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

Manuel Orlando Carreño Martínez[1]

RESUMEN

Desarrollo de un modelo computacional para el estudiar el fenómeno de flujo de calor, en la aplicación de soldadura proceso GMAW para la unión de láminas calibre No. 11 de material ASTM A-36. El proceso se inicia con el diseño del procedimiento de soldadura (WPS) cumpliendo con los criterios y requisitos del código de diseño AWS D1.1.[2] recomendados para este espesor de lámina y material.

El modelo computacional desarrollado describe un sistema de flujo de calor bidimensional, se consideraron las dimensiones de las probetas soldada, las propiedades termo-físicas del material base, y los parámetros de soldadura definidos en la WPS realizada, como variables de entrada. El modelo seleccionado para la solución del sistema de flujo de calor, consideró la simplificación propuesta por Rosenthal [5] Un estado cuasi-estacionario del flujo de calor.

Se evaluó el modelo computacional obtenido por medio de un experimento en juntas de acero carbono A-36 calibre 11 , soldadas con proceso GMAW. Para la medición del ciclo de temperaturas, se usaron termopares ubicados geométricamente alrededor de la junta soldada.

El análisis de los resultados se basó en comparar el comportamiento del ciclo térmico medido en el experimento físico de la unión soldada, y la distribución de la temperatura nodal obtenida mediante el software ANSYS Multiphysics, del modelo computacional desarrollado por medio de elementos finitos.

[1] Manuel O. Carreño M., Ingeniero Mecánico Universidad Industrial de Santander, Correo-e: manuelocm@gmail.com

[2] ANSI/AWS D1.1:D1.1M-2015. Structural Welding Code-Steel

ABSTRAC

This study developed a computational model for the phenomenon of heat flow in the application of (GMAW) welding process for the union of sheets caliber No. 11 of ASTM A-36 material. The process starts up with the design of the WPS welding procedure, fulfilling the criteria and requirements of the AWS design code D1.1. Recommended for this thickness of sheet and material.

The computational model developed describes a two-dimensional heat flow system, the dimensions of the welded specimens, the thermo-physical properties of the base material, and the welding parameters in the WPS.The model selected for the solution of the heat flow system, considered the simplification proposed by Rosenthal [5] a quasi-stationary state of the heat flow.

The computational model obtained was evaluated by means of an experiment in carbon steel joints A-36 caliber No. 11, welded with GMAW process. For the measurement of the temperature cycle, thermocouples located geometrically around the welded joint were used.

The analysis of the results was based on comparing the behavior of the thermal cycle measured in the physical experiment of the welded joint, and the distribution of the nodal temperature obtained by means of the software ANSYS Multiphysics, and the model was developed by finite elements.

Palabras Claves:

Distribución temperatura soldadura, simulación por elementos finitos, análisis térmico, modelo computacional, plan de soldadura, especificación del procedimiento de soldadura, ANSYS Multiphysics.

Keywords:

Welding temperature distribution, finite element simulation, thermal analysis, computational model, welding plan, specification of the welding procedure (WPS), ANSYS Multiphysics.

INTRODUCCIÓN

Con el desarrollo computacional, se han correlacionando las herramientas de simulación y de modelado respecto a los procesos de soldadura, y manufactura, mejorando el concepto de diseño en ingeniería, en procesos de fabricación cada día más sostenibles y eficientes.

Es por ello que de manera progresiva se han mejorado y renovando las técnicas computacionales mediante el uso de métodos numéricos, tales como métodos de diferencias finitas, elementos de contorno y elementos finitos, en los cuáles se encuentran incluidos los procesos de soldadura, la confiabilidad de los modelos matemáticos planteados requieren de verificación, con el fin de determinar tanto los alcances como las limitaciones, de los planteamientos asumidos por el ingeniero que estudia los fenómeno físicos intrínsecos en las uniones soldadas.

PROBLEMA

Las deformaciones en láminas de acero carbono, 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.

JUSTIFICACIÓN

Estudiar el flujo de calor mediante la evolución de temperaturas generadas durante el proceso de soldeo, es una herramienta para la optimizar el diseño de los procedimientos 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 termopares. Este estudio permitirá conocer la sensibilidad y la validez del modelo computacional propuesto, y optimizar o validar el diseño de la (WPS) planteada.

