaturas para la corrida experimental. 69

9.2 Historial de temperaturas para la corrida simulada. 71

10. CONCLUSIONES 76

11. RECOMENDACIONES 77

12. BIBLIOGRAFÍA 79

ANEXO A. Código de simulación ANSYS 82

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Eficiencias de arco de algunos procesos de soldadura 22

Tabla 2. Tipos de carga para los análisis térmicos ANSYS. 36

Tabla 3. Comandos para ejecutar los análisis térmicos en ANSYS. 37

Tabla 4. Composición química metales a soldar 40

Tabla 5. Clasificación material A-36 según código AWS D1.1 2015.....41

Tabla 6. Espesor material A-36 comercial.....42

Tabla 7. Índice de agrupamiento de susceptibilidad en función de H1 y Pcm 45

Tabla 8. Temperatura mínima de precalentamiento e inter-pases para tres niveles de restricción 46

Tabla 9. Requerimientos de composición química para alambres y Electrodos. 50

Tabla 10. Clasificación Metal de aporte.....51

Tabla 11. Corrientes GMAW-S.....52

Tabla 12. Corrientes, diámetro de electrodos, velocidad, flujo de gas, y voltajes proceso GMAW-S según espesores de lámina aceros al carbono. 53

Tabla 13. Rangos Corrientes Seleccionadas 53

Tabla 14. Plan de soldadura 54

Tabla 15. Propiedad termo-dependientes material A-36. 62

Tabla 16. Lectura de temperatura para seis tiempos en el experimento aplicando el proceso de soldadura GMAW sobre las probetas de láminas A-36. 67

Tabla 17. Resultados experimentales vs resultados del modelo por medio de la herramienta Ansys APDL.....70

Tabla 18. Comparación % de erro resultados experimentales vs resultados del modelo 75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Conducción de calor a través de una pared 20

Figura 2: Representación esquemática del movimiento de la fuente de calor en una placa 22

Figura 3: Estado transitorio y cuasi-estacionario para un proceso de soldadura 23

Figura 4. Pérdidas presente en un proceso de soldadura por arco eléctrico 23

Figuras 5a y 5b. flujo de calor unidimensional y penetración total de la soldadura. 5b. 26

Figura 6. Representación esquemática de la distribución de calor en placa delgada. Solución del modelo de placa delgada propuesto por Rosenthal [5].....28

Figura 7. Representación de la distancia r en función de la velocidad de avance y tiempo. 29

Figura 8. Representación de la distancia r en función de la velocidad de avance y tiempo. 31

Figura 9. Malla de elemento finito (mitad simétrica) para análisis numérico de la temperatura de campo en una placa plana durante la unión por soldadura (longitud de la soldadura IW) 32

La figura 10. Secuencia detallada de la estrategia de simulación 34

figura 11. Curvas de carga vs tiempo;|| 36

Figura 13. Zona de clasificación de los aceros. 47

Figura 14. Dimensión junta y símbolo de soldadura. 52

Figura 15. Esquema proceso GMAW. 53

Figura 16.Termometro digital de cuatro canales. 60

Figura 17.Termocupla tipo K 61

Figura 18. Arreglo de termocuplas. 62

Figura 19. Arreglo Mesh modelo. 63

Figura 20. Solución modelo.....66

Figura 21. Montaje de termocuplas. 67

Figura 22. Inicio de experimento 67

LISTA DE GRÁFICAS

Grafica 1. Historial de temperaturas T1. Hasta 985 seg. 69

Grafica 2. Historial de temperaturas T1. Hasta 1250 seg. Simulación.....71

Grafica 3. Comparación historial de temperaturas modelo computacional y experimento. De cero a 950 segundos.....72

Grafica 4. Comparación historial de temperaturas modelo computacional y experimento. De 0 a 100 segundos 74

.....74

Grafica 5. Comparación historial de temperaturas modelo computacional y experimento. De 0 a 100 segundos 74

INTRODUCCIÓN

Muchas de las necesidades con las que se encuentra el ingeniero encargado de diseñar los procedimientos de soldadura (WPS), se suplen recurriendo a la denominada ‘’ingeniería práctica’’ la cual se encuentra reunida en manuales y recomendaciones técnicas o reglamentos. En la actualidad, las industrias han desarrollado procesos para realizar uniones soldadas mediante la configuración ensayo y error, de experiencias previas llevadas a cabo a través de los años, gracias al conocimiento de los ingenieros.

Esta metodología general de la ingeniería ha logrado muy buenos resultados y aún se continúa realizando. Sin embargo, es importante resaltar que se trata de una metodología que presenta considerables limitaciones, en cuanto a las posibilidades de análisis, hecho que influye más si se consideran las crecientes necesidades tecnológicas y de innovación en los procesos industriales establecidos, y las exigencias del mercado.

Con el desarrollo computacional, se han estado correlacionando las herramientas de simulación y de modelado con respecto a los procesos de soldadura, transformando el concepto de diseño en ingeniería. Es por ello que de manera progresiva se han ido mejorando y renovando las técnicas computacionales mediante el uso de métodos numéricos, tales como los Métodos de Diferencias Finitas, Elementos de Contorno y Elementos finitos.

1. ANTECEDENTES

En los últimos años el método de elementos finitos (FEA) ha tomado protagonismo como herramienta computacional para predecir campos de temperatura, distorsiones de los materiales, tensiones residuales, en las tecnologías de fabricación, en las cuáles se encuentran incluidos los procesos de soldadura.

[1] H. Sanzi (1), G. Elvira(1), E. Asta(1) y M. Zalazar(2) (2007)

En este trabajo se presenta la distribución de temperaturas que se desarrolla durante un proceso de soldadura por arco eléctrico con protección gaseosa (GMAW), aplicado en la unión de chapas estructurales utilizadas en la fabricación de cañerías de uso en poliductos, a través del planteo de un modelo simplificado de elementos finitos utilizando sólidos tridimensionales.

En el análisis se considera que mientras se desarrolla el proceso de soldadura, no hay pérdidas de calor al medio ambiente, y que las transformaciones producidas en el material debido a los cambios de fase no producen modificaciones de sus propiedades, tanto para el material de aporte, como el de base.

Los resultados obtenidos de la modelización son comparados con resultados experimentales utilizando mediciones con termocuplas, realizadas durante la ejecución de la soldadura, considerando el tiempo de enfriamiento entre 800 °C y 500 °C (t) como parámetro de comparación.

---

[1]Simulación computacional del ciclo térmico de una soldadura bajo proceso gmaw en una placa estructural. comparación experimental utilizando termocuplas. H. Sanzi , G. Elvira, E. Asta y M. Zalazar

Este estudio permitirá conocer la sensibilidad y la validez del modelo propuesto, como así también determinar y ajustar los parámetros que intervienen y controlan el proceso de soldadura.

2. DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Los problemas por deformaciones en láminas de espesores delgado por falta de control en la entrada de calor, han generado pérdidas de material que conllevan a bajos rendimiento en los trabajos con soldadura en las diferentes industrias, de las cuales se requiere controlar variables específicas de cada proceso, tales como voltaje, amperaje, velocidad de avance...etc.; aumentando tanto complejidad como certidumbre.

Por lo general en los procedimientos de soldadura (WPS), se especifican rangos muy amplios en estas variables, generando alteraciones de fabricación en los productos, que se realicen con soldadura.

3. JUSTIFICACIÓN

Estudiar el flujo de calor mediante la evolución de temperaturas generadas durante el proceso de soldeo, es la mejor herramienta para la optimizar los diseños del procedimiento de soldadura (WPS). Siendo el pilar para los estudios de deformaciones y de tensiones residuales. El presente proyecto pretende diseñar una (WPS), y estudiar mediante el método de elementos finitos, el flujo de calor obtenido por la deposición del material durante el proceso de soldadura.

Los resultados de la simulación son comparados con los obtenidos experimentalmente, a través de la medición con termocuplas. Este estudio permitirá conocer la sensibilidad y la validez del modelo computacional propuesto, y optimizar el diseño de la (WPS) propuesta.

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar el flujo de calor, producto de la unión soldada de láminas delgadas calibre #11 ASTM, A-36. Mediante el análisis de la evolución térmica, generada en el proceso de soldadura por arco con gas de protección (GMAW).

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseño procedimiento de soldadura (WPS), para láminas de acero, A-36 calibre 11.

- Seleccionar un modelo matemático que permita determinar la distribución de calor en juntas soldadas por intermedio del software seleccionado, ANSYS Multiphysics ®.

- Obtener experimentalmente los cambios de temperatura en las juntas soldadas a través de un sistema de adquisición de datos por termopares.

- Analizar los valores obtenidos, entre el modelo computacional y los datos experimentales. Ajustar los valores iniciales en la WPS diseñada.

5. MARCOS REFERENCIALES

5.1 MARCO TEÓRICO

5.1.1 Soldadura (MIG/MAG ó GMAW)

Este procedimiento, conocido también como soldadura MIG/MAG, consiste en mantener un arco entre un electrodo de hilo sólido continuo y la pieza a soldar. Tanto el arco como el baño de soldadura se protegen mediante un gas que puede ser activo o inerte. El procedimiento es adecuado para unir la mayoría de materiales, disponiéndose de una amplia variedad de metales de aportación.

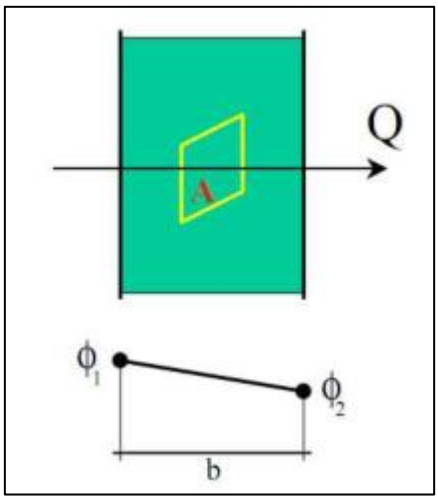
La soldadura MIG/MAG es intrínsecamente más productiva que la soldadura SMAW, donde se pierde productividad cada vez que se produce una parada para reponer el electrodo consumido. Las pérdidas materiales también se producen con la soldadura SMAW, cuando la parte última del electrodo es desechada. Por cada kilogramo de electrodo revestido comprado, alrededor del 65% forma parte del material depositado (el resto es desechado).
La utilización de hilos sólidos e hilos tubulares han aumentado esta eficiencia hasta el 80-95%.
La soldadura MIG/MAG es un proceso versátil, pudiendo depositar el metal a una gran velocidad y en todas las posiciones. El procedimiento es muy utilizado en espesores delgados y medios, en fabricaciones de acero y estructuras de aleaciones de aluminio, especialmente donde se requiere un gran porcentaje de trabajo manual. La introducción de hilos tubulares está encontrando cada vez más, su aplicación en los espesores fuertes que se dan en estructuras de acero pesadas.

5.1.2 Flujo de calor en los procesos de soldadura

La ley de Fourier establece que la cantidad de calor Q que fluye por unidad de tiempo través de un elemento de área A en una pared de espesor b, por diferencia de temperaturas entre los extremos de la pared φ1 y φ2 (φ1 >φ2) (Figura 1) es:

$$Q = \frac{k}{b} A(\Phi 1 - \Phi 2) \qquad (1.1)$$

Figura 1: Conducción de calor a través de una pared



Fuente: Simulación numérica del proceso de soldadura [2]

Donde k es la conductividad térmica que es una propiedad del material que se deduce de (1.1).

La cantidad de calor que atraviesa una unidad de superficie por unidad de tiempo se denomina flujo de calor. Su expresión es:

$$q = \frac{Q}{A} = \frac{k}{b}(\Phi 1 - \Phi 2) \qquad (1.2)$$

La forma lineal discreta de la ec. (1.4) no existe en procesos transitorios y en general el flujo de calor varía localmente y en el tiempo. En la práctica se acepta que la ec. Satisface en partes del cuerpo infinitesimales. Las expresiones diferenciales equivalentes de las ecs. (1.1) y (1.2) se escriben por

$$Q = -kA(\frac{d\Phi}{dn})$$

(1.3, 1.4)

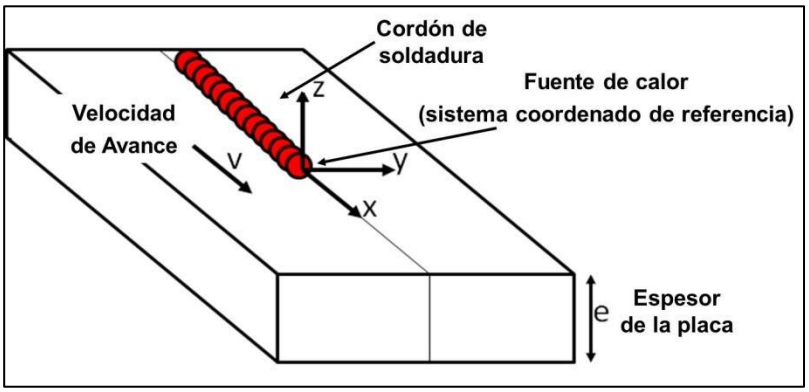
$$q = -k\frac{d\Phi}{dn}$$

Donde n es la línea normal al plano del elemento diferencial *dA* a través del cual fluye el calor. El signo menos en las ecuaciones anteriores indica que el calor fluye en la dirección de la disminución de temperatura, es decir, en la dirección negativa del gradiente de temperatura. $d\Phi/dn.$

La Figura 2. Representa esquemáticamente el movimiento de una fuente de calor de un proceso de soldadura (por ejemplo, proceso de soldadura al arco eléctrico)

La fuente de calor se mueve a lo largo de una placa bajo un sistema coordenado de referencia a una velocidad de avance constante v, (m/s), sobre una placa base de espesor e, (m).

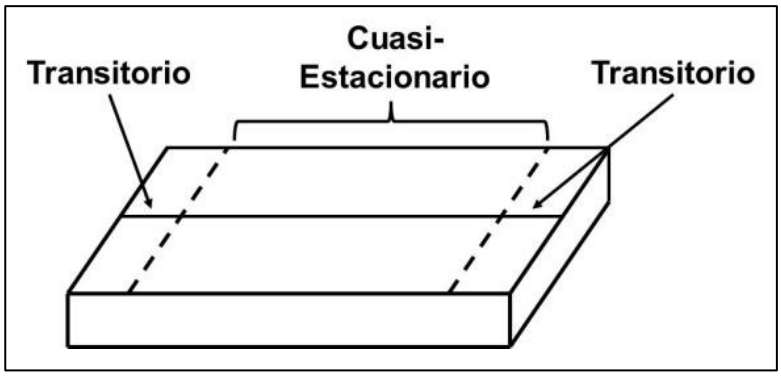
Figura 2: Representación esquemática del movimiento de la fuente de calor en una placa



Fuente: Desarrollo de un modelo teórico experimental para ciclos térmicos y perfiles de temperatura en juntas soldadas obtenidos por procesos de soldadura al arco eléctrico [3]

Del movimiento de la fuente de calor se establece un estado térmico transitorio que se presenta al iniciar y finalizar la fuente de calor. Para un punto cualquiera entre el inicio y culminación del cordón de soldadura se establece un equilibrio térmico con respecto al movimiento de la fuente de calor, estableciendo un estado cuasi-estacionario de la distribución de temperaturas alrededor del punto como se muestra en la Figura 3.

Figura 3: Estado transitorio y cuasi-estacionario para un proceso de soldadura

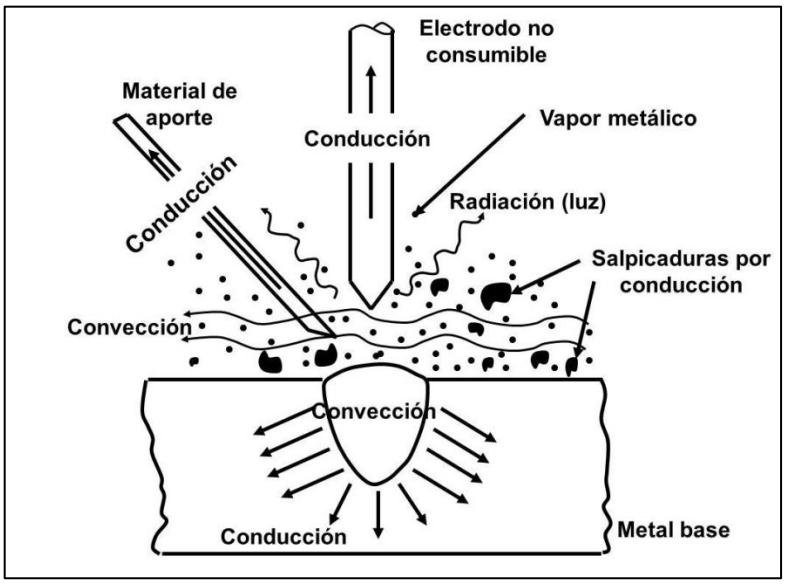


Fuente: Desarrollo de un modelo teórico experimental para ciclos térmicos y perfiles de temperatura en juntas soldadas obtenidos por procesos de soldadura al arco eléctrico [2]

5.1.3 Análisis del flujo de calor en los procesos de soldadura

Solo una porción de la entrada de calor es usada para generar el cordón de soldadura, la otra porción es la suma de perdidas entre la fuente de calor y el metal base. La Figura 4. Presenta de manera esquemática algunas perdidas presentes en el proceso de soldadura.

