

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

Sección de Estudios de Posgrado e Investigación
Unidad Profesional “Adolfo López Mateos”

EVALUACIÓN NUMÉRICO-EXPERIMENTAL SOBRE LA INDUCCION DE ESFUERZOS RESIDUALES POR MEDIO DEL PROCESO DE SOLDADURA TIPO TIG, MIG Y RAYO LÁSER

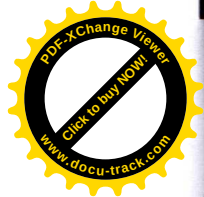
T E S I S PARA OBTENER EL GRADO DE: **MAESTRO EN CIENCIAS**

CON ESPECIALIDAD EN
INGENIERIA MECÁNICA
P R E S E N T A:
ING. MIGUEL ÁNGEL GÓMEZ GÓMEZ

DIRECTORES:
DR. GUILLERMO URRIOLAGOITIA SOSA
DR. LUIS HECTOR HERNÁNDEZ GÓMEZ



MEXICO D.F. ENERO 2012



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

SIP-14BIS

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México, D. F. siendo las 11:00 horas del día 14 del mes de Diciembre del 2011 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de E. S. I. M. E. para examinar la tesis titulada:

"EVALUACIÓN NUMÉRICO-EXPERIMENTAL SOBRE LA INDUCCIÓN DE ESFUERZOS RESIDUALES POR MEDIO DEL PROCESO DE SOLDADURA DE TIPO TIG, MIG Y RAYO LÁSER".

Presentada por el alumno:

GÓMEZ

Apellido paterno

GÓMEZ

Apellido materno

MIGUEL ÁNGEL

Nombre (s)

Con registro:

B	0	9	1	8	3	2
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACIÓN DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISION REVISORA

Directores de tesis

DR. GUILLERMO URRIOLAGOITIA SOSA

Presidente

DR. LUIS HÉCTOR HERNÁNDEZ GÓMEZ

Segundo Vocal

DR. GUILLERMO MANUEL URRIOLAGOITIA CALDERÓN

Tercer Vocal

DR. LUIS HÉCTOR HERNÁNDEZ GÓMEZ

Secretario

DR. ALEJANDRO TONATLI VELÁZQUEZ SÁNCHEZ

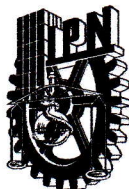
DR. JUAN ALFONSO BELTRÁN FERNÁNDEZ

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO



DR. JAIME ROBLES GARCIA

SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
COORDINACIÓN GENERAL DE POSGRADO E
INVESTIGACION

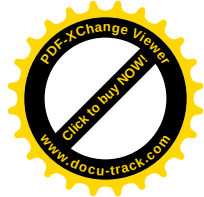
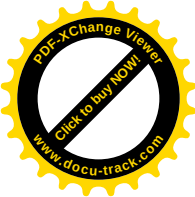
CARTA DE CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México, Distrito Federal, el día 14 del mes Diciembre del año 2011, el que suscribe, ING. MIGUEL ÁNGEL GÓMEZ GÓMEZ, alumno del Programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica opción en Diseño Mecánico con número de registro B091832, adscrito a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIME Unidad Zacatenco, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. Guillermo Urriolagoitia Sosa y el Dr. Luis Hector Hernandez Gómez y cede los derechos del trabajo titulado: "EVALUACIÓN NUMÉRICO-EXPERIMENTAL SOBRE LA INDUCCIÓN DE ESFUERZOS RESIDUALES POR MEDIO DEL PROCESO DE SOLDADURA; TIG, MIG Y RAYO LÁSER" al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, graficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: Unidad profesional "Adolfo López Mateo", Edificio número 5, 3er piso Col. Lindavista. C.P. 07738 México D.F. Tel.: 57296000 ext.: 54820. Sus comentarios pueden ser recibidos en el correo: magg_gsr@hotmail.com Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Ing. Miguel Ángel Gómez Gómez

Nombre y Firma



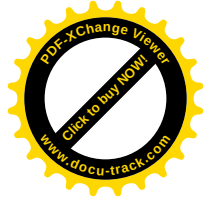
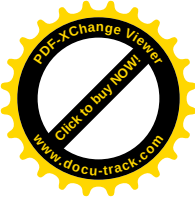
INDICE	i
INDICE DE FIGURAS	iv
INDICE DE TABLAS	ix
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xiii
OBJETIVO	xiv
JUSTIFICACION	xv
INTRODUCCION	xvii

CAPÍTULO I

I.1.- Generalidades	2
I.2.- Antecedentes históricos de soldadura en general	3
I.2.1.- Aplicación industrial de la soldadura	7
I.2.2.- Antecedentes históricos sobre el proceso de soldadura tipo TIG (GTAW)	11
I.2.3.- Antecedentes históricos en el proceso MIG ó GMAW	15
I.2.4.- Antecedentes históricos del proceso de soldadura tipo rayo láser.	17
I.3.- Esfuerzos residuales	21
I.4.- Interacción de los esfuerzos residuales y el proceso de soldadura	22
I.4.1.- Factores que intervienen en la formación de esfuerzos residuales	23
I.4.2.- Influencia de campos involucrados en el proceso de soldadura	27
I.5.-Diversos métodos utilizados en la medición de esfuerzos residuales en soldadura	28
I.6.- Planteamiento del problema	31
I.7.-Sumario	31
I.8.- Referencias	32

CAPÍTULO II

II.1.- Introducción	37
II.2.- Soldadura por arco de Tungsteno y gas (TIG)	37
II.2.1.- Gases inertes empleados en el proceso TIG	37
II.2.2.- Aplicaciones óptimas de gases inertes en el proceso de soldadura TIG	38
II.2.3.-Descripción del proceso de soldadura TIG	38
II.2.4.- Electrodo en el proceso TIG	43
II.2.5.- Tiempo y frecuencia de los impulsos	45
II.2.6.- Velocidad de soldadura	45
II.2.7.- Ventajas en el proceso TIG	45
II.2.8.- Desventajas en el proceso TIG	46
II.3.- Proceso de soldadura Gas Arco Metal (MIG)	47
II.3.1.- Equipo utilizado en el proceso MIG	48
II.3.2.- Mecanismos de transferencia del metal	50
II.3.2.1.- Transferencia por aspersión	51
II.3.2.2.- Transferencia globular	54
II.3.2.3.- Transferencia en corto circuito	55
II.3.3.- Corrientes de soldadura	57
II.3.4.- Polaridad	59
II.3.5.- Longitud del arco (voltaje del arco)	60
II.3.6.- Orientación del electrodo	61
II.3.6.1- Tamaño del electrodo	63
II.3.7.- Gas protector	63
II.3.7.1.- Gases protectores inertes (Argón y Helio) [II.14]	63



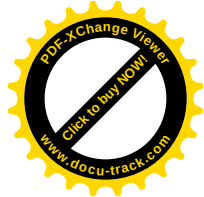
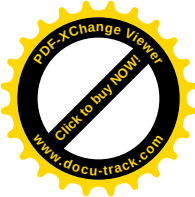
II.3.7.2.- Mezclas de Argón y Helio	64
II.3.8.- Ventajas del proceso MIG	65
II.3.9.- Desventajas en el proceso de soldadura MIG	65
II.4.- Soldadura por rayo Laser(Laser beamwelding)	66
II.4.1.- Rayo Láser adecuado para el proceso de soldadura	68
II.4.2.- Láser de gas	69
II.4.3.- Selección del sistema Láser para soldar	70
II.4.4.- Interacción Láser y metal a soldar	71
II.4.5.- Velocidad de soldadura	72
II.4.6.- Ventajas del proceso de soldadura por rayo Láser.	73
II.4.7.- Desventajas del proceso de soldadura por rayo laser	73
II.5.- Sumario	74
II.6.- Referencias.	74

CAPÍTULO III

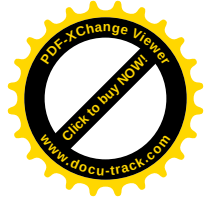
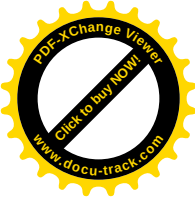
III.1.- Generalidades	77
III.2.- Simulación numérica aplicado en procesos de soldadura	77
III.3.- Selección del material	78
III.3.1.- Descripción general del material AISI 316L	79
III.3.2.-Usos comunes del Acero inoxidable AISI 316 L	80
III.3.3.-Propiedades mecánicas	81
III.3.4.- Propiedades Físicas del Acero 316L	81
III.4.- Desarrollo del análisis térmico en 3-D para el proceso TIG por MEF	82
III.4.1.- Elemento térmico solid 70 para un análisis en 3D	82
III.4.2.- Inducción de propiedades mecánicas por medio del MEF	82
III.4.3.- Modelado y mallado de la probeta	83
III.4.4.- Simulando el proceso de soldadura TIG en función del tiempo	85
III.5.- Análisis térmico en el proceso de soldadura TIG en 2D	87
III.5.1.- Elemento térmico Plane 55 para un análisis térmico en 2-D	88
III.5.2.- Modelado y mallado del espécimen TIG en 2D	88
III.5.3.-Inducción de temperaturas al espécimen 2D TIG	88
III.6.- Análisis térmico del proceso de soldadura MIG en 3D	90
III.6.1.- Modelado y mallado utilizado en el espécimen MIG	91
III.6.2.- Declaración de análisis trascendental en 3D	92
III.6.3.- Inducción de la potencia térmica	93
III.7.- Análisis en 2D del proceso MIG	96
III.7.1.- Modelado y mallado del espécimen MIG en 2D	96
III.7.2.- Inducción de temperaturas al espécimen 2D MIG	96
III.8.- Análisis en 3D del proceso de soldadura basado en Rayo Láser	98
III.8.1.- Modelado y mallado utilizado en el espécimen MIG	99
III.8.2.- Declaración de análisis trascendental en Láser 3D	100
III.8.3.- Inducción de la potencia térmica en proceso de soldadura por rayo láser	100
III.9.-Análisis en 2D del proceso MIG	104
III.9.1.- Modelado y mallado del espécimen MIG en 2-D	104
III.9.2.Inducción de temperaturas al espécimen 2D en proceso de soldadura láser	105
III.10.- Sumario	107
III.11.- Referencias	107

CAPÍTULO IV

IV.1.- Generalidades	109
----------------------	-----



IV.2.- Selección de elemento para análisis estático en 3D para TIG, MIG y rayo Láser	109
IV.2.2.- Inducción de propiedades mecánicas y termodependientes para un análisis no lineal en el proceso TIG, MIG y rayo Láser	109
IV.2.3.- Propiedades termodependientes para el análisis estructural	110
IV.2.4.- Modelado y mallado para análisis estático en 3D TIG, MIG y rayo Láser	111
IV.2.5.- Resumen de la estructura de un análisis acoplado	113
IV.2.6.- Aplicación de cargas térmicas transcendentales para un análisis estático, aplicando el archivo rth. (TIG, MIG y Láser)	114
IV.2.7.- Condiciones de frontera aplicados en análisis estructural, del proceso de soldadura TIG y MIG 3D.	116
IV.3.- Elemento Plane 42 para el análisis estructural TIG, MIG y rayo Láser en 2D	122
IV.3.1.- Inducción de propiedades mecánicas y térmicas al análisis estático en el proceso TIG, MIG y rayo Láser 2D	123
IV.3.2.- Inducción de cargas térmicas al análisis estático en el proceso TIG, MIG Rayo Laser 2D	123
IV.3.3.- Condición de frontera en el análisis 2D	124
IV.4.- Sumario	127
CAPÍTULO V	
V.1.- Generalidades	129
V.2.- Aplicación del método de respuesta de grieta en análisis estructural de los procesos de soldadura TIG, MIG y rayo Láser en 2D	129
V.2.1.- Casos de estudio.	129
V.2.2.- Aplicación de método CCM en los análisis 2D (TIG, MIG y Rayo Láser)	130
V.3.- Aplicación del método de respuesta de grieta en análisis estructural de los procesos de soldadura TIG, MIG y rayo Láser en 3D	135
V.3.1.- Casos de estudio	135
V.3.2.- Inducción del corte en los análisis 3D	136
V.3.3.- Selección del nodo en análisis 3D	136
V.4.- Sumario	137
CAPÍTULO VI	
VI.1.- Generalidades	139
VI.2.- Diseño de la probeta para TIG y MIG	139
VI.3.- Casos de estudio	140
IV.4.-Maquinado de las probetas	140
VI.5.- Relevado de esfuerzos en probetas	141
VI.6.-Proceso de soldadura en probetas TIG	142
VI.7.-Proceso de soldadura en probetas MIG	144
VI.8.- Instrumentación de las probetas TIG y MIG	146
VI.9.- Corte por electroerosión para el método de respuesta de grieta	149
VI.10.-Sumario	152
CAPÍTULO VII	
VII.1.- Resultados en el análisis térmico del proceso de soldadura TIG 3D	154
VII.1.2.- Resultados en análisis térmico TIG en 2D	157
VII.2.- Resultados en análisis térmico del proceso de soldadura MIG 3D	160
VII.2.1.- Resultados del análisis térmico de proceso de soldadura MIG 2D	161



VII.3.- Resultados de análisis térmico del proceso Láser en 3D	163
VII.3.1.- Resultados de análisis térmico del proceso Láser en 2D	165
VII.4.-Resultados del análisis estructural TIG	167
VII.4.1.- Resultados del análisis TIG 2D Estructural	171
VII.5.- Resultados del análisis MIG 3D	173
VII.5.1.- Resultado del análisis estructural MIG 2D	175
VII.6.- Resultados del análisis estructural Láser 3D	177
VII.6.1.- Resultados en el análisis Láser 2D	179
VII.7.- Resultados del método de respuesta de grieta en ambas metodologías	181
VII.7.1.- Método de respuesta de grieta en Ansys TIG	181
VII.7.2.- Resultados del análisis experimental CCM TIG	183
VII.7.3.- Resultados del análisis CCM numérico MIG	187
VII.7.4.- Resultados del análisis CCM numérico MIG	188
VII.7.5.- Resultados del análisis numérico CCM Láser.	191
VII.7.6.- Resultados del análisis experimental CCM Láser.	192
VII.8.- Conclusiones	193
VII.9.- Referencias	202

ÍNDICIE DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura I.1.- Pilar de Hierro de Delhi	2
Figura I.2.- Humphry Davy	3
Figura I.3.- Reproducción de un antiguo gravado de un taller de soldadura	4
Figura I.4.- Inversiones de polaridad	5
Figura I.5.- Soldadura por aplicación de soplete	6
Figura I.6.- Soldadura por arco soplado	7
Figura I.7.- Soldadura por arco eléctrico con electrodo metálico	8
Figura I.8.- The Baldwin Locomotive Works en 1931.	8
Figura I.8.- Electrodo con recubrimiento empleado en la actualidad	8
Figura I.9.- Proceso de soldadura. a) Antes. b) Después.	10
Figura I.10.- Historia de la soldadura [I.23]	11
Figura I.11.- Sistema implementado para soldar por medio de electrodo con recubrimiento	12
Figura I.12.- Procedimiento de soldadura TIG	13
Figura I.12.- Sistema de soldadura tipo TIG	15
Figura I.13.- Proceso MIG.	16
Figura I.13.- Sistema de soldadura tipo MIG	17
Figura I.13.- Diseño presentado por Theodoro H. Maiman con la finalidad de obtener la patente del rayo láser por Rubí, el cual es excitado por una lámpara de destello [I.34]	19
Figura I.14.- Sistema de soldadura tipo rayo láser automatizado	21
Figura I.14.- Clasificación de esfuerzos residuales	22
Figura I.15.- Tipos principales en la clasificación del agrietamiento.	23
Figura I.16.- Tipos principales en la clasificación del agrietamiento	25
Figura I.17.- Microestructura del acero afectada en el proceso de soldadura. a) Ferrita. b) Bainita. c) Perlita. d) Martensita.	27
Figura I.18.- Influencia entre campos en el proceso de soldadura [I.49]	28

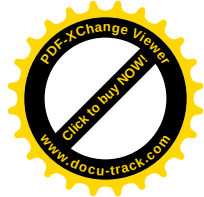
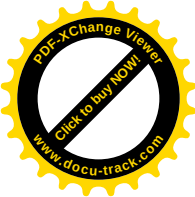
**CAPÍTULO II**

Figura II.1.- Proceso de soldadura por arco de Tungsteno y gas	39
Figura II.2.- Equipo para el sistema de soldadura TIG o GTAW [II.2]	40
Figura II.3.- Forma correcta de comenzar el arco eléctrico en el proceso TIG	43
Figura II.3.- Posibles formas del electrodo de Tungsteno	43
Figura II.4.- Proceso de soldadura por arco de metal	47
Figura II.5.- Equipo empleado en el proceso de soldadura MIG	49
Figura II.6.- Transferencia por aspersión axial	52
Figura II.7.- Características de corriente de soldadura de arco de rocío a pulsos [II.14]	53
Figura II.8.- Transferencia globular no axial [II.14]	55
Figura II.9.- Transferencia de metal en cortocircuito [II.14]	56
Figura II.10.- Corrientes de soldadura típica contra las velocidades de alimentación del alambre para electrodos de acero inoxidable de la serie 300. [II.14]	57
Figura II.11.- Corrientes de soldadura contra velocidad de alimentación del alambre para electrodos de acero Aluminio ER4043 [II.14]	58
Figura II.12.- Corrientes de soldadura típica contra las velocidades de alimentación del alambre para electrodos de acero inoxidable de la serie 300. [II.14]	58
Figura II.13.- Polaridad en un equipo MIG	59
Figura II.14.- Efecto de la posición del electrodo	62
Figura II.15.- Clasificación de soldadura por rayo Láser	67
Figura II.16.- Soldadura por Rayo Láser en la industria [II. 22]	69
Figura II.15.- Clasificación de los metales unificados por Láseres de CO2 [II.23]	72
Figura II.16.- Grafica de profundidad vs velocidad	73

CAPÍTULO III

Figura III.1.- Materiales que se pueden soldar, por proceso MIG y TIG. [III.1]	78
Figura III.2.- AISI 316 en barra y en lámina	79
Figura III.3.- Aplicaciones industriales del acero AISI 316L [III.5]	80
Figura III.4.- Aplicaciones del acero inoxidable 316L	80
Figura III.5.- Medidas del espécimen	83
Figura III.6.- Modelado de probetas para proceso TIG, MIG y Rayo Láser	83
Figura III.7.- Mallado utilizado por Pozo-Morejón en el cual la zona afectada térmicamente	84
Figura III.8.- Mallado utilizado	84
Figura III.9.- Colocación de carga térmica en el primer pasó en un tiempo de 4 seg.	85
Figura III.10.- Colocación de carga térmica en el último paso TIG	86
Figura III.11.- Grafica de comportamiento térmico con respecto al tiempo en un espécimen 3-D, en el proceso de soldadura TIG	86
Figura III.12.- Temperatura del espécimen a los 2500 segundos	87
Figura III.12.-Modelado de espécimen en 2D para el análisis térmico del proceso TIG	88
Figura III.13.- Aplicación de carga térmica en los nodos en el primer pasó	89
Figura III.14.-Primer paso de carga térmico en análisis 2D TIG	89
Figura III.15.-Especimen en equilibrio térmico	90
Figura III.16.-Comportamiento de temperatura con respecto al tiempo	90
Figura III.17.- Medidas del modelo utilizado en Ansys	91
Figura III.18.- Mallado utilizado en espécimen MIG	91
Figura III.19.-Pasos de carga	93
Figura III.20.- Primer paso carga en el análisis 3-D MIG.	94
Figura III.21.- Paso de carga 10 a 40 seg.	95
Figura III.22.-Gráfica de comportamiento térmico en función del tiempo	95

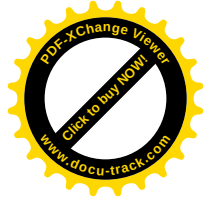
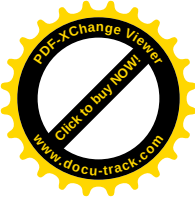


Figura III.23.-Modelado de espécimen en 2D para el análisis térmico del proceso MIG	96
Figura III.24.- Aplicación de carga térmica en los nodos en el primer pasó	97
Figura III.25.-Primer paso de carga térmico en análisis 2-D MIG	97
Figura III.24.- Aplicación de carga térmica en los nodos en el primer pasó	97
Figura III.25.-Primer paso de carga térmico en análisis 2-D MIG	97
Figura III.26.-Espécimen en equilibrio térmico	98
Figura III.27.- Grafica temperatura vs tiempo, proceso MIG 2-D	98
Figura III.28.- Medidas del modelo utilizado	99
Figura III.29.- Mallado utilizado en espécimen Láser.	99
Figura III.30.-Inducción de cargas térmicas en Ansys	101
Figura III.31.- Proceso de soldadura por rayo Láser en el primer paso de carga.	102
Figura III.32.-Pasos de carga	102
Figura III.33.-Grafica Temperatura Vs Tiempo en el proceso de soldadura por Láser de gas.	103
Figura III.34.- probeta en equilibrio térmico	103
Figura III.35.-Modelado de espécimen en 2D para el análisis térmico del proceso rayo Láser	104
Figura III.36.-Mallado en el espécimen 2-D rayo Láser	104
Figura III.37.- Primer paso de carga en proceso de soldadura por rayo Láser de gas	106
Figura III.38.- Grafica Temperatura Vs Tiempo en proceso de rayo Láser	106
Figura III.39.- Equilibrio térmico en proceso de rayo Láser	107

CAPÍTULO IV

Figura IV.1.- Medidas del espécimen	111
Figura IV.2.- Modelado de probetas para proceso estructural TIG, MIG y rayo Láser	112
Figura IV.3.- Mallado utilizado en análisis estructural 3D TIG	112
Figura IV.4.- Resumen estructural de un análisis acoplado	113
Figura IV.5.- Archivo del análisis térmico	114
Figura IV.6.- Proceso de inducción de cargas	115
Figura IV.7.- Tiempo y pasos del análisis térmico en Ansys	115
Figura IV.8.- Restricciones de movimiento impuestas al modelo mecánico por Pozo Morejón [IV.2]	116
Figura IV.9.- Condiciones de frontera aplicados al proceso TIG y MIG en 3D	117
Figura IV.10.- Condiciones de frontera	117
Figura IV.11.- Aplicación de presión en el proceso de soldadura Láser	118
Figura IV.12.- Campo de tensiones transversales, para el primer pasó de carga en proceso TIG	119
Figura IV.13.- Campo de esfuerzos longitudinales, para el primer pasó de carga en TIG	120
Figura IV.14.- Campo de esfuerzos transversales, para el pasó de carga número 10 en TIG	121
Figura IV.15.- Campo de esfuerzos longitudinales para el pasó de carga número 10 en TIG	122
Figura IV.16.- Pasos de carga para el análisis estructural	124
Figura IV.17.- Condiciones de frontera en análisis TIG y MIG 2D	125
Figura IV.18.- Condiciones de frontera en análisis estructural en soldadura Láser 2D	125
Figura IV.19.- Primer paso de carga en proceso de soldadura TIG 2D (Longitudinal)	126
Figura IV.20.- Primer paso de carga en proceso de soldadura TIG 2D (Transversal)	126

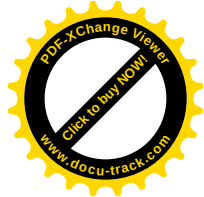
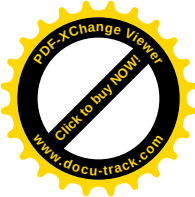
**CAPÍTULO V**

Figura V.1.- Casos de estudio para el método de respuesta de grieta en los análisis 2D	130
Figura V.2.- Comandos para la simulación del corte	131
Figura V.3.- Dirección del corte	131
Figura V.4.- Procedimiento de corte	132
Figura V.5.- Nodo 45 seleccionado para la medición de microdeformaciones	132
Figura V.6.- Lista de resultados por nodos en Ansys	133
Figura V.7.- Casos de estudio para el método de respuesta de grieta en los análisis 3D	135
Figura V.8.- Comando utilizado en la eliminación de elementos	136
Figura V.9.- Probeta utilizada en el análisis experimental TIG	136
Figura V.10.- Probeta utilizada en el análisis numérico TIG	137

CAPÍTULO VI

Figura VI.1.- Medidas de la probeta en isométrico	139
Figura VI.2.- Especímenes por cada caso de estudio	140
Figura VI.3.- Especificaciones de probetas de acero inoxidable 316L	141
Figura VI.4.- Probetas	141
Figura VI.5.- Horno utilizado en el proceso de recocido	142
Figura VI.6.- Angulo de aplicación para el proceso TIG	143
Figura VI.7.- Distancia recomendada para el proceso de soldadura	143
Figura VI.8.- Proceso de soldadura TIG	144
Figura VI.9.- Probetas de Acero inoxidable 316L, soldadas bajo el proceso TIG	144
Figura VI.10.- Condiciones similares para los procesos de soldadura TIG y MIG	145
Figura VI.11.- Proceso de soldadura MIG	146
Figura VI.12.- Colocación se la galga	146
Figura VI.13.- Pegado de galga en el cristal	147
Figura VI.14.- Colocación de la cinta adhesiva sobre la galga	147
Figura VI.15.- Probeta cubierta con M-COAT-A, AIR-DRYING POULYURETHANE COATING y M-COAT-B NITRILE RUBER COATING	148
Figura VI.16.- Planteamiento de cortes para el CCM	149
Figura VI.17.- Maquina de electroerosión por penetración SODICK	149
Figura VI.18.- Corte electroerosión por penetración	150
Figura VI.19.- Corte electroerosión por hilo	151
Figura VI.20.- Modalidad de grafica para el método de respuesta de grieta	151
VI.10.- Sumario	152

CAPÍTULO VII

Figura VII.1.- Primer paso de carga en análisis MIG	154
Figura VII.2.- Comportamiento de temperatura con respecto al tiempo TIG 3D	155
Figura VII.3.- Equilibrio térmico del espécimen TIG	155
Figura VII.4.- Proceso TIG en el segundo 39 justo en el final del proceso	156
Figura VII.5.- Pirometro Óptico	157
Figura VII.6.- Primer paso de carga en análisis TIG 2D	157
Figura VII.7.- Grafica de temperatura VS tiempo Análisis 2D TIG	158
Figura VII.8.- Análisis térmico TIG 2D, a los 3600 segundos	158
Figura VII.9.- Equilibrio térmico en análisis TIG 2D	159
Figura VII.11.- Primer paso de carga en análisis MIG 3D	160
Figura VII.12.- Grafica de comportamiento de temperatura nodo 4001	160
Figura VII.12.- Grafica de comportamiento de temperatura nodo 4001	160
Figura VII.13.- Ultimo pasó de carga en análisis térmico MIG	161

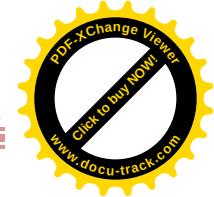
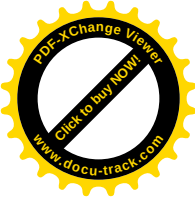


Figura VII.14.- Primer pasó de carga en análisis térmico MIG 2D	161
Figura VII.15.- Grafica del nodo 1 análisis MIG	162
Figura VII.16.- Último paso del análisis MIG 2-D, en equilibrio térmico	162
Figura VII.17.- Comparación de análisis MIG 3D y 2D	163
Figura VII.18.- Primer paso de carga en el análisis Láser 3D	163
Figura VII.19.- Grafica de comportamiento térmico en el análisis Láser 3D	164
Figura VII.20.- Equilibrio térmico en análisis láser 3-D	164
Figura VII.21.- Primer paso de carga en el análisis Láser	165
Figura VII.22.-Grafica del nodo 1 en el análisis térmico Láser 2D	165
Figura VII.23.- Equilibrio térmico en análisis láser 3D	166
Figura VII.24.- Grafica de dispersión de calor en proceso Láser	166
Figura VII.25.- Resultados longitudinales del análisis estático TIG con fuente térmica	167
Figura VII.26.- Resultados Transversales del análisis estático TIG con fuente térmica	167
Figura VII.27.- Resultados longitudinales de media probeta del análisis estático TIG	168
Figura VII.28.- Resultados del análisis estático transversal	169
Figura VII.29.- Esfuerzos residuales longitudinales en el proceso TIG	170
Figura VII.30.- Esfuerzos residuales longitudinales por elementos (TIG)	170
Figura VII.31.- Campo de esfuerzos con fuente térmica TIG 2D	171
Figura VII.32.- Esfuerzos residuales transversales en el proceso TIG	172
Figura VII.33.- Esfuerzos residuales longitudinales en el proceso TIG	172
Figura VII.34.- Esfuerzos Transversales MIG	173
Figura VII.35.- Esfuerzos Residuales transversales MIG	174
Figura VII.36.- Esfuerzos residuales longitudinales MIG 3D	174
Figura VII.37.- Esfuerzos residuales longitudinales Seleccionados MIG	175
Figura VII.38.- Primer paso de carga en el análisis estructural MIG 2D	175
Figura VII.39.- Esfuerzos residuales transversales MIG 2D	176
Figura VII.40.- Esfuerzos residuales longitudinales MIG 2D	176
Figura VII.41.- Elementos seleccionados para mejorar apreciación de resultados longitudinales	177
Figura VII.42.- Primer paso de carga para el análisis Láser	177
Figura VII.43.- Campo de esfuerzos residuales en análisis láser transversales	178
Figura VII.44.- Esfuerzos longitudinales en el proceso Láser	178
Figura VII.45.- Esfuerzos del proceso laser con fuente térmica 2D	179
Figura VII.46.- Esfuerzos residuales transversales del proceso Láser	179
Figura VII.47.- Esfuerzos residuales longitudinales análisis Láser 2-D	180
Figura VII.48.- Esfuerzos residuales de elementos seleccionados Láser 2D	180
Figura VII.49.- Resultados del análisis numérico TIG CCM 2D y 3D 5 mm	182
Figura VII.50.- Resultados del análisis TIG CMM 2-D y 3-D numérico	182
Figura VII.51.- Resultados en el método CCM experimental TIG 3 mm	183
Figura VII.52.- Resultado del método CCM TIG 5 mm experimental	184
Figura VII.53.- Resultado del método CCM TIG 7 mm experimental	184
Figura VII.54.- Resultado del método CCM TIG	185
Figura VII.55.- Resultados obtenidos del programa FORTRAM TIG 3mm	185
Figura VII.56.- Resultados obtenidos del programa FORTRAM TIG 5mm	186
Figura VII.57 Resultados obtenidos por el programa FORTRAM TIG 7mm	186
Figura VII.58.- Comparación de resultados CCM TIG	187
Figura VII.59.- Grafica obtenida del análisis numérico MIG 2-D 3mm	187
Figura VII.60.- Resultado del corte por electroerosión MIG 3mm	188
Figura VII.61.- Resultado del corte por electroerosión MIG 5mm	188
Figura VII.62.- Resultado del corte por electroerosión MIG 7mm	189

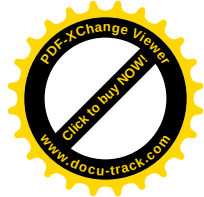
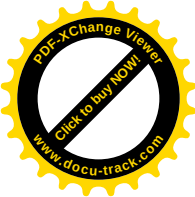


Figura VII.63.- Comparación de los tres casos de estudio	189
Figura VII. 64.- Campo de esfuerzos residuales en la probeta MIG 3mm	190
Figura VII. 65.- Campo de esfuerzos residuales en la probeta MIG 5mm	190
Figura VII. 66.- Campo de esfuerzos residuales en la probeta MIG 7mm	191
Figura VII.67.- Comparación de campos residuales MIG	191
Figura VII.68.- Deformaciones muy pequeñas o igual a cero en el método CCM	192
Figura VII.69.- Comparación de temperaturas de los tres procesos	193
Figura VII.70.- Valor de esfuerzos para el proceso TIG en la inducción de la fuente térmica	193
Figura VII.71.- Distribución de los esfuerzos residuales en una unión soldada a tope	194
Figura VII.73.- Distribución de esfuerzos residuales en el análisis 3-D TIG	194
Figura VII.74.- Interpretación de resultados longitudinales	195
Figura VII.75.- Grafica de resultados longitudinales a 3 mm TIG	195
Figura VII.76.- Grafica de resultados longitudinales a 5 mm TIG	196
Figura VII.77.- Grafica de resultados longitudinales a 7 mm TIG	196
Figura VII.78.- Grafica de resultados longitudinales a 3 mm MIG	197
Figura VII.79.- Grafica de resultados longitudinales a 5 mm MIG	197
Figura VII.80.- Grafica de resultados longitudinales a 7 mm MIG	198
Figura VII.81.- Grafica de resultados longitudinales a 3 mm Láser	198
Figura VII.82.- Grafica de resultados longitudinales a 5 mm Láser	199
Figura VII.83.- Grafica de resultados longitudinales a 7 mm Láser	199
Figura VII.84.- Interpretación de resultados para el análisis transversal en 2-D	200
Figura VII.85.- Resultados para el análisis transversal en TIG	200
Figura VII.86.- Resultados para el análisis transversal MIG	201
Figura VII.87.- Resultados para el análisis transversal Láser	201

INDICE DE TABLAS

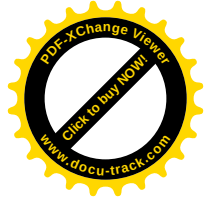
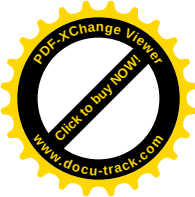
CAPÍTULO I

CAPÍTULO II

Tabla II.1.- Aplicación de gas inerte en diferentes materiales [II.4]	38
Tabla II.2.- Corrientes necesarias en el proceso de soldadura TIG	41
Tabla II.3.- Electrodo en función de la corriente y diámetro [II.2]	44
Tabla II.4.- Material de adición del oxido en el electrodo [II.2]	44
Tabla II.5.- Código de colores por norma ISO 4868 [II.5]	44
Tabla II.6.- Corrientes de transición de globular a aspersión para diversos electrodos [II.15]	53
Tabla II.7.- Voltajes de arco típicos para soldadura por arco de metal y gas de diversos metales [II.11]	60
Tabla II.8.- Porcentajes de gas para soldadura por cortocircuito [II.2]	64
Tabla II.9.- Parámetro a considerar en el proceso de soldadura por laser [II.23].	70

CAPÍTULO III

Tabla III.1.- Propiedades Mecánicas del Acero inoxidable AISI 316L [III.3]	81
Tabla III.2.- Propiedades físicas del acero inoxidable AISI 316 L	81
Tabla III.3.- Propiedades termo dependientes del acero 316L	81



Contenido

x

CAPÍTULO IV

Tabla IV.1.- Propiedades físicas del acero inoxidable 316L	110
Tabla IV.2 Propiedades termo dependientes del acero 316L [IV.1]	110
Tabla IV.3.- Datos de la gráfica esfuerzo-deformación	111

CAPÍTULO V

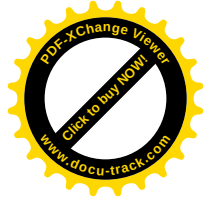
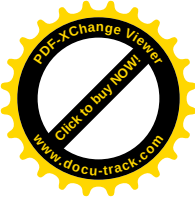
Tabla V.1.- Resultados de las microdeformaciones en el proceso TIG 2D	134
---	-----

CAPÍTULO VI

Tabla VI.1.- Número de probetas por cada caso de estudio	140
Tabla VI.2.- Aplicación de gas inerte en diferentes materiales	143
Tabla VI.3.- Selección de electrodo, gas protector y corriente	145

CAPÍTULO VII

Tabla VII.1.- Resultados análisis TIG	181
Tabla VII.2.- Resultados análisis MIG	181
Tabla VII.3.- Resultados análisis Láser	181



RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se pretende delimitar el análisis a procesos de soldadura con el objetivo principal de conocer el campo de esfuerzos residuales causados por las altas temperaturas. Por lo cual se procurará el recopilar en esta tesis la información más relevante en el proceso de soldadura así como la evaluación de esfuerzos residuales, en un Acero Inoxidable 316L el cual puede ser utilizado en la manufactura de prótesis biocompatibles con el ser humano.

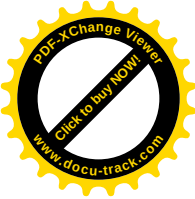
El primer Capítulo está compuesto por el estado del arte en el cual se describe desde la primera aplicación así como la evolución a través del tiempo. Los factores que impulsaron su aplicación en el sector industrial convirtiéndose en un proceso fundamental en la unificación de materiales.

A continuación en el Capítulo II se describe de forma detallada el procedimiento teórico con el objetivo de realizar el proceso de soldadura TIG, MIG y Rayo Láser. Considerando los complementos para cada proceso, es decir tipo de Electrodo, Gas protector, Amperaje, Voltaje, y el tipo de material.

Para el Capítulo III se desarrolla la primera fase del análisis numérico desarrollado en ANSYS, la cual consiste en realizar un análisis térmico del tipo transitorio, ya que la inducción de la fuente térmica está en función del tiempo al igual que el fenómeno de la convección térmica. En este capítulo se realizan análisis para cada proceso de soldadura mencionado anteriormente en 2-D y 3-D. Estos análisis son fundamentales ya que el archivo de resultados en RTH será esencial en el capítulo IV. Este análisis es del tipo no-lineal ya que son utilizados datos termodependientes.

En el Capítulo IV se modelan y mallan nuevamente las probetas utilizadas en el análisis térmico, con la diferencia de que el elemento cambia ya que en este capítulo se realizara el análisis acoplado del tipo estructural. Ya que los resultados del análisis térmico se insertaran como cargas estáticas en este análisis obteniendo los esfuerzos residuales ocasionados por la inducción de altas temperaturas en las probetas. Este análisis es del tipo no-lineal ya que son utilizados datos termodependientes y la gráfica esfuerzo deformación.

Después en el Capítulo V se realiza la simulación en Elemento Finito del método de respuesta de grieta. Este método es del tipo experimental-destructivo y el desarrollarlo en ANSYS, permite

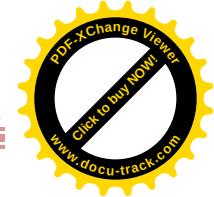
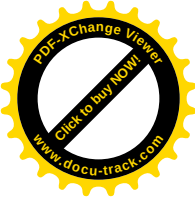


obtener resultados para ser comparados con el análisis experimental. Este método consiste en eliminar o inducir cortes controlados a la probeta, en este caso se requiere eliminar elementos mallados en las probetas permitiendo simular el fenómeno real del tipo experimental.

Para el Capítulo VI se explica el procedimiento detallado para realizar el método de respuesta de grieta en probetas soldadas, así como la instrumentación de las probetas con galgas extensométricas. Se explica la importancia del porque realizar el corte con el método de electroerosión.

Como registrar las microdeformaciones obtenidas a través del puente de *Wheatstone*, para que la gráfica de la curva obtenida se introduzca a un programa computación con plataforma en FORTRAM, los resultados obtenidos se graficaran de tal manera que los esfuerzos obtenidos estarán en función de la profundidad de los cortes realizados a la probeta.

Por último se obtuvieron una serie de conclusiones que conducen a la discusión de los resultados obtenidos en los análisis realizados en 2-D y 3-D, de ambas metodologías y se plantean las opciones para trabajos futuros.

**ABSTRACT**

In the present research is to define the welding process analysis with the main objective to know the residual stress field caused by high temperatures. Therefore the collection efforts will be made in this thesis the most important in the soldering process and the evaluation of residual stresses in a 316L stainless steel which can be used in the manufacture of prostheses biocompactibles with humans.

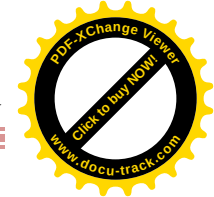
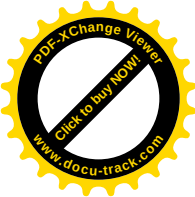
The first chapter is composed of the state of the art which describes the first application and the evolution over time. The factors that prompted its application in industry becoming a fundamental process in the unification of materials.

Then in Chapter II describes in detail the theoretical procedure in order to perform TIG welding, MIG and laser. Considering the supplements for each process, ie type of electrode, shielding gas, amperage, voltage, and type of material.

For Chapter III develops the first phase of the numerical analysis developed in ANSYS, which is to produce a transient thermal analysis of the type, since the induction of the heat source is a function of time as the phenomenon of thermal convection . In this chapter, analysis is performed for each welding process mentioned above in 2-D and 3-D. These tests are essential because the output file will be essential RTH in Chapter IV. This analysis is of the non-linear as they are used termodependientes data.

In Chapter IV are modeled and meshed again specimens used in thermal analysis, with the difference that the item changes as in this chapter is coupled analysis of the structural type. Since the results of thermal analysis should be inserted as static in this analysis by obtaining the residual stresses caused by the induction of high temperatures in the specimens. This analysis is of the non-linear as they are used and the graph data termodependientes stress-strain.

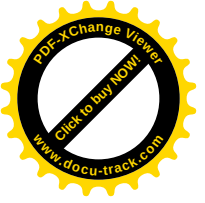
Then in Chapter V is performed Finite Element simulation of crack response method. This method is experimental-destructive and development in ANSYS, allows results to be compared with experimental analysis. This method is to remove or induce controlled cutting the specimen, in this case requires removing elements meshed in test tubes to simulate the actual experimental phenomenon.



For Chapter VI describes the detailed procedure for performing the method of crack response in welded specimens, as well as the instrumentation of the specimens with strain gauges. It explains the importance of making the cut because the method of electroerosion.

As microdeformaciones record obtained through the Wheatstone bridge so that the graph of the curve obtained is introduced to a program FORTRAM computing platform, the results were plotted so that efforts will be obtained depending on the depth of cuts made to the specimen.

Finally, we obtained a series of conclusions that lead to discussion of the results of the analysis performed in 2-D and 3-D, raised both methodologies and options for future work.



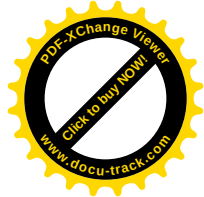
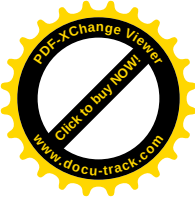
OBJETIVO

Este trabajo de investigación considera tres objetivos fundamentales los cuales son:

Desarrollar análisis térmicos del tipo transitorio, en los cuales se simulen la inducción de una fuente térmica y el enfriamiento que sufre al realizarse el equilibrio térmico del medio que lo rodea a causa de la convección térmica. A su vez estos resultados térmicos ser insertados he interpretados por *ANSYS* como cargas mecánicas del tipo estáticas.

Realizar la simulación del proceso de soldadura en 2-D y 3-D, ya que este es un tema muy importante a discutir, sobre que simulación puede asimilarse más a la realidad.

Otro objetivo es realizar el Método de Respuesta de Grieta en probetas de Acero Inoxidable 316L, bajo las mismas características de las realizadas en *ANSYS 12®*, así como experimental.

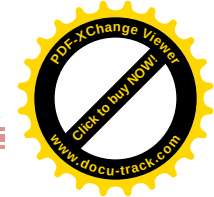
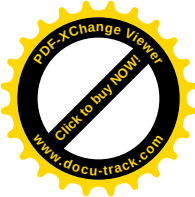


JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, el proceso de soldadura está presente en el entorno del hombre urbano, desde el micro-chip del celular más sofisticado, así como en el auto de tipo austero o equipado, incluso en pequeños edificios, hasta rasca cielos de magnitudes sorprendentes.

Por lo cual es importante el considerar estudiar a detalle el fenómeno. Este trabajo de investigación busca analizar a los procesos más comunes, los cuales son TIG y MIG y desarrollar un análisis de elemento finito basados en *ANSYS 12®*, una herramienta utilizada en la Sección de Posgrados e Investigación del honorable Instituto Politécnico Nacional.

El acero inoxidable 316L cuenta con la gran virtud de ser empleado en prótesis humanas, por lo cual es importante analizar, como se comporta ante la inducción de elevadas temperaturas a causa del proceso de soldadura. Esto se realizara en elemento finito tanto en 2-D y 3-D, al realiza un análisis acoplado el cual culminara en el desarrollo del método de respuesta de grieta (CCM), el cual es otra importante herramienta experimental en la evaluación de campos de esfuerzos residuales.



INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el proceso de soldadura está presente en el entorno del hombre urbano, desde el micro-chip del celular más sofisticado, así como en el auto de tipo austero o equipado, incluso en pequeños edificios, hasta rasca cielos de magnitudes sorprendentes.

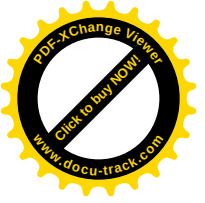
En la evaluación de esfuerzos residuales existen diversos métodos, los cuales pueden ser del tipo experimental (destructivo, semi-destructivo y no destructivo), analíticos y numéricos. La importancia de realizar un método experimental consiste en obtener el campo de esfuerzos residuales causados en materiales bajo condiciones reales, es decir el considerar que el material no está libre de imperfecciones, impurezas vacancias entre otras. Así como la magnitud de los campos residuales causados por cargas en las cuales se exceden el límite de cedencia ocasionando esfuerzos a compresión y a tensión sin algún factor externo. Estos esfuerzos se encuentran en equilibrio ya que el área bajo la curva en compresión debe de ser la misma a tensión.

El método de respuesta de grieta del tipo destructivo permite realizar la evaluación del campo de esfuerzos residuales el cual consiste en obtener las microdeformaciones que ocurren en el material al inducir un corte controlado, los cuales son censados por galgas extensometricas he interpretados por un puente de *Wheatstone*. Después estos resultados se grafican en función del corte y se introducen a un programa de cómputo con plataforma *FORTRAN* el cual en esta investigación se utilizara como caja negra, es decir:

Introducción de datos en programa *FORTRAN* > El programa resuelve > entrega el resultado en función de la geometría del espécimen.

El método más empleado en el análisis de campos residuales, es el de tipo Numérico ya que este permite realizar simulaciones más rentables que un análisis experimental. El análisis numérico inicio a mediados del siglo pasado pero al darse cuenta que era un procedimiento complicado en su forma manual, este no tuvo mayor auge.

Es hasta el desarrollo de las computadoras en los años 40's en los que se retoma su camino y en los años 60's es cuando los equipos de cómputo alcanza un nivel aceptable, es así como el Método de Elemento Finito se convierte en una opción real para los analistas. Hoy en día se las simulaciones pueden ser más completas gracias a la amplia variedad de las capacidades de computo.



Ansys constituye una excelente herramienta en la simulación de cargas estáticas y dinámicas, así como en la evaluación de flujos térmicos, en los cuales el estudio puede ser del tipo transitorio, el cual permite la aplicación de cargas térmicas en función del tiempo.

Este trabajo de investigación busca el desarrollar ambas metodologías con la finalidad de poder comparar los resultados obtenidos.

Capítulo 1



Estado del arte

Procesos de soldadura

Capítulo I

I.1.- Generalidades

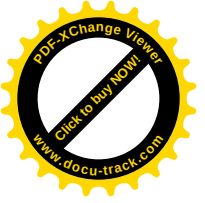
El proceso de soldadura, en la época del hombre moderno, es parte fundamental en el desarrollo de los grandes proyectos de la humanidad. Los primeros antecedentes de aplicación fueron desarrollados en Europa y Oriente medio, este proceso de manufactura se remonta hasta la edad de bronce y Hierro [I.1]. Una de las primeras edificaciones de grandes magnitudes, en la historia de la humanidad, que aplicó el proceso de soldadura se encuentra en la India, lleva el nombre de *Pilar de Hierro de Delhi*, edificado en el año 310 A. C. y pesando 5.4 toneladas (Figura I.1) [I.2].



Figura I.1.- *Pilar de Hierro de Delhi*

Asimismo, resulta extremadamente difícil determinar con exactitud el país de origen de este método de unificación de materiales ferrosos. Es hasta el año de 1800 *Humphry Davy* descubrió el arco eléctrico, dando origen a el avance tecnológico que más tarde originó el proceso de soldadura por arco eléctrico [I.3]. Este fue el inicio, en la constante innovación, desarrollo y evolución de metodologías dirigidas a la unión de materiales de forma permanente, tales como; soldadura en frio, explosiva, fricción fusión, por gas, por inducción, mixta, a tope, ultrasónica sin Plomo [I.4].

La relevancia de la unión de materiales ferrosos de manera permanente, por varios siglos ha sido de gran importancia para el desarrollo tecnológico de la humanidad. En específico, este



trabajo de investigación se fundamente en el conocimiento de los procesos de soldadura *TIG*, *MIG* y rayo láser. Por lo que a continuación se presenta en forma general el estado del arte en esto tres tópicos.

I.2.- Antecedentes históricos de soldadura en general

A través de la historia del hombre, se pueden encontrar diversas situaciones y aspectos técnicos donde se ha tenido la necesidad de unir materiales de manera permanente. Lo anterior, se debe a diversas causas y necesidades. Sin embargo, el proceso de la unión de metales en forma permanente se remonte a varios milenios de años atrás, aunque es claro pensar que las primeras necesidades de este tipo de aplicación debieron de surgir con la necesidad de soldar joyería en la época de la edad de bronce y Hierro.

Siglos después en la época del renacimiento los artesanos demostraron tener un dominio habilidoso sobre el método de unificación de piezas. Es en esta época en la cual el proceso de soldadura empieza a proyectarse no solo como una herramienta artesanal, o en procesos pequeños, esta se empieza aplicar en proyectos industriales, de tal manera que esta se vuelve una excelente opción en la unificación de materiales proyectándose a una constante evolución. [I.5]. Es extremadamente difícil determinar con exactitud el país en donde surge el proceso de soldadura de manera científica, controlada y repetitiva. Aparentemente el establecimiento del método de soldadura común, que hoy en día conocemos, data del siglo XIX y se debe a él inglés *Humphry Davy*. Descubrió la manera para generar y mantener un arco eléctrico entre dos terminales (una de tipo positiva y otra negativa) [I.6].



Figura I.2.- Humphry Davy

Capítulo I

En el año de 1835, también en Inglaterra, *Edmund Dave* (Profesor de Química) descubrió el gas acetileno. Sin embargo en esa época su fabricación era demasiado costosa, por lo cual este descubrimiento no pudo desarrollarse al máximo [I.7]. Para el año de 1881, el Francés *De Meritens* logró con gran éxito soldar diversas piezas mecánicas. Lo cual fue posible con la aplicación de un arco eléctrico entre dos carbones, los cuales realizaron la función de conductores para administrar la corriente eléctrica de acumuladores de Plomo. Este arco eléctrico producía suficiente calor, el cual era capaz de fundir ambos metales en el plano de unión, obteniendo como resultado que al enfriarse ambos metales estos tenían una unión mecánica [I.8]. Mientras en el año de 1885, los Ingenieros Rusos *S. Olczewski* y *F. Bernardos* los cuales realizaron uniones metálicas por medio de fusión. En este proceso se aplicó una corriente continua, produciendo un arco eléctrico desde la punta de la varilla de Carbón (conectada al polo positivo) hacia las piezas a unir las cuales estaban unidos a la terminal negativo. Este arco eléctrico producía suficiente calor, el cual era capaz de fundir ambos metales en el plano de unión, obteniendo como resultado que al enfriarse ambos metales se unían de una manera mecánica (Figura I.3) [I.9].

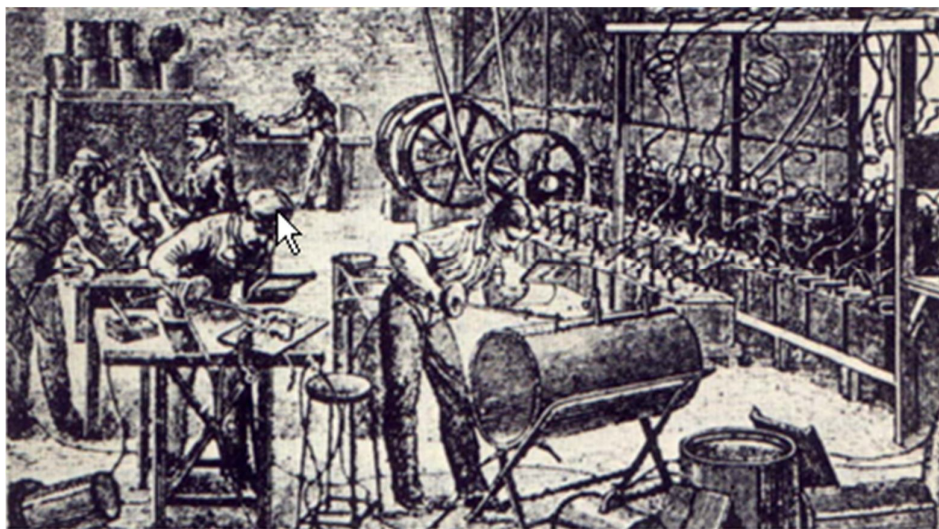


Figura I.3.- Reproducción de un antiguo gravado de un taller de soldadura

El proceso de soldadura se llevaba a cabo con un operario el cual comenzaba el trabajo apoyando el electrodo de Carbón (polo positivo) provisto de un mango aislante que permitía que el operario no sufriera una descarga, al frotar el electrodo de Carbón con el polo negativo obteniendo un chisporroteo y al alejarlo a unos milímetros, se podía crear un arco eléctrico continuo. Este fenómeno ocurría como consecuencia de una diferencia de potencia constante que permitía mantener el arco eléctrico a una distancia muy pequeña del polo positivo del

negativo. Una vez que se originaba un arco eléctrico se podía desarrollar el proceso de unificación por fusión realizando una traslación del electrodo hacia el lado opuesto siguiendo el contorno de los metales a unir. Este proceso se realizaba a una velocidad constante, al igual que la distancia del electrodo a la pieza a unir que está haciendo contacto constante al polo negativo (Figura I.4).

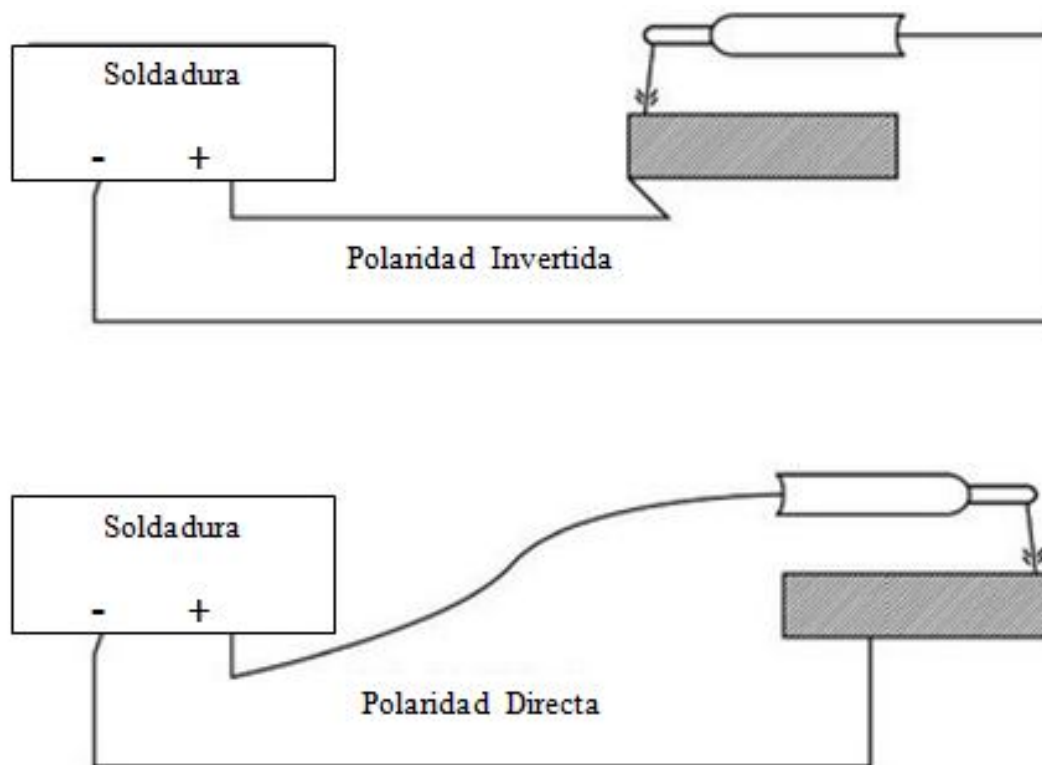


Figura I.4.- Inversiones de polaridad

Para 1892 la soldadura que se desarrolla por la aplicación de gases empezó a evolucionar cuando el canadiense *T. L. Wilson* descubrió un método para reducir el costo económico con la finalidad de fabricar el gas acetileno. Esto permitió que tres años más tarde el francés *H. E. Chatelier* realizó una combustión mezclando Oxígeno con el acetileno, esto motivo a la invención del primer soplete de oxiacetileno (Figura I.5) [I.10]. Cuando este tipo de proceso inició a efectuarse con más formalidad en la unificación de piezas metálicas, se requirió de forma indispensable que este procedimiento se realizara en condiciones óptimas. Lo anterior con la finalidad de tener como resultado del proceso, una unión metálica libre de defectos y en la búsqueda de esta optimización se encontró que en ciertas condiciones el arco eléctrico tiene la propiedad de cortar el metal o perforarlo. Sin embargo, el proceso no era un proceso eficiente, ya que era difícil mantener el arco eléctrico constante, ya que este se generaba de

forma irregular. Al continuar con la aplicación y realización de pruebas, se descubrió que al invertir la polaridad, es decir que la pieza se uniera al electrodo positivo y el negativo estuviera conectado a la terminal con la barra de Carbón. Esto generaba que el arco eléctrico no se originara en cualquier punto de la pieza. Para que el arco se originara era indispensable realizar el arco en mismo punto donde se colocó la terminal positiva [I.11].



Figura I.5.- Soldadura por aplicación de soplete

Un estudio más elaborado sobre cómo debe de comportarse la soldadura por el acomodo de polaridad se realizó en el año de 1889 por el físico Alemán *H. Zenerer*. Al ensayar un tipo de soldadura por generación de un arco eléctrico entre dos electrodos de Carbón, bajo estas condiciones el arco no se mantenía con buenas condiciones (se carecía de estabilidad). Así que se le ocurrió la idea de acondicionar el sistema con un electroimán, el cual actuaba sobre el mismo dirigiéndolo de manera magnética al lugar deseado. Esto producía en el arco eléctrico un efecto que recibió el nombre de *efecto soplado* [I.12]. Por este motivo, a este tipo de soldadura se le conoce como *soldadura por arco soplado*. El flujo del arco se regulaba con facilidad ya que el flujo solo depende de la variación de la corriente de excitación (I_e) del electroimán y a su vez se variaba el campo magnético producido (Figura I.6). El arco eléctrico que se obtenía por este método, mostraba comportarse de forma estable en donde los dos electrodos de Carbón y el electroimán era parte de un sistema, el cual, era portátil, ya que el metal que se utilizaba para ser fundido se convertía en la tercer varilla metálica, la cual se ubicaba por debajo del arco eléctrico (es decir, más cerca de la pieza). Asimismo, con el calor

que se producía en el arco eléctrico, la tercera varilla se fundía en el metal base dando como resultado la unión de los materiales [I.13].

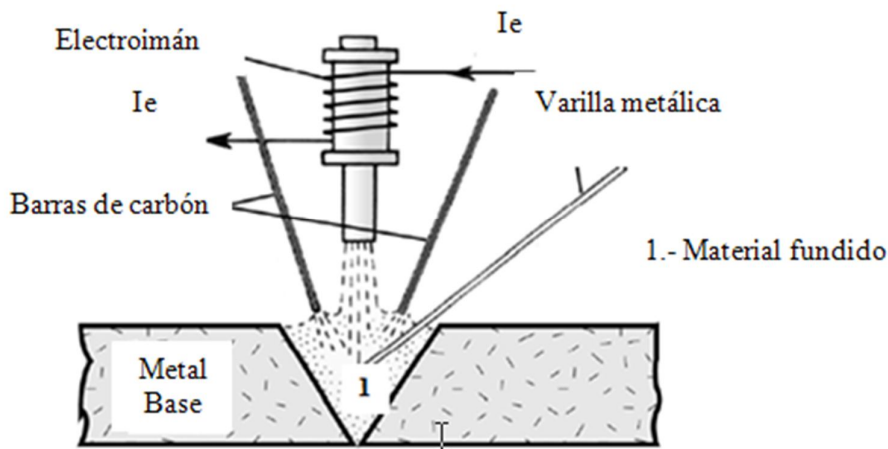


Figura I.6.- Soldadura por arco soplado

I.2.1.- Aplicación industrial de la soldadura

La primera aplicación industrial con la soldadura se da en el año 1899 por la *Lloyd & Lloyd* de Birmingham, Inglaterra. Donde se empleó este proceso con la finalidad de unir caños de Hierro de 305 mm de diámetro. Una vez que los tubos estaban unidos, estos debían soportar una prueba hidráulica de 56 atmosferas o 57.86 kilo/cem² [I.14].

Este método trabaja empleando tres dinamos de 55° Amperes cada uno y con un potencial de 150 Volts, los cuales cargaban una batería de 1800 acumuladores, los cuales tenían como función abastecer una gran corriente eléctrica en un lapso de tiempo muy pequeño. Además, es en el año de 1891 en donde el Ingeniero ruso *N. Slavianoff* sustituye electrodos de Carbón por electrodos de metal (Figura I.7) [I.15].

De manera industrial este proceso se aplicó por primera vez como soldadura por arco eléctrico en una fábrica de los Estados Unidos en el año de 1902 con electrodo de Carbón, el cual tenía por nombre; *The Baldwin Locomotive Works* [I.16] (Figura I.8). En el año de 1914 los electrodos fueron mejorados, por sus creadores el sueco *Oscar Kjellberg* junto al inglés *A. P. Strohmenger*, donde propusieron que las varillas quedaran constituidas por una aleación metálica, la cual se convierte en la fundición en el material de aporte. Esta varilla esta forrada por un recubrimiento especial a base de asbesto, tal y como se conocen en la actualidad (Figura I.9) [I.8].

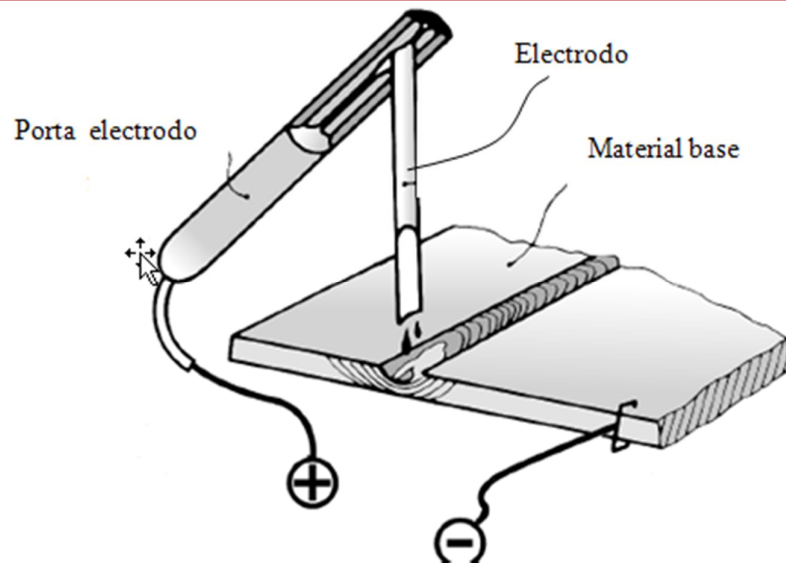


Figura I.7.- Soldadura por arco eléctrico con electrodo metálico

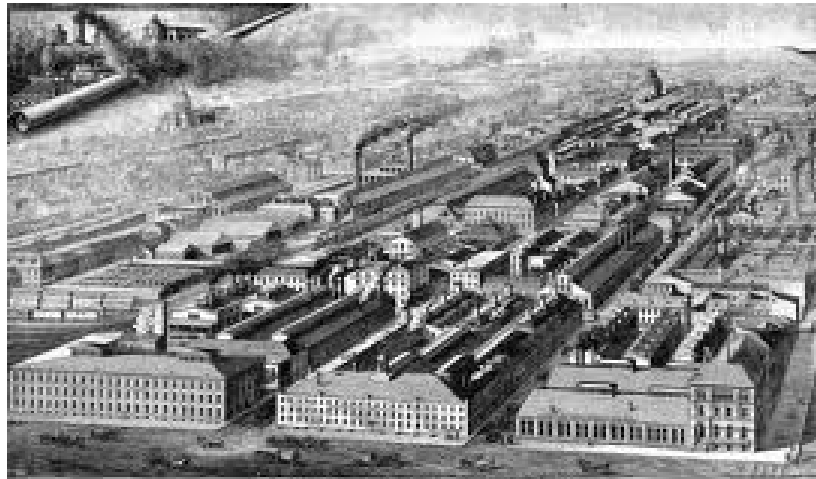
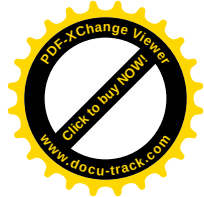
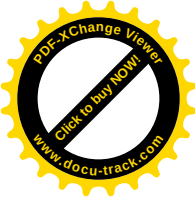


Figura I.8.- The Baldwin Locomotive Works en 1931.



Figura I.8.- Electrodo con recubrimiento empleado en la actualidad



Muy diversas circunstancias a nivel mundial han influido de forma directa e indirecta en el desarrollo evolutivo de diversos sistemas de procesos en soldadura. En este ámbito, la carrera armamentista anticipación, que esta evolución se diera de forma potencial en el desarrollo de centros de investigación tanto científicos como tecnológicos. Los cuales se han encargado de explotar al máximo las diversas novedades, las cuales han sido utilizadas en diversos países y han ayudado a realizar grandes avances en el área de la reingeniería [I.17].

Durante la primera guerra mundial, el proceso de soldadura por arco eléctrico tuvo bastante uso en Inglaterra y Alemania. Como antecedente, el proceso de soldadura fue utilizado por *Anthony Fokker* con la finalidad de manufacturar bombas, fuselajes, minas y torpedos para este suceso bélico mundial [I.18].

En esa misma época, los estudios de *Jackson* plantean que el arco de soldadura eléctrica consiste en descargas eléctricas, las cuales se encuentran sostenidas sobre un gas ionizado en alta temperatura. En este proceso se genera el calor suficiente para realizar la fusión de los metales. Este es el resultado de un proceso histórico en la unificación de materiales metálicos en la humanidad [I.19].

Para el año 1912, la empresa *Lincoln Electric* introdujo al mercado la primera máquina soldadora comercial. El desarrollo de este tipo de equipo, fue perfeccionado a través de diversos experimentos los cuales dieron inicio desde el año de 1907 [I.20]. En este mismo año, en la Gran Bretaña aparecen nuevos electrodos revestidos, la mayoría cubiertos de arcilla, lo que dio como resultado un proceso de soldadura por arco más estable, ya que las características en el cordón de soldadura se elevaban en calidad. En Estados Unidos obtuvo la patente en este país, ya que el recubrió el electrodo con asbesto azul con una anteojera basada en silicato de Sodio. Este fue el primer electrodo que se produjo para soldar metales, con la característica de que en este existía menor generación de impurezas en la unificación [I.9].

H. M. S. Fulagar fue el primero de todos los soldadores en la Gran Bretaña que se encontró con la tarea de soldar estructuras de embarcaciones militares, las cuales se encontraban en mal estado por ataques de los alemanes al tratar de ser hundidas durante la primera guerra mundial.

Asimismo, en Estados Unidos un equipo de Ingenieros que pertenecían a la compañía *Possibly The Rock Island Line* tuvo como objetivo impartir un curso sobre soldadura, el cual tenía la finalidad de prepararlos para que estos se integraran a las tropas de más de 500,000 soldados que se unirían a la guerra Europea en Francia, donde se utilizarían embarcaciones reparadas [I.21].

Mientras tanto el presidente *Wooldrow Wilson* de los Estados Unidos estableció la corporación *The United Status Wartime Welding* el 13 de enero de 1919, bajo el liderazgo de *Comfort Avery Adams* y con la finalidad de crear una sociedad americana de soldadura (*American Welding Society*) [I.22].

La soldadura como proceso de unificación de materiales metálicos, ha sido de gran importancia para la humanidad, pero la evolución de este proceso radica fundamental mente en los materiales y dispositivos; esto quiere decir que el mecanismo de aplicación es básicamente es el mismo desde sus inicios (Figura I.9).

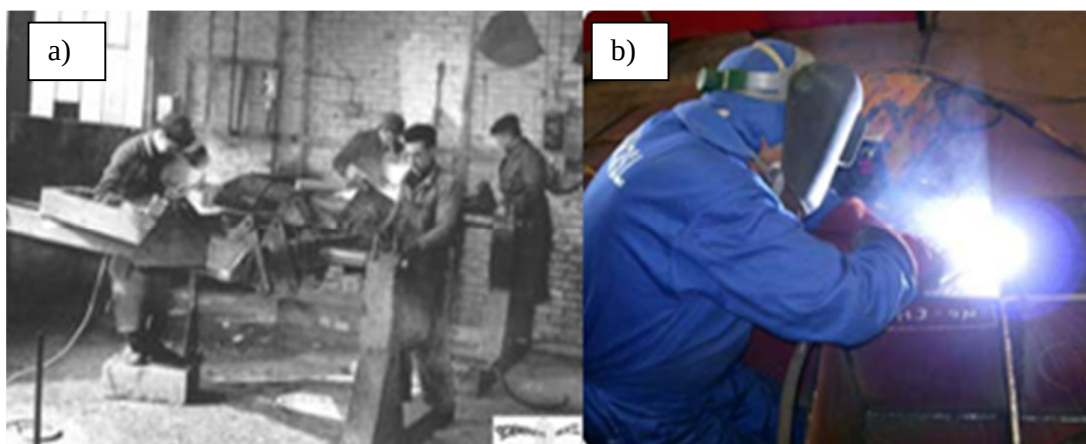


Figura I.9.- Proceso de soldadura. a) Antes. b) Después.

En la siguiente Figura I.10 se muestra de forma breve la evolución que ha sufrido el proceso de soldadura, creándose diversos tipos a través de la historia de la humanidad, iniciando por el año 1890.

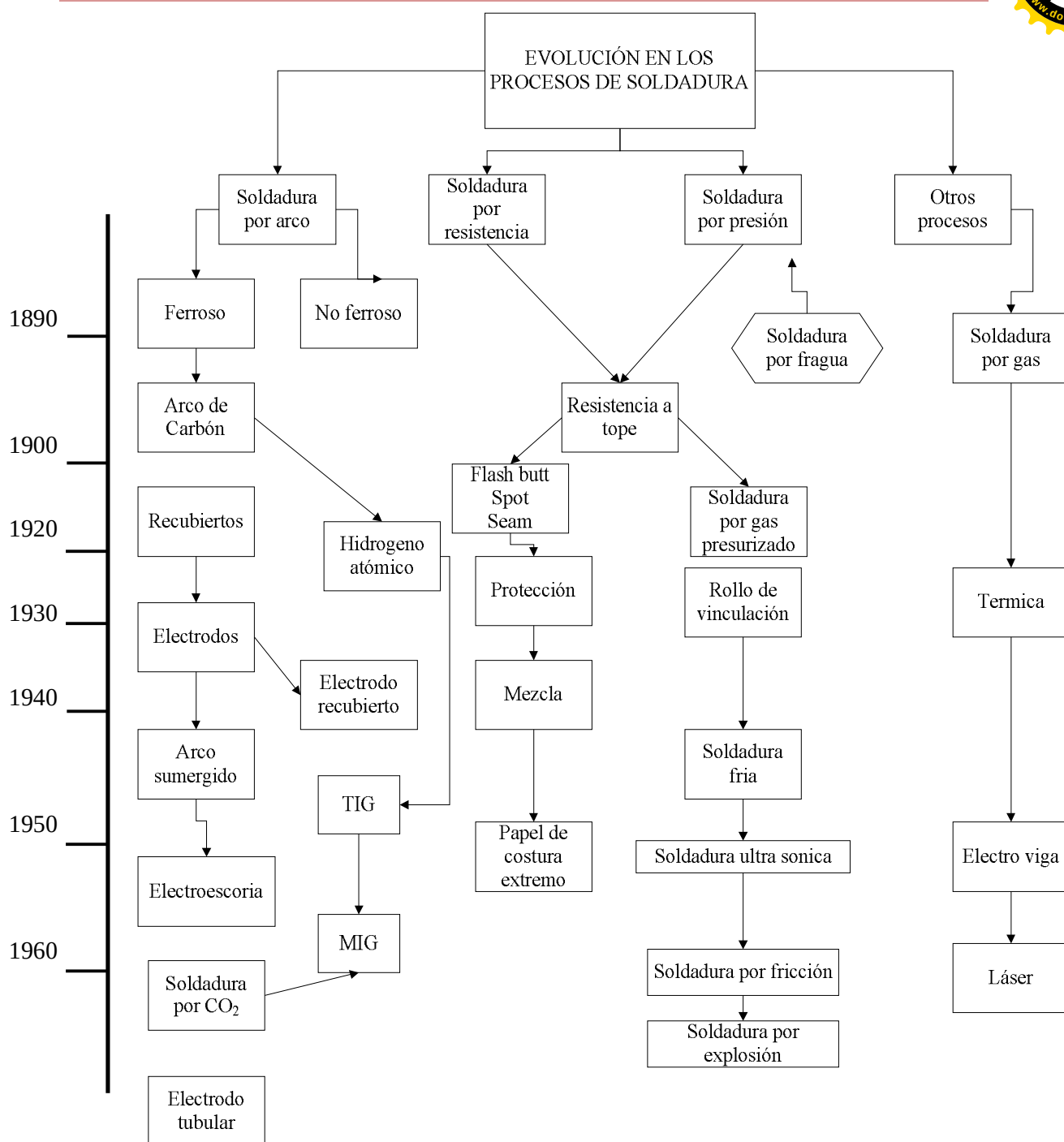


Figura I.10.- Historia de la soldadura [I.23]

I.2.2.- Antecedentes históricos sobre el proceso de soldadura tipo TIG (GTAW)

Este proceso de unificación de materiales es también conocido como soldadura de arco de Tungsteno protegida por gas (en inglés se define como Tungsteno Inerten Gas (TIG)).

También es conocida como soldadura por heliarco, ya que el gas de Helio se utiliza como protección en el proceso de unificación [I.24].

Fue hasta el año de 1910 donde se deja de aplicar el uso de electrodos de Carbón y se utilizan electrodos de Hierro sin recubrir. Sin embargo, la eficiencia es muy mala, ya que existía poca resistencia a la tracción y además presenta una reducida ductilidad. También, presentaban una nociva acción en contra de la capa de ozono, ya que este proceso se generaba a través de un proceso de oxidación acelerada. Esto se desarrollaba en los electrodos sin recubrir en la generación del arco eléctrico [I.9]. Esta problemática, permitió abrir un nuevo campo de investigación en la búsqueda de una solución que no afectara al usuario ni a la capa de ozono. Una de las primeras experiencias en busca de corregir esta problemática fue la del investigador *Alexander* quien busco eliminar la acción perjudicial del Oxígeno, el cual rodeaba al arco eléctrico, teniendo como resultado que se produjera un atmosfera que no fuera nociva, inyectando un gas que no fuera dañino y realizara la función de gas protector [I.14]. En la Figura I.11 se puede observar el proceso de soldadura empleando el electrodo con recubrimiento inyectando gas para que este no produzca una reacción que afecte la capa de ozono.

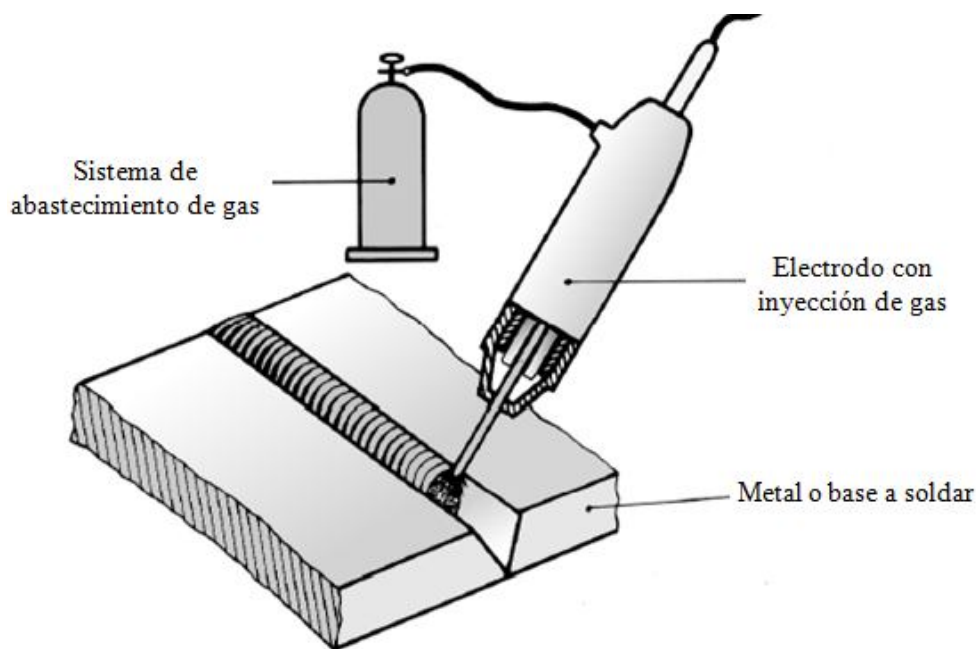


Figura I.11.- Sistema implementado para soldar por medio de electrodo con recubrimiento

El investigador *Alexander* utilizó diversos tipos de gas en busca de encontrar el proceso óptimo con la finalidad de obtener resultados positivos. En su experimentación encontró que

el metanol se comportaba de manera muy estable y cumplía con los requerimientos en el proceso de soldadura y en la producción de una combustión no dañina. El inconveniente para emplear este proceso, requería de un sistema muy complejo en el equipamiento, por lo cual esto lo hacía poco viable [I.9]. Retomando los avances del investigador *Alexander* y a su vez modificándolos el investigador *Kjellberg*, él revistió los electrodos con material refractario y aglomerado el cual rodea el electrodo con una sustancia sólida que poseía el mismo punto de fusión que el metal de aporte [I.14]. Al producirse el arco eléctrico, ambos materiales se fundirán simultáneamente, obteniendo como resultado una capa de material fundido, brindando la adecuada protección al material fundido contra el Oxígeno del medio ambiente en la etapa de enfriamiento (Figura I.12).

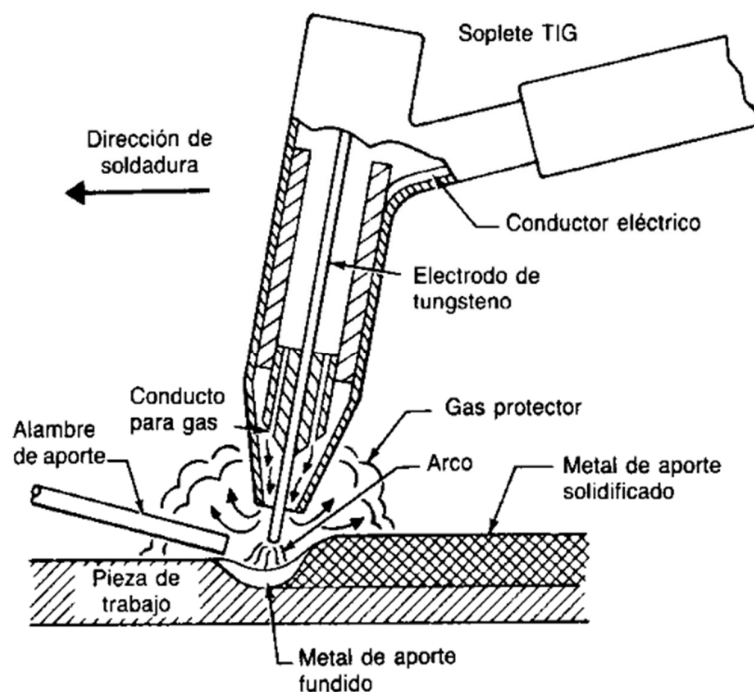
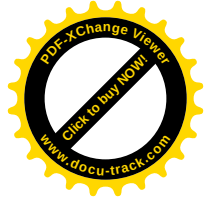
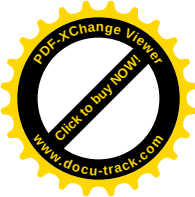


Figura I.12.- Procedimiento de soldadura TIG

La idea de aplicar un gas con la finalidad de proteger el proceso de soldadura y el charco de metal fundido se investigó por primera vez en el año 1920. Sin embargo, este método se empezó a explotar en el comienzo de la segunda guerra mundial. Como el proceso de GTAW es por arco eléctrico los primeros sopletes que se utilizaban eran una adaptación de las pinzas existentes o también conocidos como porta electrodos, los cuales se empleaban en el método convencional (SMAW), la innovación en el método radicaba en la aplicación del electrodo de tungsteno y un tubo de cobre el cual suministraba el gas inerte sobre la zona de soldadura. [I.25]



Lo anterior, se realizó en función a que el sector aeronáutico tuvo la problemática de unificar materiales reactivos como el Aluminio y el Magnesio sin utilizar los remaches. La solución en esta época se dio con la ayuda con un electrodo de Tungsteno y como fuente de energía el potencial del arco eléctrico de corriente continua con un electrodo negativo. Trabajos de investigación sobre electrodos revestidos manuales, realizados hacia fines de los años 40, mostraron que el gas producido en la desintegración del revestimiento del electrodo era principalmente CO₂.