METODOLOGÍA

El diseño de la (WPS) se realizará bajo las especificaciones del código Structural Welding Code AWS D1.1 2015, para juntas a tope, en metales ASTM A-36 con un espesor de 3,04 mm o calibre 11 con presentación comercial de planchas de 3 x 8 pies en la industria. Las variables propias del proceso de soldadura con gas de protección o proceso (GMAW). Elaborando el plan de soldadura como soporte para la obtención del procedimiento de soldadura o (WPS), el cual determina las condiciones óptimas de soldeo en este tipo de láminas de acero carbono de bajos espesores, y es requerido para delimitar las condiciones necesarias para llevar a cabo el estudio del flujo de calor en la fase de modelo y experimentación. Con composición química y requisitos de tensión descritos en la tabla 1.

Tabla 1. 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]

Condiciones Metalúrgicas

La metodología para determinar la temperatura de precalentamiento, se obtuvo 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, [13] 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.

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).

Condiciones soldabilidad

El metal de aporte del proceso de soldadura seleccionado, es el alambre ER70S-6 de la clasificación AWS A5.18/A5.18M:2005 [17] (ver tabla 2 y 3), la composición química de los materiales base y los metales a soldar presentan similitud en sus componentes principales (ver tabla 1 y 2), las propiedades mecánicas del material aporte son superior tanto la resistencia a la tracción como el Límite Elástico mínimo con respecto a los metales a soldar. Este alambre es adecuado para un solo pase de soldadura, como para varios pases de soldadura, además son diseñados para el uso en láminas delgadas que tienen moderadas cantidades de impurezas, herrumbres y porosidades del material, debido a su contenido de silicio y magnesio.

El electrodo seleccionado ERS70S-6 será tanto para el pase de raíz, como de presentación.

Tabla 2. 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 [17]

Tabla 3. 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 [17]

De acuerdo con el plan de soldadura desarrollado se determinó el WPS más apropiado (ver tabla 4) en el que se resumen las condiciones térmicas, geométricas, y variables fundamentales necesarias para realizar la unión soldada, cumpliendo con un plan de soldadura adecuado a las condiciones establecidas para ser analizadas experimental y computacionalmente, la elaboración del procedimiento de soldadura o WPS. se ilustra en la tabla 4. Incluyendo la información mínima requerida por el código de diseño Structural Welding Code AWS D1.1 2015 [13] formato “Sample WPS Form (GMAW & FCAW) Welding Procedure Specification” del anexo M.

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:

Especificación procedimiento de soldadura – WPS

Tabla 4. Procedimiento de soldadura

ANNEX M — AWS D1.1/D1.1M:2015

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

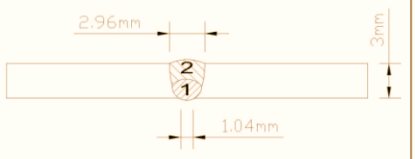
Ciclomontaña Carreño	001	1	01/Abril/17
Company Name	WPS No.	Rev. No.	Date
Manuel Carreño	01/04/17		
Authorized by	Date	Supporting PQR(s)	CVN Report

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	---

JOINT DETAILS (Sketch)



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

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	---	---						

Form M-2 (See http://go.aws.org/D1forms)

Fuente: Formato [13] http://go.aws.org/D1forms y *Autor*

Definir datos de ingeniería

EL tipo de elemento seleccionado, posee la temperatura como grado de libertad. Y se emplea el elemento SOLID70 un elemento sólido de ocho nodos (ANSYS Inc. 2016), y PLANE 55 [12]

```
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,0.0058      (Velocidad avance en 0.0058 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 (Valor de calor corregido).
```

Establecer Geometría

Establecer la geometría del modelo tridimensional de placa plana utilizando elementos sólidos cuyas dimensiones, se establecieron en la figura 1. Para el modelo se simulará una lámina de 200mm x 400 mm, dado que con solo una sección de lámina se puede simular el comportamiento térmico, debido a que es igual para cada sección, ahorrándose recursos computacionales. La entrada de calor está en función radial del tamaño del charco, con lo que no se ve afectada al solo ser simulada una sección. Inicialmente se establecen las coordenadas principales para generar dentro de ella el mallado (ver figura 2).