Figura 4. Pérdidas presente en un proceso de soldadura por arco eléctrico



Fuente: Desarrollo de un modelo teórico experimental para ciclos térmicos y perfiles de temperatura en juntas soldadas obtenidos por procesos de soldadura al arco eléctrico [2]

Al existir solo una porción de la entrada de calor total suministrada a la pieza de trabajo, se hace necesario determinar cuánto es ese calor. Algunos autores sugieren que, el calor suministrado Q está en función de la eficiencia del proceso η y una potencia nominal Qmax suministrada por la fuente.

$$Q = \eta * Q_{\max} \quad (W) \quad \text{(1.5a, b)}$$

$$Q_{\max} = Is*Va \quad (W)$$

Dónde:

$Is =$ Amperaje equipo de soldadura

$Va =$ Voltaje equipo de soldadura

Para los procesos de soldadura por arco, el Qmax es la potencia en función del voltaje de arco y la intensidad de arco. La eficiencia de algunos procesos de

Soldadura es representada en la Tabla 1.

Tabla 1. Eficiencias de arco de algunos procesos de soldadura

Proceso de soldadura		**Eficiencia de Arco, factor η**	
		Intervalo	Media
Soldadura SA		0,91 – 0,99	0,95
Soldadura SMAW		0,66 – 0,85	0,80
Soldadura GMAW	CO_2 - Acero	0,75 – 0,93	0,85
	Ar - Acero	0,66 – 0,70	0,70
Soldadura GTAW	Ar – acero	0,25 – 0,75	0,40
	He – Al	0,55 – 0,80	0,60
	Ar - Al	0,22 – 0,46	0,40

Fuente: Metallurgical modeling of welding, London, 1994. [3]

Este calor de entrada, genera una distribución de temperaturas sobre la pieza, la cual está gobernada por la ecuación de conducción de calor (1.6), que describe el comportamiento de la temperatura con respecto al tiempo, visto desde un plano de coordenadas cartesianas.

$$\frac{\partial \mathrm{T}}{\partial \mathrm{t}} = \frac{\lambda}{cp}\left(\frac{\partial^2 T}{\partial \mathrm{x}^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial \mathrm{y}^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial \mathrm{z}^2}\right) + \frac{1}{cp}\frac{\delta Q_{\cdot}}{\delta t} \qquad (1.6)$$

Dónde:

x= es la dirección en la que se mueve la fuente de calor (m)

y= es la dirección transversal a la fuente de calor (m)

z= es la dirección normal a la fuente de calor (m)

k(T)= es la conductividad térmica en función de la temperatura (J*m-1s-1C-1)

ρ= es la densidad del material base (Kg* m-3)

C= es el calor especifico del material base (W*m-3)

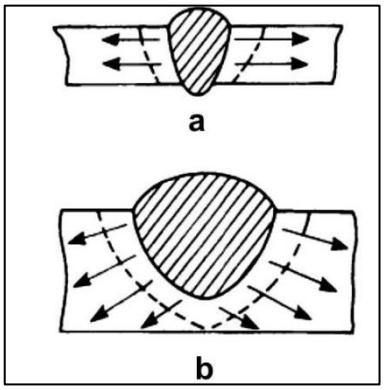
T= temperatura de la junta (°C)

Q= es el calor suministrado (W*m-3)

Si se desea resolver la ecuación de conducción de calor para una dimensión específica, puede considerarse placas delgadas donde se considera un flujo de calor unidimensional y existe una penetración total de la soldadura como se muestra en la Figura 5, permitiendo la solución de la ecuación 2 usando una o dos dimensiones. En el caso de placas gruesas donde el flujo de

calor es radial y existe una penetración parcial de la soldadura como se muestra en la Figura 5b, entonces la solución de la ecuación 3 estará asociada a 3 dimensiones.

Figuras 5a y 5b. Flujo de calor unidimensional y penetración total de la soldadura. 5b. Penetración parcial de la soldadura.



Fuente: Joining of materials and structures from pragmatic process to enabling technology [4]

La solución de la ecuación de distribución de calor se dificulta cuando las dimensiones del flujo de calor se aumentan y se considera la dependencia de las propiedades termo-fisicas del material en función de la temperatura. Por tal motivo, Rosenthal [5] presento dos posibles soluciones para la ecuación de distribución de calor, a traves de una serie de consideraciones:

Un estado cuasi-estacionario del flujo de calor (existe un balance entre la fuente de calor y todas las pérdidas).

Representación de la fuente de calor como un punto

Velocidad constante (v) de la fuente de calor, a lo largo del eje del cordón de soldadura del marco de referencia.

Las propiedades termo-físicas del material son independientes de la temperatura. la ecuación 1.7 presenta la solución de la distribución de temperaturas para una fuente de calor que se mueve con velocidad constante (v) a lo largo de una placa gruesa de longitud semi-infinita y comportamiento de flujo de calor radial, como se muestra en la Figura 6.

$$T - T_0 = q_0/\lambda 2p \left[1/r\right] \exp\left[- v/2a \left(r + w\right)\right] \qquad (1.7)$$

Dónde:

T0 = Temperatura inicial de la placa (°C)

q0 = Calor transferido de la fuente de calor al metal base (J*m-1)

λ = conductividad térmica del material (J* m-1)

v = velocidad de avance del proceso de soldadura (m*s-1)

α = difusividad térmica (m*s-1)

C = calor especifico del material (W*m-3)

ρ = densidad del material base (kg*m-3)

r = distancia radial desde el origen del sistema de coordenadas O, a un punto P.

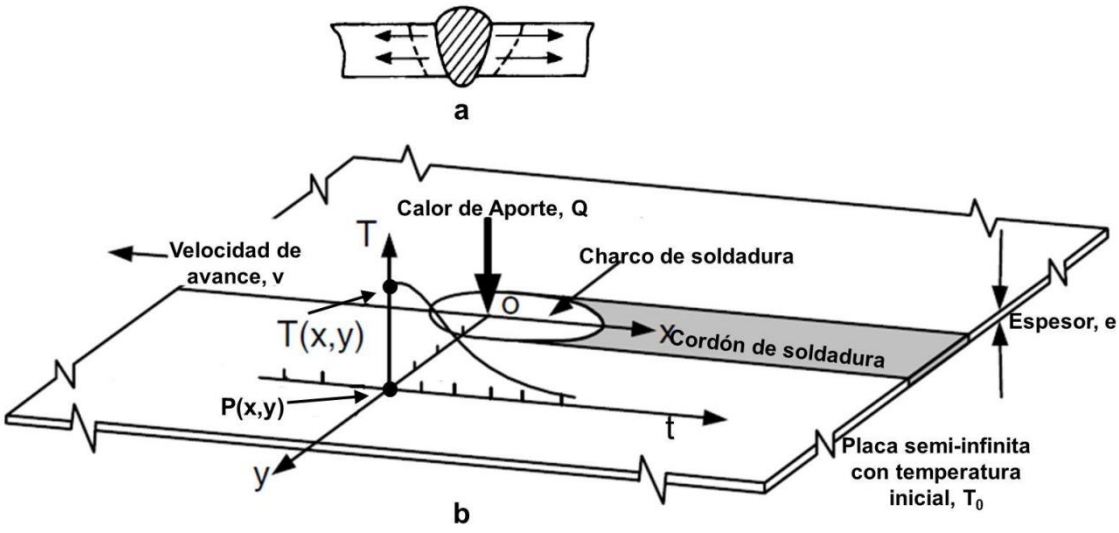
Esta dado por r = (W2+ Y2+ Z2)1/2

w = x – vt (m), donde x es un punto fijo en el metal base medido a lo largo de la soldadura, v es la velocidad de avance y t es el tiempo después que pasa la fuente de calor.

T = cambio de temperatura obtenida para un punto de análisis dado durante el movimiento de la fuente de calor, en una, dos o tres dimensiones. (°C)

Figura 6. Representación esquemática de la distribución de calor en placa delgada.

Solución del modelo de placa delgada propuesto por Rosenthal [5



Fuente: S. Kou, Welding Metallurgy [6]

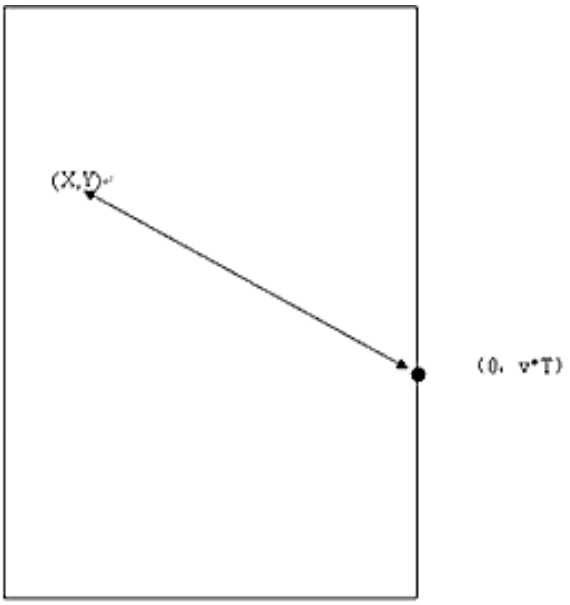
[2]La segunda generación de modelos de distribución de fuentes de calor son los modelos de funciones. Ahora estos modelos son los más usados debido a que tienen mejores precisiones con respecto a los modelos de primera generación y menor complejidad.

Fiedman [7] propuso aplicar el modelo de distribución de calor en la fuente Gaussiano en función de la distancia ***r*** al centro de la fuente de calor y que se expresa de la siguiente forma:

[2] Bai-Qiao Chen & Marzieh Hashemzadeh Numerical and experimental studies on temperature and distortion patterns in butt-welded plates [8]

$$q(r) = q_{max} exp\left(-\frac{3r^2}{R^2}\right) = \frac{3Q}{\pi R^2} exp\left(-\frac{3r^2}{R^2}\right) \qquad (1.8)$$

Figura 7. Representación de la distancia r en función de la velocidad de avance y tiempo.



Fuente: Autor.

$$r = (x - 0)^2 + (y - vt)^2 \qquad (1.9)$$

De acuerdo a la figura 7. La ecuación (1.10) se puede expresar de la siguiente manera:

$$q(r) = q_{max} exp\left(-\frac{3(x^2 + (y-vt)^2)}{R^2}\right) \qquad (1.10)$$

Dónde:

x= es la dirección en la que se mueve la fuente de calor (m)

y= es la dirección transversal a la fuente de calor (m)

v= es la velocidad de avance.

t = es el tiempo después que pasa la fuente de calor.

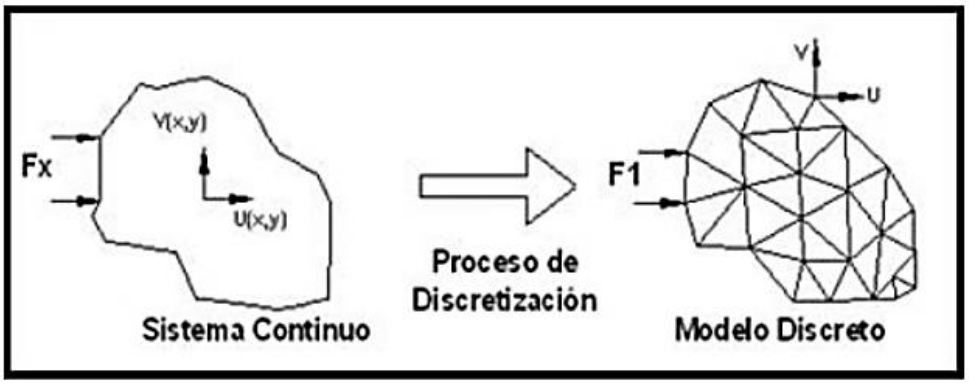
5.1.4 Modelo de Cálculo por Elementos Finitos

[3]Los modelos MEF se presentan como un procedimiento general de discretización de problemas continuos que están expresados por modelos matemáticos bien definidos, es decir en métodos de solución de sistemas de ecuaciones diferenciales que describen procesos en medios continuos.

Este método hace uso de la "discretización" o subdivisión de una región sobre la cual están definidas las ecuaciones en formas geométricas simples. Las propiedades del material y las relaciones gobernantes en estos elementos se expresan en función de los valores desconocidos (desplazamientos) en las "esquinas" de los elementos o nodos ver figura 8, [8].

Figura 8. Representación de la distancia r en función de la velocidad de avance y tiempo.

[3] Hennart, Jean-Pierre. Introducción al Método de los Elementos Finitos para la solución numérica de ecuaciones diferenciales [8]



Fuente: Proceso de análisis de un problema físico mediante Elementos Finitos [8]

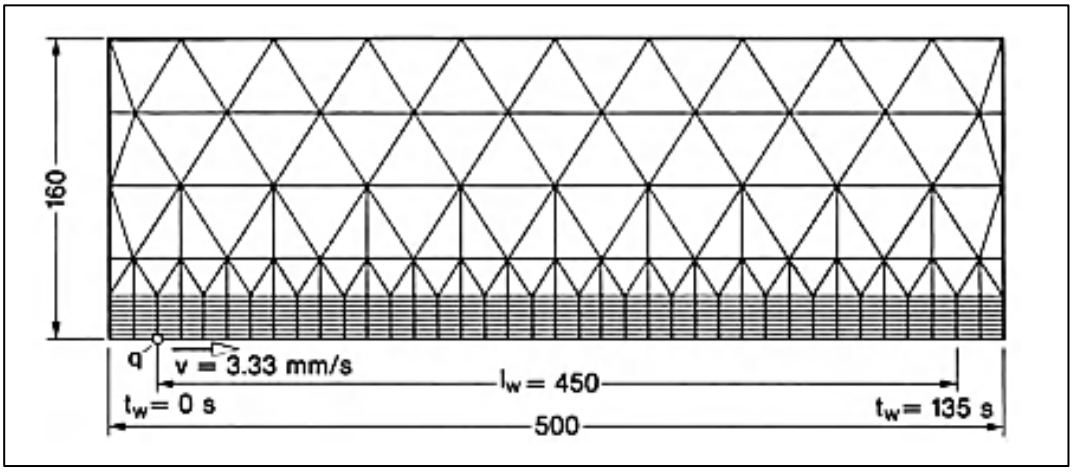
Un cuerpo sólido que va a ser analizado mediante MEF es dividido en pequeñas regiones, por ejemplo, triangulares, rectangulares, cuadriláteros, etc., denominados Elementos Finitos. Estos elementos se conectan entre sí a través de puntos, generalmente situados en los vértices de los elementos y son denominados nodos. Al conjunto de elementos con sus nodos se denomina Malla de los Elementos Finitos. Esta malla, más todos los datos que describen el problema, se conoce como Modelo de Cálculo por Elementos Finitos [8].

5.1.4.1 Criterios de convergencia

Cuando se realice un modelo, se debe recurrir al análisis de la convergencia para seleccionar el tamaño correcto de los elementos en el mallado y de este modo obtener el mínimo de error en los resultados. La convergencia define que al refinar progresivamente la malla, la solución numérica se aproxima, tanto como se desee, a la solución exacta; este es un factor que debe garantizar, que los resultados del cálculo no dependan de la densidad del mallado.

Las características de las mallas requeridas para modelar por elementos finitos para procesos de soldadura; muy fina en el área de soldadura y más basta en el resto del componentes. Diferentes soluciones existen para dar el grado de enmallado a las corazas. (Ver figura 9)

Figura 9. Malla de elemento finito (mitad simétrica) para análisis numérico de la temperatura de campo en una placa plana durante la unión por soldadura (longitud de la soldadura IW)



Fuente: Dr.-Ing. Hábil, Dieter, Rada, Heat Effects of Welding Temperature Field Residual Stress Distortion [9]

5.1.5 Enfoque Térmico de las simulaciones en Ansys®

5.1.5.1 Simulaciones témicas en Ansys®

La ecuación básica para el análisis térmico en ANSYS es la ecuación de equilibrio de calor, obtenida del principio de conservación de la energía. La solución por elementos finitos que se

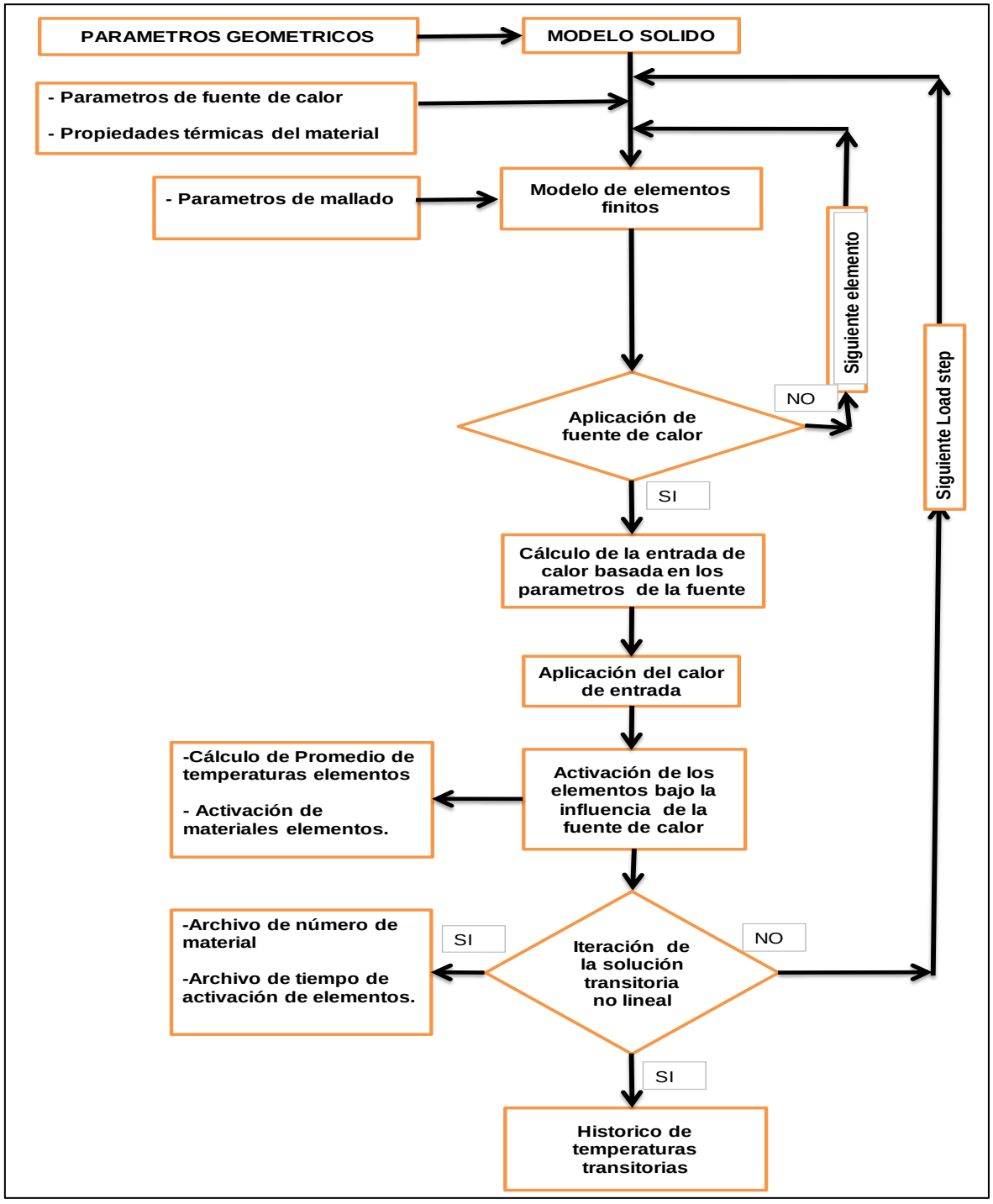
obtiene por medio del software ANSYS, calcula las temperaturas nodales, posteriormente utiliza las temperaturas nodales para obtener otras cantidades térmicas. ANSYS soporta los tres modos primarios de trasferencia de calor: Conducción, convección, y radiación.