Este descubrimiento llevó rápidamente a la utilización de CO₂ como gas de protección en el proceso Gas Metal Arc Welding (GMAW) cuando se lo utilizaba en aceros al carbono. El proceso GMAW protegido con CO₂ se volvió comercialmente disponible a mediados de los '50. Aproximadamente para el mismo tiempo la protección con CO₂ fue combinada con la utilización de un electrodo tubular que contenía fundentes en su interior. Las características operativas fueron mejoradas por la adición de elementos en el relleno y la calidad de la soldadura se mejoró por la eliminación de la contaminación atmosférica.

El proceso fue introducido públicamente en la exposición de la American Welding Society (AWS) en Buffalo, New York, en mayo de 1954. Los electrodos y el equipamiento fueron refinados y se introdujo con la forma esencial que hoy tiene en 1957 [I.22]. En este proceso se logró producir una fuente de calor estable y eficiente con la cual se podían obtener procesos de soldadura firmes y con buen acabado. Además, se seleccionó al gas Helio para crear la atmosfera de protección que se requería, lo cual fue una buena idea ya que en esa época era el único gas inerte disponible en abundancia. Este proceso de soldadura ha evolucionado a tal grado que no se han creado fuentes de alimentación específicamente para realizar este proceso. Algunas tienen la cualidad de suministrar potencia de corriente continua a pulsos y corriente alterna de polaridad variable. En la actualidad los investigadores están tratando de lograr otros avances en áreas específicas, como el control automático en los procesos, la visibilidad al realizar el proceso, adiciones al material de aporte (Figura I.11) [I.26]. La evolución ha permitido sustituir materiales tales como los Aceros inoxidables Férricos y Austenicos por aceros Inoxidables Dúplex (DSS) en la fabricación de componentes industriales, ya que estos cuentan con una excelente combinación entre las propiedades mecánicas y sus propiedades a la resistencia a la corrosión. En la actualidad este tipo de aceros se están utilizando con más frecuencia en la industria química, petrolera y refinerías

debido a su alta resistencia a la corrosión, y este tipo de materiales se pueden unir a través del proceso de soldadura TIG.



Figura I.12.- Sistema de soldadura tipo TIG

I.2.3.- Antecedentes históricos en el proceso MIG ó GMAW

Este proceso de soldadura tubo sus orígenes en el año 1900, ya que en este año se entrega una patente, la cual consistía en electrodos rodeados por un gas inerte (gas protector), es así como esta patente se consideran como el primer antecedente histórico bien fundamentado del proceso MIG y TIG. Una vez que se estableció este proceso de soldadura, se realizaron experimentos con el objetivo de mejorar el proceso existente en busca de unificaciones de calidad, estos experimentos continuaron por varias décadas, básicamente 1920 y 1930 pero aun no era un proceso confiable por varias cuestiones. Sin embargo fue hasta el año de 1940 en donde el proceso MIG o GTAW, se empezó a emplear con más frecuencia.

Antes de comenzar la segunda guerra mundial existían pocos experimentos con este proceso derivado de lo costoso de los gases inertes, pero es en este suceso mundial en el cual el proceso MIG se empieza a emplear ya que la industria de la aviación necesita con suma importancia, un método el cual tenga como características rapidez y que este pueda soldar Aluminio y Magnesio, para acelerar la producción [I.27].

Este tipo de características o necesidades se podían cubrir a través del proceso MIG, ya que debido a los beneficios logrados en la producción se justifico el costo adicional del empleo del gas inerte en una escala mayor.

. En la constante evolución del proceso de soldadura, en la década de los años cuarenta, se otorgó una patente a un fantástico sistema de soldadura, el cual alimentaba el proceso de forma constante (Electrodo en forma de rollo).

El electrodo tenía forma de alambre para realizar el soldar con arco protegido por gas. De esta forma, es como inicia el proceso de soldadura conocido en ese momento como MIG (Metal Inert Gas), hoy en día ostenta la nomenclatura AWS y CSA de soldadura con gas y arco metálico, y sus siglas en inglés son GMAW (Gas Metal Arc Welding) [I.9].

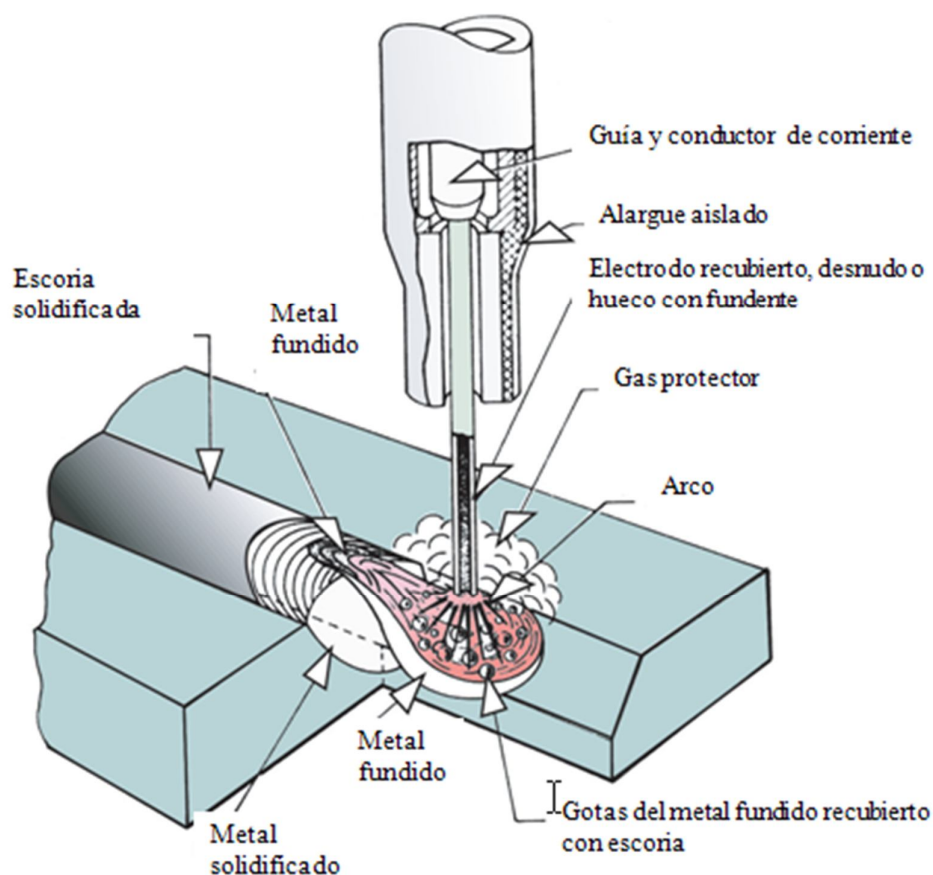


Figura I.13.- Proceso MIG.

Este proceso de unificación ha evolucionado comparado a sus inicios, por ejemplo, en algunos casos se utilizan los electrodos desnudos recurriendo a la protección por gas, otros tipo de proceso que corresponde a MIG utiliza electrodos recubiertos con material fundente, muy similar a los que se utilizan en el proceso de arco protegido por gas convencional [I.28]. Cuando los investigadores estudiaron en qué forma o efecto se transfería el metal, sobre la pieza a través de un arco eléctrico en un proceso GMAW o MIG, se descubrieron tres formas.

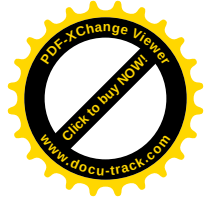
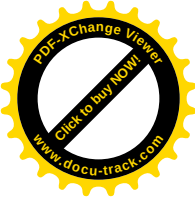
Estas son por inmersión o corto circuito, esto se produce cuando sin haberse producido el arco al tocar el electrodo con la pieza, este se queda pegado produciéndose un cortocircuito. Por tal motivo la corriente se incrementa demasiado y esta es capaz de fundir el electrodo, teniendo como resultado una pequeña porción del material a soldar. En la transferencia globular, las gotas del metal fundido se mueven o transfieren a través del arco por efecto de la gravedad y su propio peso. Otra alternativa es utilizar un electrodo hueco el cual consta de un núcleo fundente, es preciso resaltar que para algunos procesos especiales se puede combinar el uso de electrodos con fundente ya sean recubiertos o huecos al mismo tiempo con gas protector [I.29].



Figura I.13.- Sistema de soldadura tipo MIG

I.2.4.- Antecedentes históricos del proceso de soldadura tipo rayo láser.

Los orígenes del láser se remontan al año de 1917 cuando *Albert Einstein* publicó un artículo en el que desarrollaba las ideas fundamentales de la emisión y absorción de la luz [I.30]. Ya en el año de 1957, varios científicos canalizaban sus esfuerzos, en buscar de lograr la amplificación másaer del espectro invisible. En Noviembre de ese mismo año *Gordon Gould* se dio cuenta que existía la posibilidad de fabricar un resonador óptico eficiente, al disponer de dos espejos en forma de un interferómetro [I.31].



Pero a diferencia de otros diseños que se habían sugerido, esta propuesta de llevarse a cabo ocasionaría emisión intensa, coherente. *Gordon Gould* también sugirió el bombeo a través de colisiones a nivel atómico y anticipó varias aplicaciones potenciales que se podría aplicar por este método. Así que anotó sus análisis en una libreta de laboratorio bajo el nombre de “Cálculos aproximados sobre la viabilidad de un LÁSER. El cuaderno de *Gordon Gould* fue considerado como el primer manual para la construcción de un láser viable y, considerando la importancia de la información, *Gordon Gould* la llevo ante un notario con la finalidad de tener certificado su trabajo [I.32].

Ansioso por conseguir una patente para su invención y creyendo erróneamente que para esto se necesitaba la construcción del dispositivo, *Gordon Gould* abandono Columbia (EUA) sin completar su doctorado y se unió a una compañía de investigación privada TGR (Technical Research Group).

Desafortunadamente el proyecto se clasifico como, proyecto reservado, lo que significa que se requería una autorización para trabajar en el. Aunque el proyecto continuó con TGR, este no tuvo la facultad para contribuir al proyecto ni materializar sus ideas. [I.33]

La patente se otorgo el 14 de Noviembre de 1967 a *Theodoro H. Maiman* por su sistema de rayo laser utilizando como medio el Rubí en los Ángeles California [I.34].

El primer rayo láser que se produjo empleando un cristal de rubí excitado por lámparas de destello. Los láseres de estado sólido, de este tipo solo producen pulsos muy cortos de energía luminosa con tasa de repetición limitadas por la capacidad calorífica del cristal. Como consecuencia aunque los pulsos individuales alcanzan niveles de potencia máxima instantáneos del orden de los Megawatts, los láseres de rubí pulsados están limitados a niveles de potencia media bajos.

En la Figura I.13 se muestra una pequeña parte del diseño que presento *Theodoro H. Maiman* con la finalidad de obtener la patente de un rayo láser de Rubí.

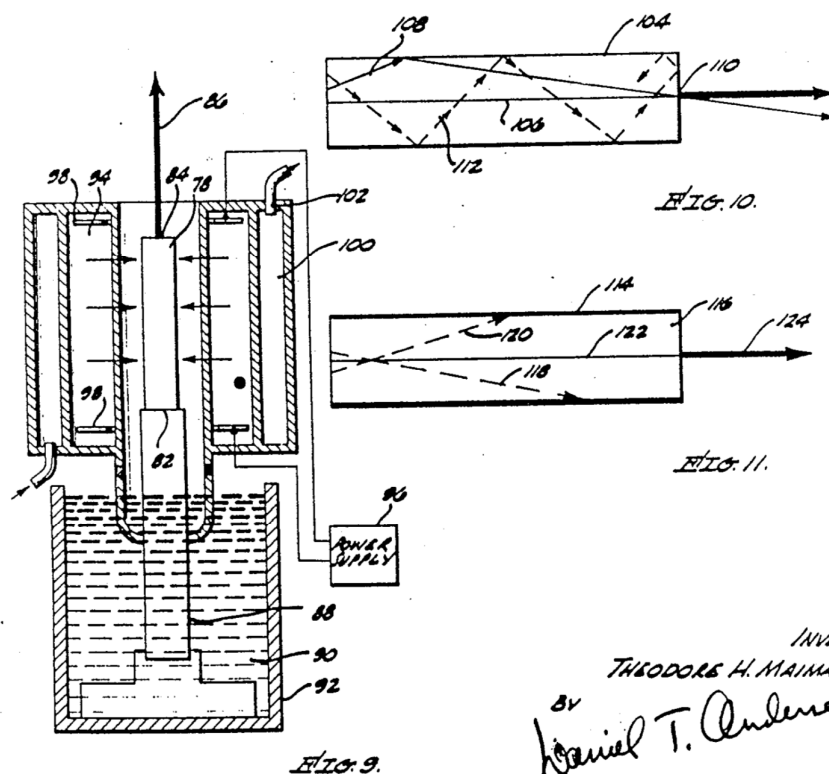
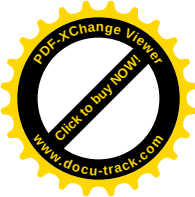


Figura I.13.- Diseño presentado por *Theodoro H. Maiman* con la finalidad de obtener la patente del rayo láser por Rubí, el cual es excitado por una lámpara de destello [I.34]

Más tarde el investigador *Gordon Gould* interpuso diversas demandas e busca de obtener la patente, pero final mente perdió la batalla por la patente del láser, esto principal mente porque en su cuaderno no se presentaba una explicación de que las paredes laterales del medio laser tenían que ser transparentes, aunque planeo el bombeo óptico de la ganancia a través de ellas a demás de estimar la perdida de luz mediante las paredes laterales por el efecto de la difracción. Años más tarde a *Gordon Gould* se le conceden una serie de patentes en tecnologías de láseres específicos, esto en los Estados Unidos. [I.33]

Básicamente láser es un dispositivo que produce un haz de luz coherente concentrado estimulando transiciones electrónicas o moleculares a niveles de energía más bajos. La palabra láser en un acrónimo de “amplificación de la luz por emisión estimulada de radiación, (light amplification by stimulated emission of radiation). Una forma simple y coherente para darle un significado es el que todas las ondas de luz están en fase. La primera aplicación industrial del rayo láser se da en la aplicación de soldaduras de elementos de chapas de automóviles [I.31] y en el año de 1969 *Gordon Gould* patenta muchas aplicaciones prácticas para el rayo láser [I.32].



En la práctica un laser consiste en un medio colocado entre los espejos terminales de una cavidad de resonancia óptica. Cuando este medio se excita o bombea, hasta llegar al punto en donde ocurre una inversión de la población, condición en la mayor parte de los átomos o moléculas activos del medio alcanzan un estado energético superior al normal, esto tiene como resultado, una fuente de luz coherente que podrá reflejarse una y otra vez en los espejos terminales de la cavidad.

Esto genera una inducción de un efecto de cascada y esta hará que el nivel de esta luz coherente llegue al valor de umbral, (esto es el punto en el que la ganancia de amplificación de la luz que se produce comienza a exceder pérdidas de luz que puedan estar ocurriendo simultáneamente), en el cual el dispositivo podrá comenzar a emitir un rayo de luz láser.

Desde el punto de vista de ingeniería, un láser es un dispositivo de conversión de energía, ya que sencillamente se transforma energía de una fuente primaria la cual puede ser eléctrica, química, térmica, óptica o nuclear, en un haz de radiación electromagnética con una frecuencia específica es decir que estas frecuencias pueden ser ultravioleta, visible o infrarroja. Esta transformación se logra gracias a ciertos medios sólidos, líquidos o gaseosos que al ser excitados en una escala molecular o atómica, esto por diversas técnicas las cuales producen una forma de luz muy coherente y relativamente monocromática [I.35]

Los rayos de luz láser tanto de baja y alta potencia, tienen un ángulo de divergencia muy pequeño que permite transportarlos a distancias relativamente grandes antes de concentrarlos en grado sumo (mediante sistemas óptimos de enfoque de tipo transmisivo o reflectivo) a fin de suministrar los niveles de densidad de potencia necesarios para realizar diversas tareas de procesamiento de materiales como soldar, cortar y dar tratamiento térmico.

En la industria, los láseres se utilizan para cortar, perforar, soldar y grabar materiales desde el encaje hasta el acero, en medicina los láseres se han utilizado ampliamente en oftalmología desde el año 1971, mientras que muchas aplicaciones en el campo militar incluyen los láseres como sistemas de guía de misiles. [I.32]

Actual mente hay en el mercado láseres de estado sólido, tanto pulsados como de operación continua, capaces de cortar y soldar láminas metálicas delgadas. A demás de láseres de

segundo tipo los cuales emplean varillas cristalinas de Granate de Itrio y Aluminio contaminado con Neodimio (Nd: YAG), para producir rayos monocromáticos continuos con potencias del orden de 1 a 2 Kw.

También se han desarrollado láseres gaseosos excitados electrónicamente, de pulsos y de onda continua (CW), en variedades con excitación de corriente alterna y corriente continua. Actualmente en el mercado existen láseres de Dióxido de Carbono (CO_2) con salidas de hasta 25 Kw, y se emplean en una amplia gama de procesamiento de materiales en la industria. Estos láseres tienen la capacidad de soldar acero de 32 mm (1.25 pulgadas) de espesor con una sola pasada de penetración completa. [I.33]



Figura I.14.- Sistema de soldadura tipo rayo láser automatizado.

I.3.- Esfuerzos residuales

Los esfuerzos residuales se han asociado con los seres humanos desde que la civilización comenzó a tomar una forma civilizada al realizar diversos tipos de herramientas. Todo comenzó con la manipulación de componentes de arcilla ligada al uso del fuego ya que en los primeros días la realización de este arte logro mantener un equilibrio entre la generación de esfuerzos Residuales y el gradiente de tensión dando como resultado productos de una forma deseada [I.36].

Los esfuerzos residuales en forma general se pueden definir como esfuerzos de tensión y de compresión que existen en un material en la ausencia de un agente externo y se encuentran en auto equilibrio. Es así que, los esfuerzos residuales se dividen en tres diferentes clases [I.37] esto se explica de forma breve en la figura I.14.

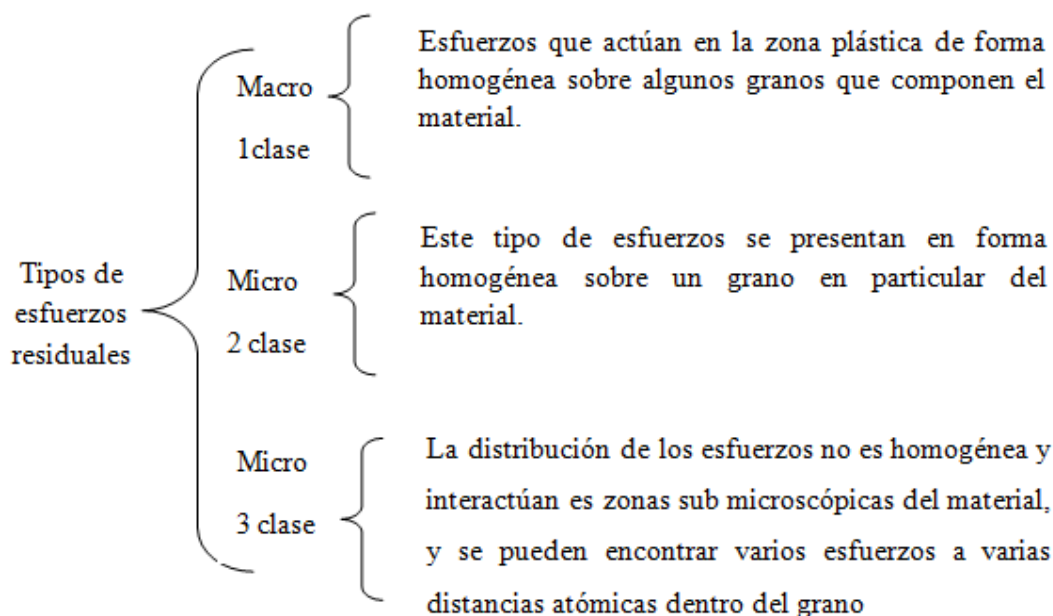


Figura I.14.- Clasificación de esfuerzos residuales.

I.4.- Interacción de los esfuerzos residuales y el proceso de soldadura

Existen diversos estudios que basan un análisis en el proceso de soldadura, en los cuales se considera los campos térmico, mecánico y metalográfico. En este tipo de estudios se estipula que el campo térmico es el que ejerce una mayor influencia de carácter significativo sobre los otros dos (mecánico, metalográfico), y por el contrario estos ejercen una pequeña influencia sobre el campo térmico.

En el proceso de soldadura están presente diferente fenómenos físicos, estos surgen como consecuencia de la interacción de del campo de temperatura en el material y este campo interactúa a su vez de forma directa con el campo de esfuerzos residuales que se ocasionaran en el material y las deformaciones de tipo mecánica sin olvidar que estos afectan de forma directa al estado micro estructural del material. El campo de temperatura no es constante hay que resaltar que este está en función de varios parámetros del proceso de soldadura, por

ejemplo la potencia del arco eléctrico, la velocidad de la soldadura, secuencia de la soldadura y condiciones ambientales [I.38].

Las distorsiones y esfuerzos residuales que se generan en este proceso no solo dependen de lo mencionado anterior mente, también es importante el considerar las propiedades del material, así como las condiciones de borde estructural, tipo de soldadura y condiciones de soldadura, estos factores se mencionaran más adelante junto con ciertas recomendaciones para que el esfuerzo residual disminuya en el material.

I.4.1.- Factores que intervienen en la formación de esfuerzos residuales

Este es un término el cual está haciendo referencia a la capacidad que tiene un material a ser soldado bajo determinadas condiciones del diseño y fabricación con la finalidad de cumplir adecuada mente su función y elevar su desempeño en el tiempo de servicio o operación del material.

La Figura I.15 se representa de forma simplificada los factores que están relacionados de forma directa en la generación de problemas en el proceso de soldadura y un ejemplo claro o común se da en los aceros al carbono, en los cuales están presentes las capacidades de resistir a la generación de un agrietamiento en el área que esta soldada, es por esto que es adecuado realizar una valoración en base a la sensibilidad al agrietamiento tanto en frio como en caliente. [I.39]

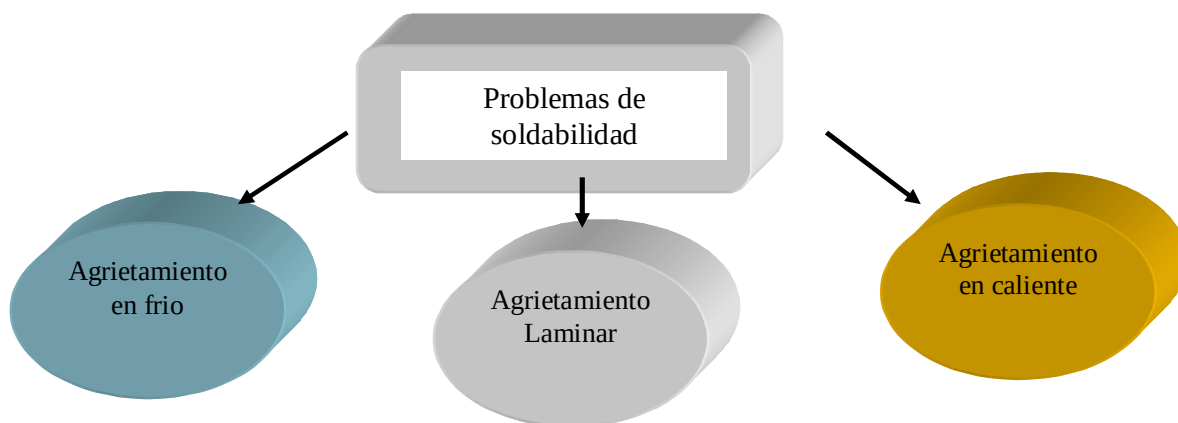
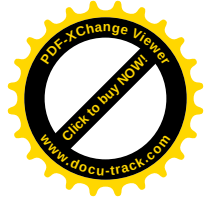
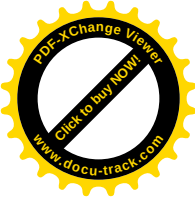


Figura I.15.- Tipos principales en la clasificación del agrietamiento.

El Carbón es un elemento que no se puede dejar de considerar en el proceso de soldadura ya que es un elemento el cual define las particularidades de los aceros, es por esta característica



que al carbono se le atribuye la máxima responsabilidad en el cambio de propiedades en el desarrollo de la soldadura.

La soldadura suele clasificarse por algunos autores como buena, regular o mala; esto en dependencia del contenido de carbono en el material o el porcentaje que tenga el acero en su composición, esto es mencionado por *Kasuya y Yurioca* en su trabajo el cual se relaciona con explicar que el carbono que constituye los aceros y demuestran todos los factores a considerar, desde el punto de vista de la composición química del acero resaltando el efecto metalográfico de los elementos aleantes [I.40].

Es preciso aclarar que el carbono no es el único factor que afecta al proceso de unificación de aceros, pero es muy claro que al aumentar el porcentaje de este elemento, de la misma forma aumentan los problemas de agrietamiento. Es por eso que se debe considerar los niveles de carbono, en especial cuando estos alcancen un rango de 0.30 a 0.35%, normal mente en estos casos es preciso tomar ciertas precauciones especiales tales como:

- Precalentamiento del material.
- Control de entrada de calor.
- Un tratamiento térmico post soldadura.

También se hace la recomendación de usar materiales con bajo contenido de hidrogeno ya que esto permite obtener una soldadura de buena calidad, este tipo de recomendaciones están publicadas por la TWI [I.41].

El investigador *Kayusa* muestra en sus investigaciones, el predecir la dureza que se puede alcanzar en el área de unión o zona afectada por el calor (ZAC) y afirma que esta dureza puede ser utilizada para obtener información relativa a la soldabilidad del acero, principalmente en el fenómeno de sensibilidad a la fisuración en frio la cual es consecuencia de las transformaciones estructurales en la zona afectada por el calor (ZAC), y por el hidrogeno lo cual repercute directamente en la influencia del agarre logrado entre el cordón de relleno. Esto plantea o establece que en la zona afectada (ZAC) la máxima dureza no solo depende del porcentaje contenido de carbono en el acero, sino también de la templabilidad del acero por influencia de los otros elementos implícitos en la aleación [I.42].

En la unión se puede localizar la zona de máxima dureza, la cual se genera en la zona de sobrecalentamiento ya que en este caso puede existir un elevado gradiente de temperatura, en la cual se alcanza la máxima velocidad de enfriamiento, también es claro que en esta área, el tiempo de permanencia con temperatura alta es mayor que en cualquier otra parte del material, esto tiene como consecuencia el crecimiento del grano [I.43].

Al realizar el proceso de unificación, en aceros al carbono existe un gradiente micro estructural el cual inicia desde el centro del cordón de soldadura hasta el metal base, esto a consecuencia de los ciclos que se producen en los ciclos térmicos experimentados en función de los parámetros de soldadura empleados, de esta forma se puede identificar la zona afectada térmicamente (ZAT) y el metal base no afectado [I.44]. Principalmente en los aceros al carbón la ZAT que es lo mismo que ZAC se puede afectar de tal manera que se crean tres regiones en el mismo material por este fenómeno, las cuales son: Supercrítica, Intercrítica y Subcrítica.

ZAC: Zona afectada por el calor.

ZAT: Zona afectada por la temperatura.

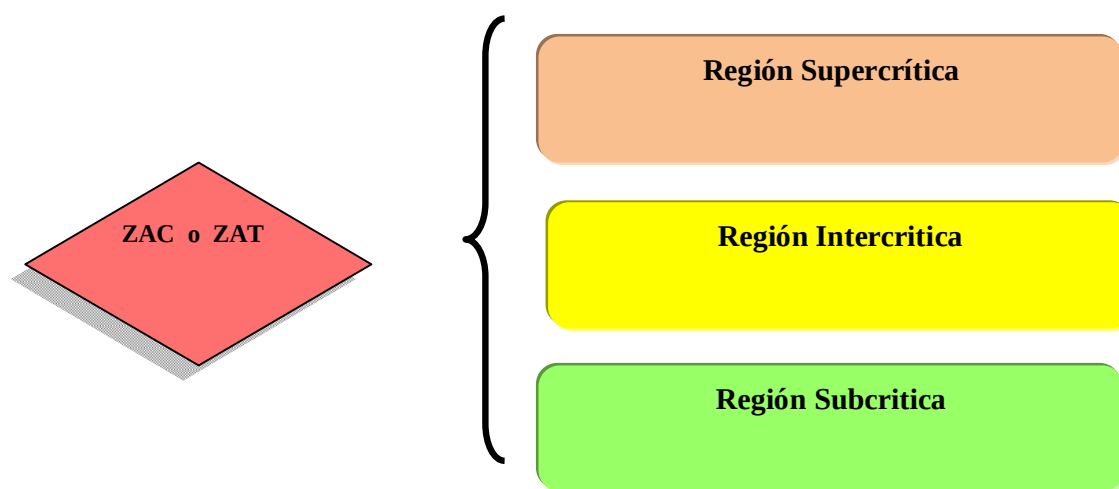
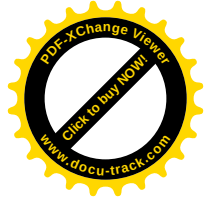
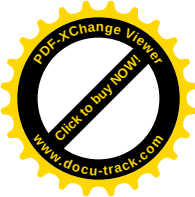


Figura I.16.- Tipos principales en la clasificación del agrietamiento

Región Supercrítica: corresponde a la región de grano grueso, esto debido a que la temperatura máxima sobre paso la temperatura de crecimiento de grano austenico. Esto a medida que avanza la temperatura desde el centro del cordón hasta el metal



base, es en este punto donde se puede describir que las velocidades de enfriamiento disminuyen dando como consecuencia un gradiente de microestructuras.

Región Intercrítica: Esta región es relativamente estrecha, en la cual ocurre una transformación parcial, la microestructura consiste en colonias de perlita inmersas en una matriz ferrítica no transformada.

Región Subcrítica: en esta región generalmente no ocurren cambios microestructurales apreciables, esto solo puede ser posible por una esferoidización de la perlita, pero esta es muy difícil de detectar por microscopía óptica [I.45].

En un experimento realizado por la investigadora *Gladys Yerania*, pretendía analizar las propiedades mecánicas resultantes, en un proceso de soldadura de acero AHSS del tipo TRIP800 por láser CO₂ y por arco metálico con gas (GMAW). En la cual se encontró una dureza alta en la zona de fusión ZF presentando martensita principalmente y vainita en la zona afectada por calor (ZAC) [I.46].

Para una mejor comprensión del tema es importante definir los términos mencionados anteriormente tales como Perlita, Ferrita, Vainita, Martensita ya que estas están implícitas como consecuencia en la microestructura del material al realizar el proceso de soldadura en aceros.

Se le denomina perlita a la microestructura formada por capas o láminas alternas de las dos fases (α y cementita) durante el enfriamiento lento a temperatura eutéctica, se le da este nombre porque tiene la apariencia de una perla al observarse microscópicamente.

La ferrita es una solución intersticial de carbono en una red cúbica centrada en un cuerpo de hierro, el cual admite hasta un 0,0021% de carbono a temperatura eutéctica, este es el constituyente más blando del acero. [I.47]

Cuando se hace referencia a la martensita se debe de hacer referencia cuando la velocidad de enfriamiento es superior a la crítica de temple en donde no existe una difusión de carbono y la austenita se transforma en martensita sin que se produzca variación en los átomos de carbono.

Bainítica es la transformación en la cual se produce un cizallamiento el cual está ligado al proceso de difusión de carbono. Esta difusión es necesaria para que se produzcan regiones pobres y ricas de carbono [I.48].

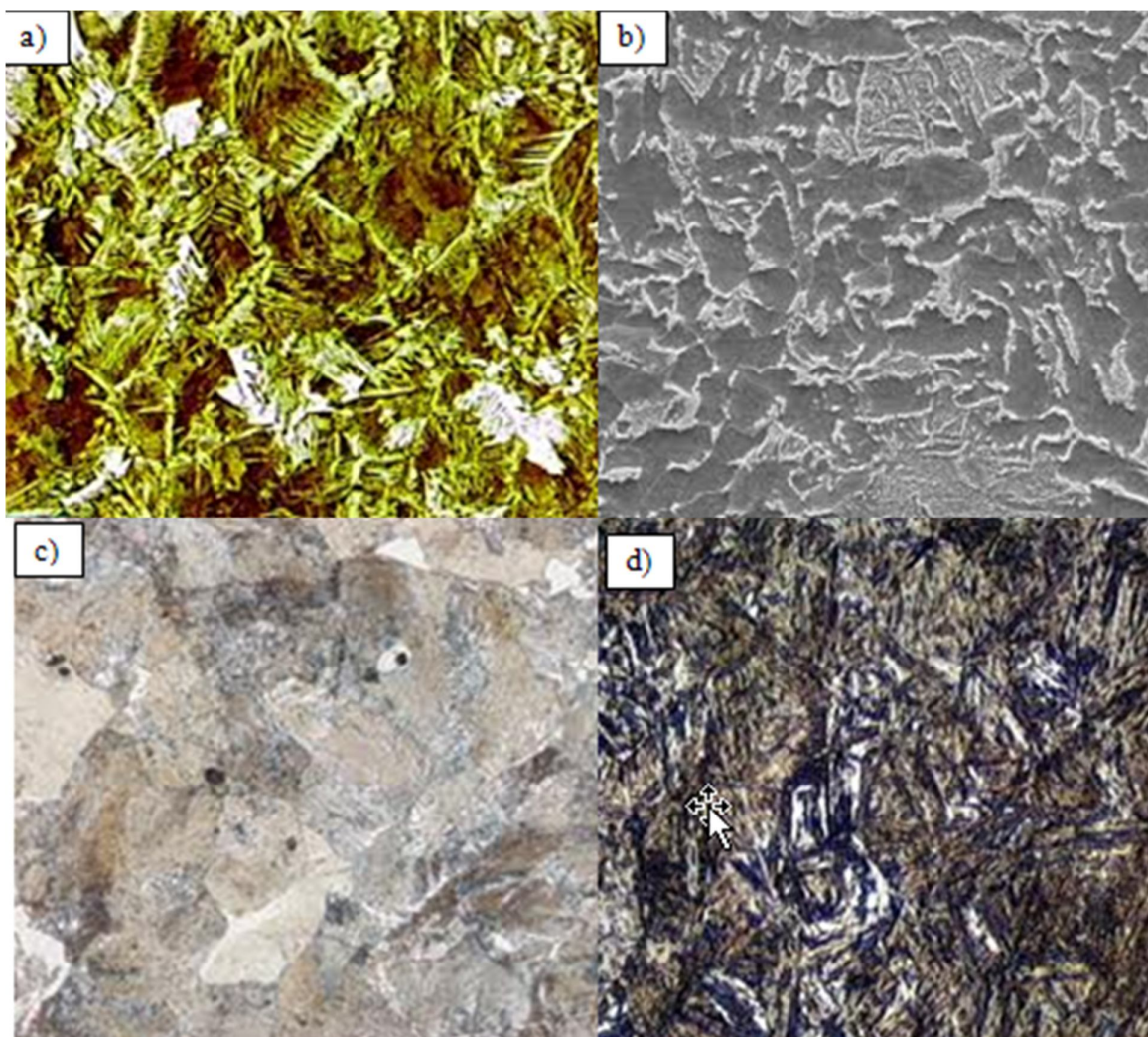


Figura I.17.- Microestructura del acero afectada en el proceso de soldadura.
a) Ferrita. b) Bainita. c) Perlita. d) Martensita.

I.4.2.- Influencia de campos involucrados en el proceso de soldadura

W. Bullon C. estipula en un artículo publicado en el octavo congreso de Ingeniería Mecánica, que existen tres campos en el proceso de soldadura los cuales están relacionados en la existencia de esfuerzos residuales. Estos son el campo termodinámico o térmico (campo de temperatura), campo mecánico (campo de esfuerzos mecánicos) y el campo metalográfico los cuales fueron mencionados anterior mente, estableciendo que existe una relación mutua entre ellos presentada por líneas continuas y discontinúas [I.49]. Esta relación se muestra en la siguiente figura mostrando la complementación entre estos tres campos involucrados en el proceso de soldadura de cualquier tipo.

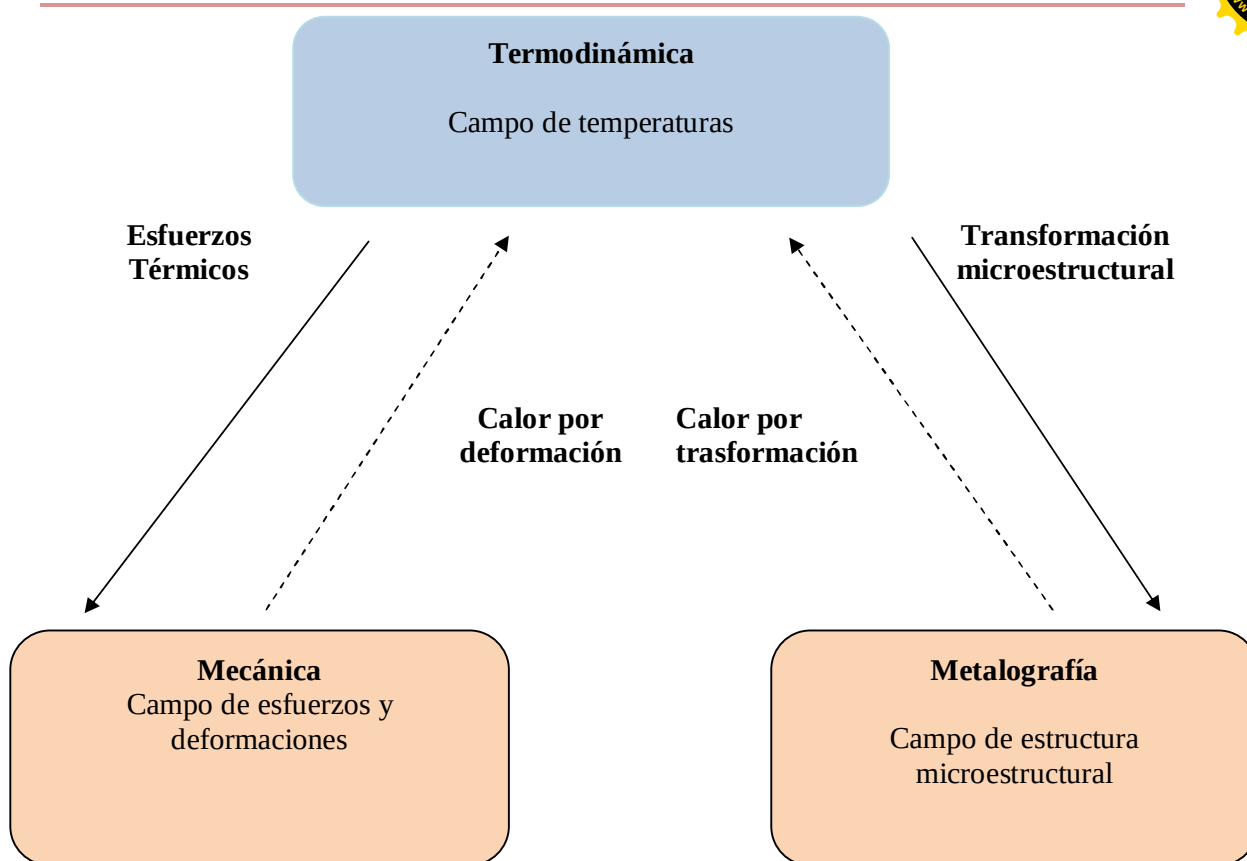
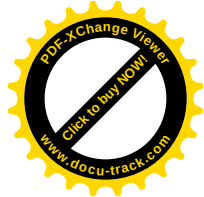
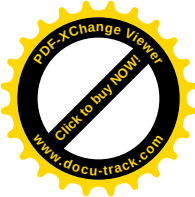


Figura I.18.- Influencia entre campos en el proceso de soldadura [I.49]

Es importante explicar que la figura muestra la influencia que ejerce el campo de temperaturas sobre el campo mecánico y el campo metalográfico, esto en relación directa con la temperatura la cual tiene gran influencia sobre los altos gradientes que generan dislocaciones de tipo no homogéneas en el material, y estos a su vez producen esfuerzos y distorsiones en el material, las cuales generan cambios en las propiedades del material [I.49]. *Mazubuchi* plantea que el proceso de soldadura se caracteriza por la particularidad en los fenómenos que ocurren por la transferencia de calor de una fuente móvil, en donde las dimensiones de la pieza llevan a diferentes desigualdades del volumen por diferencia de gradientes de temperaturas y a veces coeficientes de dilatación lineal que están en función de condiciones de embridamiento las cuales repercuten en el menor o mayor grado de los esfuerzos residuales [I.50].

I.5.- Diversos métodos utilizados en la medición de esfuerzos residuales en soldadura

Uno de los métodos más comunes empleados en la medición de esfuerzos residuales en el proceso de soldadura es a través del Elemento Finito, en la actualidad existen diversos tipos

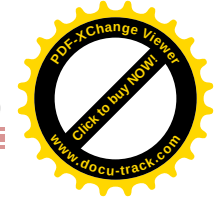
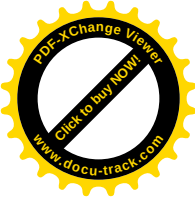


de programas computacionales en el área de Ingeniería, *Yenei Garcia* realizó una investigación en la cual plantea un procedimiento para obtener los campos térmicos, deformaciones y tensiones residuales en uniones soldadas en tipo T, utilizando las características del acero A-36. En esta investigación se muestra el procedimiento detallado que realizó, enunciando las consideraciones como aspectos de transferencia de calor en estado transiente, así como la variación de propiedades físicas del material en función de la temperatura, esto indica que el análisis no se comportara de forma lineal [I.51].

W. Bullón realizó una investigación en la cual buscaba la simulación de un proceso de la soldadura mediante un modelo Termo-Mecánico considerando el efecto de esfuerzos residuales utilizando el método de elemento finito este estudio parte tomando en consideración los efectos en el proceso de soldadura considerando el campo térmico mecánico, metalografico, entre estos se considera que es el campo térmico el que tiene una influencia significativa sobre los otros dos. En la simulación se utilizan por ser de dominio Básico de fuentes puntuales en la temperatura a lo largo del cordón de soldadura, de esta forma se logra obtener en el campo mecánico resultados comparables a los que se obtienen con modelos más complejos y que se aproximen al proceso real [I.49]

Pero no solo en uniones básicas como en tipo T o empalmes por el método de soldadura para poder evaluar por el método de elemento finito ya que el *Dr. P. A. Ramón* busca realizar una evaluación de esfuerzos residuales en Guijos desgastados en la zona del collarín empleando el proceso de arco sumergido y electro cinta, esta pieza mecánica constituye los arboles de molinos de azúcar los cuales han mostrado fallar continuamente. Este investigador propone la modelación por el método de elemento finito basándose en la geometría del guijo el cual recibe un proceso de soldadura por electro cinta que elevara la temperatura de 800°C – 500°C [I.52].

En reactores nucleares se ha empleado este método con la finalidad de tener un parámetro del desaguaste que ha sufrido el contenedor, o esfuerzos residuales que se producen por la presión interna o en las uniones por soldadura que se han realizado al crear el contenedor en conjunto con el gradiente de temperatura en el material base, esta herramienta es de gran ayuda ya que como se sabe el reactor nuclear es muy peligroso por la radioactividad, el instituto de petróleo de Colombia realizó una evaluación en su planta de energía nuclear en donde se realizó un análisis por el método de elemento finito en donde las fisuras en este tipo de reactores de

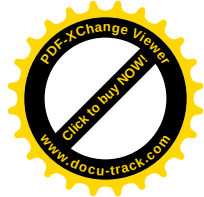
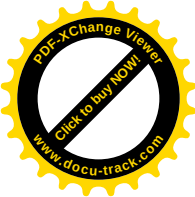


hidrotratamiento pueden crecer en las paradas y arrancadas mientras el reactor permanece frío este estudio se aplico en los reactores R-2651-R-2652 [I.53]. Este método de evaluación pertenece a los métodos no destructivos.

Pero no solo se utiliza elemento de finito para medir los esfuerzos residuales en procesos de soldadura, *Claudia P.* en una investigación en la cual monitorea uniones soldadas de acero estructural utilizando ruido magnético de Barkhausen, de una manera más simple este método se empleo en un acero A36, donde fueron realizadas uniones soldadas a tope de un pase con preparación de un bicel en V utilizando el proceso de SMAW con electrodo E7018 de 32mm de diámetro. El RMB se aplico en la superficie de la unión con un barrido de 1mm a partir del centro del cordón de la soldadura hasta una distancia de 35mm, se empleo una fuente bipolar que aplica una corriente variable, controlada por onda sinusoidal, en la superficie muestra un sensor inductivo que capta los pulsos electromagnéticos correspondientes a la señal de Barkhausen, estos impulsos son filtrados y amplificados finalmente digitalizados por medio de una tarjeta de adquisición de datos analógica [I.54].

Otro método empleado con muy buenos resultados en procesos de soldadura es aquel en donde se analiza la microestructura del material llevando a cabo un análisis de su composición, de una forma muy similar a realizar una autopsia solo que esta se realiza con un microscopio de barrido analizando la presencia de Ferrita, Perlita, Martensita etc. Este es el método que utilizo la investigadora *Gladys* al buscar evaluar la integridad estructural de un acero TRIP800 soldado mediante procesos láser CO₂ y GMAW. El cual implica todo un análisis metalografico para saber en qué zona se encuentran los esfuerzos residuales causados por la elevada temperatura del proceso. Este método se clasifica en los destructivos ya que existe el desbaste en la exploración por medio del microscopio [I.55].

En la elaboración de recipientes a presión la soldadura es fundamental para la unificación del materia, esta debe ser precisa para evitar fallas de tipo catastróficas al entrar en operación, una solución muy adecuada es la evaluación por líquidos penetrantes, esta es de tipo no destructiva [I.56] al igual que el ultrasonido. No solo en la producción de recipientes se puede aplicar también es de gran utilidad en la reparación como en la investigación de *Pozo Morejón* en la cual busca realizar diagnósticos en reparaciones en recipientes a presión instalados en una planta de energía eléctrica es decir que se encuentran en operación [I.57].



Otro método de tipo no destructivo es el que empleo el investigador *Zdzislaw Mazur*, al realizar la reparación por soldadura de rotores de turbinas de vapor y de gas fabricados con aceros al Cr-Mo-V utilizando el método de Rayos X. En este trabajo se busca presentar una clasificación de los rotores y estas se analizan al realizarse por rayos x en busca de obtener pruebas de en qué área se presentan los esfuerzos residuales que pueden afectar el funcionamiento de la turbina ya que la combustión de la reparación por la soldadura oscila entre los 900°C y los 1400°C [I.58]. El método que se empleara en este trabajo de investigación se sustentara en un tipo de método destructivo el cual emplea galgas extensométricas, este método es conocido como Método de Respuesta de Grieta que en ingles se conoce como *Crack Compliance Method* [I.59].

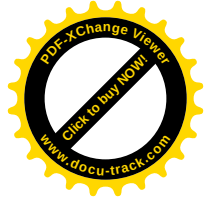
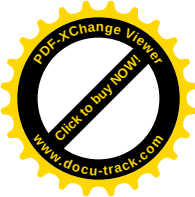
J. L. García empleo explosivos para aliviar de tenciones residuales la zona de influencia térmica de uniones soldadas, en esta investigación utilizo dos modos de disposición de la carga explosiva, la primera de forma lineal y la segunda de forma sinusoidal, como resultado se obtiene que el tratamiento por explosivos por cualquiera de los métodos de colocación de carga ofrece un alivio de tensiones en el entorno en un 50-60% demostrando la viabilidad del método para aumentar la eficiencia de las uniones soldadas, la medición se realizo por galgas y el puente de Wheastone como circuito fundamental, en esta prueba se realizo una medición antes de la explosión ya que la galga se destruye como consecuencia de la misma [I.60].

I.6.- Planteamiento del problema

Este tema de investigación se enfocará a los tipos de soldadura TIG y MIG los cuales se emplean de forma común en el sector industrial y un tipo de soldadura que es de nueva generación “Rayo Láser”. Con la finalidad de obtener una representación gráfica de la generación de esfuerzos residuales causados por el proceso de soldadura, utilizando un análisis experimental que consiste en método de CCM (COMPLIANCE METHOD FOR CRACK) que en español se puede comprender como Método de respuesta de grieta [I.1] sustentado en la aplicación de galgas extensométricas, y el puente de Wheatstone. Y a su vez un análisis numérico que respalde el desarrollo del método experimental buscando obtener resultados similares.

I.7.- Sumario

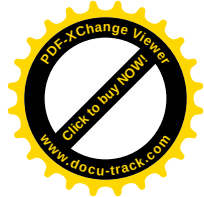
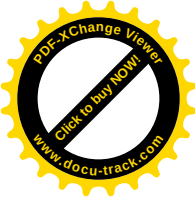
Este capítulo describe en su inicio los antecedentes históricos de soldadura en general y un breve antecedente histórico del proceso de soldadura que se empleara en el proyecto de



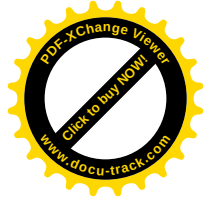
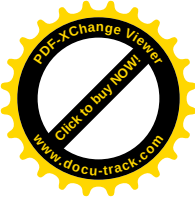
investigación los cuales son TIG, MIG y Rayo pueden influir en los esfuerzos residuales al realizar el proceso de soldadura y al termino una descripción de los diversos métodos que se han utilizado con la finalidad de evaluar los esfuerzos residuales. El siguiente capítulo estará dedicado a reunir la información necesaria para realizar este proyecto tanto en el análisis experimental como numérico, esto es mejor conocido como marco teórico.

I.8.- Referencias

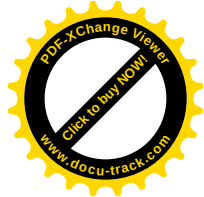
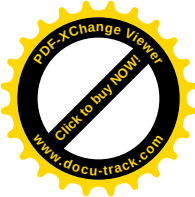
- 1.- *Índice Histórico Español*, Centro de estudios históricos internacionales, Ed. Universitat de Barcelona, Vol. XLIII, Núm. 119, pp 91, 1992.
- 2.- Howard, B., C. y Helzer, S., *Tecnología Moderna de la Soldadura*, Ed. Pearson, pp 4, 2005.
- 3.- Knight, D., *Humphry Davy Science and Power*, Ed. Cambridge University Press, pp 57-73, 1998.
- 4.- Kalpakjian, S. y Schmid, S., *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*, Ed. Person Educación, pp 103, México, 2002.
- 5.- *The Procedure Handbook of Arc Welding*. Cleveland: Lincoln Electric, pp 69-72, 1994.
- 6.- Hunt, R., *Humphry Davy, (1778–1829), Natural Philosopher*, Dictionary of National Biography, pp 56, 1985.
- 7.- Charles, S, *Diccionario de Biografía Científica*, Ed. Consejo Americano de Sociedades Científicas, Vol. 2, pp 67, 1981.
- 8.- Groover-Michael, P., *Orígenes de la Soldadura, Fundamentos de Manufactura moderna*, Ed. , pp.713-714, AÑO.
- 9.- Rodríguez, C. P, *Manual de Soldadura Eléctrica TIG y MIG*, Ed. Alsina, pp 17-20, 2001.
- 10.- Caori, T. P., *Conexiones en Estructuras Metálicas*, Ed. Universidad de Colombia, pp 19, 1996.
- 11.- Larry-Jeffus, *Welding Principles and Applications*, Ed. Thomson, pp 4-10, 2004.
- 12.- Gockel, F. y Schlossorsch, L., *Metaloctenia Fundamental*, Ed. Reverte S. A., pp 330, 1986.
- 13.- O'Brien, R. L., *Manual de Soldadura*, Ed. Prentice-Hall Hispanoamericana, pp 16, 1996.
- 14.- Rodolfo-Zúñiga, P., *Historia de la Soldadura*, Ed. Universidad de San Carlos Guatemala, pp.73, 2008.
- 15.- Houldcroft, P. T., *Tecnología de los Procesos*, Ed. Ceac S. A., pp 11-26, 2000.
- 16.- Brown, J. K., *The Baldwin Locomotive Works*, Ed. The Johns Hopkins University Press, pp 28, 2001.



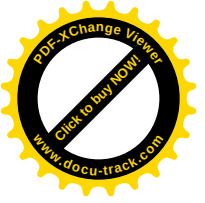
- 17.- Aguirre, M. y Malgesini, G., *Misiles o Microchips, la Conversión de la Ingeniería Militar en Civil*, Ed. Icaria, pp 249, 1996.
- 18.- JACKSON, C., *Weld. J.* 39 (3-5) (1960) 129s-140s, pp. 177- 190s, 225s-230s
- 19.- William, L. G. y Frank, M. M., *Welding Essentials Questions and Answers*, Ed. Industrial Press, pp vii, 2001.
- 20.- Lincoln, J. F., *Principles of Industrial Welding*, Ed. Arc Welding Foundation, pp. 56-67, 1978.
- 21.- Western, R. C., *Official Proceeding of the Railway Club*, Ed. Universidad de California, pp 23-45, 1917.
- 22.- *Welding Handbook*, 7a .Ed. ,American Welding Society, Vol. 1, pp 34-56, 1987 .
- 23.- Pazos, P., *Tecnología de los metales y procesos de manufactura*, Ed. Universidad Católica de Caracas, pp. 263, 2005.
- 24.-Guiachino, W. J. y Weeks, W., *Técnica y Práctica de la Soldadura*, Ed. Reverte, pp 166, 1981.
- 25.- Cueto, J., *Manual de Soldadura TIG*, Ed. Ceysa, pp 4-6, 2003.
- 26.- Geary, D., *Welding*, Ed. Mc Graw Hill, pp 1-3, 2000.
- 27.- Cueto, J., *Manual de Soldadura MIG-MAG*, Ed. Ceysa, pp 10-11, 2002.
- 28.- Pere-Molera, S. *Soldadura Industrial: Clase y Aplicaciones*, Ed. Productica, pp 106, 1992.
- 29.- Cembrero, C., Ferrer, C., Pascual, M. y Pérez, M. A., *Ciencia y Tecnología de los Materiales: Problemas y Cuestiones*, Ed. Prentice Hall, pp 52-56, 2005.
- 30.- Jagdish, P. S. y Surya, N. T., *Laser-Induced Breakdown Spectroscopy*, Ed .Elsevier, pp 49, 2007.
- 31.- Marshall, L. S., *Láser: Tecnología y Aplicaciones*, Ed. Reverte S. A., pp 4, 1972.
- 32.- Cooper, M., *Introducción a la limpieza con láser*, Ed. Istmo, pp 21-34, 2005.
- 33.- Porcel-Granados, F. M., Desarrollo tecnológico en la historia de la humanidad inventores e inventos; Gould y el Láser, *Revista Digital Innovación y Experiencias Educativas*, N° 21, pp.45-49, 2009.
- 34.- Maiman, H. T., *United States Patent Office: Ruby Laser System N° 3353115*, California, 1967.
- 35.- González, E., *El Láser: Principios Básicos*, Ed. Universidad de Santo Tomas, pp 41-46, 2003.
- 36.- Frederick, L. F., *Mechanical Engineering Series*, Ed. Editor-in-Chief, pp.14, 1995.



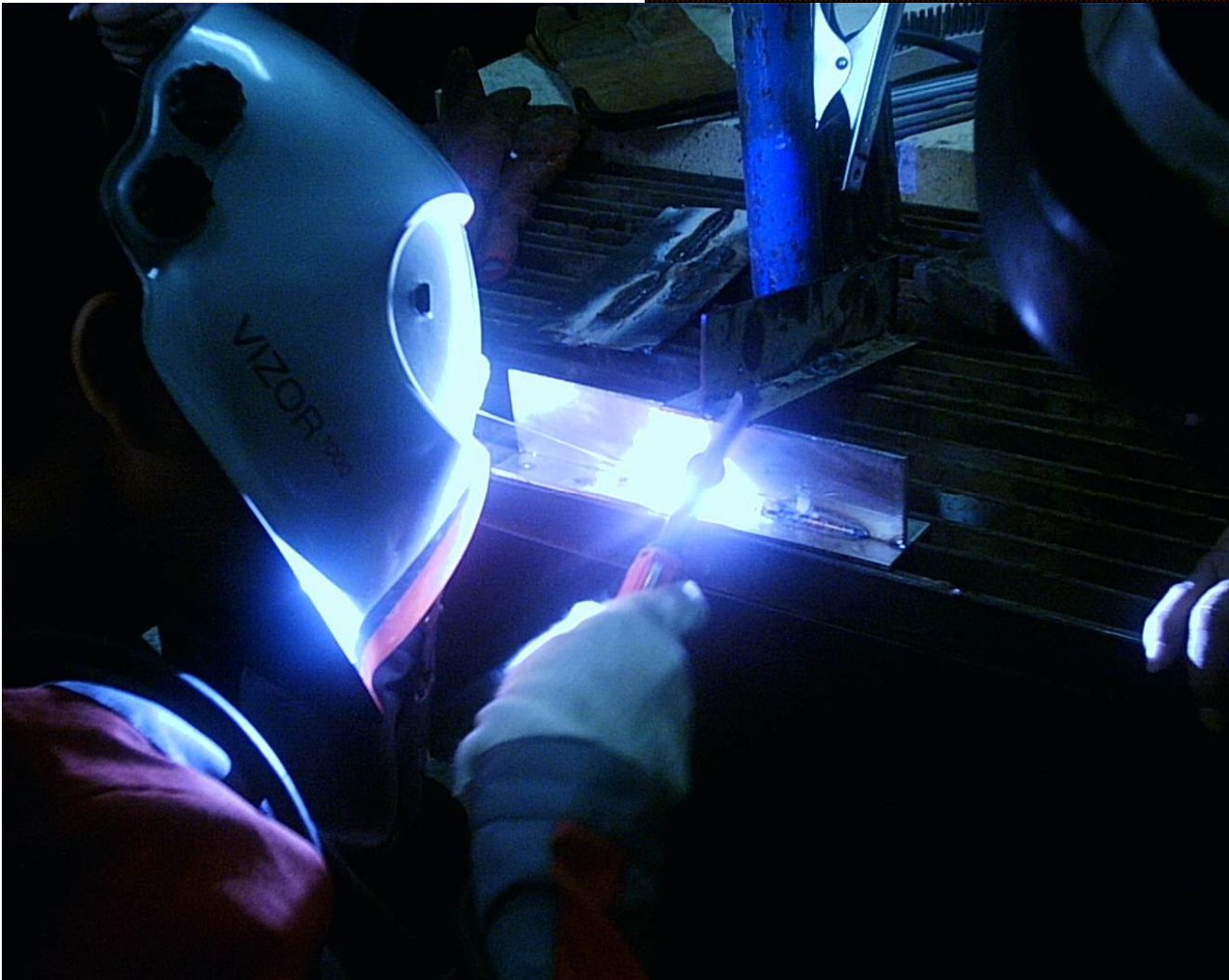
- 37.- Treuting, R. G., The nature, origin and effects of residual stresses, *Residual stress measurements*, pp 1– 41, 1952.
- 38.- Anderson, T. L., *Fracture Mechanics; Fundamentals and Applications*, Ed. CRC, pp 9-10, 2005.
- 39.- Krutz, G. W. y Segerlind, L. J., Finite elements analysis of welded structures, *Welding Journal* 57 (7), pp 211-216, 1978.
- 40.- Goldak, J., Bibby, M., Moore, J., House, R., y Patel, B., *Computer modeling of heat flows in welds*, *Metallurgical Transactions*, 17B: 587-600, 1986.
- 41.- Hart, P. H., *Hydrogen cracking-its causes, costs and future occurrence*, pp.59-62, London, 2000.
- 42.- Kasuya, T. y Hashiba, Y., Prediction of hardness distribution in steel heat affected zone, *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 4 No. 5 1995.
- 43.- Nawrocki, J. G., Dupont, J. N., Robino, C. V. y Marder, A. R., The stress-Relief Cracking Susceptibility of a new Ferritic Steel – Part 2 Multiple – pass Heat – affected zone simulations, *Welding Research Supplement*, January, 2001.
- 44.- Grajon, H., *Fundamentals of Welding Metallurgy*, Ed. Abigton Publishing, Cambridge, pp. 18-40, 1991.
- 45.- Lancaster, J. F., *Metallurgy of Welding*, Ed. Chapman y Hall, pp 175-198, London, 1994.
- 46.- Yerania, P. G., Medina R. A. y Valdez, H. F., Integridad estructural del acero TRIP800 soldado mediante procesos laser CO2 y GMAW, *Ingenierías*, Vol. 13, pp 62, 2010.
- 47.- Pere-Molera, S. *Tratamiento Térmico de los Metales*, Ed. Productica Barcelona, pp 17-21, 1991.
- 48.- Gil-Mur, F. J, y Manero-Panella, J. M., *Metalografía*, Ed. Ediciones UPS, pp 59-65, 2005.
- 49.- Bullón, W. C., Acosta, J. S., Franco, R. R. y Valverde, Q. G., Simulación de un proceso de soldadura mediante un modelo termo-mecánico considerando el esfuerzos residuales utilizando el método de elemento finito, *8 Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica*, 2007.
- 50.- Masubuchi, K., *Analysis of welded structures: Residual stresses, distortion, and their consequences*, Massachuset, Institute of Technology, pp. 88-145, USA, 1980.
- 51.- García-Rodríguez, Y. y Burgos-Sola, J., Procedimiento para la obtención mediante MEF de los campos térmicos, deformaciones y tensiones residuales en uniones soldadas, *Revista Técnica Ing. Universidad Zulia*, Vol.30, pp 13-22, 2007.



- 52.- Martínez, R. C. y Estrada, A. E., *Consideraciones para la obtención del procedimiento de relleno de guijos desgastados en la zona del collarín, empleando el proceso de arco sumergido y electro cinta*, Centro de investigación de soldadura, 2006.
- 53.- Córdoba, T., Zabala, C., Guzmán, M. y Germán, T. Q., Evaluación fitness for service de integridad estructural y vida residual en reactores de hidrotratamiento, *6ta.Coferencia sobre tecnología y conocimiento*, Colombia, 2003.
- 54.- Giraldo, M. C., Monitoreo de uniones soldadas de acero estructural utilizando ruido magnético de Barhausen, *IV Conferencia panamericana de END Buenos Aires*, 2007.
- 55.- Pérez-Medina, G. y Reyes-Vadés, H., Integridad estructural de un acero TRIP800 soldado mediante proceso Láser Co2 y GMAW, *Ingenierías*, Vol. 13, pp 62, 2010.
- 56.- Casasola, L. I., *Líquidos penetrantes; un método no destructivo*, Tesis de licenciatura para obtener el grado de Ingeniero Mecánico, ESIME Culhuacán, pp.72, 2008.
- 57.- Pozo-Morejón J.A., Díaz-Cedré E. y Duffus-Scott A., *Metodología para la reparación por soldadura de recipientes a presión*, Ed. Centro de investigaciones de soldadura Universidad central “Marta Abreu” de las Villas, 2003.
- 58.- Zdzislaw-Mazur, C., Hernandez, R. A., Orozco, S. J. y Bañuelos, P. J., *Reparación por soldadura de rotores de turbinas de vapor y de gas fabricados con aceros al Cr-Mo-V, Aplicaciones Tecnológicas*, Boletín de CFE, pp 49-54, 2003.
- 59.- Urriolagoitia-Sosa, G. y Durodola-Fellows J. F. , *Effect of strain hardening on residual stress distribution in beams determined using the crack compliance method*, Department of Mechanical Engineering, Oxford Brookes University, Headington, Oxford, UK, pp 115, 2005.
- 60.- Garcia-Jacomino, J. L., Burgos-Sola, J., Cruz-Crespo, A., Álvarez-Luna, M. y García-Arteaga, M., *Empleo de explosivos en alivio de Tensiones Residuales de la zona de influencia térmica de uniones soldadas*, Ed. Soldagem, San Pablo, Vol. 2, No. 2, pp 170-175, 2005.

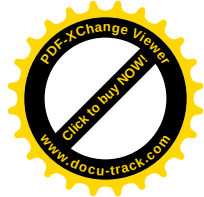
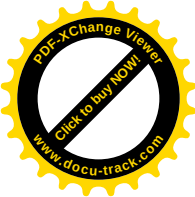


Capítulo II



Marco conceptual

Soldadura TIG, MIG y Rayo Láser

**II.1.- Introducción**

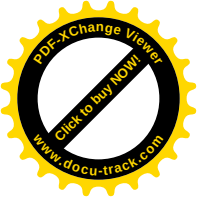
Como ya se mencionó en el capítulo anterior, la aplicación del proceso de soldadura ha evolucionado de manera considerable y constante. Las técnicas de soldadura se han convertido en fundamentales para el desarrollo de los procesos de adición de materiales metálicos. Los procesos de soldadura que más se emplean en el sector industrial son de tipo TIG y MIG, los cuales se evaluarán en este trabajo junto al proceso de rayo láser. Asimismo en este capítulo se describe el método de respuesta de grieta (CCM), el cual es un método destructivo utilizado en la evaluación de esfuerzos residuales. Así como, una breve descripción de cómo funcionan las simulaciones numéricas por medio del método de elemento finito.

II.2.- Soldadura por arco de Tungsteno y gas (TIG)

Este proceso de soldadura es comúnmente conocido como TIG (Tungsteno Inert Gas) ó GTAW (Gas Tungsteno Arc Welding), el cual consiste en la unificación de materiales de tipo metálicos. Empleando un arco eléctrico que se genera a través de un electrodo de Tungsteno, el cual no es consumible. Este proceso emplea un gas protector sin la aplicación de presión. Este proceso se ha vuelto una herramienta de uso común en muchos sectores industriales en virtud de la alta calidad de las uniones producidas y el bajo costo del equipo empleado para desarrollar este proceso [II.1]. Este tipo de soldadura se sustenta en la fusión de materiales, en el cual se establece un arco eléctrico y desprende una muy alta cantidad de calor (1500-2000 °C). Lo anterior sucede entre un electrodo de Tungsteno no consumible y el metal de base o pieza a soldar. Como en este proceso el electrodo no es consumible, se requiere realizar aportes metálicos, los cuales se pueden realizar utilizando una varilla o alambre en la zona de soldadura. Esta es la misma técnica que se utiliza en el proceso de soldadura *oxiacetilénica*. La diferencia entre el proceso de soldadura de *oxiacetilénica* y GTAW es que este último utiliza un gas inerte con la finalidad de proteger la zona y así, evitar la formación de escoria. Uno de los primeros gases inertes empleados en este proceso fue el Helio, su función era crear una protección sobre el material fundido, evitando un efecto contaminante sobre el material fundido y evitar el efecto edificador de la atmosfera (Oxígeno y Nitrógeno). [II.2]

II.2.1.- Gases inertes empleados en el proceso TIG

La cualidad de un gas inerte, se encuentra desde el punto de vista químico, ya que este gas no reacciona en el proceso de soldadura. Es decir, que el gas no genera combustión en el proceso de soldadura. Existen cinco tipos de gases inertes como el Argón, Neón, Kriptón y el Xenón,



de estos cinco sólo resultan aptos dos gases para emplearse en este proceso los cuales son el Argón y el Helio [II.3].

II.2.2.- Aplicaciones óptimas de gases inertes en el proceso de soldadura TIG

Una comparación en la aplicación de estos gases, se da, en que para obtener una misma longitud de arco y corriente, el Helio necesita un mayor voltaje, superior al Argón para producir el mismo arco eléctrico. El Helio tiene la propiedad de producir más calor que en el proceso que el Argón. Por lo que resulta más efectivo utilizar este gas en materiales con mayor espesor, como el Cobre, Aluminio y sus aleaciones. El Argón tiene la cualidad de adaptarse mucho mejor a los procesos de soldadura de metales con menor conductividad térmica y poco espesor. En la Tabla II.1 se muestra la aplicación idónea de gas y elemento a soldar.

Tabla II.1.- Aplicación de gas inerte en diferentes materiales [II.4]

Metal a soldar	Gas
Aluminio y sus aleaciones	Argón
Latón y sus aleaciones	Helio y Argón
Cobre y sus aleaciones (menor a 3mm)	Argón
Cobre y sus aleaciones (mayor a 3mm)	Helio
Acero al Carbón	Argón
Acero inoxidable	Argón

En el proceso de soldadura TIG tiene como particularidad que entre *más grueso* sea el gas, mejor será el resultado obtenido en el proceso de soldadura con arco protegido por gas. Por ejemplo, el Argón es diez veces más denso que el Helio y un 30% más denso que el aire. Cuando el Argón se descarga sobre la soldadura, este forma una densa nube protectora, mientras que la acción del Helio es más liviana, de mayor acción dispersiva en el proceso de soldadura. Por este motivo en caso de usar Helio serán necesarias mayores cantidades de gas puro que contengan en su mayoría Helio que si utilizaran Argón. Actual mente y desde hace bastante tiempo, el Helio ha sido remplazado por el Argón o por mezclas de Argón-Hidrogeno o Argón-Helio [II.2].

II.2.3.-Descripción del proceso de soldadura TIG

El proceso de soldadura por arco de Tungsteno y de gas se ilustra en la Figura II.1. Este proceso requiere la aplicación de un electrodo de Tungsteno, el cual se comporta como conductor, para generar el arco eléctrico ya que este electrodo es de tipo no consumible el cual se encuentra sostenido en el soplete. Se utiliza un electrodo de Tungsteno, el cual es permanente, ya que este material se funde a los 3410 °C y la temperatura alcanzada en este proceso oscila entre los 1500-2000 °C, este electrodo se acompaña de la protección del gas. Este sistema como se ha mencionado anterior mente se alimenta de un gas protector inyectado en el proceso por el soplete, con la finalidad de proteger el electrodo, el charco de soldadura y el arco de soldadura, todo lo mencionado anterior mente se encuentra en el proceso de solidificación evitando de esta forma la contaminación generada por la atmósfera [II.5].

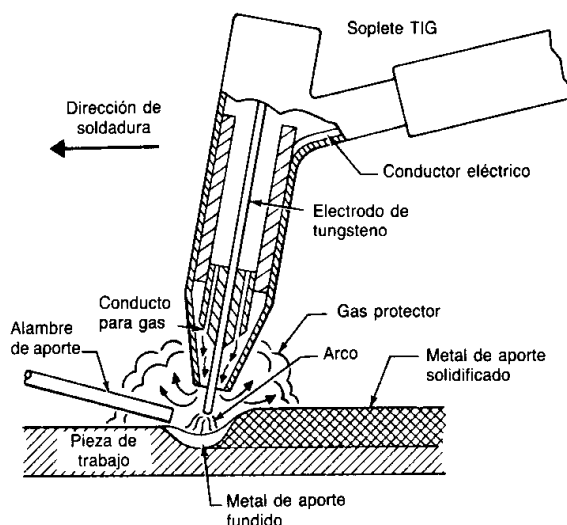


Figura II.1.- Proceso de soldadura por arco de Tungsteno y gas

La fuente principal de calor se produce en el arco eléctrico y este a su vez se produce como consecuencia por el paso de la corriente eléctrica a través del gas protector ionizado que conduce electricidad. Una vez establecido el arco eléctrico, el calor generado funde el metal base, generando en ese punto un charco de soldadura, por lo cual es necesario mover el soplete a lo largo de la unión con la finalidad de fundir las superficies de empalme, generando la unión del material cuando este pierde la energía térmica suministrada.

En algunos casos es necesario emplear materiales de aporte, en el proceso de fundición, este debe de colocarse por el borde delantero del charco de soldadura para llenar la unión. Este

tipo de equipos de soldadura tipo TIG siempre están formados por cuatro componentes básicos los cuales son:

- Soplete.
- Electrodo.
- Gas protector.
- Fuente de potencia para soldadura.

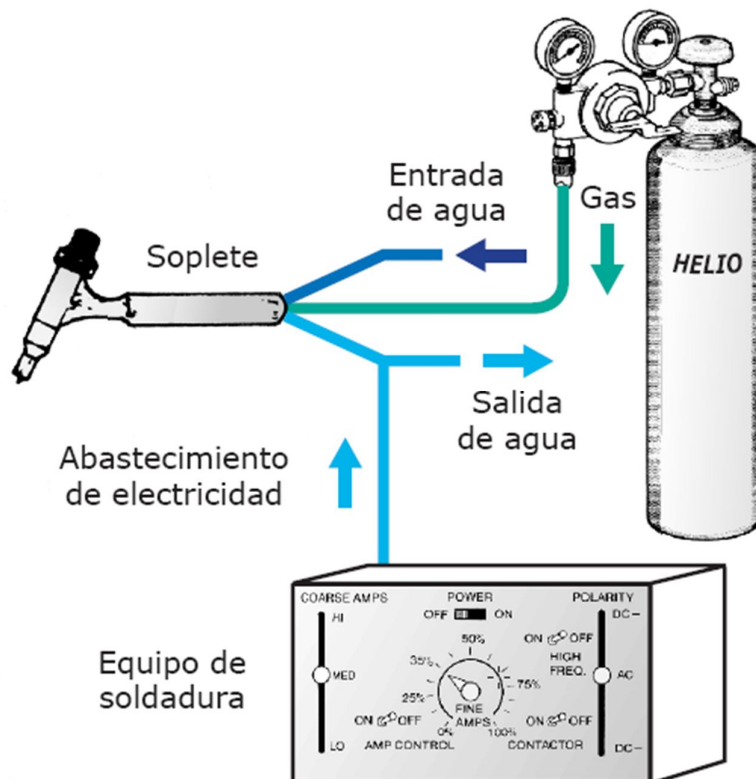
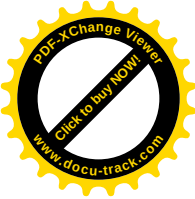


Figura II.2.- Equipo para el sistema de soldadura TIG o GTAW [II.2]

En un sistema TIG la corriente o su polaridad se determinan en función del material a soldar y es posible utilizar corriente continua y corriente directa. También cuenta con una unidad generadora de alta frecuencia también conocido como AF, el cual tiene como función el formar el arco eléctrico entre el electrodo y el metal a soldar. Este sistema cuenta con electroválvulas las cuales permiten controlar el accionamiento en forma conjunta del agua y gas, algunos equipos poseen un control mediante pedal o gatillo el cual está instalado en el soplete. Al realizar este proceso de soldadura con corriente continua, se puede observar que en la terminal positiva se desarrolla el 70% del calor en proceso y en el negativo el 30%. Esto quiere decir, que según la polaridad asignada, directa o inversa los resultados obtenidos serán



diferentes. De esto se puede deducir que utilizando el mismo valor de corriente o amperaje, pero utilizando la polarización directa se puede utilizar un electrodo de tungsteno de menor tamaño, con lo cual se puede obtener un arco eléctrico más estable, obteniendo una mayor penetración en la soldadura efectuada.

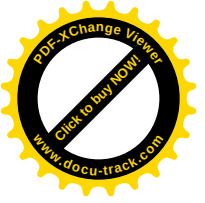
Cuando se utiliza corriente directa el sistema no tiene la capacidad de penetrar la capa de oxido, la cual se forma habitual mente en el proceso de soldadura en algunos metales como el aluminio. La corriente alterna tiene la capacidad de penetrar la capa de oxido mencionada anteriormente, pero el arco se extingue cada vez que la forma sinusoidal pasa por el valor de cero de tensión o de corriente. Sin embargo, este problema se puede solucionar superponiendo una corriente alterna a alta frecuencia (AF), la cual mantiene el arco encendido aún con tensión cero. A continuación se muestra la Tabla II.2 en donde se detalla el tipo de corriente según su aplicación [II.5].

Tabla II.2.- Corrientes necesarias en el proceso de soldadura TIG

Metal a soldar	Corriente preferida	Corriente opcional
Aluminio	CA (Alta frecuencia)	CC inversa
Latón y aleaciones	CC directa	CA (alta frecuencia)
Cobre y aleaciones	CC directa	-
Acero al Carbón	CC directa	CA (alta frecuencia)
Acero inoxidable	CC directa	CA (alta frecuencia)

Una descripción de los puntos principales a tener en cuenta son [II.6]:

- Previo a la realización de cualquier operación de soldadura con TIG, la superficie deberá estar perfectamente limpia. Esto es muy importante ya que en este sistema no se utilizan fundentes o “fluxes” los cuales realizan dicho trabajo y separen las impurezas como escoria.
- Cortar la varilla de aporte en tramos de no más de 450 mm. Resultan más cómodas para maniobrar. Previamente a su utilización, se deberán limpiar con alcohol o algún solvente volátil. Aún el polvo contamina la soldadura.



- Si se es diestro, deberá sostener el soplete o antorcha con la mano derecha y la varilla de aporte con la mano izquierda. Si es zurdo, se deberán intercambiar los elementos de mano.
- Tratar de adoptar una posición cómoda para soldar, sentado, con los brazos afirmados sobre el banco o mesa de trabajo. Se debe aprovechar que este sistema no produce chispas que vuelen a su alrededor.
- Utilizar los elementos de protección necesarios (casco, lentes, guantes, etc.). A pesar de que la luz producida por la soldadura TIG no parezca peligrosa, en realidad lo es. Ella posee una gran cantidad de peligrosa radiación ultravioleta.
- Se deberá estimar el diámetro del electrodo de tungsteno a utilizar en aproximadamente la mitad del espesor del metal a soldar.
- El diámetro de la tobera deberá ser lo mayor posible para evitar que restrinja el pasaje de gas inerte a la zona de soldadura.
- Deben evitarse corrientes de aire en el lugar de soldadura. La más mínima brisa hará que las soldadura realizada con TIG se quiebre o fisura. Además, puede ser que por efecto del viento, se sople o desvanezca el gas inerte de protección.
- Para comenzar la soldadura, el soplete deberá estar a un ángulo de 45° respecto al plano de soldadura. Se acercará el electrodo de Tungsteno a la pieza mediante un giro de muñeca (fig.). Se deberá mantener una distancia entre el electrodo y la pieza a soldar de 3 a 6 mm ($1/8''$ a $1/4''$). Nunca se debe tocar el electrodo de tungsteno con la pieza a soldar. El arco se generará sin necesidad de ello.
- Calentar con el soplete hasta generar un punto incandescente. Mantener alejada la varilla de aporte hasta tanto no se haya alcanzado la temperatura de trabajo correcta.

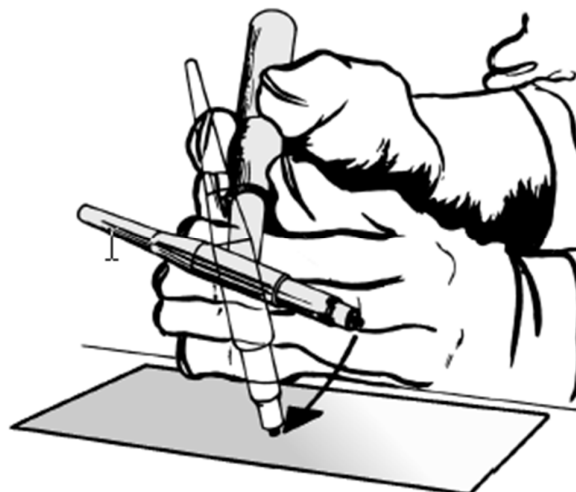


Figura II.3.- Forma correcta de comenzar el arco eléctrico en el proceso TIG

El sistema puede enfriarse por aire o por agua, pero cuando se utilizan corrientes por debajo de los 150 Ampere, solo se emplea la refrigeración por aire. En cambio cuando se emplean corrientes superiores a los 150 Ampere suele emplearse refrigeración por agua. Esta puede ser utilizada varias veces en el proceso gracias a un sistema que permite su recirculación, mediante un tanque de reserva, una bomba y un enfriador [II.7].