Figura 1. dimensiones probetas experimento

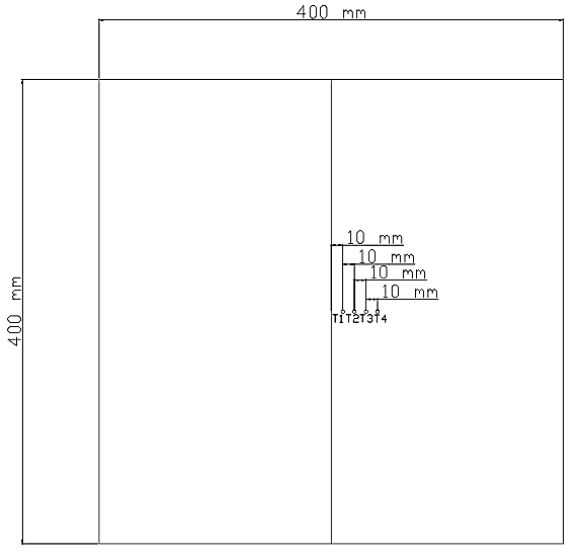
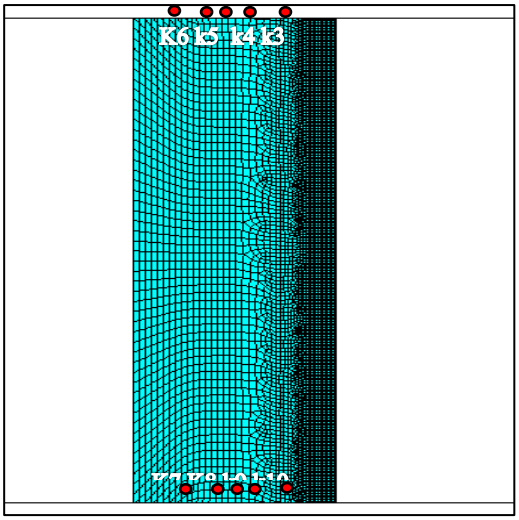


Figura 2. Arreglo Mesh con puntos de mallado

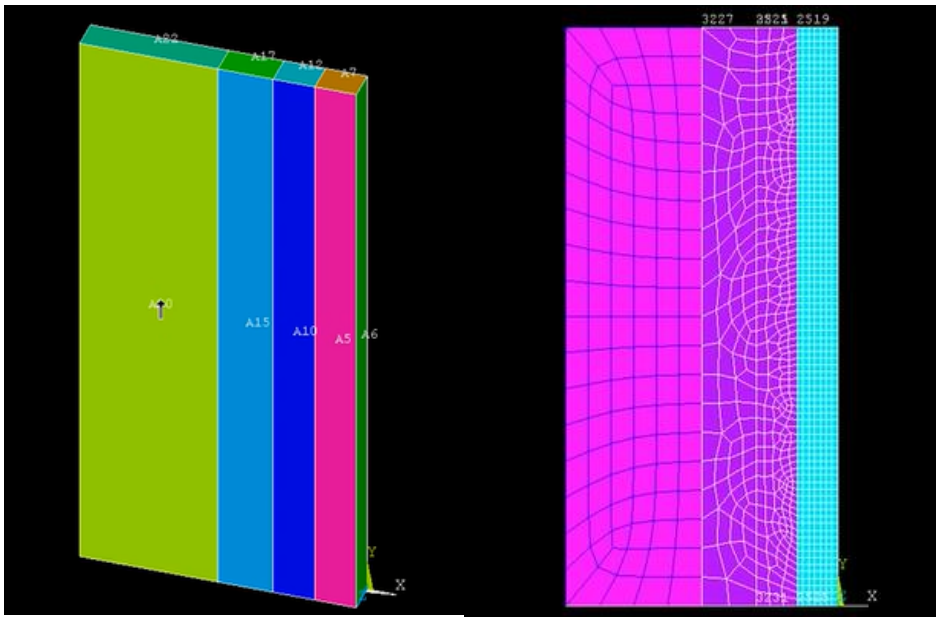


Fuente: Autor

```
K,1,0,0,0   (coordenada K1 = punto inicial  extremo derecho
superior ver figura 1)
K,2,0,L,0(coordenada K2 = extremo derecho inferior  figura 1)
K,3,-W/2*0.15,L,0 (coordenada K3 = 0.15 veces el ancho de la
lámina extremo inferior  figura 3.
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
```

El mallado disminuyen en definición, para las secciones A20, A15 y A10 con respecto a A5 con el fin de ahorrar en capacidad computacional. (ver figura 3)

Figura 3. Áreas de mallado modelo.