5.1.5.2 Estrategia de simulación en Ansys Multiphysiscs.

El modelamiento de una fuente de calor en movimiento en ANSYS es un proceso típicamente transitorio. La fuente de calor móvil es modelada por los códigos de lenguaje paramétrico de diseño (ADPL) en sus siglas en inglés, para que constantemente se mueva a cada pequeño incremento del tiempo. Durante el movimiento de la fuente de calor, la energía calórica se mantiene constante, pero la ubicación del centro de la fuente de calor cambia de tiempo en tiempo. Una vez el modelo de elementos finitos es establecido, la fuente de calor seleccionada puede ser aplicada en el modelo como se discutió anteriormente en 5.1.3. El principio se basa en que los parámetros de la función que representa la locación de la fuente de calor Ec. (1.10) cambian con respecto al tiempo. Todas las otras superficies externas del modelo del elemento finito están sujetas a la convección, mientras los elementos dentro de la geometría de la fuente de calor, están sujetos al flujo de calor.

Un bucle de tiempo (time loop) en sus siglas en inglés, se usa en el cálculo, lo que significa que el resultado obtenido en el tiempo presente es usado como la condición inicial del siguiente paso-tiempo (time-step). El intervalo de tiempo para cada paso-tiempo puede ser estimado como la longitud del plato en la dirección de la soldadura dividido por la velocidad de soldeo.
Para el análisis del comportamiento térmico, un análisis transitorio no lineal es llevado a cabo. Es decir la distribución de la temperatura nodal, se lleva a cabo por medio de un análisis geométrico interactivo.

La figura 10. Secuencia detallada de la estrategia de simulación



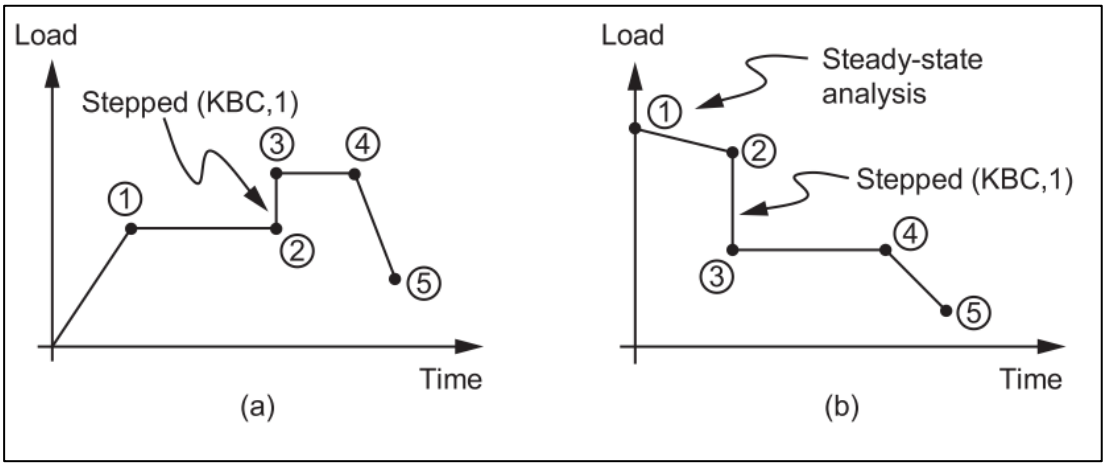
Fuente: Expert System for Optimization of Welding Process of Thin Walled HSLA Steel Structures [11]

La figura 10. Muestra la secuencia detallada de la estrategia de simulación requerida para el presente trabajo. En el inicio, la temperatura nodal es igual a la ambiente. Las restricciones nodales son removidas en el momento en el que los elementos son secuencialmente afectados por la fuente de calor. La fuente de calor se supone que esté al menos una vez en cada elemento a lo largo de la línea de soldadura, para obtener mejores resultados computacionales. La ecuación 1.11 da el tiempo apropiado de cada ‘’*Step*’’ usado en el análisis para cumplir con la tarea.

$$\boldsymbol{Load\ Step} = \left(\frac{Tiempo\ toatal\ de\ Soldeo\ (seg)}{No.de\ elementos\ circumferenciales\ a\ lo\ largo\ del\ cordon\ de\ soladadura}\right) \qquad (1.11)$$

Un análisis térmico transitorio, sigue las mismas formulas y los mismos procedimientos que un análisis térmico de estado estacionario. La principal diferencia es que las cargas aplicadas en un análisis transitorio están en función del tiempo. Para poder especificar las cargas en función del tiempo, primero se debe dividir la curva carga-vs-tiempo en pasos. Cada ‘’esquina’’ de la curva carga-tiempo puede ser el escalón de carga. Como se ilustra en las siguientes figuras.

figura 11. Curvas de carga vs tiempo



Fuente: ANSYS Thermal guide. Release 12.0 [12]

Para cada escalón de carga ‘’load step’’ se requiere especificar ambos valores de cargas y valores de tiempo.

5.1.5.3 Construcción de modelo

El procedimiento para construir el modelo, se inicia especificando el nombre del trabajo y el título para el análisis.

- Definir el tipo de Elemento
- Si es necesario definir las constantes reales del elemento
- Definir las propiedades del material
- Definir la geometría del modelo.
- Aplicar el enmallado al modelo

5.1.5.4 Aplicación de cargas para obtener la solución

En un análisis transitorio, el primer paso es aplicar las cargas transitorias las cuales definen el tipo de análisis y establecen las condiciones iniciales para el análisis.

5.1.5.5 Definición del Tipo de análisis

Para especificar el tipo de análisis, se debe hacer lo siguiente:

Seleccionar

Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis>Transient

5.1.5.6 Establecer las condiciones iniciales del análisis

Para establecer las condiciones iniciales, se debe necesitar obtener una solución de estado-estable, o simplemente especificar una temperatura inicial uniforme en todos los nodos.

Seleccionar

Menu>Preprocessor>Define Loads>Settings>Uniform Temp

5.1.5.7 Especificar la opción de Load Step o escalón de carga

Para análisis térmicos, se pueden especificar opciones generales, opciones no lineales, y los controles de salida.

5.1.5.8 Definición de la estrategia tiempo-escalamiento Time-Stepping

Los problemas transitorios se pueden analizar tanto por la definición de múltiples escalones de carga (para condiciones de frontera stepped o ramped) o mediante el uso de un solo escalón de carga y la tabulación de las condiciones de frontera (para condiciones de variación arbitraria) con un parámetro de arreglos que definen los puntos de tiempo.

Para usar el método de escalón de carga, se debe seguir los siguientes pasos:

Especificar el tiempo al final de *Load Step* usando uno de los siguientes métodos:

Command(s): TIME

Menu>Preprocessor>Loads>Load Step Opts>Time/Frequenc>Time-Time Step

Especificar cuando las Cargas *Loads* son en escalón o en rampla.

Command(s): KBC

Menu>Preprocessor>Loads>Load Step Opts>Time/Frequenc>Time-Time Step

Especificar los valores de carga al final del paso de carga (*Load Step),* para esto se cuenta con varios comandos o por medio de la ruta del menú. Descritos en la tabla 2.: Tipos de carga para los análisis térmicos. Y tabla 3. Comandos de carga para los análisis térmicos.

Tabla 2. Tipos de carga para los análisis térmicos ANSYS.

Tipo de Carga	**Categoría**	**Familia Cmd**	**Ruta del menú**
Temperatura (TEMP, TBOT,TE2,TE3,…TTOP)	Constantes	**D**	**Main menú>solution>Define Loads>Apply>Thermal>Temperature**
Rata de flujo de calor (HEAT, HBOT, HE2, HE3,..HTOP)	Fuerzas	**F**	**Main menú>solution>Define Loads>Apply>Heat Flow**
Convección (CONV) Flujo de calor (HFLUX)	Cargas de Superficie	**SF**	**Main menú>solution>Define Loads>Apply>Convection**

			Main menú>solution>Define Loads>Apply>Heat Flux
Generación de calor	Cargas al cuerpo	**BF**	**Main menú>solution>Define Loads>Apply>Heat Generat**

Fuente: ANSYS Thermal guide. Release 12.0 [12]

Tabla 3. Comandos para ejecutar los análisis térmicos en ANSYS.

Tipo de Carga	**Sólido o Modelo FE**	**Entidad**	**Ejecutar**
Temperatura	Modelo sólido	Keypoints	**DK**
‘’	Elemento Finito	Nodos	**D**
Rata Flujo de calor	Modelo sólido	Keypoints	**FK**
‘’	Elemento finito	Nodos	**F**
Convección Flujo de calor	Modelo sólido	Línea	**SFL**
‘’	Modelo sólido	Áreas	**SFA**
‘’	Elemento finito	Nodos	**SF**
‘’	Elemento finito	Elementos	**SFE**
Rata generación de calor	Modelo Sólido	Keypoints	**BFK**
‘’	Modelo sólido	Línea	**BFL**
‘’	Modelo sólido	Áreas	**BFA**
‘’	Modelo sólido	Volúmenes	**BFV**

‘’	Elemento finito	Nodos	**BF**
‘’	Elemento finito	Elementos	**BFE**

Fuente: ANSYS Thermal guide. Release 12.0 [12]

6. ALCANCE Y LIMITACIÓN

El diseño de la (WPS) se realizará bajo las especificaciones del código Structural Welding Code AWS D1.1 2010, para juntas a tope, en metales ASTM A-36 para un espesor de 3 mm.

No se considera dentro del modelo realizado lo siguiente:

El calentamiento no uniforme y la variación del volumen del metal debido a la dilatación por temperatura, así como las transformaciones de fase o estructurales que conducen al surgimiento de las deformaciones de tipo elásticas y plásticas.
El resultado de las deformaciones plásticas, las cuales permanecen en el material

El proceso se va a analizar de forma transitoria y no lineal, ya que el mismo depende del tiempo y de la variación de las propiedades del material con respecto a la temperatura.

7. DESARROLLO METODOLÓGICO

7.1 Material Base

Acero A-36

Es un acero diseñado para diferentes aplicaciones dentro de la industria, su uso más común es en aplicaciones estructurales, se da una descripción de las características en la siguiente tabla.

Tabla 4. Composición química metales a soldar

COMPOSICIÓN QUÍMICA % METALES A SOLDAR						
	C, máx	Si máx	Mn	P máx	S máx	Cu mín
MATERIAL 1 A-36	0.26	0.4	…	0,04	0,05	0.8
MATERIAL 2 A-36	0.26	0.4	…	0,04	0,05	0,8
REQUISITOS DE TENSIÓN						
MATERIAL 1 y 2 A-36	Resistencia la tracción, Ksi [MPa]	50-80 [400-550]	Límite Elástico, mín. Ksi [MPa]	36 [250]		

Fuente: ASTM: A36/A36M-14 Standard Specification for Carbon Structural Steel[14]

7.2 Clasificación Material Base

A partir de la tabla 3.1 (Approved base metal for prequalified) del código AWS D1.1 2015, se clasifica el material A-36 en el grupo 1, y de la tabla 3.3 (Prequalified Minimum Preheat and Interpass Temperature), se clasifica dentro de la categoría A y B, para este estudio se clasifica en B porque el proceso de soldadura es GMAW. Como estas clasificación obedece a WPS's precalificadas, se requiere cumpla con todos los requerimientos aplicables de la sección 3 del código AWS D1.1-2015. Las WPS's que no estén conforme a los requerimientos de la sección 3 deben ser calificadas en conformidad con la sección 4 del código AWS D1.1-2015.

Tabla 5. Clasificación material A-36 según código AWS D1.1 2015

CLASIFICACIÓN MATERIAL A-36 SEGÚN AWS D1.1					
Grupo	1	Categoría	B	Clasificación UNS	k02595

Fuente: AWS D1.1/D1.1M:2015 An American National Standard [13]

7.3 Espesor Material Base

Este espesor es aplicable a una gran variedad de perfiles estructurales laminados en caliente y a placas de la misma calidad que están disponibles en el Mercado.

Tabla 6. Espesor material A-36 comercial

ESPESOR PIEZAS A SOLDAR					
Calibre	11	Espesor (mm)	3.04	Espesor (in)	0.1196

Fuente: http://www.mejorconacero.com/tabla-de-calibres/ [15]

7.4 Temperatura de Precalentamiento

La metodología para determinar la temperatura de precalentamiento, se hará por medio del método de dureza o de control de hidrogeno. Según la guía H.5, apéndice H (Guideline on Alternative Methods for Determining Preheat) del código D.1.1, la cual se debe seguir los siguientes pasos:

Cálculo de carbón equivalente (CE)

Clasificación de la zona según el tipo de acero

Cálculo por el método de control de hidrógeno (Pcm)

Clasificación susceptibilidad por hidrogeno (H1)

Agrupación del índice de susceptibilidad

Cálculo de la Temperatura mínima de precalentamiento e Inter-pases.

7.4.1 Cálculo de carbón equivalente (CE)

Se calcula el carbón equivalente (CE) de la siguiente manera:

$$\mathrm{CE} = \mathrm{C} + \frac{(\mathrm{Mn+Si})}{6} + \frac{(\mathrm{Cr+Mo+V})}{5} + \frac{(\mathrm{Ni+Cu})}{15} \quad (1.12)$$

$$\mathrm{CE} = 0.26 + \frac{(0.4)}{6} + \frac{(0)}{5} + \frac{(0.8)}{15}$$

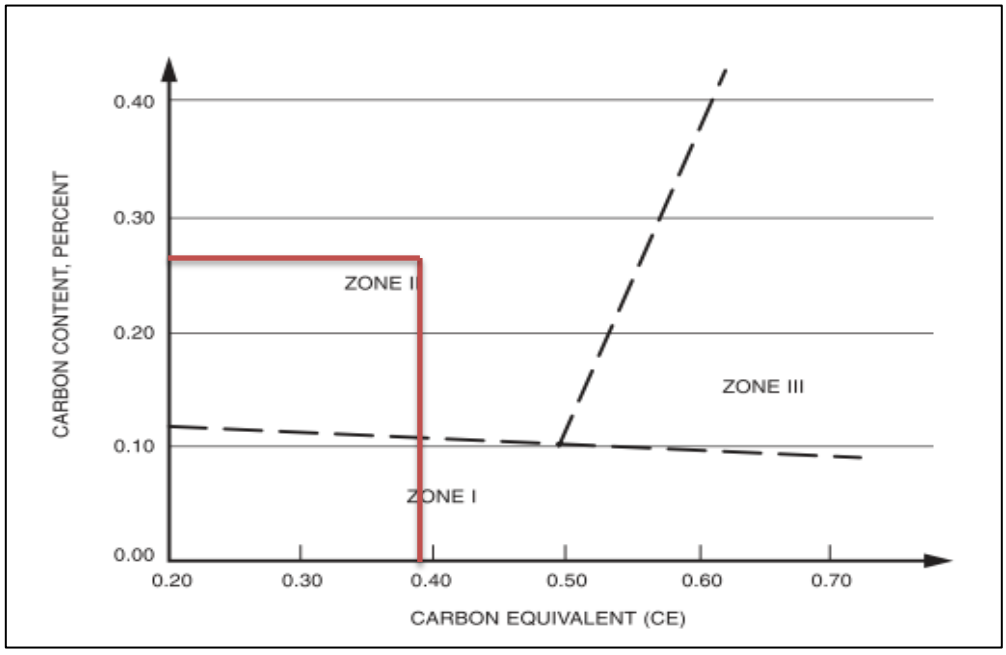
$$\mathrm{CE} = 0.38$$

7.4.2 Clasificación de la zona acero

Se localiza la posición del acero en la figura H.1 del código, figura 12.

Con el valor de (CE) en eje x, y sobre el eje el contenido de carbono del material se obtiene una clasificación para el acero A36 en la zona 2.

Figura 12. Zona de clasificación de los aceros.