II.2.4.- Electrodo en el proceso TIG

Es importante resaltar que el electrodo en un inicio no cuenta con una forma específica para el proceso, se le da forma al electrodo de manera mecánica (Figura II.3), desbaste o fundido, justo antes de ser usados. Básicamente existen tres tipos de formas en electrodos de Tungsteno y la selección de esta en función de la corriente empleada en el proceso de soldadura. En la Tabla II.3 se muestran los rangos de corriente admisible para cada diámetro [II.5].



Figura II.3.- Posibles formas del electrodo de Tungsteno

Tabla II.3.- Electrodo en función de la corriente y diámetro [II.2]

Corriente (Ampere)	Diámetro de los electrodos	
	Pulgadas	Milímetros
Hasta 15 A	0.010	0.25
5 a 20 A	0.020	0.51
15 a 80 A	0.040	1.02
70 a 150 A	1/16	1.59
150 a 250 A	3/32	2.38
250 a 400 A	1/8	3.17
350 a 500 A	5/32	3.97
500 a 750 A	3/8	4.76
750 a 1000 A	1/4	6.35

Existe una codificación en los electrodos, esto se encuentra bajo la norma internacional ISO 6848 en la cual se establece una codificación alfanumérica en la que la primera letra caracteriza el componente principal y la segunda letra se caracteriza la adición del oxido:

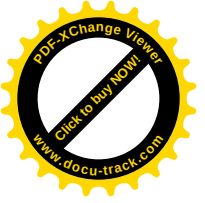
Tabla II.4.- Material de adición del oxido en el electrodo [II.2]

Codificación	Componente principal
P	Tungsteno puro
T	Torio
Z	Circonio
L	Lantano
C	Cerio

Después se sigue un número que corresponde al porcentaje de adición multiplicado por diez, por ejemplo un WP se caracteriza por ser un electrodo de Tungsteno puro mientras que un WT 20 corresponde a un electrodo de Tungsteno con un 2% de Torio. Cada electrodo está definido por norma, y viene indicado por un anillo de color como se muestra en la Tabla II.5.

Tabla II.5.- Código de colores por norma ISO 4868 [II.5]

Código	WP	WT4	WT10	WT20	WT30	WT40	W23	WZ9	WL10	WC20
Color	Verde	Azul	Amarillo	Rojo	Violeta	Naranja	Marrón	Blanco	Negro	Gris



Las boquillas o toberas se encuentran en interacción directa con electrodo, ya que tienen como función el dirigir el gas inerte sobre el proceso de soldadura y proteger el electrodo, estas boquillas se pueden ser de dos materiales los cuales son: cerámica y metal. Las boquillas de cerámica son utilizadas en los sopletes de enfriamiento por aire, mientras que los metálicos son utilizados en los sopletes enfriados por agua.

II.2.5.- Tiempo y frecuencia de los impulsos

Estos están en función del grueso, así como las propiedades del material. De tal manera que siempre exista un tiempo de base suficiente para que el calor generado en el proceso se pueda perder satisfactoriamente. Las condiciones de enfriamiento tienen una relación directa con la velocidad de crecimiento de los cristales en el proceso de solidificación. Las frecuencias comúnmente utilizadas son de 0.5 a 20 Hz [II.8].

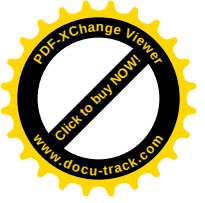
II.2.6.- Velocidad de soldadura

Este parámetro se encuentra relacionado con la geometría de la junta soldada. Es decir, su penetración, profundidad y longitud. Ya que si la velocidad de soldadura es elevada y la corriente eficaz y débil la zona térmicamente afectada y la zona fundida son pequeñas, esto evita el sobrecalentamiento del metal base. De todas maneras a velocidades de soldaduras elevadas, pueden aparecer regueros en los bordes de la soldadura debido a la potencia del arco, efecto que depende de la corriente de soldadura [II.9].

II.2.7- Ventajas en el proceso TIG

En el proceso de soldadura TIG se pueden encontrar las siguientes ventajas [II.2]:

- Las soldaduras tienen la cualidad de ser más dúctiles y resistentes contrala corrosión, que las realizadas por sistemas usuales. Este proceso no utiliza decapantes para ningún tipo de material, se evitan las inclusiones de estos y sin el peligro consecuente de la corrosión en la zona de soldadura.
- Todo el proceso se realiza sin proyecciones, chispas escoria o humos, se puede emplear para soldar prácticamente todos los metales que se emplean en la industria como lo son:
 - Todos los metales ligeros: Aluminio, Magnesio y sus aleaciones.



- Todos los Aceros inoxidables como el Cromo y Níquel.
 - Cobre y sus aleaciones.
 - Plata y Oro.
 - Fundiciones y Aceros al Carbón.
-
- La soldadura es de buena calidad, general mente sin defectos, también la soldadura tiende a estar libre de salpicaduras.
 - Puede usarse con o sin material de aporte para realizar la unión de los metales y el costo de la fuente de poder es relativamente bajo.
 - Controla de forma independiente la fuente de calor y las adiciones de aporte-
 - Permite una perfecta soldadura en materiales de espesor delgado.
 - Existen menores posibilidades de grietas por la acción del hidrogeno en aceros susceptibles a ellas.
 - El cordón presenta un buen acabado.

II.2.8.- Desventajas en el proceso TIG

Este proceso no es perfecto, de tal manera que tiene algunas desventajas tales como [II.10]:

- Se requiere una buena destreza al realizar el proceso de forma manual.
- Alto costo del equipo.
- Limitación en lugares de difícil acceso para la pistola.
- Enfriamiento más rápido en comparación a otros métodos.
- Luego de rebasar un espesor de 3/8" esta resulta menos económica comparado con otros procesos, a demás que la protección de la soldadura, es decir el gas no tiene la eficacia requerida en lugares abiertos por las corrientes de aire.

II.3.- Proceso de soldadura Gas Arco Metal (MIG)

El proceso de soldadura MIG (Metal Gas Inert), también conocido como Gas Arco Metal (MAG) o GMAW (Gas Metal Arc Welding), se basa en una línea de alimentación continua del electrodo continuo. El cual es consumible el cual se protege aplicando un gas de procedencia externa. Una vez que el operador a realizado los ajustes iniciales del equipo con la característica de regular la velocidad del electrodo en su avance y de controlar la temperatura en el proceso de soldadura, (por variación de la corriente eléctrica) al igual que el fluido del gas protector. Estas variables están en función de las características del proceso (material, espesor, aporte, posición, etc.) [II.2]. Por todo esto los únicos controladores manuales que el soldador requiere para la operación semiautomática son los de velocidad y dirección del desplazamiento. Así como, el posicionamiento de la pistola. Cuando se cuenta con los ajustes apropiados, la longitud del arco y la corriente (es decir la velocidad de alimentación del alambre) se mantiene automáticamente. En el proceso MIG existen tres formas de transferir el metal sobre la pieza y estas son la transferencia por inmersión o corto circuito, la globular y en determinadas circunstancias transferencia por aspersión [II.11].

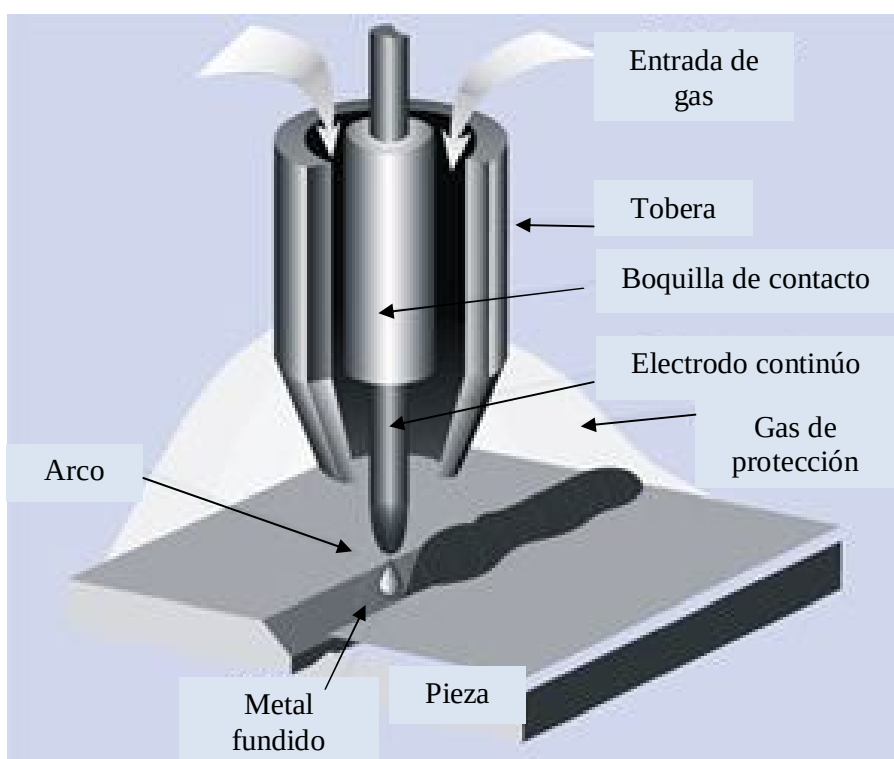
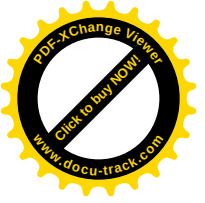


Figura II.4.- Proceso de soldadura por arco de metal

A continuación se describe de forma sencilla los pasos a seguir al realizar el proceso de soldadura tipo MIG [II.2]:



1. Encender el sistema de refrigeración (si se dispone).
2. Regular la velocidad de avance del electrodo.
3. Oprimir el gatillo de la pistola hasta que sobresalgan 6 mm de electrodo de la boquilla en caso de sobrepasar dicha medida, cortar el excedente con un alicate.
4. Abrir el cilindro de gas protector.
5. Oprimir el gatillo de la pistola para purgar el aire de las mangueras y ajustar el fluxómetro al valor deseado.
6. Graduar el voltaje del equipo, corriente, etc. según el tipo y espesor de metal a unir.
7. Utilizar el método de rayado o raspado para iniciar el arco.
8. Para extinguir el arco, separar la pistola del metal o bien soltar y volver a pulsar el gatillo.
9. Si el electrodo se pega al metal, soltar el gatillo y cortar el electrodo con alicate.
10. Si se desea realizar un cordón o una costura, se deberá calentar el metal formando una zona incandescente, y luego mover la pistola a lo largo de la unión a una velocidad uniforme para producir una soldadura lisa y pareja.
11. Mantener el electrodo en el borde delantero de la zona de metal fundido, conforme al avance de la soldadura.
12. El ángulo que forme la pistola con la vertical es muy importante. Este deberá ser de no más de 5° a 10° . De no ser así, el gas no protegerá la zona de metal fundido.

II.3.1.- Equipo utilizado en el proceso MIG

Está constituida por [II.12]:

Evaluación numérico-experimental sobre la inducción de esfuerzos residuales por medio del proceso de soldadura tipo TIG; MIG y Rayo láser

- Equipo para soldadura por arco con sus cables.
- Suministro de gas inerte para la protección de la soldadura con su respectiva mangueras.
- Mecanismos de alimentación automática de electrodo continuo.
- Electrodo continuo.
- Pistola o antorcha para soldadura con sus mangueras y cables.

En algunos casos se utilizan electrodos desnudos con protección por gas y en otros casos se utilizan electrodos recubiertos con fundentes similares a los utilizados en el proceso de arco protegido convencional. Existe otra alternativa como los electrodos huecos con núcleo fundente. El equipo necesario para el proceso de soldadura MIG se muestra en la Figura 5. Los componentes básicos del equipo son; unidad de pistola soldadora y cables, unidad de alimentación del electrodo, fuente de potencia y la fuente del gas protector.

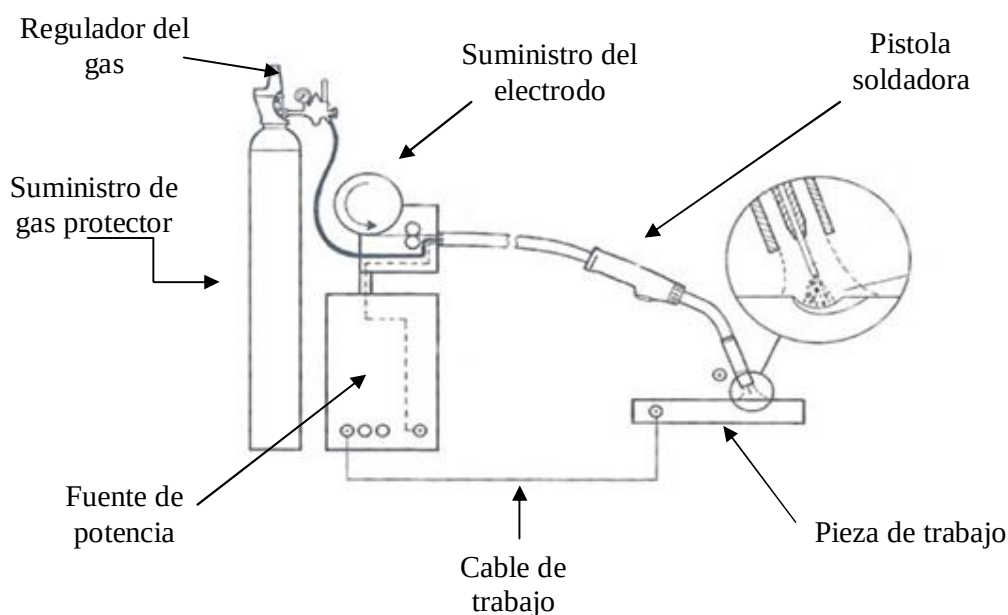
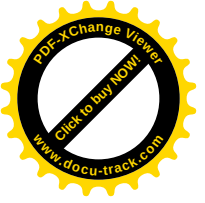


Figura II.5.- Equipo empleado en el proceso de soldadura MIG



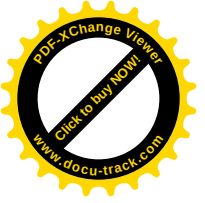
La pistola guía el electrodo consumible y conduce la corriente eléctrica y el gas protector al trabajo de modo que proporciona la energía para establecer y mantener el arco y fundir el electrodo. Además de la protección necesaria contra la atmosfera del entorno [II.2].

Se emplean dos combinaciones de unidad de alimentación de electrodo y fuente de potencia para lograr la autorregulación de la longitud del arco que se desea. Generalmente esta regulación se efectúa con la fuente de potencia de voltaje (potencial) constante en conjunción con una alimentación de electrodo de velocidad constante. Con la combinación de potencial constante (alimentación del electrodo constante), los cambios en la posición del soplete originan un cambio de corriente de soldadura que coincide exactamente con el cambio en la extensión (potrusión) del electrodo, de modo que la longitud del arco no se modifica. Un ejemplo común de este caso sería el aumentar la extensión del electrodo al retirar el soplete, la salida de corriente de la fuente de potencia se reduce, con lo que se mantiene el mismo calentamiento por resistencia del electrodo. En un sistema alternativo, la autorregulación la autorregulación se efectúa cuando las fluctuaciones del voltaje se reajustan los circuitos de control del alimentador, los cuales se modifican de manera apropiada la alimentación del alambre. En algunos casos (como cuando se suelda aluminio), puede ser preferible apartarse de esas combinaciones estándar y acoplar una fuente de potencia de corriente constante con una unidad de alimentación del electrodo de velocidad constante. Esta combinación no tiene mucha capacidad de autorregulación y por lo tanto requiere de operadores más hábiles en operaciones de soldadura semiautomática. Algunos usuarios opinan que esta combinación ofrece un grado de control sobre la energía del arco (corriente) que puede ser importante para resolver el problema que implica la elevada conductividad térmica de los metales base de Aluminio [II.13]

II.3.2.- Mecanismos de transferencia del metal

Un factor indiscutible en el proceso de soldadura MIG o GMAW es el describir las características en términos de los tres mecanismos básicos empleados para transferir el metal del electrodo al trabajo por este proceso, los cuales son:

- a) Transferencia por aspersión.
- b) Trasferencia globular.
- c) Transferencia en cortocircuito.



Este tipo de transferencia está determinado por varios factores y los más significativos son; la magnitud y tipo de corriente de la soldadura, diámetro del electrodo, composición del electrodo, extensión del electrodo y el gas protector.

II.3.2.1.- Transferencia por aspersión

Con un escudo rico en gas Argón, es posible producir una modalidad de transferencia de rocío axial muy estable y libre de salpicaduras. Para esto es preciso usar corriente continua con el electrodo positivo, y un nivel de corriente por encima de un valor crítico conocido como corriente de transición. Por debajo de este nivel, la transferencia se realiza en modalidad globular, la cual se describirá más adelante, a razón de unas cuantas gotas por segundo. Por encima de la corriente de transición, la transferencia se efectúa en forma de gotas muy pequeñas, las cuales caen a centenares por segundo.

Este método de transferencia produce un flujo altamente direccional de las gotas discretas, y aceleradas por la fuerza del arco, hasta alcanzar velocidades que vencen los efectos de la gravedad. Por esta razón y en ciertas condiciones, el proceso puede utilizarse en cualquier posición. Como las gotas son más pequeñas que la longitud del arco, no se genera un corto circuito y las salpicaduras son insignificantes, si es que no se eliminan del todo [II.14].

La modalidad de transferencia por aspersión, puede servir para soldar casi cualquier metal o aleación gracias a las características inertes al escudo de argón. Sin embargo este proceso puede ser difícil de aplicar a láminas delgadas por las corrientes tan altas que se necesitan para producir el arco por rocío. Las fuerzas del arco pueden perforar láminas relativamente delgadas en lugar de soldarlas, a demás la tasa de deposición característicamente alta puede producir un charco de soldadura demasiado grande para sostenerse exclusivamente con la tensión superficial en la posición vertical [II.14].

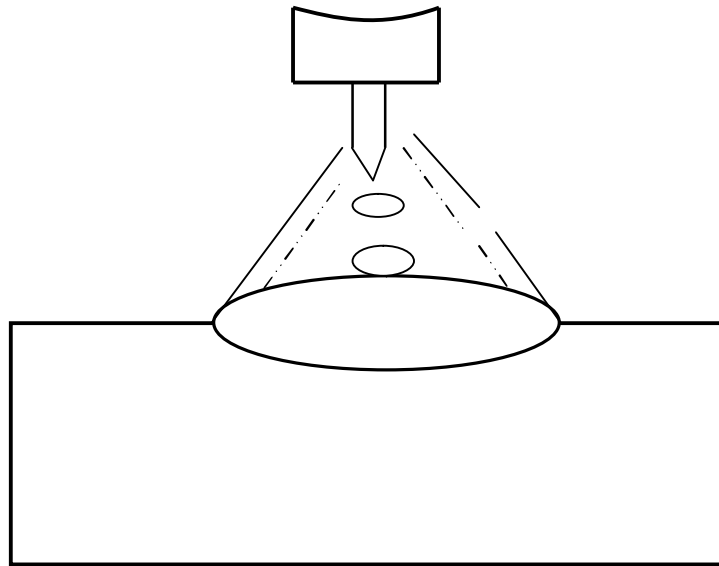


Figura II.6.- Transferencia por aspersión axial

Las limitaciones de las transferencias por arco por rocío en cuanto al espesor de trabajo y posición de la soldadura se han superado mediante el empleo de fuentes de potencia de diseño especial. Estas maquinas producen formas de onda y frecuencias cuidadosamente controladas que *pulsan* la corriente de la soldadura. En la Figura II.7, puede mostrarse dos niveles de corriente; una de corriente de fondo baja y constante que mantiene el arco sin proporcionar energía suficiente para hacer que se formen gotas en la punta del alambre, y una corriente a pulsos superpuesta cuya amplitud es mayor que la corriente de transición necesaria para la transferencia por aspersión [II.14].

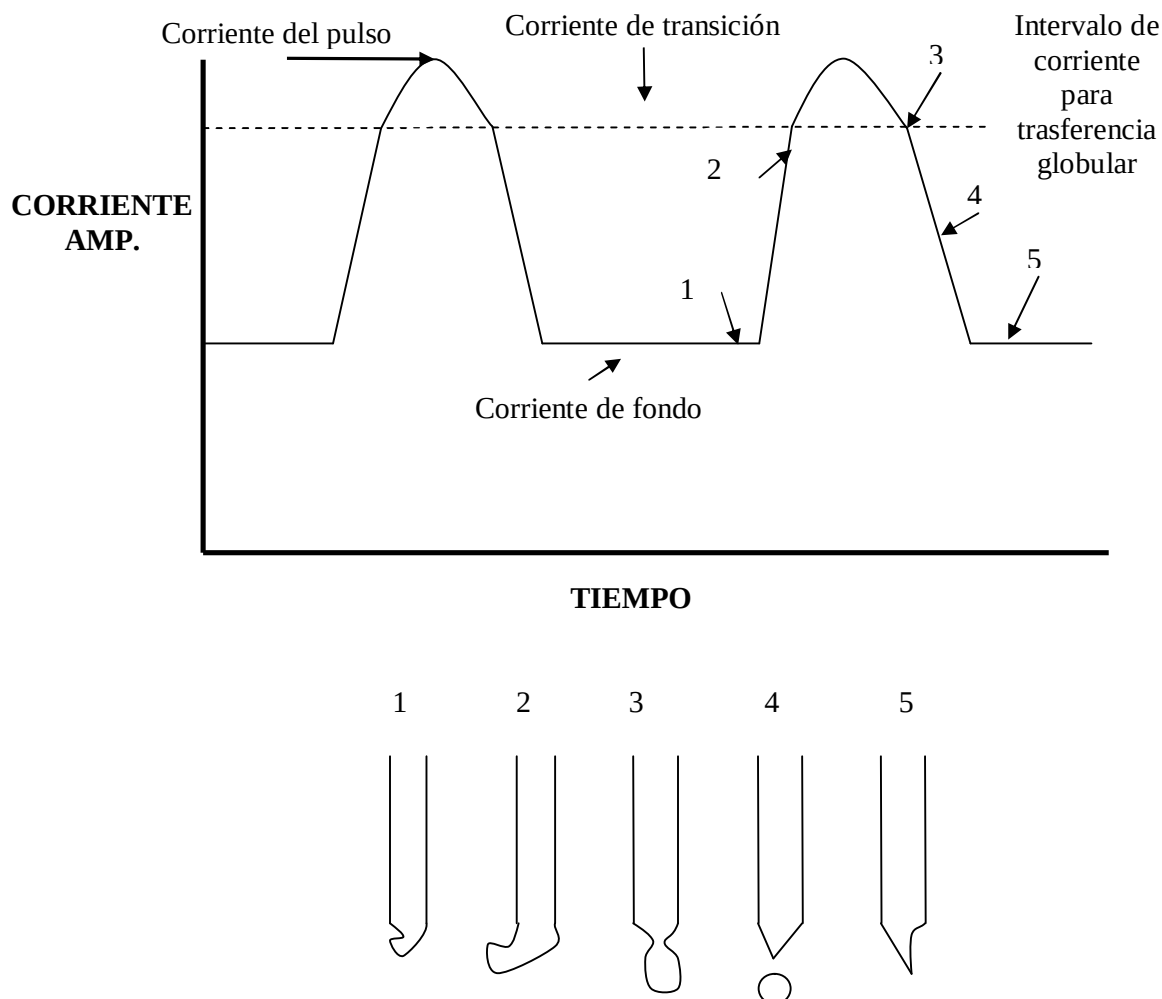
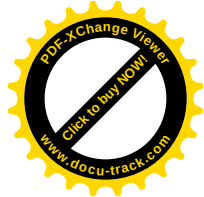
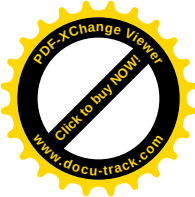


Figura II.7.- Características de corriente de soldadura de arco de rocío a pulsos [II.14]

En la siguiente tabla se muestran las corrientes de transición globular a aspersión para diversos electrodos.

Tabla II.6.- Corrientes de transición de globular a aspersión para diversos electrodos [II.15]

Tipo de electrodo de alambre	Diámetro del electrodo en Pulgadas	Diámetro del electrodo en milímetros	Gas protector	Corriente del arco de rocío, mínima (A)
Acero dulce	0.030	0.8	98% de Argón 2% de oxígeno	150
Acero dulce	0.035	0.9	98% de Argón 2% de oxígeno	165
Acero dulce	0.045	1.1	98% de Argón	220



			2% de oxígeno	
Acero dulce	0.062	1.6	98% de Argón 2% de oxígeno	275
Acero inoxidable	0.035	0.9	98% de Argón 2% de oxígeno	170
Acero inoxidable	0.045	1.1	98% de Argón 2% de oxígeno	225
Acero inoxidable	0.062	1.6	98% de Argón 2% de oxígeno	285
Aluminio	0.030	0.8	Argón	95
Aluminio	0.045	1.1	Argón	135
Aluminio	0.062	1.6	Argón	180
Cobre desoxidado	0.035	0.9	Argón	180
Cobre desoxidado	0.045	1.1	Argón	210
Cobre desoxidado	0.062	1.6	Argón	310
Bronce al Silicio	0.035	0.9	Argón	165
Bronce al Silicio	0.045	1.1	Argón	205
Bronce al Silicio	0.062	1.6	Argón	270

II.3.2.2.- Transferencia globular

Se le llama transferencia globular cuando la corriente es relativamente baja, sea cual sea el gas protector empleado. Sin embargo, con el dióxido de Carbón y Helio este tipo de transferencia ocurre con todas las corrientes de soldadura útiles. La transferencia globular se caracteriza por un tamaño mayor de la gota que el diámetro del electrodo. El efecto de la gravedad actúa fácilmente sobre la gota, por lo que en general solo existe una transferencia útil en la posición plana. Si el arco es demasiado corto (bajo voltaje), la gota de crecimiento puede hacer corto con la pieza de trabajo, sobrecalentarse y desintegrarse, produciendo una buena cantidad de salpicaduras. Por lo tanto el arco debe tener una longitud suficiente mente para asegurar que la gota se suelte antes de que haga contacto con el charco de soldadura.

Una soldadura en este tipo de transferencia globular, empleando el voltaje más alto probablemente resulte inaceptable a causa de la fusión, la insuficiente penetración y el excesivo refuerzo. Esto lo limita considerablemente en aplicaciones de producción continua [II.2]. La protección con dióxido de Carbón produce la transferencia globular en la dirección aleatoria cuando la corriente y el voltaje de la soldadura están por encima del intervalo para la transferencia por corto circuito. La desviación respecto a la transferencia axial está regida por fuerzas electromagnéticas, generadas por la corriente de soldadura al actuar sobre la punta

fundida (Figura II.8), en donde las más importantes de estas fuerzas son la fuerza de estrangulamiento electromagnético (P) y la fuerza de reacción del ánodo (R) [II.14].

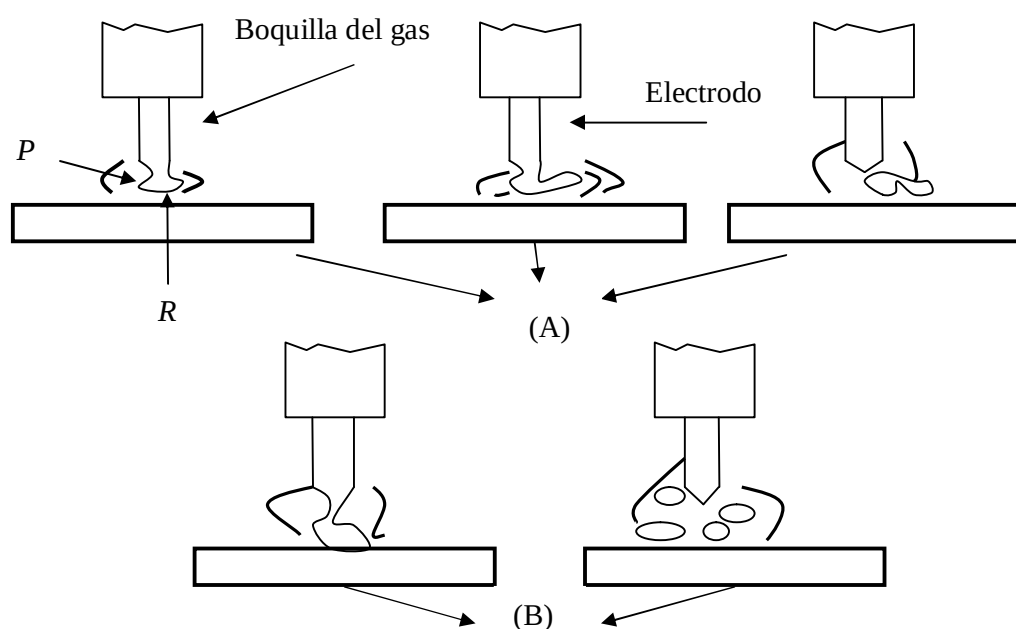


Figura II.8.- Transferencia globular no axial [II.14]

Se debe de considerar que la magnitud de la fuerza de estrangulamiento es función directa de la corriente de soldadura y del diámetro del alambre. Por lo regular es la que causa la separación de las gotas. Con protección de CO_2 , la corriente de soldadura se conduce a través de la gota fundida y el plasma del arco no envuelve la punta del electrodo. Con fotografías de alta velocidad se ha visto que el arco se mueve sobre la superficie de la gota fundida y la pieza de trabajo, porque la fuerza R tiende a sustentar la gota. La gota crece hasta que se separa por corto circuito o por la gravedad (Figura II.8A), ya que P por si solo nunca vence a R . La situación más probable se muestra en la Figura II.8B, donde puede verse que la gota pone en corto circuito la columna del arco y explota, por ello las salpicaduras pueden ser severas, lo que limita el empleo del escudo de CO_2 en muchas aplicaciones comerciales. No obstante el CO_2 sigue siendo el más utilizado para soldar los aceros dulces [II.14]

II.3.2.3.- Transferencia en corto circuito.

Este intervalo de soldadura abarca el rango más bajo de corrientes de soldadura y diámetros de electrodos asociados al proceso GMAW. La transferencia en corto circuito se produce un charco de soldadura pequeño, de rápida solidificación, que general mente sea apropiado para

unir secciones delgadas, soldar fuera de posición y tapar aberturas de raíz anchas. El metal se transfiere del electrodo de al trabajo solo durante el periodo en que el primero está en contacto con el charco de soldadura; no se transfiere metal a través del espacio del arco [II.2]. El electrodo hace contacto con el charco de soldadura a razón de 20 a 200 veces por segundo. La transferencia del metal, corriente y el voltaje corresponden (Figura II.9).

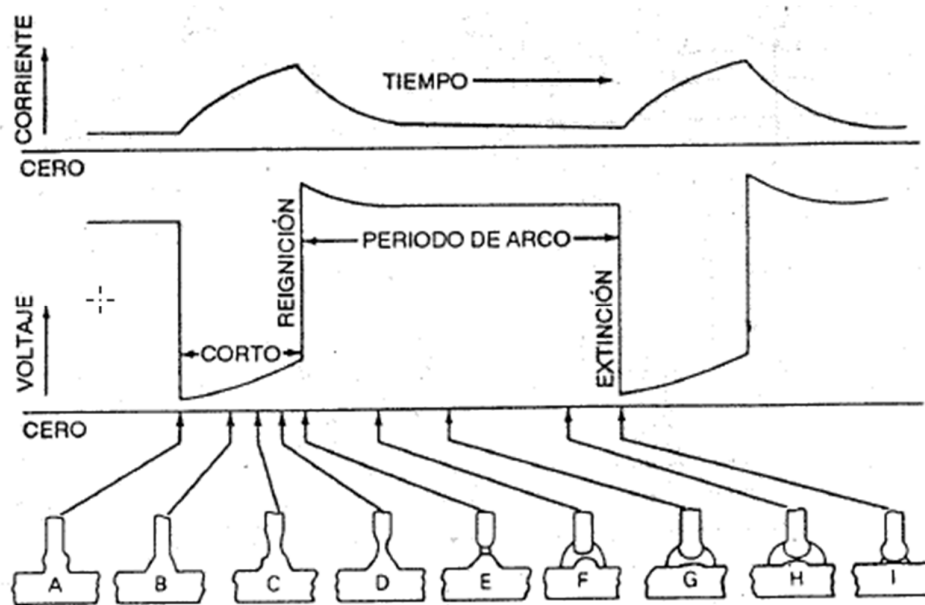


Figura II.9.- Transferencia de metal en cortocircuito [II.14]

Cuando el alambre toca el metal de soldadura, la corriente aumenta (A, B, C, D), el fundido en la punta del alambre se estrangula en D y E, iniciando un arco como se muestra en E y F. La rapidez con la que aumenta la corriente debe de ser suficiente para calentar el electrodo y promover la transferencia de metal, pero lo bastante baja como para minimizar las salpicaduras causadas por la separación violenta de la gota del metal. Esta tasa de aumento de corriente se controla por la inductancia de la fuente de potencia. El ajuste de inductancia óptimo depende tanto de la resistencia eléctrica del circuito de soldadura como del punto de fusión del electrodo. Una vez que se establece el arco, la punta del alambre se funde al tiempo que el alambre se alimenta hacia el siguiente circuito en (H) (Figura II.9) donde el voltaje de circuito abierto de la fuente de potencia debe ser tan bajo que la gota de metal derretido en la punta del alambre no pueda transferirse hasta que toque el metal base. Aunque sólo hay transferencia del metal durante el corto circuito, la composición del gas protector tiene un efecto drástico sobre la tensión superficial del metal fundido. Este cambio en composición del gas puede afectar notablemente el tamaño de las gotas y la duración del corto circuito. A

demás el tipo de gas influye sobre las características de operación del arco y la penetración en el metal base. El dióxido de Carbono generalmente produce niveles de salpicadura elevados en comparación con los gases inertes, pero el CO_2 también promueven la penetración. Para lograr un buen término medio entre salpicaduras y penetración a menudo se usan mezclas de CO_2 y el Argón al soldar aceros al Carbono y de baja aleación. Las adiciones de Helio al Argón incrementan la penetración en metales no ferrosos.

II.3.3.- Corrientes de soldadura

Si las demás variantes en el proceso de soldadura se mantienen constantes, el amperaje de la soldadura varía con la velocidad de alimentación del electrodo o con la rapidez de fusión siguiendo una relación no lineal. Al variarse la velocidad de alimentación, el amperaje de la soldadura varía de manera de similar si se emplea una fuente de potencia de voltaje constante. Esta relación entre la corriente de soldadura y velocidad de alimentación del alambre, como se muestra en la Figura II.10, II.11 y II.12, para los electrodos de Acero al Carbono. En los niveles de corriente baja para cada tamaño del electrodo, la curva es casi lineal, pero con corrientes de soldadura altas, sobre todo si los electrodos son de diámetro pequeño, las curvas dejan de ser lineales y su pendiente aumenta al incrementarse el amperaje de la soldadura.

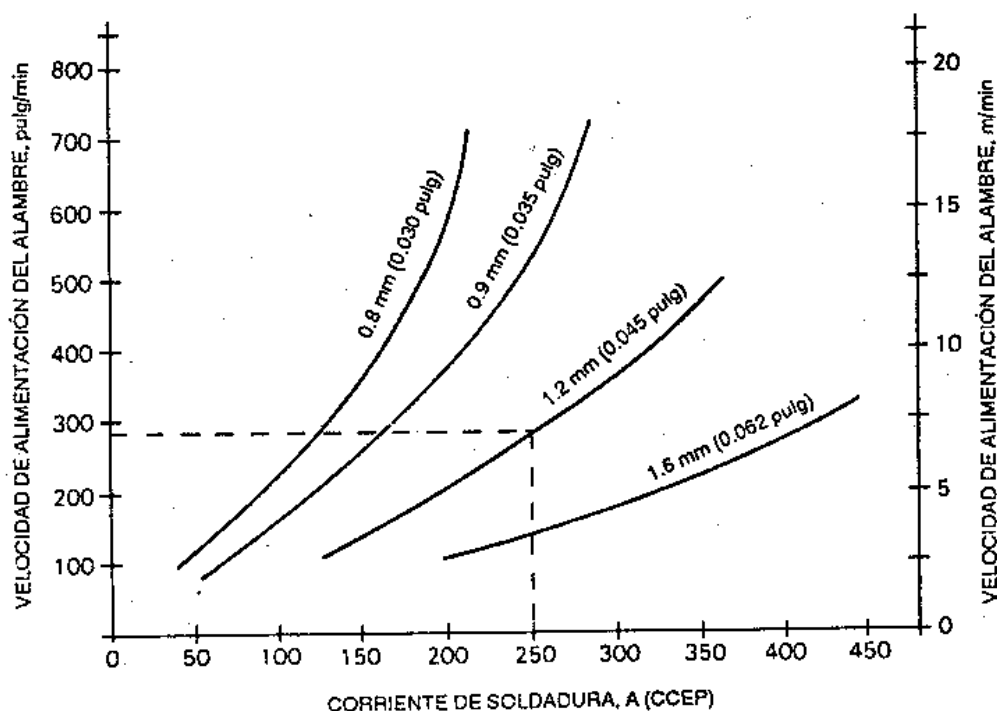


Figura II.10.- Corrientes de soldadura típica contra las velocidades de alimentación del alambre para electrodos de acero inoxidable de la serie 300. [II.14]

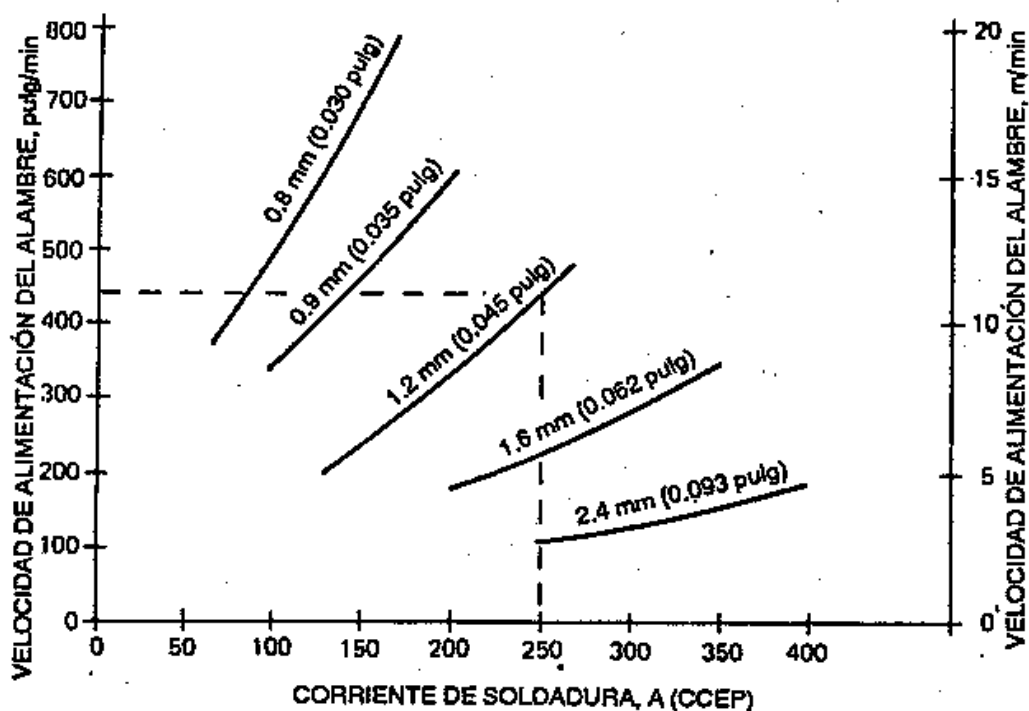


Figura II.11.- Corrientes de soldadura contra velocidad de alimentación del alambre para electrodos de acero Aluminio ER4043 [II.14]

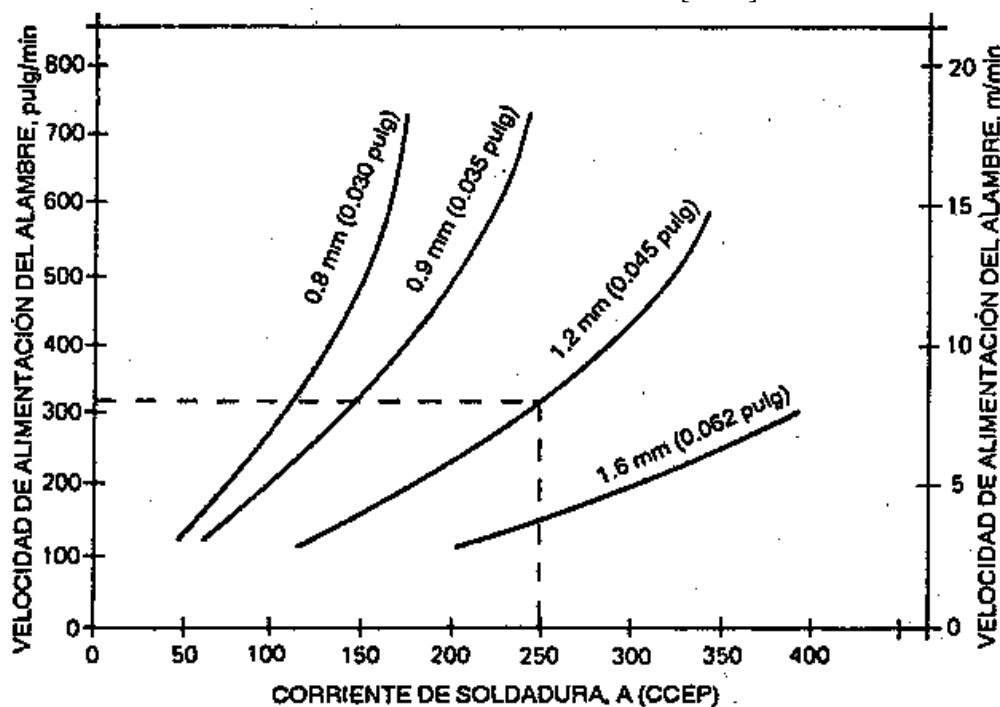


Figura II.12.- Corrientes de soldadura típica contra las velocidades de alimentación del alambre para electrodos de acero inoxidable de la serie 300. [II.14]

II.3.4.- Polaridad

Esto describe la conexión eléctrica de la pistola soldadora en relación con las terminales de una fuente de potencia de corriente continua. Si el cable de potencia de la terminal positiva, la polaridad se designa como corriente continua con el electrodo positivo (CCEP) y se le ha dado arbitrariamente el nombre de polaridad inversa. Cuando la pistola se conecta a la polaridad negativa, la polaridad se designa como corriente continua con electrodo negativo (CCEN), que originalmente se llama polaridad directa.

Casi todas las aplicaciones de GMAW emplean corriente continua con el electrodo positivo (CCEP). Esta condición produce un arco estable, una transferencia de metal uniforme, relativamente pocas salpicaduras, buenas características de la franja de soldadura y profundidad máxima de penetración para una amplia gama de corrientes de soldadura. La corriente continua con electrodo negativo (CCEN), se utiliza muy rara vez ya que no puede obtenerse transferencia por aspersión axial sin efectuar modificaciones que no han gozado de mucha aceptación comercial [II.16].

La polaridad (CCEN) ofrece una clara ventaja de velocidades de fusión altas, que no pueden explotarse porque la transferencia es globular. En el caso de los aceros la transferencia puede mejorarse añadiendo un mínimo del 5% de Oxígeno al escudo de Argón (lo que requieren aleaciones especiales para compensar las pérdidas por oxidación) o sometiendo el alambre a un tratamiento para hacerlo termoiónico (esto eleva el costo del metal de aporte). Los intentos para usar corriente alterna en el proceso de GMAW casi nunca han tenido éxito, ya que la onda cíclica hace inestable el arco porque éste tiende a extinguirse cuando la corriente pasa por cero. Aunque se han desarrollado tratamientos especiales de la superficie del alambre para resolver este problema, el costo de su aplicación ha hecho que la técnica no resulte económica, dando un motivo más para no utilizar este proceso [II.2].

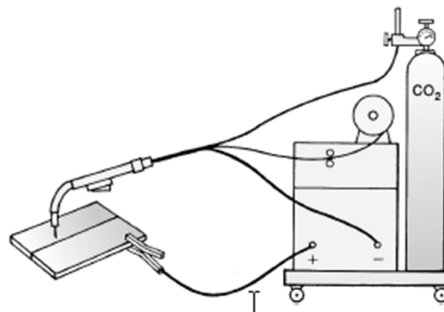
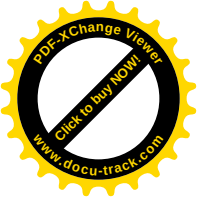


Figura II.13.- Polaridad en un equipo MIG



II.3.5.- Longitud del arco (voltaje del arco)

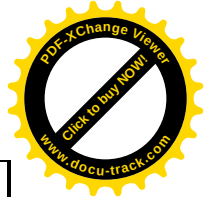
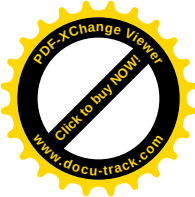
Estos términos por lo regular se utilizan indistintamente. Pese a ello cabe señalar que si bien están relacionados entre sí, son diferentes. En el proceso de soldadura MIG o GMAW, la longitud del arco es una variable crítica, la cual debe de controlarse cuidadosamente. Por ejemplo en la modalidad de arco por rocío con el escudo de Argón, se tiene que un arco demasiado corto experimenta cortos circuitos momentáneos, los cuales causan fluctuaciones en la presión mismas que bombean aire hacia el chorro del arco, produciendo porosidades y pérdida de ductilidad por absorción de nitrógeno [II.17].

Si el arco es demasiado largo, se tiende a generar un movimiento lateral aleatorio que afecta tanto la penetración como el perfil de la superficie de franja, también se puede producir que se rompa el escudo de gas. En el caso de arcos enterrados con escudos de dióxido de Carbón, un arco largo produce salpicaduras excesivas y también porosidad y si el arco es demasiado corto, el electrodo hará corto circuito con el charco de soldadura causando inestabilidad.

El voltaje del arco depende de la longitud del arco así como de muchas otras variables, como la composición y dimensiones del electrodo, el gas protector, la técnica de soldadura ya que a menudo se mide en la fuente de potencia, incluso la longitud del cable de soldadura. El voltaje del arco permite expresar en forma aproximada en la longitud física del arco como lo muestra en la Tabla II.7 en donde se muestran los términos eléctricos, aunque el voltaje del arco también incluye la caída de voltaje en la extensión del electrodo sobresale del tubo de contacto.

Tabla II.7.- Voltajes de arco típicos para soldadura por arco de metal y gas de diversos metales [II.11]

Metal	Transferencia globular por aspersión (*) electrodo de 1.6 mm de diámetro (1/16 pul.)					Transferencia en corto circuito Electrodo de diámetro			
	Argón	Helio	25%Ar 75%He	Ar-O ₂	CO ₂	Argón	Ar-O ₂ (1-5%O ₂)	75%Ar 25%CO ₂	CO ₂
Aluminio	25	30	29	----	----	19	----	----	----
Magnesio	26	----	28	----	----	16	----	----	----
Acero al Carbón	-----	----	----	28	30	17	18	19	20
Acero de baja Ale.	-----	----	----	28	30	17	18	19	20
Acero inoxidable	24	----	----	26	----	28	19	21	----



Níquel	26	30	28	----	----	22	----	----	----
Aleación Cobre-Ní	26	30	28	----	----	22	----	----	----
Aleación Níquel-Cromo-Hierro	26	30	28	----	----	22	----	----	----
Cobre	30	36	33	----	----	24	22	----	----
Aleación Cobre-Níquel	28	32	30	----	----	23	----	----	----
Bronce de silicio	28	32	30	28	----	23	----	----	----
Bronce de alumi-.	28	32	30	----	----	23	----	----	----
Bronce Fosforado	28	32	30	23	----	23	----	----	----

(*) En la variación a pulsos de la transferencia por aspersión, el voltaje del arco estará entre 18 y 28 Volts, dependiendo del intervalo de amperaje empleado.

Es muy importante establecer que si todas las variables se mantienen constantes, el voltaje del arco se relaciona directamente con la longitud del arco.

Aunque la variable que interesa y que debe controlarse es la longitud del arco, ya que es más fácil vigilar el voltaje. Por esta razón en el proceso de soldadura se especifique el voltaje del arco, éste término que se usa con mayor frecuencia. Los niveles establecidos en el voltaje del arco varían dependiendo del material, el gas protector y la modalidad de transferencia tal y como se muestra en la tabla II.7 en donde se presentan los valores típicos [II.14]

II.3.6.- Orientación del electrodo

En todos los procesos de soldadura por arco, la orientación del electrodo con respecto a su unión por soldar afecta la forma y la penetración del arco de soldadura, y este efecto sobre la franja de soldadura, este efecto sobre la franja es mayor que el voltaje del arco o el de la velocidad de recorrido.

La orientación del electrodo se describe de dos maneras [II.14]:

- Por la relación entre el eje del electrodo y la dirección de desplazamiento (ángulo de desplazamiento).

- Con el ángulo entre el eje del electrodo y la superficie adyacente del trabajo (ángulo de trabajo).

Cuando el electrodo apunta en dirección opuesta a la dirección del desplazamiento, la técnica se denomina soldadura de revés con ángulo de arrastre.

Cuando la dirección apunta en dirección del desplazamiento, la técnica es soldadura derecha con ángulo de ataque. En la Figura II.9 se muestra el efecto que se genera por la posición del electrodo y de la técnica de soldadura [II.14]

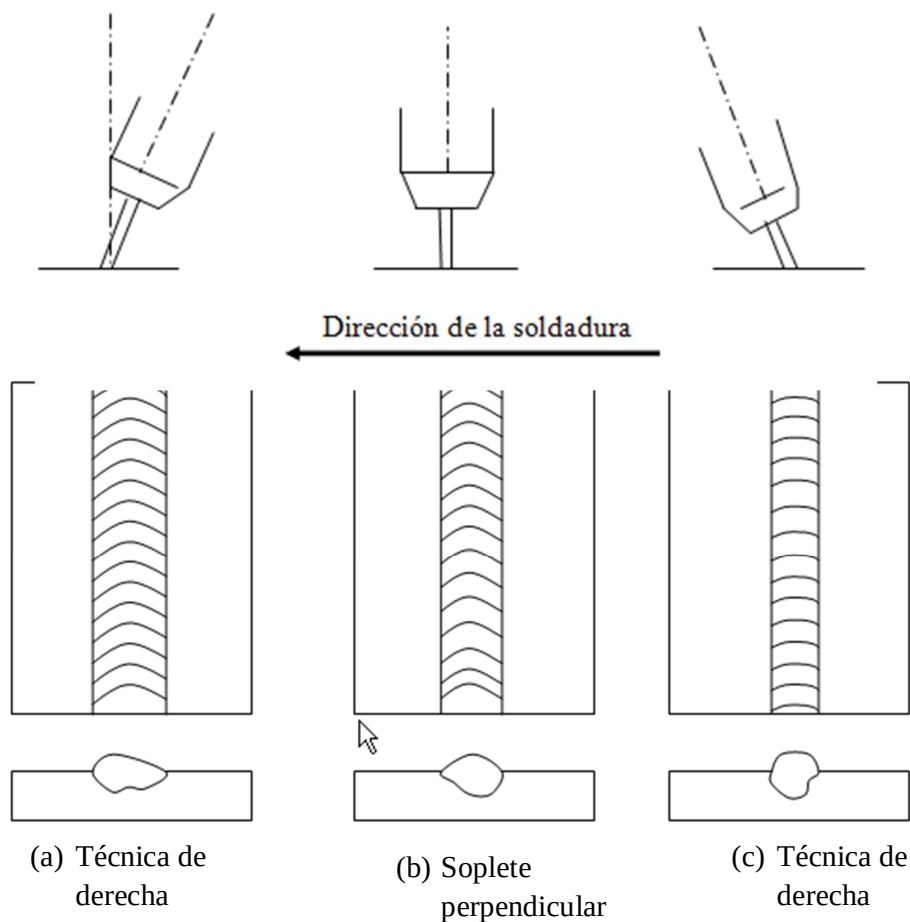
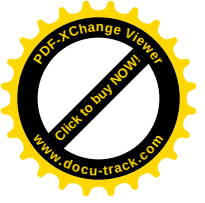


Figura II.14.- Efecto de la posición del electrodo

**II.3.6.1.- Tamaño del electrodo**

El diámetro del electrodo influye en la configuración de la franja de soldadura, un electrodo de mayor tamaño requiere corriente mínima más alta que un electrodo pequeño con las mismas características del metal. Las corrientes altas, pueden producir una mayor fusión en el electrodo y depósitos de soldadura más grandes. Otra consecuencia al aplicar corrientes altas es el aumento de la tasa de deposición y en la penetración, no obstante en la penetración vertical por lo regular se efectúa con electrodos de menor diámetro y con corrientes más bajas [II.17].

II.3.7.- Gas protector

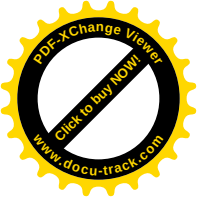
Es claro que la aplicación de los diversos tipos de gases tendrá un claro efecto sobre la calidad de la soldadura y las características del arco. La función primaria del gas es el crear una atmosfera entre el contacto con el metal de soldadura fundido. A demás de proporcionar un entorno protector, el gas y la tasa de flujo tienen un efecto importante sobre lo siguiente [II.14]:

- Propiedades mecánicas del metal de soldadura.
- Acción limpiadora.
- Velocidad de soldadura.
- Penetración y perfil de la franja de soldadura.
- Características del arco.

II.3.7.1.- Gases protectores inertes (Argón y Helio) [II.14]

Los gases inerte empleados en este proceso de soldadura son el Argón y el Helio, estas mezclas se emplean para soldar en materiales no ferrosos y aceros inoxidables, al Carbón y baja aleación.

Las diferencias físicas entre el Argón y el Helio son la densidad, conductividad térmica y las características del arco. Por ejemplo el Argón es 1.4 más denso que el aire, en tanto que la densidad del Helio es alrededor de 0.14 veces la del aire. El Helio tiene mayor conductividad térmica que el Argón y produce un arco en la cual la energía del mismo, está distribuida de



manera más uniforme. En cambio el plasma de arco del Argón se caracteriza por un núcleo de alta energía y en la zona exterior menor energía.

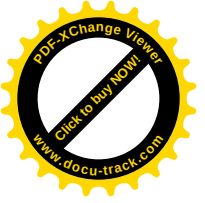
Los arcos protegidos exclusivamente con Helio pueden presentar problemas de iniciación de arco, a demás que los arcos protegidos con este gas no presentan transferencia por aspersión axial. Es decir que en los arcos protegidos por este gas presentan más salpicaduras y tienen franjas con superficies más ásperas que las protegidas con Argón. La protección con Argón incluidas las variables existentes por mezclas, con un contenido de argón tan bajo como 80% producen transferencia por aspersión axial cuando la corriente está por encima del nivel de transición [II.2].

II.3.7.2.- Mezclas de Argón y Helio

Existen muchas aplicaciones en las cuales se emplea el Argón puro en materiales no ferrosos. El empleo de Helio puro general mente está restringido a áreas más especializadas porque en se tiene una estabilidad limitada. En la siguiente tabla se muestra la aplicación de gases protectores para transferencia en corto circuito.

Tabla II.8.- Porcentajes de gas para soldadura por cortocircuito [II.2]

Metal	Gas protector	Espesor	Ventajas
Acero al Carbón	75% Argón+25 % CO ₂	Menos de 3.2 mm (1/8 pulg)	Altas velocidades de soldadura sin perforación.
Acero al Carbón	75% Argón+25 % CO ₂	Más de 3.2 mm (1/8 pulg)	Mínimo de salpicaduras, aspecto limpio buen control del charco en posición vertical y cenital.
Acero al Carbón	Argón con 5-10% de CO ₂	_____	Penetración más profunda; más altas velocidades de soldadura.
Acero inoxidable	90% Helio +7.5% Argón+ 2.5% CO ₂	_____	Zona afectada térmicamente pequeña; mínima distorsión.
Acero de baja aleación	60-70% Helio+25-35% Argón+4.5% CO ₂	_____	Excelente tenacidad y estabilidad del arco, pocas salpicaduras.
Acero de baja aleación	75 % Argón +25% CO ₂	_____	Buena tenacidad, exelente estabilidad del arco, características de mojado
Aluminio, Cobre, Magnesio, Níquel y sus aleaciones.	Argón y Argón +Helio	Más de 3.2 mm (1/8 pulg.)	El argón es satisfactorio para lamina, se prefiere Argón-Helio para material base



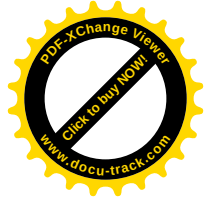
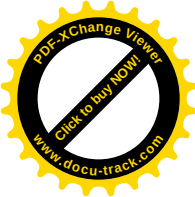
II.3.8.- Ventajas del proceso MIG

Las ventajas al utilizar el equipo de soldadura MIG son los siguientes [II.14]:

- Es el único proceso de electrodo consumible que puede servir para soldar los metales y aleaciones comerciales.
- GMAW no tiene la restricción de tamaño del electrodo limitado que se presenta con la soldadura por arco sumergido.
- Se puede soldar en todas las posiciones, algo que no es posible con la soldadura por arco sumergido.
- Casi no requiere limpieza después de realizar el proceso ya que no se produce mucha escoria.
- Cuando se usa transferencia por aspersión, es posibles lograr mayor penetración que con la soldadura por arco de metal protegido, esto permite el uso de soldaduras de filete más pequeñas, capaces de obtener una resistencia equivalente mecánica.
- La alimentación de este proceso es continua, por lo cual es posible depositar soldaduras largas sin tener que parar y volver a comenzar.
- Las velocidades en el proceso de soldadura son más altos, comparado con la soldadura por metal protegido, esto gracias a la alimentación continua del electrodo y a las mayores tasas de deposición del metal.
- Posibilidad de automatización.
- El arco siempre es visible para el operador.
- La pistola y cables son ligeros permitiendo una buena manipulación de estos.

II.3.9.- Desventajas en el proceso de soldadura MIG

Como en todo proceso existen desventajas las cuales son [II.14]:



- El equipo es costoso y complejo lo que le impide ser transportado fácil mente que el proceso SMAW.
- Este proceso es más difícil de utilizar en lugares de difícil acceso por la pistola.
- El arco debe de protegerse de corrientes de aire que puedan dispersar el gas protector. Esto tiende a limitar ciertas aplicaciones al intemperie, a menos que se le coloquen barreras, para proteger el proceso de corrientes de aire.
- La cantidad de calor es soportable por el operador al realizar el proceso.

II.4.- Soldadura por rayo Laser (Laser beam welding)

En 1960, el científico norteamericano *Theodore Maiman* anunció al mundo la operación del primer laser. Las aplicaciones del laser en la industria varían ya que puede aplicarse para trazar túneles y que estos sean completamente rectos. Por ejemplo, otras de sus aplicaciones consiste en unir metales, este es un proceso de unión o soldadura, el cual se basa en enfocar una fuente de calor obtenida de la aplicación de un rayo de luz, consistente y concentrado que choca contra los materiales a soldar [II.18].

Básicamente las siglas de laser indican; Amplificación de luz por la emisión simultánea de radiación, ya que el rayo Láser consiste de un flujo de fotones que puede ser enfocado y dirigido por elementos ópticos como espejos y lentes.

Para soldar, el rayo del Láser debe ser enfocado a un pequeño punto para producir una alta densidad de poder. Este controla la intensidad para fundir el metal y en su caso la profundidad de penetración de la soldadura, evapora parte del metal y cuando la solidificación ocurre, la zona de fusión o junta de soldadura resulta estable [II.19].

En la actualidad las industrias que impulsan fuertemente la evolución tecnológica, como automotriz, naval y aeroespacial, han incorporado el Láser en sus cadenas de montaje para soldar una gran variedad de materiales. Dentro de estos se encuentran metales y aleaciones preciosas, Plomo, Cobre y sus aleaciones, Aluminio y sus aleaciones, Titanio y sus aleaciones, materiales refractarios, Aceros inoxidables, aleaciones de Níquel y Hierro resistentes al calor.

Cabe resaltar que existen materiales no metálicos, como plásticos los cuales se pueden soldar mediante el Láser. Básicamente el procedimiento es el mismo, obtener una fusión de los materiales con la finalidad, que al solidificarse se unan, las limitaciones existentes en este campo, se generan por las características físicas de los plásticos y no por el Láser haciendo que su aplicación sea menor en los plásticos y mayor en los metales [II.20]. En la actualidad existen dos tipos de soldadura por rayo laser: penetración profunda y conducción limitada. Estos se usan principal mente en los materiales a unir sin necesidad de material de aporte [II.19].

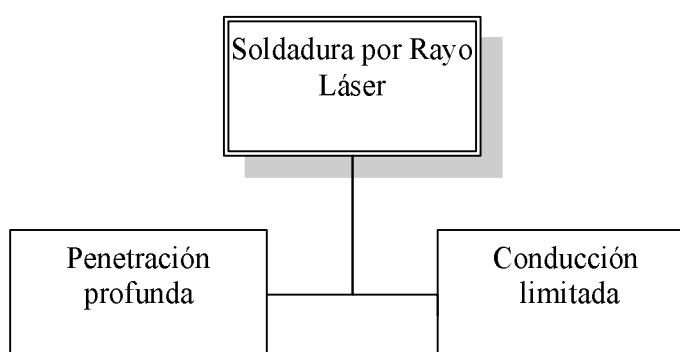
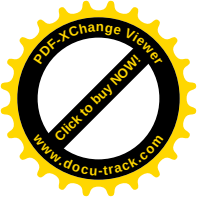


Figura II.15.- Clasificación de soldadura por rayo Láser

El método de conducción limitada utiliza una potencia moderada del CO₂ y trabaja normalmente a menos de 1KW de potencia. Por otra parte en el proceso de penetración profunda requiere una muy alta potencia del CO₂, ya que en la conducción térmica no existe una limitación en la penetración de los materiales a soldar, ya que este método permite que la energía del haz, sea suministrada al metal a través de todo su espesor, no tan solo en la superficie como el método de conducción limitada. Es importante resalta que el proceso de soldadura con haz de Láser requiere la aplicación de un método meticuloso. Ya que cuando se enfoca el tamaño apropiado del punto a soldar, el haz funde el metal de manera óptima produciendo rápidamente una soldadura reducida con alta eficiencia de unión y mínima distorsión. El control del laser es preciso ya que este se debe de mantener durante el proceso para mantener la zona de fusión en óptimas condiciones, y este control se realiza a través de la variación de pulsos, un rango de repetición de puntos, el tamaño del haz y el nivel de potencia [II.21].



II.4.1.- Rayo Láser adecuado para el proceso de soldadura

En el mercado se encuentran cuatro tipos de Láseres útiles para el proceso de soldadura [II.22]:

- Láser de ND vidrio.
- Láser de rubí.
- Láser de Nd: YAG.
- Láser de CO₂.

Los dos primeros solo pueden operar en el modo pulsado, esto tiene como resultado un rendimiento muy bajo, lo que hace que sólo se utilice en los casos en donde sea importante la localización de la soldadura [II.23]. Los más utilizados en la industria son; el laser de Nd YAG (Sólido) y el laser de CO₂ (Gas).

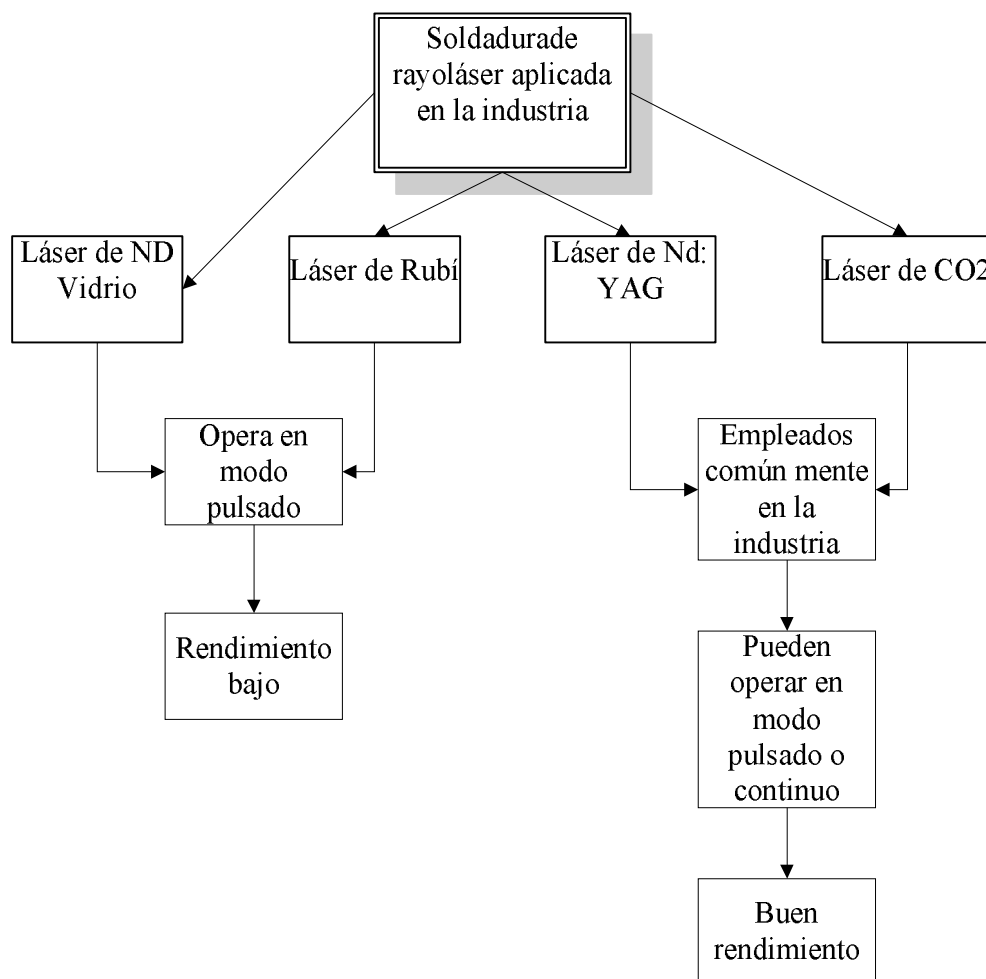
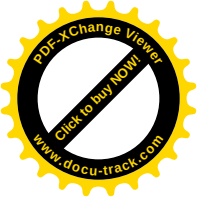


Figura II.16.- Soldadura por Rayo Láser en la industria [II. 22]

Se puede establecer que lo interesante de esta clasificación es que el estado sólido tiene una longitud de onda de $1.06 \mu\text{m}$. Mientras el Láser de gas tiene una longitud de onda de $10.6 \mu\text{m}$ y el elemento en estado sólido es un ion de Neodimio (Nd), en el Láser de gas el medio activo es la molécula de CO_2 .

II.4.2.- Láser de gas

Se puede establecer que el Láser más eficiente en la actualidad para aplicaciones en procesos de materiales es el Láser de CO_2 que puede ser usado de dos formas. Alto poder de onda continua y en modo de operación por pulsos. Como fuente de excitación el Láser de CO_2 utiliza una carga eléctrica. El más sencillo de CO_2 tiene un flujo axial, el gas fluye en la misma dirección que el haz del Láser y del campo eléctrico. Este flujo axial del gas es mantenido a través del tubo para poner moléculas eliminadas por el efecto de carga eléctrica



de Multikilovolts de la excitación. El medio gaseoso del Láser se mantiene a presión atmosférica y es accionado por descargas eléctricas, por electrodos los cuales se encuentran localizados longitudinalmente a lo largo del resonador óptico [II.19]

En un área cerca de los electrones, se requiere un bajo potencial con la finalidad de mantener un alto campo de fuerzas. Ya que una descarga muy corta en relación del tiempo, permite una descarga eléctrica en el gas a presión de una atmosfera o más. Esta excitación atmosférica transversal puede llegar a generar 10 MW (Mega Watt) o más de poder en una simple pulsación menos de 1 μ m de largo. Este Láser por lo regular opera en rangos de pocos pulsos por segundo. El gas transportador del Láser opera por circulación continua, el gas a través de la cavidad de resonancia se emplea como soplador de alta velocidad, mientras se puede mantener un campo eléctrico perpendicular ambos al gas y haz del Láser [II.19].

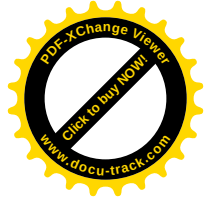
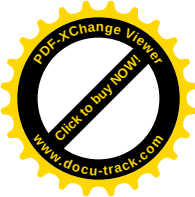
Debido a que el volumen de resonancia es relativamente alto comparado por la longitud, grandes espejos pueden ser ubicados en cada uno de los extremos para reflejar el haz a través de una región o zona de descarga en donde varias veces antes de escapar por un acoplamiento de salida. Se debe de tomar en consideración que para alcanzar la capacidad óptima, es decir obtener un camino óptico que sea lo suficiente mente largo en una distancia real mente corta, permitiendo al gas trasportar al Láser a una estructura compacta que genera un poder de salida muy alto, es decir que este Láser puede ser capaz de tener una entre 1 y 25 Kw los cuales ya están disponibles en el mercado para su venta [II.23].

II.4.3.- Selección del sistema Láser para soldar.

Se debe de considerar la variedad de Láser existente para el propósito de soldadura, la sección de un tipo de Láser o del nivel de potencia y lo más importante la aplicación; en la siguiente tabla se presentan las principales características, que se deben de considerar para le elección del rayo Láser en el proceso de soldadura [II.19].

Tabla II.9.- Parámetro a considerar en el proceso de soldadura por laser [II.23].

Material	Propiedades ópticas de la superficie de la radiación Propiedades térmicas como conductividad Difusión, temperatura de fusión y ebullición
Geometría de la unión	Diseño Tolerancias Accesibilidad.
Láser	Potencia, promedio de pico, modo continuo o pulsante,



	Modo de distribución espacial de la potencia Longitud de onda
Proceso	Velocidad de soldadura Longitud focal utilizada Posición relativa del punto focal y de la pieza Tipo del gas de aporte

II.4.4.- Interacción Láser y metal a soldar

El principal problema que se encuentra para soldar metales, es el alto coeficiente de reflexión que estos presentan a la radiación de $10.6 \mu\text{m}$. En la siguiente figura se puede mostrar la clasificación de los metales según su respuesta de reflexión ante Láseres de CO_2 . Esta interacción y la aparición de energía es en función a las características de ambos, del haz y del material. Las propiedades del haz del Láser afectan directamente a la intensidad, la longitud de onda, longitud de pulso, divergencia y la densidad de energía en el material. Las propiedades del material que afectan esta interacción de forma directa son: coeficiente de absorción, densidad, conductividad térmica, capacidad calorífica, reflectividad y calor contenido. Se debe de considerar las condiciones de la superficie del metal ya que está en función con la emisividad (cantidad de energía que se refleja al inducir la radiación del Láser), así que alterando las propiedades de la superficie, se logran grandes cambios en el coeficiente térmico de acoplamiento y se pueden alcanzar incrementos en la eficiencia entre la interacción del Láser con el metal [II.19].

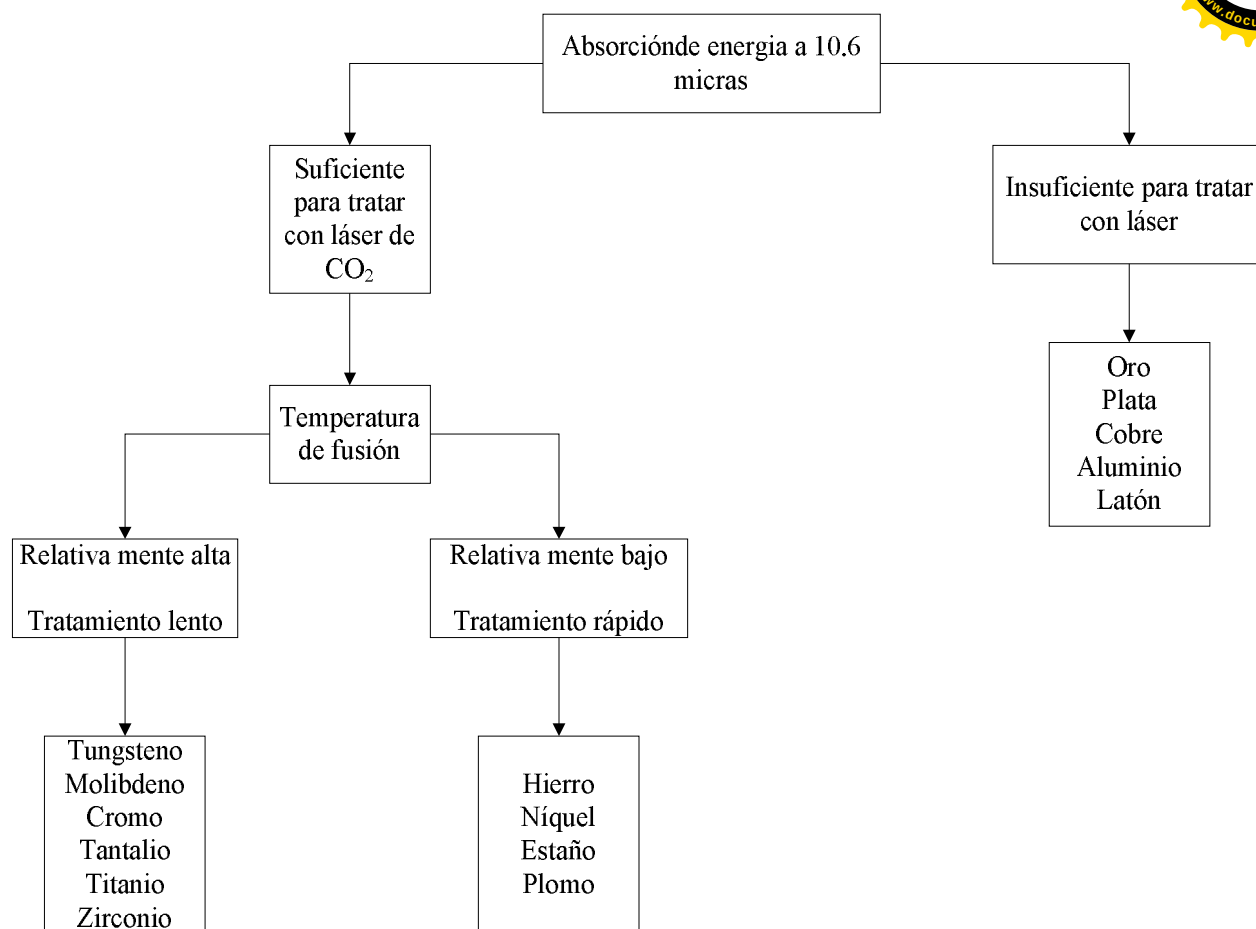
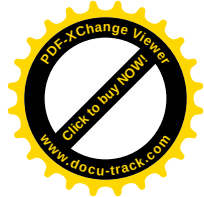
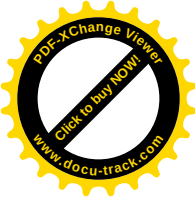


Figura II.15.- Clasificación de los metales unificados por Láseres de CO₂ [II.23]

II.4.5.- Velocidad de soldadura

En la actualidad se cuenta con tablas las cuales a través de curvas pueden precisar la profundidad del proceso de soldadura en función de la velocidad para distintas potencias, un ejemplo es la Digura II.16 en la cual se hace referencia a la velocidad de corte y profundidad para un acero inoxidable 304. Observando las curvas de profundidad para las potencias de 600 y 1200 Watts, se puede observar que a velocidades bajas el doble de potencia implica el doble de profundidad y esto deja de cumplirse a velocidades superiores. En este caso deja de ser valido a partir de los 2.5 m/min. [II.22]

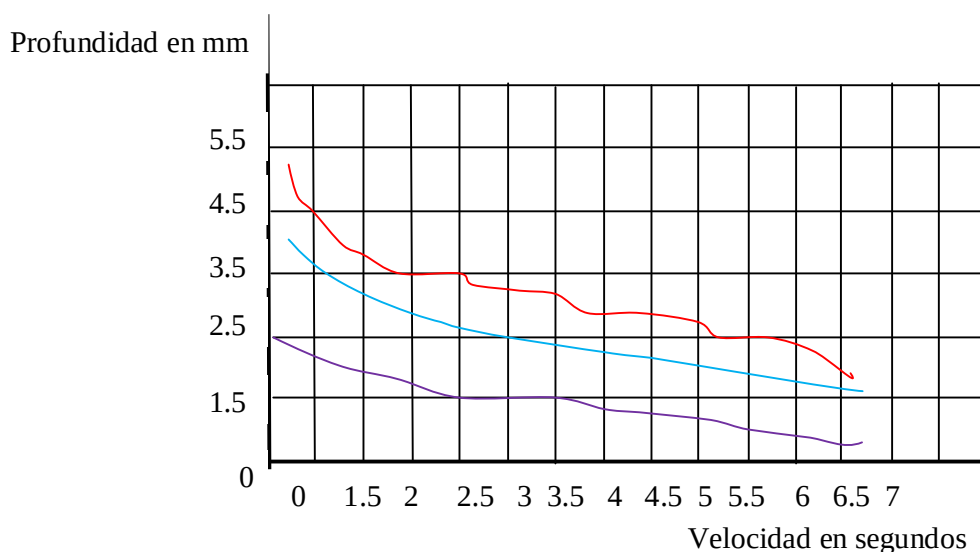


Figura II.16.- Grafica de profundidad vs velocidad

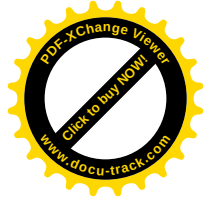
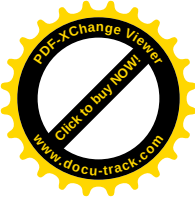
II.4.6.- Ventajas del proceso de soldadura por rayo Láser.

En este proceso de soldadura no se generan rayos X.

- La calidad de la soldadura es mayor y esta tiene menores posibilidades a una fusión incompleta, salpicaduras, menor distorsión y porosidades.
- Los rayos Láser se pueden conformar, manipular y enfocar ópticamente, utilizando fibras ópticas por lo que este proceso se puede automatizar rápidamente.
- Este sistema no requiere un vacío, así que el rayo se puede transmitir por aire.
- Este sistema por ser automatizado, requiere de la mínima destreza que se requiere en el operador.

II.4.7.- Desventajas del proceso de soldadura por rayo laser

- El costo de los equipos de soldadura con Láser va de 40,000 a 1, 000,000 de dólares.
- Este proceso no tiene la capacidad para realizar soldaduras profundas (aproximadamente 19 mm.).



- Otra desventaja es que la energía altamente concentrada en un área pequeña del rayo Láser y esto no permite utilizarlo en uniones de partes grandes.

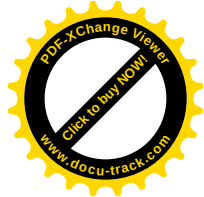
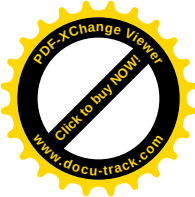
II.5.- Sumario

En este capítulo se dio una breve descripción del proceso de soldadura TIG, MIG y rayo Láser, ya que es muy importante resaltar que existen diversos factores que influyen en el proceso de soldadura y esto a su vez los hace completamente diferentes tanto en aplicación y termino.

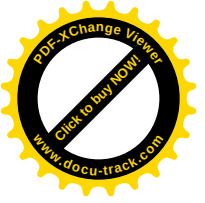
Por ejemplo la aplicación del electrodo correcto ya que existen diversos tipos de materiales los cuales responden mejor mecánicamente ante ciertos tipos de elementos metálicos o en el caso del proceso TIG o MIG, existen diversos tipos de combinaciones de gases protectores con la finalidad de proveer a la fundición una protección contra la atmosfera. En los próximos capítulos se desarrollara un análisis experimental, empleando el método de respuesta de grieta y numérico con la finalidad de corroborar cómo se comportan los esfuerzos residuales en el proceso de soldaduras TIG, MIG y Rayo Láser.

II.6.- Referencias.