Fuente: Autor

Definir el comportamiento de la pieza

En este paso, se establecieron 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 5.

```
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 5. 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]

Etapa de solución:

Establecer 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 los que se obtiene el flujo de calor en cada nodo. El nodo de interés en el estudio es el T1 de la figura 1.

- Selección del avance en tiempo automático (automatic time stepping).

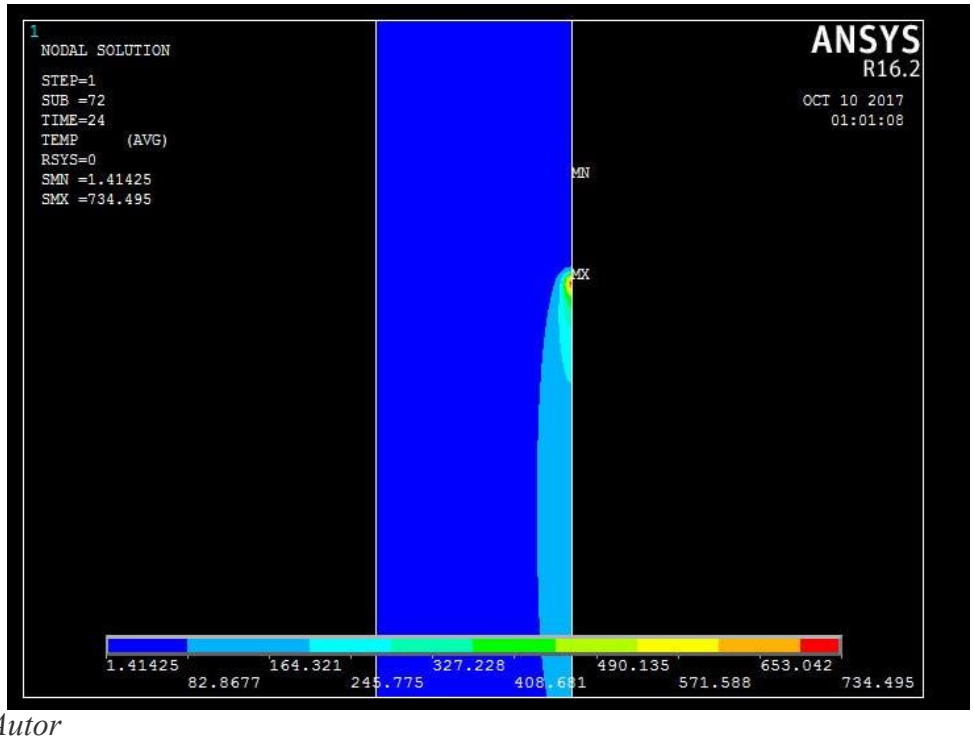
- Establecer la temperatura inicial del metal base. 20°c y del ambiente en 30°c

- Declarar 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 2 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 2.

Historial de temperaturas para la simulación.

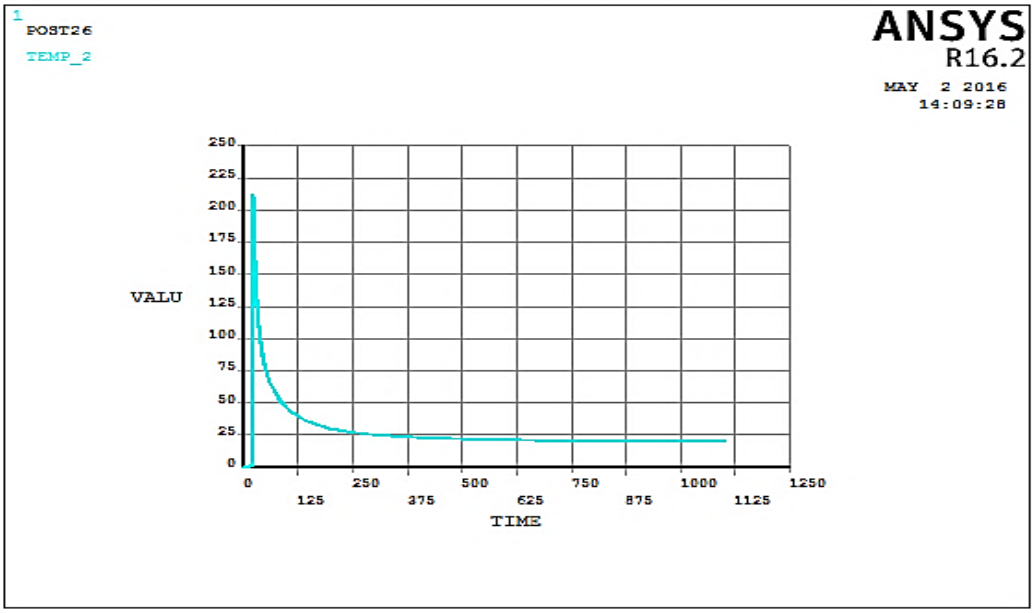