Fuente: AWS D1.1/D1.1M:2015 an American National Standard [13]

La clasificación del acero en la zona 2 recomienda usar el método de control de hidrógeno para determinar el precalentamiento. Para juntas a tope y con bajos contenidos de carbono, según el código AWS D1.1,

7.4.3 Cálculo por el método de control de hidrógeno

El valor del parámetro de composición, Pcm, debe ser calculado de acuerdo a la ecuación 1.13 del código AWS D1.1 anexo H1.

$$P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \qquad (1.13)$$

$$P_{cm} = 0.26 + \frac{0.4}{30} + \frac{0}{20} + \frac{0.8}{20} + \frac{0}{60} + \frac{0}{20} + \frac{0}{15} + \frac{0}{10} + 0$$

Pcm = 0.273

De acuerdo a éste valor aplica para susceptibilidades menores de 0,28 según tabla 7. Índice de agrupamiento de susceptibilidad en función de H1 y Pcm

7.4.4 Clasificación susceptibilidad

De acuerdo a lo especificado en el parágrafo H6.2.2 del anexo H del código AWS D1.1, los alambres solidos usados en el proceso (GMAW), y por ser de extra-bajo hidrógeno.

Se clasifica como susceptibilidad tipo H1

7.4.5 Agrupación del índice de susceptibilidad

A partir de la tabla 7. (código D1.1 Anexo H.), se selecciona el índice de agrupación, teniendo en cuenta las variables de nivel de Hidrógeno (H1), y el parámetro de composición (Pcm = 0.28). Se agrupa el índice de susceptibilidad como tipo C.

Tabla 7. Índice de agrupamiento de susceptibilidad en función de H1 y Pcm

Table H.1
Susceptibility Index Grouping as Function of Hydrogen Level "H" and Composition Parameter P_{cm} (see H6.2.3)

Hydrogen Level, H	Susceptibility Index[b] Grouping[c] Carbon Equivalent = P^a_{cm}				
	< 0.18	< 0.23	< 0.28	< 0.33	< 0.38
H1	A	B	C	D	E
H2	B	C	D	E	F
H3	C	D	E	F	G

Fuente: AWS D1.1/D1.1M:2015 an American National Standard [13]

7.4.6 Cálculo de la Temperatura mínima de precalentamiento e Inter-pases.

A partir de la tabla 8. (H.2 código D1.1 Anexo H.), se selecciona la temperatura mínima de precalentamiento e inter-pases. Teniendo un nivel de restricción bajo, en vista que la junta a tope a realizar, existe una razonable libertad de movimiento de los miembros, Y con el índice de susceptibilidad (C) se obtiene la temperatura de precalentamiento mínima y de inter-pases.

Temperatura mínima de 20 °C. de precalentamiento e inter-pases.

Tabla 8. Temperatura mínima de precalentamiento e inter-pases para tres niveles de restricción

Table H.2 (Continued)
Minimum Preheat and Interpass Temperatures for Three Levels of Restraint (see H6.2.4)

Restraint Level	Thickness[a] mm	Minimum Preheat and Interpass Temperature (°C)[b] Susceptibility Index Grouping A	B	C	D	E	F	G
Low	< 10	< 20	< 20	< 20	< 20	60	140	150
	10–20 incl.	< 20	< 20	20	60	100	140	150
	> 20–38 incl.	< 20	< 20	20	80	110	140	150
	> 38–75 incl.	20	20	40	95	120	140	150
	> 75	20	20	40	95	120	140	150
Medium	< 10	< 20	< 20	< 20	< 20	70	140	160
	10–20 incl.	< 20	< 20	20	80	115	145	160
	> 20–38 incl.	20	20	75	110	140	150	160
	> 38–75 incl.	20	80	110	130	150	150	160
	> 75	95	120	140	150	160	160	160
High	< 10	< 20	< 20	20	40	110	150	160
	10–20 incl.	< 20	20	65	105	140	160	160
	> 20–38 incl.	20	85	115	140	150	160	160
	> 38–75 incl.	115	130	150	150	160	160	160
	> 75	115	130	150	150	160	160	160

Fuente: AWS D1.1/D1.1M:2015 an American National Standard [13]

7.5 Temperatura de inter-pases

A partir de la tabla 8. (H.2 código D1.1 Anexo H.), se selecciona la temperatura mínima de precalentamiento e inter-pases a 20°C. Y se delimita hasta un máximo 150°C

7.**6 Enfriamiento**

La temperatura de enfriamiento que se requiere, es la ambiente.

Debido a que ya se determinó la temperatura de precalentamiento e inter-pases mínimo a 20°C, se tiene un colchón térmico que ayuda que se mantenga el enfriamiento a 100° C, y se evite el agrietamiento en frío.

7.7 PHWT, Tratamiento térmico post-soldadura.

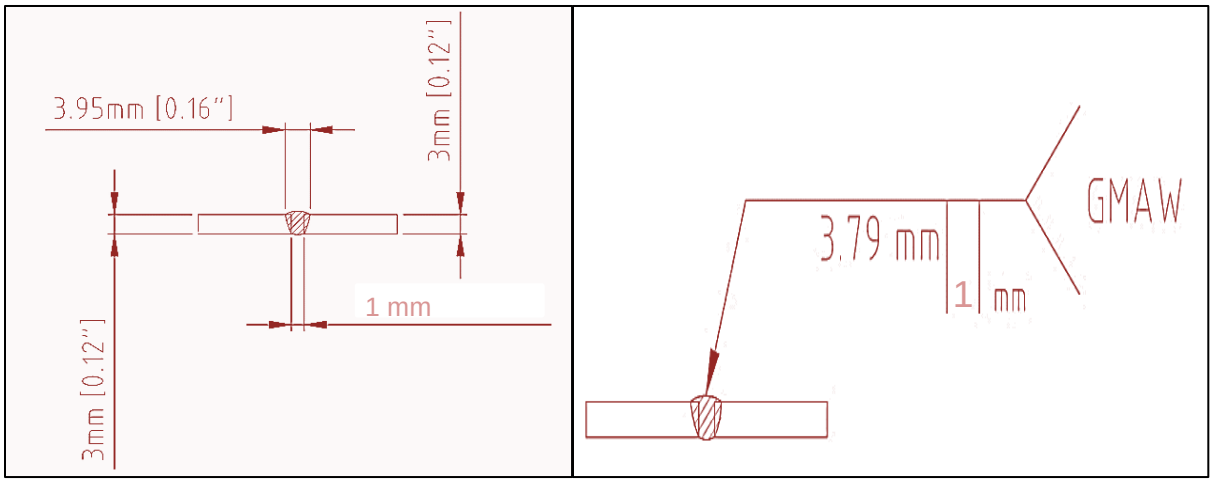
Para este espesor de material, no se requiere alivio de esfuerzos, ya que no existen restricciones según tabla 8. El nivel de restricción es bajo. Y la combinación de espesor-temperatura debe ser más alta.

PHWT= No aplica.

7.8 Dimensión Junta, posición soldeo y simbología

La posición de soldeo es plana, y el avance en la posición vertical debe ser en descendente, para una menor entrada de calor.

Figura 13. Dimensión junta y símbolo de soldadura.

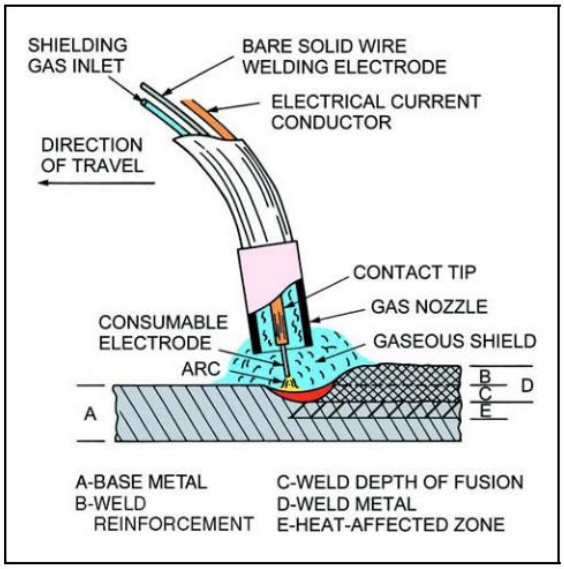


Fuente: Autor

7.9 Selección del proceso GMAW

La soldadura por gas es un método versátil, y hace que este proceso particularmente se ajusta muy bien a aplicaciones automatizadas y de alta producción. Además el método de transferencia por corto circuito es de amplio interés, ya que es la opción más recomendada para la unión de secciones transversales delgadas.

Figura 14. Esquema proceso GMAW



Fuente: AWS Welding Handbook, Ninth Edition Volume 2 [16]

7.9.1 Transferencia por corto circuito [16]

Se selecciona la transferencia por corto circuito debido a que este tipo de transferencia produce, un pequeño y rápido enfriamiento charco de soldadura que es generalmente adecuado para secciones de espesores delgados, en todas las posiciones, y para un largo número de aperturas de raíz. El metal es transferido desde el electrodo hasta la pieza de metal únicamente durante el periodo en que el electrodo entra en contacto con el charco del metal soldado.

7.10 Material de aporte

De acuerdo al anexo A de la especificación para electrodos y alambres de soldadura con gas de protección (GMAW) para aceros al carbono AWS A5.18/A5.18M:2005, en el parágrafo A.7 Propósito, descripción y uso de electrodos y alambres.

Se considera el alambre que mejor se adapta, el ER70S-6, debido a que estos electrodos son adecuados tanto para un solo pase de soldadura, como para varios pases de soldadura. Y son especialmente adecuados para aplicaciones de chapa metálica, y de láminas delgadas que tienen moderadas cantidades de impurezas, herrumbres y porosidades del material.

Se utilizará para los pases de raíz, relleno y presentación.

Tabla 9. Requerimientos de composición química para alambres y Electrodos.

COMPOSICIÓN QUÍMICA % METAL DE APORTE										
	C	Si	Mn	P máx	S máx	Cu máx	Ni máx	Cr máx	Mo máx	V máx
ERS70S-6	0.06 a 0.15	0.80 a 1.15	1.40 a 1.85	0.025	0.15	0.50	0.15	0.15	0.15	0.03
REQUISITOS DE TENSIÓN (SOLDADO)										
MATERIAL 1 y 2 A-36 ERS70S-6 Gas CO_2	Resistencia la tracción mín, Ksi [MPa]		70 [480]		Límite Elástico, mín. Ksi [MPa]		58 [400]			

Fuente: AWS A5.18/A5.18M:2005 an American National Standard [16]

7.10.1 Clasificación Metal Aporte

Tabla 10. Clasificación Metal de aporte

CLASIFICACIÓN SEGÚN AWS				**NÚMERO UNS**
A5.18	ER70S-6	A5.18M	ER48S-6	K11140

Fuente: AWS A5.18/A5.18M:2005 an American National Standard [16]

7.10.2 Espesor Metal Aporte[18]

El modo de transferencia de metales por cortocircuito, es el modo de transferencia de metal para GMAW con más baja entrada de calor. Toda la transferencia de metales ocurre cuando el electrodo está cortocircuitado eléctricamente (en contacto) con el material base o el charco fundido.

Este modo de transferencia de metal suele ser con electrodos de 0.025 "- 0.045" (0.6 - 1.1 mm) de diámetro protegidos con gases 100% de CO2, o una mezcla de 75-80% de argón, más 25-20% de CO2.

Por el factor de entrada de calor se selecciona un diámetro de electro de: 0.030 In (0.8 mm).

7.11 Gas de protección

Se selecciona 100% dióxido de carbono ($C0_2$), por lo siguiente:

El Dióxido de carbono puro no es un gas inerte, debido a que el calor del arco descompone el CO2 en monóxido de carbono y oxígeno libre. Este oxígeno se combina con los elementos de transferencia a través del arco para formar óxidos que se liberan desde el charco de soldadura en forma de escoria. Aunque el CO2 es un gas activo y produce un efecto oxidante, las soldaduras pueden ser consistentes y fáciles de lograr que estén libres de porosidad y defectos. El dióxido de carbono es ampliamente utilizado para la soldadura de aceros al carbono. Su popularidad se debe a la alta deposición y calidad en el rendimiento del material soldado, así como su bajo costo y fácil instalación.

El flujo de gas es de 30 cfh ver tabla 12.

7.12 Tipo de corriente y Fuente

Tabla 11. Corrientes GMAW-S

TIPO DE CORRIENTE		
Raíz	Relleno Presentación	Fuente
DCEP	DCEP	Voltaje constante VC (Inversores)

Fuente: Autor

7.12 Tipos de Amperajes [18]

A partir de la guía para corrientes para aceros de bajo carbono de Lincoln Electric.

Se seleccionan los intervalos de corrientes respectivos para el pase de raíz, de aproximadamente de 1 mm de espesor, y el segundo pase para 2mm de espesor.

Tabla 12. Corrientes, diámetro de electrodos, velocidad, flujo de gas, y voltajes proceso GMAW-S según espesores de lámina aceros al carbono.

Welding Guidelines for Carbon and Low Alloy Steel

Welding Guidelines for Carbon and Low Alloy Steel
Short-Circuiting Transfer — Horizontal Fillets and Flat Butt Joints

CTWD(1) : 1/2" (13mm)
Gas: 100% CO_2
Gas flow: 25 to 35 cfh
(12 to 17 L/min.)

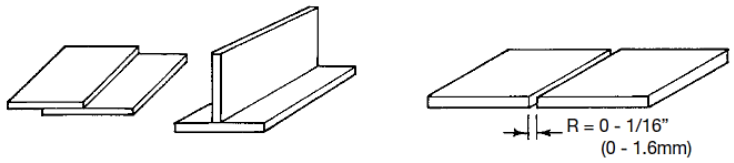


Plate Thickness - (mm)	24 ga (0.6)		20 ga (0.9)		16 ga (1.5)		14 ga (2)		12 ga (3)		10 ga (4)			3/16" (5)	1/4" (6)
Electrode Dia. - in. (mm)	0.025 (0.6)	0.030 (0.8)	0.030 (0.8)	0.035 (0.9)	0.030 (0.8)	0.035 (0.9)	0.030 (0.8)	0.035 (0.9)	0.030 (0.8)	0.035 (0.9)	0.030 (0.8)	0.035 (0.9)	0.045 (1.1)	0.045 (1.1)	0.045 (1.1)
WFS - in./min (M/min.)	100 (2.5)	75 (1.9)	125 (3.2)	100 (2.5)	175 (4.4)	150 (3.8)	225 (5.7)	175 (4.4)	275 (7.0)	225 (5.7)	300 (7.6)	250 (6.4)	125 (3.2)	150 (3.8)	200 (5.0)
Amps (Approximate)	35	35	55	80	80	120	100	130	115	160	130	175	145	165	200
Travel Speed - in./min (M/min.)	10 (0.25)	10 (0.25)	14 (0.35)	13 (0.33)	13 (0.33)	20 (0.50)	18 (0.45)	18 (0.45)	20 (0.50)	20 (0.50)	17 (0.43)	20 (0.50)	18 (0.45)	15 (0.38)	13 (0.33)
Voltage (2) (DC+)	17	17	18	18	19	19	20	20	21	21	22	22	18-20	19-21	20-22

Fuente: Lincoln Electric, Gas Metal Arc Welding Guide Product and Procedure Selection [18]

Tabla 13. Rangos Corrientes Seleccionadas

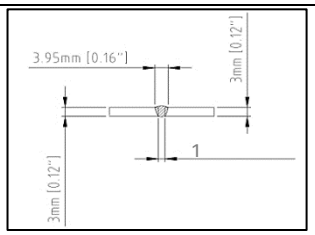
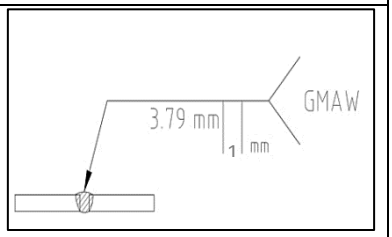
RANGOS DE CORRIENTE (AMPS)	
Raíz	Relleno Presentación
45-65	90-110

Fuente: Autor

7.13 Plan de Soldadura

Tabla 14. Plan de soldadura

	MATERIAL BASE							
Junta	**Material 1**	**Material 2**	**Grupo Material 1**	**Grupo Material 2**	**Categoría Material 1**	**Categoría Material 2**	**Espesor(mm) Material 1**	**Espesor(mm) Material 2**
1	A-36	A-36	1	1	B	B	3.04	3.04

	VARIABLES TÉRMICAS				DIMENSIÓN JUNTA Y SÍMBOLO SOLDADURA	
Junta	**Precalentamiento °C**	**Inter pases °C**	**Enfriamiento °C**	**PHWT**		
1	20-150	20	Temp. Amb	N/a	**POSICIÓN SOLDADURA**: PLANA	

	PROCESO		MARERIAL APORTE		TIPOS DE CORRIENTE		AMPERAJE (AMPS)		TIPO DE FUENTE
Junta	**Raíz**	**Relleno Presentación**	**Raíz**	**Relleno Presentación**	**Raíz**	**Relleno Presentación**	**Raíz**	**Relleno Presentación**	**Fuente INVERSOR**
1	GMAW	GMAW	ER70S-6	ER70S-6	DCEP	DCEP	45-65	90-110	VOLTAJE CONSTANTE
	TIPO DE TRANSFERENCIA		**GAS DE PROTECCIÓN**		**VELOCIDAD ALIMENTACIÓN ALAMBRE [m/min]**		**RATA FLUJO GAS**		
Junta	**Raíz**	**Relleno Presentación**	**Raíz**	**Relleno Presentación**	**Raíz**	**Relleno Presentación**	**Raíz**	**Relleno Presentación**	
1	CORTO CIRCUITO	CORTO CIRCUITO	100% CO2	100% CO2	0,35	0,45	30 CFH	30 CFH	

7.14 WPS Diseñada

A partir del plan de soldadura obtenido anteriormente se procede a diligenciar el formato de WPS, de acuerdo al formato estándar sugerido por AWS D1.1 - 2