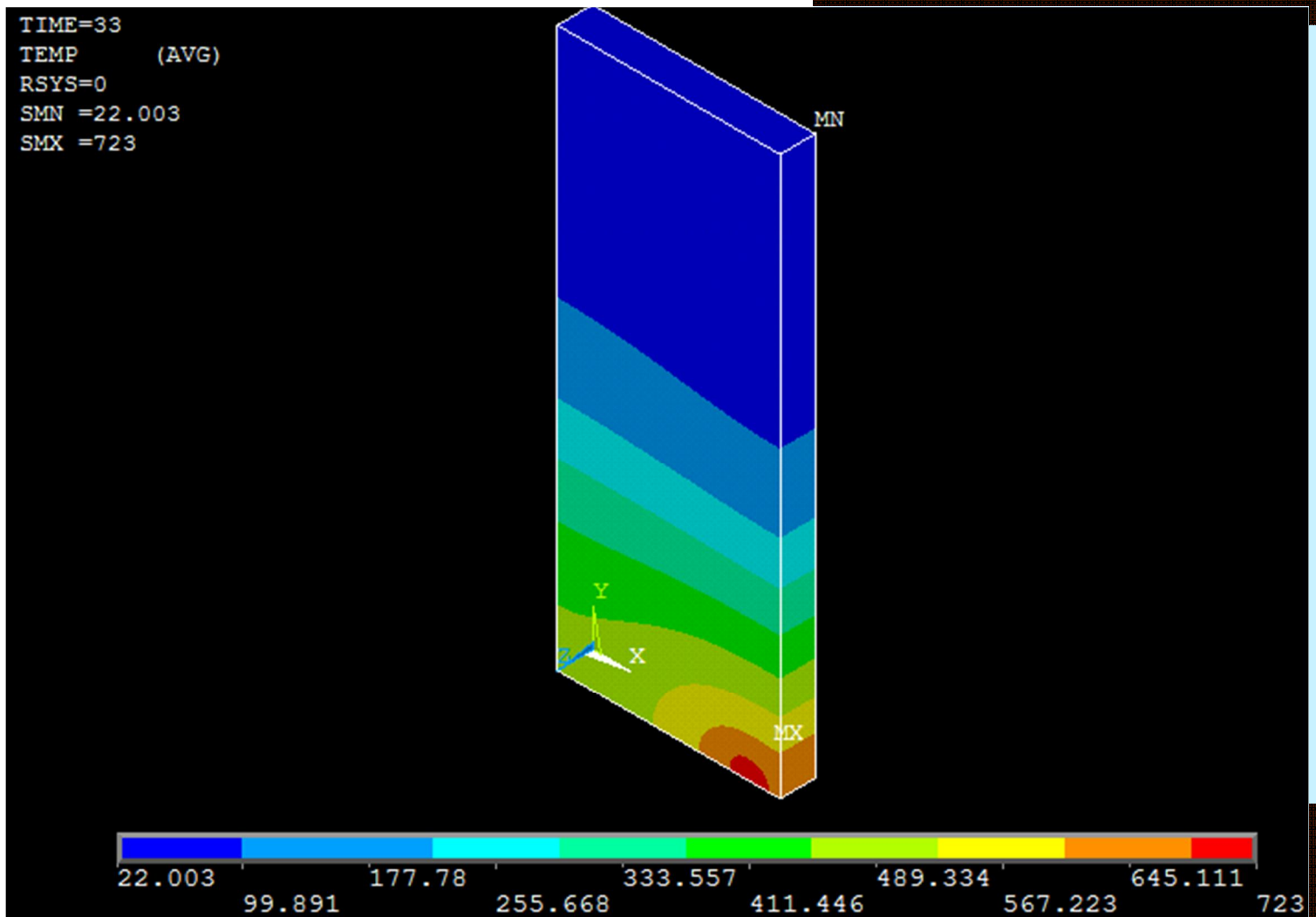
- 1.- Cueto, J., *Manual de soldadura TIG*, Ed. Ceysa, pp 2-3, 2003.
- 2.- Rodríguez-Pérez, C., *Manual de soldadura: Soldadura eléctrica MIG y TIG*, Ed. Alsina, Argentina, pp. 39-50 y 56-61, 2001.
- 3.- Giachino, W. J. y Weeks, W., *Técnica y práctica de soldadura*, Ed. Reverte, España, pp 166-172 y 184-194, 2007.
- 4.- *Soldadura TIG con protección de gas*, Manual de usuario ESAB[®], pp 18-25, 2010.
- 5.- *Manual de electrodos para soldar*, Electrodo Infra[®], pp 69-73 y 116, 2011.
- 6.- *Tecnología en soldadura: Soldadura TIG*, Manual de usuario Sunarc[®], pp 4-7 y 11-19, 2009.
- 7.- *Manual de instrucciones para soldadora de arco*, Manual de usuario Cebora[®], pp 18-20, 2009.
- 8.- *Manual de conceptos básicos en soldadura y corte*, Manual de usuario Infra[®], pp 10-13, 14-20 y 30-33, 2011.
- 9.- Gaxiola, J., *Curso de capacitación de soldadura*, Ed. Limusa, pp 132- 152, 2002.
- 10.- Molera-Sola, P., *Soldadura Industrial: Clases y aplicaciones*, Ed. Morcombo, pp. 33-47, 1992.
- 11.- *Soldadura (MIG/MAG o GMGA)*, Manual de usuario ESAB[®], 2006.



- 12.- Cueto-Martos, J., *Manual de soldadura GMAW (MIG-MAG)*, Ed. Ceysa, pp 23-40, 2003.
- 13.- *Manual de instrucciones sistema de soldadura MIG*, Manual de usuario Firepower[®], pp 10-12, 2009.
- 14.- *Manual de soldadura Tomo II*, American Welding Society, pp 109-154, 1996.
- 15.- *Tecnología es soldadura: Soldadura MIG/MAG*, Manual de usuario Sunarc[®], pp 4-8, 2008.
- 16.- Rowe, R., Jeffus, L. y Caballero, P. J., *Manual de soldadura GMAW (MIG-MAG)*, Ed. Paraninfo, pp 47-60, 2008.
- 17.- *Soldadura (MIG/MAG ó GMAW)*, Manual de usuario Esab[®], 2006.
- 18.- Cooper, M., *Introducción a la limpieza con Láser*, Ed. Istmo, pp 21, 1998.
- 19.- *Manual de soldadura Tomo III*, American Welding Society, pp 713-738, 1996.
- 20.- Banchs, L., Cuesta, J. y Carles N., *Aplicaciones industriales del Láser*, Ed. Productica, España, pp 39-69, 1988.
- 21.- Morones-Ibarra, J. R., Láser; 50 años, *Revista Ingenierías*, Vol. XIII, No. 49, pp 9-17, 2010.
- 22.- Houldocrof, P. T., *Tecnología en los procesos de soldadura*, Ed. Ceac, España, pp 235-240, 2000.
- 23.- González, E., *El Láser principios básicos*, Ed. Universidad de Santo Tomas, Colombia, pp 39-51, 2003.

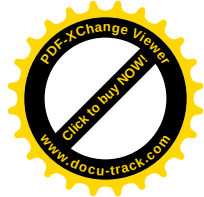
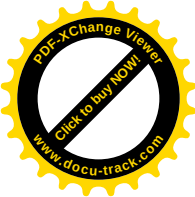


Capítulo III



Elemento finito

Análisis térmico



III.1.- Generalidades

El presente trabajo de investigación, busca encontrar una comparación lógica entre los procesos TIG y MIG, ya que estos procesos de soldadura se aplican comúnmente en el área de diseño. El más importante de los objetivos de este trabajo de investigación, es el poder valorar en que proceso se genera la mayor cantidad de esfuerzos residuales al material base. El proceso de rayo láser es diferente ya que este se aplica por lo regular en laminas, esto quiere decir que el espesor es muy pequeño, por lo cual no se puede comparar en contra de TIG y MIG. Este capítulo describe detalladamente el procedimiento para realizar un análisis numérico utilizando *Ansys 12* en un proceso de transferencia térmica a la probeta como primer instancia, para después realizar un análisis estructural a la misma probeta dando como resultado la obtención de un análisis numérico de tipo acoplado, ya que los resultados del análisis térmico se proyecta en cargas en la solución del análisis estructural.

III.2.- Simulación numérica aplicado en procesos de soldadura

Existen diversas investigaciones dirigidas a procesos analíticos, con el objetivo de simular con mayor precisión los procesos de soldadura. Este proceso además de contar con diversos tipos tales como TIG, Laser, MIG, explosión etc. Tienden a ser procedimientos muy complejos, ya que se involucra una fuente de calor con movimiento en función del tiempo, en crear el cordón de forma experimental, depósito de materiales con propiedades diferentes al material base, condiciones de frontera, deformaciones o estados tensionales. El programa computacional de base en el elemento finito *Ansys*, apareció en 1971. En la actualidad esta herramienta cuenta con la factibilidad de realizar análisis estáticos y dinámicos en transferencia de calor, flujo de fluidos, y de electromagnetismo [III.1], a cuarenta años de su aparición se puede corroborar su contante evolución.

A pesar de no ser un programa especializado en procesos de soldadura diversos investigadores, *Kim*[III.2], *Armentani*[III.3], *Camilleri*[III.4] utilizan *Ansys* que constituye una potente herramienta. Como el caso de *Bezerra*[III.5] quien utiliza este programa computacional en busca de una caracterización del comportamiento dinámico en estructuras soldadas. Las dudas que aún existen en cuanto la aplicación del método de elemento finito en procesos de soldadura son las siguientes:

- Si es conveniente construir modelos bidimensionales o tridimensionales.
- Introducir propiedades termo dependiente.

- Cuál es el método más efectivo de introducir el color al modelo.
- Simular el depósito de material de aporte aplicando (birth-death).[III.6]

III.3.- Selección del material

Con la finalidad de obtener un material en común entre ambos procesos se debe tomar en cuenta lo siguiente:

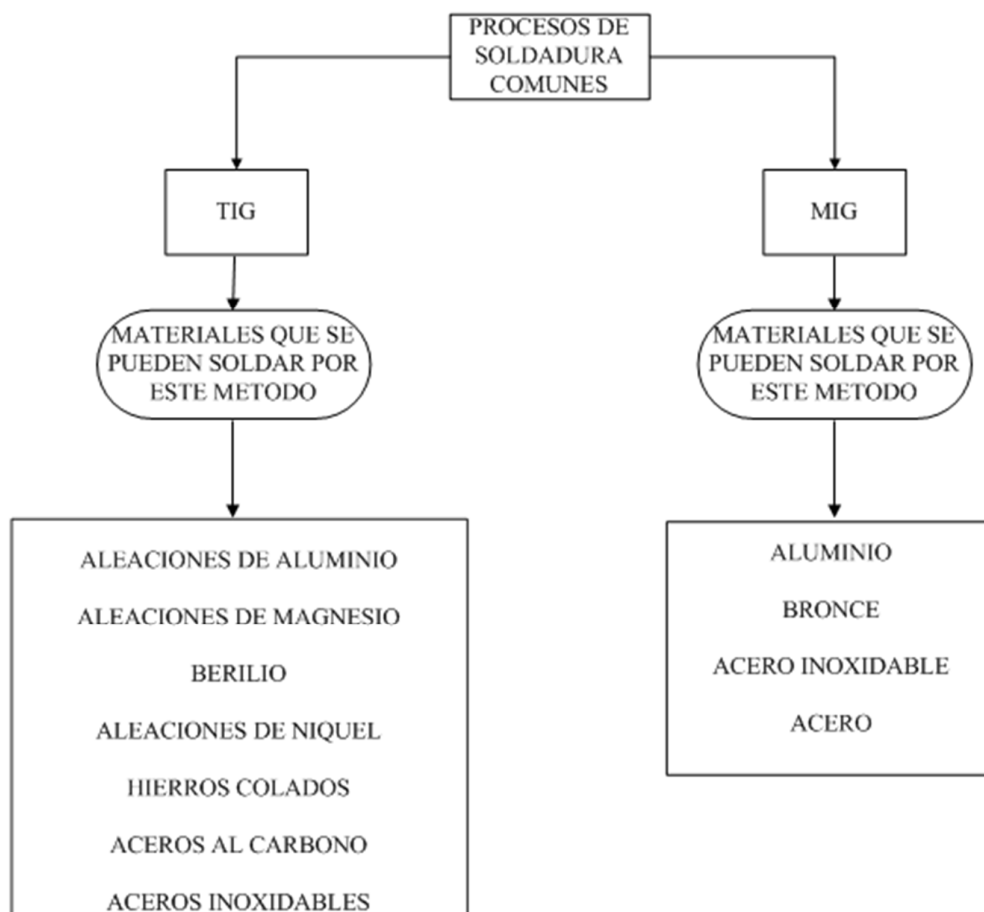


Figura III.1.- Materiales que se pueden soldar, por proceso MIG y TIG. [III.1]

Como se puede observar en la Figura III.1 el proceso de soldadura TIG y MIG, tienen en común el poder unificar aceros y Aluminios. Se establece analizar el efecto de esfuerzos residuales en el acero inoxidable AISI 316L causados por el proceso de soldadura, el cual es de uso común en el sector industrial.

III.3.1.- Descripción general del material AISI 316L

Tiene las mismas características del Acero 304L, pero la adición de Molibdeno mejora su resistencia la corrosión frente a ciertos medios muy activos, como los siguientes:

- Ácido acético concentrado (en caliente)
- Ácido sulfúrico diluido.
- Soluciones salinas.
- Se suelda fácilmente, pero para soldar se debe de utilizar electrodos del mismo acero.
- Debido a su bajo contenido de Carbón no presenta corrosión intergranular aún en estado de recalentado.

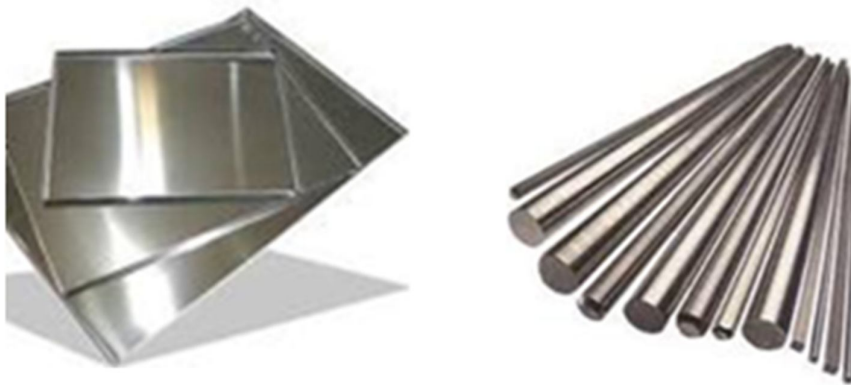


Figura III.2.- AISI 316 en barra y en lámina

Los tratamientos térmicos a los cuales se puede someter el acero inoxidable 316L son los siguientes:

- Forja a 1,100-900 °C.
- Recocido de tipo “Hipertemple”.
- Calentamiento a los 1,100°C.
- Enfriamiento al agua o en espesores muy delgados al aire.

III.3.2.-Usos comunes del Acero inoxidable AISI 316 L

Común mente tiene aplicaciones en:

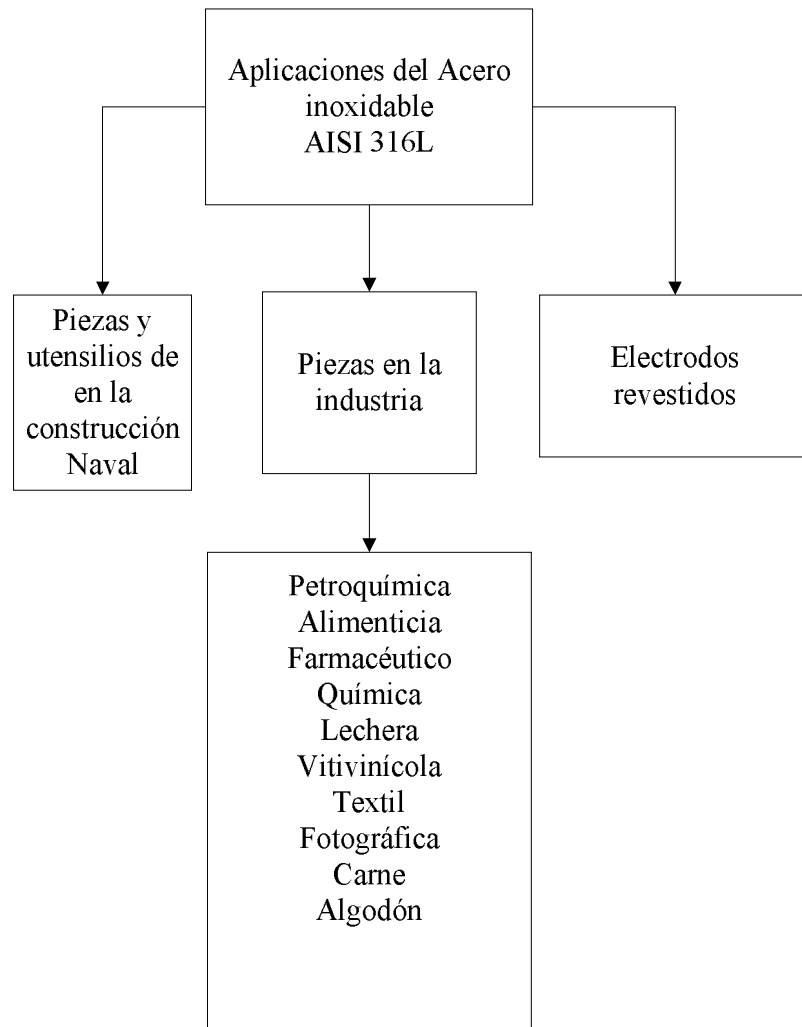
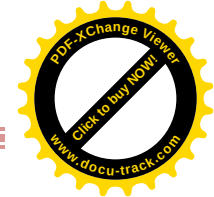
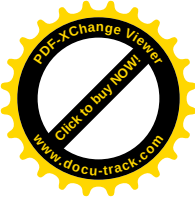


Figura III.3.- Aplicaciones industriales del acero AISI 316L [III.5]



Figura III.4.- Aplicaciones del acero inoxidable 316L

Evaluación numérico-experimental sobre la inducción de esfuerzos residuales por medio del proceso de soldadura tipo; TIG, MIG y Rayo láser



III.3.3.-Propiedades mecánicas

En busca de obtener resultados lógicos en la simulación del proceso de soldadura por medio de elemento finito, se deben de ingresar valores que describen las propiedades mecánicas del Acero 316L. Esto permite que el programa genere resultados aproximados a la realidad.

Tabla III.1.- Propiedades Mecánicas del Acero inoxidable AISI 316L [III.3]

Dureza	138 HBN
Esfuerzo de fluencia	370 MPa (53700 PSI)
Esfuerzo máximo	440 MPa (63800 PSI)
Elongación	15 % en 50mm
Reducción de área	40 %
Módulo de elasticidad	190 GPa (29700 KSI)
Maquinabilidad	75 %

III.3.4.- Propiedades Físicas del Acero 316L

Las propiedades de interés particular son la densidad, el punto de fusión, calor específico, la conductividad y dilatación térmica, las propiedades eléctricas y magnéticas, resistencia a la corrosión y a la oxidación. Se puede establecer que estas propiedades determinan el comportamiento o la eficiencia del diseño, al momento de interactuar con factores externos aplicados al material.

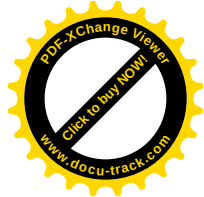
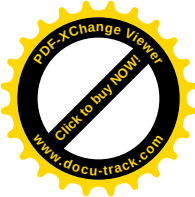
Tabla III.2.- Propiedades físicas del acero inoxidable AISI 316 L

Propiedades físicas del acero 316L						
Material	Densidad (g/m ³)	Temperatura de fusión °C	Conductibilidad Calorífica (W/m *°C)	Coeficiente de dilatación	Calor específico (J/Kg °C)	Coeficiente de expansión térmica (mm/mm°C)
Acero	8000	1375-1400	16.3	11x10 ⁻⁴	500	8.3

Tabla III.3.- Propiedades termo dependientes del acero 316L

Coeficiente de expansión térmica	15.9µm/m *K	100°C
	16.2 µm/m *K	315°C

Evaluación numérico-experimental sobre la inducción de esfuerzos residuales por medio del proceso de soldadura tipo; TIG, MIG y Rayo láser



Coeficiente de expansión térmica	17.5 $\mu\text{m/m} \cdot \text{K}$	500°C
	19.9 $\mu\text{m/m} \cdot \text{K}$	871°C
Módulo de elasticidad	193 Gpa	22°C
Límite de fluencia	241 Mpa	204°C
	190 Mpa	427°C
	110 Mpa	871°C
Coeficiente de <i>Poisson</i>	0.28	22°C

III.4.- Desarrollo del análisis térmico en 3-D para el proceso TIG por MEF

Con la finalidad de simular procesos de soldadura TIG y MIG de forma real y lógica de manera acoplada. Simplificando el proceso de tal manera que el análisis térmico se pueda aplicar al análisis estructural. Se modela la probeta con las siguientes características

III.4.1.- Elemento térmico solid 70 para un análisis en 3D

En este trabajo de investigación se emplea un elemento SOLID 70, el cual es un sólido de ocho nodos, este tipo de elemento ha sido empleado con eficiencia en trabajos de investigación tales como *Bezerra y Moraitis*. Este elemento tiene la capacidad de conducción térmica en modelos en 3D. Además de contar con ocho nodos, con un solo grado de libertad, la temperatura en cada uno de los nodos.

III.4.2.- Inducción de propiedades mecánicas por medio del MEF

Después de seleccionar el elemento con las propiedades ideales se procede a ingresar las propiedades termo-dependientes ya que estas determinan el comportamiento del material ante la inducción de temperatura tales como son:

- Densidad
- Calor específico
- Conductividad térmica

Esto se hace en el preprocesador de *Ansys* en la sección de material propiedades donde aparece otra sección que tiene por nombre Material Models, es en esta sección donde se dan de alta las propiedades termodinámicas de la siguiente manera:

- Thermal>Conductivity>Isotropic>KXX= 14.9
- SpecificHeatfor Material Number 1= 500
- Densityfor material Number1 = 8000

Se debe de dejar establecido de forma clara, en que unidades se ingresan estos datos ya que *Ansys* funciona de forma unidimensional. Es decir, que el control de las unidades está directamente en función del operador del software. El siguiente paso es modelar el espécimen el cual debe de ser similar al experimental, esto permitirá comparar los resultados obtenidos en ambos métodos. Las medidas del espécimen son las que se muestran en la Figura III.5.

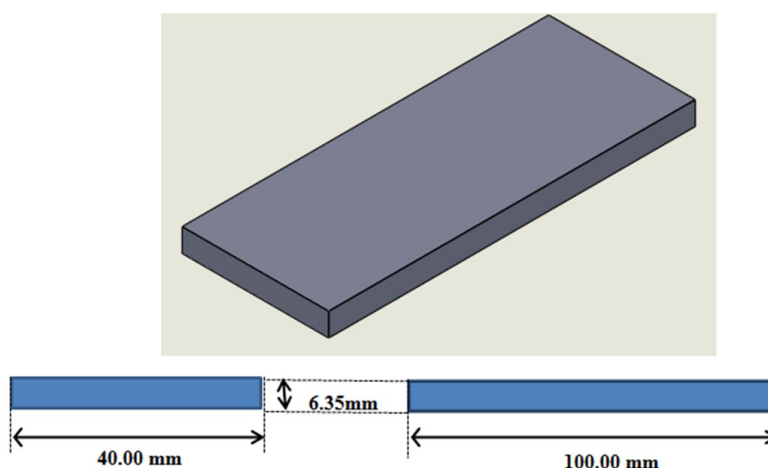


Figura III.5.- Medidas del espécimen

III.4.3.- Modelado y mallado de la probeta

Dando de alta las siguientes coordenadas al modelar un volumen $X_1(0)$, $X_2(0,0.04)$ en $Y_1(0)$, $Y_2(0,0.1)$ y en $Z_1(0)$, $Z_2(0,0.00635)$, tal y como se muestra en la Figura III.6.

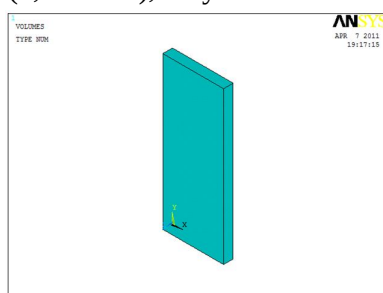


Figura III.6.- Modelado de probetas para proceso TIG, MIG y Rayo Láser

El mallado es diferente a otros autores, por ejemplo *Pozo Morejón*, [III.7] utiliza un mallado el cual es más fino en la zona afectada térmicamente con la finalidad de utilizar menos recursos de la computadora en la zona alejada del paso de la fuente térmica (arco eléctrico), tal y como se muestra en la siguiente Figura III.7.

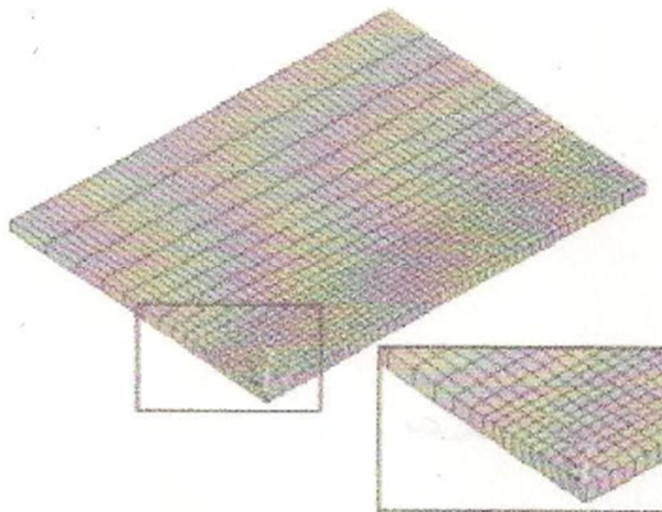


Figura III.7.- Mallado utilizado por *Pozo-Morejón* en el cual la zona afectada térmicamente

El mallado que se utilizara en esta investigación, implica el contemplar la escala de 1:1 ya que al estar a escala de un milímetro, se podrá utilizar el método de respuesta de grieta. El cual implica realizar cortes controlados de un milímetro. Esto quiere decir que el mallado estará constituido por 40 nodos en la parte longitudinal y 100 nodos en la transversal como se muestra en la Figura III.8.

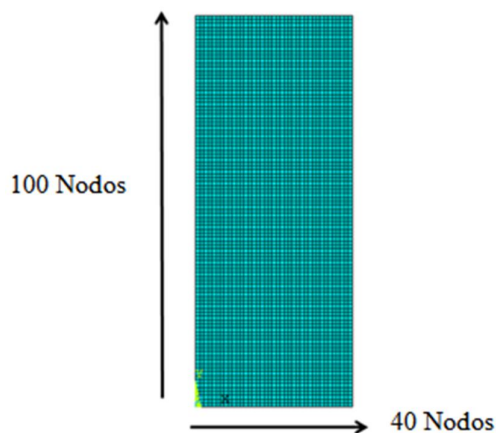


Figura III.8.- Mallado utilizado

III.4.4.- Simulando el proceso de soldadura TIG en función del tiempo

Con la finalidad de simular el proceso de soldadura, esta tiene que estar en función del tiempo, tal y como sucede en el fenómeno real, ya que la fuente térmica recorre el espécimen a soldar en un tiempo determinado. Esto tiene como consecuencia que la simulación de soldadura en *Ansys* será de tipo transitorio, lo cual significa que es un análisis en función del tiempo. El siguiente paso después de tener mallado, es inicial el proceso de solución en el cual se declara en *Analystype*, donde se declara que es un análisis transitorio.

Después de declarar el tipo de análisis se procede a inducir la condición de frontera la cual consiste en la convección con el medio ambiente, donde se toma en consideración una película constante de $25 \text{ W}/(\text{m}^2 * ^\circ\text{C})$. La radiación se descarta ya que la eficiencia considerada es de un 65% por lo cual no se contempla, la temperatura inicial en el espécimen es considerada de 22°C . La carga se aplicara en un tiempo de 40 segundos, el cual es obtenido del proceso de soldadura en forma experimental. De tal manera que los 40 segundos se dividen en la sección longitudinal creando 10 pasos de carga en los cuales al espécimen se le induce el paso de una fuente térmica de 723°C . Cada paso contempla la aplicación de la fuente térmica en 4 nodos localizados en sección longitudinal, por 2 nodos en la sección transversal simulando un cordón de 4 milímetros al insertar la propiedad de simetría en el análisis estructural (Figura III.13).

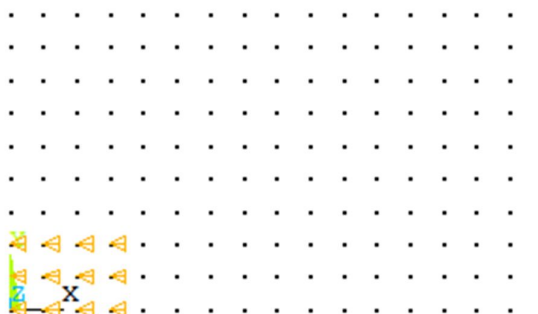


Figura III.9.- Colocación de carga térmica en el primer pasó en un tiempo de 4 seg.

Después de aplicar el paso de carga se debe de borrar la fuente térmica, de tal manera que se pueda inducir el segundo paso térmico en los siguientes 4 nodos contemplando un tiempo de 8 segundos y así sucesivamente hasta alcanzar los 10 pasos, como se muestra en la Figura III. 10, en la cual se puede visualizar el paso de la fuente térmica en el último paso de carga (Figura III.10).

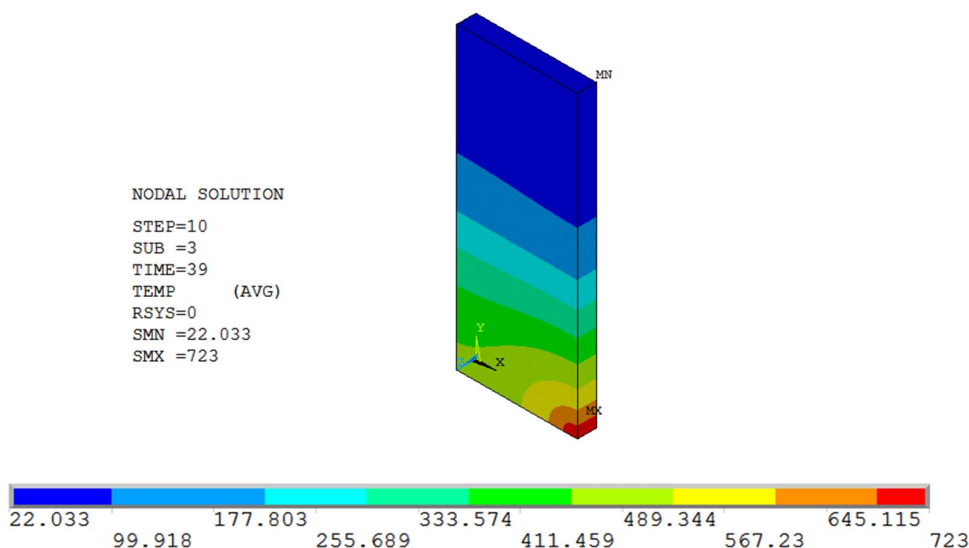


Figura III.10.- Colocación de carga térmica en el último paso TIG

Después de realizar la inducción de carga térmica en el paso 10 se debe de borrar la fuente térmica y crear un paso 11 el cual contempla la interacción del espécimen con el medio ambiente, obteniendo un enfriamiento hasta alcanzar el equilibrio térmico. El tiempo estimado en el paso 11 es de 2500 segundos, la siguiente grafica muestra el comportamiento de la temperatura en el espécimen en función del tiempo.

TEMP

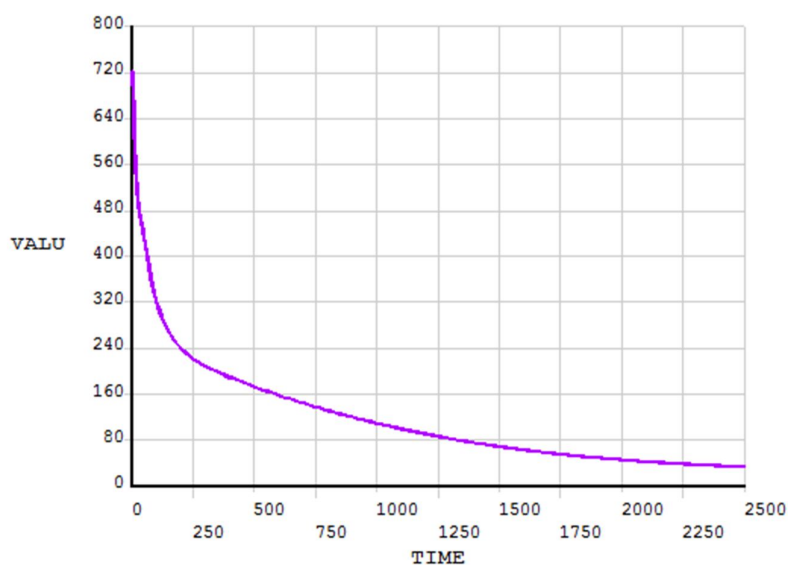


Figura III.11.- Grafica de comportamiento térmico con respecto al tiempo en un espécimen 3-D, en el proceso de soldadura TIG

Contemplando que la simulación del proceso de soldadura sea lo más cercano a la realidad, se debe contemplar en el análisis térmico un equilibrio térmico, ya que este trabajo de investigación está estructurado en un análisis acoplado, el cual se estructura en su primera fase en un análisis trascendente y un estático. La Figura 12 muestra la temperatura en el espécimen justo cuando este alcanza su equilibrio térmico a los 34 °C.

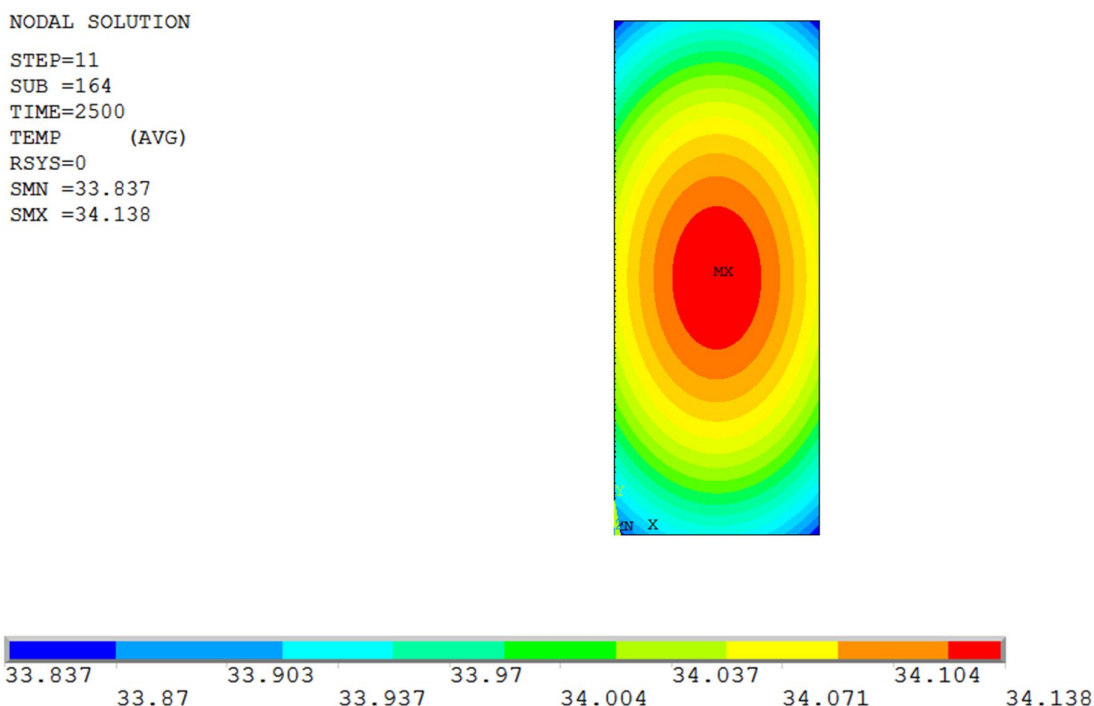


Figura III.12.- Temperatura del espécimen a los 2500 segundos

III.5.- Análisis térmico en el proceso de soldadura TIG en 2D

Es importante desarrollar un análisis en 2D, con la finalidad de poder obtener una comparación de resultados, ya que este es tema de discusión en diversos trabajos de investigación entre la igualdad a la realidad. Los datos utilizados en este análisis son exactamente los mismos del 3D, los cuales se ingresan de la misma manera la cual consiste en el preprocesador de *Ansys* en la sección de Material Props donde aparece otra sección que tiene por nombre Material Models, es en esta sección donde se dan de alta las propiedades termodinámicas de la siguiente manera:

- Thermal>Conductivity>Isotropic>KXX= 14.9
- SpecificHeatfor Material Number 1= 500
- Densityfor material Number1 = 8000

III.5.1.- Elemento térmico Plane 55 para un análisis térmico en 2-D

El elemento Plane 55 puede ser utilizado como un elemento plano o como un elemento de simetría axial con excelentes cualidades para la conducción térmica en un análisis 2D. El elemento tiene cuatro nodos con un solo grado de libertad para la temperatura en cada nodo, el elemento es aplicable a un análisis en 2D de tipo térmico en estado estacionario o transitorio. También puede simular el flujo de calor, cuando se aplica una fuente a velocidad constante. Cuando se requiere realizar un análisis acoplado, al sustituirse debe de ser por un elemento estructural equivalente por ejemplo el elemento Plane 42. Un elemento con capacidad similar midside en el nodo es el Plane 77 [III.8].

III.5.2.- Modelado y mallado del espécimen TIG en 2D

Se modela el espécimen con la característica de un cuadrado dándole un valor en X de 0.04 metros y en el eje Y de 0.1 metros como se muestra en la Figura 13 la cual es similar a la modelada en 3-D, solo que en este modelo se descarta el espesor. El mallado aplicado es exactamente igual al espécimen utilizado en el proceso 3D TIG.

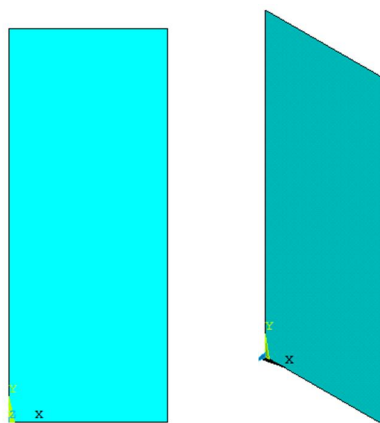


Figura III.12.-Modelado de espécimen en 2D para el análisis térmico del proceso TIG

III.5.3.-Inducción de temperaturas al espécimen 2D TIG

De la misma manera el primer paso es considerar que este es un análisis de tipo transitorio ya que la aplicación de las cargas térmicas estará en función del tiempo, al igual que la convección térmica con el medio ambiente. La condición inicial del espécimen considera la temperatura ambiente en 22 °C. Además de considerar una película de convección de $25W/(m^2 * ^\circ C)$. La manera de inducir las cargas térmicas es similar a la aplicada en 3-D, con la finalidad de poder discutir las diferencias en los resultados. De tal manera que los 40

segundos se dividen en la sección longitudinal creando 10 pasos de carga en los cuales al espécimen se le induce el paso de una fuente térmica de 723°C. Cada paso contempla la aplicación de la fuente térmica en 4 nodos localizados en sección longitudinal, por 2 nodos en la sección transversal simulando un cordón de 4 milímetros al insertar la propiedad de simetría en el análisis estructural, como se muestra en la siguiente figura.

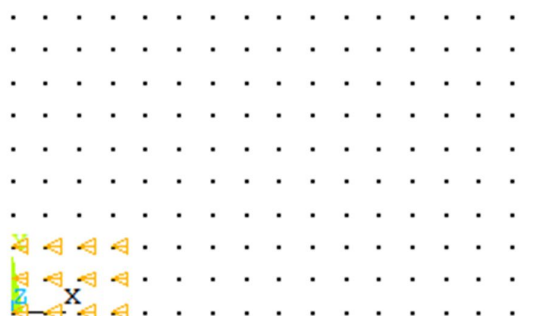


Figura III.13.- Aplicación de carga térmica en los nodos en el primer paso

La Figura III.14 muestra la simulación justo en el primer paso de carga térmica, considerando una fuente térmica de 723°C.

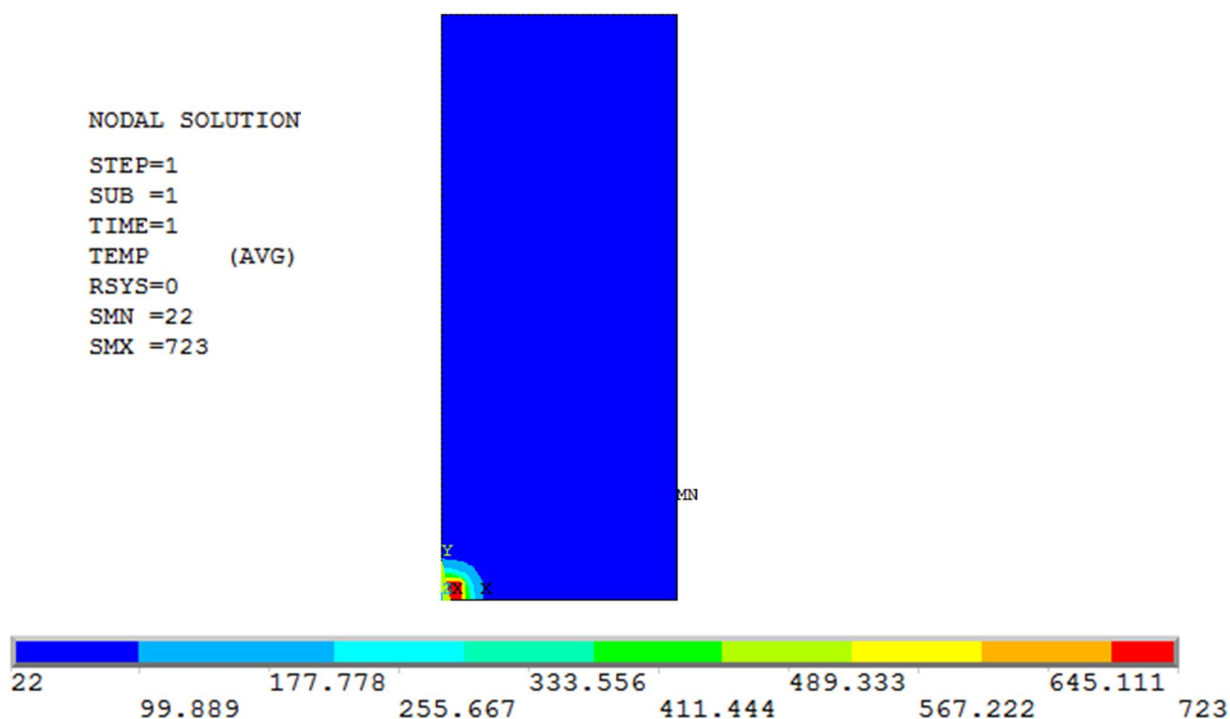


Figura III.14.-Primer paso de carga térmico en análisis 2D TIG

El paso numero 11 contempla un enfriamiento del espécimen a través de la convección térmica con el medio ambiente, la cual como se mencionó anterior mente es de 22 °C. El tiempo considerado en la convección térmica es de 10000 segundos para igualar al espécimen de 3D.

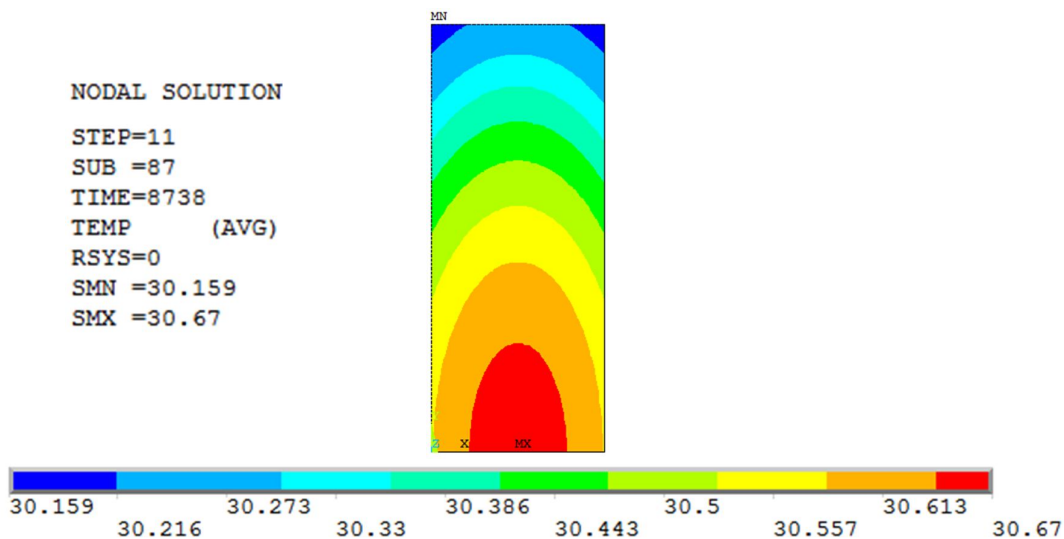


Figura III.15.-Espécimen en equilibrio térmico

La siguiente grafica muestra cómo se comporta la zona afectada térmicamente con respecto al tiempo y la convección térmica.

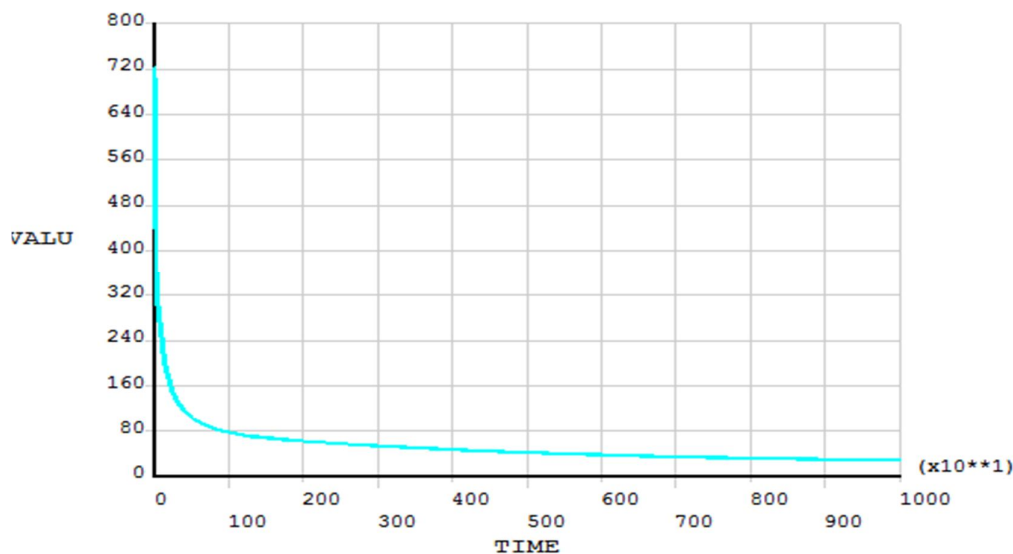


Figura III.16.-Comportamiento de temperatura con respecto al tiempo

III.6.- Análisis térmico del proceso de soldadura MIG en 3D

Para desarrollar el análisis térmico se vuelve a considerar el mismo elemento utilizado en el proceso TIG(Solid 70). Con la finalidad de obtener una comparación lógica con el método experimental se vuelven a retomar las propiedades mecánicas y termo dependientes del acero inoxidable 316L.

III.6.1.- Modelado y mallado utilizado en el espécimen MIG

Con la finalidad de obtener una comparación lógica entre los tres procesos (TIG, MIG y Láser), se debe de mantener las características en cuestión de las dimensiones (Figura III.17), y mallado las cuales son:

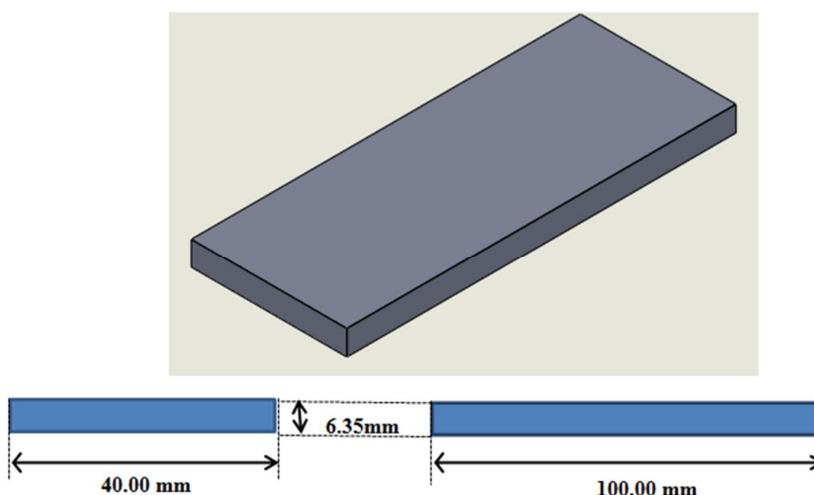
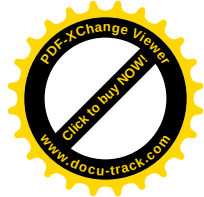
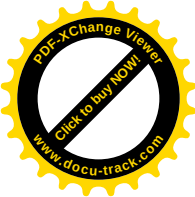


Figura III.17.- Medidas del modelo utilizado en Ansys

El mallado utilizado es fino, ya que esta característica permitirá más adelante realizar el Método de Respuesta de Grieta. Este mallado consiste en simular cada nodo en un milímetro de distancia tal y como se muestra en la FiguraIII.18.



Figura III.18.- Mallado utilizado en espécimen MIG



III.6.2.- Declaración de análisis trascendental en 3D

El desarrollar un análisis de tipo transitorio, tiene como objetivo que las cargas o el desarrollo del mismo este en función de un tiempo determinado, ya sea con cargas constantes o variables a través de la inducción de tablas al programa de cómputo. La forma de declarar un análisis de tipo transitorio en *Ansyses* la siguiente:

Solution>AnalysisType> New Analysis>Transient> Ok > Full > Ok, (Figura III.28)

III.6.3.- Inducción de la potencia térmica

La temperatura adecuada para el proceso de soldadura MIG se determinó considerando factores de Eficiencia, Voltaje y Corriente. Considerando la fase experimental las probetas se soldaron utilizando las siguientes características de la maquina MIG *Infra* modelo:

- 20 Volts
- 125 Ampers
- 0.65 de Eficiencia

De manera que la carga térmica que se aplica al modelo se determina en función del régimen de soldadura utilizado, por la siguiente ecuación:

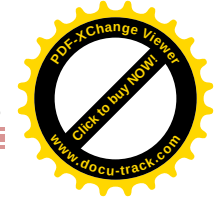
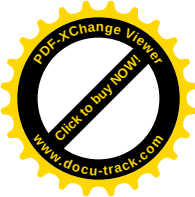
$$Q = h * I_s * V_a (W)$$

Donde; Q representa la potencia térmica, h la eficiencia del proceso la cual es de un 65 % con la finalidad de descartar la radiación en el proceso de soldadura, I_s es la corriente de soldeo empleado (A) y V_a el voltaje del arco. [III.9]

$$Q = 0.65 * 125 * 20$$

$$Q = 1625 (W)$$

Esta potencia térmica se induce en el programa *Ansys*, como HeatFlow ya que esta es una forma de inducir la potencia térmica en Watts [III.8]. Después de realizar diversas corridas con esta potencia se pudo determinar que la temperatura máxima se encuentra en un rango de 523° C y los 902°C. Existe un manual técnico de *Infra*, en el cual se estipula que la



temperatura en un rango muy elevado de eficiencia en el proceso de soldadura es de 921°C [III.10], lo cual está próximo a los 902°C del análisis aplicando 1625 W en el análisis numérico.

Si se considera una eficiencia de 0.65 con el objetivo de descartar la radiación y pérdidas en el ambiente se puede determinar una temperatura de 693.44°C en el arco de soldadura. Esta temperatura se ingresa al programa *Ansys* de la siguiente manera:

Solution> Define Loads>Apply>Thermal>Temperature>On nodes(box) > Ok

La carga se aplica seleccionando los nodos en una caja permitiendo que la carga no solo se aplique en los nodos de la superficie, ya que esto no sucede en el fenómeno real. Se crearan 10 pasos de carga contemplando que el proceso de soldadura se realiza en un tiempo estimado de 40 segundos. Cada paso de carga se guarda y se borra con el objetivo de simular la fuente térmica. Considerando un paso 11 el cual consiste en inducción de tiempo sin el arco de soldadura, permitiendo así su convección térmica con el medio ambiente y en consecuencia su enfriamiento. Las condiciones iniciales de temperatura son de 22°C y una película de transferencia térmica de 25W/m²°C. La Figura III.19 muestra el concepto de los 11 pasos de carga.

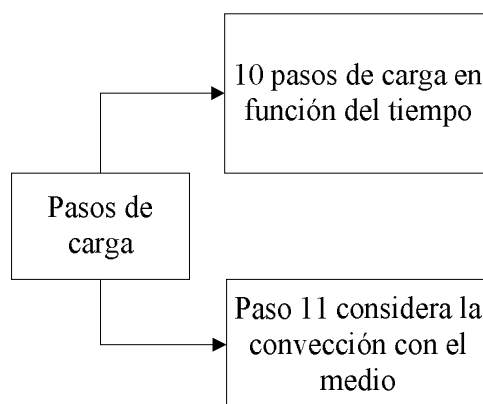


Figura III.19.-Pasos de carga

El último paso de carga contempla los 10000 segundos con la finalidad de poder observar cómo se comporta la distribución de temperatura con respecto al tiempo. Al crear todos los pasos de carga se procede a que el programa computacional *Ansys* resuelva de la siguiente manera:

Solution>Solve>From LS > Files.

Después aparecerá una ventana en la cual se pregunta el rango de pasos a resolver, que en este caso sera de 1 a 11. A continuación se muestra la simulación de Ansys en el primer paso de carga (los primeros 4 segundos). (Figura III.32)

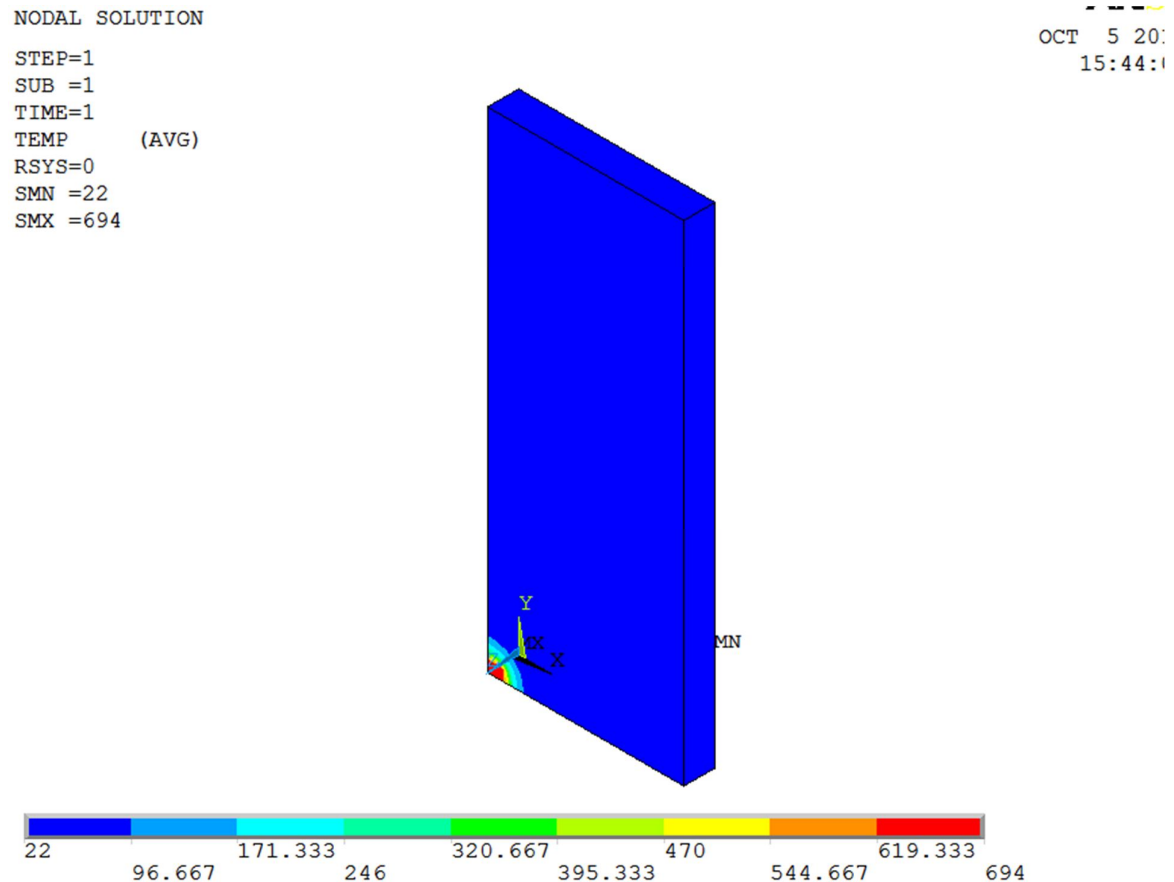


Figura III.20.- Primer paso carga en el análisis 3-D MIG.

En la figura anterior se puede observar la simulación al inicio del proceso de temperatura en el cual la mayoría del espécimen se encuentra a 22°C y solo en la esquina inferior izquierda, se empieza a inducir la fuente térmica de 694°C, esta imagen contempla un tiempo de 4 segundos al iniciarse el proceso de soldadura. La Figura III.21 muestra el último paso de la fuente térmica o arco eléctrico sobre el espécimen justo en el segundo 40.

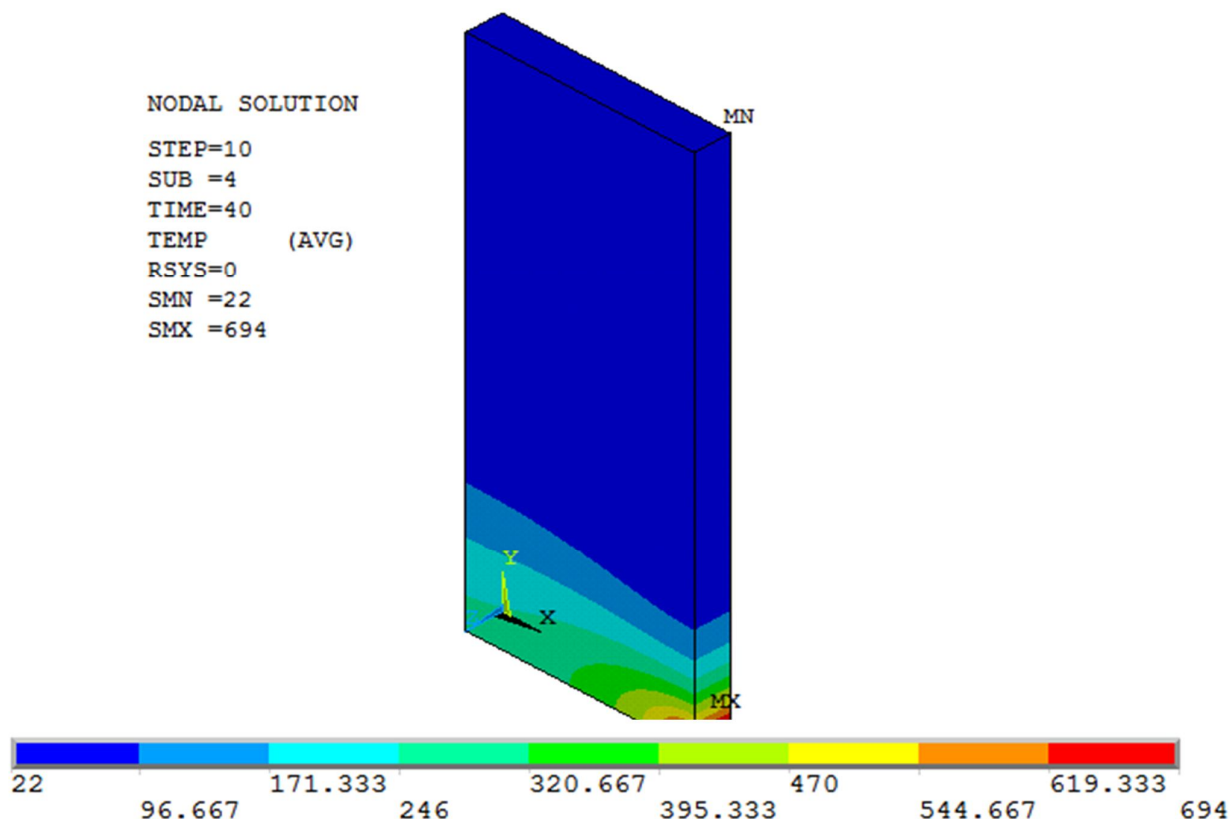


Figura III.21.- Paso de carga 10 a 40 seg.

Básicamente la temperatura se comporta de la siguiente manera, tal y como se comporta en el primer nodo que interactúa con la fuente térmica.

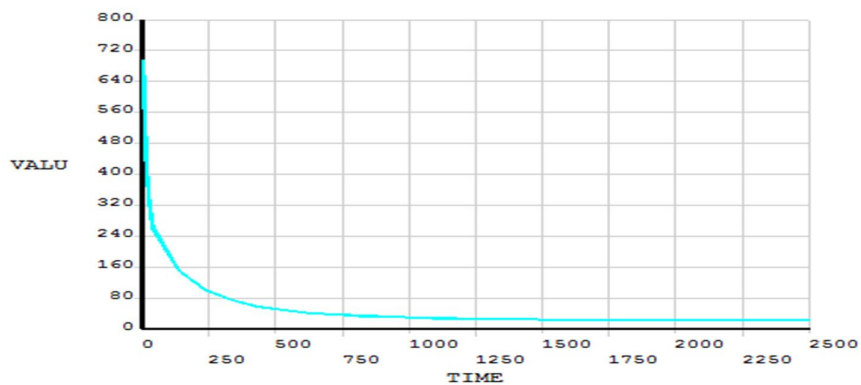


Figura III.22.-Gráfica de comportamiento térmico en función del tiempo

III.7.- Análisis en 2D del proceso MIG

Se vuelve a utilizar el elemento Plane 55 para realizar el análisis térmico, recordando que se puede ser utilizado como un elemento plano o como un elemento de simetría axial con excelentes cualidades para la conducción térmica en un análisis 2D.

III.7.1.- Modelado y mallado del espécimen MIG en 2D

Se modela el espécimen con la característica de un cuadrado dándole un valor en X de 0.04 metros y en el eje Y de 0.1 metros como se muestra en la Figura III.23, la cual es similar a la modelada en 3D, solo que en este modelo se descarta el espesor.

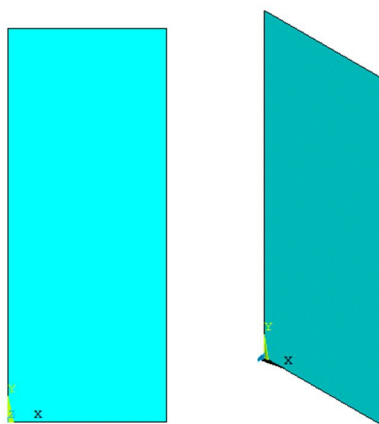


Figura III.23.-Modelado de espécimen en 2D para el análisis térmico del proceso MIG

El mallado aplicado es exactamente igual al espécimen utilizado en el proceso 3-D MIG.

III.7.2.- Inducción de temperaturas al espécimen 2D MIG

De la misma manera el primer paso es considerar que este es un análisis de tipo transitorio ya que la aplicación de las cargas térmicas estará en función del tiempo, al igual que la convección térmica con el medio ambiente. La condición inicial del espécimen considera la temperatura ambiente en 22 °C, además de considerar una película de Convección de $25W/(m^2 * ^\circ C)$. La manera de inducir las cargas térmicas es similar a la aplicada en 3-D, con la finalidad de poder discutir las diferencias en los resultados. De tal manera que los 40 segundos se dividen en la sección longitudinal creando 10 pasos de carga en los cuales al espécimen se le induce el paso de una fuente térmica de 694°C. Cada paso contempla la aplicación de la fuente térmica en 4 nodos localizados en sección longitudinal, por 2 nodos en

la sección transversal simulando un cordón de 4 milímetros al insertar la propiedad de simetría en el análisis estructural, como se muestra laFigura III.24.

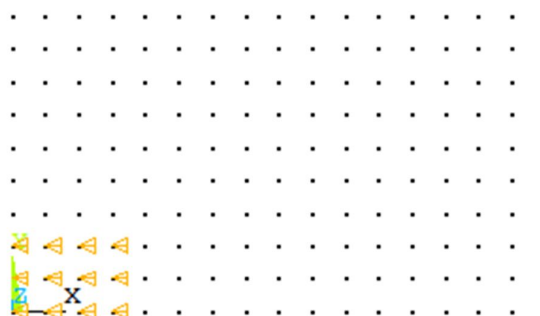


Figura III.24.- Aplicación de carga térmica en los nodos en el primer pasó

La Figura III.25 muestra la simulación justo en el primer paso de carga térmica, considerando una fuente térmica de 694°C.

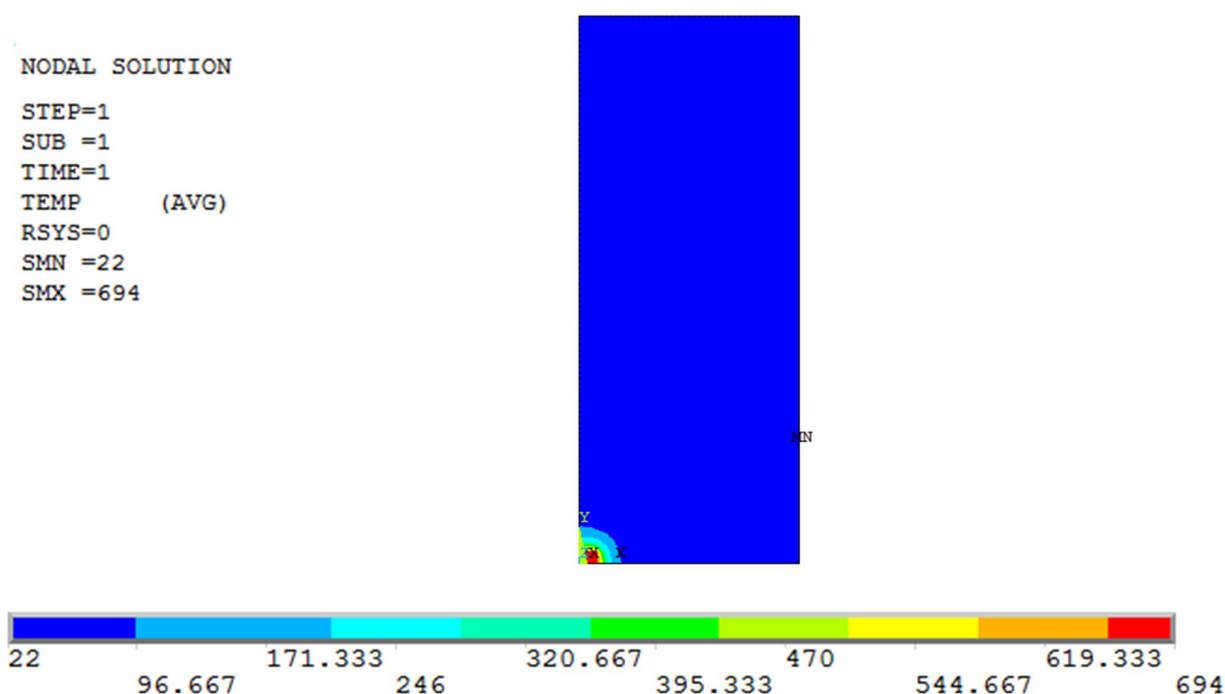


Figura III.25.-Primer paso de carga térmico en análisis 2-D MIG

El paso numero 11 contempla un enfriamiento del espécimen a través de la convección térmica con el medio ambiente, la cual como se mencionó anterior mente es de 22 °C. El tiempo considerado en la convección térmica es de 10000 segundos para igualar al espécimen de 3D.

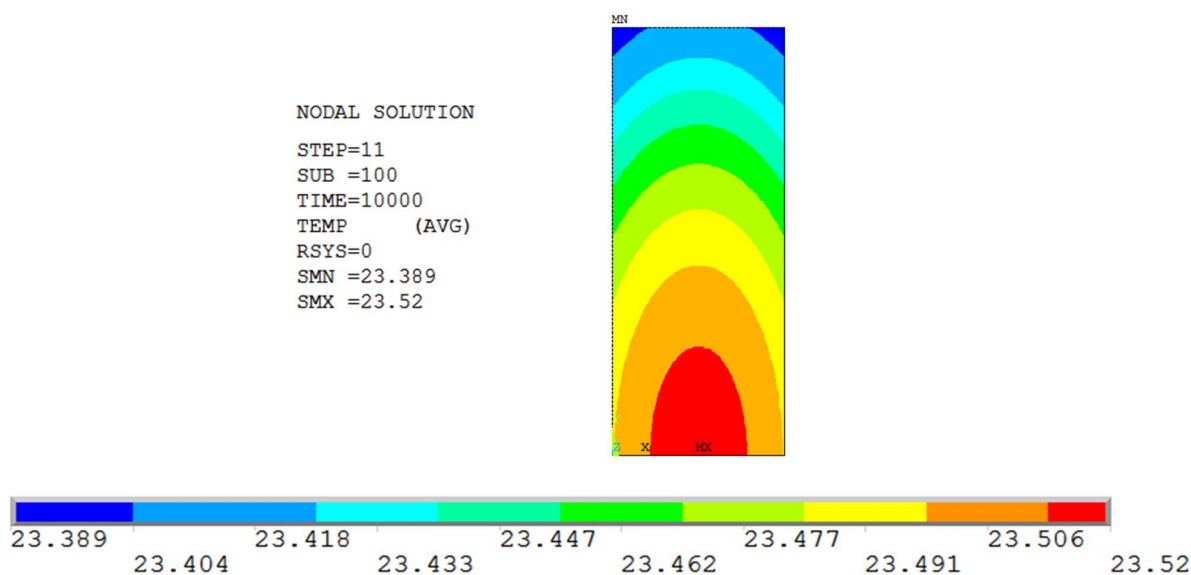


Figura III.26.-Especimen en equilibrio térmico

La siguiente grafica muestra cómo se comporta la zona afectada térmicamente con respecto al tiempo y la convección térmica.

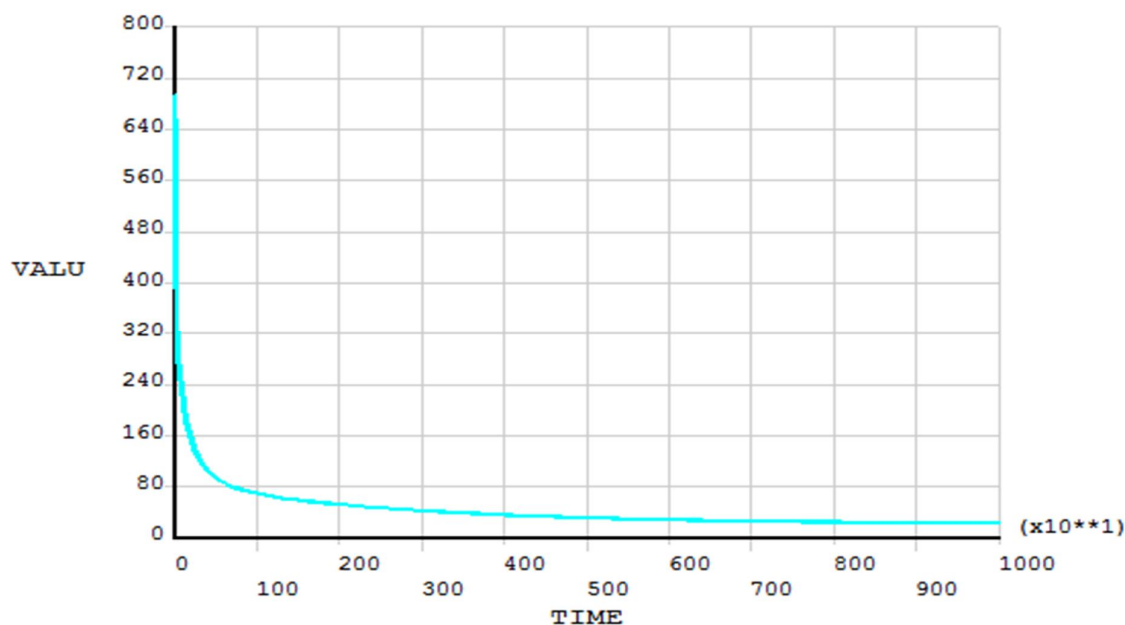


Figura III.27.- Grafica temperatura vs tiempo, proceso MIG 2-D

III.8.- Análisis en 3D del proceso de soldadura basado en Rayo Láser

Para desarrollar el análisis térmico se vuelve a considerar el mismo elemento utilizado en el proceso MIG, (Solid 70). Se vuelven a retomar las propiedades mecánicas y termo dependientes

del acero inoxidable 316L. Estos datos se insertan de la manera mencionada anteriormente la cual consiste en:

Preprocessor> Material Props> Material Models.

III.8.1.- Modelado y mallado utilizado en el espécimen MIG

Con la finalidad de obtener una comparación lógica entre los tres procesos (TIG, MIG y Láser), se debe de mantener las características en cuestión de las dimensiones y mallado las cuales son:

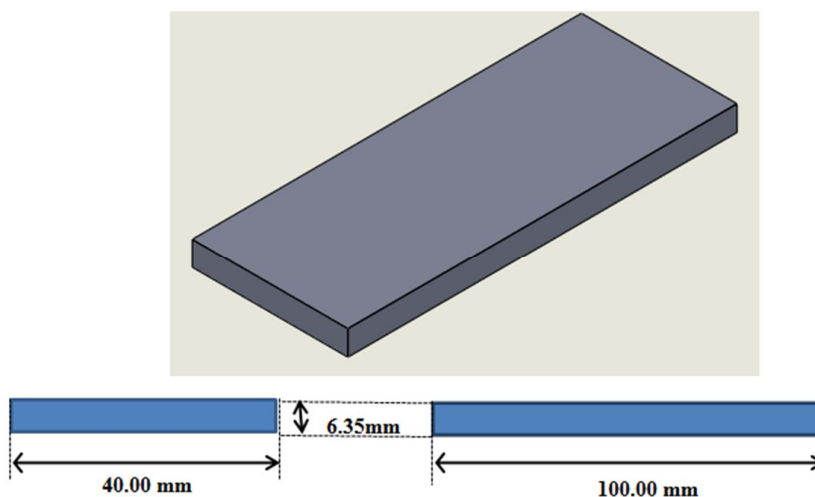


Figura III.28.- Medidas del modelo utilizado

El mallado utilizado es fino, ya que esta característica permitirá más adelante realizar el Método de Respuesta de Grieta. Este mallado consiste en simular cada nodo en un milímetro de distancia tal y como se muestra en la Figura III.29.

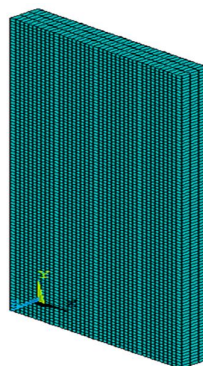
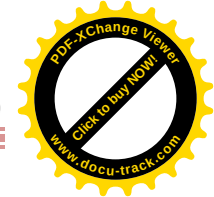
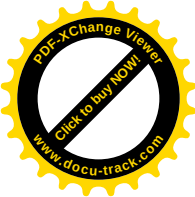


Figura III.29.- Mallado utilizado en espécimen Láser.

**III.8.2.- Declaración de análisis trascendental en Láser 3D**

El desarrollar un análisis de tipo transitorio, tiene como objetivo que las cargas o el desarrollo del mismo este en función de un tiempo determinado, ya sea con cargas constantes o variables a través de la inducción de tablas al programa de cómputo. La forma de declarar un análisis de tipo transitorio en *Ansyses* la siguiente:

III.8.3.- Inducción de la potencia térmica en el proceso de soldadura por rayo Láser

Existen dos tipos de rayo láser empleados en el proceso de soldadura los cuales son:

- Láser de estado solido
- Láser de gas

El láser con mayor eficiencia para el proceso de soldadura y el corte es el CO₂, el medio emisor para este tipo de láser es una mezcla de Helio, Nitrógeno y Anhídrido Carbónico. Este sistema puede operar por encima de los 20 Kw. En el proceso de soldadura una potencia de un nivel de 1.7 Kw. Por ello un nivel de potencia de 5 Kw, permite contar con una amplia gama de aplicaciones. Es por esta razón que la potencia considerada en este proceso de soldadura será de los 5Kw. Si se retoma la ecuación que representa la potencia térmica (Q).

$$Q = h * Is * Va (W)$$

Se puede observar que el resultado está dado en Watts, por lo cual la potencia del láser es igual a:

$$Q = 5000 \text{ Watts}$$

Es muy importante resaltar que este es un análisis en tercera dimensión por lo cual la potencia térmica, debe ser considerada como un flujo de calor volumétrico, el cual se determina de la siguiente manera:

$$FCv = Q/V (W/ m^3)$$

Dónde V corresponde al volumen del elemento finito que se encuentra en la trayectoria del Láser por donde se introduce el calor, por lo cual la ecuación queda de la siguiente manera:

Evaluación numérico-experimental sobre la inducción de esfuerzos residuales
por medio del proceso de soldadura tipo; TIG, MIG y Rayo láser

$$FCv = 5000 / (0.001 * 0.04 * 0.00635) \text{ (W/ m}^3 \text{)}$$

$$FCv = 1.96 * 10^{10} \text{ W/ m}^3$$

Obteniendo el flujo de calor volumétrico, este se ingresa a Ansys como un HeatGeneration Per Volumen. Esto se realiza en el programa de cómputo de la siguiente manera:

Solution>Apply>Thermal>HeatGenerat>Onnodos> Ok.

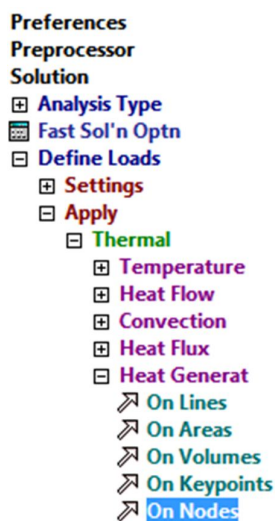


Figura III.30.-Inducción de cargas térmicas en Ansys

Se crean 11 pasos de carga, los primero 10 conforman el procedimiento de soldadura, solo que en este proceso el tiempo es menor al proceso TIG y MIG. El tiempo considerado en el proceso de soldadura será de 5 segundos. Esto quiere decir que cada paso de carga será de 0.5 segundos, la Figura III.31 muestra el primer paso de carga.

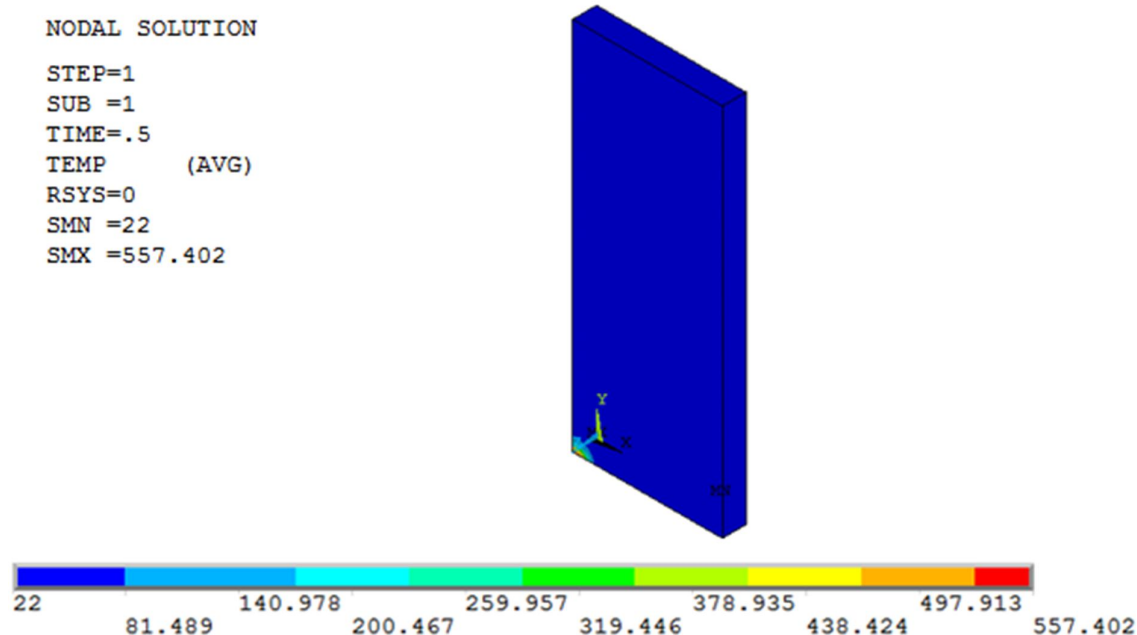


Figura III.31.- Proceso de soldadura por rayo Láser en el primer paso de carga.