Presentación de los resultados obtenidos por el modelo computacional de temperaturas desarrollado mediante Ansys. La gráfica 1. Muestra el ciclo térmico completo obtenido para las láminas de acero A36 soldadas por el proceso GMAW, a partir del nodo 2739 que se asimila al punto de estudio a 10 mm en el modelo experimental. La lectura de temperatura del modelo en el nodo 2739 equivalente a la temperatura T1 del experimento realizado.
T'' (20 Seg) = 212 °C (Temperatura máxima)

Figura 4 Solución modelo



Fuente: Autor

Grafica 1. Historial de temperaturas T1. Hasta 1250 seg. Simulación



Fuente: Autor

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 las mediciones, ubicadas 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 termopares sobre lámina calibre 11.de acuerdo al esquema presentado (ver figura 5 y 7).

Figura 5. Montaje de termopares

Figura 6. Medición condiciones temperatura inicial.

Figura 7. Montaje de termopares.

Figura 8. Medición de voltaje experimento.

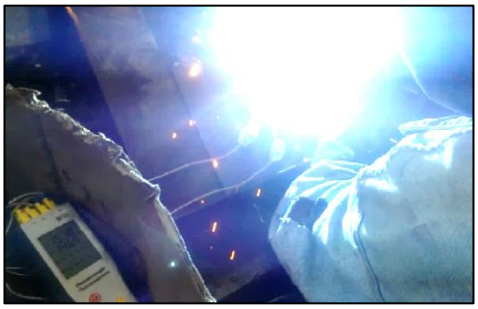
Fuente: Autor