Sample WPS Form (GMAW & FCAW)
WELDING PROCEDURE SPECIFICATION (WPS)

Ciclomontaña Carreño	001	1	01/Abril/17
Company Name	WPS No.	Rev. No.	Date
Manuel Carreño		01/04/17	
Authorized by	Supporting PQR(s)	Date	CVN Report

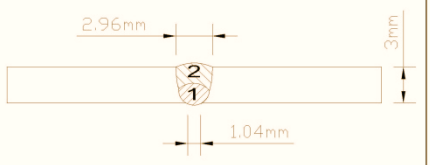
BASE METALS	Specification	Type or Grade	AWS Group No.
Base Material	ASTM-A36	---	1 Categoría B
Welded To	ASTM-A36	---	1 Categoría B
Backing Material	---	---	---
Other ---			

BASE METAL THICKNESS	As-Welded	With PWHT
CJP Groove Welds	3 a 6 mm	---
CJP Groove w/CVN	---	---
PJP Groove Welds	---	---
Fillet Welds	---	---
DIAMETER	---	---

JOINT DETAILS	
Groove Type	Junta a Tope de Ranura Cuadrada
Groove Angle	---
Root Opening	1 mm
Root Face	3 mm
Backgouging	No aplica
Method	---

POSTWELD HEAT TREATMENT	
Temperature	No aplica
Time at Temperature	---
Other	---

JOINT DETAILS (Sketch)



PROCEDURE								
Weld Layer(s)	1	2						
Weld Pass(es)	1	1						
Process	GMAW-S	GMAW-S						
Type *(Semiautomatic, Mechanized, etc.)*	Semiautomático	Semiautomático						
Position	Todas	Todas						
Vertical Progression	Descendente	Descendente						
Filler Metal (AWS Spec.)	AWS 5.18	AWS 5.18						
AWS Classification	ER70S-6	ER70S-6						
Diameter	0.8 mm	0.8 mm						
Manufacturer/Trade Name	Lincoln SuperArc L56	Lincoln SuperArc L56						
Shielding Gas (Composition)	100%CO2	100%CO2						
Flow Rate	30 CFH	30 CFH						
Nozzle Size	Estándar	Estándar						
Preheat Temperature	20°-150°C	20°-150°C						
Interpass Temperature	20°C	20°C						
Electrical Characteristics	—	—	—	—	—	—	—	—
Current Type & Polarity	DECP	DECP						
Transfer Mode	Corto Circuito	Corto Circuito						
Power Source Type (*cc, cv, etc.*)	VC	VC						
Amps	45-65	90-110						
Volts	17-20	20-22						
Wire Feed Speed	3.2 m/seg	5.7 m/seg						
Travel Speed	0.35 m/min	0.45 m/min						
Maximum Heat Input	No aplica	No aplica						
Technique	—	—	—	—	—	—	—	—
Stringer or Weave	A lo largo	A lo largo						
Multi or Single Pass (per side)	Si	Si						
Oscillation (*Mechanized/Automatic*)	No aplica	No aplica						
Traverse Length	No palica	No aplica						
Traverse Speed	No aplica	No aplica						
Dwell Time	No aplica	No aplica						
Number of Electrodes	1	1						
Contact Tube to Work Distance	10-12 mm	10-12 mm						
Peening	No aplica	No aplica						
Interpass Cleaning	Cepillo Grata	Cepillo Grata						
Other	---	---						

8. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS

8.1. Equipos

Termómetro tipo K Digital sensor de termopar -200 ~ 1372 ° C, tiene 4 canales para toma de temperaturas diferentes y viene con sus 4 termocuplas tipo K.

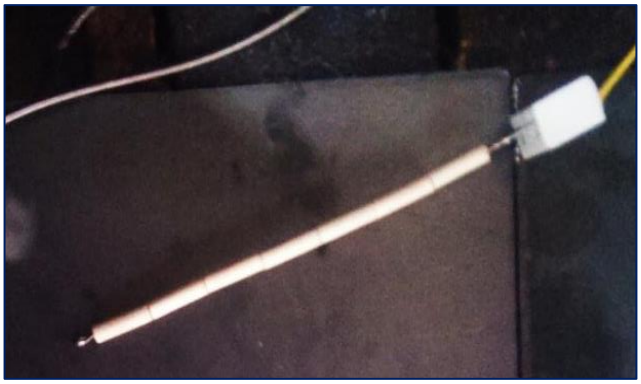
Figura 15.Termometro digital de cuatro canales.

Fuente: Autor

Se usaran termopares tipo k Níquel-Cromo (+) Níquel –Aluminio (-), el cual tiene un intervalo de medidas entre -200 – 1370 °C según fabricante. Los cables que constituyen al termopar son de calibre 24 y se encuentran aislados de manera individual y cuentan con un aislante exterior que permite cubrirlos a ambos de condiciones externas, tales como campos electromagnéticos.

El aislante exterior es de fibra de vidrio flexible para que pueda ser manipulado con total libertad. La presentación real de un termopar

Figura 16.Termocupla tipo K



Fuente: Autor

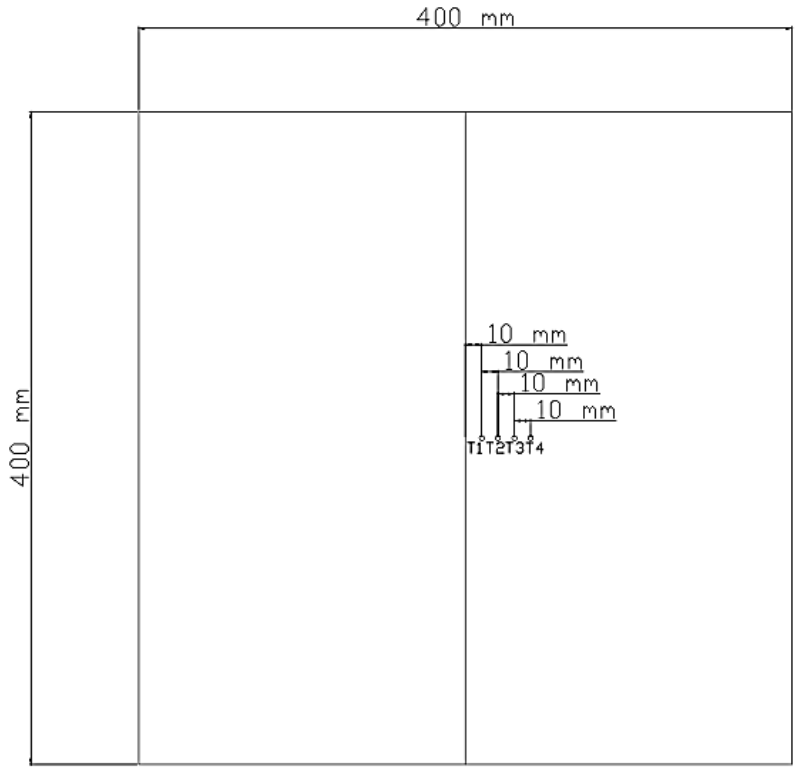
8.2 Fases de investigación

8.2.1 Geometría del modelo

Con la simulación se pretende valorar la precisión del método propuesto de deposición de material acoplando el análisis termodinámico para predecir la evolución de la temperatura, a la siguiente geometría:

El diseño experimental que se propone para el análisis es el que se muestra en la Figura 16 y 17, consistente en una placa de base rectangular de 400 mm de largo, 200 mm de ancho y 3 mm de espesor. El material utilizado es el descrito anteriormente. Se ubican 4 puntos de medición separados en 10 mm al cordón de soldadura.

Figura 17. Arreglo de termocuplas.



Fuente: Autor

Selección de materiales, equipos de soldadura, sistema de medición de temperaturas para obtención experimental de ciclos térmicos.

8.2.2 Metodología para el análisis térmico mediante ANSYS

Preparación del análisis Típicamente, un análisis térmico en estado estacionario incluye varios pasos para la creación del sistema de análisis:

• Definir datos de ingeniería

• Adjuntar Geometría

• Definir el comportamiento de la pieza

• Aplicar controles de malla / malla de pre-visualización

• Establecer ajustes de análisis y definir condiciones iniciales

• Etapa de solución (Aplicar cargas y soportes Resuelve)

• Revisar los resultados Etapa de pre-procesamiento:

8.2.2.1 Definir datos de ingeniería

Se elige un tipo de elemento, que posea la temperatura como grado de libertad. En el presente trabajo se emplea el elemento SOLID70 un elemento sólido de ocho nodos (ANSYS Inc. 2016), y PLANE 55

```
SET,L,4E-1      (largo de platina 0.4m)
*SET,W,2E-1     (Ancho de platina 0.2m)
*SET,H,3E-3     (Espesor de platina 0.003m)
*SET,U,20       (Voltaje  experimento 20 Voltios )
*SET,I,50       (Corriente  experimento 50 Amperios)
*SET,V,0.01     (Velocidad avance en 0.01 m/seg)
*SET,YITA,0.7    (Factor de eficiencia proceso GMAW)
*SET,R,0.007     (Radio del arco de soldadura de 7 mm)
*SET,Q,U*I*YITA   (Formula de entrada de calor)
*SET,Qm,3/3.1415/R**2*Q (Q máximo ver formula 1.18)
```

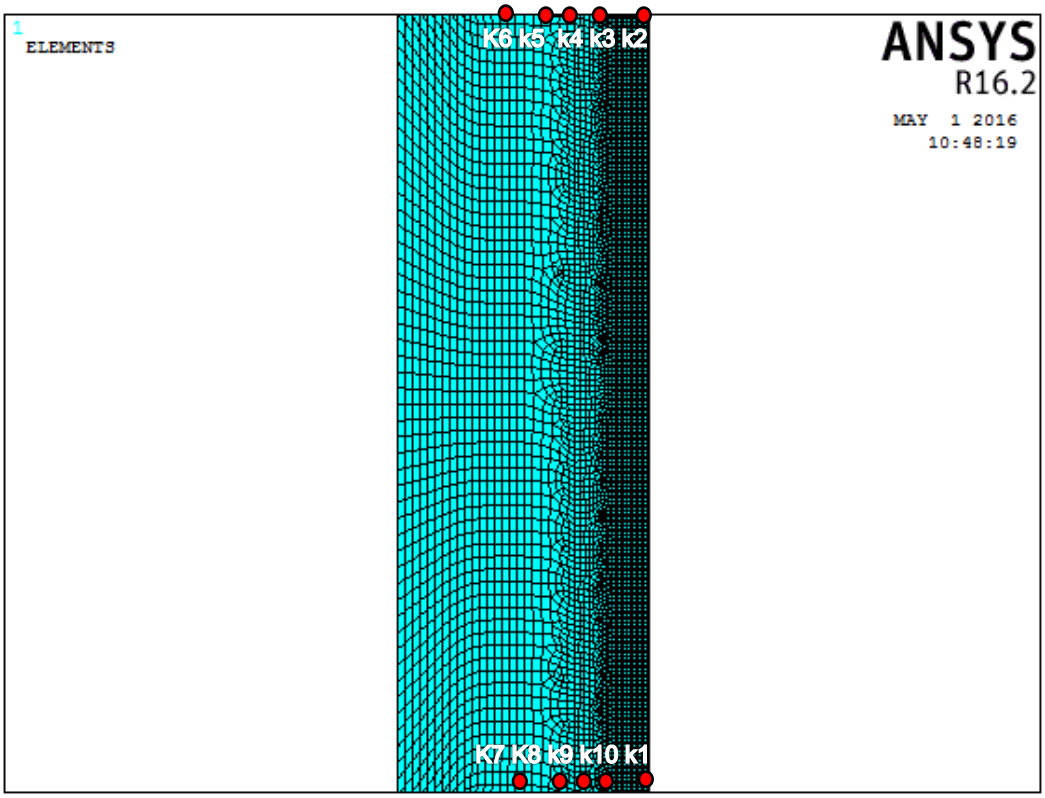
8.2.2.2 Establecer Geometría

Se define un modelo tridimensional de placa plana utilizando elementos sólidos cuyas dimensiones, se establecieron en la figura 16 y 17. Para el modelo se simulará media lámina de 200mm x 400 mm se declaran las coordenadas para generar dentro de ella el mallado. De la siguiente forma:

```
K,1,0,0,0    (coordenada K1 = punto inicial  extremo derecho superior
figura 18)
K,2,0,L,0    (coordenada K2 = extremo derecho inferior  figura 18)

K,3,-W/2*0.15,L,0 (coordenada K3 = 0.15 veces el ancho de la lámina
extremo inferior  figura 18
K,4,-W/2*0.3,L,0
K,5,-W/2*0.5,L,0
K,6,-W/2,L,0
K,7,-W/2,0,0
K,8,-W/2*0.5,0,0
K,9,-W/2*0.3,0,0
K,10,-W/2*0.15,0,0
K,11,0,0,H
```

Figura 18. Arreglo Mesh modelo.



Fuente: Autor

8.2.2.3 Definir el comportamiento de la pieza

Se declaran como propiedades termo-dependientes del material, la conductividad térmica, el calor específico y la densidad, introduciendo el valor de la propiedad que corresponde a cada valor de temperatura, entre la temperatura ambiente y la de fusión del metal. Con la función `MPTEMP,` a los distintos rangos de la tabla 15.

```
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPTEMP,2,100
MPTEMP,3,200


MPDATA,KXX,1,,60 (conductividad térmica W/m°c)
MPDATA,KXX,1,,50
MPDATA,KXX,1,,45
```

Tabla 15. Propiedad termo-dependientes material A-36.

Temperatura (°C)	**Calor específico (J/Kg°c)**	**Conductividad (W/m°c)**	**Densidad (kgm^{-3})**	**Esfuerzo elástico (MPa)**	**Coeficiente de Expansión térmica (10-5/°c)**	**Módulo de Young's (GPa)**	**Radio de Poisson's**
0	480	60	7880	380	1,15	210	0,3
100	500	50	7880	340	1,2	200	0,3
200	520	45	7800	315	1,3	200	0,3
400	650	38	7760	230	1,42	170	0,3
600	750	30	7600	110	1,45	80	0,3
800	1000	25	7520	30	1,45	35	0,3

1000	1200	26	7390	25	1,45	20	0,3
1200	1400	28	7300	20	1,45	15	0,3
1400	1600	37	7250	18	1,45	10	0,3
1550	1700	37	7180	15	1,45	10	0,3

Fuente: Deepak M.Badgujar, S.P.Shekhawat, Finite Element Analysis for Residual Stress, Strain and Temperature Characteristics of Butt Welded Steel Plate[10]

8.2.2.4 Aplicar controles de malla / malla de pre visualización

- Se construye el modelo geométrico tridimensional. Se malla el volumen, teniendo en cuenta refinar la malla en el lugar cercano a la soldadura, por ser ésta la zona donde se producen los mayores gradientes térmicos. En las zonas definidas para el mallado.

- `ESIZE,0.0012 (zona cerca al cordón de soldadura tamaño de elemento 1.2 mm)`
- `AMESH,1`
- `ESIZE,0.0025 (segunda zona cerca al cordón de soldadura tamaño de elemento 2.5 mm)`
- `AMESH,2`
- `ESIZE,0.005 (tercer distante al cordón de soldadura tamaño de elemento 5 mm)`
- `AMESH,3`
- `ESIZE,0.0065 (zona periférica al cordón de soldadura tamaño de elemento 6.5 mm)`
- `AMESH,4`

8.2.2.5 Establecer ajustes de análisis y definir condiciones iniciales

- Se declara como condición de frontera la pérdida de calor del modelo, por convección al medio, a través de todas las superficies exteriores que físicamente emiten calor,

mediante el coeficiente de convección y la temperatura del medio. Sólo se exceptúa el área de simetría del modelo, si se modela la mitad de la unión aprovechando esta propiedad. El valor del coeficiente de convección se fija en 30 W/m^{2}C°, y la temperatura inicial del metal base se fija en 20°C.

- `SFA,15,1, CONV,30,20`
- `SFA,20,1, CONV,30,20`
- `SFA,9,1, CONV,30,20`

Etapa de solución:

- Se declara como tipo de análisis el transitorio en el tiempo. Se ejecuta la corrida térmica a través de un análisis transitorio. Ingresando la función para el análisis transitorio

  ```
  *SET, _FNCNAME,'GAOSI'
  Begin of equation: Qm*exp(-3*({X}^2+({Y}-V*{TIME}) ^2)/R^2)
  ```

  Esta función es la que gobierna con respecto al tiempo y a la distancia a la cual se encuentre la fuente de calor en función de los Load step o pasos de carga. De la cual se obtiene el flujo de calor en cada nodo.

- Se selecciona el avance de tiempo automático (automatic time stepping).