Se crea un último paso (11) el cual consiste en inducción de tiempo sin el rayo Láser, permitiendo así su convección térmica con el medio ambiente y en consecuencia su enfriamiento. Las condiciones iniciales de temperatura son de 22°C y una película de 25W/m²*°C. La figura III.32 muestra el concepto de los 11 pasos de carga.

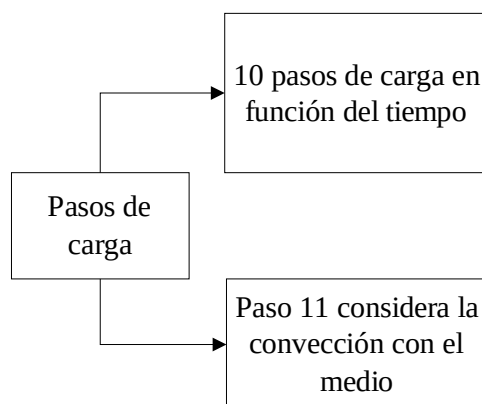


Figura III.32.- Pasos de carga

El último paso de carga contempla los 2500 segundos, con la finalidad de poder observar cómo se comporta la distribución de temperatura con respecto al tiempo.

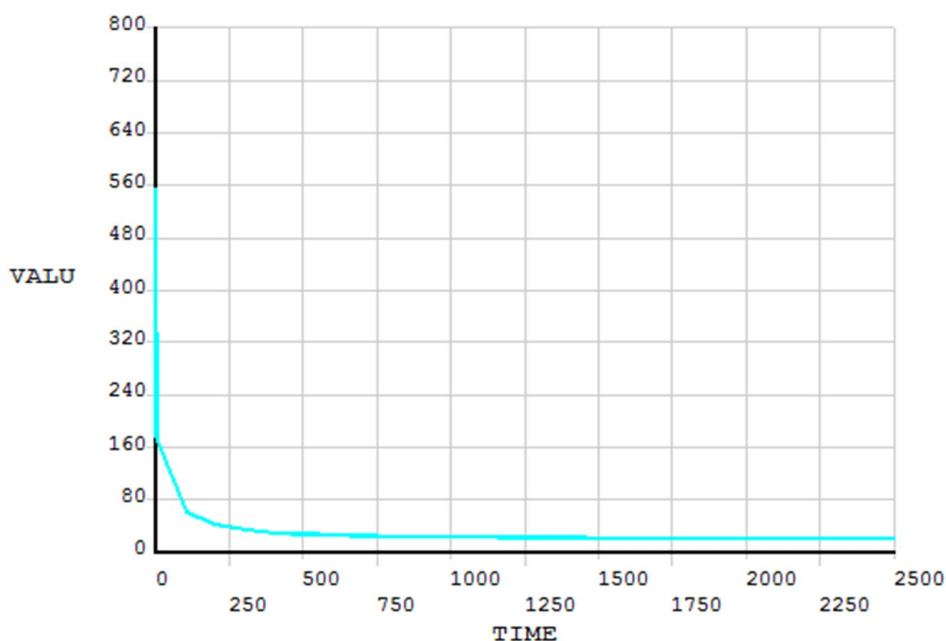


Figura III.33.-Grafica Temperatura Vs Tiempo en el proceso de soldadura por Láser de gas.

Es de suma importancia que el espécimen alcance un equilibrio térmico, dicho de otra manera que esta regrese su temperatura inicial. Esto es fundamental ya que se trata de un análisis acoplado. La Figura III.34 muestra el momento justo en el cual la probeta alcanza el equilibrio térmico.

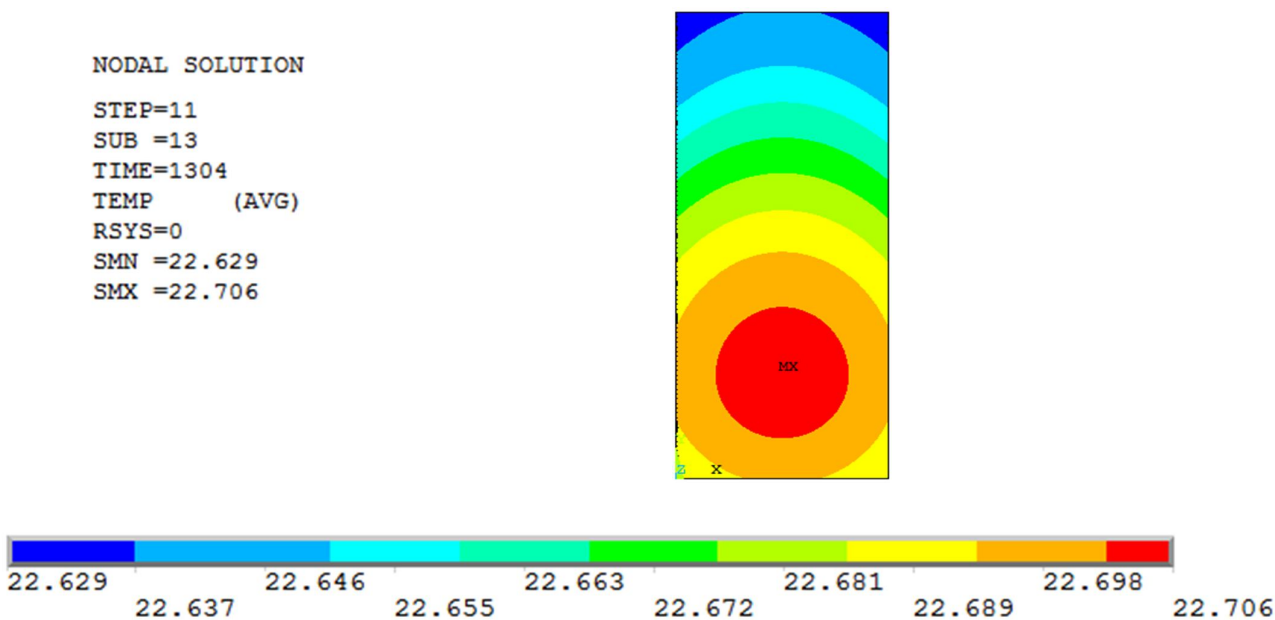


Figura III.34.- probeta en equilibrio térmico

III.9.- Análisis en 2D del proceso MIG

Se vuelve a utilizar el elemento Plane 55 para realizar el análisis térmico, recordando que se puede ser utilizado como un elemento plano o como un elemento de simetría axial con excelentes cualidades para la conducción térmica en un análisis 2D.

III.9.1.- Modelado y mallado del espécimen MIG en 2-D

Se modela el espécimen con la característica de un cuadrado dándole un valor en X de 0.04 metros y en el eje Y de 0.1 metros como se muestra en la Figura III.35, la cual es similar a la modelada en 3D, solo que en este modelo se descarta el espesor.

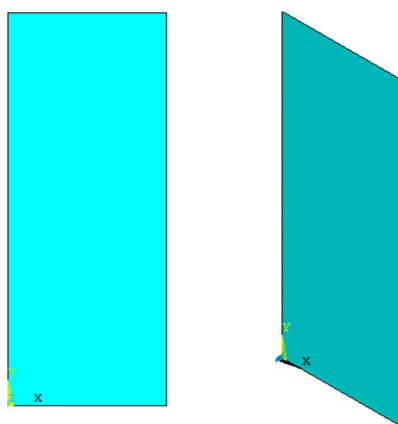


Figura III.35.-Modelado de espécimen en 2D para el análisis térmico del proceso rayo Láser

El mallado aplicado es exactamente igual al espécimen utilizado en el proceso 3-D Láser como se muestra en la Figura III.36.

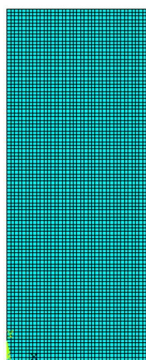
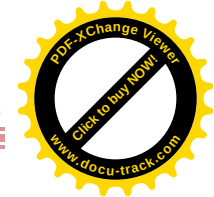
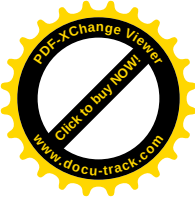


Figura III.36.-Mallado en el espécimen 2-D rayo Láser

**III.9.2.- Inducción de temperaturas al espécimen 2D en el proceso de soldadura Láser**

De la misma manera el primer paso es considerar que este es un análisis de tipo transitorio ya que la aplicación de las cargas térmicas estará en función del tiempo, al igual que la convección térmica con el medio ambiente. La condición inicial del espécimen considera la temperatura ambiente en 22 °C, además de considerar una película de Convección de $25W/(m^2 * ^\circ C)$. La potencia considerada en este proceso de soldadura será de los 5Kw. Si se retoma la ecuación que representa la potencia térmica (Q).

$$Q = h * Is * Va (W)$$

Se puede observar que el resultado está dado en Watts, por lo cual la potencia del láser es igual a:

$$Q = 5000 \text{ Watts}$$

Es muy importante resaltar que este es un análisis en 2-D, por lo cual se induce en *Ansys*, como *HeatFlow*, ya que esta modalidad permite inducir la carga térmica directamente en Watts. Esto se hace de la siguiente manera.

Solution> Define Loads>Apply>Thermal>On nodos >HeatFlow> Ok.

La Figura III.37 muestra el primer paso de carga, el cual es considerado de medio segundo, ya que el proceso de soldadura en Láser es más rápido que TIG y MIG. Esto quiere decir que se crearan 10 pasos de carga los cuales serán de 0.5 segundos cada uno, dando un total de 5 segundos en todo el proceso, creando un último paso el cual no contempla inducción de carga térmica, este paso solo contempla el enfriamiento con el medio a través de la convección.

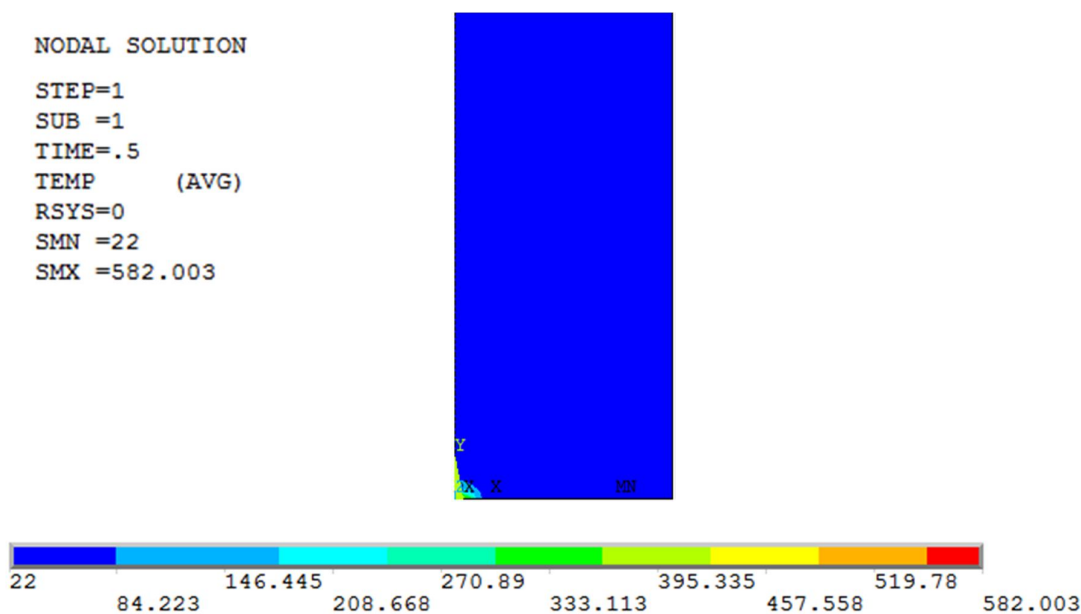


Figura III.37.- Primer paso de carga en proceso de soldadura por rayo Láser de gas

El enfriamiento con el medio ambiente se comporta tal y como muestra la Figura III.38.

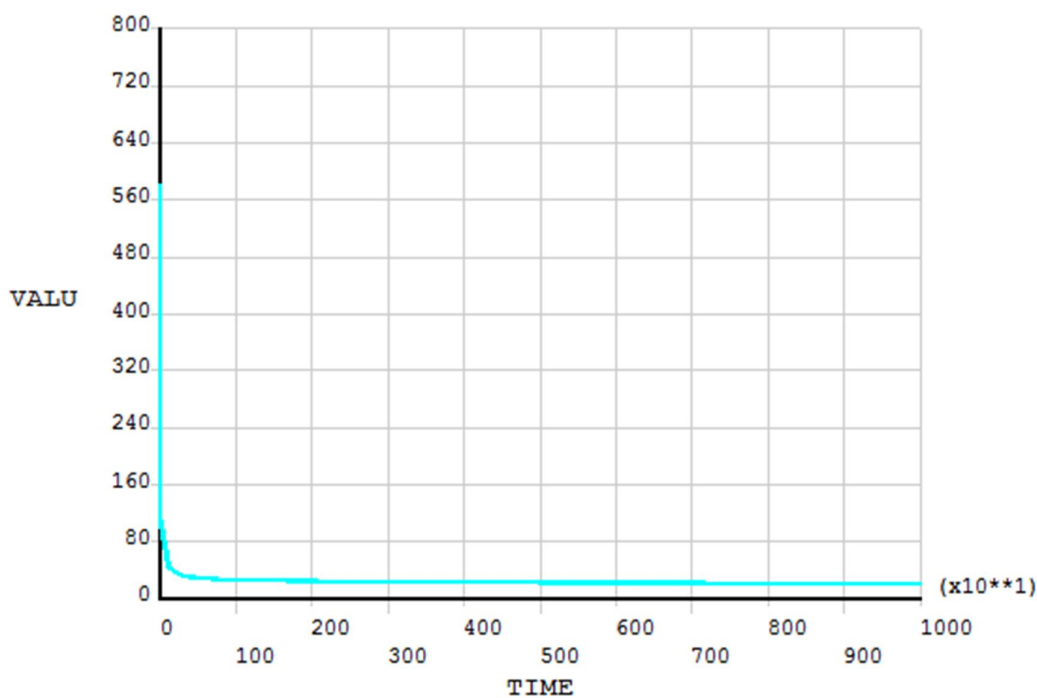


Figura III.38.- Grafica Temperatura Vs Tiempo en proceso de rayo Láser

La Figura III.39 muestra al espécimen cerca del equilibrio térmico.

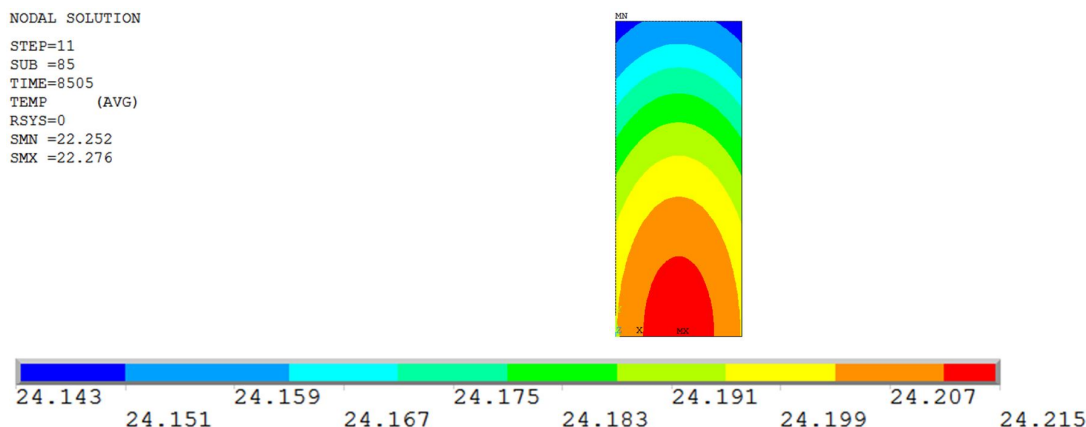


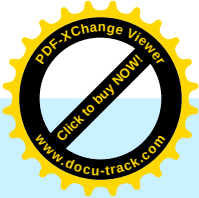
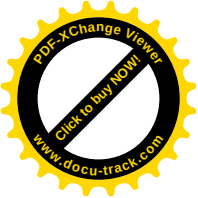
Figura III.39.- Equilibrio térmico en proceso de rayo Láser

III.10.- Sumario

En el presente capítulo se describe el procedimiento para desarrollar la simulación térmica, de los procesos de soldadura TIG, MIG y rayo Láser por medio del MEF. Para cada proceso se desarrolló un análisis en 3D y 2D, de tipo trascendental, esto quiere decir que el análisis está en función del tiempo. Todos los análisis son No Lineales, ya que al inducir las propiedades termodependientes este no se comporta de forma lineal. En el siguiente capítulo se inducirán los resultados térmicos a un análisis de tipo estructural estático, obteniendo los esfuerzos residuales en los tres procesos de soldadura.

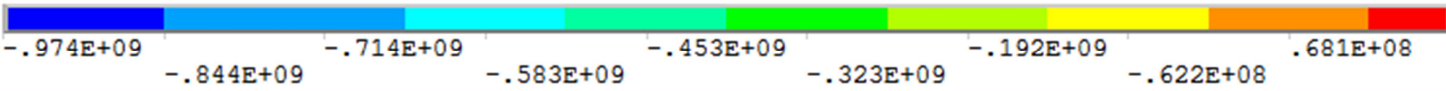
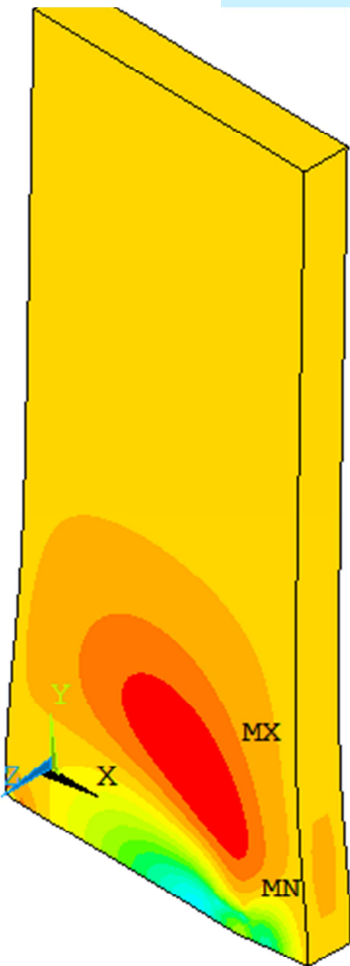
3.11.- Referencias

- 1.- *Manual de soldadura Tomo II*, American Welding Society, pp. 109-154, 1996.
- 2.- Ferrer J. y Domínguez E., *Técnicas de mecanizado para el mantenimiento de vehículos*, Ed. Editex, España pp. 114, 2008.
- 3.- *Manual de suministros Sumitec Acero AISI 316L*, Sumitec®, 2011.
- 4.- Houldcroft, P. T., *Tecnología en los procesos de soldadura*, Ed. Ceac, España, pp 235-240, 2000.
- 5.- Recuperado de: http://www.cyclosrl.com.ar/03infdat_01.htm
- 7.- Pozo-Morejón, J., García-Jacomino, J., Ramos-Morales, F., García-Rodríguez, Y., Cruz-Crespo, A., Díaz-Cedre, E. y Duffus-Scott, A., Metodología de modelación mediante ansys de la historia térmica, tensiones y deformaciones de soldadura, *Revista de la facultad de Ingeniería Universidad central de Venezuela*, Vol. 4, Numero 2, Caracas, 2009.
- 8.- *Ansys 12® tutorial element Plane 55*.
- 9.- *Ansys 12® tutorial Thermal conversion factors*, Table 1.2.



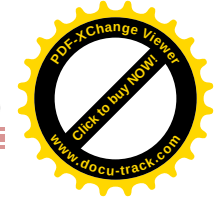
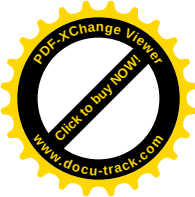
Capítulo IV

SX (AVG)
RSYS=0
DMX =.269E-03
SMN =-.974E+09
SMX =.198E+09



Análisis estructural

TIG, MIG y Láser

**IV.1.- Generalidades**

La inducción del campo de esfuerzos residuales en procesos de soldadura, ocurre justamente en la zona afectada térmicamente por la alta temperatura derivada del proceso y por el enfriamiento brusco y súbito en el sistema. Para poder realizar una simulación acertada de los procesos de soldadura TIG, MIG y rayo Láser es necesario, realizar un análisis acoplado el cual se conforma de dos fases. La primera contempla realizar el análisis térmico en el cual se analiza la distribución térmica, en un análisis de tipo transitorio. Es decir, en función del tiempo de los procesos de soldadura mencionados anteriormente, tanto en 2D y 3D. La segunda etapa está constituida por un análisis de tipo estático, en el cual se inducen las cargas térmicas, con la finalidad de obtener los esfuerzos residuales que se generan en el proceso de soldadura.

IV.2.- Selección de elemento para análisis estático en 3D para TIG, MIG y rayo Láser

El elemento SOLID45 se utiliza comúnmente para el modelado 3D, de estructuras sólidas. Este elemento está constituido por ocho nodos con tres grados de libertad en cada nodo (X, Y, Z). Las temperaturas y flujos pueden colocarse en los nodos, el elemento tiene plasticidad, fluencia, rigidez, expansión, esfuerzo, la desviación de grandes deformaciones y capacidades.

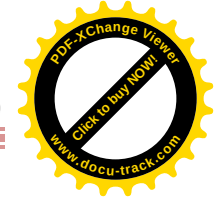
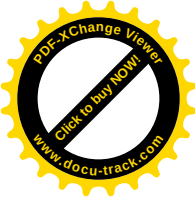
IV.2.2.- Inducción de propiedades mecánicas y termodependientes para un análisis no lineal en el proceso TIG, MIG y rayo Láser

Después de seleccionar el elemento con las propiedades ideales se procede a ingresar las propiedades termodependientes ya que estas determinan el comportamiento del material ante la inducción de temperatura tales como son:

- Densidad
- Coeficiente de expansión térmica
- Módulo de elasticidad
- Límite de fluencia
- Coeficiente de Poisson a temperatura ambiente

Esto se hace en el preprocesador del paquete del programa de MEF en la sección de Material Props donde aparece otra sección que tiene por nombre Material Models.

Preprocessor > Material Models > Structural.

**IV.2.3.- Propiedades termodependientes para el análisis estructural**

Con el objetivo de realizar una simulación, lo más cercano a la realidad, es necesario conocer las propiedades termodependientes y mecánicas del acero inoxidable 316L las cuales se citan en la Tabla IV.1 y IV.2, obteniendo como consecuencia la realización de un análisis no lineal.

Tabla IV.1.- Propiedades físicas del acero inoxidable 316L

Propiedades Físicas del Acero 316L						
Material	Densidad (g/m ³)	Temperatura de fusión °C	Conductibilidad Calorífica (W/m *°C)	Coefficiente de dilatación	Calor especifico (J/Kg °C)	Coefficiente de expansión térmica (mm/mm°C)
Acero	8000	1375-1400	16.3	11x10 ⁻⁴	500	8.3

Tabla IV.2 Propiedades termo dependientes del acero 316L [IV.1]

Coeficiente de expansión térmica	15.9 µm/m *K	100°C
	16.2 µm/m *K	315°C
	17.5 µm/m *K	500°C
	19.9 µm/m *K	871°C
Módulo de elasticidad	193 Gpa	22°C
Límite de fluencia	241 Mpa	204°C
	190 Mpa	427°C
	110 Mpa	871°C
Coeficiente de Poisson	0.28	22°C

También se debe de ingresar la gráfica esfuerzo contra deformación, con la finalidad de obtener esfuerzos residuales, esto viene a complementar el ingreso de propiedades termodependientes, las cuales tienen como objetivo de realizar un análisis no lineal. Los datos que se ingresan se muestran en la Tabla IV.3.

Tabla IV.3.- Datos de la gráfica esfuerzo-deformación

Datos de la curva esfuerzo-deformación	
Esfuerzo (MPa)	Deformación unitaria
370	0.001947
425	0.005104
471	0.008171
491.7	0.009828
513.5	0.011726
525	0.012756
546	0.015000
558	0.016500
567	0.018000
575.8	0.019500
584.5	0.021000
590.5	0.022500
596.85	0.024000

IV.2.4.- Modelado y mallado para análisis estático en 3D TIG, MIG y rayo Láser

Como se trata de un análisis acoplado se debe de tener en cuenta, que es de suma importancia que los especímenes, tengan las mismas medidas que los análisis térmicos, ya que en este capítulo se inducirán los resultados del análisis térmico, y se retomaran como cargas estáticas.

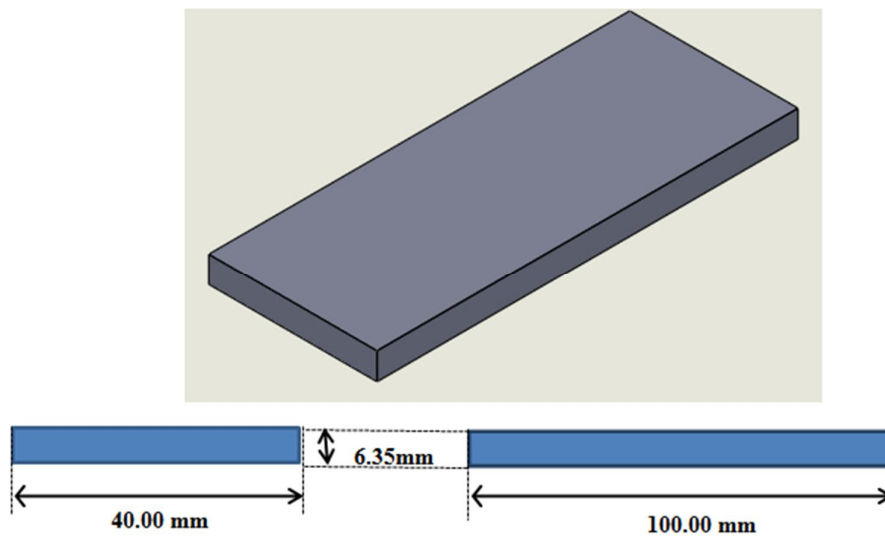


Figura IV.1.- Medidas del espécimen

Dando de alta las siguientes coordenadas al modelar un volumen $X_1(0)$, $X_2(0,0.04)$ en $Y_1(0)$, $Y_2(0,0.1)$ y en $Z_1(0)$, $Z_2(0,0.00635)$, tal y como se muestra en la figura IV.2.



Figura IV.2.- Modelado de probetas para proceso estructural TIG, MIG y rayo Láser

El mallado sigue conservando las características especificadas desde el principio. En el análisis térmico ya que los resultados obtenidos de la distribución térmica, ahora se retomaran como cargas estáticas en el análisis estructural. Esto quiere decir que el mallado estará constituido por 40 nodos en la parte longitudinal y 100 nodos en la transversal, obteniendo un total de 16000 nodos (Figura IV.3).

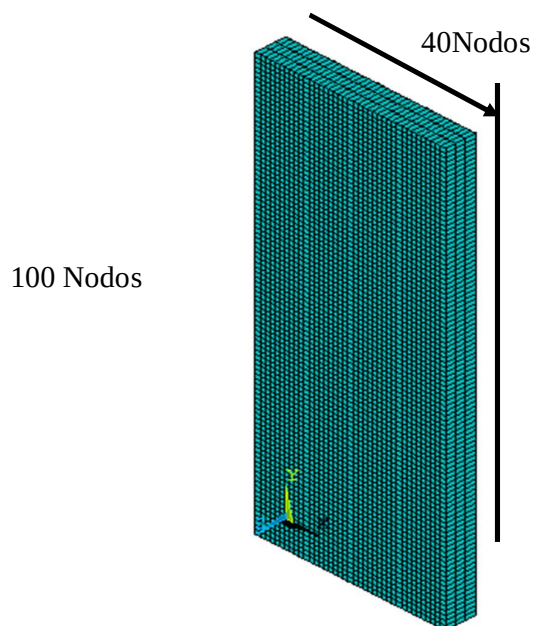


Figura IV.3.- Mallado utilizado en análisis estructural 3D TIG

IV.2.5.- Resumen de la estructura de un análisis acoplado

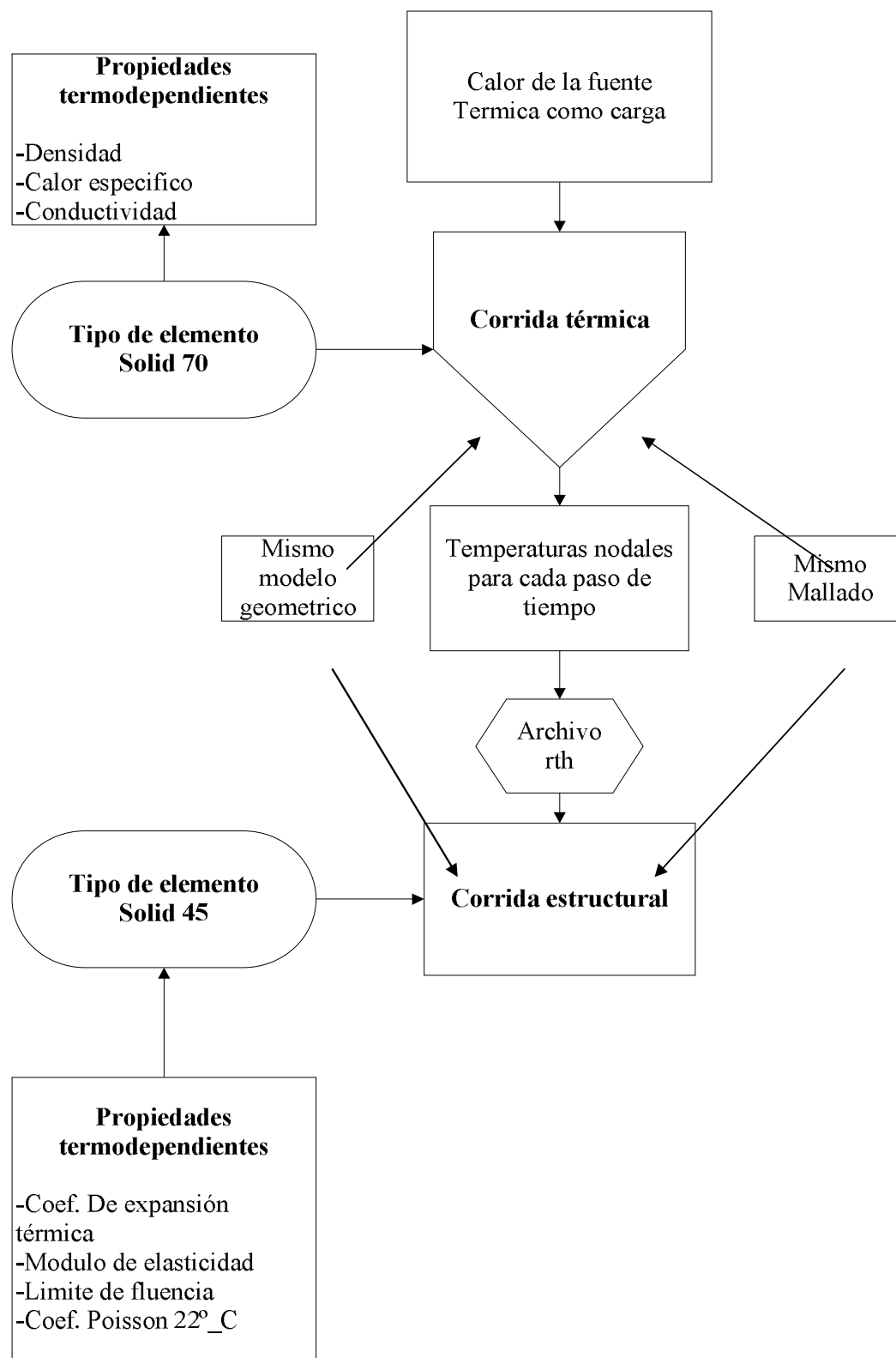
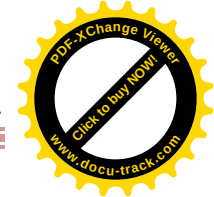
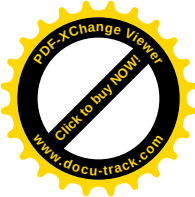


Figura IV.4.- Resumen estructural de un análisis acoplado



IV.2.6.- Aplicación de cargas térmicas transcendentales para un análisis estático, aplicando el archivo rth. (TIG, MIG y Láser)

Es de suma importancia el contar con una buena organización de las corridas térmicas (TIG, MIG, Láser) tanto en 2D y 3D, ya que los resultados obtenidos se guardan en un archivo con extensión rth (Figura IV.5), el cual puede ser aplicado en el análisis estructural.

tig.BCS	16/08/2011 01:09 ...	Archivo BCS	3 KB
tig.db	14/09/2011 11:22 a...	ANSYS .db File	26.624 KB
tig.dbb	14/09/2011 09:56 a...	ANSYS .dbb File	26.560 KB
tig.err	17/09/2011 06:34 a...	Archivo ERR	3 KB
tig.esav	16/08/2011 01:09 ...	Archivo ESAV	896 KB
tig.full	16/08/2011 01:09 ...	Archivo FULL	4.160 KB
tig.ldhi	16/08/2011 01:00 ...	Archivo LDHI	17.847 KB
tig.log	17/09/2011 07:52 a...	Documento de tex...	17 KB
tig.mntr	16/08/2011 01:09 ...	Archivo MNTR	19 KB
tig.osav	16/08/2011 01:09 ...	Archivo OSAV	896 KB
tig.page	17/09/2011 06:27 a...	Archivo PAGE	0 KB
tig.r001	16/08/2011 01:09 ...	Archivo R001	1.216 KB
tig.rth	16/08/2011 01:09 ...	Archivo RTH	2.278.336 KB
tig.s01	16/08/2011 12:47 ...	Archivo S01	1.624 KB
tig.s02	16/08/2011 12:48 ...	Archivo S02	1.624 KB
tig.s03	16/08/2011 12:49 ...	Archivo S03	1.624 KB

Figura IV.5.- Archivo del análisis térmico

Este archivo guarda los resultados obtenidos en el análisis térmico el cual va a ser utilizado con la finalidad de evaluar los desplazamientos y tensiones para cada paso de tiempo, obteniendo así las deformaciones plásticas desde el inicio del proceso de soldadura hasta cuando este termine y el espécimen alcance un equilibrio térmico con el medio que lo rodea. Para un buen desarrollo del análisis estático es necesario contemplar los primeros 10 pasos de carga, en los cuales la temperatura máxima se induce al material, esto permite simular los esfuerzos causados por las altas temperaturas del proceso. Después se crean otros diez pasos los cuales están solo en función del tiempo de enfriamiento, esto permite analizar el comportamiento de los esfuerzos residuales, en relación al tiempo en el cual el espécimen interactúa con la convección, la idea de crear estos pasos consiste en sintetizar el análisis. Por ejemplo si en el proceso de soldadura TIG, en 3-D el tiempo de enfriamiento es de 2500 segundos, se pueden crear pasos de carga de 250 segundos, obteniendo un total de 10 pasos finales. La Figura IV.6 resume el proceso de inducción de cargas.

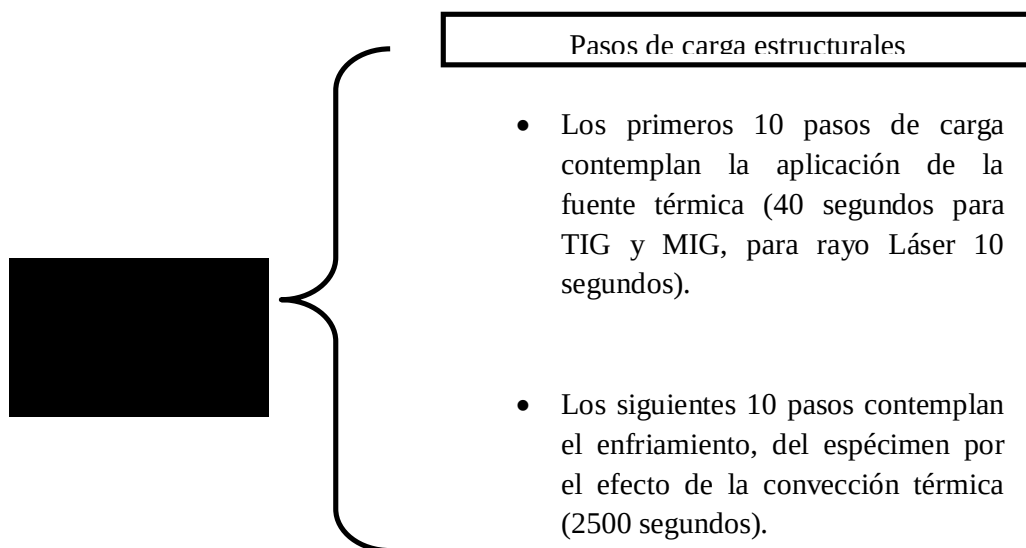


Figura IV.6.- Proceso de inducción de cargas

Con el objetivo de realizar una buena inducción del tiempo es necesario abrir el archivo térmico y en la sección de General Postproc se busca la sección de ListResult y dentro de esta se selecciona Detailed Summary en la cual se muestra el tiempo exacto en el cual Ansys almaceno los resultados tanto en pasos y tiempo tal y como lo muestra la siguiente imagen.

SET,LIST Command

SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	1.0000	1	1	7
2	2.0000	1	2	12
3	3.0000	1	3	16
4	4.0000	1	4	20
5	5.0000	2	1	23
6	6.0000	2	2	26
7	7.0000	2	3	29

Figura IV.7.- Tiempo y pasos del análisis térmico en Ansys

Al tener el tiempo específico de los resultados obtenidos en el análisis térmico se procede a inducirlos en el nuevo análisis del tipo estructural de la siguiente manera:

Solution > Define Loads > Apply > Structural > Temperature > From ThermAnaly

Después aparecerá la siguiente imagen en la cual se induce el tiempo obtenido del análisis térmico y se selecciona Browse. Donde se selecciona el archivo rth, es importante contar con una muy buena organización de todos los análisis, ya que su localización y la aplicación de la misma se requiere en todos los análisis. Después de ingresar la carga térmica como un carga estructural obtenida de un análisis térmico se procede a escribir el paso de carga. Mismo que una vez guardado se borrara para dar paso al siguiente, obteniendo así desplazamientos y tensiones para cada pasó de tiempo.

IV.2.7.-Condiciones de frontera aplicados en análisis estructural, del proceso de soldadura TIG y MIG 3D.

Dentro de los trabajos más relevantes en elemento finito se encuentra *Juan Pozo Morejón*, en el cual establece, una simetría justo en la zona donde se genera la unión, esto con el objetivo de simular un espejo, obteniendo el mismo fenómeno justo debajo de la zona en la cual se plantea la simetría. Esta condición permite ahorrar recursos computacionales al evitar el modelar y mallar el material a unir. A demás propone restringir dos nodos superiores en ambos extremos, tal y como se muestra en la Figura IV.8.

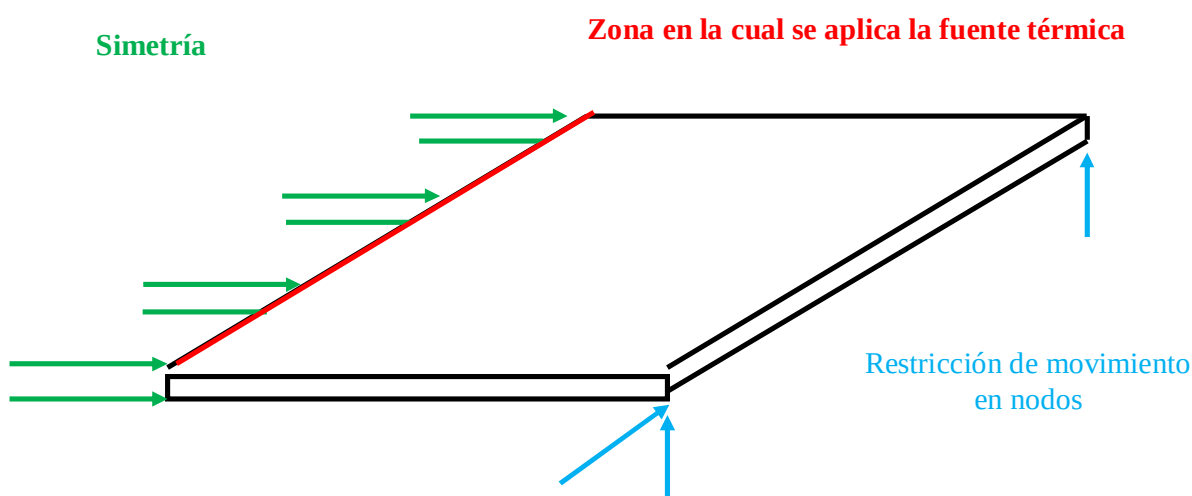


Figura IV.8.- Restricciones de movimiento impuestas al modelo mecanico por *Pozo Morejón* [IV.2]

Tomando en cuenta las consideraciones de *Juan Pozo Morejón* se plantea la siguiente condición de frontera para el análisis estático, en el proceso de soldadura TIG y MIG en 3-D, en el cual se aplica la condición de simetría es fundamental con la finalidad de contar con una

excelente administración de recursos computacionales o memoria del equipo de cómputo. Con la importante variante de restringir solo un nodo en todos los ejes justo en la parte inicial del espécimen, en el cual se aplica la fuente térmica, esto con el objetivo de permitir libremente las deformaciones causadas al aplicar temperaturas elevadas en el espécimen, la Figura IV.9 muestra la condición de frontera utilizado en los procesos de soldadura TIG y MIG.

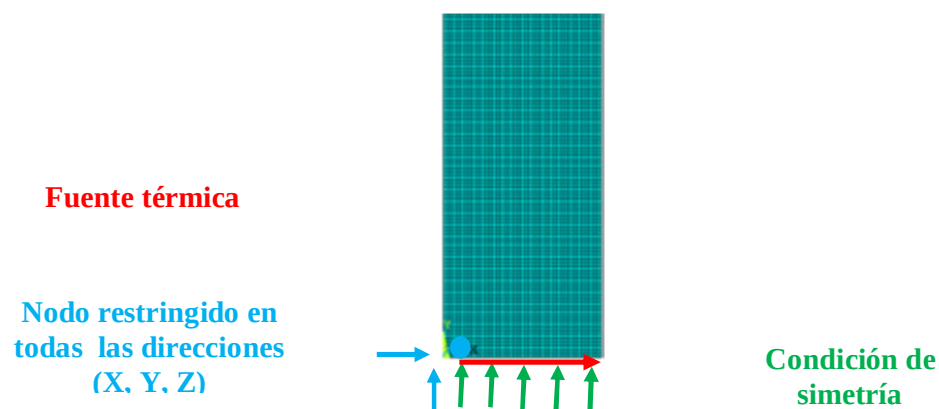


Figura IV.9.- Condiciones de frontera aplicados al proceso TIG y MIG en 3D

En la Figura IV.10, se muestra las condiciones de frontera en *Ansys*.

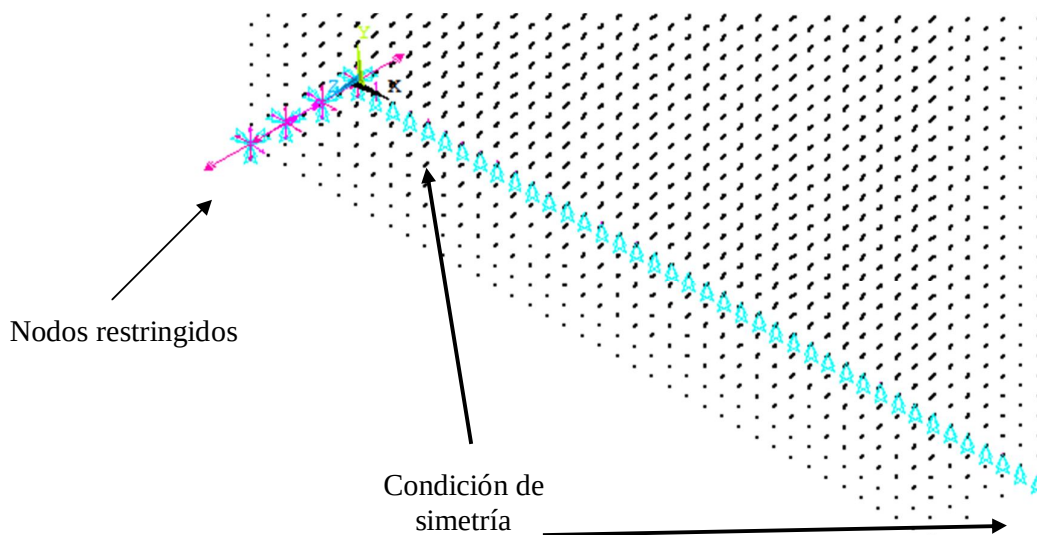


Figura IV.10.- Condiciones de frontera

Para el proceso de soldadura por rayo Láser se contempla la misma condición de frontera, solo que en este proceso no existe material de aporte, por lo cual al material se le aplica una presión que no debe causar deformaciones plásticas en el material. La Figura IV.11 muestra la zona en la cual se aplica la presión, en la parte superior del espécimen.

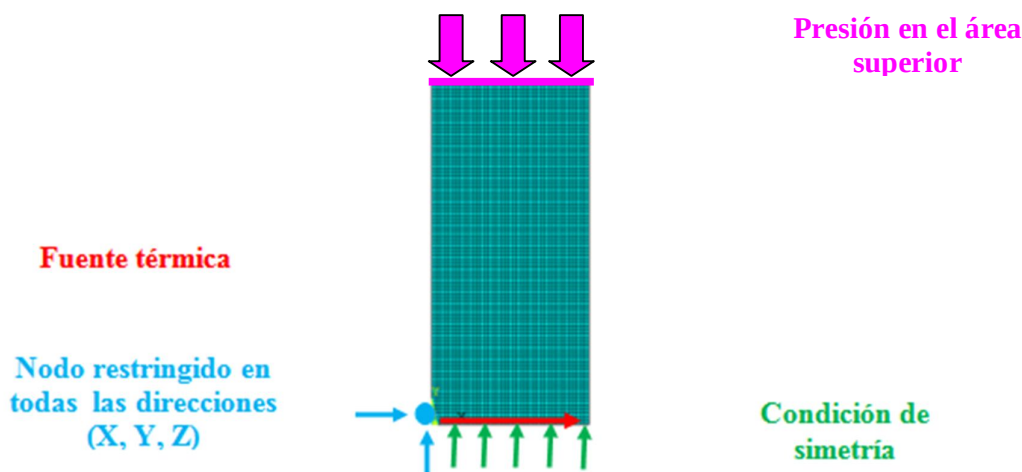


Figura IV.11.- Aplicación de presión en el proceso de soldadura Láser

La presión aplicada en el proceso de soldadura es de 50 Newton, ya que solo se requiere una presión en la cual ambos materiales estén en contacto. A continuación se muestran las Figuras IV.12y IV.13, en las cuales el análisis estático se encuentra en el primer paso de carga, mostrando en la primera los esfuerzos transversales y en la segunda los esfuerzos longitudinales.

NODAL SOLUTION

STEP=1
SUB =1
TIME=1
SY (AVG)
RSYS=0
DMX =.624E-03
SMN =-.389E+09
SMX =.296E+09

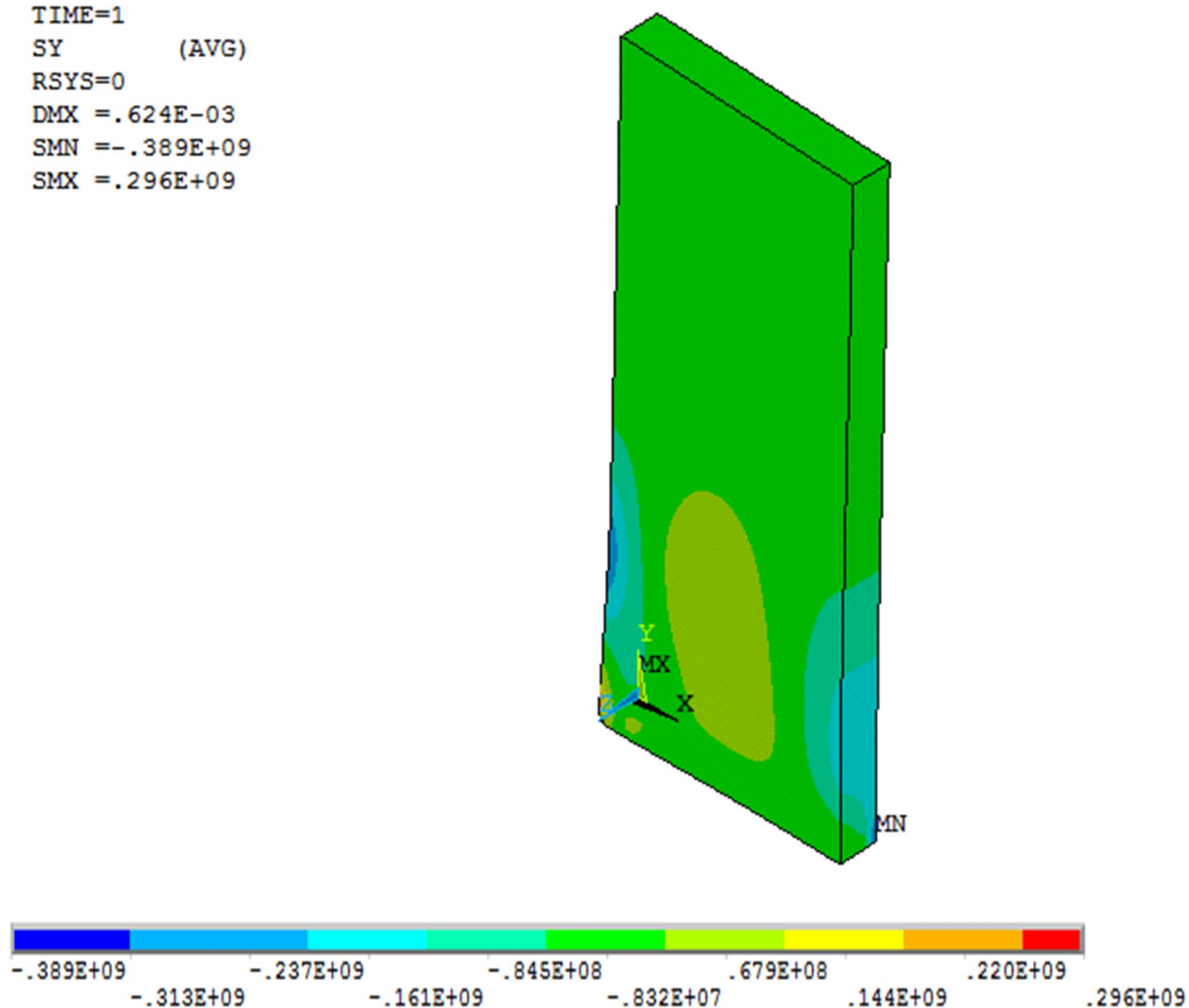


Figura IV.12.- Campo de tensiones transversales, para el primer pasó de carga en proceso

TIG

NODAL SOLUTION

STEP=1
SUB =1
TIME=1
SX (AVG)
RSYS=0
DMX =.624E-03
SMN =-.209E+09
SMX =.299E+09

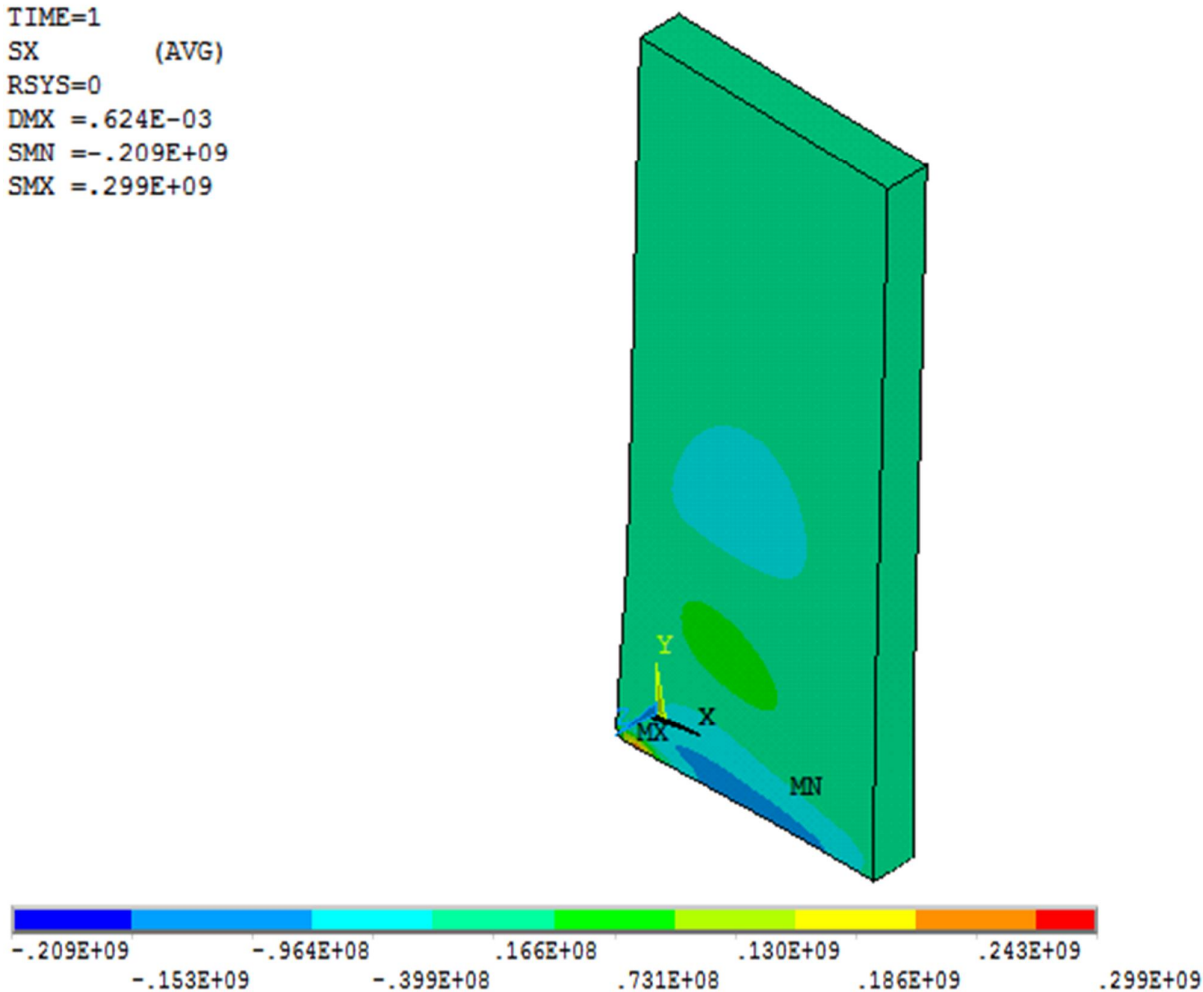


Figura IV.13.- Campo de esfuerzos longitudinales, para el primer pasó de carga en TIG

A continuación se muestra el paso numero10 de carga, cuando esta se encuentra por finalizar la inducción térmica, para el proceso TIG.

NODAL SOLUTION

STEP=10
SUB =1
TIME=10
SY (AVG)
RSYS=0
DMX =.501E-03
SMN =-.110E+09
SMX =.390E+09

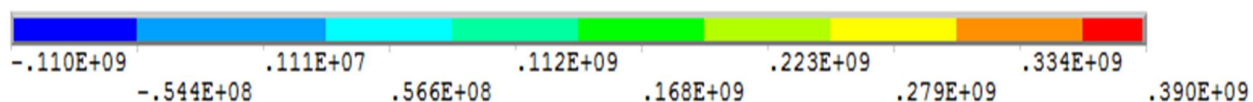
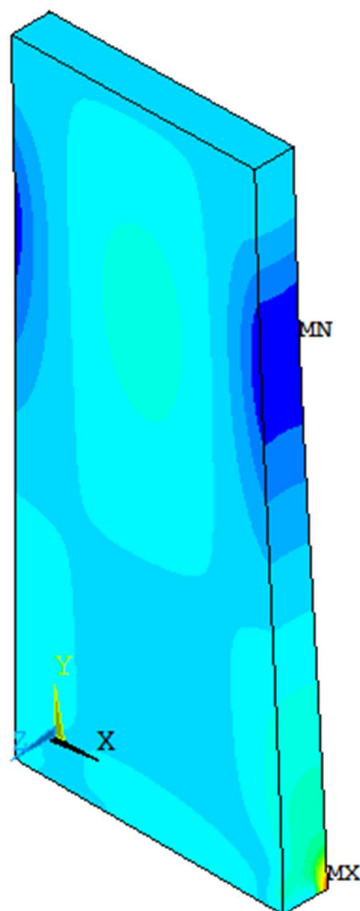


Figura IV.14.- Campo de esfuerzos transversales, para el pasó de carga número 10 en TIG

NODAL SOLUTION

STEP=10
SUB =1
TIME=10
SX (AVG)
RSYS=0
DMX =.501E-03
SMN =-.685E+08
SMX =.120E+09

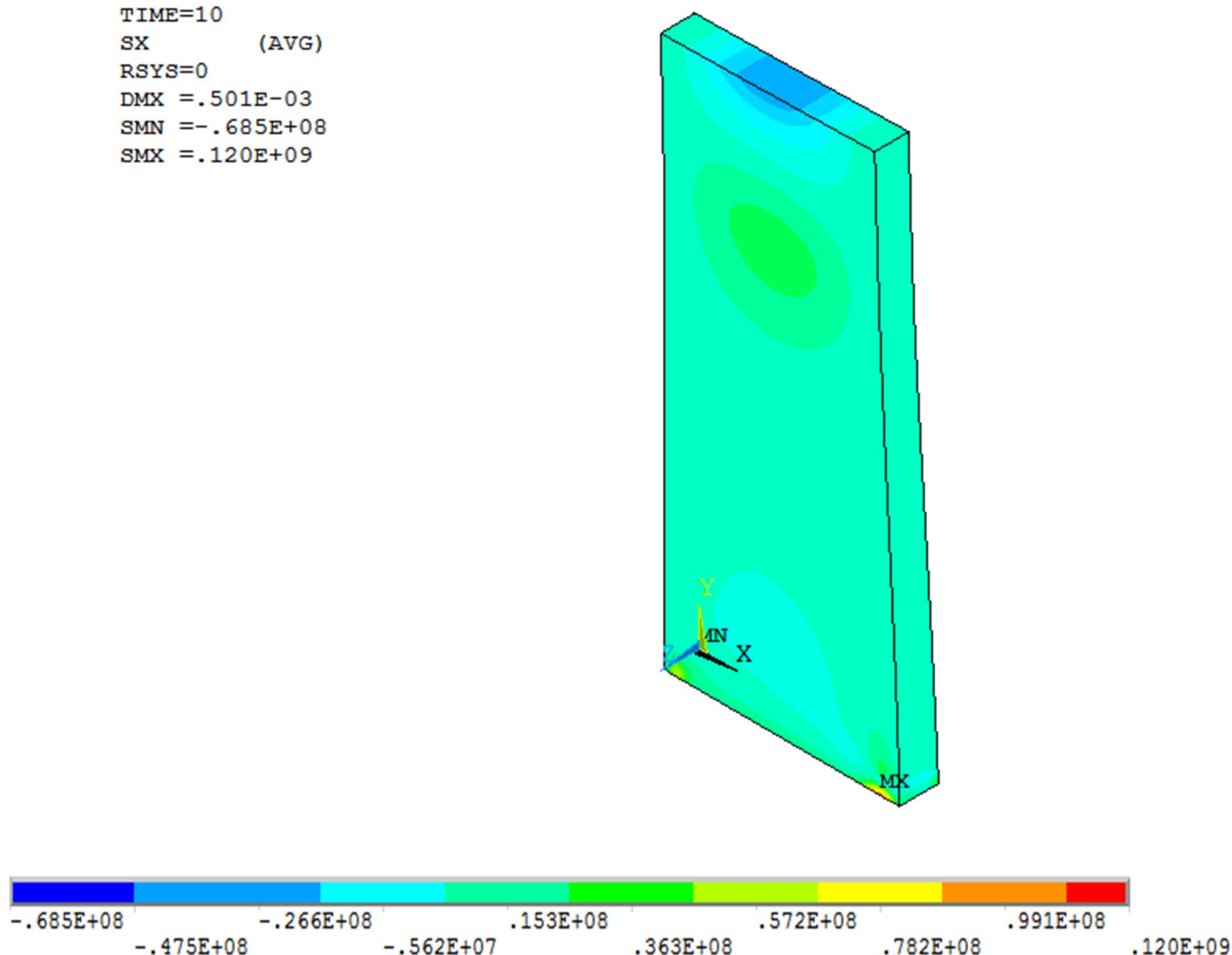
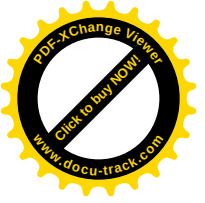


Figura IV.15.- Campo de esfuerzos longitudinales para el pasó de carga número 10 en TIG

IV.3.- Elemento Plane 42 para el análisis estructural TIG, MIG y rayo Láser en 2D

Comúnmente se utiliza para el modelado en 2D de estructuras sólidas. El elemento puede ser utilizado como un elemento plano (esfuerzo plano o deformación plana) o como un elemento de simetría axial. El elemento es definido por cuatro nodos con dos grados de libertad en cada nodo (direcciones x e y). El elemento tiene plasticidad, fluencia, rigidez, esfuerzo, y gran capacidad de deformación. La opción de esfuerzo plano solamente se puede resolver cuando las propiedades del material son del tipo ortotrópico [IV.3].



IV.3.1.- Inducción de propiedades mecánicas y térmicas al análisis estático en el proceso TIG, MIG y rayo Láser 2D

La inducción de propiedades mecánicas y termodependientes en el análisis 2D, se realiza de la misma forma que en el análisis 3D. Después de seleccionar el elemento con las propiedades ideales se procede a ingresar las propiedades termodependientes ya que estas determinan el comportamiento del material ante la inducción de temperatura tales como son:

- Densidad
- Coeficiente de expansión térmica
- Módulo de elasticidad
- Límite de fluencia
- Coeficiente de Poisson a temperatura ambiente

IV.3.2.- Inducción de cargas térmicas al análisis estático en el proceso TIG, MIG y rayo Láser 2D

Después de introducir las propiedades termodependientes a *Ansys* se procede a inducir las cargas térmicas obtenidas del análisis térmico 2-D de cada proceso, esto mediante el archivo *rth*, en el cual *Ansys* almacena resultados. Esto se realiza de la siguiente manera:

Solution> Define Loads>Apply>Structural>Temperature>FromThermAnaly.

Al igual que en el análisis estático en 3D, se consideran los primeros 10 pasos en los cuales la fuente térmica se encuentra activa, en la probeta y después se crean otros 10 pasos con la finalidad de obtener el valor de los esfuerzos, cuando la temperatura empieza a disminuir por el efecto de la convección.

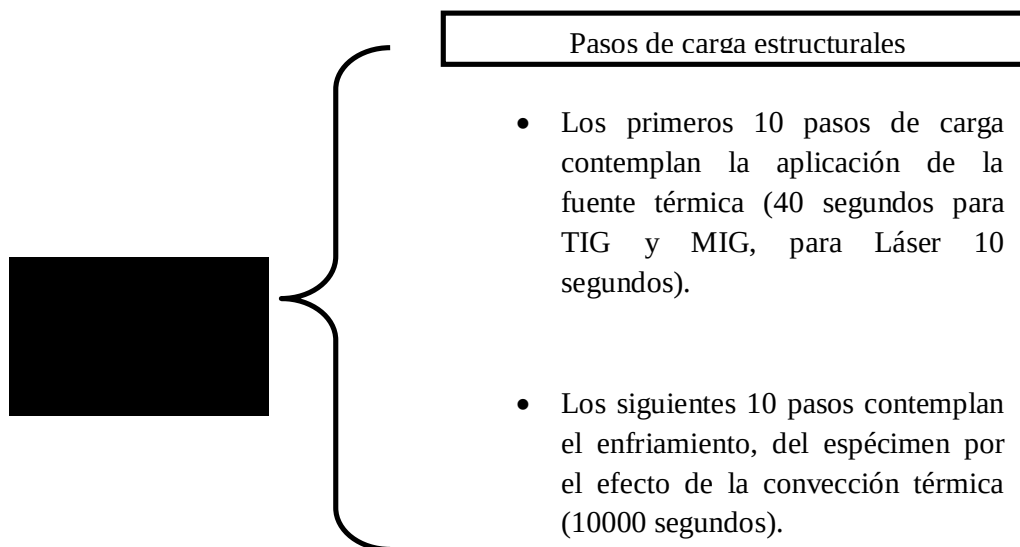


Figura IV.16.- Pasos de carga para el análisis estructural

El tiempo es de 10000 segundos ya que en el análisis térmico el tiempo de enfriamiento es mayor, comparado contra el análisis en 3D.

IV.3.3.- Condición de frontera en el análisis 2D

Se retoman las condiciones explicadas en los análisis 3D, se restringe un nodo y la diferencia es que la simetría se dará justo en la línea inferior de la probeta, esto para los análisis TIG y MIG.

La Figura IV.17 muestra la colocación de las condiciones de frontera especificadas anteriormente, en un análisis TIG y MIG, ya que en rayo láser existe una pequeña variante.

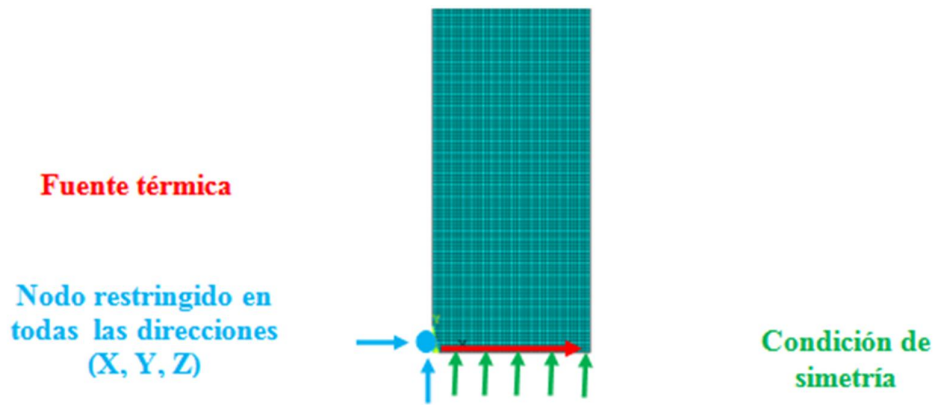


Figura IV.17.- Condiciones de frontera en análisis TIG y MIG 2D

A continuación se muestra las condiciones de frontera aplicados al análisis estructural del proceso de soldadura por rayo Láser de gas 2-D.

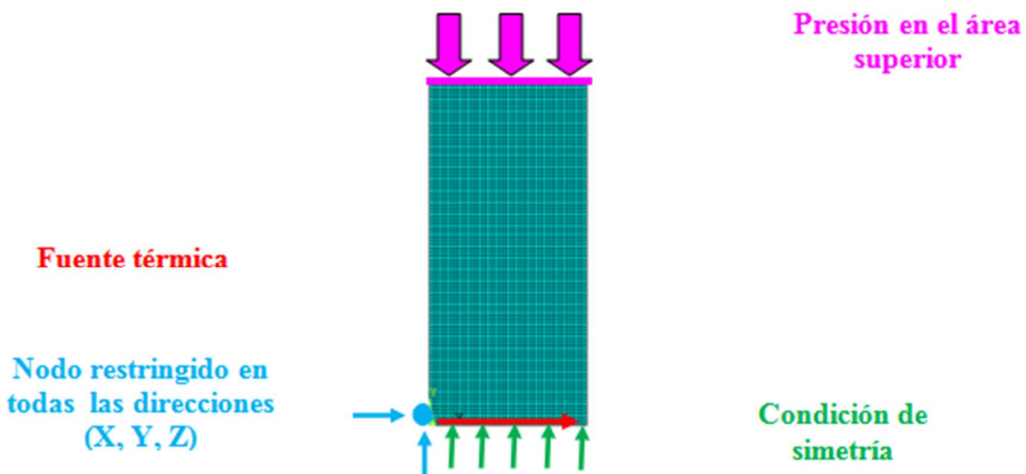


Figura IV.18.- Condiciones de frontera en análisis estructural en soldadura Láser 2D

Después de inducir los pasos de carga se procede a resolver los diversos análisis (TIG, MIG y rayo Láser), obteniendo los esfuerzos por cada paso de tiempo.

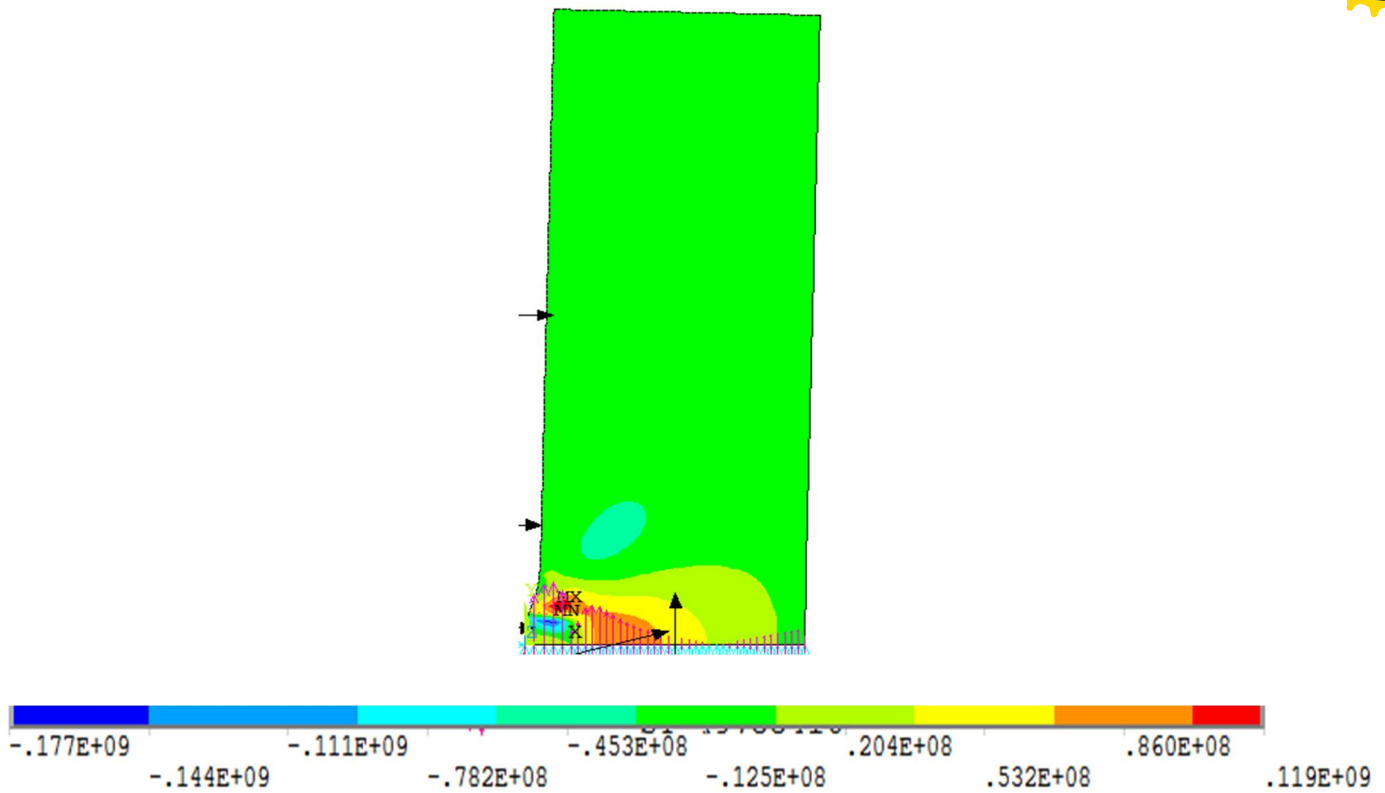


Figura IV.19.- Primer paso de carga en proceso de soldadura TIG 2D (Longitudinal)

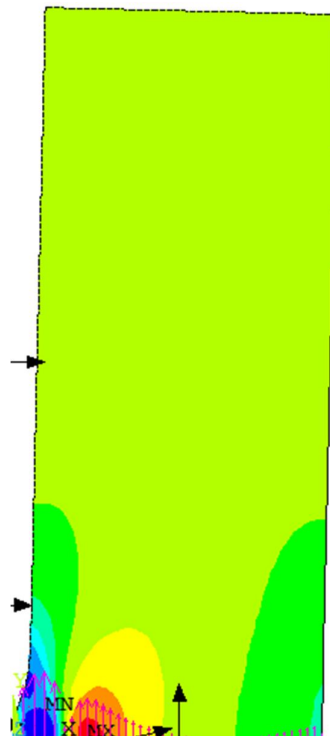
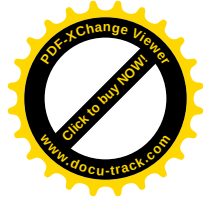
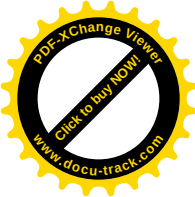


Figura IV.20.- Primer paso de carga en proceso de soldadura TIG 2D (Transversal)

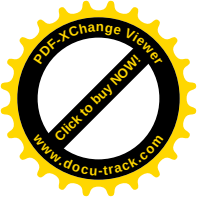


IV.4.- Sumario

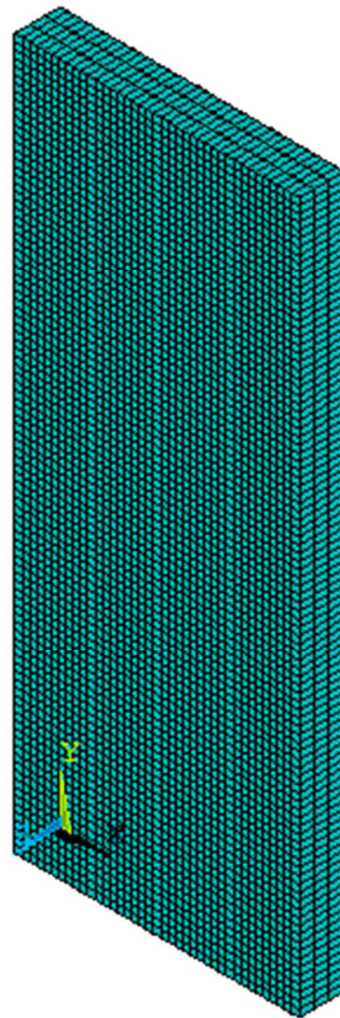
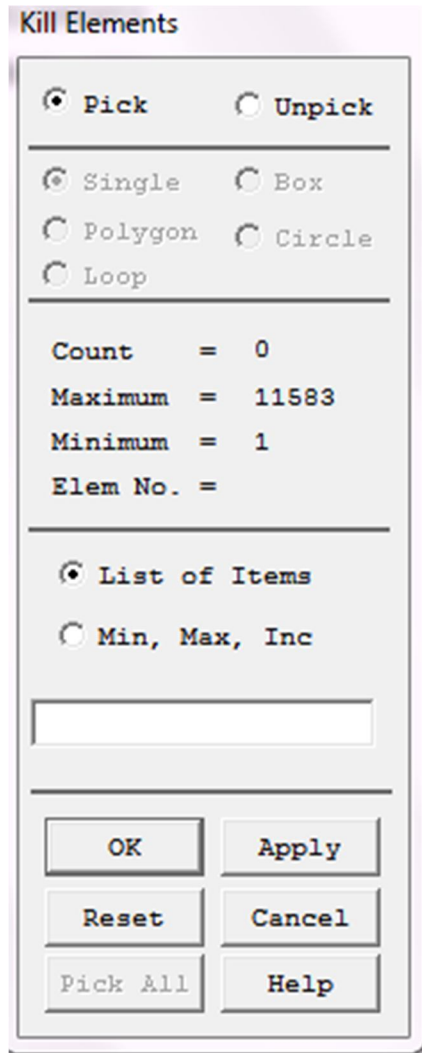
En este capítulo se describió el procedimiento para realizar un análisis acoplado, considerando un análisis térmico, del cual se retomaran los resultados obtenidos en función del tiempo y estos se aplicaran como una carga térmica simulando la generación de esfuerzos en el Acero inoxidable 316L, a causa de las elevadas temperaturas derivadas del proceso de soldadura TIG, MIG y Rayo Láser. Los resultados obtenidos de este análisis acoplado se discutirán en la sección de conclusiones, pues se tendrá que comparar que procesos causa menor esfuerzo residual en el proceso de soldadura y que modelo cuenta con mayor eficacia en la simulación, es decir si el 3-D o el 2-D se aproxima más a los resultados obtenidos del análisis experimental aplicando el método del CCM. En el siguiente capítulo se simulara el método del CCM en los análisis resueltos en este capítulo.

IV.5.-Referencias

- 1.-*Product Data Bulletin, 316 / 316L Stainless Steel*, AK Steel, 2010.
- 2.-Pozo-Morejón, J., García-Jacomino, J., Ramos-Morales, F., García-Rodríguez, Y., Cruz-Crespo, A., Díaz-Cedre, E. y Duffus-Scott, A., Metodología de modelación mediante ansys dela historia térmica, tensiones y deformaciones de soldadura, *Revista de la facultad de Ingeniería Universidad central de Venezuela*, Vol. 4, Numero 2, Caracas, 2009.
- 3.- *Ansys 12® tutotial element Plane 55*.

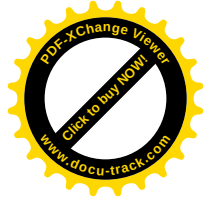
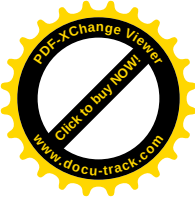


Capítulo V



Análisis estructural CCM

TIG, MIG y Láser



V.1.- Generalidades

En este capítulo se desarrolla la evaluación del método de respuesta de grieta por medio del MEF. El CCM es una prueba de tipo destructiva que tiene el fin de evaluar los esfuerzos residuales inducidos por el proceso de manufactura o la operación del sistema. El Capítulo II explica las bases teóricas del método, las cuales se fundamentan en el reacomodo de los esfuerzos residuales como consecuencia de la inducción de un corte controlado al material, por medio de electroerosión la cual induce pequeños esfuerzos residuales. En el procedimiento experimental se utilizan las galgas extensométricas las cuales se colocan en el material, con el objetivo de censar las microdeformaciones causadas por la inducción del corte, estos datos se pueden obtener al conectar las galgas al puente de *Wheatstone*. El objetivo principal en este capítulo consiste en simular el procedimiento mencionado anteriormente por medio de elemento finito obteniendo las microdeformaciones al inducir un corte utilizando el comando *Kill and Death* en los nodos seleccionados.

V.2.-Aplicación del método de respuesta de grieta en análisis estructural de los procesos de soldadura TIG, MIG y rayo Láser en 2D

Después de realizar el análisis acoplado en el cual se divide en dos secciones, la primera contempla la inducción de la fuente térmica simulando el proceso de soldadura. Así como el enfriamiento de la probeta al interactuar con el medio ambiente, al efectuarse la convección térmica.

La segunda fase consiste en realizar un análisis estático, en el cual se toman los resultados obtenidos del análisis térmico y estos se inducen al análisis estático considerando el tiempo del paso de carga. Después de tener los resultados se procede a realizar el método de respuesta de grieta, en la realidad el proceso sigue esta lógica, es decir el material se suelda y después este se enfriara al interactuar con el medio ambiente. Este análisis se realiza en el último paso de carga del análisis estructural ya que en este paso la probeta se encuentra a temperatura ambiente.

V.2.1.- Casos de estudio.

Para los tres procesos de soldadura (TIG, MIG y rayo Láser), se plantean tres casos de estudio en los cuales se inducirá un corte a 3mm, 5mm y 7mm. Después del cordón de soldadura (Figura V.1). Lo recomendable en este análisis es copiar el archivo completo del análisis

estructural y pegarlo en una nueva carpeta, en la cual se realice el método de respuesta de grieta.