Medición de la temperatura en los cuatro termopares, a condiciones ambientales, por medio del termómetro digital de cuatro canales. Y se dio inicio al experimento con las condiciones de temperatura iniciales de la chapa se registraron en la figura 6.

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, y el plan de soldadura planteado para este modelo (Ver figura 8).

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 6. Así mismo la gráfica 2. Muestra el ciclo térmico obtenido para el termopar ubicado a 10 mm de la unión soldada los picos de temperatura que se obtuvieron 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”.

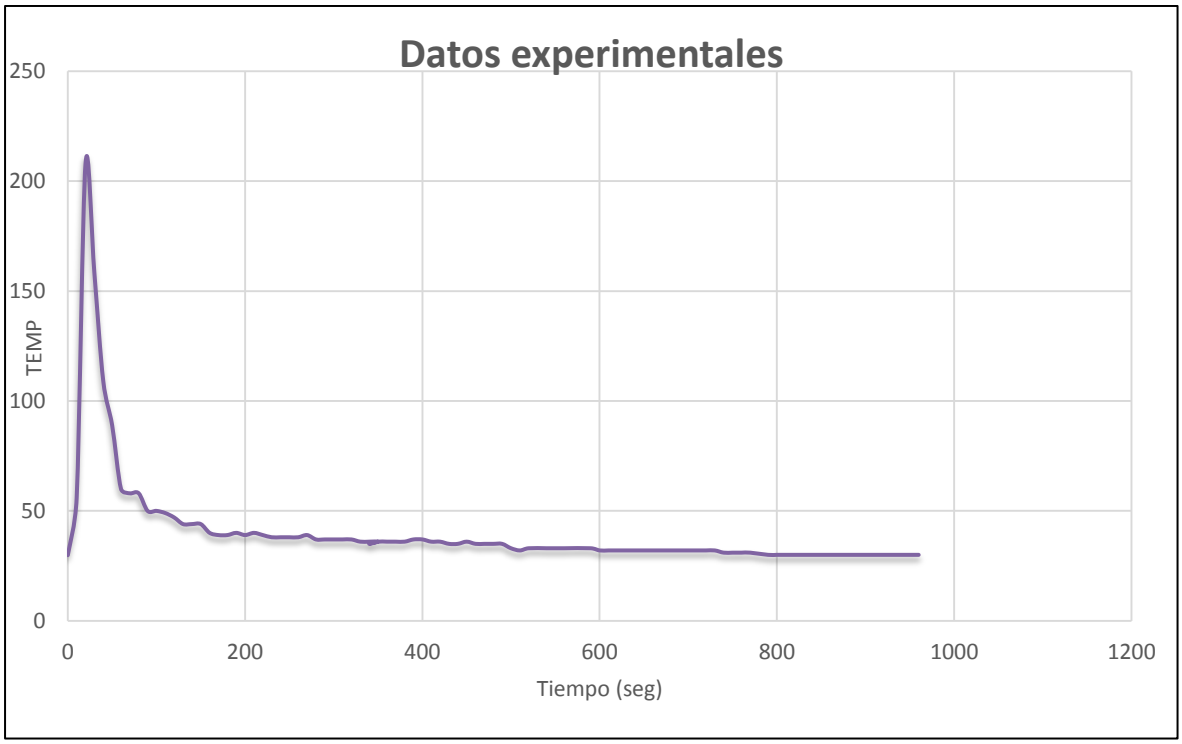
Tabla 6. Lectura de temperatura para seis tiempos en el experimento aplicando el proceso de soldadura GMAW sobre las probetas de láminas A-36.



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

Grafica 2. Historial de temperaturas T1. Hasta 985 seg.

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



Fuente: Autor

Comparación resultados modelo y experimento

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.