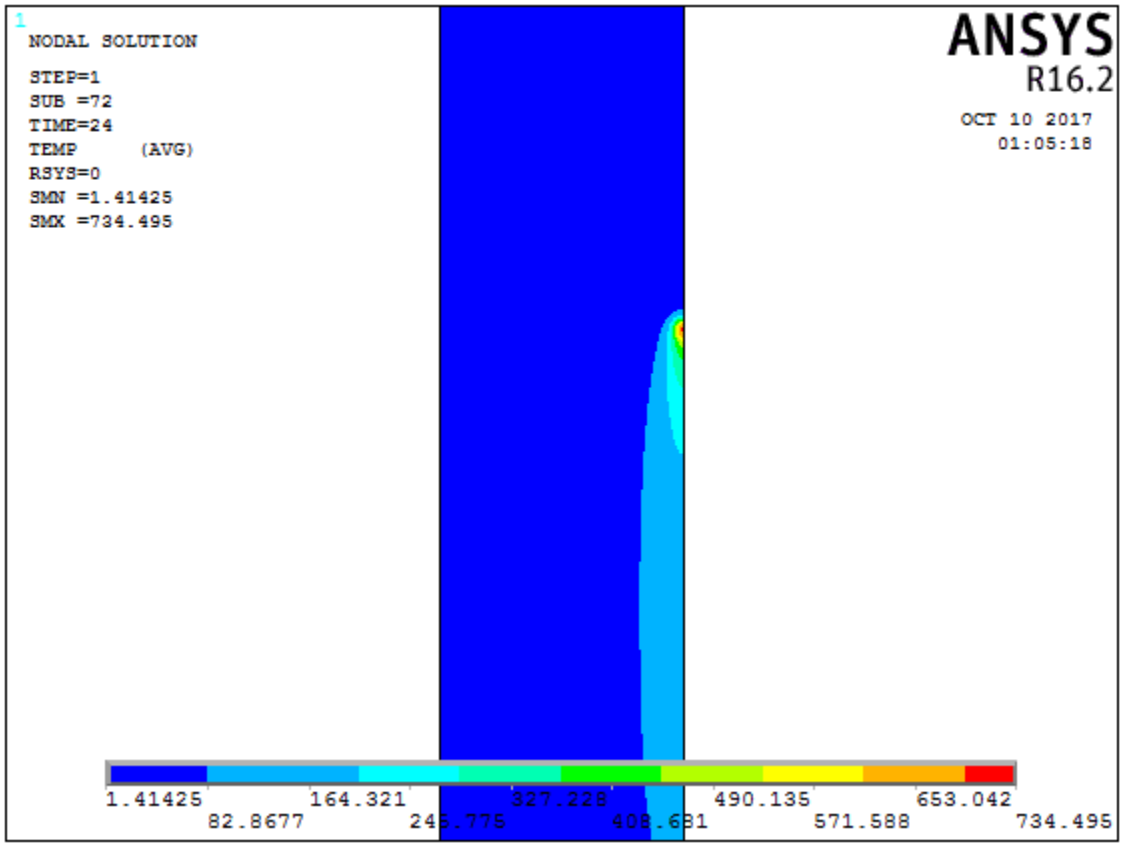
- Se declara la temperatura inicial del metal base. 20°c y del ambiente en 30°c

- Se declara el inicio de la ecuación (1.10) la cual arranca en un tiempo/frecuencia de (0,3333) hasta (1100 seg).
- Asignando la carga térmica al modelo, en la superficie superior del volumen de los elementos finitos que conforman la soldadura y el modelamiento del desplazamiento de

la fuente. De tal manera que la carga térmica que se aplica al modelo se determina en base al régimen de soldadura utilizado.

- la figura 19 muestra la distribución de temperatura de la lámina soldada transcurridos 24 segundos desde que se arranca la simulación del paso de la fuente de calor. Se presenta una temperatura máxima de alrededor de 653°C, los nodos que se van a analizar se encuentran entre las temperaturas intermedias de (82.8° -164.3° - 245°C) de la figura 19.

Figura 19. Solución modelo



Fuente: Autor

8.3 Estudio experimental del modelo

En orden de verificar los resultados numéricos del modelo computacional descrito anteriormente, se procedió a preparar las probetas con el arreglo geométrico propuesto en la figura 17.

Las mediciones fueron realizadas en la sección media de las láminas con una distancia de 10 mm desde la ranura de la junta a tope cuadrada, que une las dos probetas de 200mm de ancho por 400mm de largo y espesor de 3mm lámina A36.

Montaje de termocuplas sobre lámina calibre 11.de acuerdo al esquema presentado en la figura 20.

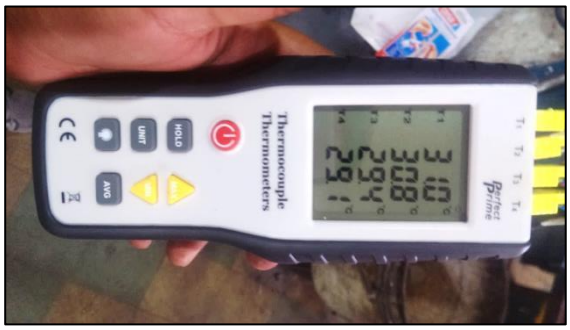
Figura 20. Montaje de termocuplas.

Fuente: Autor

Se procedió a medir la temperatura en las cuatro termocuplas, a condiciones ambientales, por medio del termómetro digital de cuatro canales. Y se dio inicio al experimento

Las condiciones de temperatura iniciales de la chapa se registraron en la figura 21.

Figura 21. Medición temperatura condiciones iniciales probeta.



Fuente: Autor

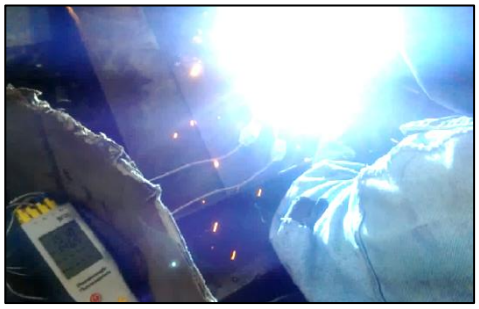
Para el inicio del experimento se realizó una prueba de calibración, en la que se utilizó una pinza voltiamperimétrica para medir el voltaje y la corriente, coincida con los valores definidos en la WPS diseñada en 7.14, y el plan de soldadura planteado para este modelo.

Figura 22. Inicio de experimento

Fuente: Autor

Posteriormente se tomaron registros de lecturas en los distintos intervalos de tiempo, mediante registro en video y fotografías durante el transcurso del experimento. Como muestra la tabla 16.

Tabla 16. Lectura de temperatura para seis tiempos en el experimento aplicando el proceso de soldadura GMAW sobre las probetas de láminas A-36.



Lectura 1		
Tiempo (Seg)	**T1 (°C)**	**T2(°C)**
10	50.5	--
Lectura 2		
Tiempo (Seg)	**T1 (°C)**	**T2(°C)**
15	151.8	146.5
Lectura 3		
Tiempo (Seg)	**T1 (°C)**	**T2(°C)**
50	128	133.5
Lectura 4		
Tiempo (Seg)	**T1 (°C)**	**T2(°C)**
40	121	1159
Lectura 5		
Tiempo (Seg)	**T1 (°C)**	**T2(°C)**
170	52.2	52.2
Lectura 6		
Tiempo (Seg)	**T1 (°C)**	**T2(°C)**
170	52.2	52.2

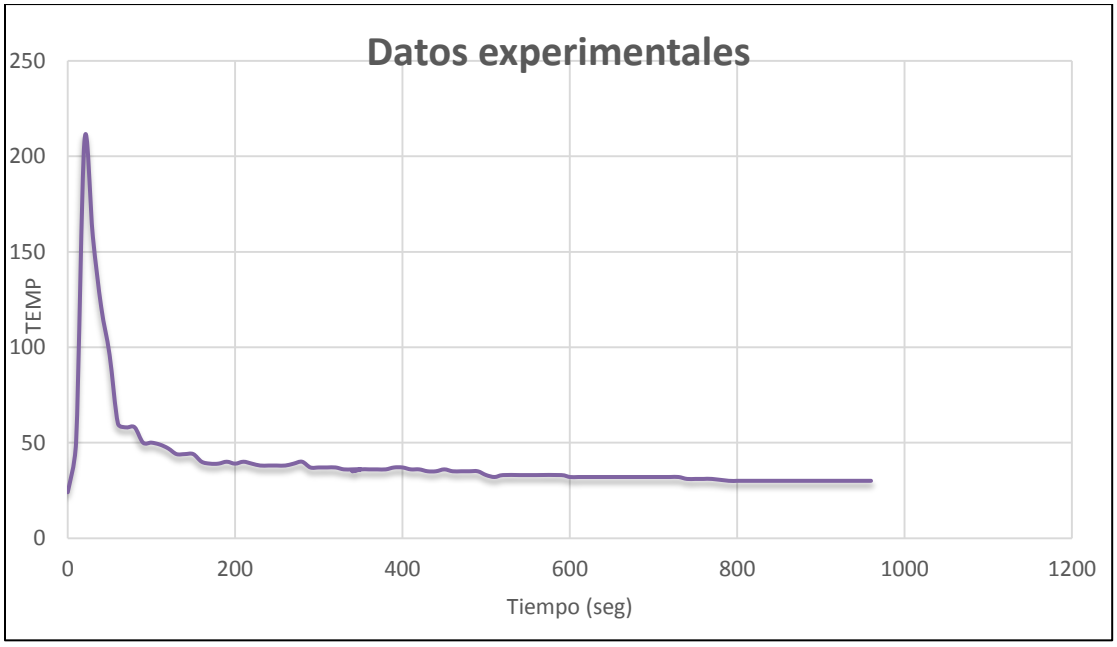
9. RESULTADOS

9.1 Historial de temperaturas para la corrida experimental.

La gráfica 1. Muestra el ciclo térmico obtenido para el termopar ubicado a 10 mm de la unión soldada los picos de temperatura que se obtuvieron se tabulan en la tabla 27 hasta un tiempo de 985 segundos. Estos valores fueron ajustados por medio de iteraciones en las diferentes pruebas llevadas a cabo con las probetas experimentales, dichos valores se consignaron en la tabla 17 columna "*Temperatura (°C) Experimental".*

Grafica 1. Historial de temperaturas T1. Hasta 985 seg.

T'(20 Seg) = 208°C Temperatura máxima de los datos experimentales. Para d= 10 mm



Fuente: Autor

En la tabla 17 se comparan 960 datos en pasos temporales de 10 segundos, para el experimento y el modelo.

Tabla 17. Resultados experimentales vs resultados del modelo por medio de la herramienta Ansys APDL.

TIME	TEMP (°C) Experimental	TEMP (°C) Modelo		TIME	TEMP (°C) Experimental	TEMP (°C) Modelo		TIME	TEMP (°C) Experimental	TEMP (°C) Modelo
0	30	26		170	39	32.5884		340	35	24.2739
10	56	66		180	39	31.5721		350	36	24.0665
20	208	212		190	40	30.6774		360	36	23.8719
30	158	133.8		200	39	29.8860		370	36	23.6889
40	121	95.3		210	38	29.1827		380	36	23.5164
50	89	76.9		220	39	28.5547		390	37	23.3537
60	60	67.0		230	38	27.9914		400	37	23.1998
70	58	59.7		240	38	27.4839		410	36	23.0541
80	58	54.0		250	38	27.0246		420	36	22.9160
90	50	49.6		260	38	26.6073		430	35	22.7850
100	50	45.9		270	39	26.2265		440	35	22.6605
110	49	43.0		280	37	25.8777		450	36	22.5421
120	47	40.5		290	37	25.5569		460	35	22.4296
130	44	38.4		300	37	25.2609		470	35	22.3223
140	44	36.6		310	37	24.9869		480	35	22.2202
150	44	35.0		320	37	24.7324		490	35	22.1228
160	40	33.7		330	36	24.4953		500	33	22.0300

Fuente: Autor

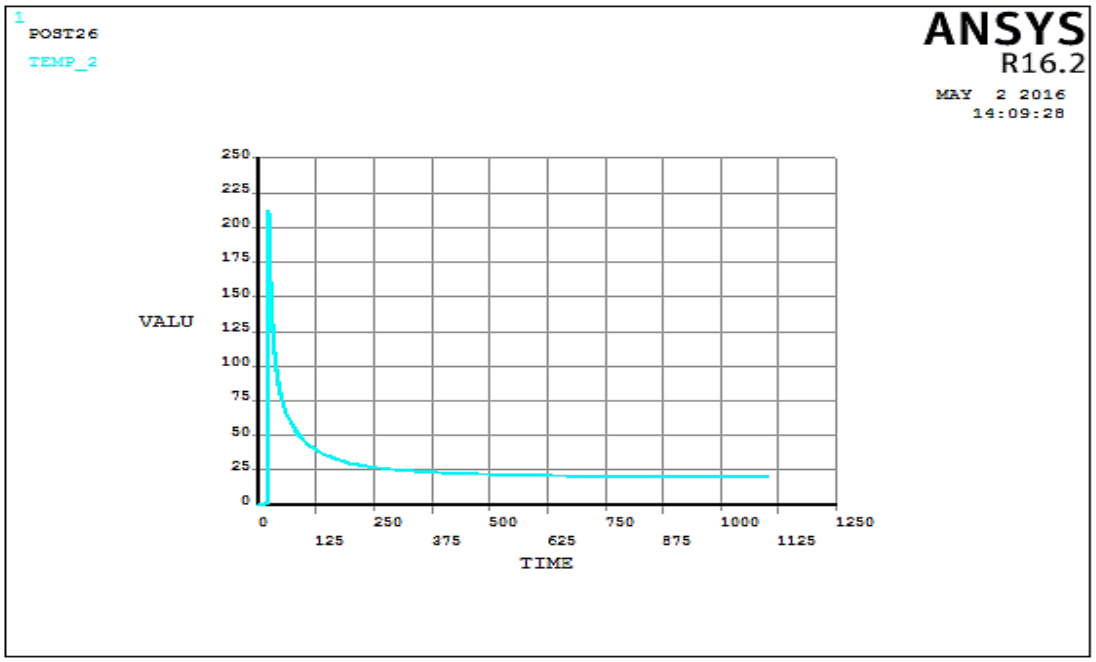
De la tabla anterior los datos experimentales y los datos del modelo, se encuentran aproximadamente en el mismo nodo ubicado a 10 mm de la soladura en el centro de la placa ver figura 17. Equivalentes al nodo 2739

9.2 Historial de temperaturas para la simulación.

Se presentan los resultados obtenidos por el modelo computacional de termperaturas desarrollado mediante Ansys. La gráfica 2. Muestra el ciclo térmico completo obtenido para las láminas de acero A36 soldadas por el proceso GMAW, a partir del nodo 2739 que se asimila al punto de estudio a 10 mm en el modelo experimental.

Lectura de temperatura modelo en el nodo 2739 equivalente a la temperatura T1 del experimento realizado.T'' (20 Seg) = 212 °C (Temperatura máxima)

Grafica 2. Historial de temperaturas T1. Hasta 1250 seg. Simulación



Fuente: Autor

Con respecto a las temperaturas máximas alcanzadas, se observa un grado de similitud aceptable comparado con los del ensayo, del orden de los 212 °C. Con respecto al parámetro tiempo, se observó que la variación de temperatura en el Modelo Computacional fue alcanzada en un tiempo del orden de los 20 segundos, comparado con los resultados del ensayo, que es del orden de los 30 segundos.

Las máximas temperaturas obtenidas, a través de la Simulación Computacional, como así también el parámetro T1 y nodo 2739 son aproximadamente del mismo orden, comparadas con los resultados del ensayo, lo cual la convierte en una excelente e interesante metodología para encarar el estudio térmico como el propuesto.

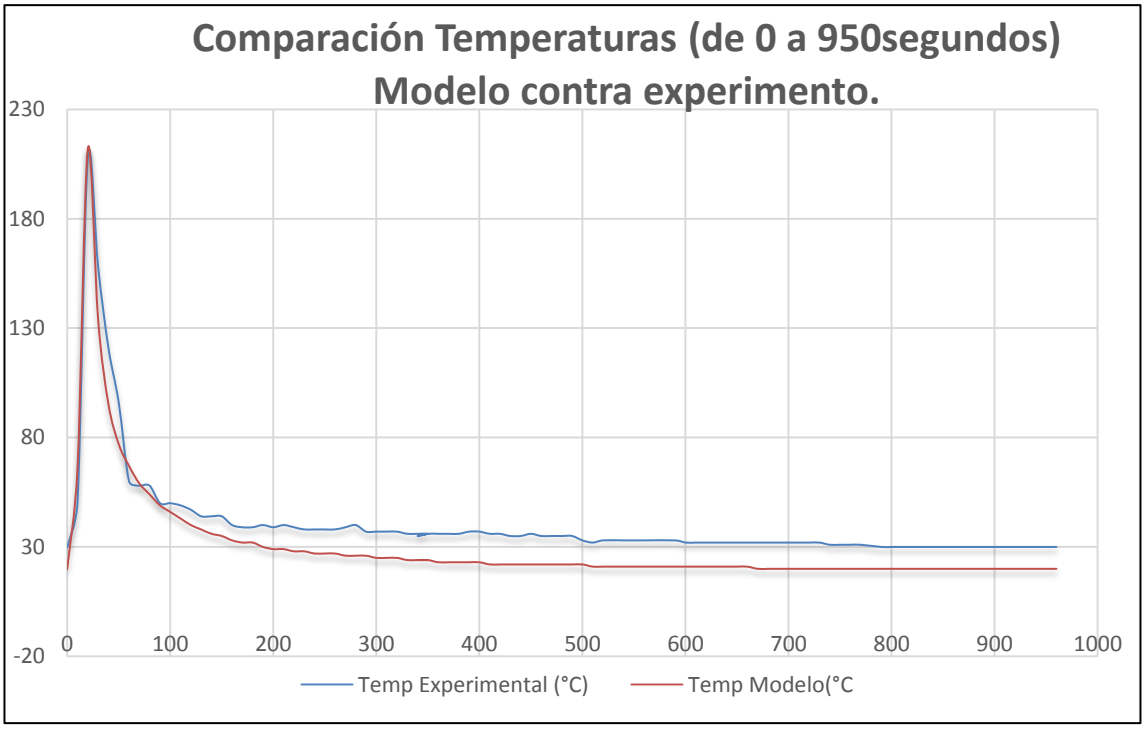
TDife= [(T'2/ T')-1]*100 = [(212/208)-1]*100= 1,92% de error ver tabla 18

En la tabla 16. se comparan los resultados obtenidos en el experimento contra los valores obtenidos por el modelo matemático de elementos finitos, usando como punto de referencia un nodo común ubicado a 10 mm del cordón de soldadura y en el centro de la probeta, la temperatura a los 20 segundos es el valor máximo obtenido en ambas condiciones.