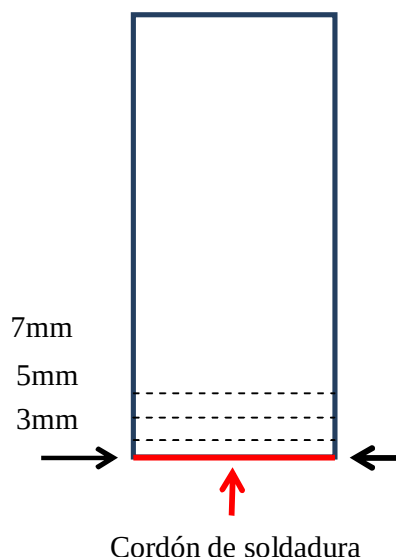


Figura V.1.- Casos de estudio para el método de respuesta de grieta en los análisis 2D

V.2.2.- Aplicación de método CCM en los análisis 2D (TIG, MIG y Rayo Láser)

Después de tener los resultados del análisis estructural se procede a realizar el método de respuesta de grieta, en el cual se utiliza el comando *Kill and Death*, es muy importante establecer que el método de respuesta de grieta debe desarrollarse solo en el preprocesador, de lo contrario los resultados serán erróneos.

Para no tener dificultad se debe de tener en cuenta que todo el proceso se desarrollara sin salir de la sección de **Solution**. Después de abrir la nueva carpeta en la cual se encuentra la copia del análisis estructural, se debe de identificar la sección en la cual se realizara la simulación del corte utilizando el comando *Kill* (Figura V.2), con el cual se eliminan elementos de manera controlada, permitiendo realizar con precisión el método de respuesta de grieta. En el análisis de 2-D se facilita el procedimiento ya que solo se debe seleccionar un elemento para ser eliminado, es importante resaltar que no se deben de ingresar más datos al programa de elemento finito.

- Preprocessor > Solution > Load Step Opts > Other > Birth and Death > Kill Elements

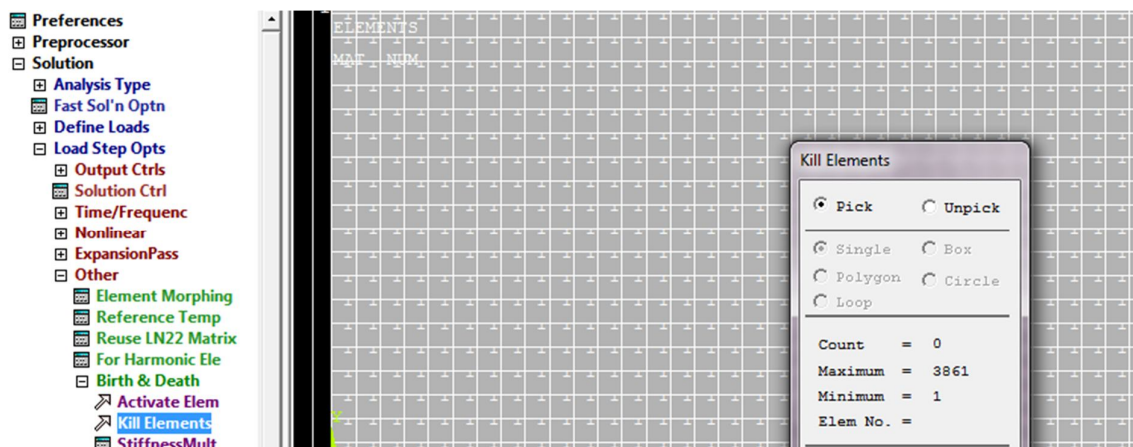


Figura V.2.- Comandos para la simulación del corte

El corte se realizara en dirección del cordón de soldadura, se debe recordar que el mallado se realizó de tal manera que este equivalga a un milímetro en cada elemento. Esto con el objetivo de simular el procedimiento experimental en *Ansys*. La Figura V.3 muestra la dirección del corte.

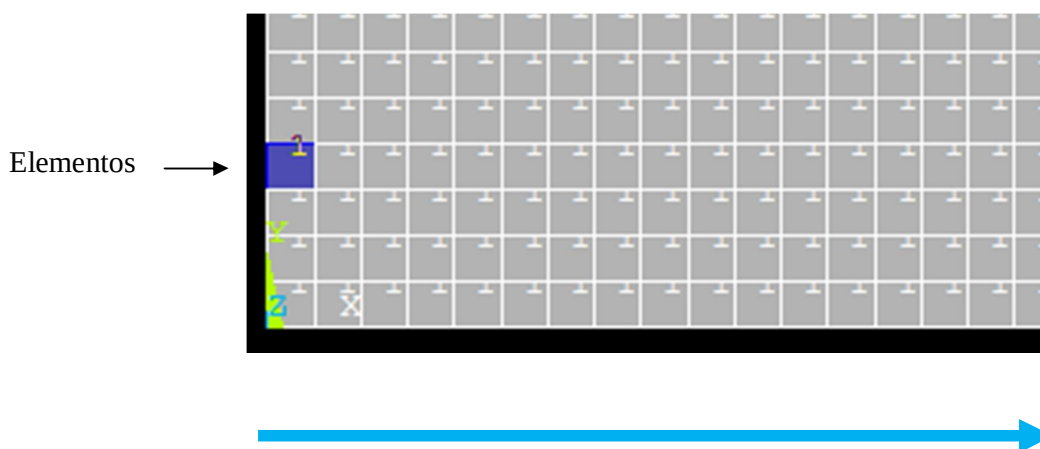
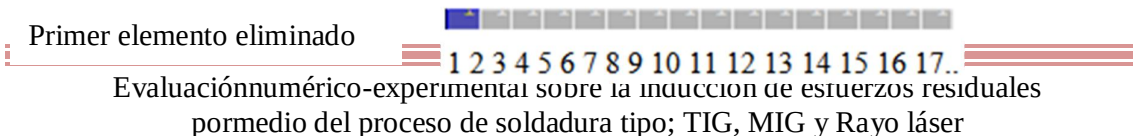


Figura V.3.- Dirección del corte

Se deben realizar 38 cortes en los cuales se realizan al seleccionar el comando *Kill*, después de seleccionar el elemento, se debe de solucionar sin salir de la sección del menú **Solution**. Después de solucionar ese paso se procede a eliminar el próximo elemento en la misma dirección, la probeta cuenta con 39 elementos de los cuales se deben de cortar 38, de manera progresiva (Figura V.4).



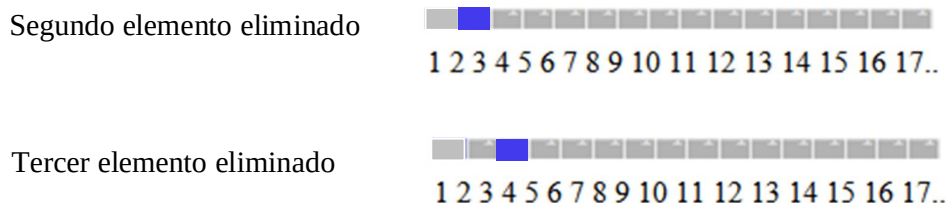


Figura V.4.- Procedimiento de corte

Después de realizar los 38 cortes, se debe de seleccionar un nodo el cual este lo más cercano posible del corte en la sección contraria del corte, la Figura V.5 muestra la selección del nodo, esto con la finalidad de obtener los resultados de la microdeformacion registrada a causa de la eliminación de elementos. En un análisis experimental esta función se realiza al utilizar una galga extensométrica la cual censa las microdeformaciones que ocurren en el material como consecuencia del corte por electroerosión, estos datos se pueden interpretar al utilizar el puente de *Wheatstone*.

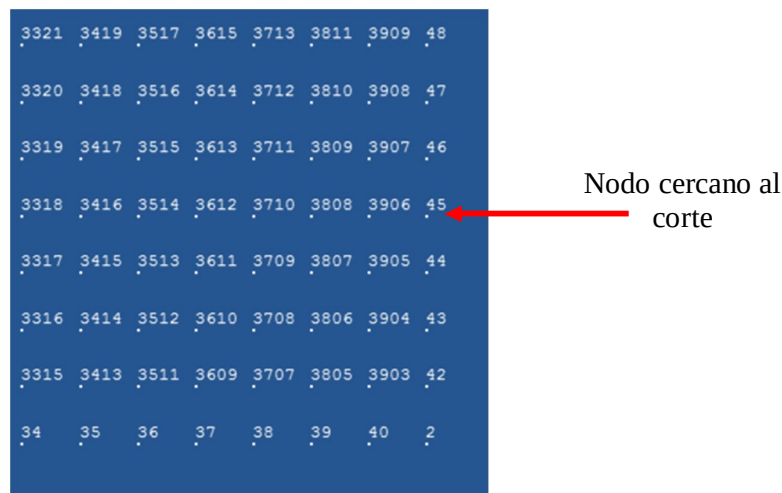


Figura V.5.- Nodo 45 seleccionado para la medición de microdeformaciones

Los resultados de las microdeformaciones deben de ser elásticas y no plásticas en la sección de Nodal Solution y estas deben de ser las registradas en el eje X, como lo muestra la Figura V.6.

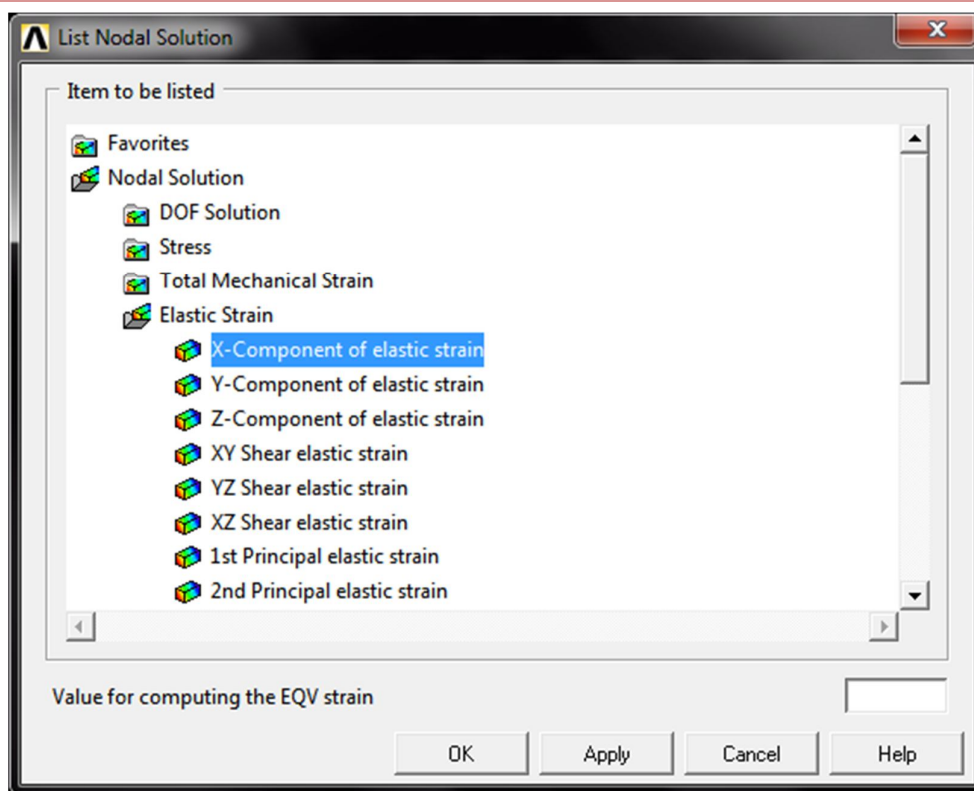
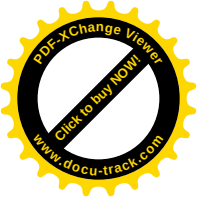


Figura V.6.- Lista de resultados por nodos en Ansys

Después de obtener los resultados en el nodo que realizará la función de galga extensométrica. Los datos obtenidos se introducirán a un programa Compac Visual FORTRAN, usando el LU Decompositor and Backsubstitution (LUBKSB). Este programa de cómputo se utilizara como una caja negra en la cual se ingresan los datos de las microdeformaciones y se obtienen resultados en función de la medida del corte.

Se debe de mencionar que el método experimental es del tipo indirecto ya que el campo de esfuerzos residuales no se puede obtener de forma directa, por lo cual es necesario resolver las microdeformaciones en FORTRAN, permitiendo obtener el campo de esfuerzos residuales de manera gráfica.

Esta metodología se debe de aplicar de la misma manera en todos los procesos de soldadura realizados en 2-D, ya que en los análisis en 3-D se deben considerar ciertas variantes. A continuación se muestra un ejemplo de las microdeformaciones (Tabla V.1), obtenidas al



realizar el corte a 3 mm del cordón de soldadura en el nodo 45 el cual realizara la función de la galga extensométrica, en el proceso de soldadura TIG 2-D.

Tabla V.1.- Resultados de las microdeformaciones en el proceso TIG 2D

Corte	ϵ
1	-0.89740E-07
2	-0.87401E-07
3	-0.84490E-07
4	-0.81219E-07
5	-0.77685E-07
6	-0.73965E-07
7	-0.70119E-07
8	-0.66194E-07
9	-0.62226E-07
10	-0.58245E-07
11	-0.54279E-07
12	-0.50350E-07
13	-0.46479E-07
14	-0.42684E-07
15	-0.38985E-07
16	-0.35396E-07
17	-0.31934E-07
18	-0.28612E-07
19	-0.25444E-07
20	-0.22443E-07
21	-0.16981E-07
22	-0.16980E-07
23	-0.14536E-07
24	-0.12289E-07
25	-0.12288E-07
26	-0.12221E-07
27	-0.12351E-07
28	-0.12589E-07
29	-0.12838E-07
30	-0.12996E-07
31	-0.12986E-07

32	-0.12986E-07
33	-0.12786E-07
34	-0.12899E-07
35	-0.13246E-07
36	-0.14081E-07
37	-0.17249E-07
38	-0.34719E-07

V.3.-Aplicación del método de respuesta de grieta en análisis estructural de los procesos de soldadura TIG, MIG y rayo Láser en 3D

Básicamente el procedimiento para realizar el método de respuesta de grieta en 3D es muy similar al 2D. Solo se deben contemplar dos diferencias, las cuales son la selección del nodo que realizara la función de la galga y el procedimiento del corte.

V.3.1.- Casos de estudio

Con el objetivo de realizar comparaciones en los resultados obtenidos en los análisis 2D y 3D, bajo las mismas condiciones al simular los procesos de soldadura TIG, MIG y rayo Láser, se consideran los mismos casos de estudio para los análisis en 2-D, se plantean tres casos de estudio en los cuales se inducirá un corte a 3mm, 5mm y 7mm. Después del cordón de soldadura.

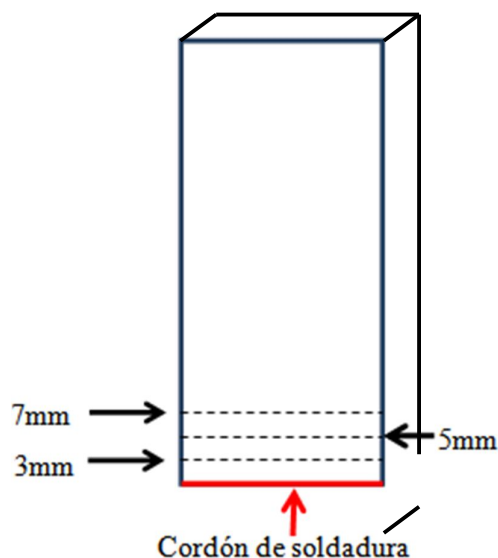


Figura V.5.- Casos de estudio para el método de respuesta de grieta en los análisis 3D

V.3.2.- Inducción del corte en los análisis 3D

La simulación del corte se realiza seleccionando el comando *Kill and Deaht* (Figura V.6), sin salir del preprocesador se debe de inducir el corte y solucionarse por cada elemento seleccionado. Se debe de establecer que a diferencia de los análisis 2-D se debe de seleccionar tres veces el elemento a eliminar, pues se trata de un modelo en tercera dimensión.

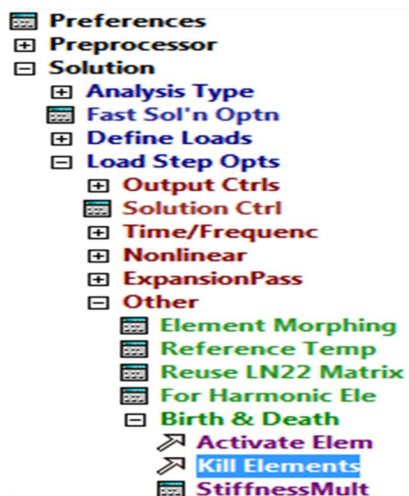


Figura V.6.- Comando utilizado en la eliminación de elementos

V.3.3.- Selección del nodo en análisis 3D

Con el objetivo de realizar una simulación numérica aproximada a la realidad se debe de considerar la selección del nodo como si se tratara de la colocación de la galga extensométrica colocada en un espécimen real (Figura V.7), y de esta manera se puede obtener las microdeformaciones como consecuencia de la eliminación de elementos en *Ansys*.



Figura V.7.- Probeta utilizada en el análisis experimental TIG

Considerando lo mencionado anteriormente se debe de seleccionar el nodo en costado contrario en el cual se simula el corte al eliminar elementos, la Figura V.8 muestra al espécimen modelado y mallado en *Ansys 3D*, en la vista isométrica lateral, en la cual se selecciona el nodo.

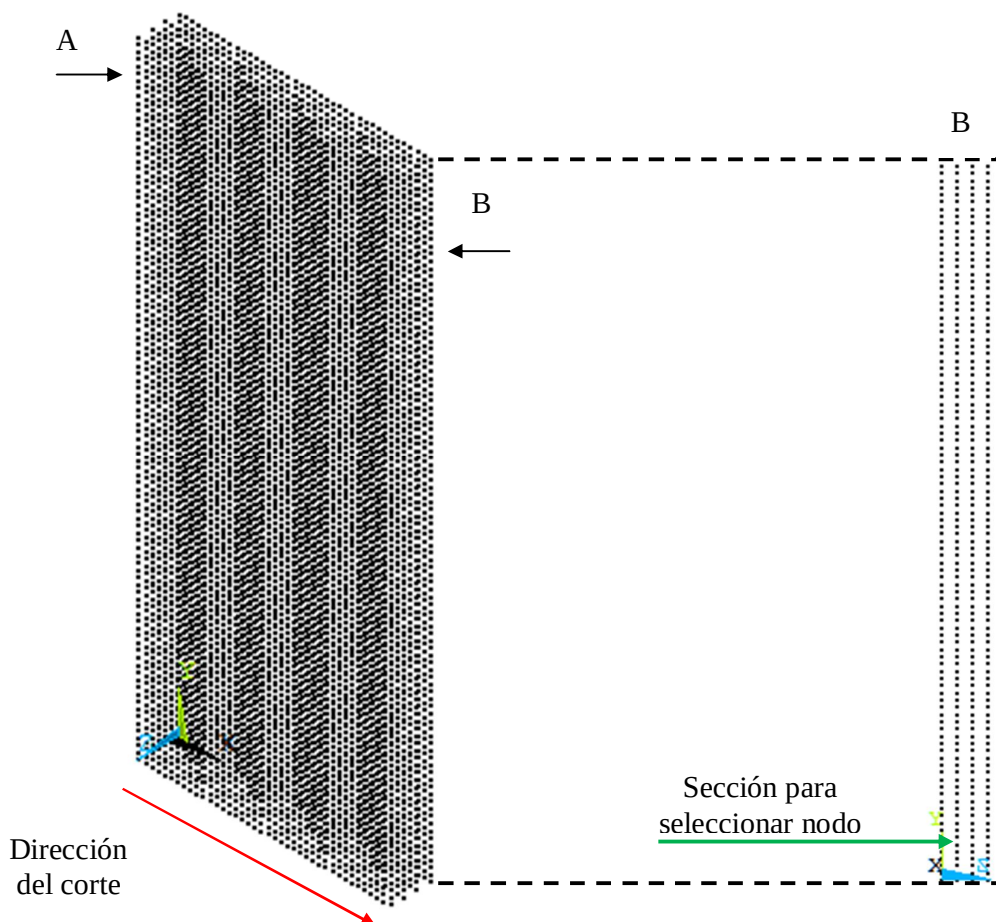
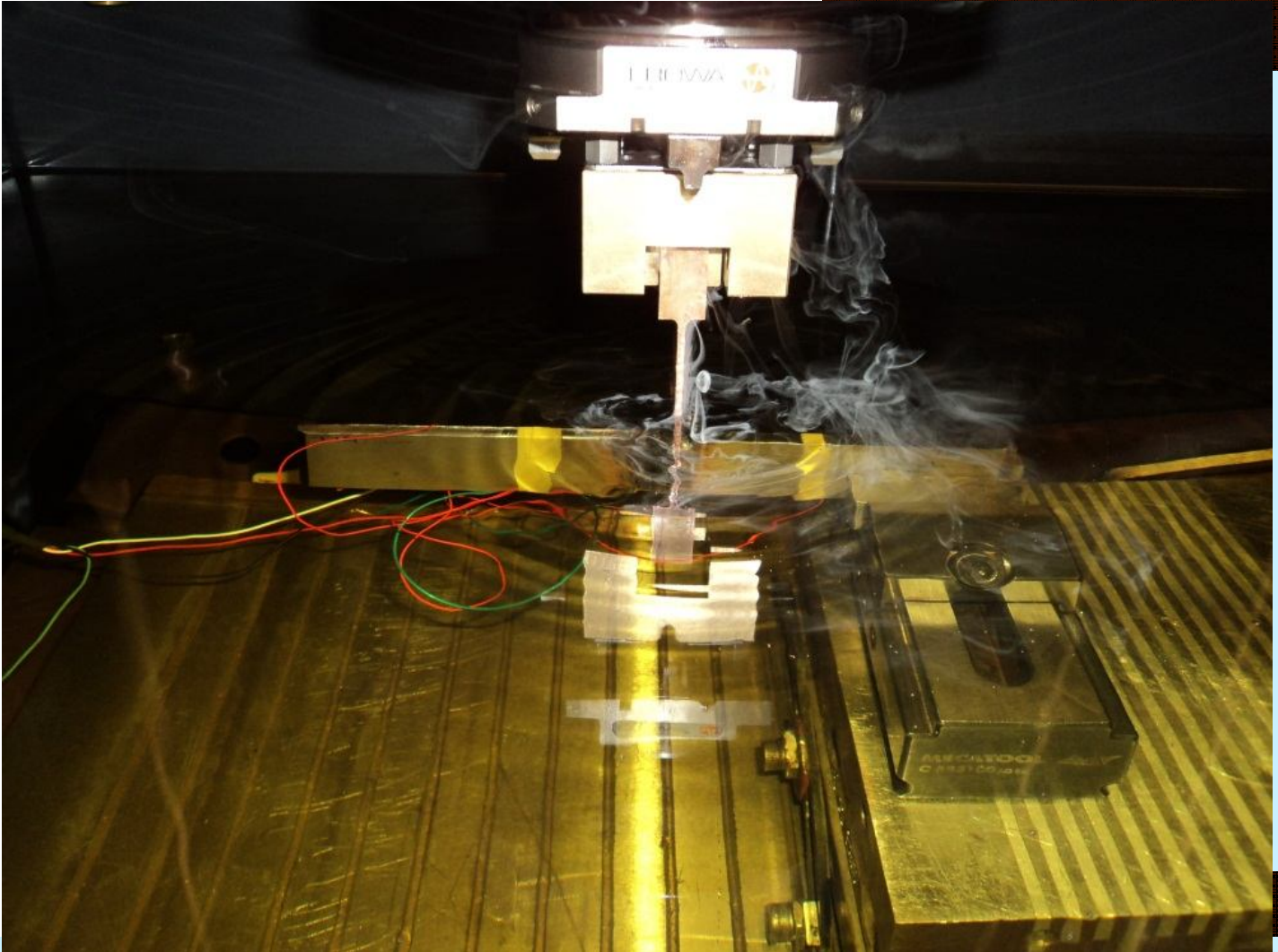


Figura V.8.- Probeta utilizada en el análisis numérico TIG

V.4.- Sumario

El trabajo de investigación contempla realizar el método de respuesta de grieta en *Ansys*, por lo cual en este capítulo se describe el procedimiento para su desarrollo. Este método es experimental del tipo destructivo, el cual se describirá a detalle en el siguiente capítulo contemplando probetas libres de esfuerzos residuales a causa del proceso de manufactura de las mismas.

Capítulo VI



Método experimental

CCM TIG y MIG

VI.1.- Generalidades

La inducción del campo de esfuerzos residuales en procesos de soldadura, ocurre justamente en la zona afectada térmicamente por la alta temperatura derivada del proceso, este fenómeno se debe a un crecimiento del grano micro cristalino de forma descontrolada al inducirse altas temperaturas, teniendo como consecuencia deformaciones en el material del tipo elastoplásticos cuando el material alcanza un equilibrio térmico. En el área de manufactura, los procesos de soldadura empleados comúnmente son TIG (*Tungsten Inert Gas*), y MIG (*Metal Inert Gas*). El objetivo de esta investigación es aplicar el método destructivo CCM, (*Crack Compliance Method*) permitiendo evaluar el campo de esfuerzos residuales de forma indirecta en función de las microrelajaciones, que se registran a través de las galgas extensiométricas al inducir un corte controlado por electroerosión.

VI.2.- Diseño de la probeta para TIG y MIG

Se seleccionó una probeta de acero inoxidable, con las siguientes dimensiones:

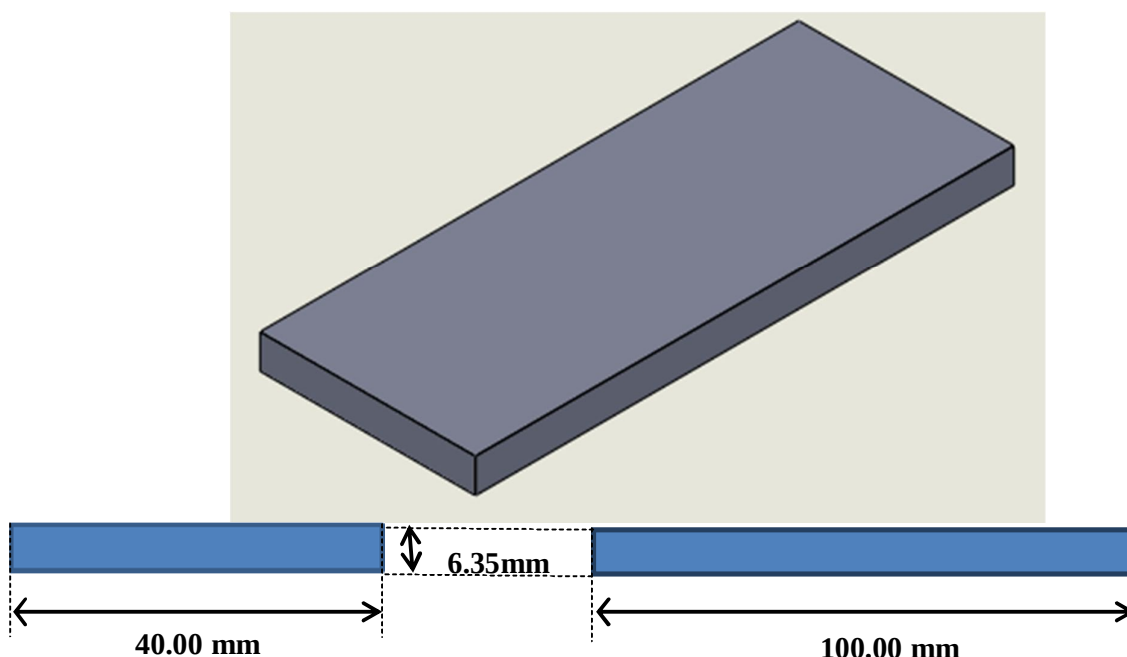


Figura VI.1.- Medidas de la probeta en isométrico

Las medidas del espécimen se seleccionaron tomando en consideración factores de uso común, por ejemplo el espesor del espécimen es utilizado comúnmente en el sector alimenticio y médico. El largo y ancho se plantea a partir de la necesidad de poder evaluar la magnitud de esfuerzos residuales en probetas no simétricas, ya que diversas investigaciones

en elemento finito evalúan especímenes en los cuales el cordón de soldadura se aplica en la sección más larga de la probeta.

VI.3.- Casos de estudio

Se tiene 3 casos de estudio ya que se analizara por el método del CCM los esfuerzos residuales en el cordón de soldadura, 7 mm de distancia a partir de la unión, y 14 mm, con una repetitividad de 4 en cada caso de estudio como se muestra en la Figura VI.2.

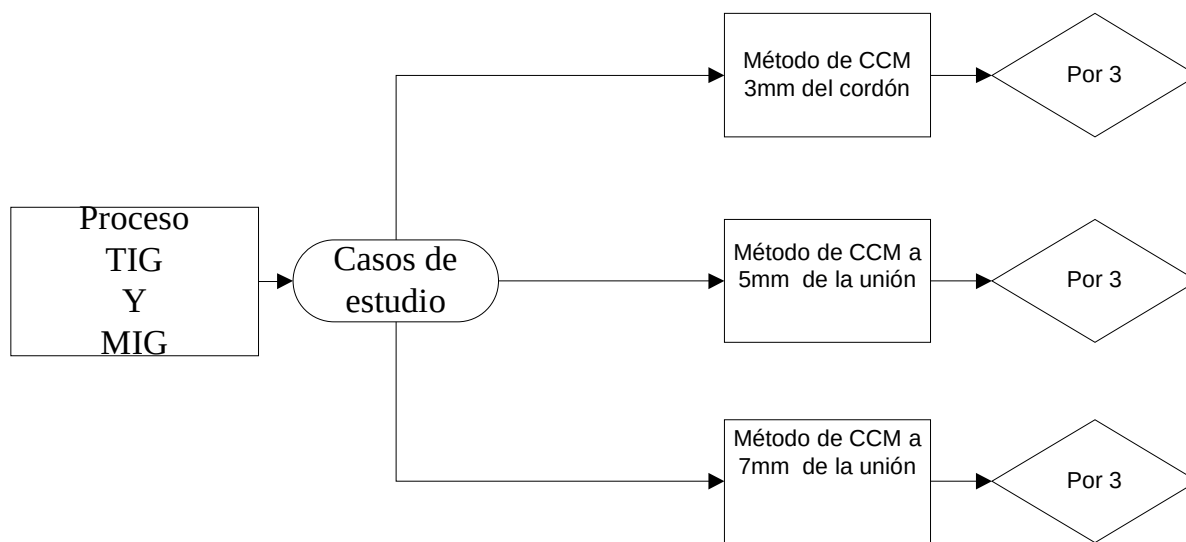


Figura VI.2.- Especímenes por cada caso de estudio

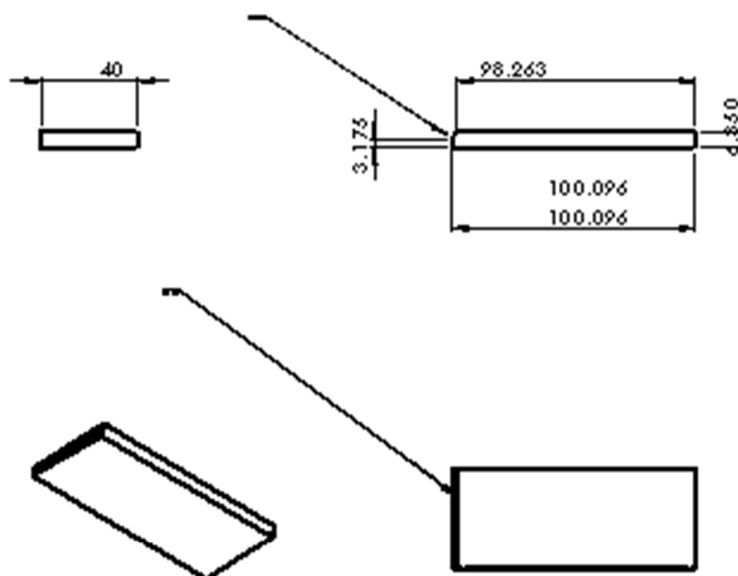
Tabla VI.1.- Número de probetas por cada caso de estudio

Proceso	No. Probetas	No. Pruebas	No. Galgas
TIG	4	3	12
MIG	4	3	12
Láser	4	3	12
TOTAL	12	9	36 + 10% = 40

Es de esta forma es como se determina el total de probetas y galgas que se utilizaran en análisis experimental *CCM* con la finalidad de medir las relajaciones. Se suma un 10 % más suponiendo que alguna galga no funcione adecuadamente.

IV.4.-Maquinado de las probetas

Las probetas se deben maquinar bajo las condiciones especificadas a continuación:



PROBETAS TIG	12
PROBETAS MIG	12

Figura VI.3.- Especificaciones de probetas de acero inoxidable 316L

La Figura VI.4 muestra las probetas utilizadas en el análisis experimental al final del proceso de manufactura.



Figura VI.4.- Probetas

VI.5.- Relevado de esfuerzos en probetas

Consiste en aplicar un recocido al material con el propósito de eliminar las tensiones residuales, que hayan sido producidas por procesos de moldeo, hechurado y mecanizado. Y mejora en consecuencia, la resistencia a la corrosión bajo tenciones. Básicamente consiste en calentar el material a una temperatura inferior a 650°C durante un tiempo de media y posterior mente enfriarlo de forma lenta, en aire. Para este caso el recocido se desarrolló en un

horno sellado al vacío, con la finalidad de evitar el cubrir las probetas con lámina y así evitar la presencia de cascarillas. Este proceso se realizo en un horno al vacío marca *MAHLER*, la Figura VI.5 muestra el horno empleado.



Figura VI.5.- Horno utilizado en el proceso de recocido

Después de aplicar el relevado de esfuerzos en las probetas de acero inoxidable, estas se pueden considerar lista para ser sometidas al proceso de soldadura TIG y MIG, con el objetivo de evaluar los esfuerzos residuales causados por ambos procesos de soldadura.

VI.6.-Proceso de soldadura en probetas TIG

Después 12 probetas se someten al proceso de soldadura TIG, a un tiempo de 40 segundos como máximo para realizar el cordón de soldadura en el chaflán o socavado, a un voltaje de 15 Volts, con una Corriente de 110 Amperes, el electrodo debe de aplicarse entre un ángulo de 45 a 55 °.

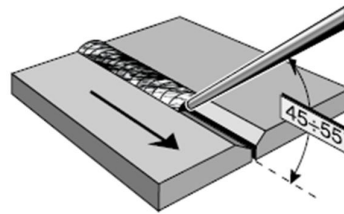
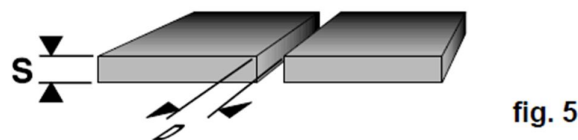


Figura VI.6.- Angulo de aplicación para el proceso TIG

Se recomienda considerar una distancia de 1 mm a 1.5 mm entre las placas a soldar, como se muestra la figura VI.7.

DISTANCIA (D) EN mm ENTRE LOS BORDES POR UNIR



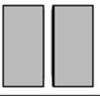
S mm	2 ÷ 3	3 ÷ 4	4 ÷ 5
 plano	1 ÷ 1.5	1.5 ÷ 2.5	2 ÷ 3
 vertical	1 ÷ 1.5	1.5 ÷ 2	2 ÷ 2.5
 frontal	1 ÷ 1.5	1.5 ÷ 2.5	2 ÷ 3

Figura VI.7.- Distancia recomendada para el proceso de soldadura

El tipo de gas utilizado en el proceso de soldadura se selecciona en función del material a soldar por el proceso TIG, como lo muestra la tabla VI.2.

Tabla VI.2.- Aplicación de gas inerte en diferentes materiales

Metal a soldar	Gas
Aluminio y sus aleaciones	Argón
Latón y sus aleaciones	Helio y Argón
Cobre y sus aleaciones (menor a 3mm)	Argón
Cobre y sus aleaciones (mayor a 3mm)	Helio
acero al Carbón	Argón
acero inoxidable	Argón

En el Capítulo II se describe la selección del electrodo en función de la corriente eléctrica empleada en el proceso de soldadura el cual es de 1/16 de pulgada o 1.59 mm. La Figura IV.8 muestra el proceso de soldadura en las probetas de acero inoxidable.



Figura VI.8.- Proceso de soldadura TIG

Después de realizar el proceso de soldadura en las probetas de Acero bajo las condiciones mencionadas anteriormente, la figura VI.9 muestra las probetas soldadas.



Figura VI.9.- Probetas de Acero inoxidable 316L, soldadas bajo el proceso TIG

VI.7.-Proceso de soldadura en probetas MIG

El proceso de soldadura MIG se realizó bajo las siguientes condiciones:

- Voltaje: 20 Volts
- Corriente: 125 Amp.

Con el objetivo de realizar comparaciones entre ambos procesos de soldadura (TIG y MIG), se considera aplicar las mismas condiciones, tales como el ángulo de soldadura así como la separación entre probetas para el proceso de unificación, la Figura IV.10 resume las condiciones para el proceso de soldadura MIG.

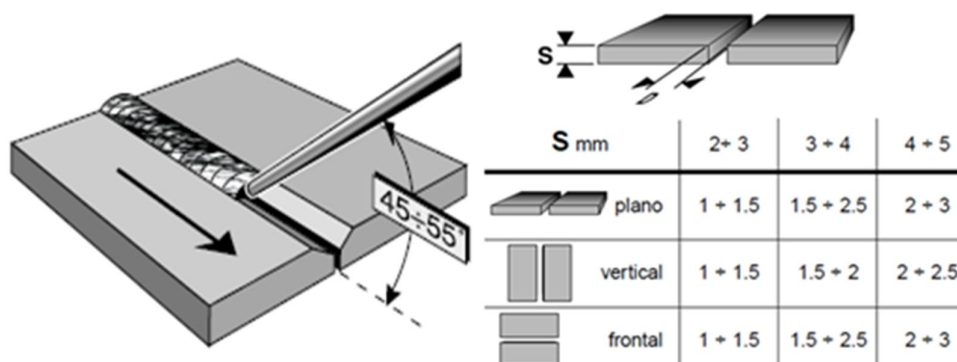


Figura VI.10.- Condiciones similares para los procesos de soldadura TIG y MIG

La selección del gas y electrodo para este proceso, se detalla en el Capítulo II. A continuación se muestra un segmento de la tabla en la cual se selecciona el tipo de gas protector y el amperaje ideal.

Tabla VI.3.- Selección de electrodo, gas protector y corriente

Tipo de electrodo de alambre	Diámetro del electrodo en Pulgadas	Diámetro del electrodo en milímetros	Gas protector	Corriente del arco de rocío, mínima (A)
Acero dulce	0.030	0.8	98% de Argón 2% de oxígeno	150
Acero dulce	0.035	0.9	98% de Argón 2% de oxígeno	165
Acero dulce	0.045	1.1	98% de Argón 2% de oxígeno	220
Acero dulce	0.062	1.6	98% de Argón 2% de oxígeno	275
Acero inoxidable	0.035	0.9	98% de Argón 2% de oxígeno	170
Acero inoxidable	0.045	1.1	98% de Argón 2% de oxígeno	225
Acero inoxidable	0.062	1.6	98% de Argón 2% de oxígeno	285
Aluminio	0.030	0.8	Argón	95
Aluminio	0.045	1.1	Argón	135
Aluminio	0.062	1.6	Argón	180
Cobre desoxidado	0.035	0.9	Argón	180
Cobre desoxidado	0.045	1.1	Argón	210
Cobre desoxidado	0.062	1.6	Argón	310
Bronce al Silicio	0.035	0.9	Argón	165
Bronce al Silicio	0.045	1.1	Argón	205
Bronce al Silicio	0.062	1.6	Argón	270

Por lo cual para este proceso se selecciono un diámetro de electrodo de 0.035 pulgadas o bien 0.9 mm, en el cual se emplea una mezcla de gas (98% Argón y 2% de Oxígeno) con una Corriente de 170 Amp.



Figura VI.11.- Proceso de soldadura MIG

VI.8.- Instrumentación de las probetas TIG y MIG

Una vez terminado el proceso de soldadura para ambos casos de estudio, se procede a instrumentar las probetas colocando galgas extensométricas. Se coloca una galga a cada una probeta en la base del tipo: EA-06240LZ-120/E, como se muestra en la siguiente figura.

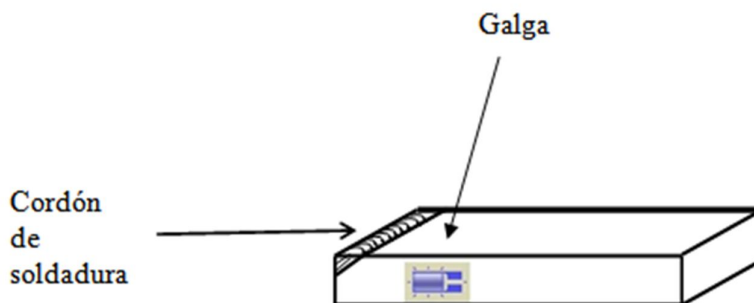


Figura VI.12.- Colocación se la galga

Primero, es necesario colocar la galga sobre una superficie limpia químicamente con la superficie de adhesión hacia abajo, para que no se produzca una mala adhesión y luego pueda

producir una mala medida de la deformación (Figura VI.13). Se recomienda realizarlo en un cristal el cual tiene marcado un centro con la finalidad de que la galga se pueda colocar exactamente en el centro de la cinta y optimizar su función tras esto, ha de pegarse cuidadosamente cinta adhesiva, de la forma que la galga quede al centro, y luego levantarla lentamente llevándose la galga con ella.



Figura VI.13.- Pegado de galga en el cristal

A continuación, hay que alinear la galga de la forma deseada y pegar la cinta adhesiva a un lado, para luego doblar la cinta sobre la misma, de tal forma que la superficie adhesiva de la galga quede hacia arriba. La figura VI.14 muestra cómo se debe de aplicar una o dos gotas de adhesivo en la unión de la cinta con el material.

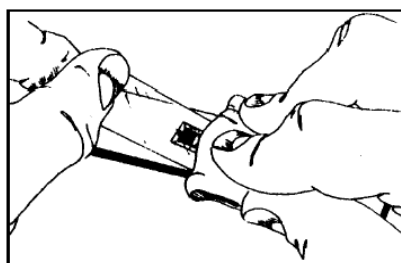


Figura VI.14.- Colocación de la cinta adhesiva sobre la galga

Después se debe de limpiar perfectamente la zona con el desengrasante el cual se puede apreciar en la Figura VI.15, ya que la zona donde se colocara la galga debe de estar completamente limpia, evitando así que la galga se desprenda del material donde se había colocado. Después se debe desprender la cinta que contiene la galga con mucho cuidado colocando una galga de pegamento sobre la galga. En la zona libre de contaminantes se debe colocar una gota de catalizador para el pegamento M-BOND, lo cual permite acelerar el proceso de secado del pegamento. Inmediatamente después desdoble la cinta, mientras esta se sostiene con una ligera tensión, hay que aplicar una presión deslizante con los dedos y una

gasa oprimiendo la galga hacia una posición y alineación deseada. Hay que usar una presión firme cuando la galga se encuentre en su posición correcta, ya que se requiere una película muy delgada y uniforme para resultados óptimos. Después de mantener la presión sobre la galga durante unos minutos, la galga ya ha de encontrarse firmemente adherida a la superficie, entonces hay que pasar a retirar la cinta. Hay que jalarla directamente sobre si misma de forma continua y lenta para evitar ejercer fuerzas innecesarias sobre la galga.

Cuando se termina el proceso mencionado anteriormente y el material a secado perfectamente se procede a corroborar que la galga funcione adecuadamente, esto se realiza al conectar la galga a un *TESTER*. Si la galga no se encuentra en corto y trabaja bajo el rango especificado por el fabricante *Vishay*, se procede a aplicar el último recubrimiento.

Después de este proceso es importante recubrir la galga, por lo cual se tendrá que aplicar un recubrimiento del tipo M-COAT-A, AIR-DRYING, POULYURETHANE COATING, esto como primera fase. Se deja secar por 24 horas al primer recubrimiento epóxico, pasando este tiempo se barniza con el segundo recubrimiento del tipo M-COAT-B NITRILE RUBER COATING (Figura VI.15). Aplicando adecuadamente los materiales se puede garantizar que la galga no sufrirá un corto por humedad.

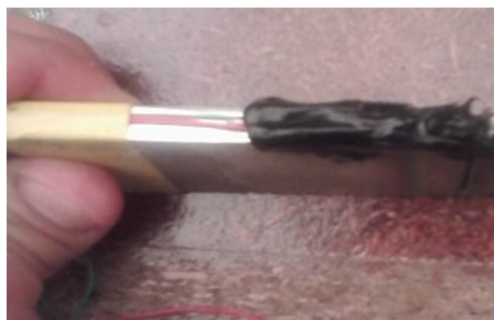


Figura VI.15.-Probeta cubierta con M-COAT-A, AIR-DRYING, POULYURETHANE COATING y M-COAT-B NITRILE RUBER COATING

VI.9.- Corte por electroerosión para el método de respuesta de grieta

El método del CCM en la probeta se debe de realizar como se muestra en la siguiente figura, realizando cortes a 3 mm del cordón, a 5 mm y 7 mm.

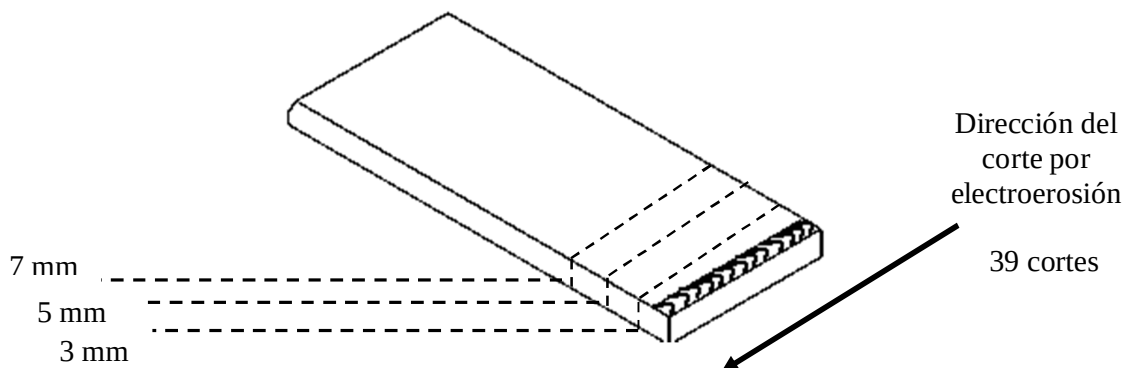


Figura VI.16.- Planteamiento de cortes para el CCM

Para cada proceso se debe de realizar 39 cortes de 1mm, tal y como se muestra en la figura VI.21, en la cual se muestra la dirección del corte. Con el objetivo de encontrar obtener datos confiables se aplica una repetitividad en la experimentación de cuatro pruebas de corte con la misma medida, es decir cuatro a 3 mm, 5mm y 7 mm. El procedimiento de corte por electroerosión se desarrollo en una primera fase en una maquina de penetración por electrodo marca *SODICK*, la cual se muestra a continuación en la Figura VI.17.

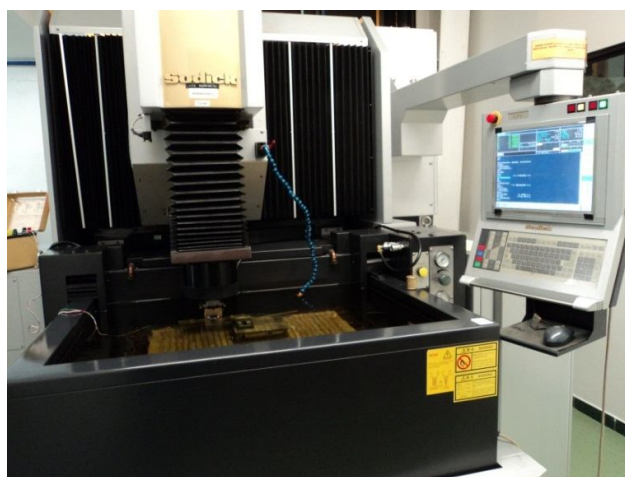


Figura VI.17.- Maquina de electroerosión por penetración *SODICK*

Es muy importante resaltar que el método de electroerosión se utiliza en este método ya que este proceso induce esfuerzos residuales despreciables en el material al realizar el corte, lo

cual es perfecto para no alterar el campo de esfuerzos residuales a evaluar por medio del método de respuesta de grieta. Este proceso implica la relación de un arco eléctrico muy pequeño, el cual se genera en entre el ánodo que en este caso es una lamina de cobre de 2mm de espesor por 50 mm de longitud y una altura de 50 mm, y el cátodo el cual esta conformado por la probeta de Acero inoxidable 316 L, es importante recordar que las galgas se cubrieron perfectamente de la humedad, ya que este proceso requiere la aplicación de liquido Dieléctrico, tal y como se muestra en la Figura VI.18.

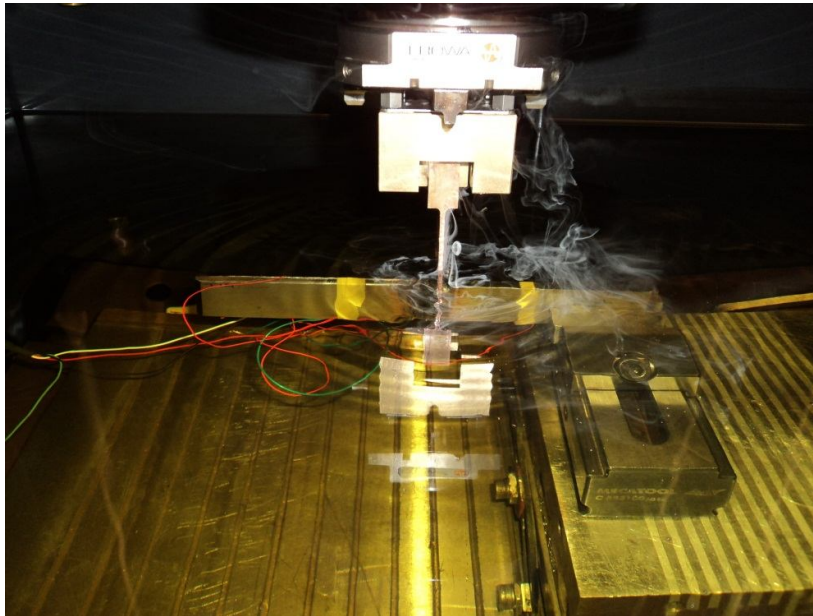


Figura VI.18.- Corte electroerosión por penetración

Este método resulto ser muy preciso en la inducción del corte, pero la desventaja es que el tiempo de corte por probeta alcanzaba las 6 horas, por lo cual se considero el corte de electroerosión por hilo ya que este proceso requiere menos de la mitad en tiempo, comparado con el procedimiento de electroerosión por penetración. La Figura VI.19 muestra el momento en el cual se prepara la probeta para el corte por hilo.

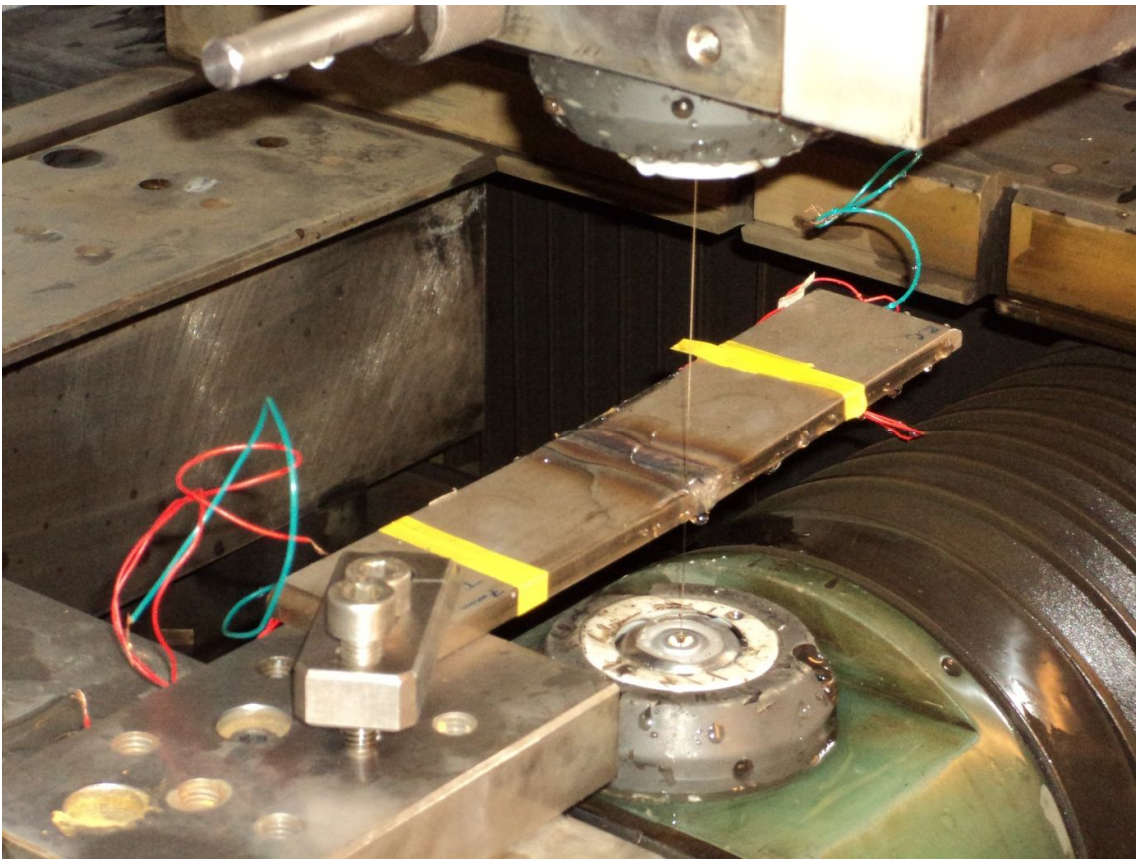


Figura VI.19.- Corte electroerosión por hilo

Para realizar el método de respuesta de grieta es necesario registrar cada variante en las microdeformaciones censadas por la galga extensométrica y esta a su vez interpretada por el puente de *Wheatstone*. Estos resultados se graficaran de la siguiente manera: en el eje y se colocaran los valores de las microrelajaciones obtenidas de los cortes y estas estarán en función de los cortes realizados y se colocaran en el eje x. La siguiente figura muestra como se debe de realizar la grafica microdeformación-corte.

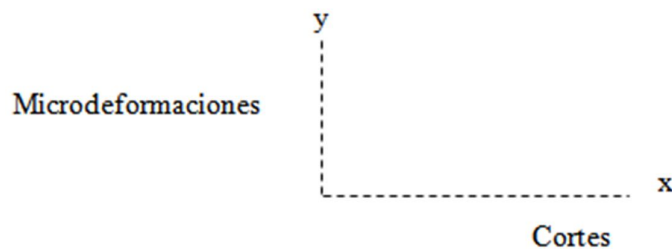
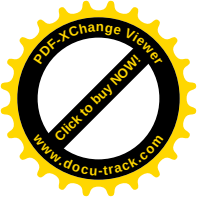


Figura VI.20.- Modalidad de grafica para el método de respuesta de grieta



Después de graficar en Excel, se pide que la grafica sea del tipo Polinomial del sexto orden, esta grafica genera una ecuación del mismo orden y estos datos se ingresan a un programa de computo Compac Visual FORTRAN, usando el LU Decompositor and Backsubstitution (LUBKSB). Hay que resaltar que el funcionamiento de este programa no se explicara en este tema de investigación, ya que este solo se utiliza como caja negra, es decir se ingresan los datos de la grafica polinomial y este resuelve proporcionando los resultados en una interpretación de 10 nodos ya que el programa requiere la base y altura de la probeta y en función de estos es como resuelve y plantea un campo de esfuerzos residuales.

VI.10.- Sumario

En el presente capítulo se describió el procedimiento para el método experimental de respuesta de grieta, el cual esta sustentado desde el proceso de manufactura de las probetas así como el relevado de esfuerzos residuales existentes en el material, permitiendo evaluar solo los esfuerzos residuales causados por el proceso de soldadura. También se describe como se realiza la instrumentación de las probetas al colocar galgas extensométricas. El proceso de corte es vital en este análisis experimental por lo cual se emplea el método de electroerosión, se describe ambos procesos utilizados en esta investigación. El próximo capítulo se sustenta sobre el análisis de resultados obtenidos de ambas metodologías (numérica-experimental), así como observaciones y conclusiones derivadas de los resultados.

Capítulo VII



Resultados y Conclusiones

VII.1.- Resultados en el análisis térmico del proceso de soldadura TIG 3D

Cuando se han realizado investigaciones en elemento finito simulando el proceso de soldadura, una de las discusiones con mayor relevancia es la comparación de resultados de modelos realizados en 2D y 3D. En la primera fase del análisis se analizarán los resultados del análisis térmico para los tres procesos de soldadura en 3D y 2D.

En el análisis térmico del proceso de soldadura TIG, el análisis se comporta de la siguiente manera. Para el análisis en 3D la temperatura de la fuente térmica es de 723°C, la Figura VII.1 muestra la inducción de la fuente térmica en el primer paso del análisis transitorio.

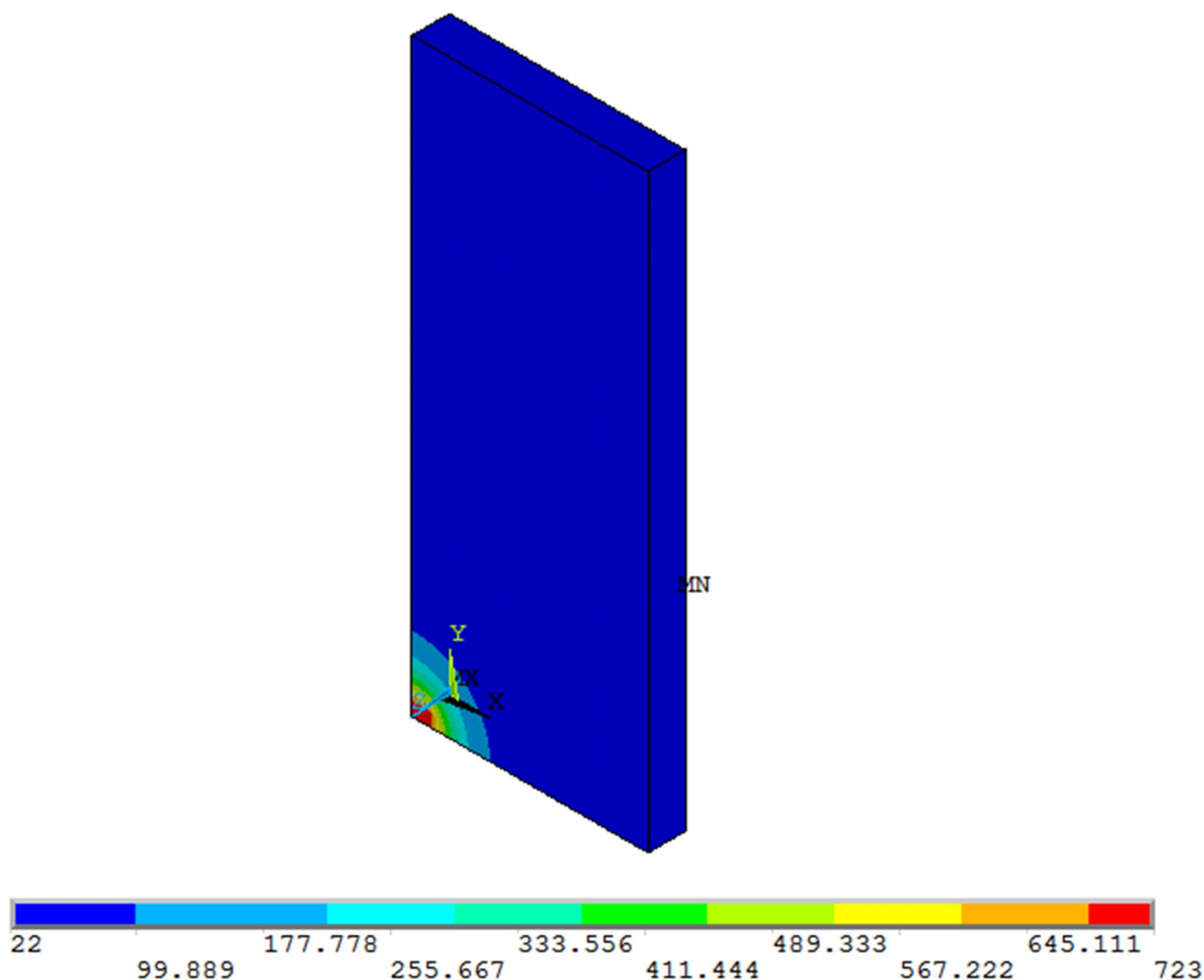


Figura VII.1.- Primer paso de carga en análisis TIG

En este paso se inicia la inducción de la fuente térmica simulando el proceso de soldadura TIG, con el objetivo de igualar las condiciones reales se considera la convección térmica, lo que ocasionará el enfriamiento de la probeta, la radiación se desprecia ya que se considera en

la eficiencia de el proceso de soldadura. La Figura VII.2 muestra la grafica del comportamiento de temperatura en el nodo número 4001 del espécimen.

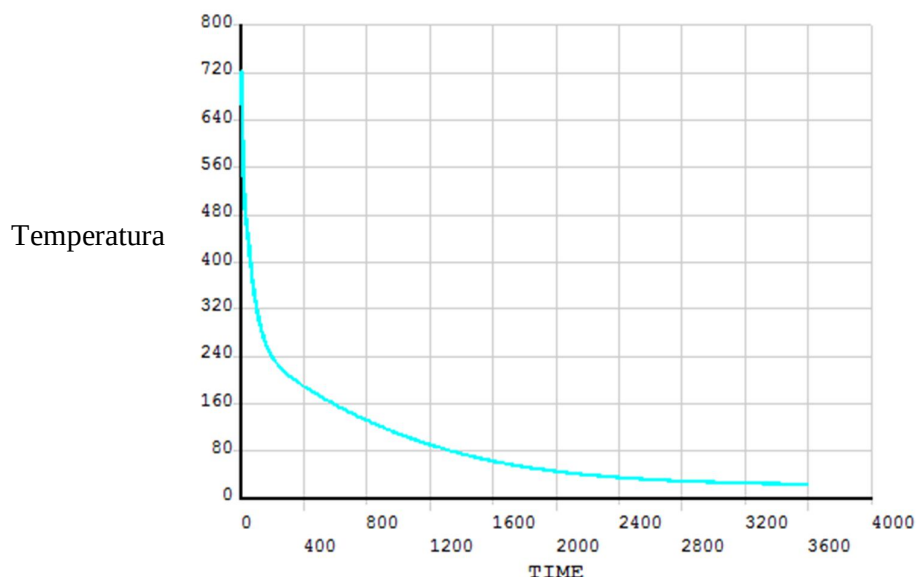


Figura VII.2.- Comportamiento de temperatura con respecto al tiempo TIG 3D

Esto demuestra que existe un descenso en la temperatura tal y como ocurre en el fenómeno real, estos datos son recopilados en el nodo 4001, la siguiente figura muestra el último paso del análisis en el cual la temperatura esta en equilibrio.

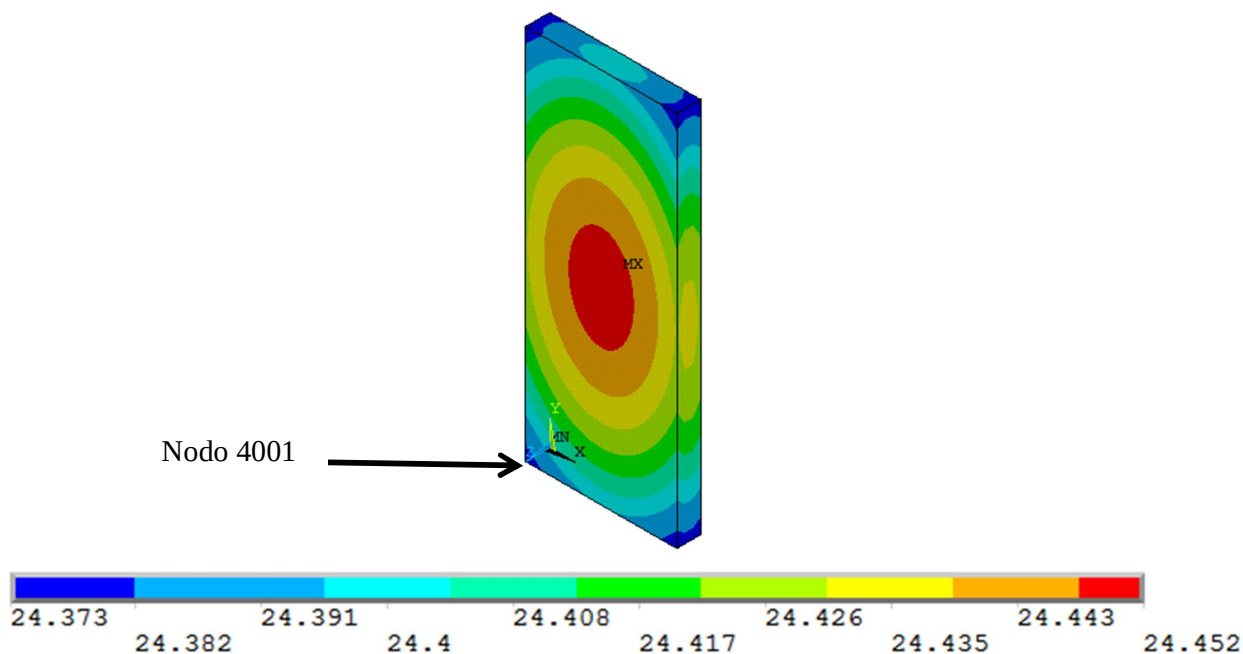


Figura VII.3.- Equilibrio térmico del espécimen TIG

En el análisis anterior se puede observar que después de inducir una temperatura de 723°C , esta será de 24.74°C en un tiempo de 3600 segundos o una hora. En la gráfica se puede observar que después que la fuente pasa por el nodo 4001, la temperatura desciende rápidamente en el segundo 39 se puede observar lo siguiente (Figura VII.4):

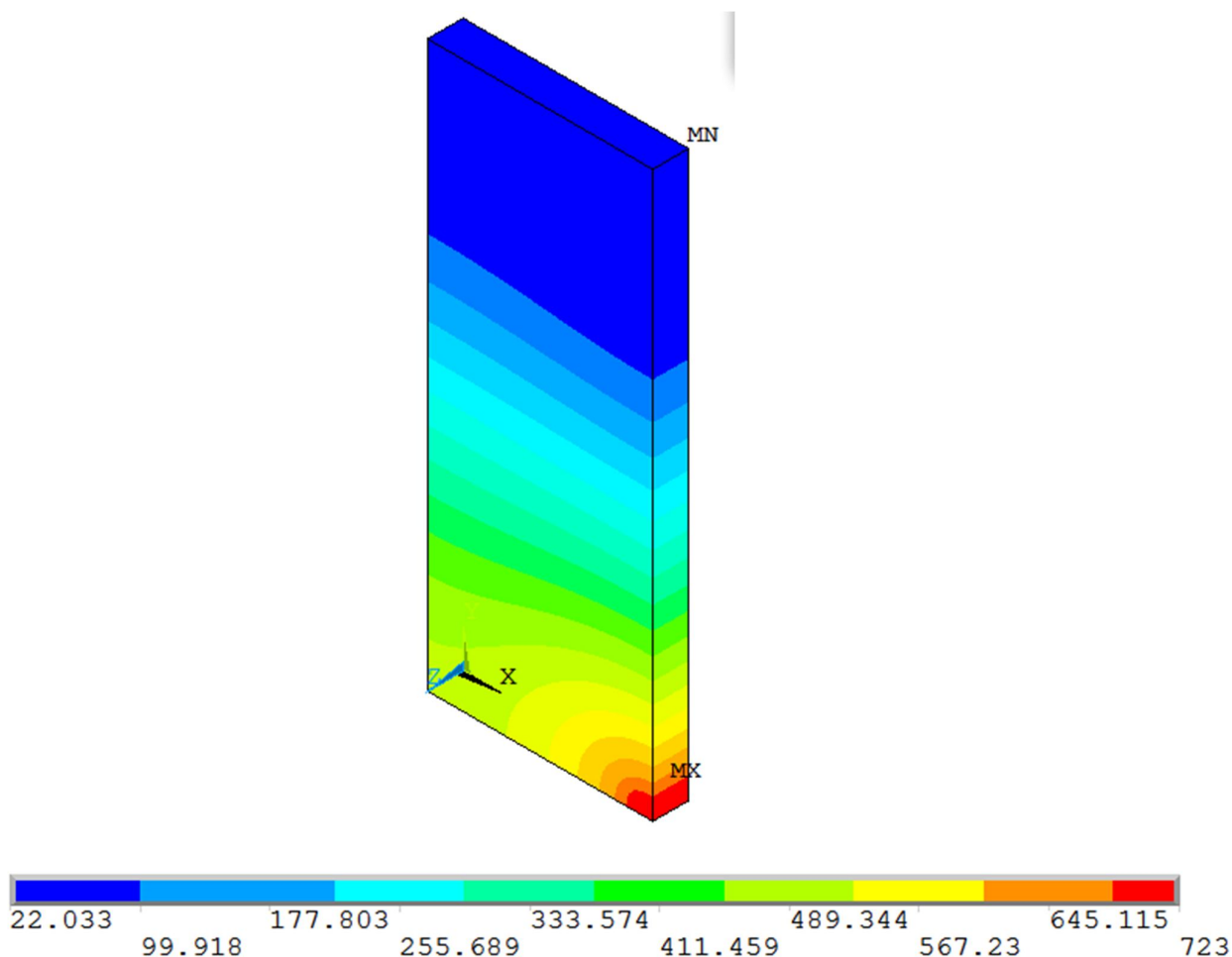


Figura VII.4.- Proceso TIG en el segundo 39 justo en el final del proceso

Esta figura es de suma importancia ya que al terminar el proceso de soldadura de manera experimental en el proceso TIG, exactamente en ese momento se tomaba la temperatura de la probeta, con un pirómetro (Figura VII.5), el cual registraba una temperatura de 530°C , en la zona afectada térmicamente. Lo cual permite corroborar que el análisis en elemento finito se comporta muy similar al fenómeno real.



Figura VII.5.- Pirometro Óptico

VII.1.2.- Resultados en análisis térmico TIG en 2D

En esta sección se muestran los resultados obtenidos en el análisis térmico desarrollado en elemento finito. La temperatura de la fuente térmica es la misma que se utilizó en el análisis térmico en 3D. La Figura VII.6 muestra el primer paso de carga.

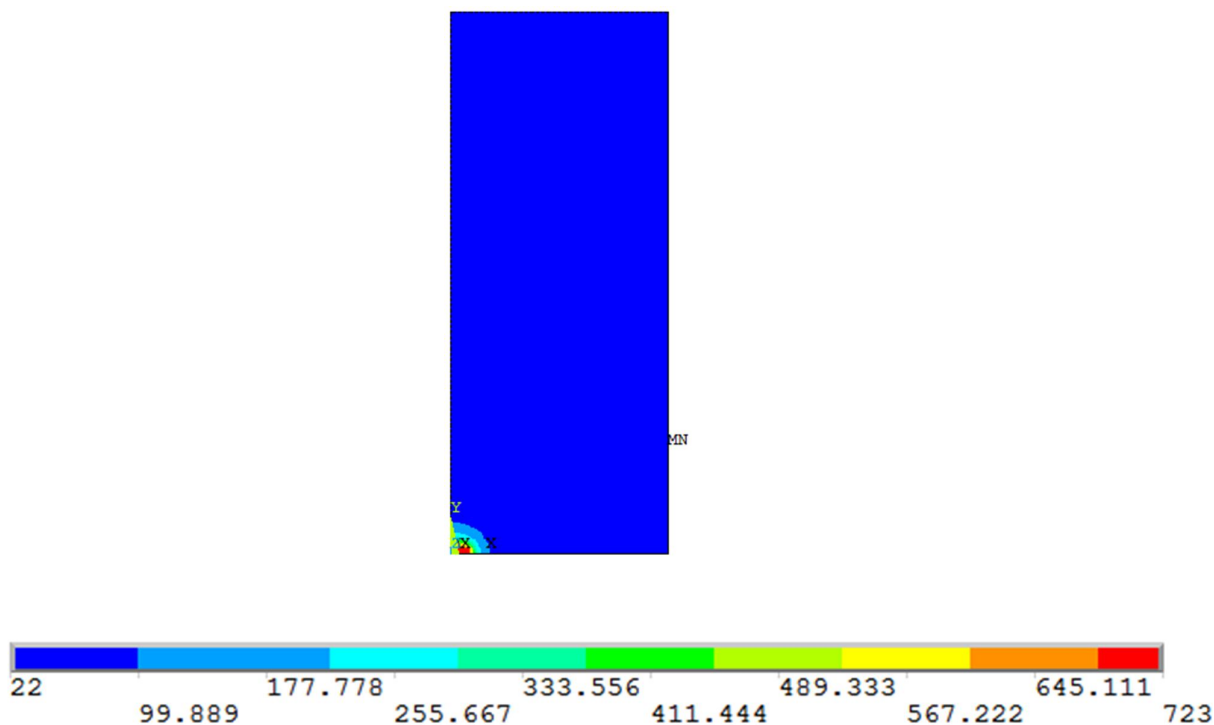


Figura VII.6.- Primer paso de carga en análisis TIG 2D

La Figura VII.7 muestra el comportamiento de la temperatura en el nodo1 desde que se induce la fuente térmica hasta el final del tiempo.

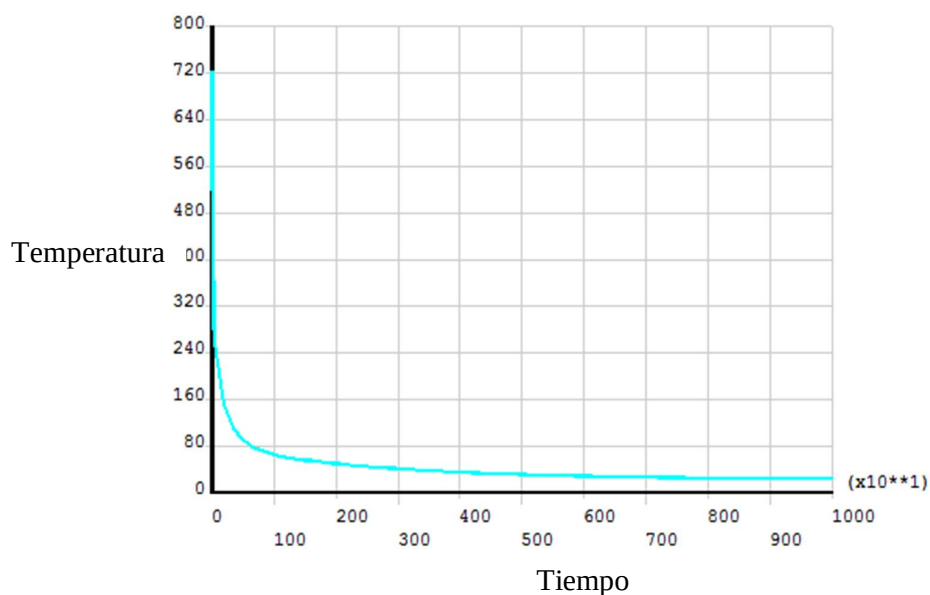


Figura VII.7.- Grafica de temperatura VS tiempo Análisis 2D TIG

Para poder apreciar las variantes existentes entre el análisis 2D y 3D importante comparar el estado de la temperatura a los 3600 segundos. La Figura VII.8 muestra las variantes de temperatura y como se encuéntrela distribuida.

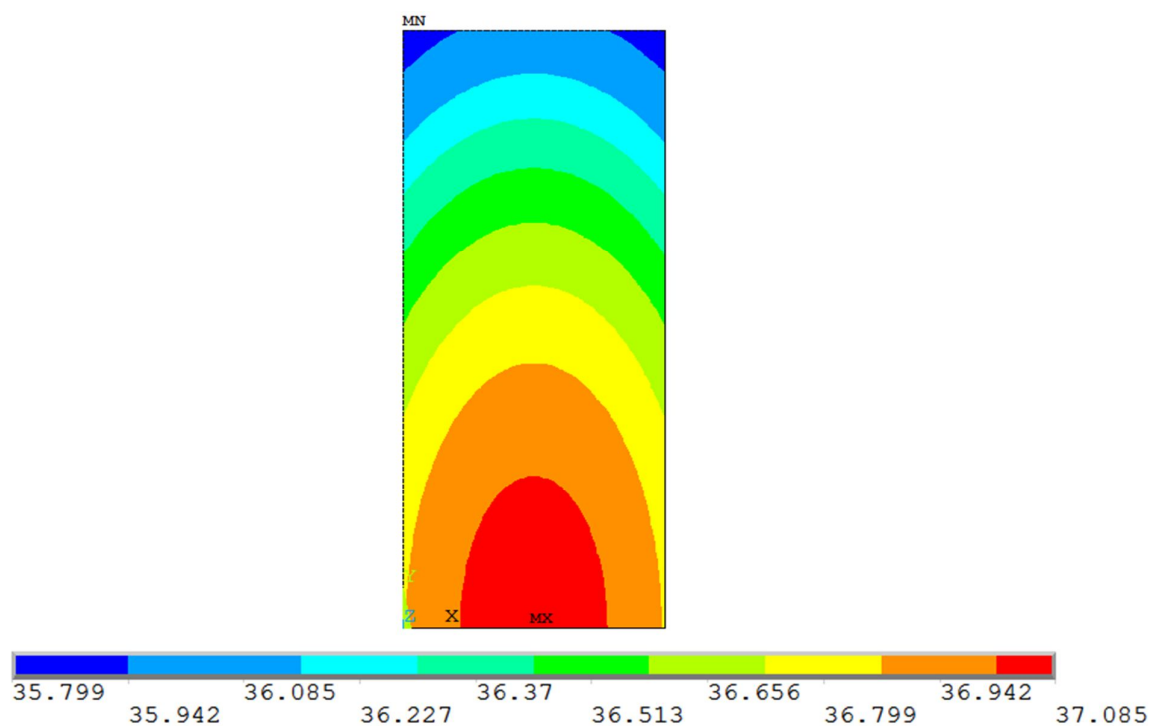


Figura VII.8.- Análisis térmico TIG 2D, a los 3600 segundos

Se puede apreciar que el tiempo en el cual la probeta 2D alcanza el equilibrio térmico, es mucho mayor que en el análisis 3D. este equilibrio similar se alcanza a los 10,000 segundos, lo cual es 2.7 veces mayor que el análisis 3D. La Figura VII.9 muestra como se encuentra el modelo a los 10,000 segundos.

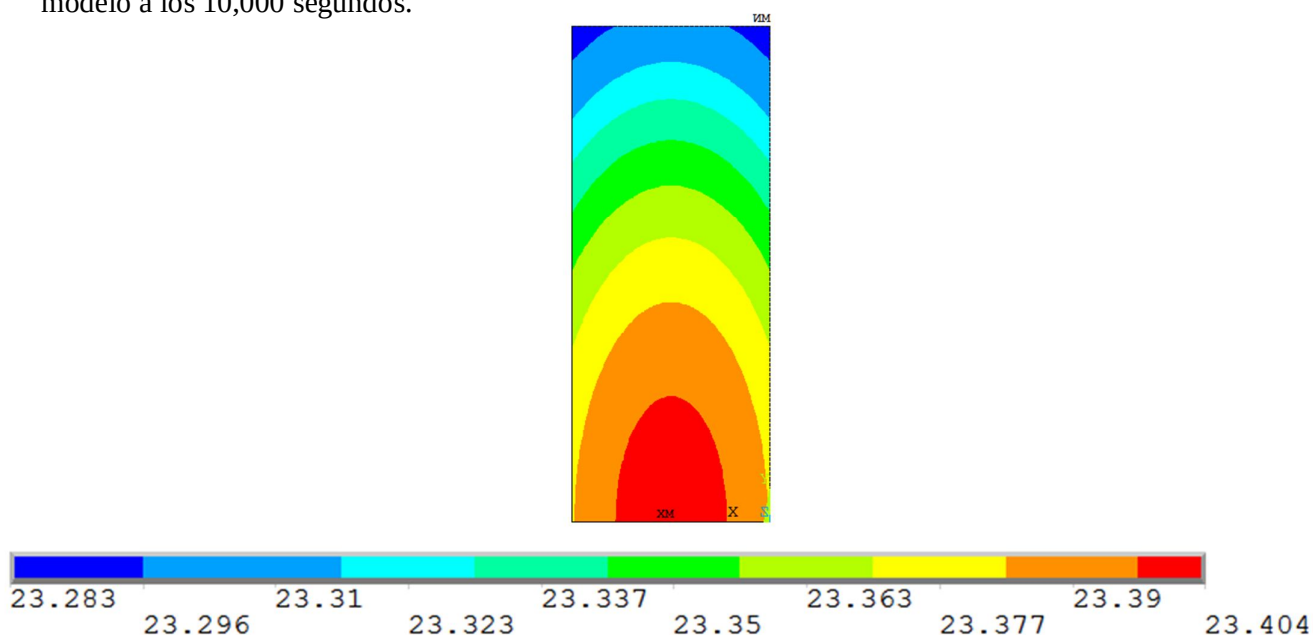


Figura VII.9.- Equilibrio térmico en análisis TIG 2D

La Figura VII.10 muestra una gráfica en la cual se puede comparar la diferencia en cuestión de el tiempo entre ambos análisis.