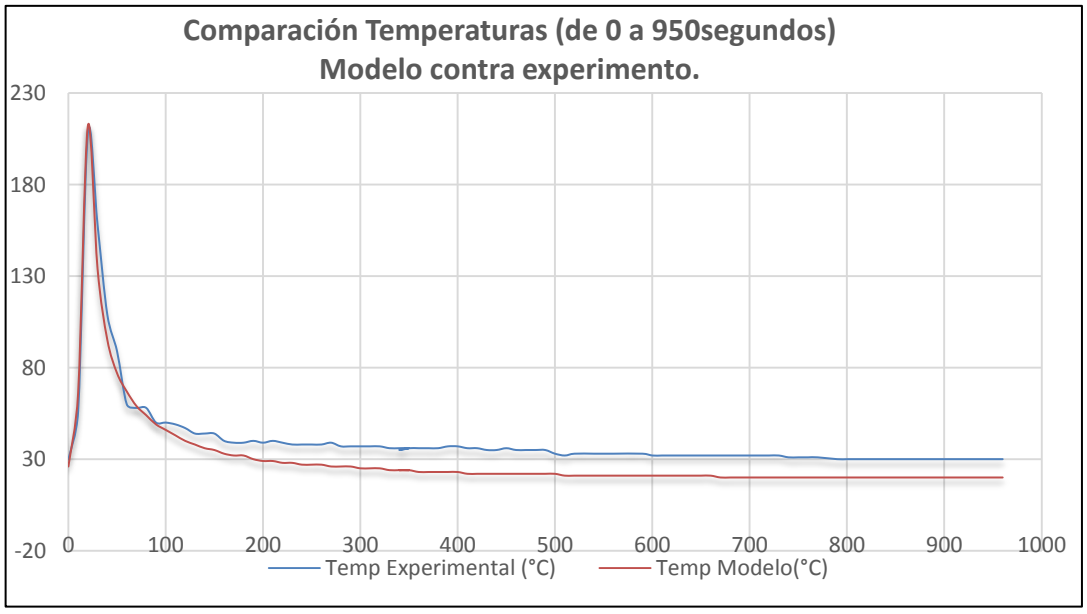
TDife= [(T’2/ T’)-1]*100 = [(212/208)-1]*100= 1,92% de error (ver tabla 7).

En la tabla 7. 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

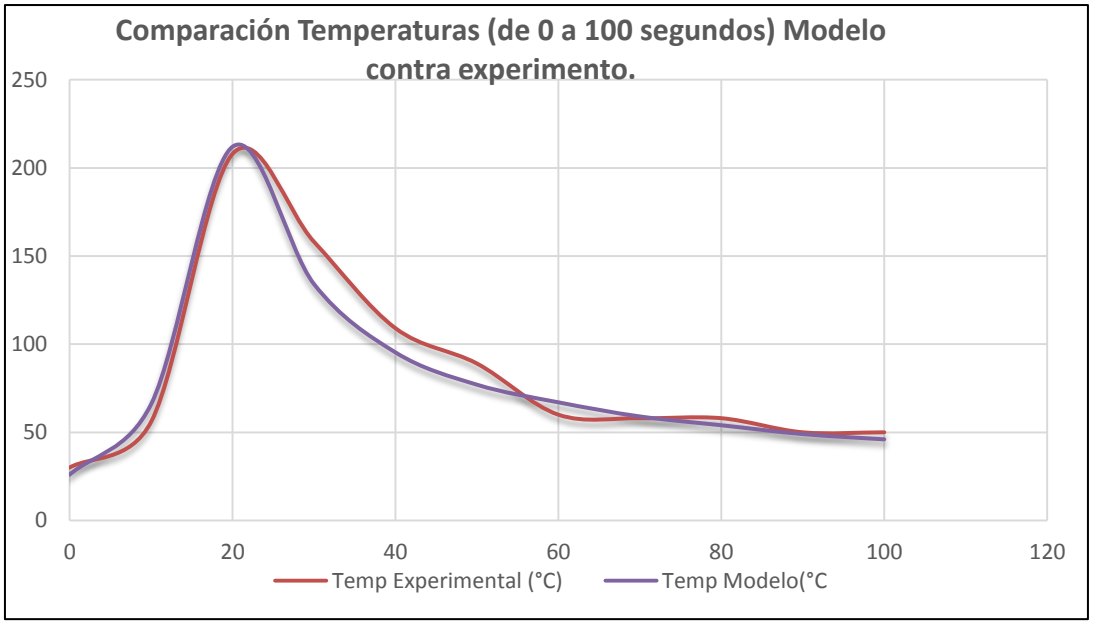
Es de desatacar que las tasas de enfriamiento calculadas por el modelo desarrollado son mayores y tienden a aumentar en el tiempo, aproximadamente después de los 100 segundos (ver gráfica 3). Se desvían significativamente para el conjunto de valores del modelo, por lo que se obtienen errores significativos 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



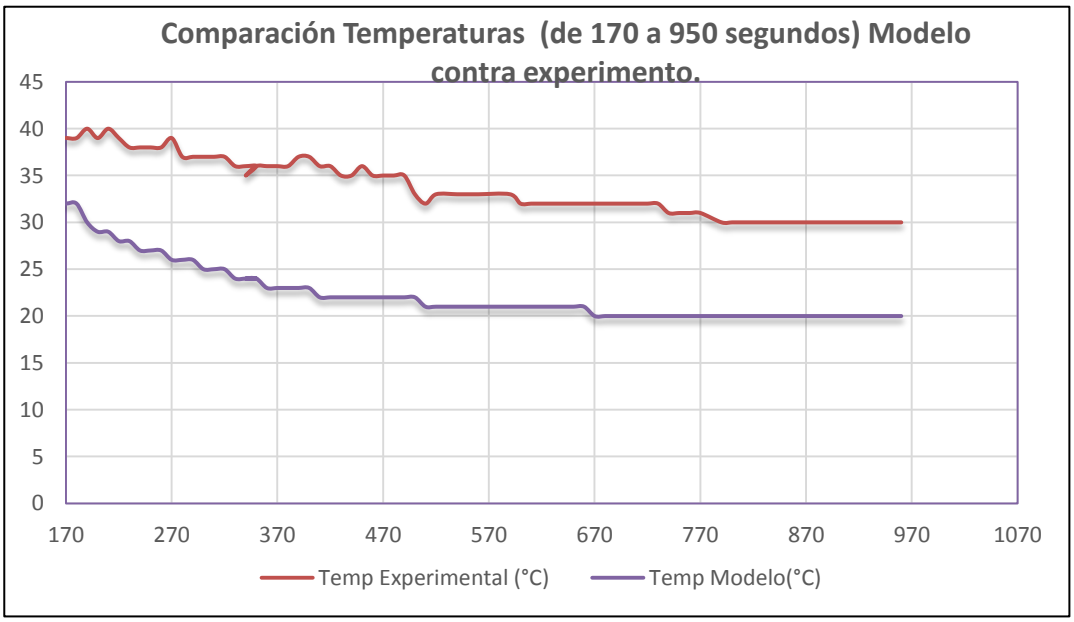
Fuente: Autor

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 7. Comparación % de error 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

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.

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.

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 de la 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.