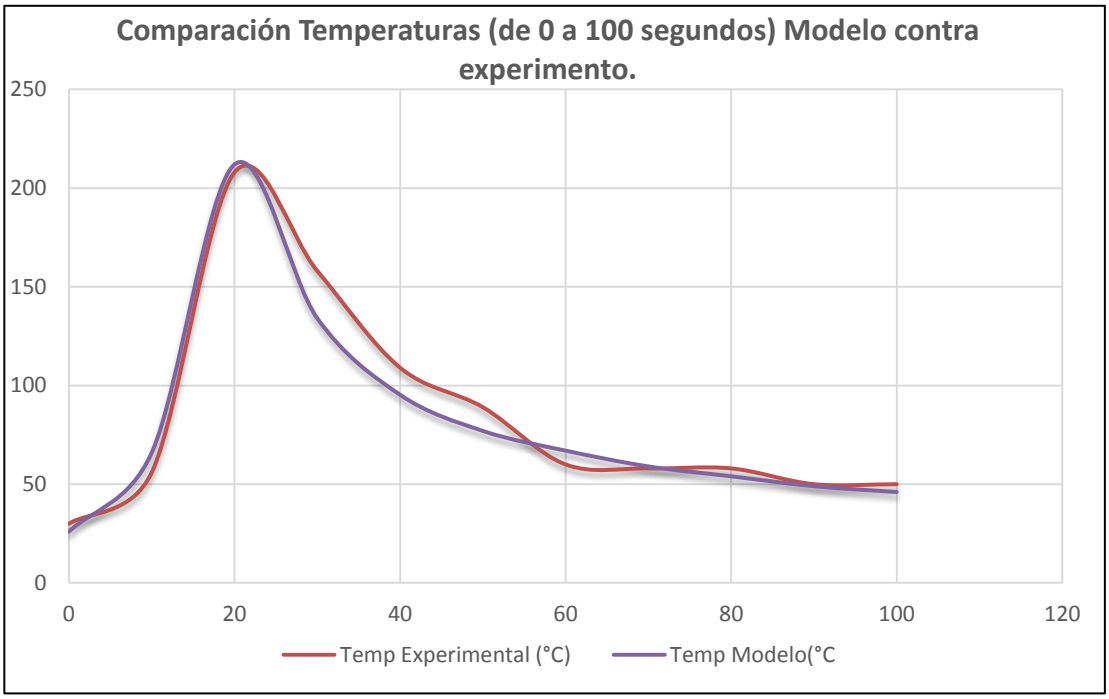
En consideración a las medidas obtenidas para ambos casos, los valores se discriminan en tres colores verde, amarillo, y naranja. Adjudicando en verde al conjunto de datos que presentan una confiabilidad buena entre 1 y 10% en especial el pico de temperatura máximo para el modelo desarrollado, los valores verdes se consideran aceptables con intervalo de errores entre 10 y 20%, y los valores de color naranja con errores superiores al 13%. lo que permite asegurar que los datos poseen una distribución normal, y se confirma que no existe una diferencia significativa entre el conjunto de datos analizados

Es de desatacar que las tasas de enfriamiento calculadas por el modelo desarrollado son mayores y tienden a aumentar en el tiempo, aproximadamente después de los 100 segundos (ver gráfica 3). Se desvían significativamente para el conjunto de valores del modelo, por lo que se obtienen errores significativos superiores al 13 %. (ver gráfica 5). Esto suceda debido a la difusividad térmica menor para el experimento, lo cual representa un cambio significativo, es decir la velocidad de propagación del calor es mayor en el modelo matemático. Tendiendo a estabilizarse más rápido que en el experimento.

Grafica 3. Comparación historial de temperaturas modelo computacional y experimento. De cero a 950 segundos

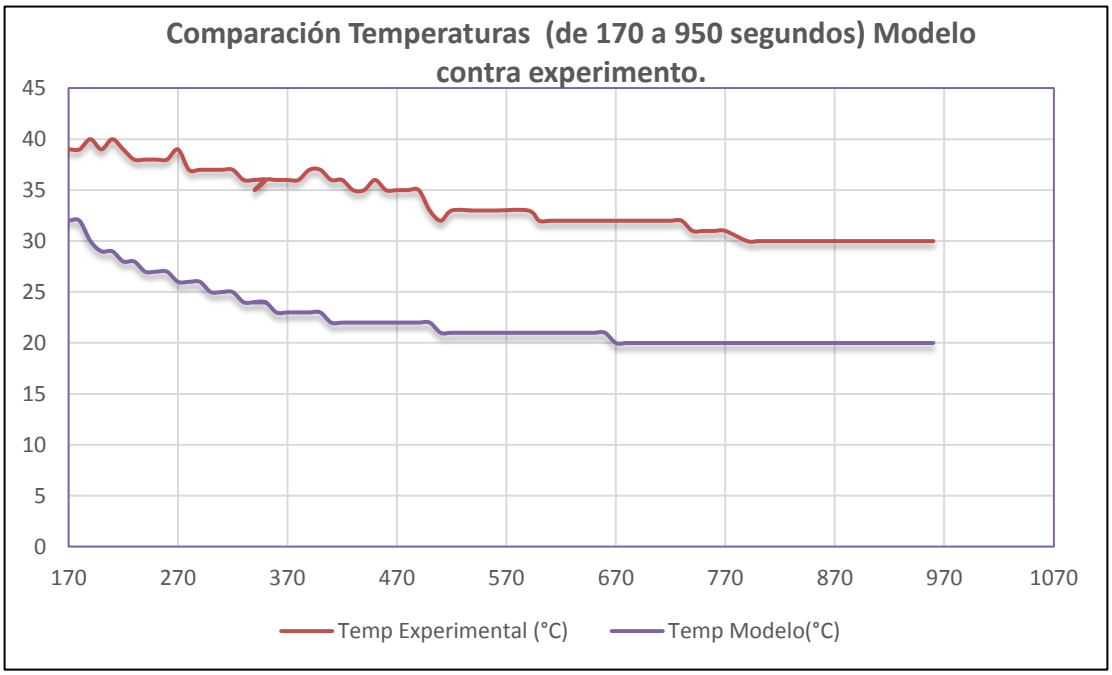


Grafica 4. Comparación historial de temperaturas modelo computacional y experimento. De 0 a 100 segundos



Fuente: Autor

Grafica 5. Comparación historial de temperaturas modelo computacional y experimento. De 0 a 100 segundos



Fuente: Autor

Tabla 18. Comparación % de erro resultados experimentales vs resultados del modelo

Tiempo (Seg)	Temp Experimental (°C)	Temp Modelo(°C)	% de error modelo vs experimento
0	30	26	13,33%
10	56	66	17,86%
20	208	212	1,92%
30	158	134	15,19%
40	109	95	12,57%
50	89	77	13,48%
60	60	67	11,67%
70	58	59	1,72%
80	58	54	6,90%
90	50	49	2,00%
100	50	46	8,00%
110	49	43	12,24%
120	47	40	14,89%
130	44	38	13,64%
140	44	36	18,18%
190	40	30	25,00%
200	39	29	25,64%
210	40	29	27,50%
220	39	28	28,21%

230	38	28	26,32%
240	38	27	28,95%
250	38	27	28,95%
260	38	27	28,95%
270	39	26	33,33%
280	37	26	29,73%
290	37	26	29,73%
300	37	25	32,43%

Fuente: Autor

Se consideran más exactos los valores de confiabilidad l resaltados en verde, dichos conjuntos de datos presentan una confiabilidad de hasta el 95% en especial los picos de temperatura para el modelo desarrollado, lo que permite asegurar que los datos poseen una distribución normal, y se confirma que no existe una diferencia significativa entre el conjunto de datos analizados.

10. CONCLUSIONES

El proceso de construcción de la WPS para este estudio de flujo de calor, permitió entender la importancia de contemplar y definir variables que son fundamentales en la aplicación del proceso de soldadura por arco eléctrico GMAW, y suple la necesidad al establecer los parámetros necesarios en la determinación de la mejor unión entre los metales de producción que tienen espesores delgados, y comerciales.

Este estudio ha permitido conocer la sensibilidad y la validez del modelo computacional propuesto, considerando fundamentalmente las simplificaciones adoptadas en el desarrollo y planteo del mismo, es decir, que las transformaciones producidas en el material de aporte como el base, debido a los cambios de fase no producen modificaciones de sus propiedades.

En función de los resultados obtenidos se ha podido determinar y ajustar los parámetros que intervienen y controlan el proceso de soldadura.

Se resalta que el modelo utilizado es de sencilla aplicación y de simplificación aceptable y de resultados conservativos, teniendo en cuenta el grado de exactitud alcanzado para la máxima temperatura como la del parámetro temperatura, menor al 10%, comparada con las mediciones del ensayo.

Se valida que el Software ANSYS Multiphysics versión 16.2 de uso general puede ser empleado satisfactoriamente en la modelación de la historia térmica.

11. RECOMENDACIONES

Profundizar en los análisis que integren deformaciones, y acumulación de esfuerzos residuales, igualmente ensayar geometrías más complejas, tipo tubería y juntas en filete.

Una gran problemática durante los trabajos de modelación de soldadura consiste en establecer, con la mayor precisión posible, las propiedades mecánicas y físicas termos dependientes del material en cuestión. En muchas ocasiones esta información no está disponible de forma

completa, con las propiedades termo dependientes desde la temperatura ambiente hasta la de fusión del material.

12. BIBLIOGRAFÍA

[1] H. Sanzi, G. Elvira, E. Asta y M. Zalazar Simulación computacional del ciclo térmico de una soldadura bajo proceso gmaw en una placa estructural. Comparación experimental utilizando termocuplas. Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Haedo. 2007

[2] Muratore Lahoz, Borja «Simulación numérica del proceso de soldadura» Ingeniería Técnica de Obras Públicas especialidad en Construcciones Civiles, 2010.

[3] Jorge Luis pacheco Yepes. Desarrollo de un modelo teórico experimental para ciclos térmicos y perfiles de temperatura en juntas soldadas obtenidos por procesos de soldadura al arco eléctrico. Universidad autónoma del caribe facultad de ingeniería programa de ingeniería mecánica barranquilla 2015

[5] D. Rosenthal, «The theory of moving sources of heat and its application to metal treatment,» Trans. ASME , 1946.

[6] S. Kou, Welding Metallurgy, New Jersey, 2002.

[7] Friedman E , Thermo-mechanical analysis of the welding process using the finite element method. J Press Vessel, 1975.

[8] Hennart, Jean-Pierre. Introducción al Método de los Elementos Finitos para la solución numérica de ecuaciones diferenciales. Centro de Investigación y Estudios avanzados del IPN.México.1997.

[9] Dr.-Ing. Hábil, Dieter, Rada, Heat Effects of Welding Temperature Field Residual Stress Distortion Springer-Verlag, 1992

[10] Deepak M.Badgujar, S.P.Shekhawat, Finite Element Analysis for Residual Stress, Strain and Temperature Characteristics of Butt Welded Steel Plate – a Review. 2013.

[11] Dar , Naeem Ullah, Expert System For Optimization Of Welding Process Of Thin Walled HSLA Steel Structures. PhD thesis, University of Engineering & Technology, Taxila. (2009)

[12] ANSYS thermal Guide Release 12.0. ANSYS, Inc. Southpointe 275 Technology Drive Canonsburg, PA 15317 ansysinfo@ansys.com http:/www.ansys.com. April 2009.

[13] AWS D1, Committee on Structural Welding. 2015. ANSI/AWS D1.1:D1.1M-2015. Structural Welding Code-Steel. USA : Ed. USA: Annual Book of ASTM Standards, 2015. 23rd Edition.

[14] ASTM Committee A01 on Steel, Stainless Steel and Related Alloys and is the direct responsibility of Subcommittee A01.02 on Structural Steel for Bridges, Buildings, Rolling Stock and Ships., ASTM: A36/A36M-14 Standard Specification for Carbon Structural Steel (Approved Dec. 1, 2014.)

[15] Altos Hornos de México, SAB de CV.: Mejor con Acero Aplicaciones, Calibre de espesores. Prolongación, Juárez Monclova, Coahuila, México. Recuperado 2011,http://www.mejorconacero.com/tabla-de-calibres/#

[16] Welding Handbook Committee, Welding Handbook Ninth Edition Volume 2 WELDING PROCESSES, PART 1, American Welding Society 550 N.W. LeJeune Road, 2004.

[17] AWS A5 Committee on Filler Metals and Allied Materials, AWS A5.18/A5.18M:2005 Specification for Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shield Arc Welding, American Welding Society 550 N.W. LeJeune Road, 2005.

[18] Lincoln Electric, Gas Metal Arc Welding Guide Product and Procedure Selection, Publication C4.200. The Lincoln Electric Company Saint Clair Avenue, Cleveland OH, 2014.