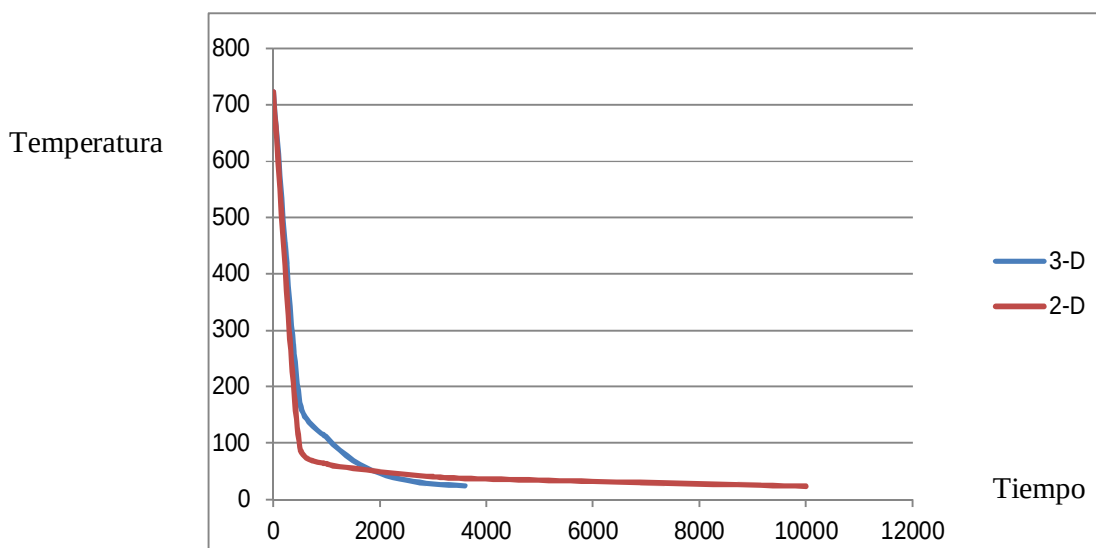


Figura VII.10.- Comparación entre ambos análisis en el proceso de soldadura TIG

VII.2.- Resultados en análisis térmico del proceso de soldadura MIG 3D

Para el proceso de soldadura MIG, se considero una temperatura de 693°C, la Figura VII.11 muestra la inducción de la fuente en el primer paso del análisis térmico.

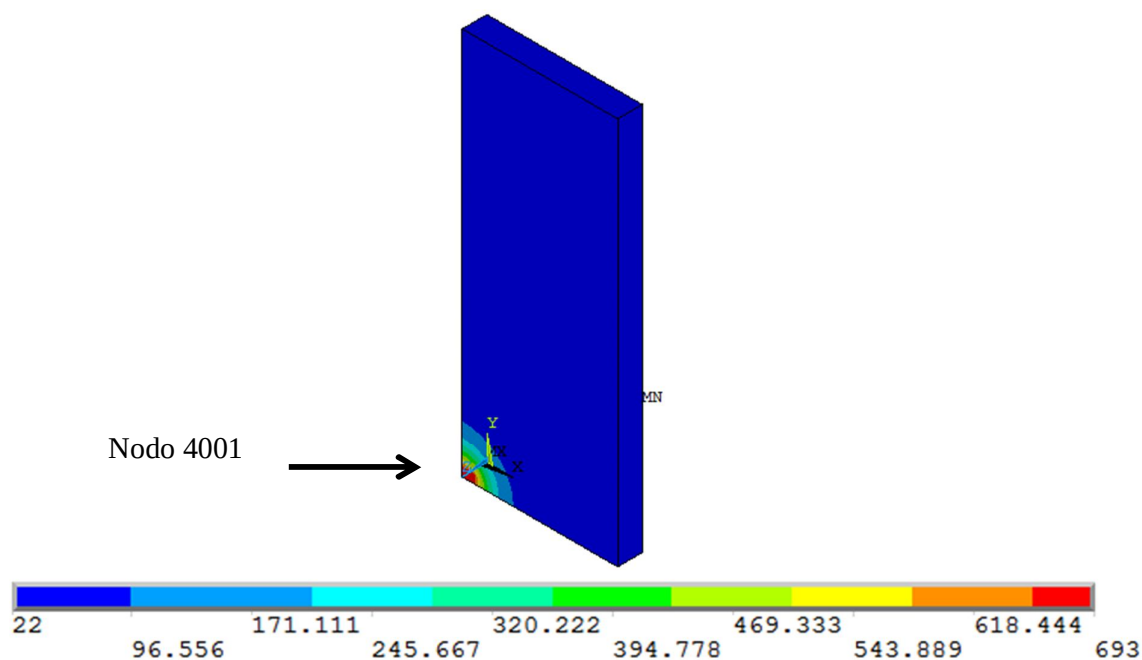


Figura VII.11.- Primer paso de carga en análisis MIG 3D

La siguiente grafica muestra el comportamiento de temperatura en el Nodo 4001 con respecto al tiempo de 3600 segundos

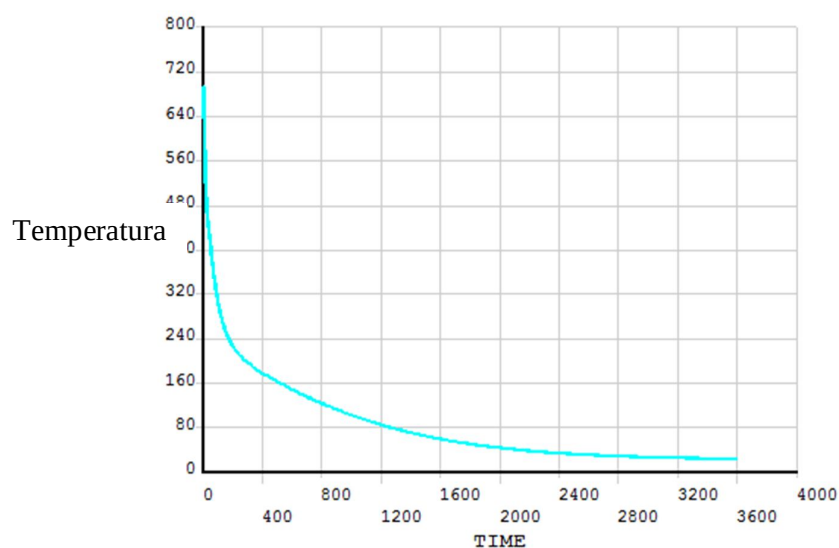


Figura VII.12.- Grafica de comportamiento de temperatura nodo 4001

La Figura VII.13 muestra el último paso del análisis térmico del proceso de soldadura MIG, en el cual se puede apreciar su comportamiento ante la convección térmica en función del tiempo.

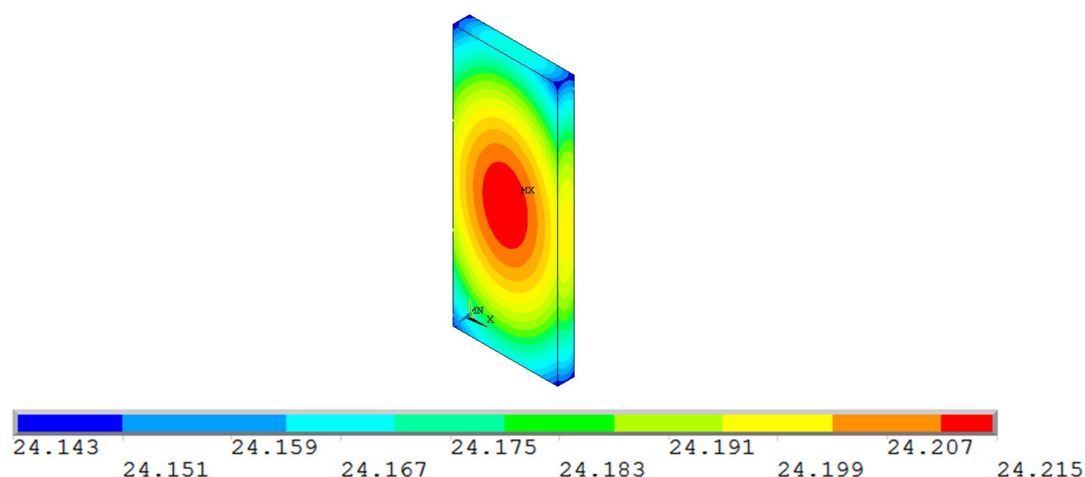


Figura VII.13.- Ultimo pasó de carga en análisis térmico MIG

VII.2.1.- Resultados del análisis térmico de proceso de soldadura MIG 2D

En el análisis térmico 2D se induce la misma fuente térmica, bajo las mismas condiciones de frontera, la diferencia se aprecia en el tiempo al igual que en el proceso de soldadura TIG. La Figura VII.14 muestra el primer paso de carga.

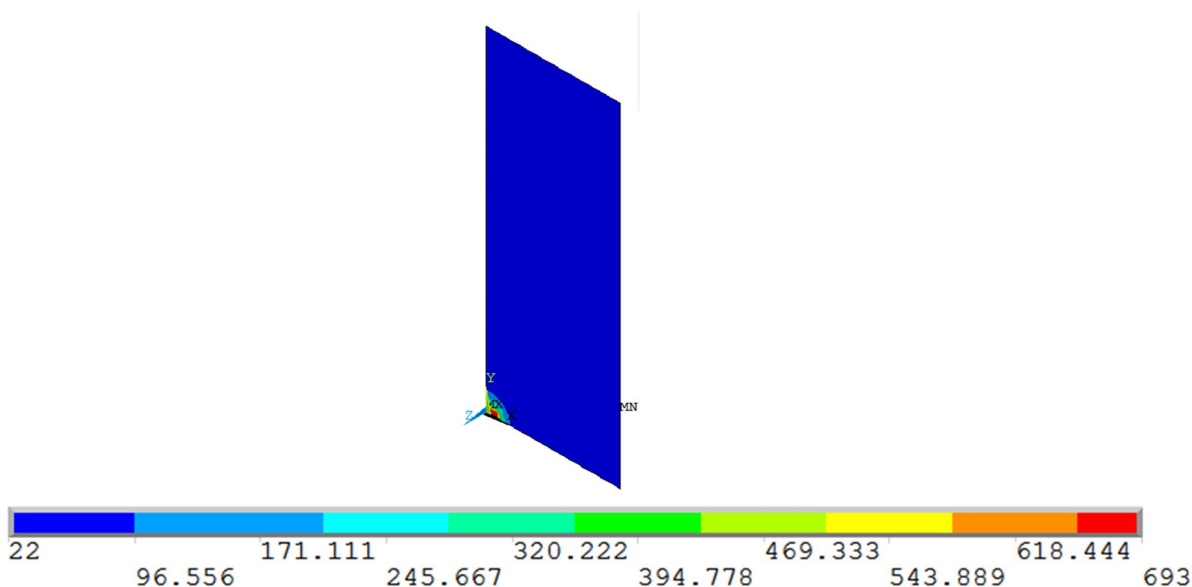


Figura VII.14.- Primer pasó de carga en análisis térmico MIG 2D

En la Figura VII.15 se muestra la gráfica, del comportamiento de la temperatura con respecto al tiempo.

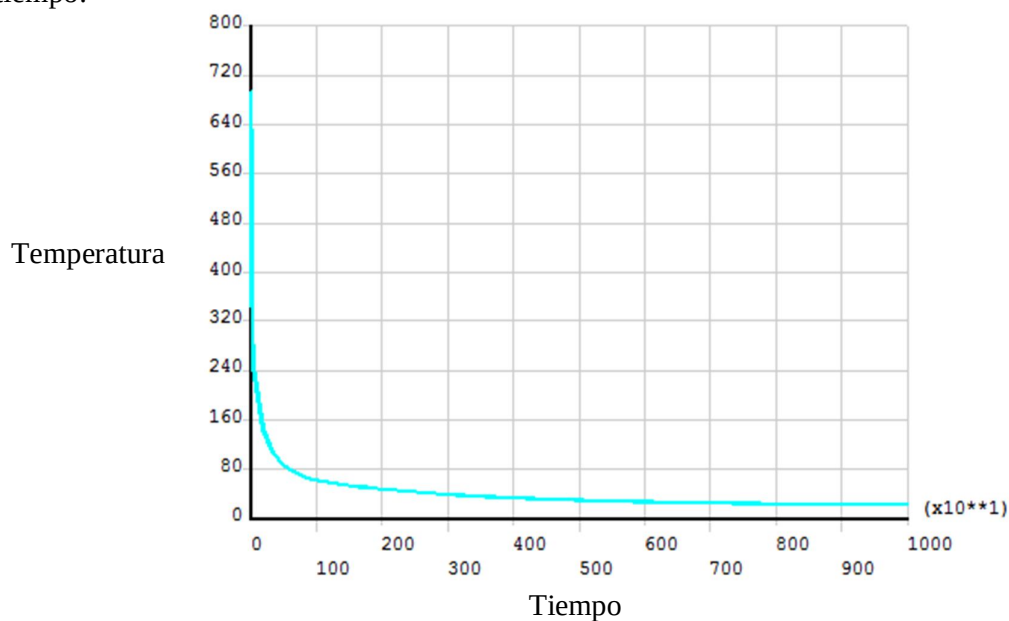


Figura VII.15.- Grafica del nodo 1 análisis MIG

A continuación se muestra el último paso del análisis 2D, el cual se encuentra en equilibrio térmico a los 10,000 segundos.

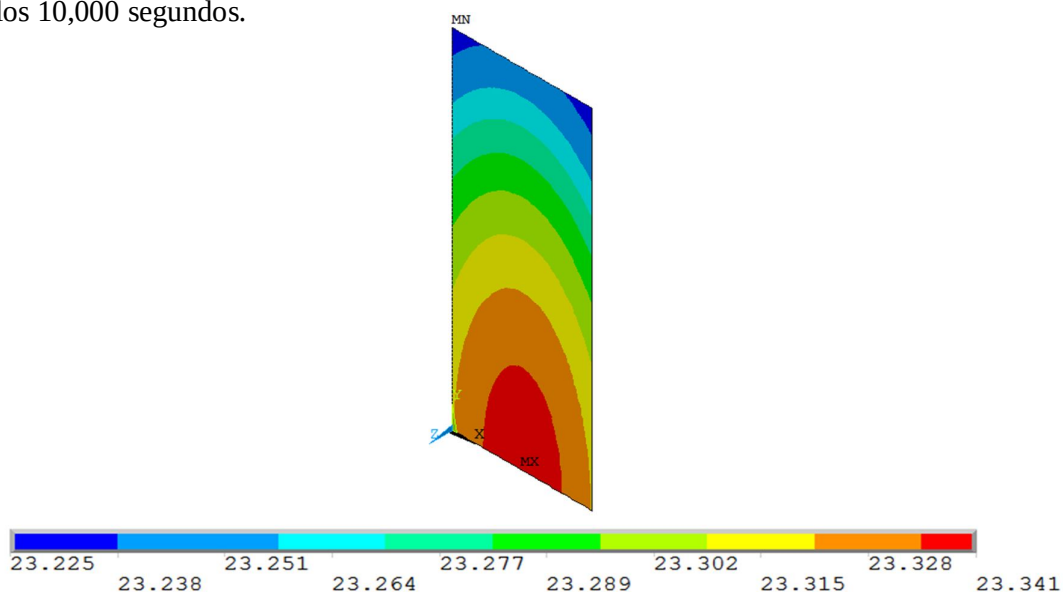


Figura VII.16.- Último paso del análisis MIG 2-D, en equilibrio térmico

En la Figura VII.17 se muestra la comparación entre ambos análisis y su comportamiento ante el fenómeno de la convección térmica.

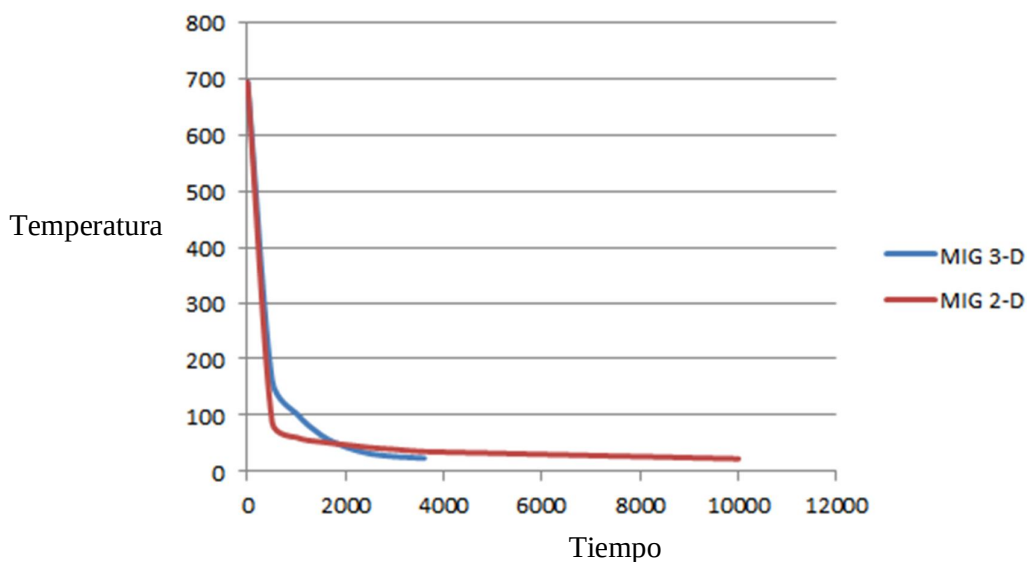


Figura VII.17.- Comparación de análisis MIG 3D y 2D

VII.3.- Resultados de análisis térmico del proceso Láser en 3D

En este análisis fuente térmica se induce como *Heat General*, por lo cual la temperatura no se comporta de manera constante, ya que esta se induce en función de la potencia del láser, en el volumen de contacto, la Figura VII.18 muestra el primer paso de inducción térmica en el análisis térmico.

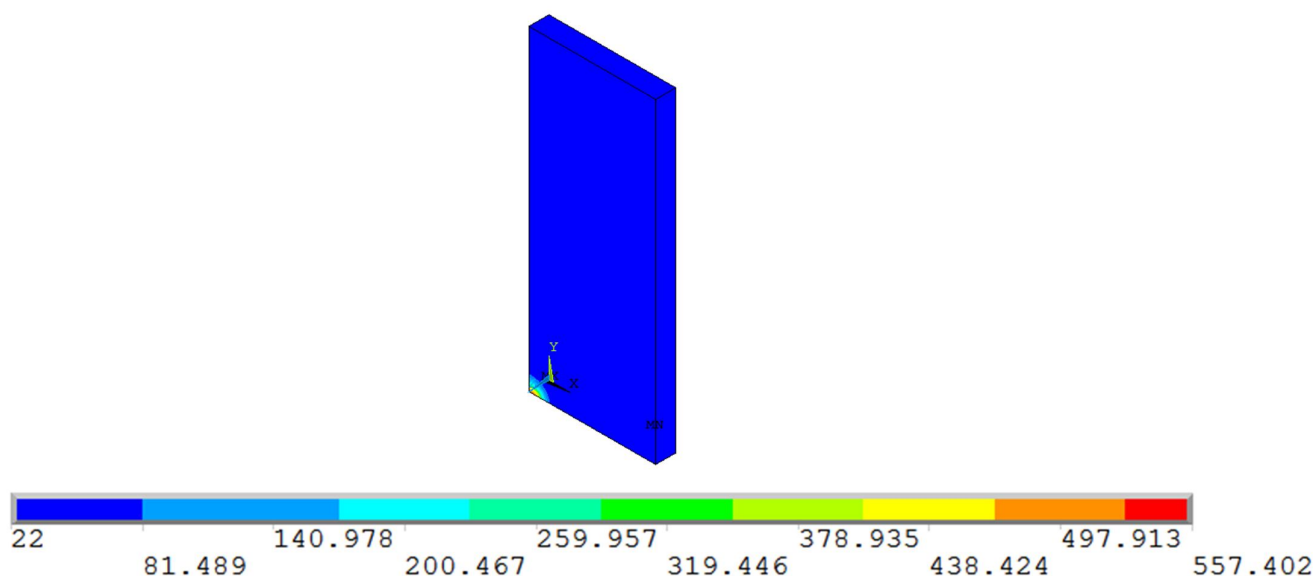
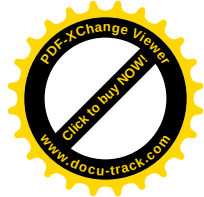
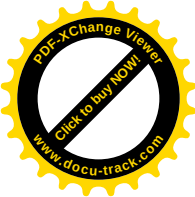


Figura VII.18.- Primer paso de carga en el análisis Láser 3D



A continuación se muestra (Figura VII.19) la interacción de la inducción de temperatura en el nodo 4001 con respecto al tiempo ya que este es un análisis del tipo transitorio, es decir en función del tiempo.

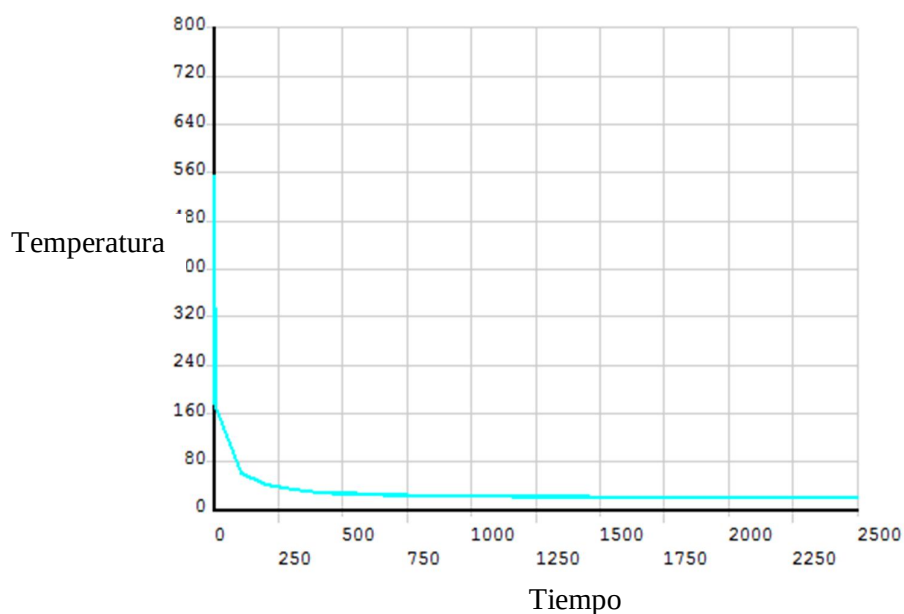


Figura VII.19.- Grafica de comportamiento térmico en el análisis Láser 3D

En un tiempo de 204 segundos (3.4 minutos) la temperatura es de 42°C y alcanza un equilibrio térmico a los 1300 segundos o 21.6 minutos. La Figura VII.20 muestra el momento en el cual el espécimen alcanza el equilibrio térmico.

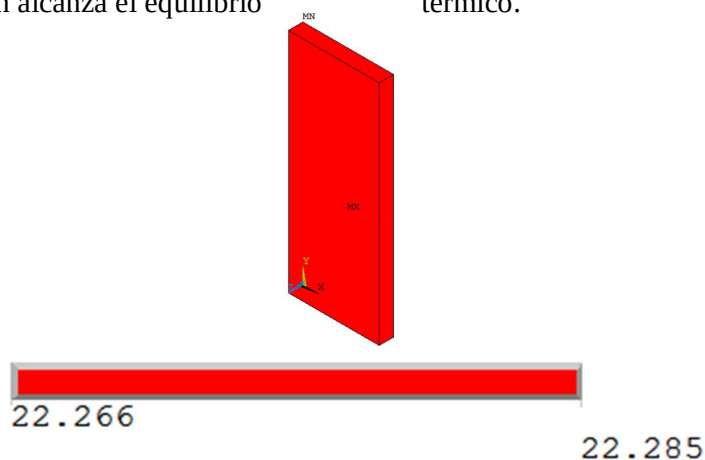


Figura VII.20.- Equilibrio térmico en análisis láser 3-D

VII.3.1.- Resultados de análisis térmico del proceso Láser en 2D

En este caso se induce la temperatura en función de la potencia del laser en Watts como un *Heat Flow*, a continuación se muestra el primer paso de carga del análisis Láser en 2D.

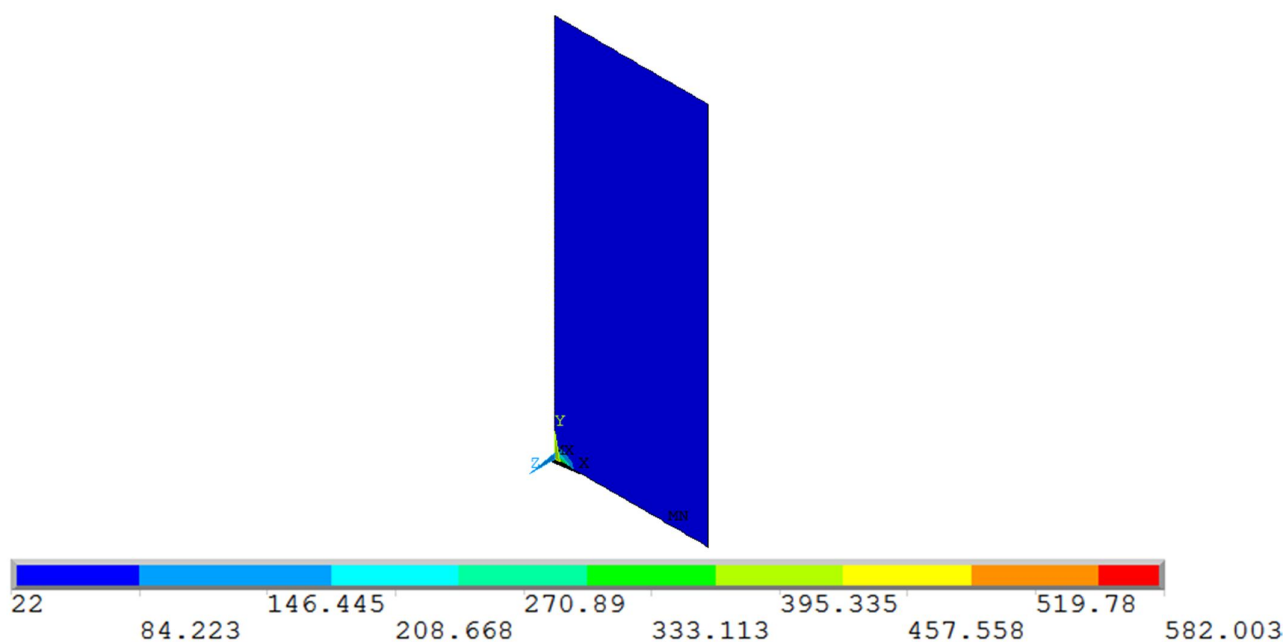


Figura VII.21.- Primer paso de carga en el análisis Láser

A continuación se muestra la Figura VII.22, en la cual se plasma el comportamiento de la inducción de temperatura y la influencia de la convección térmica en el espécimen.

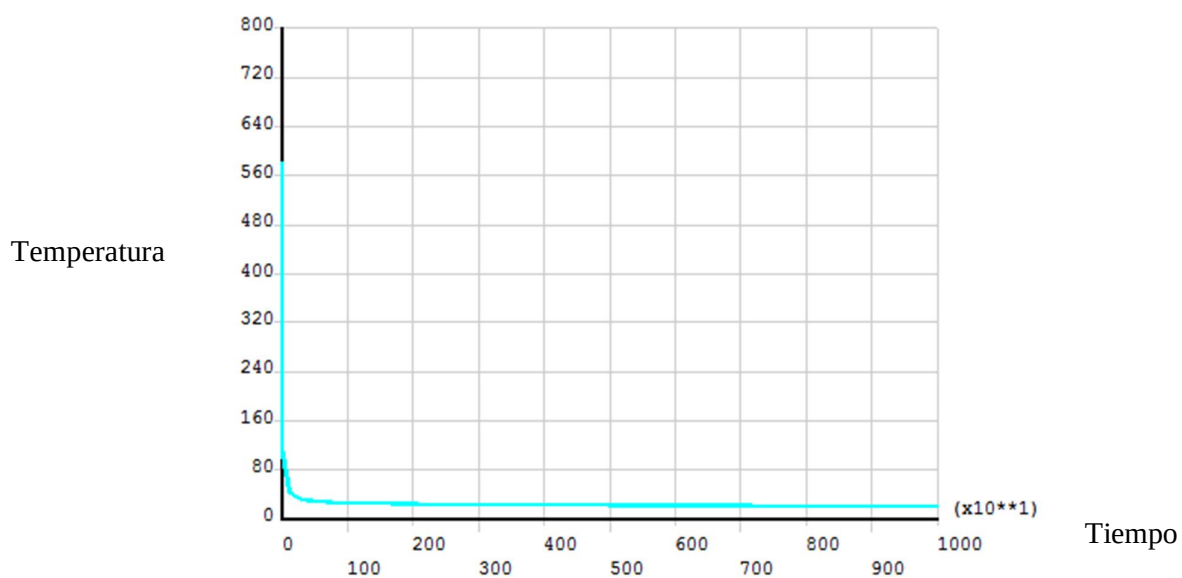


Figura VII.22.-Grafica del nodo 1 en el análisis térmico Láser 2D

En el análisis térmico Láser 2D, se puede observar que el tiempo en el cual se alcanza el equilibrio térmico es de 8700 segundos o 2.4 segundos, la Figura VII.23 muestra al espécimen cuando este alcanza el equilibrio térmico.

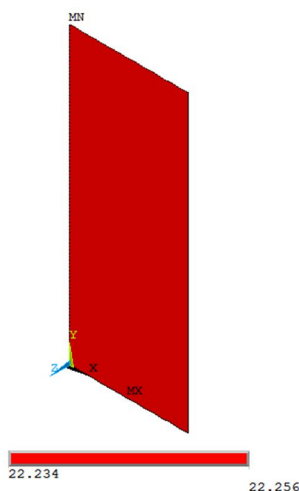


Figura VII.23.- Equilibrio térmico en análisis láser 3D

En la siguiente figura se muestra una comparación entre los dos análisis (3D y 2D), con la finalidad de poder comparar cual metodología dispersa el calor efectivamente.

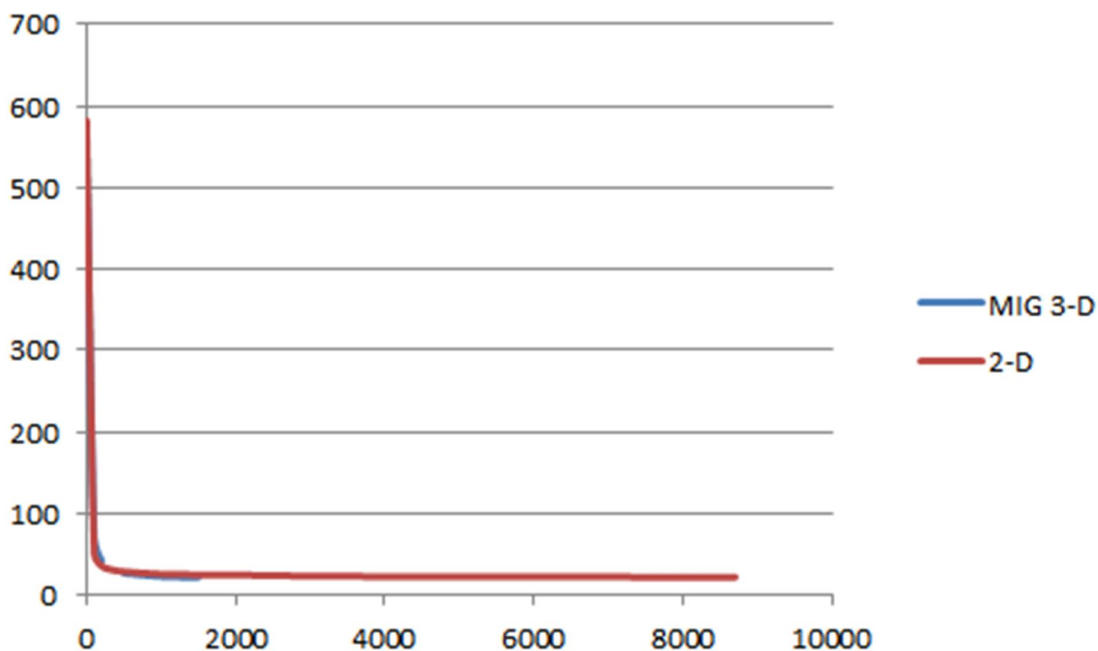


Figura VII.24.- Grafica de dispersión de calor en proceso Láser

VII.4.-Resultados del análisis estructural TIG

Después de realizar el análisis térmico se inducen los resultados obtenidos en un nuevo análisis del tipo estático estructural, en este análisis se obtuvieron varios resultados. De los cuales se discutirán los más importantes, a continuación se muestra el resultado obtenido cuando aún existe la fuente térmica (Figura VII.25).

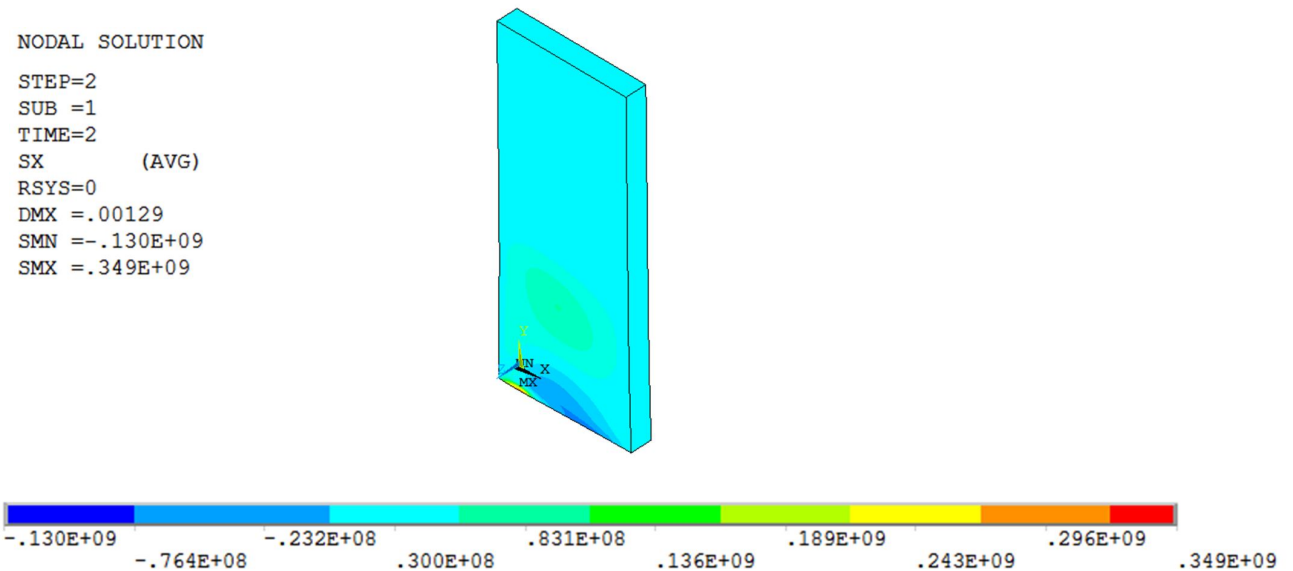


Figura VII.25.- Resultados longitudinales del análisis estático TIG con fuente térmica

También se muestran los resultados de ese mismo paso del análisis pero este será del tipo transversal, la Figura VII.26 muestra como se encuentra el espécimen en este paso de carga.

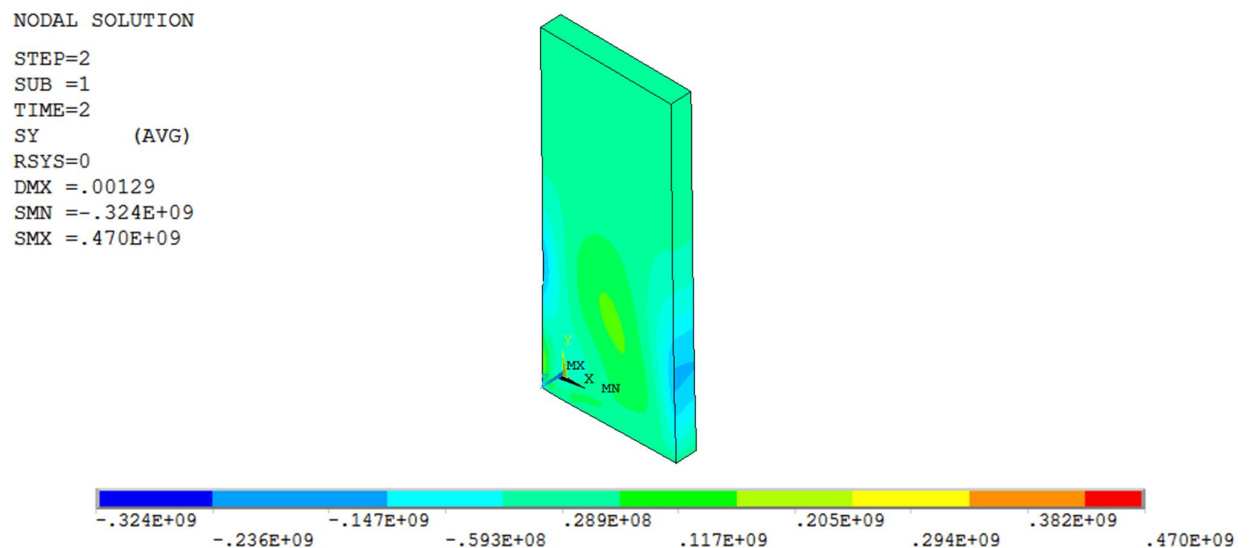


Figura VII.26.- Resultados Transversales del análisis estático TIG con fuente térmica

Se puede realizar una selección de área si se requiere un estudio en alguna zona de importancia a continuación se muestra la selección de la mitad del espécimen lo cual permite una mejor interpretación de resultados.

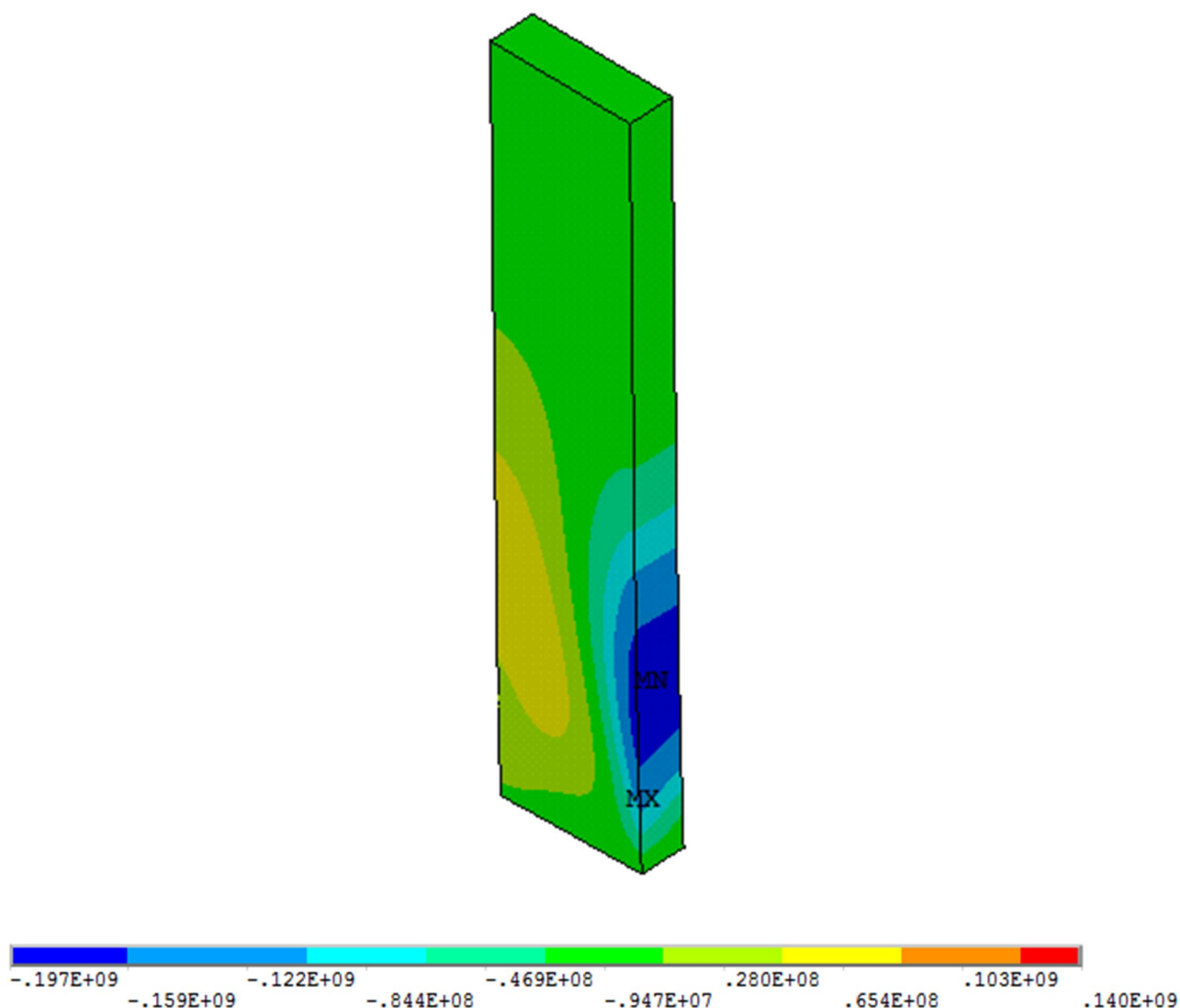


Figura VII.27.- Resultados longitudinales de media probeta del análisis estático TIG

El objetivo principal de este tema de investigación es el analizar la inducción de esfuerzos residuales por la inducción de altas temperaturas, derivadas del proceso TIG. La Figura VII.28 muestra los resultados obtenidos cuando la temperatura desciende en el espécimen.

Es importante resaltar que estos resultados son del tipo transversal, los cuales se obtienen cuando el espécimen se enfría, ya que es este momento en el cual los esfuerzos residuales se comportan de forma estable.

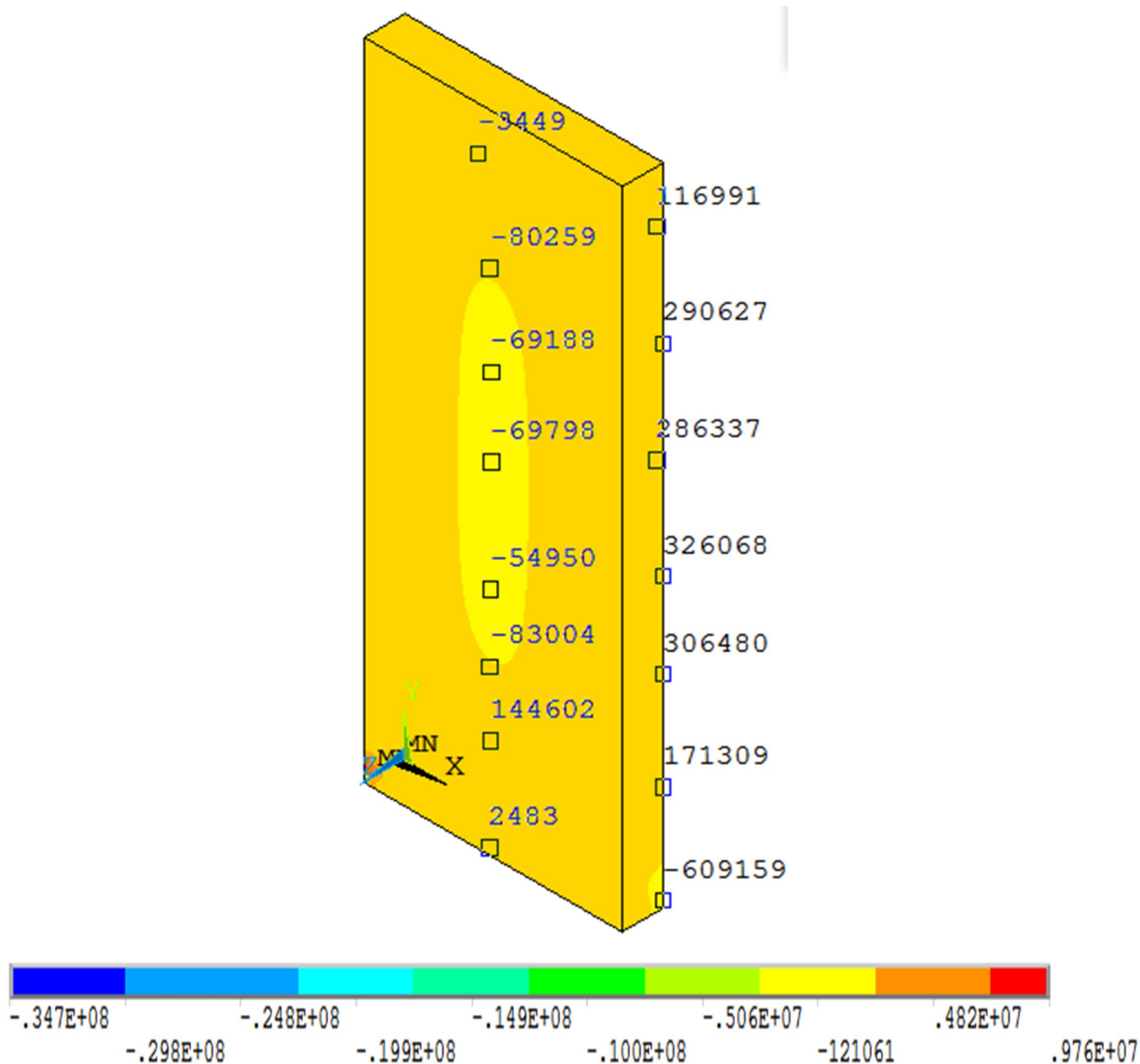


Figura VII.28.- Resultados del análisis estático transversal

La Figura VII.29 muestra los esfuerzos residuales en la dirección longitudinal, en la cual se puede apreciar que los esfuerzos residuales en el proceso TIG.

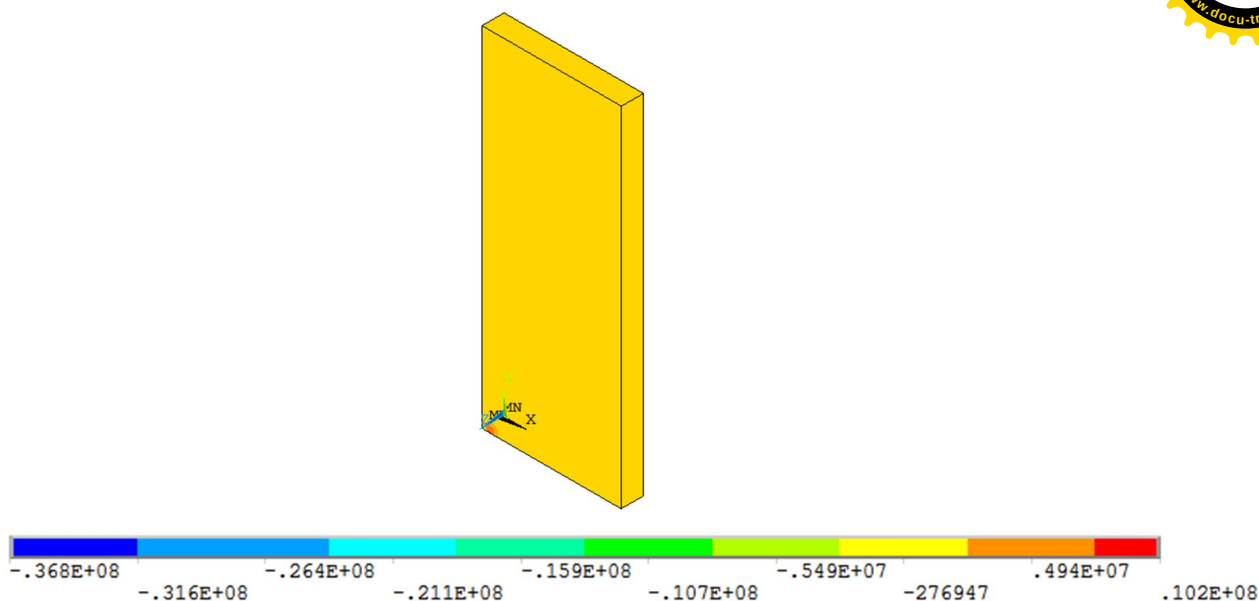


Figura VII.29.- Esfuerzos residuales longitudinales en el proceso TIG

Con el objetivo de poder apreciar los esfuerzos residuales se realiza una selección de elementos como lo muestra la Figura VII.30.

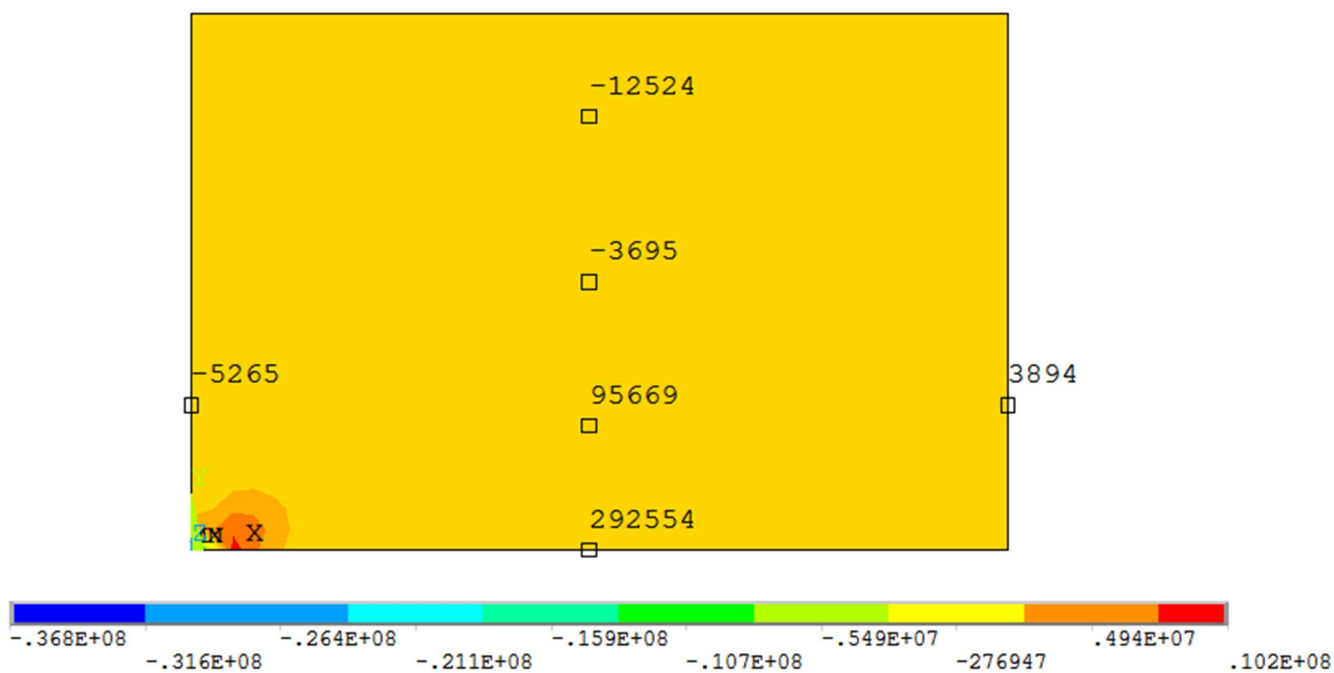


Figura VII.30.- Esfuerzos residuales longitudinales por elementos (TIG)

VII.4.1.- Resultados del análisis TIG 2D Estructural

Al igual que el análisis 3D, se debe de comparar la magnitud de los esfuerzos residuales causados por el proceso de soldadura, la Figura VII.31 muestra el campo causado de esfuerzos residuales cuando se induce la fuente térmica sobre el espécimen.

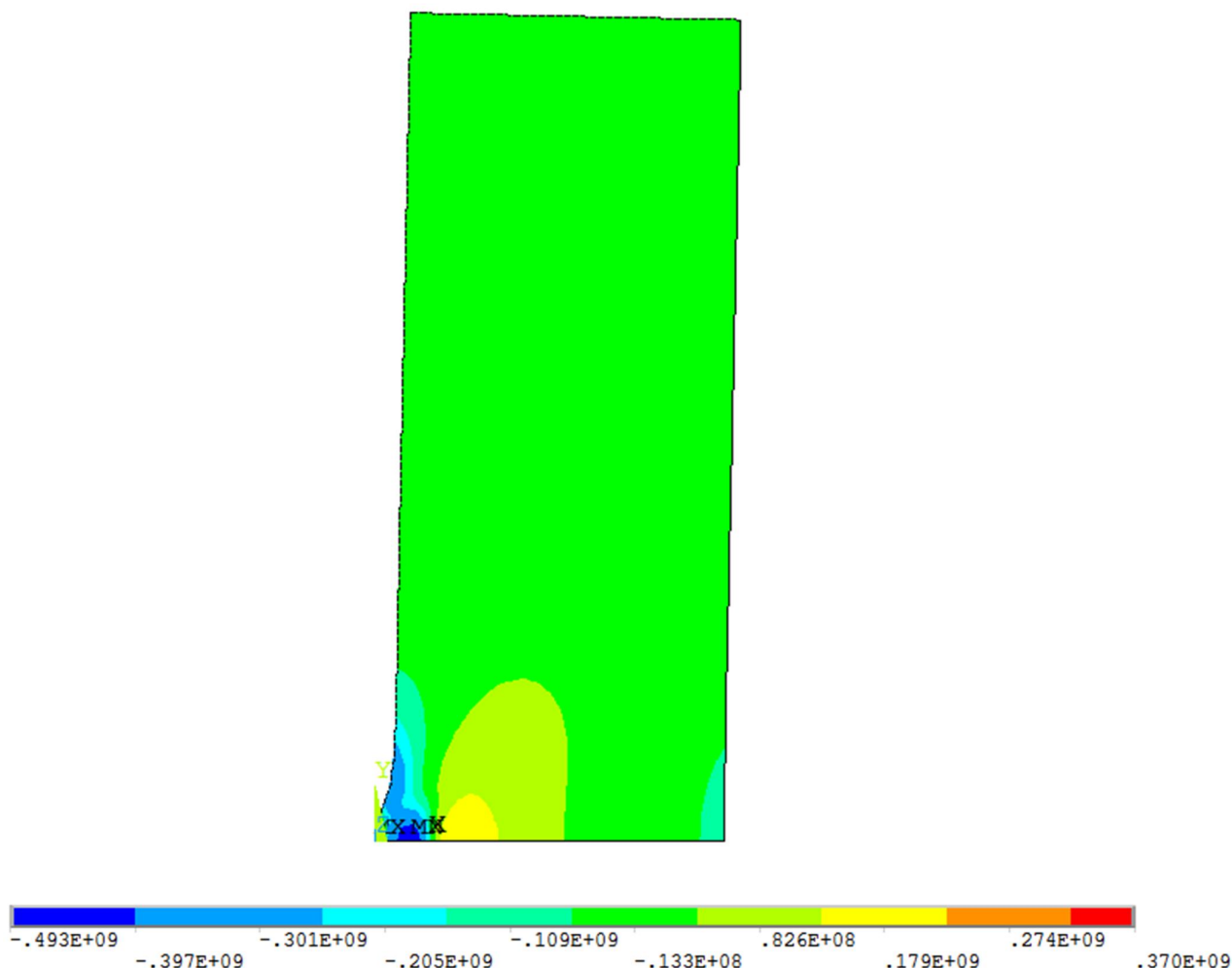


Figura VII.31.- Campo de esfuerzos con fuente térmica TIG 2D

Ansypuede realizar la visualización del campo de esfuerzos residuales, ya sea transversal o longitudinal justo en el momento que el espécimen alcanzo un equilibrio térmico con el medio ambiente. La Figura VII.32 muestra el campo de esfuerzos residuales transversal.

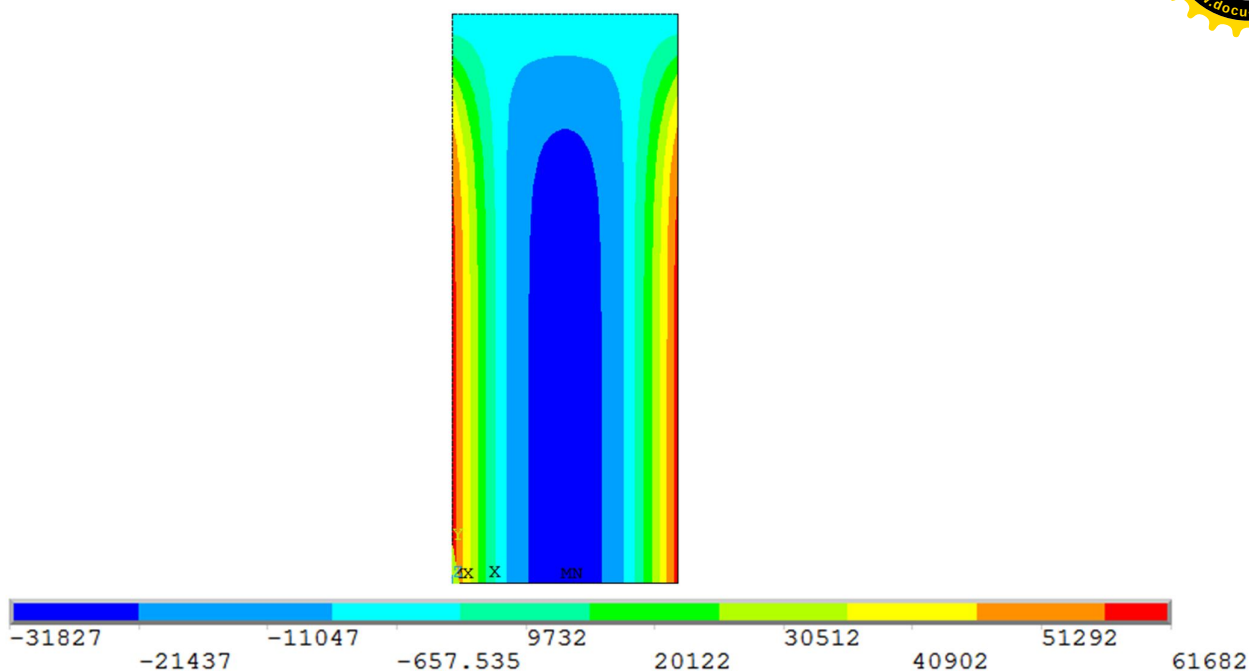


Figura VII.32.- Esfuerzos residuales transversales en el proceso TIG

Y la Figura VII.33 muestra los esfuerzos residuales longitudinales cuando el espécimen esta en equilibrio térmico.

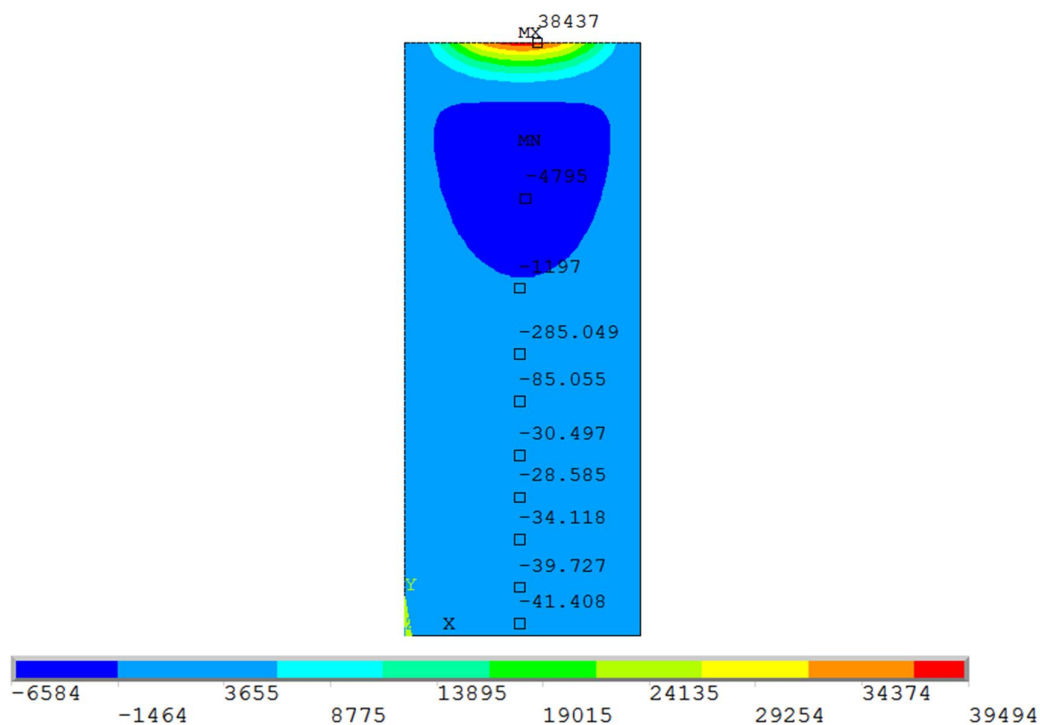


Figura VII.33.- Esfuerzos residuales longitudinales en el proceso TIG

VII.5.- Resultados del análisis MIG 3D

Después de realizar el análisis térmico se procede a realizar el análisis estructural con el objetivo de evaluar la magnitud del campo de esfuerzos, causados por la inducción de elevadas temperaturas. La Figura VII.34 muestra la magnitud de los esfuerzos residuales obtenidos del análisis estructural.

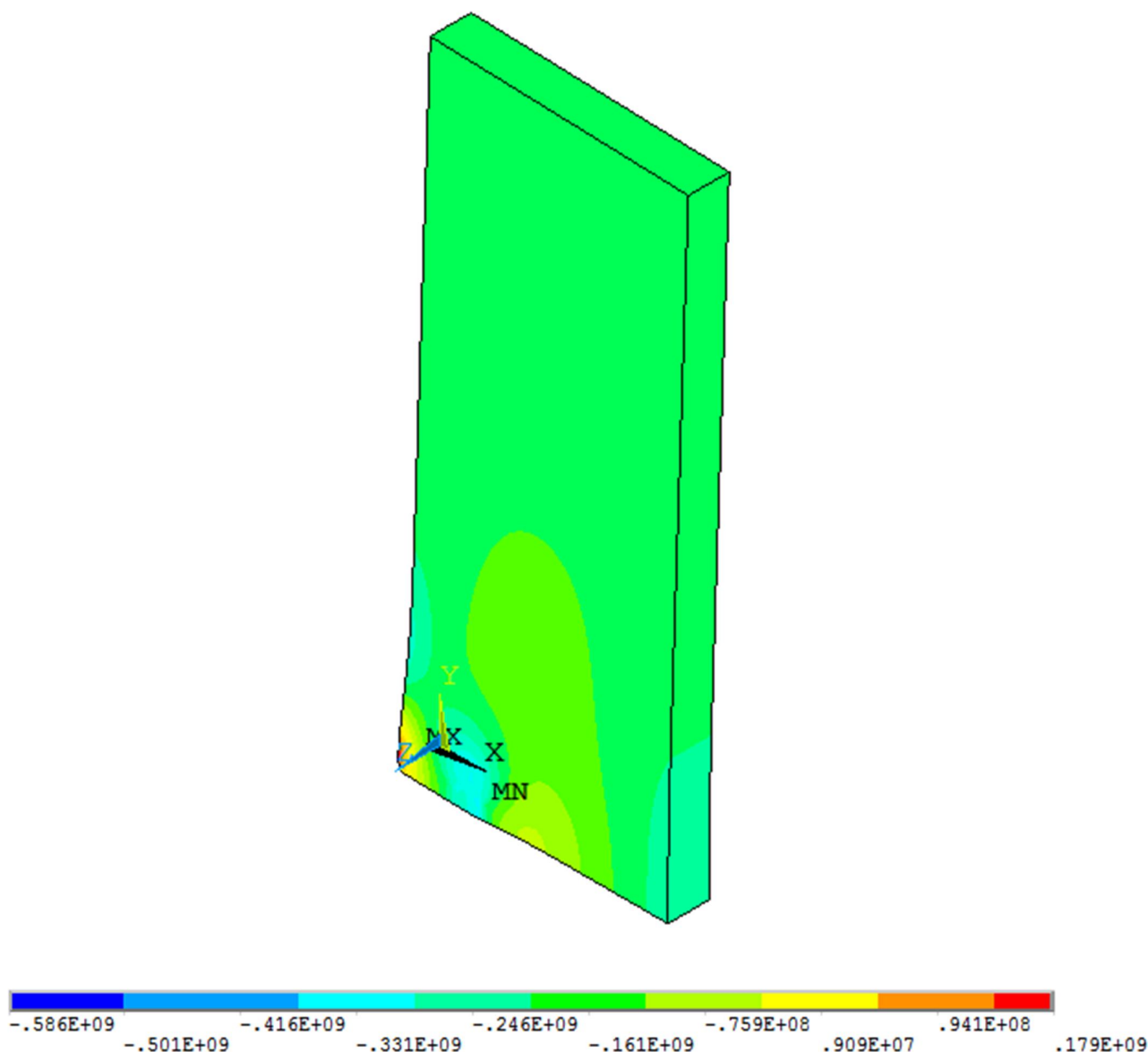
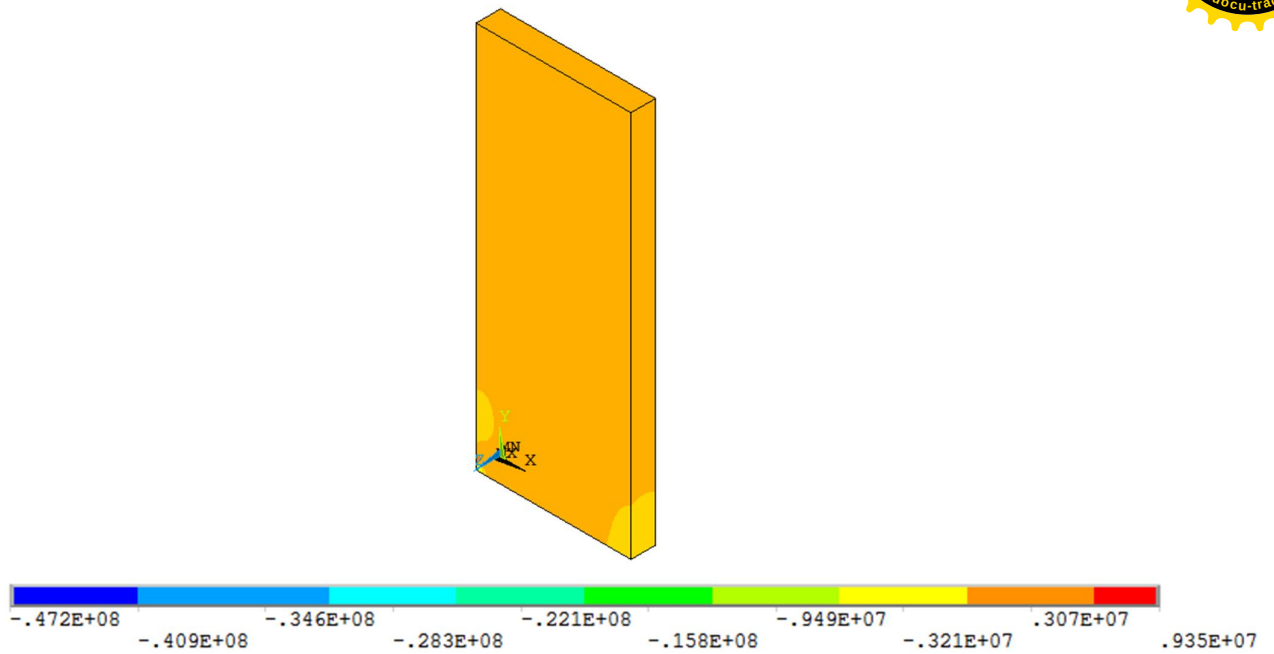


Figura VII.34.- Esfuerzos Transversales MIG

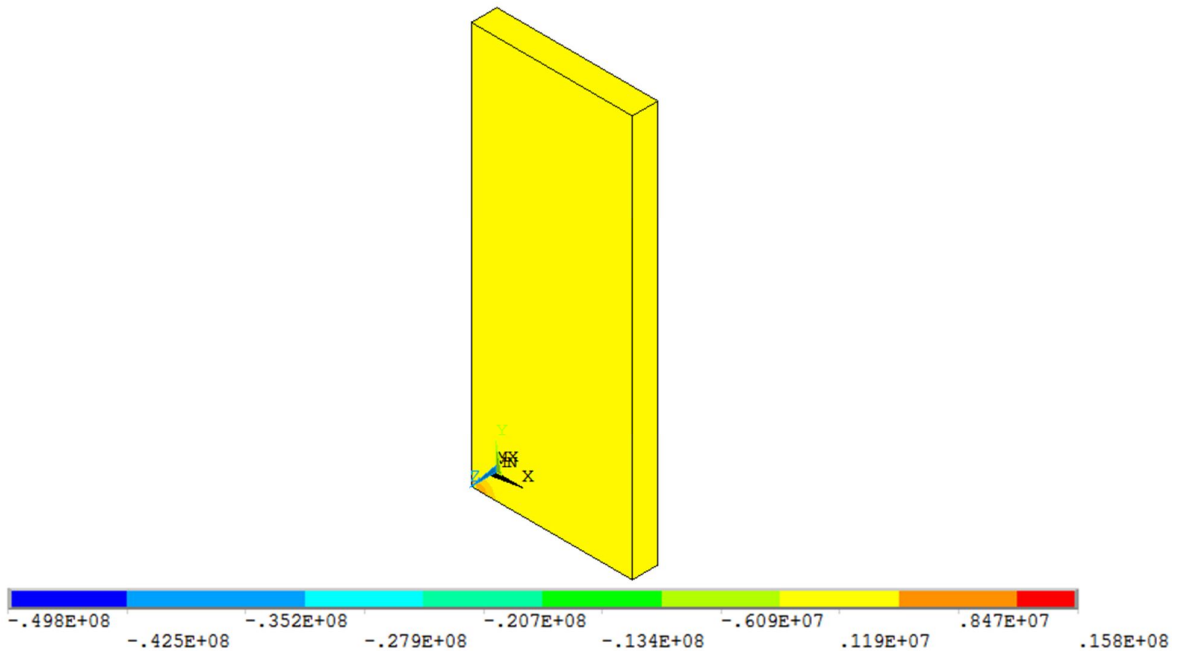
Esta figura muestra el comportamiento de los esfuerzo cuando la fuente térmica aun esta sobre el espécimen, como se comento anteriormente el objetivo es analizar los esfuerzos residuales en el momento que el material se enfría.

A continuación se muestra el campo de esfuerzos residuales (Figura VII.35) transversales, causados por el proceso de soldadura MIG.



FiguraVII.35.- Esfuerzos Residuales transversales MIG

En la Figura VII.36 muestra el campo de esfuerzos residuales longitudinales causados por el proceso MIG.



FiguraVII.36.- Esfuerzos residuales longitudinales MIG 3D

Para poder visualizar el campo de esfuerzos residuales a mayor detalle, se aplica una selección de elemento para poder evaluar el campo con mayor detalle.

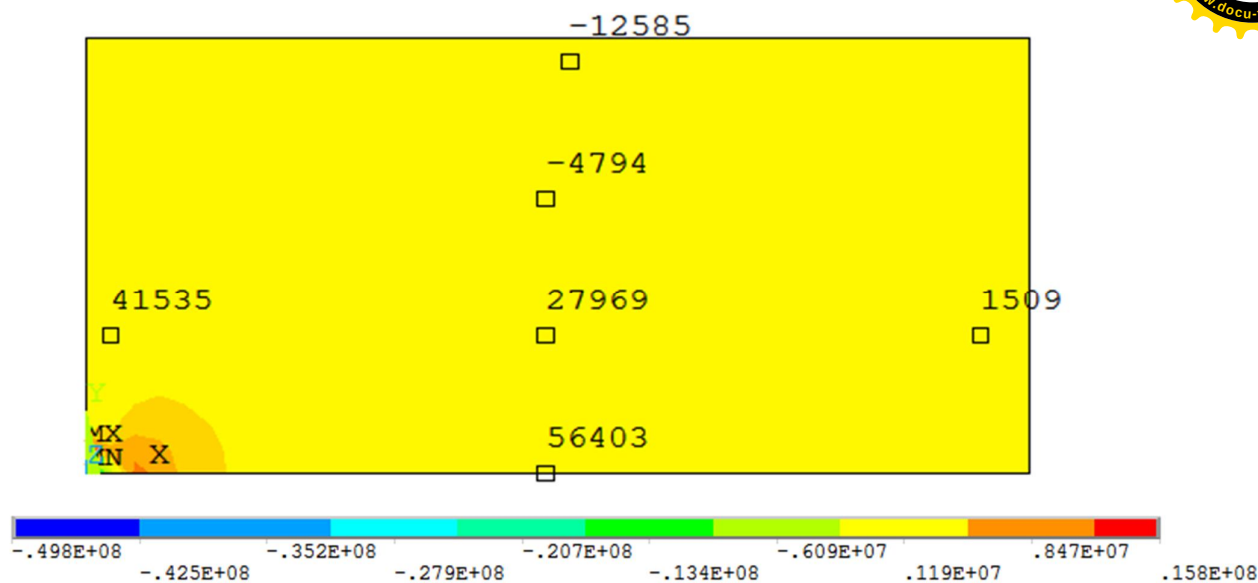


Figura VII.37.- Esfuerzos residuales longitudinales Seleccionados MIG

VII.5.1.- Resultado del análisis estructural MIG 2D

A continuación se presenta la Figura VII.38 la cual muestra la magnitud del campo de esfuerzos en el análisis 2D del proceso de soldadura MIG, cuando aun la fuente térmica no se retira del espécimen.

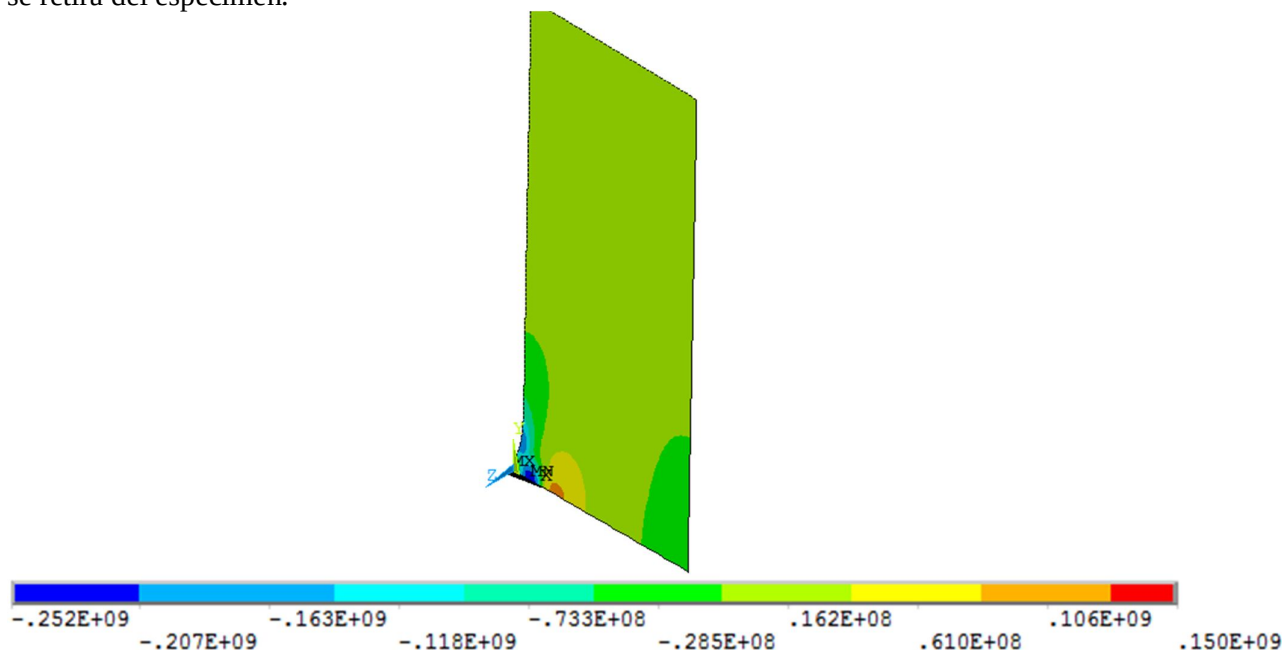


Figura VII.38.- Primer paso de carga en el análisis estructural MIG 2D

Al evaluar el proceso en el último paso de carga en el análisis estructural se puede apreciar el siguiente campo de esfuerzos residuales transversales (Figura .39).

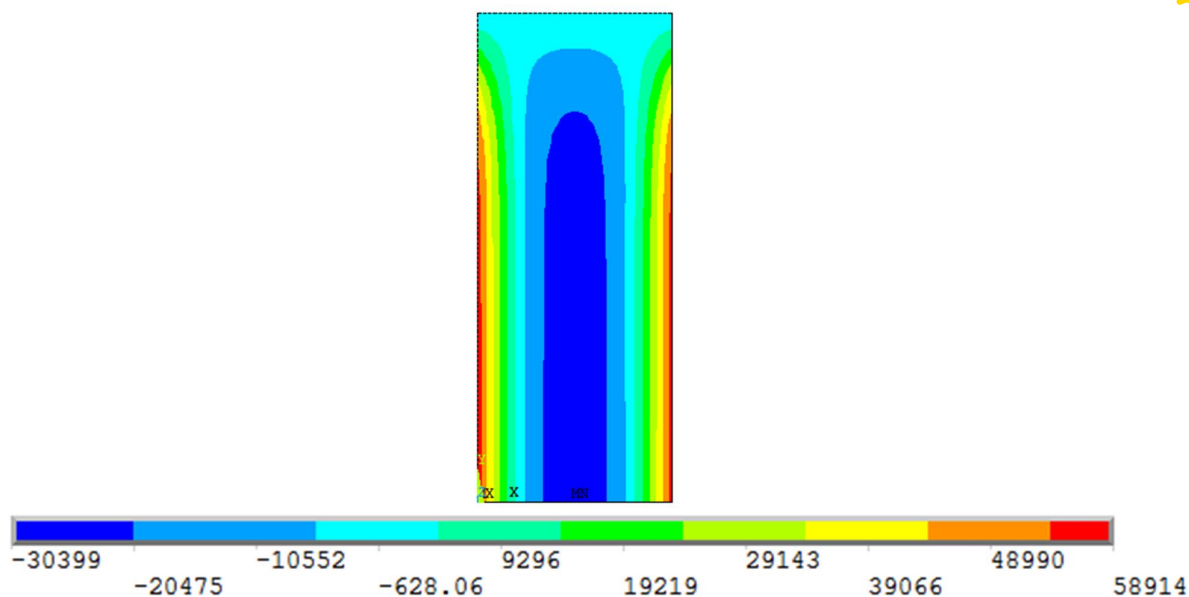


Figura VII.39.- Esfuerzos residuales transversales MIG 2D

A continuación se muestra los esfuerzos residuales longitudinales en el proceso de soldadura MIG 2D, cuando el espécimen alcanza la temperatura ambiente.