ANEXO A. Código de simulación ANSYS

```
/BATCH
! /COM,ANSYS RELEASE Release 16.2        BUILD 16.2        UP20150629
01:42:25
/input,menust,tmp,''
! /GRA,POWER
! /GST,ON
! /PLO,INFO,3
! /GRO,CURL,ON
! /CPLANE,1
! /REPLOT,RESIZE
WPSTYLE,,,,,,,,0
/FILNAME,weldingstress,0
/PREP7
!Â©wÂ¸qÂ²kÂ¥Ã³Â°Ã'Â¼Ã†
*SET,L,4E-1       !Â²kÂ¥Ã³ÂªÃ¸Â«Ã—
*SET,W,2E-1       !Â²kÂ¥Ã³Â¼eÂ«Ã—
*SET,H,3E-3       !Â²kÂ¥Ã³Â°ÂªÂ«Ã—
*SET,U,30           !Â²kÂ±ÂµÂ¹qÃ€Â£
*SET,I,50          !Â²kÂ±ÂµÂ¹qÂ¬y
*SET,V,0.0058         !Â²kÂ±ÂµÂ³tÂ«Ã—
*SET,YITA,0.7       !Â²kÂ±ÂµÂ¼Ã¶Â®Ã„Â²v
*SET,R,0.007        !Â¹qÂ©Â·Â¦Â³Â®Ã„Â¥[Â¼Ã¶Â¥bÂ®
*SET,Q,U*I*YITA     !Â¹qÂ©Â·Â¼Ã¶Â®Ã„Â²v
*SET,Qm,3/3.1415/R**2*Q !Â¥[Â¼Ã¶Â´Â³Ã,IÂ¤Â¤Â¤ÃŸÂ³ÃŒÂ¨ÃŽÂ¼Ã¶Â¬yÂ±KÂ«Ã—
!*
ET,1,PLANE55
ET,2,SOLID70
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPTEMP,2,100
MPTEMP,3,200
MPTEMP,4,400
MPTEMP,5,600
MPTEMP,6,800
MPTEMP,7,1000
MPTEMP,8,1200
MPDATA,KXX,1,,60
MPDATA,KXX,1,,50
MPDATA,KXX,1,,45
MPDATA,KXX,1,,38
MPDATA,KXX,1,,30
MPDATA,KXX,1,,25
MPDATA,KXX,1,,26
MPDATA,KXX,1,,28
MPDATA,DENS,1,,7880
MPDATA,DENS,1,,7880
```

```
MPDATA,DENS,1,,7800
MPDATA,DENS,1,,7760
MPDATA,DENS,1,,7600
MPDATA,DENS,1,,7520
MPDATA,DENS,1,,7390
MPDATA,DENS,1,,7300
MPDATA,C,1,,480
MPDATA,C,1,,500
MPDATA,C,1,,520
MPDATA,C,1,,650
MPDATA,C,1,,750
MPDATA,C,1,,1000
MPDATA,C,1,,1200
MPDATA,C,1,,1400
MPDATA,EX,1,,2.05E11
MPDATA,EX,1,,1.87E11
MPDATA,EX,1,,1.5E11
MPDATA,EX,1,,0.7E11
MPDATA,EX,1,,0.2E11
MPDATA,EX,1,,0.19E2
MPDATA,EX,1,,0.18E2
MPDATA,EX,1,,0.12e2
MPDATA,PRXY,1,,0.28
MPDATA,PRXY,1,,0.29
MPDATA,PRXY,1,,0.31
MPDATA,PRXY,1,,0.35
MPDATA,PRXY,1,,0.4
MPDATA,PRXY,1,,0.45
MPDATA,PRXY,1,,0.48
MPDATA,PRXY,1,,0.5
UIMP,1,REFT,,,20
MPDATA,ALPX,1,,1.1e-5
MPDATA,ALPX,1,,1.22e-5
MPDATA,ALPX,1,,1.39e-5
MPDATA,ALPX,1,,1.48e-5
MPDATA,ALPX,1,,1.34e-5
MPDATA,ALPX,1,,1.33e-5
MPDATA,ALPX,1,,1.32e-5
MPDATA,ALPX,1,,1.31e-5
TB,BISO,1,6,2,
TBTEMP,20
TBDATA,,220e6,0,,,,
TBTEMP,250
TBDATA,,175e6,0,,,,
TBTEMP,500
TBDATA,,80e6,0,,,,
TBTEMP,750
TBDATA,,40E6,0,,,,
TBTEMP,1000
TBDATA,,10E6,0,,,,
TBTEMP,1500
TBDATA,,1E-5,0,,,,
```

```
!Â©wÂ¸qÃƒÃ¶Ã□Ã¤Ã,I
K,1,0,0,0
K,2,0,L,0
K,3,-W/2*0.15,L,0
K,4,-W/2*0.3,L,0
K,5,-W/2*0.5,L,0
K,6,-W/2,L,0
K,7,-W/2,0,0
K,8,-W/2*0.5,0,0
K,9,-W/2*0.3,0,0
K,10,-W/2*0.15,0,0
K,11,0,0,H
!Â³qÂ¹LÃƒÃ¶Ã□Ã¤Ã,IÂ«Ã˜Â¥ÃŸÂÂ±
A,1,2,3,10
A,10,3,4,9
A,9,4,5,8
A,8,5,6,7
!Â°Ã´Â®Ã¦Â¹Â°Â¤Ã€
ESIZE,0.0012
AMESH,1
ESIZE,0.0025
AMESH,2
ESIZE,0.005
AMESH,3
ESIZE,0.0065
AMESH,4
!Â³]Â¸mÂ³Ã¦Â¤Â¸Â©Ã”Â¦Ã¹Â¡AÃ…ÃœÂ¦Â¨Ã…Â©Â°Ã´Â®Ã¦
TYPE,   2
EXTOPT,ESIZE,2,0,
EXTOPT,ACLEAR,1
!*
EXTOPT,ATTR,1,0,0
REAL,_Z4
ESYS,0
!*
VOFFST,1,H, ,
VOFFST,2,H, ,
VOFFST,3,H, ,
VOFFST,4,H, ,
! EPLOT
NUMMRG,ALL, , , ,LOW
!Â¶iÂ¦Ã¦Ã€Ã¾Â°AÂ¼Ã¶Â¤Ã€ÂªR
FINISH
/SOL
!*
ANTYPE,4
!*
TRNOPT,FULL       !Â³]Â¸mÂ§Â¹Â¥Ã¾Âªk
LUMPM,0
!Â©wÂ¸qÂ°ÂªÂ´ÂµÂ¼Ã¶Â·Â½Â¨Ã§Â¼Ã†
*DEL,_FNCNAME
*DEL,_FNCMTID
```

```
*DEL,_FNC_C1
*DEL,_FNC_C2
*DEL,_FNC_C3
*DEL,_FNCCSYS
*SET,_FNCNAME,'GAOSI'
*DIM,_FNC_C1,,1
*DIM,_FNC_C2,,1
*DIM,_FNC_C3,,1
*SET,_FNC_C1(1),QM
*SET,_FNC_C2(1),V
*SET,_FNC_C3(1),R
*SET,_FNCCSYS,0
! /INPUT,HANJIE.func,,,1
*DIM,%_FNCNAME%,TABLE,6,19,1,,,,%_FNCCSYS%
!
! Begin of equation: Qm*exp(-3*({X}^2+({Y}-V*{TIME})^2)/R^2)
*SET,%_FNCNAME%(0,0,1), 0.0, -999
*SET,%_FNCNAME%(2,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(3,0,1), %_FNC_C1(1)%
*SET,%_FNCNAME%(4,0,1), %_FNC_C2(1)%
*SET,%_FNCNAME%(5,0,1), %_FNC_C3(1)%
*SET,%_FNCNAME%(6,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(0,1,1), 1.0, -1, 0, 0, 0, 0, 0
*SET,%_FNCNAME%(0,2,1), 0.0, -2, 0, 1, 0, 0, -1
*SET,%_FNCNAME%(0,3,1),   0, -3, 0, 1, -1, 2, -2
*SET,%_FNCNAME%(0,4,1), 0.0, -1, 0, 3, 0, 0, -3
*SET,%_FNCNAME%(0,5,1), 0.0, -2, 0, 1, -3, 3, -1
*SET,%_FNCNAME%(0,6,1), 0.0, -1, 0, 2, 0, 0, 2
*SET,%_FNCNAME%(0,7,1), 0.0, -3, 0, 1, 2, 17, -1
*SET,%_FNCNAME%(0,8,1), 0.0, -1, 0, 1, 18, 3, 1
*SET,%_FNCNAME%(0,9,1), 0.0, -4, 0, 1, 3, 2, -1
*SET,%_FNCNAME%(0,10,1), 0.0, -1, 0, 2, 0, 0, -4
*SET,%_FNCNAME%(0,11,1), 0.0, -5, 0, 1, -4, 17, -1
*SET,%_FNCNAME%(0,12,1), 0.0, -1, 0, 1, -3, 1, -5
*SET,%_FNCNAME%(0,13,1), 0.0, -3, 0, 1, -2, 3, -1
*SET,%_FNCNAME%(0,14,1), 0.0, -1, 0, 2, 0, 0, 19
*SET,%_FNCNAME%(0,15,1), 0.0, -2, 0, 1, 19, 17, -1
*SET,%_FNCNAME%(0,16,1), 0.0, -1, 0, 1, -3, 4, -2
*SET,%_FNCNAME%(0,17,1), 0.0, -1, 7, 1, -1, 0, 0
*SET,%_FNCNAME%(0,18,1), 0.0, -2, 0, 1, 17, 3, -1
*SET,%_FNCNAME%(0,19,1), 0.0, 99, 0, 1, -2, 0, 0
! End of equation: Qm*exp(-3*({X}^2+({Y}-V*{TIME})^2)/R^2)
TUNIF,20, !Â©wÂ¸qÂªÃ¬Â©lÂ·Ã…Â«Ã—
!Â©wÂ¸qÂ¹Ã¯Â¬yÂ´Â«Â¼Ã¶ÃƒÃ¤Â¬Ã‰
SFA,15,1,CONV,30,20
SFA,20,1,CONV,30,20
SFA,9,1,CONV,30,20
SFA,14,1,CONV,30,20
SFA,19,1,CONV,30,20
SFA,24,1,CONV,30,20
SFA,23,1,CONV,30,20
SFA,7,1,CONV,30,20
```

```
SFA,12,1,CONV,30,20
SFA,17,1,CONV,30,20
SFA,22,1,CONV,30,20
SFA,1,1,CONV,30,20
SFA,2,1,CONV,30,20
SFA,3,1,CONV,30,20
SFA,4,1,CONV,30,20
!Â¬IÂ¥[Â°ÂªÂ´ÂµÂ¼Ã¶Â·Â½
SFA,5,1,HFLUX, %GAOSI%
SFA,10,1,HFLUX, %GAOSI%
OUTRES,ALL,ALL,
TIME,L/V !Â³]Â¸mÂ¨DÂ¸Ã‘Â®Ã‰Â¶Â¡
AUTOTS,-1
NSUBST,50,50,50
KBC,0
TSRES,ERASE
LSWRITE,1,  !Â¼gÂ¤JÂ¸Ã¼Â²Ã¼Â¤Ã¥Â¥Ã³1
!*
TIME,20
AUTOTS,1
NSUBST,20,20,20
KBC,0
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,2,
TIME,50
AUTOTS,1
NSUBST,30,30,30
KBC,0
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,3,
TIME,1100
AUTOTS,1
NSUBST,105,105,105
KBC,0
!*
TSRES,ERASE
LSWRITE,4,
LSSOLVE,1,4,1,  !Â¶}Â©lÂ¨DÂ¸Ã‘
FINISH
/POST1
SET,LIST,999
SET,,, ,,, ,4
FINISH
/SOL
FINISH
/POST1
!*
! /EFACET,1
! PLNSOL, TEMP,, 0
FINISH
```

```
/POST26
FILE,'weldingstress','rth','.'
/UI,COLL,1
NUMVAR,200
SOLU,191,NCMIT
STORE,MERGE
FILLDATA,191,,,,1,1
REALVAR,191,191
! /VIEW,1,1,2,3
! /ANG,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,0.924021086472,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,0.924021086472,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,0.924021086472,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,0.924021086472,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,0.924021086472,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,0.924021086472,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,0.924021086472,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,0.924021086472,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,0.924021086472,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,0.924021086472,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,0.924021086472,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,0.924021086472,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,0.924021086472,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,0.924021086472,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,0.924021086472,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,0.924021086472,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,0.924021086472,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,0.924021086472,1
! /REP,FAST
!*
```

```
NSOL,2,200,TEMP,, TEMP_2,
STORE,MERGE
! /DIST,1,1.08222638492,1
! /REP,FAST
! XVAR,1
! PLVAR,2,
! /XRANGE, 0,20
! XVAR,1
! PLVAR,2,
NUMVAR,200
FILLDATA,191,,,,1,1
REALVAR,191,191
! XVAR,1
! PLVAR,2,
! /XRANGE,DEFAULT
! XVAR,1
! PLVAR,2,
! /XRANGE, 0,100
! XVAR,1
! PLVAR,2,
! SAVE, weldingstress,db,
FINISH
/POST1
!*
! PLNS,TEMP,
ANTIME,50,0.5, ,1,2,0,15
!*
! /VIEW,1,1,2,3
! /ANG,1
! /REP,FAST
! /VIEW,1,1,2,3
! /ANG,1
! /REP,FAST
! /REPLOT,RESIZE
! /REPLOT,RESIZE
! /VIEW,1,1,2,3
! /ANG,1
! /REP,FAST
! /VIEW,1,1,2,3
! /ANG,1
! /REP,FAST
! /VIEW,1,,,1
! /ANG,1
! /REP,FAST
! /VIEW,1,1,2,3
! /ANG,1
! /REP,FAST
! /VIEW,1,1,2,3
! /ANG,1
! /REP,FAST
! /USER,  1
```

```
!   /FOC,        1,   -0.490410169678E-01,     0.199556922811          ,
0.147572378190E-02
! /REPLO
! /REPLO
!   /FOC,        1,   -0.482099730906E-01,     0.200996923675          ,
0.238708580087E-03
! /REPLO
! /REPLO
! /REPLO
! /REPLO
! /DIST,  1,  0.446654011626E-01
! /ANG,   1,  -46.8000000000
! /REPLO
! /REPLOT,RESIZE
! /REPLOT,RESIZE
! /VIEW,1,1,2,3
! /ANG,1
! /REP,FAST
! /VIEW,1,1,2,3
! /ANG,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,1.88167642316,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,1.88167642316,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,1.88167642316,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,0.853814968245,1
! /REP,FAST
! /VIEW,1,1,2,3
! /ANG,1
! /REP,FAST
! /REPLOT,RESIZE
!*
! PLNS,TEMP,
ANTIME,50,0.5, ,1,2,0,15
!*
!*
! PLNS,TEMP,
ANTIME,50,0.5, ,1,2,0,30
!*
!*
! PLNS,TEMP,
ANTIME,50,0.5, ,1,2,0,80
!*
!*
! PLNS,TEMP,
ANTIME,50,0.5, ,1,2,0,100
!*
!*
! PLNS,TBOT,
ANTIME,50,0.5, ,1,2,0,100
```

```
!*
! ANIM
!*
! PLNS,TBOT,
ANTIME,50,0.5, ,1,2,0,60
!*
!*
! PLNS,TEMP,
ANTIME,50,0.5, ,1,0,0,60
!*
! /REPLO
! /DIST,1,0.853814968245,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,0.853814968245,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,0.853814968245,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,1.17121394821,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,1.17121394821,1
! /REP,FAST
! /DIST,  1,  0.216252690706
! /ANG,   1,  -8.40000000000
! /REPLO
! /DIST,1,1.17121394821,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,1.17121394821,1
! /REP,FAST
! /DIST,  1,  0.329256167365
! /ANG,   1,  -50.4000000000
! /REPLO
! /DIST,1,1.17121394821,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,1.17121394821,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,0.853814968245,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,0.853814968245,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,0.853814968245,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,0.853814968245,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,0.853814968245,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,0.853814968245,1
! /REP,FAST
!  /FOC,       1,  -0.399044997803E-01,    0.201310769436         ,  -
0.273696969731E-02
! /REPLO
! /ANG,1,-75,ZS,1
! /REP,FAST
```

```
!  /FOC,       1,  -0.185774696541E-01,     0.211317778442         ,  -
0.165173190767E-01
! /REPLO
!  /FOC,       1,     0.313084927426E-01,    0.222552477920         ,  -
0.406357728609E-01
! /REPLO
! /ANG,1,-75,YS,1
! /REP,FAST
! /ANG,1,75,YS,1
! /REP,FAST
! /ANG,1,-75,ZS,1
! /REP,FAST
! /ANG,1,-75,ZS,1
! /REP,FAST
! /ANG,1,-75,ZS,1
! /REP,FAST
! /ANG,1,-75,ZS,1
! /REP,FAST
!  /FOC,       1,     0.360361827453E-01,    0.235431728509         ,  -
0.507978365881E-01
! /REPLO
! /DIST,  1,  0.300654800173
! /ANG,   1,   53.1000000000
! /REPLO
! /DIST,1,0.820738309109,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,0.820738309109,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,1.21841516218,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,1.21841516218,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,1.21841516218,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,0.820738309109,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,0.820738309109,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,0.820738309109,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,0.820738309109,1
! /REP,FAST
! /VIEW,  1,  0.629343071597    ,  0.710315948384    ,  0.315243638641
! /ANG,   1,   81.5939419602
! /REPLO
! /VIEW,  1, -0.531519353039    ,  0.772760877320    , -0.346882982905
! /ANG,   1,  -45.6600741369
! /REPLO
! /DIST,1,0.820738309109,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,0.820738309109,1
! /REP,FAST
```

```
! /DIST,1,0.820738309109,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,1.21841516218,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,1.21841516218,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,1.21841516218,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,1.21841516218,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,1.21841516218,1
! /REP,FAST
! /VIEW,  1, -0.734150976456    , -0.620104034939    , -0.276574275053
! /ANG,   1,  -19.8407855313
! /REPLO
!  /VIEW,    1,    0.972373548957        ,    0.232849079855        ,  -
0.164616918639E-01
! /ANG,   1,   111.845879047
! /REPLO
! /VIEW,  1,  0.206313654012    ,  0.279101585815    ,  0.937836329518
! /ANG,   1,   76.1010875556
! /REPLO
!  /VIEW,    1,    0.748774267751        ,    0.656514382179        ,
0.912467092347E-01
! /ANG,   1,  -118.943070445
! /REPLO
! /DIST,1,1.21841516218,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,1.21841516218,1
! /REP,FAST
! /VIEW,  1, -0.148978334809    ,  0.702249937170    , -0.696168428975
! /ANG,   1,  -35.4042007007
! /REPLO
! /VIEW,  1, -0.451794565168    ,  0.177019332379    ,  0.874383112171
! /ANG,   1,   29.5272392749
! /REPLO
! /VIEW,  1,  0.554922551490    ,  0.615196189310    ,  0.559995187932
! /ANG,   1,   20.2770112750
! /REPLO
! /VIEW,  1, -0.104834170509E-01,  0.498933762244    ,  0.866576712623
! /ANG,   1,  -4.38984362087
! /REPLO
! /VIEW,  1, -0.623658233200    , -0.247562417450    ,  0.741460219855
! /ANG,   1,   13.2095123363
! /REPLO
! /VIEW,  1,  0.861425376516    , -0.746288225029E-01,  0.502371236782
! /ANG,   1,  -13.7896206366
! /REPLO
! /DIST,1,1.21841516218,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,1.21841516218,1
! /REP,FAST
```

```
! /DIST,1,1.21841516218,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,1.21841516218,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,0.820738309109,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,0.820738309109,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,0.820738309109,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,0.820738309109,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,0.820738309109,1
! /REP,FAST
! /FOC,   1, -0.691754519590E-01,  0.180346443494    ,  0.121427433782
! /REPLO
! /VIEW,  1,  0.632861549875    ,  0.458506630212E-01,  0.772906187963
! /ANG,   1,  -10.4131366613
! /REPLO
! /DIST,1,0.820738309109,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,0.820738309109,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,1.21841516218,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,1.21841516218,1
! /REP,FAST
! /REPLO
! /ANG,1,-75,XS,1
! /REP,FAST
! /FOC,   1, -0.662109975711E-01,  0.179697690681    ,  0.108630689083
! /REPLO
! /VIEW,  1,  0.520687816037    , -0.729504146996    ,  0.443517640851
! /ANG,   1,  -15.0625483660
! /REPLO
! /VIEW,  1,  0.723224002320    , -0.250371953803    ,  0.643631048984
! /ANG,   1,  -15.1070293039
! /REPLO
! /VIEW,  1,  0.566780966174    , -0.147441439738    ,  0.810567923268
! /ANG,   1,  -13.3383404536
! /REPLO
! /FOC,   1, -0.684787699835E-01,  0.179064255701    ,  0.110101183584
! /REPLO
! /FOC,   1, -0.699906182585E-01,  0.178641965714    ,  0.111081513251
! /REPLO
!*
! PLNS,TEMP,
ANTIME,50,0.5, ,1,0,0,60
!*
!*
```

```
! PLNS,TEMP,
ANDATA,0.5, ,0,0,0,1,0,1
!*
! /REPLOT,RESIZE
!*
! PLNS,TEMP,
ANMODE,10,0.5, ,0
!*
! PLNSOL,TEMP
!*
ANCNTR,10,0.5
! PLNSOL,TEMP
!*
ANCNTR,20,0.5
!*
! PLNS,TEMP,
ANDATA,0.5, ,0,0,0,1,0,1
!*
! PLNSOL,TEMP,
!*
ANISOS,9,0.5
!*
! PLNS,TEMP,
ANHARM,50,0
!*
!*
! PLNS,TEMP,
ANHARM,50,0
!*
!*
! PLNS,TF,X
ANTIME,30,0.5, ,1,0,0,0
!*
!*
! PLNS,TOP,
ANTIME,30,0.5, ,1,0,0,0
!*
!*
! PLNS,TEMP,
ANTIME,30,0.5, ,1,0,0,0
!*
!*
! PLNS,TEMP,
ANTIME,30,0.5, ,0,0,0,0
!*
! /ANFILE,SAVE,'welding','avi','Desktop\'
! SAVE, weldingstress,db,
!*
! PLNS,TEMP,
ANTIME,30,0.5, ,0,0,0,0
!*
! SAVE, welding1,    ,C:\Users\Manu\Desktop\
```

```
! SAVE, weldingstress,db,
! SAVE, weldingstress,db,
! /REPLOT,RESIZE
! /REPLOT,RESIZE
! LGWRITE,'SOLDADURA','txt','C:\Users\Manu\Desktop\',COMMENT
```