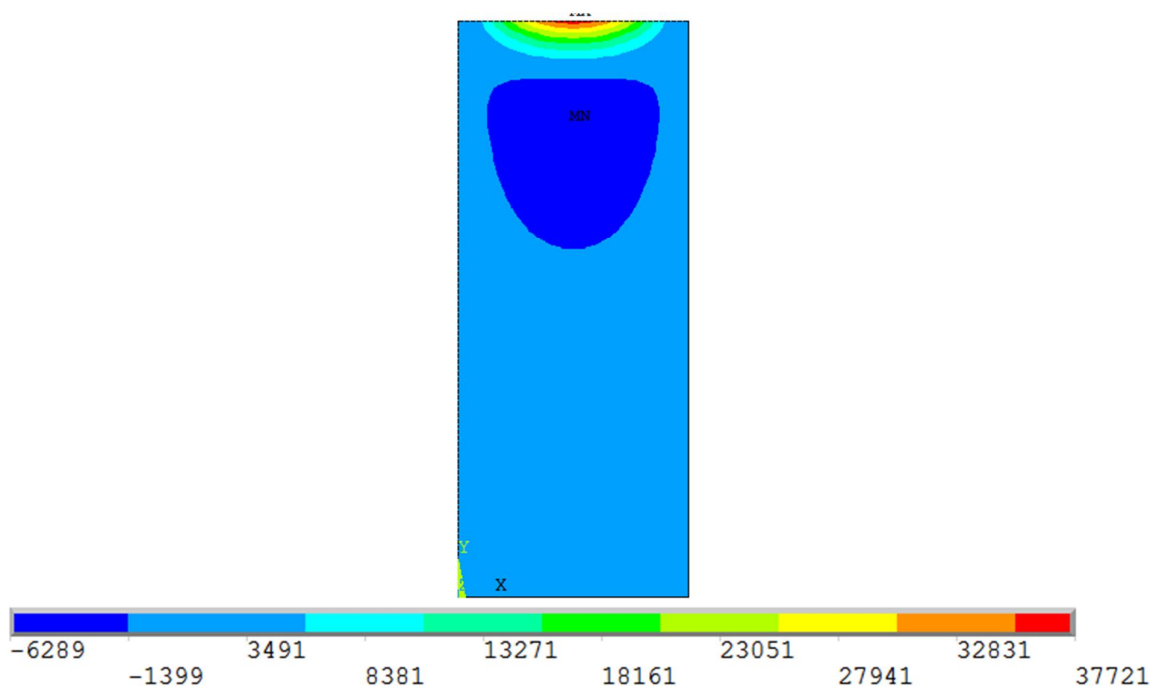


Figura VII.40.- Esfuerzos residuales longitudinales MIG 2D

Al seleccionar los elementos en la parte inferior del espécimen con el objetivo de obtener un mejor detalle de los resultados, la Figura VII.41 muestra la distribución y el valor de los resultados.

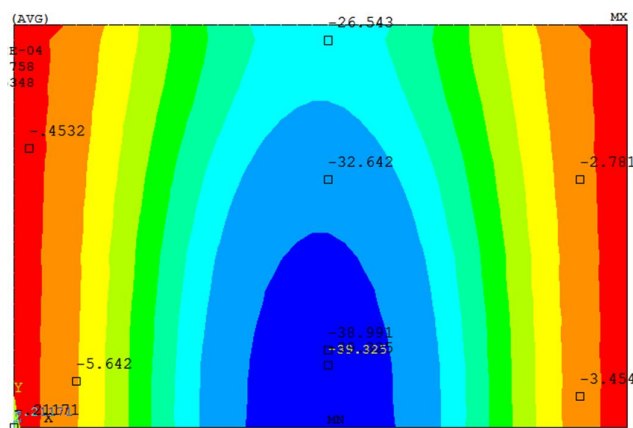


Figura VII.41.- Elementos seleccionados para mejorar apreciación de resultados longitudinales

VII.6.- Resultados del análisis estructural Láser 3D

En el análisis estructural del proceso de soldadura por rayo laser, muestra los siguientes resultados, cuando aún cuenta con la fuente térmica.

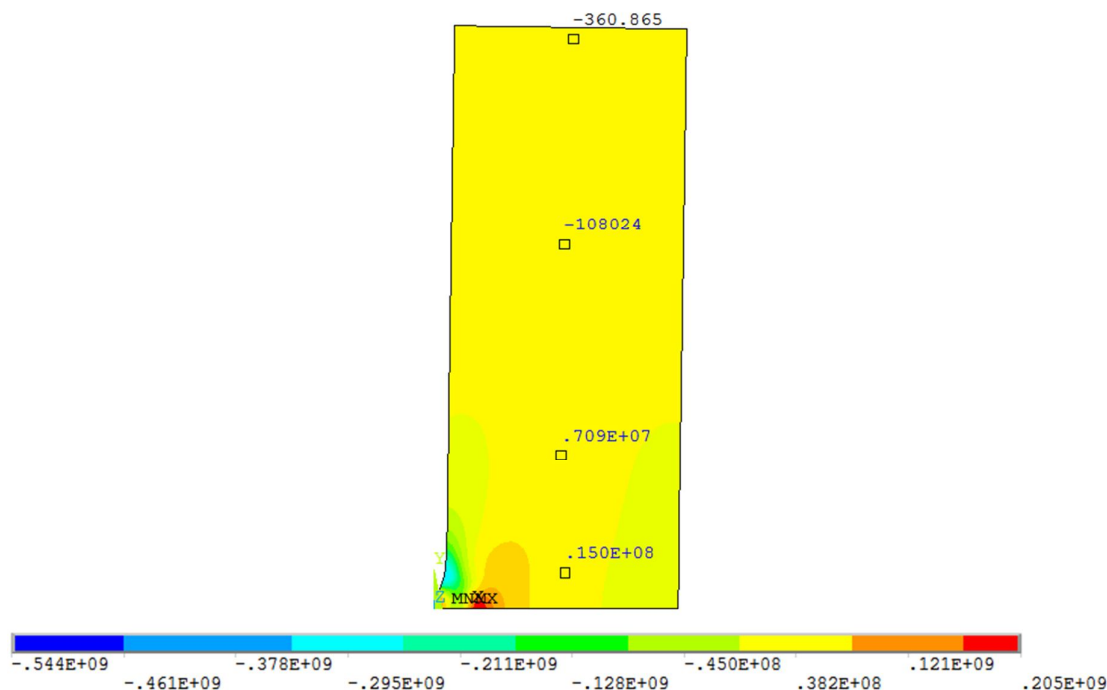


Figura VII.42.- Primer paso de carga para el análisis Láser

Es importante el poder observar el campo de esfuerzos residuales causados por la inducción de altas temperaturas, la Figura VII.43 muestra el campo de esfuerzos del tipo transversal

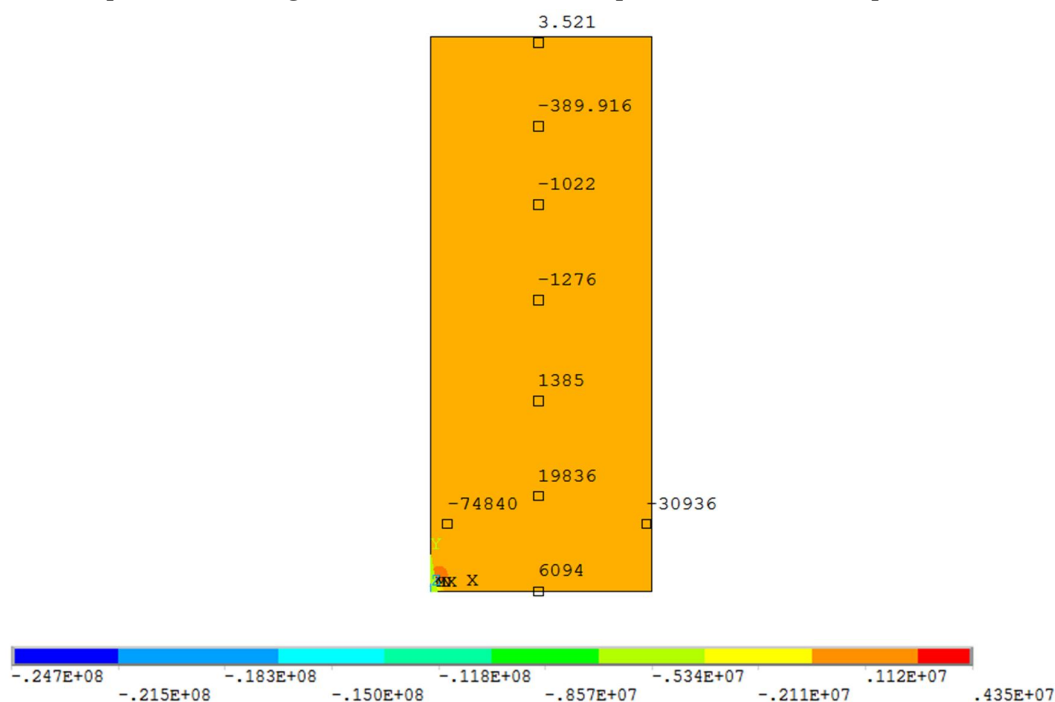


Figura VII.43.- Campo de esfuerzos residuales en análisis láser transversales

La Figura VII.44 muestra el campo de esfuerzos en ese mismo paso del análisis con la variante de esfuerzos longitudinales

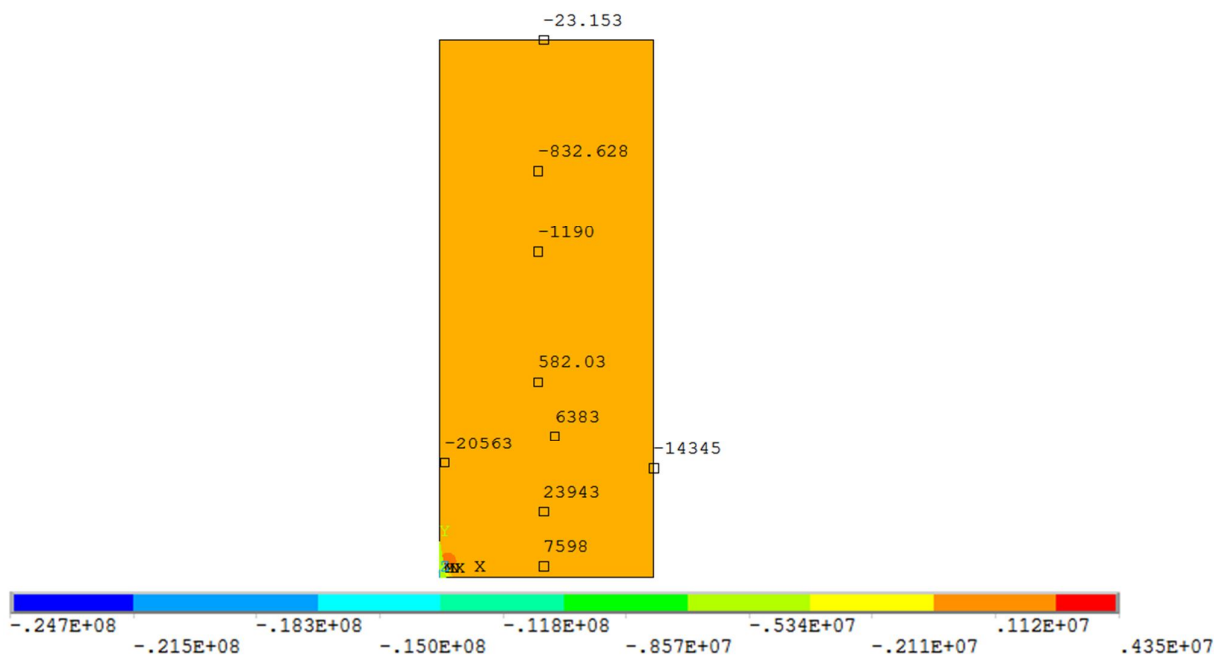


Figura VII.44.- Esfuerzos longitudinales en el proceso Láser

VI.I.6.1.- Resultados en el análisis Láser 2D

Primer paso de carga para el análisis láser 2D, la siguiente figura muestra la magnitud de esfuerzos en el proceso de soldadura.

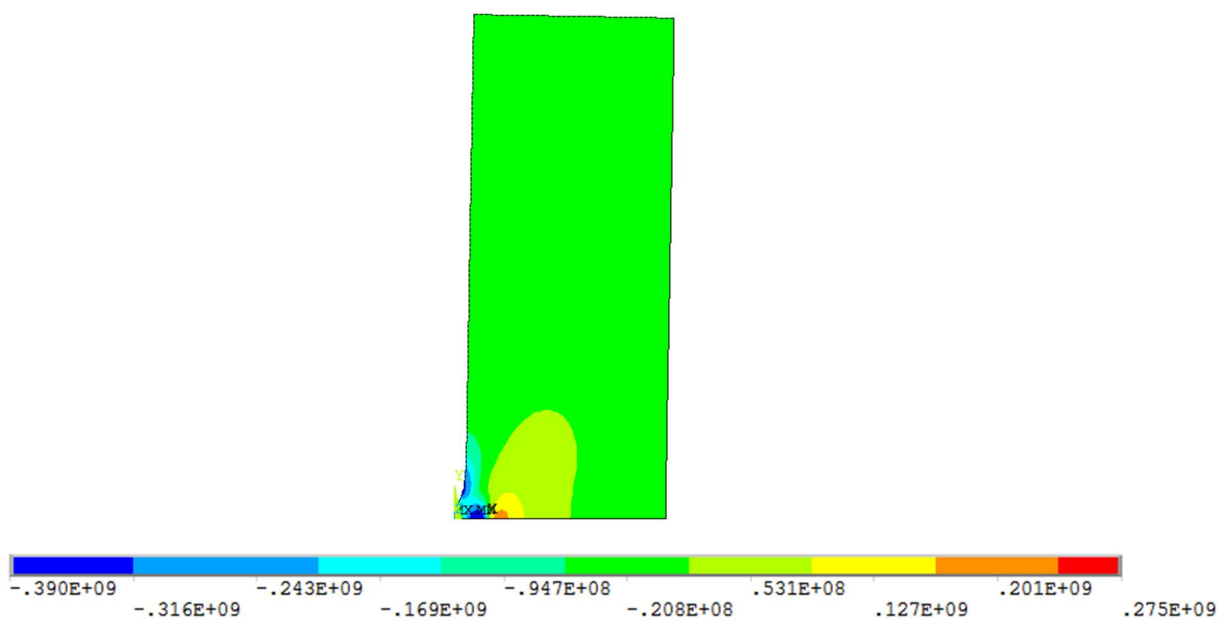


Figura VII.45.- Esfuerzos del proceso laser con fuente térmica 2D

Después de alcanzar la temperatura ambiente, en este momento se puede considerar la existencia de esfuerzos residuales como lo muestra la Figura VII.46.

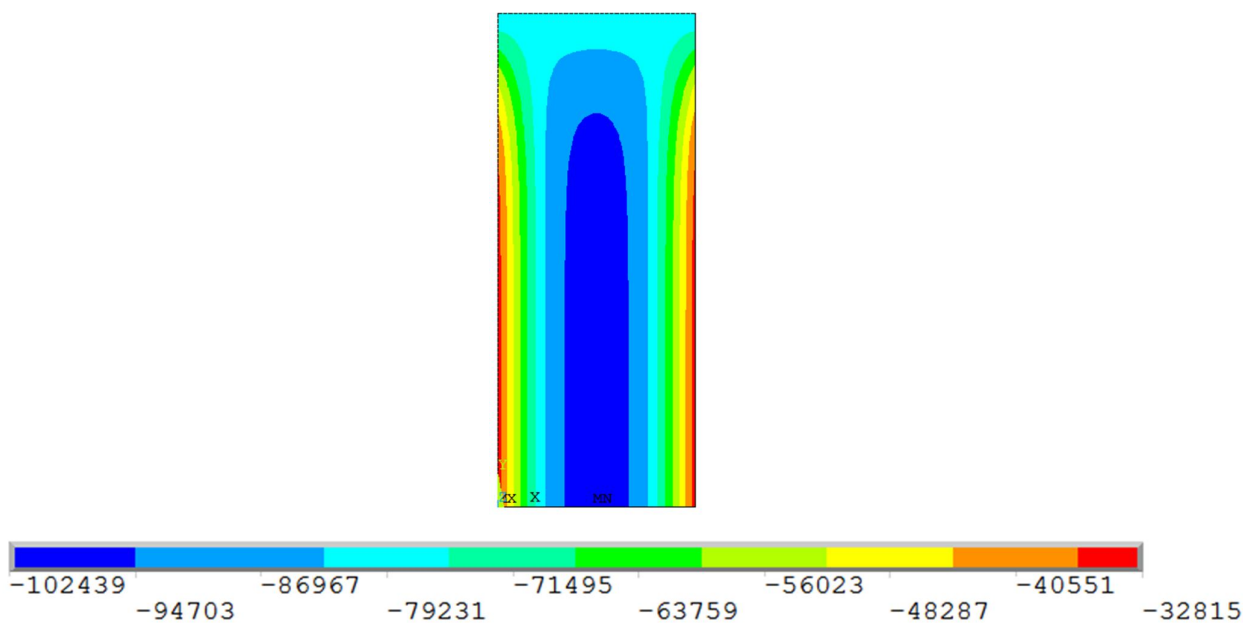


Figura VII.46.- Esfuerzos residuales transversales del proceso Láser

A continuación en la Figura VII.47, se muestran los esfuerzos residuales longitudinales en el proceso de soldadura Láser.

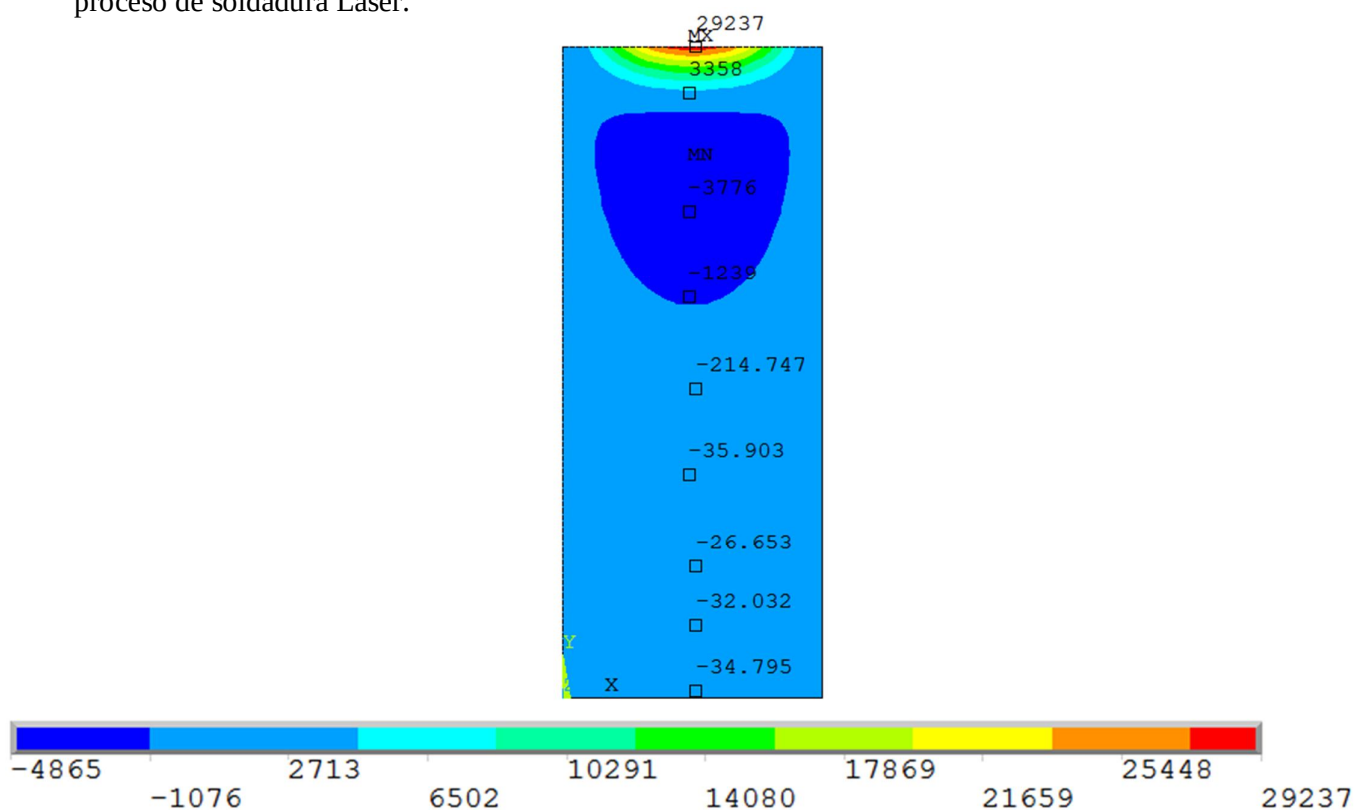


Figura VII.47.- Esfuerzos residuales longitudinales análisis Láser 2-D

La Figura VII.48 muestra un acercamiento al espécimen al seleccionar elementos, lo cual permite observar con mayor detalle los resultados obtenidos.

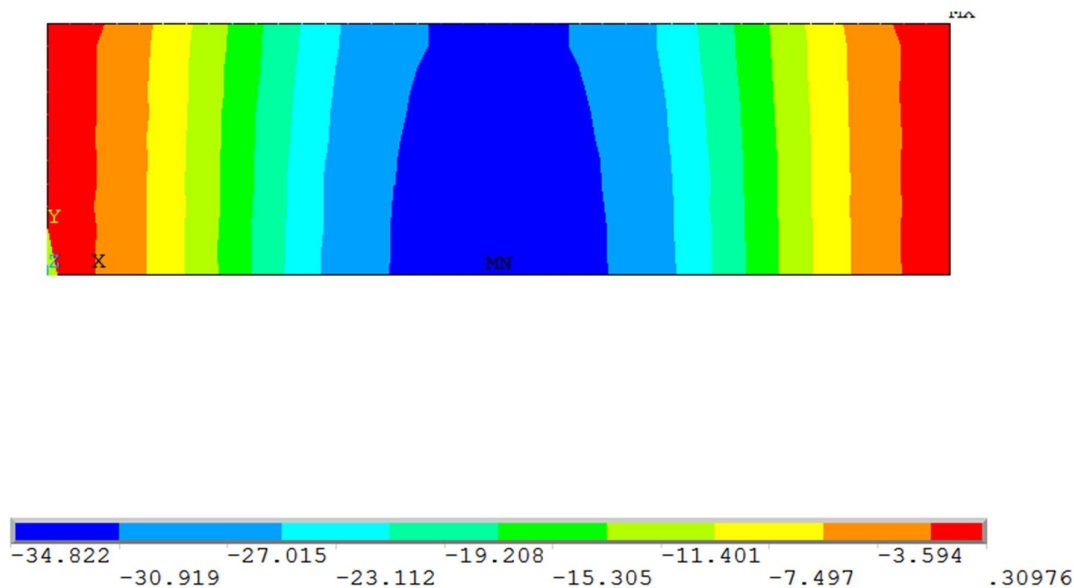
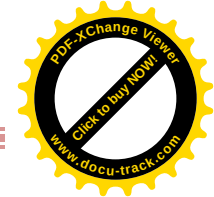
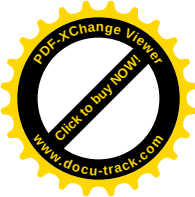


Figura VII.48.- Esfuerzos residuales de elementos seleccionados Láser 2D



En un pequeño resumen de los resultados obtenidos en los análisis estructurales, se puede resumir lo siguiente:

Tabla VII.1.- Resultados análisis TIG

Esfuerzos residuales TIG 3D	Esfuerzos residuales TIG 2D
Valor transversal -34.7 MPa, 97.6 MPa	Valor transversal -31,827, 61,682 (Pa)
Valor longitudinal -36.8 MPa, 102 MPa	Valor longitudinal -6584, 39,494 (Pa)
Selección de elementos	Selección de elementos
Longitudinales -14,644, 2483 (Pa)	Longitudinal -1466 – 3654(Pa)

Para el análisis de soldadura MIG se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla VII.2.- Resultados análisis MIG

Esfuerzos residuales MIG 3D	Esfuerzos residuales MIG 2D
Valor transversal -49.8 MPa – 15.8 MPa	Valor transversal 30,399 – 58914 (Pa)
Valor longitudinal -6.09 MPa – 1.19 MPa	Valor longitudinal -6289 – 37721 (Pa)
Selección de elementos	Selección de elementos
-1399, 3491 (Pa)	-21171, -26.54 (Pa)

En los análisis del proceso de soldadura se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla VII.3.- Resultados análisis Láser

Esfuerzos residuales Láser 3D	Esfuerzos residuales Láser 2D
Valor transversal -24.8 MPa, 4.35 MPa	Valor transversal -102,439 Pa, -32815 Pa
Valor longitudinal -24.7 MPa, 4.35 MPa	Valor longitudinal -4865 Pa, 29237 Pa
Selección de elementos	Selección de elementos
-20,563, 23943(Pa)	-4865, 29237 (Pa)

VII.7.- Resultados del método de respuesta de grieta en ambas metodologías

Para poder evaluar los resultados obtenidos en el análisis numérico es necesario poder comparar los resultados con un método experimental. Al realizarlo se encontraron los siguientes resultados:

VII.7.1.- Método de respuesta de grieta en Ansys TIG

Para el análisis TIG del tipo numérico se realizó la inducción del corte tanto en los modelos 3D y 2D, y la grafica obtenida no representaba una grafica polinomial del sexto orden, para

todos los casos (3D y 2D). A continuación se muestra la Figura VII.49 muestra la tendencia de las gráficas en cualquier caso de estudio.

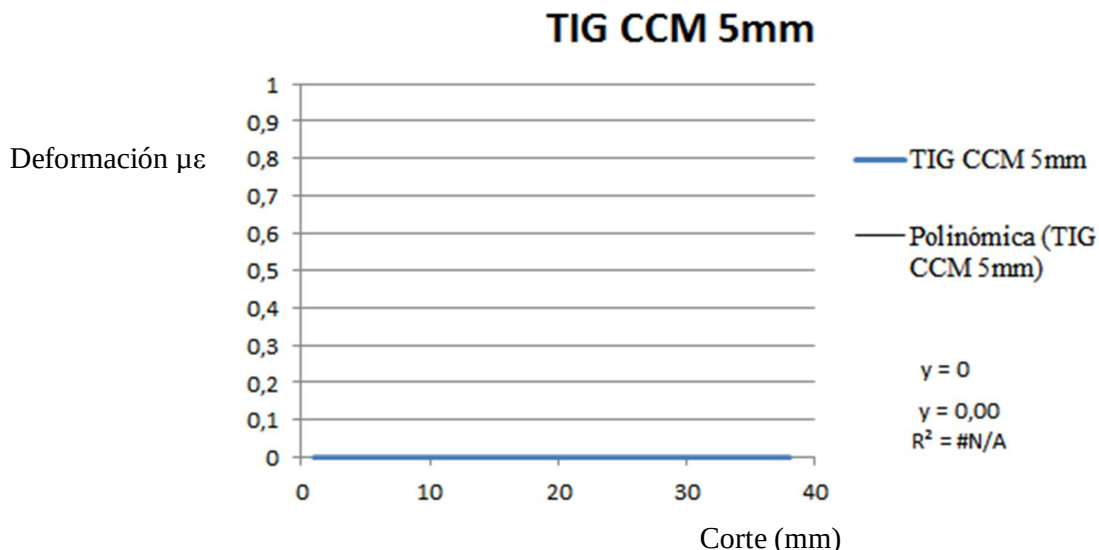


Figura VII.49.- Resultados del análisis numérico TIG CCM 2D y 3D 5 mm

Al inducir el corte en *Ansys* simulando la eliminación de elementos, se pudo observar que las microrelajaciones son de una magnitud muy pequeña por lo cual al realizar la grafica deformación Vs corte, esta se comportaba de forma lineal. La Figura VII.50 muestra la grafica obtenida en el método de respuesta de grieta a 7 mm del cordón de soldadura.

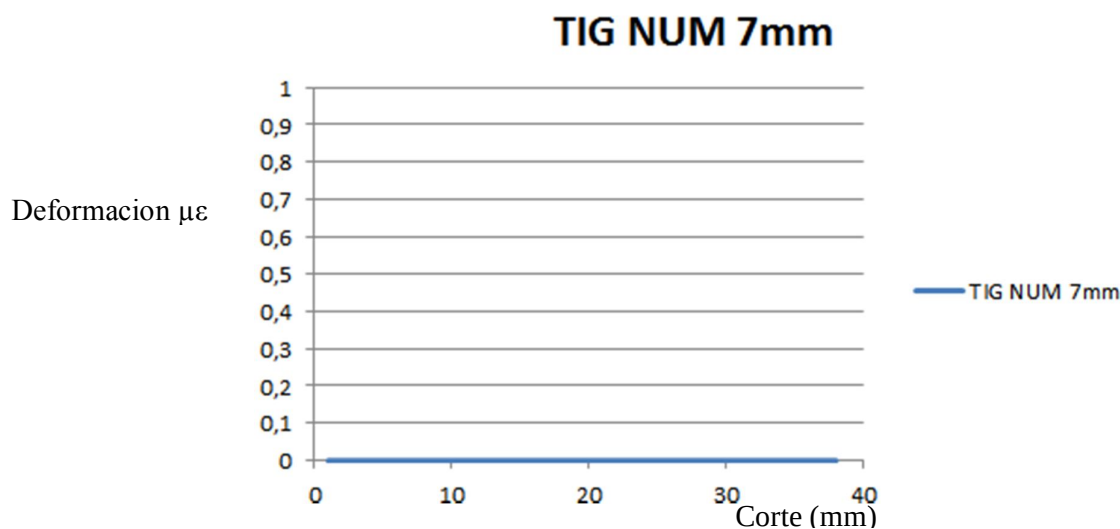


Figura VII.50.- Resultados del análisis TIG CMM 2-D y 3-D numérico

VII.7.2.- Resultados del análisis experimental CCM TIG

Se debe resaltar que estos resultados se encontraron en ambos análisis (2D y 3D), al realizarla gráfica obtenida por el método experimental, después de inducir un corte controlado a las probetas, utilizando el método de corte por electroerosión, por lo cual se pudieron obtener las siguientes imágenes que muestran el reacomodo del material a causa de los esfuerzos residuales.

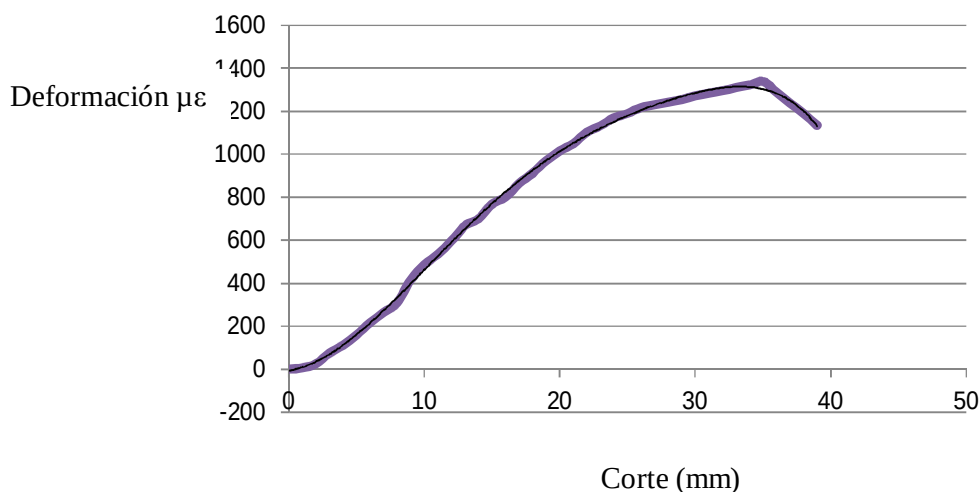


Figura VII.51.- Resultados en el método CCM experimental TIG 3 mm

Al realizar estas graficas, se deben de modificar en la línea de trazado, con la modalidad delinea polinomial de sexto orden, después se obtiene una ecuación de la grafica a la cual se le debe de modificar el formato de etiqueta a la línea de tendencia del tipo numérico, esta modificación a la ecuación del sexto orden permite que los datos se puedan ingresar a un programa desarrollado en plataforma FORTRAM, el cual en este tema de investigación se considerará como una caja negra, es decir se ingresan datos al programa, este los procesara y al termino entregara los resultado en un block de texto, estos resultados se graficaran en función de 9 resultados en cada block de notas.

A continuación se muestran las graficas restantes obtenidas en el análisis experimental CCM, en el proceso de soldadura TIG.

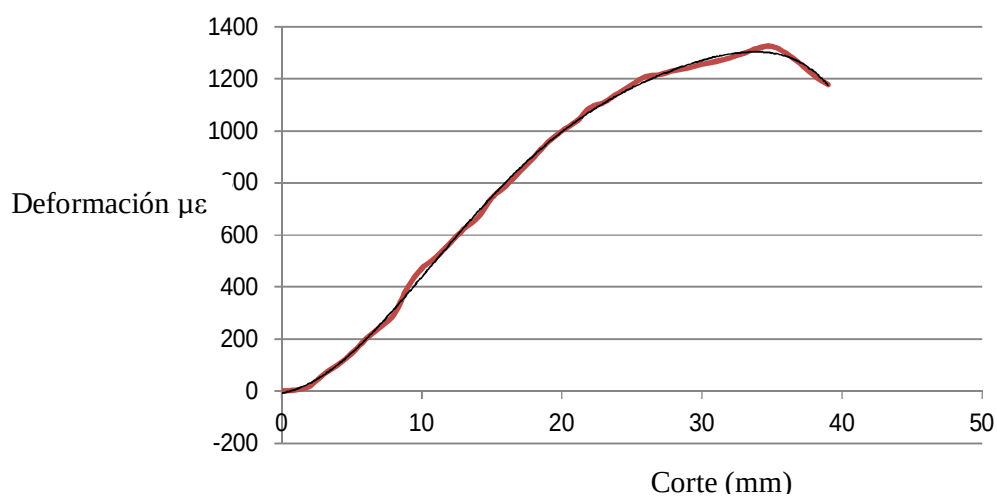


Figura VII.52.- Resultado del método CCM TIG 5 mm experimental

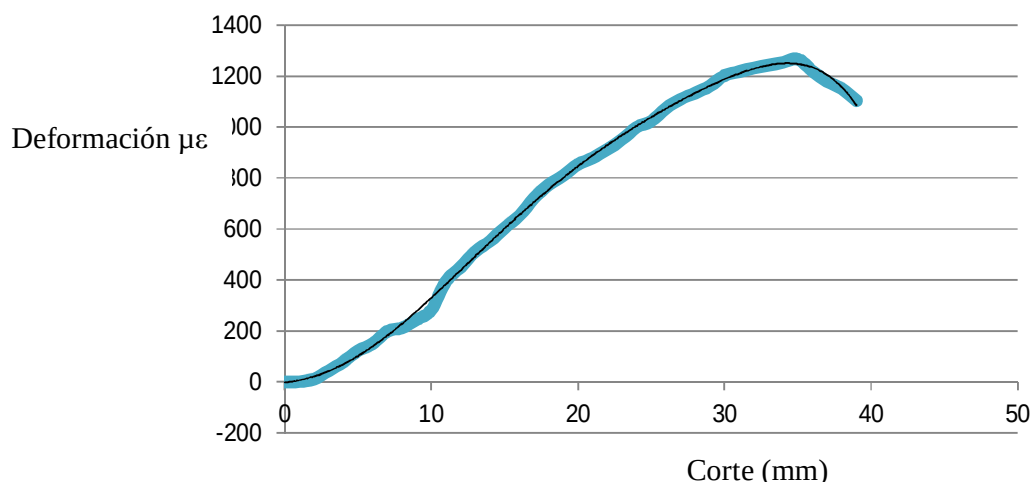


Figura VII.53.- Resultado del método CCM TIG 7 mm experimental

A continuación se muestra una grafica comparativa entre los tres casos de estudio para este proceso de soldadura, la cual muestra la relación corte vs microrelajación.

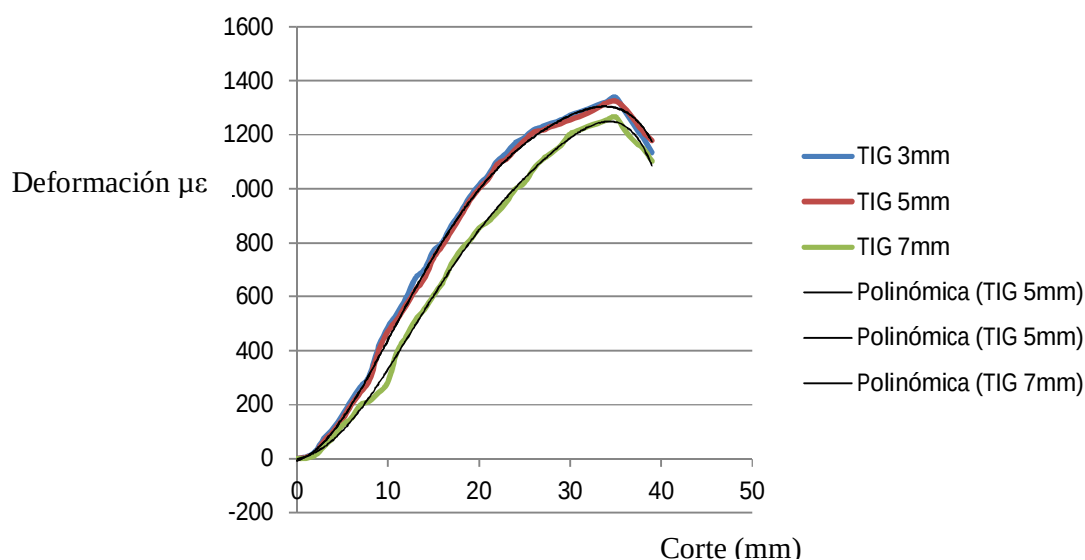


Figura VII.54.- Resultado del método CCM TIG

Para el método respuesta de grieta en el proceso de soldadura MIG, se fenómeno que en el proceso TIG, por lo cual los resultados en elemento finito se resumen en una sola grafica ya que estos no aportan resultados relevantes.

Los resultados obtenidos del análisis experimental después de obtener la ecuación de sexto orden y utilizar el programa en plataforma FORTRAM, son los siguientes:

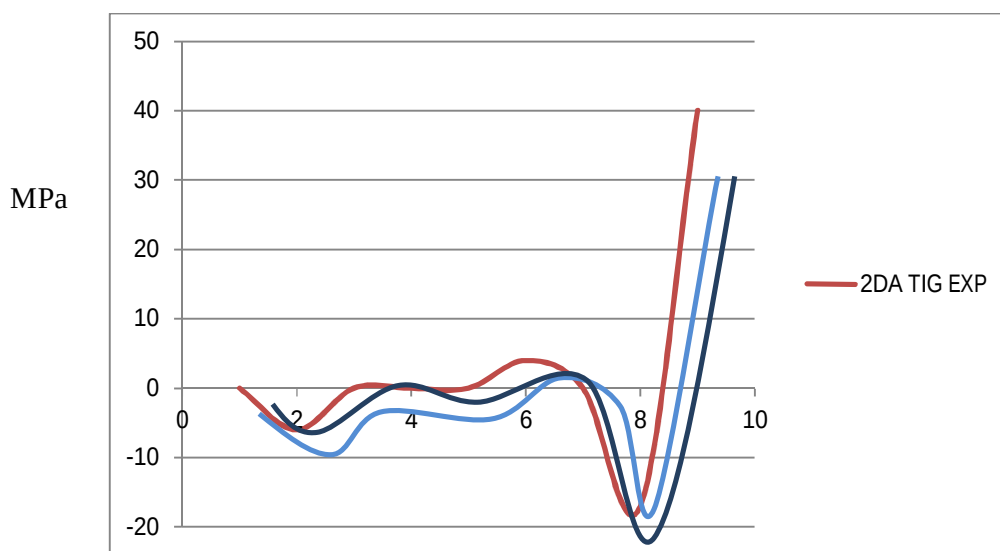


Figura VII.55.- Resultados obtenidos del programa FORTRAM TIG 3mm

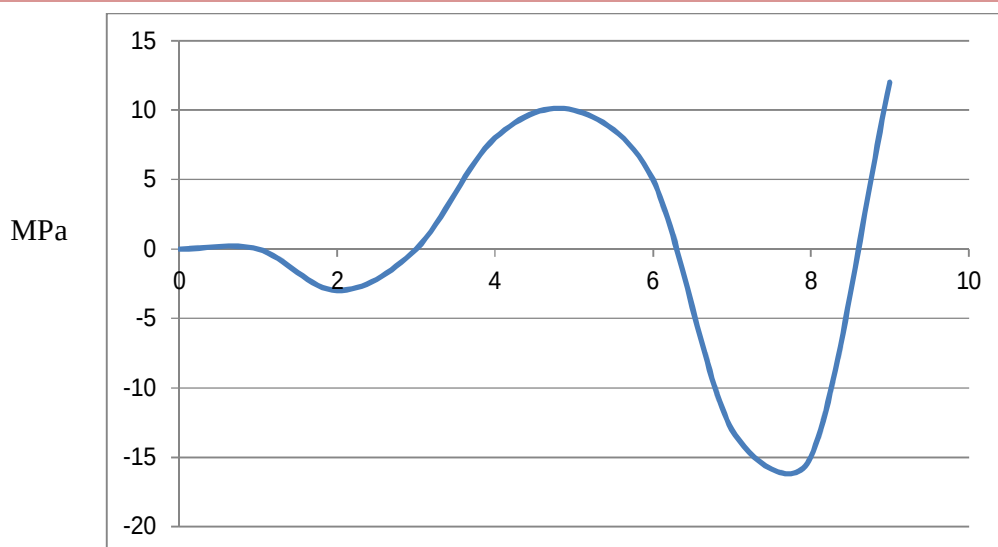


Figura VII.56.- Resultados obtenidos del programa FORTRAM TIG 5mm

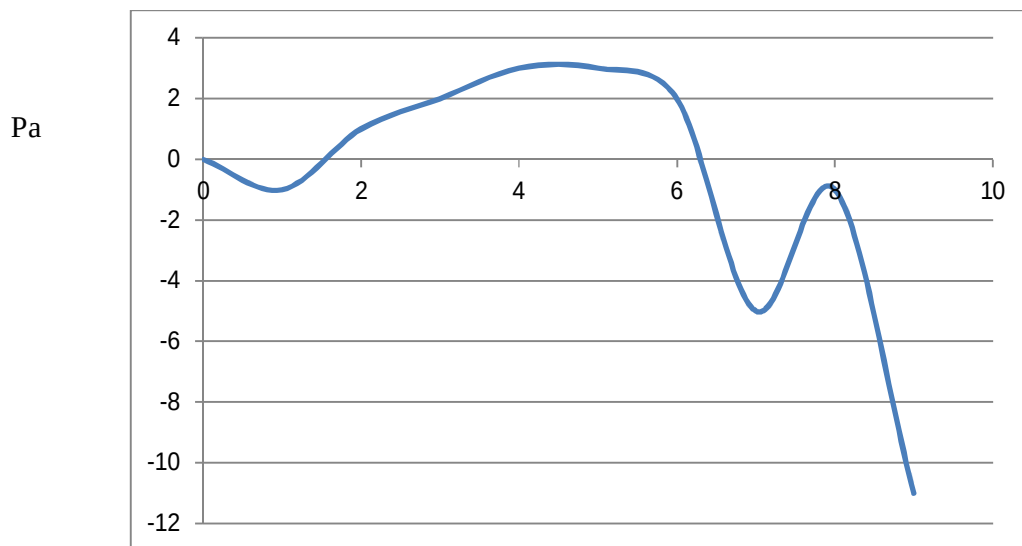


Figura VII.57 Resultados obtenidos por el programa FORTRAM TIG 7mm

Es de suma importancia el realizar una grafica que implique los tres casos de estudio, con el objetivo de realizar comparaciones, sobre la variación de los esfuerzos residuales, en función de la distancia de la zona afectada térmicamente.

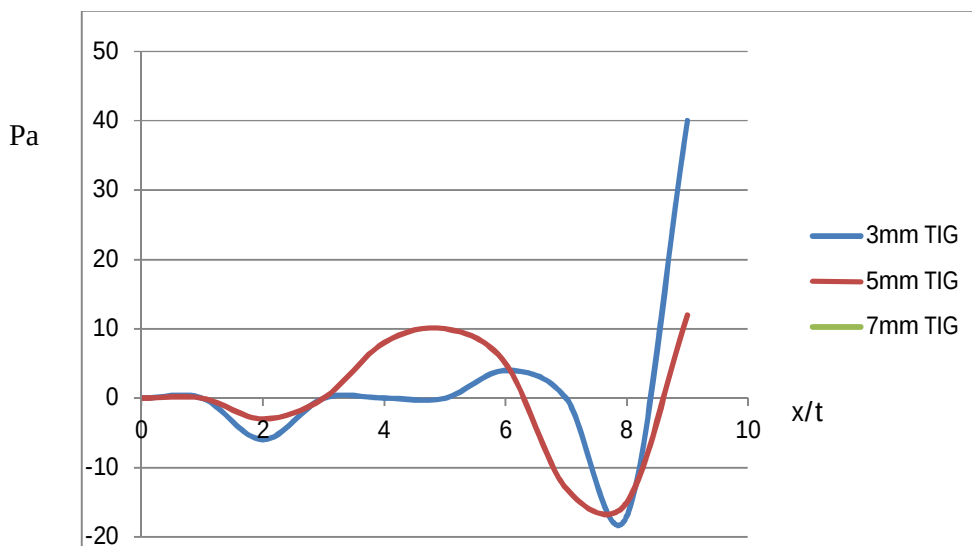


Figura VII.58.- Comparación de resultados CCM TIG

VII.7.3.- Resultados del análisis CCM numérico MIG

Al igual que en el análisis numérico TIG al inducir el corte por la eliminación de elementos se obtuvo la siguiente grafica:

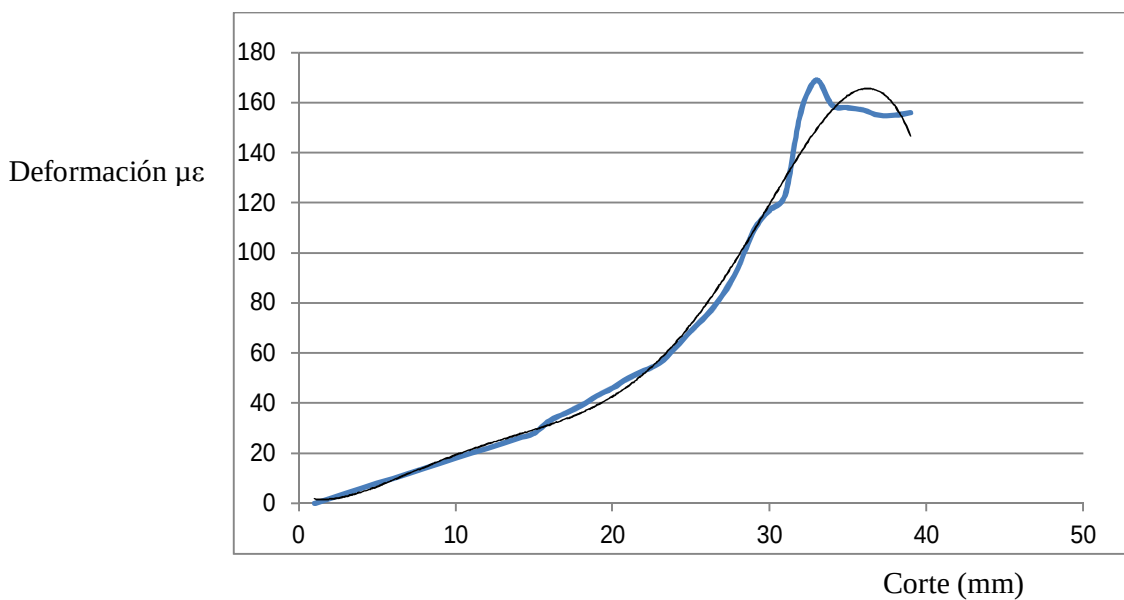


Figura VII.59.- Grafica obtenida del análisis numérico MIG 2-D 3mm

Después de realizar la grafica, se debe de realizar una línea de tendencia del tipo polinómica y a su vez la ecuación de la línea, esta ecuación del sexto orden se ingresa al programa con plataforma FORTRAM, y este no responde ya que no genera ningún tipo de resultado. Esto ocurre tanto para los casos de estudio en 2-D y 3D.

VII.7.4.- Resultados del análisis experimental CCM MIG.

Las graficas obtenidas de la relación Deformación-Corte se presentan a continuación:

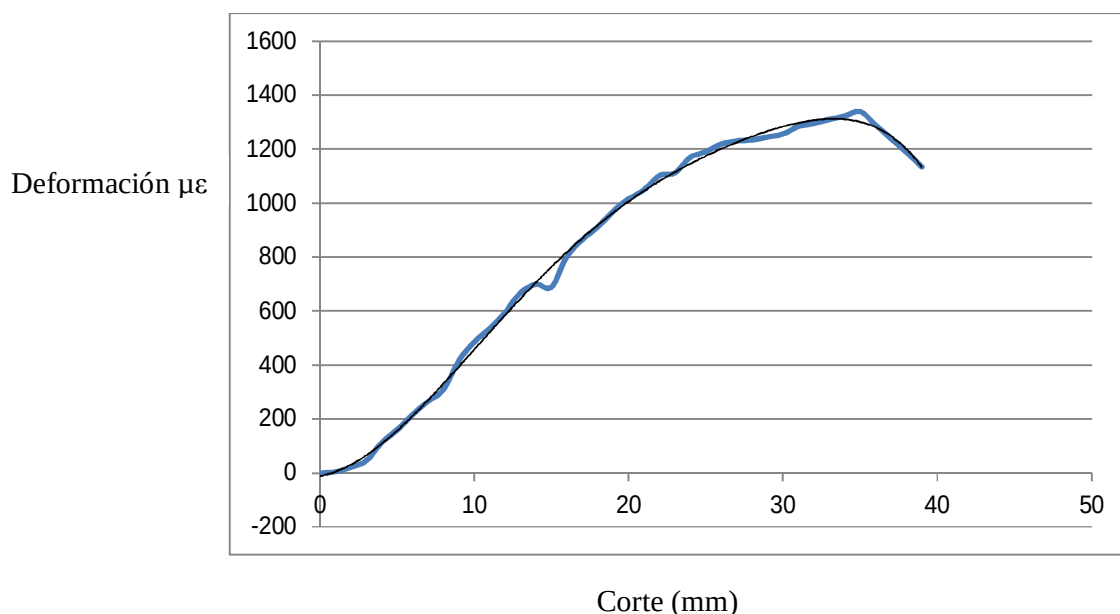


Figura VII.60.- Resultado del corte por electroerosión MIG 3mm

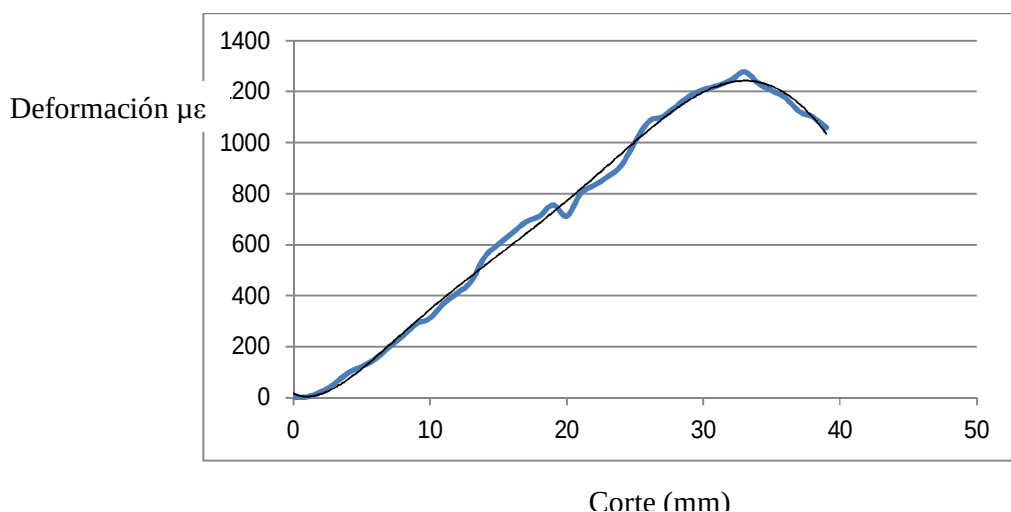


Figura VII.61.- Resultado del corte por electroerosión MIG 5mm

Deformación $\mu\epsilon$

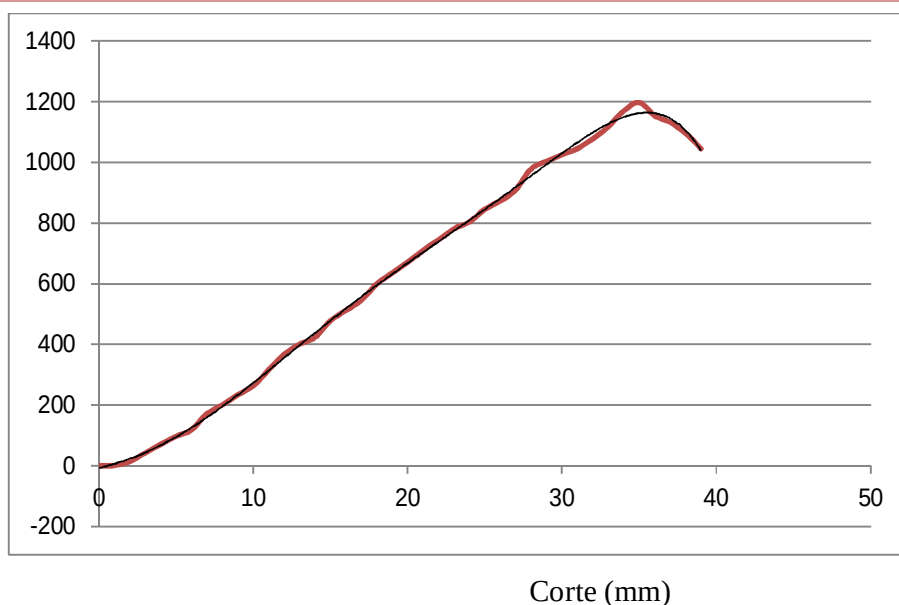


Figura VII.62.- Resultado del corte por electroerosión MIG 7mm

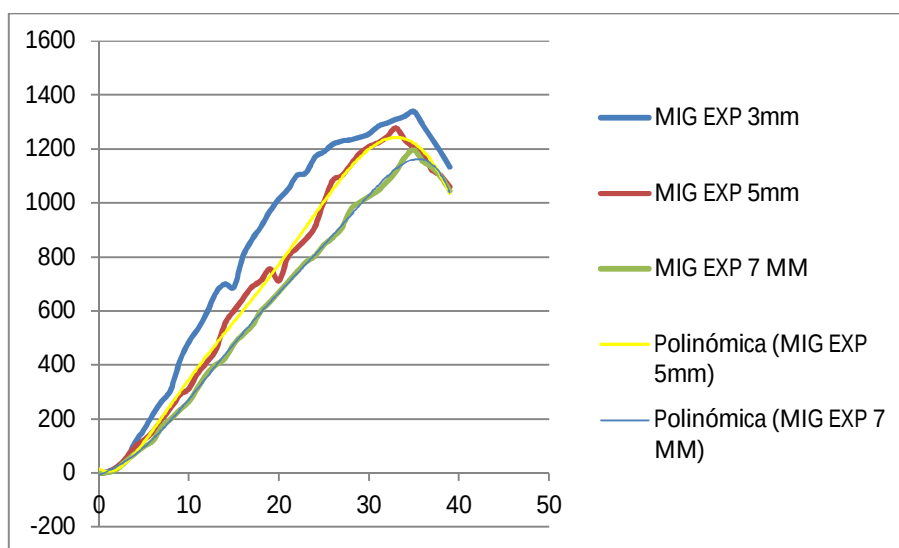


Figura VII.63.- Comparación de los tres casos de estudio

Después de obtener las graficas se introducen las ecuaciones de sexto orden al programa con plataforma FORTRAM, lo que permite obtener el campo de esfuerzos residuales. La figura VII.64 muestra el campo de esfuerzos residuales en la probeta soldada con MIG, y evaluada a tres milímetros del cordón de soldadura.

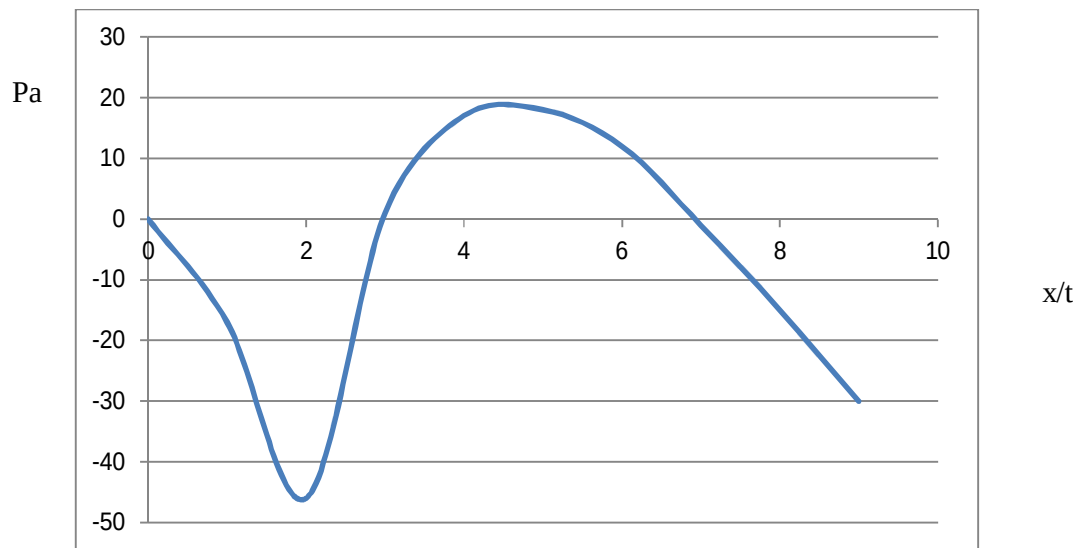


Figura VII. 64.- Campo de esfuerzos residuales en la probeta MIG 3mm

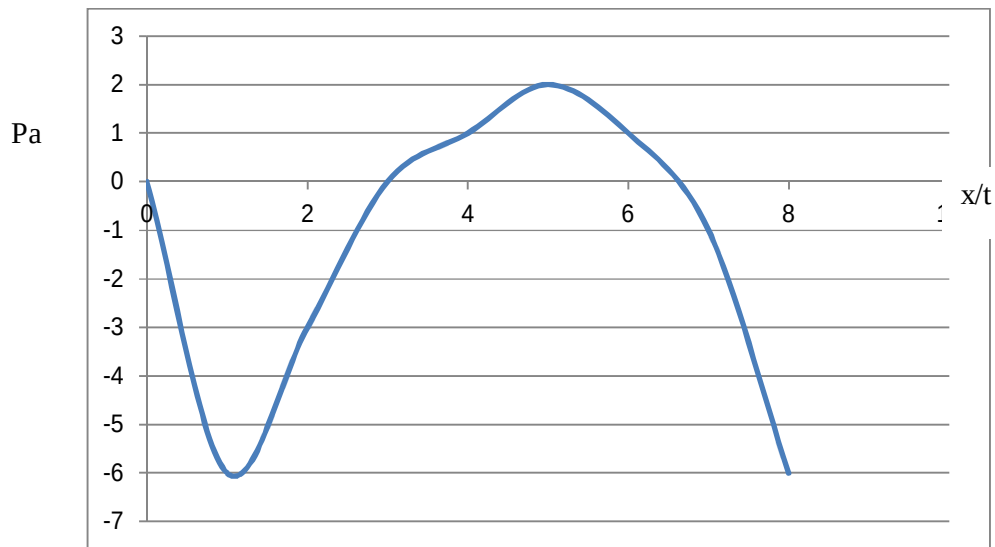


Figura VII. 65.- Campo de esfuerzos residuales en la probeta MIG 5mm

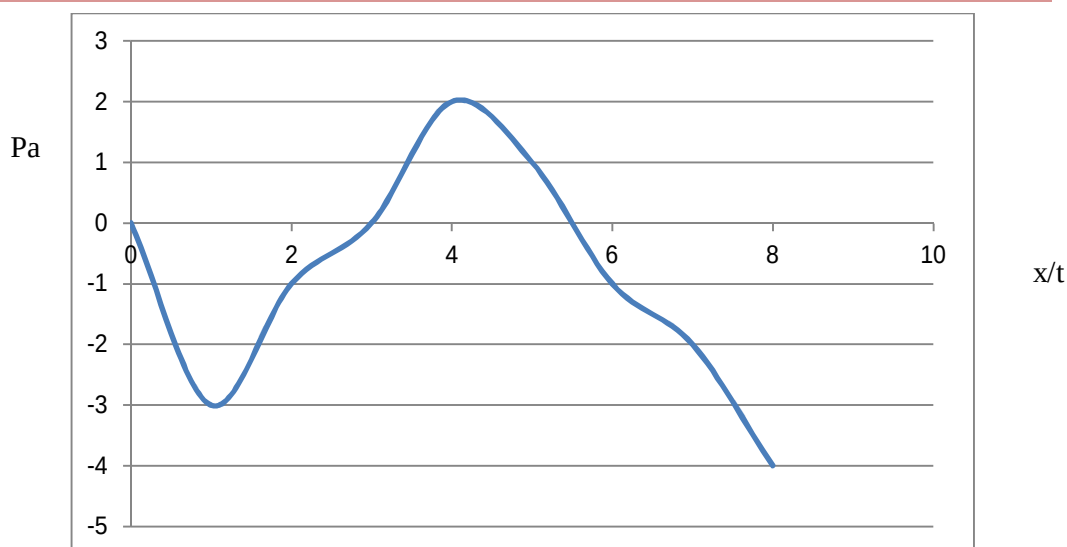


Figura VII. 66.- Campo de esfuerzos residuales en la probeta MIG 7mm

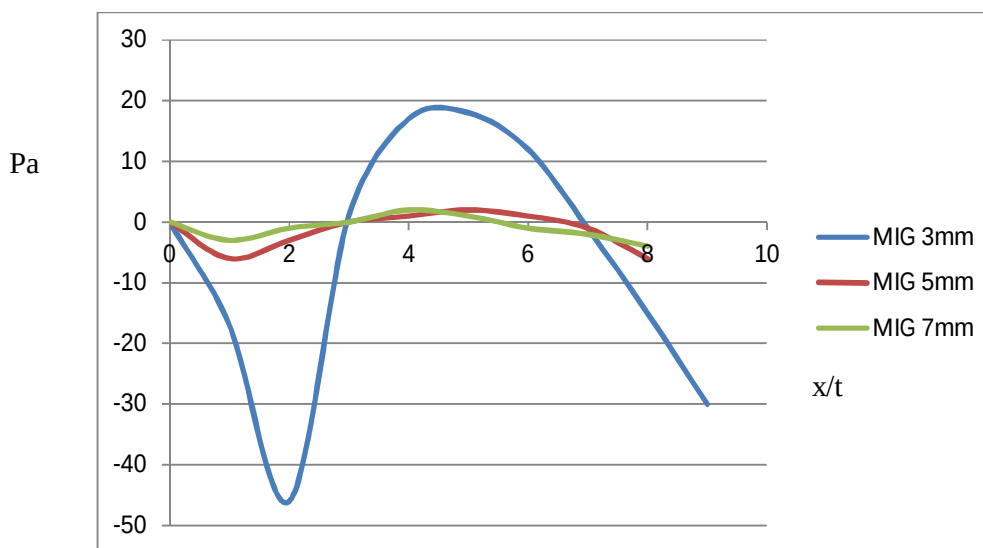
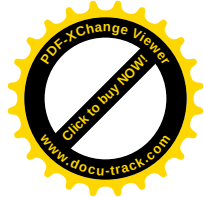
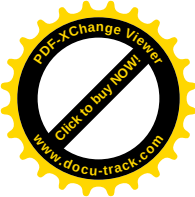


Figura VII.67.- Comparación de campos residuales MIG

VII.7.5.- Resultados del análisis numérico CCM Láser.

Al realizar el método de respuesta de grieta en los análisis estructurales 2-D y 3-D, se obtuvo que las deformaciones que ocurren en el material a causa de la inducción del corte son muy pequeñas, al grado de ser menor o igual a cero por lo cual el método de respuesta de grieta no se pudo desarrollar en *Ansys*. La figura VII.68 muestra la uniformidad del comportamiento del análisis CCM en elemento finito.



NODAL SOLUTION

STEP=1

SUB =1

TIME=1

EPHELX (AVG)

RSYS=0



Figura VII.68.- Deformaciones muy pequeñas o igual a cero en el método

VII.7.6.- Resultados del análisis experimental CCM Láser.

El análisis experimental del proceso de soldadura se plantea como un trabajo futuro, ya que no se pudo desarrollar debido a que el Instituto no cuenta con un dispositivo de soldadura láser.

En otras casas de estudio se desarrolla soldadura por laser a circuitos eléctricos, en el sector industrial es difícil, ya que los procesos de soldadura por laser son automatizados en su totalidad.

VII.8.- Conclusiones

Se puede observar que la convección térmica se comporta de manera similar al fenómeno real en el modelo realizado en 3-D, ya que el tiempo de enfriamiento es menor a los modelos en 2-D.

La inducción térmica en el proceso de soldadura por rayo Láser no se comporta de manera constante ya que esta se realiza en función de la potencia en Watts, además el tiempo de enfriamiento es menor comparado a los procesos TIG y MIG, la figura VII.69 muestra la grafica comparativa de los tres procesos.

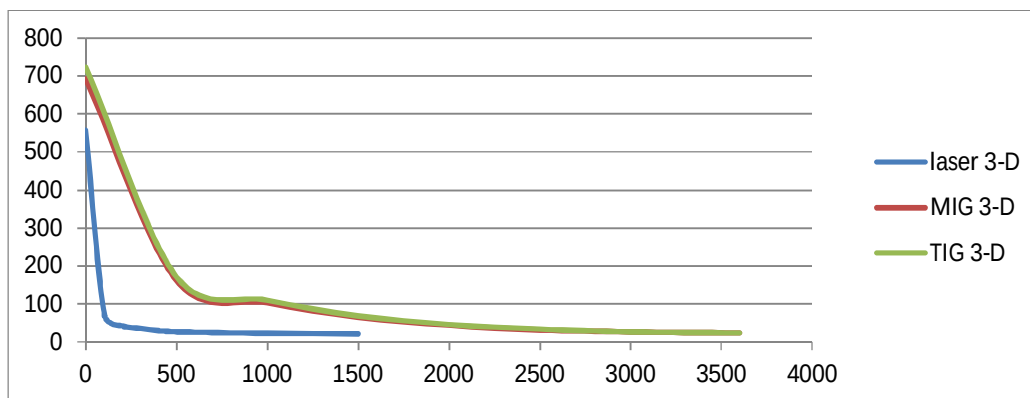


Figura VII.69.- Comparación de temperaturas de los tres procesos

El análisis estructural permite obtener los valores de los esfuerzos causados por las altas temperaturas aplicadas al acero inoxidable 316L, los cuales pueden alcanzar hasta los 324 MPa a compresión y 470MPa a tensión, esto en el proceso TIG.

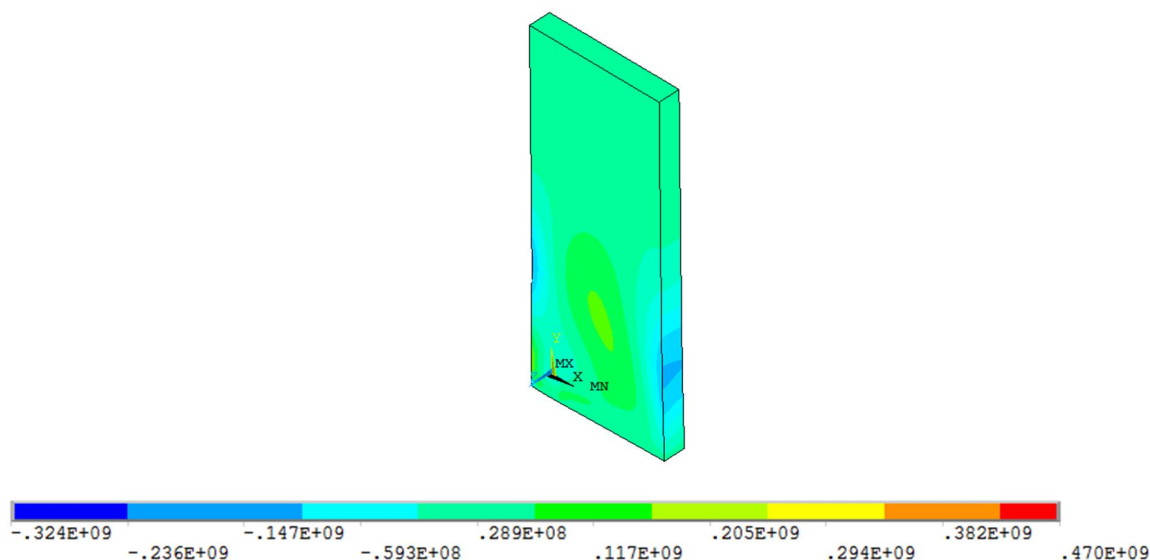


Figura VII.70.- Valor de esfuerzos para el proceso TIG en la inducción de la fuente térmica

En el proceso MIG la magnitud de esfuerzos alcanzo, los 586 MPa a compresión y los 179 MPa a tensión, estos se presentan solo al inicio y durante la presencia de la fuente térmica, cuando esta se retira los esfuerzos disminuyen en función del enfriamiento térmico. Para la simulación del proceso de soldadura por rayo Láser, se alcanzan esfuerzos a compresión de 544 MPa y esfuerzos a tensión de 205 MPa.

Especialistas en la simulación de soldadura como es el caso de *W. Bullón* [VII.1], aseguran que los esfuerzos de tensión se presentan en el cordón de soldadura o la zona afectada térmicamente, y a medida que se aleja del cordón de soldadura estos esfuerzos se convierten a compresión. La Figura VII.71 muestra la distribución de esfuerzos residuales en una unión soldada a tope.

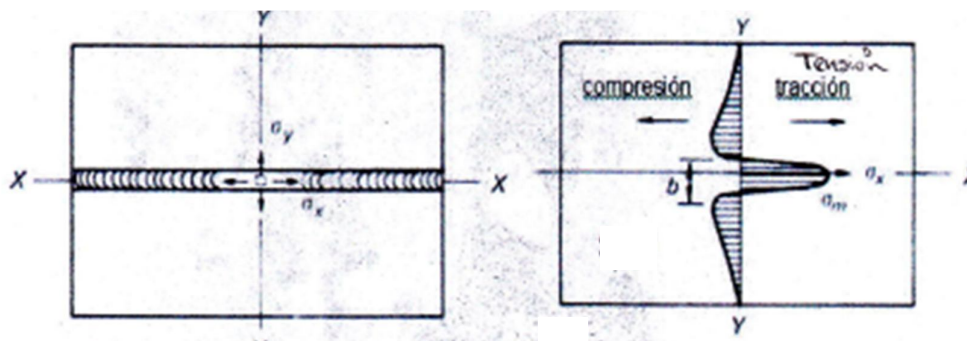


Figura VII.71.- Distribución de los esfuerzos residuales en una unión soldada a tope

En los análisis 3-D de los tres procesos de soldadura se observo que cerca de la zona afectada térmicamente los esfuerzos residuales son a tensión y a medida que la distancia es mayor del cordón de soldadura estos esfuerzos son a compresión, tal y como lo muestra la figura VII.72

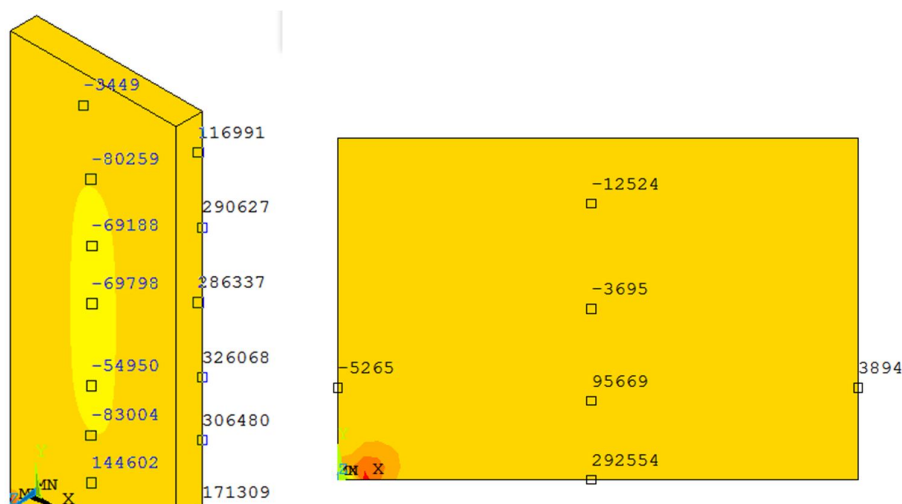


Figura VII.73.- Distribución de esfuerzos residuales en el análisis 3-D TIG

Los análisis 2-D estáticos realizados en los tres procesos de soldadura, permitieron evaluar la magnitud de los esfuerzos y graficarlos en función del nodo. Para la correcta interpretación de los resultados la figura VII.74 muestra la interpretación de los resultados en el análisis realizado cerca de la zona afectada térmicamente.

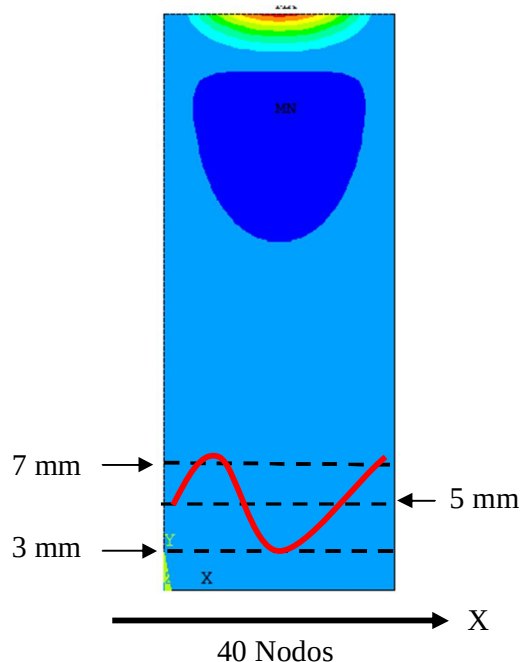


Figura VII.74.- Interpretación de resultados longitudinales

Lo cual consiste en analizar los resultados de los 40 nodos a 3mm, 5mm y 7mm cerca del cordón de soldadura, los resultados graficados para el proceso TIG son los siguientes:

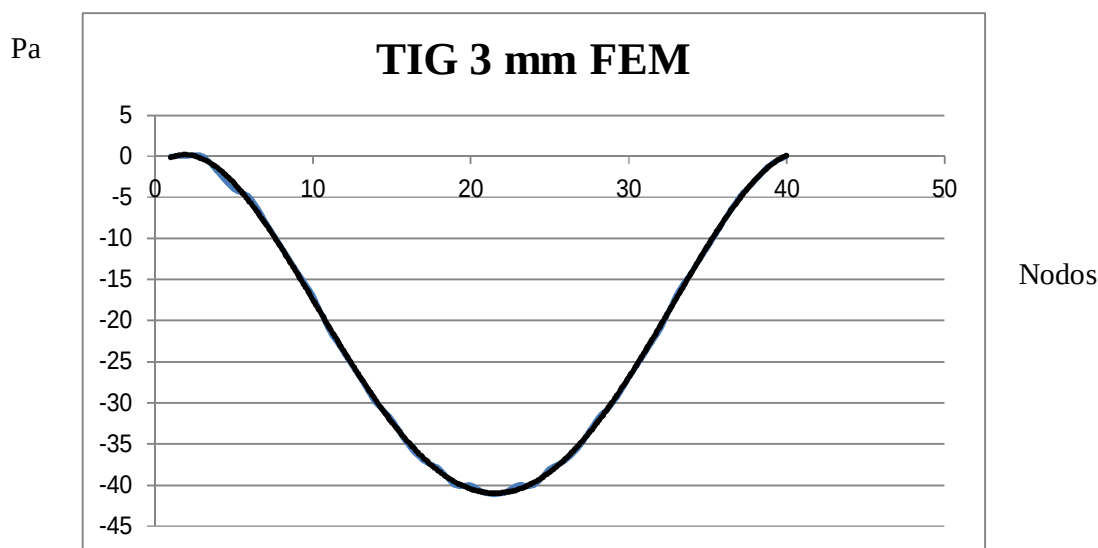
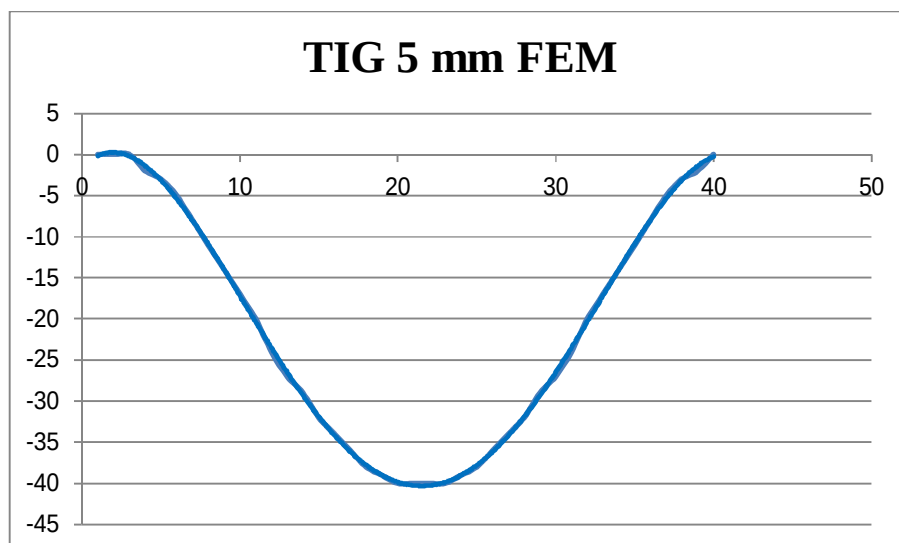


Figura VII.75.- Grafica de resultados longitudinales a 3 mm TIG

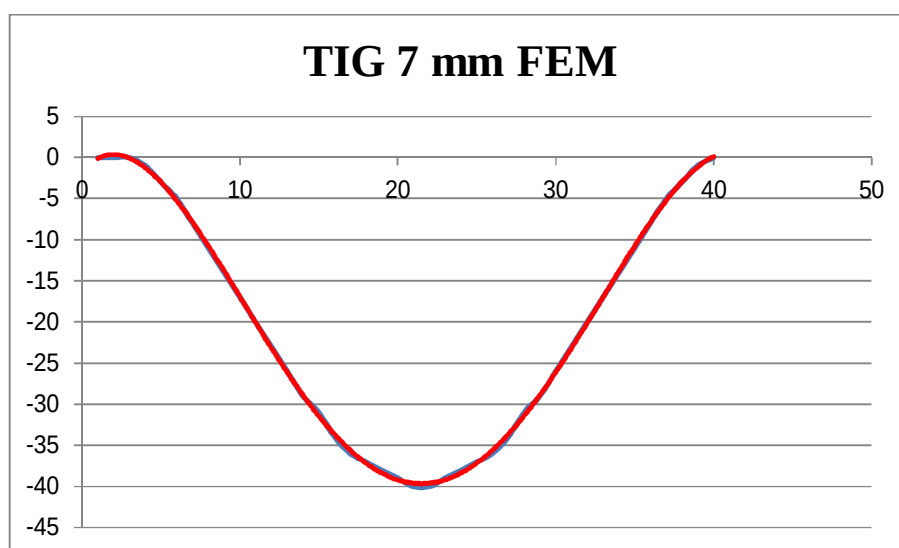
Pa



Nodos

Figura VII.76.- Grafica de resultados longitudinales a 5 mm TIG

Pa



Nodos

Figura VII.77.- Grafica de resultados longitudinales a 7 mm TIG

Se puede apreciar que no existe un cambio relevante en la magnitud de los esfuerzos en una distancia mayor de 7 milímetros del cordón de soldadura. Así mismo se puede observar que los esfuerzos son pequeños. A continuación se presentan las graficas obtenidas del análisis longitudinal al proceso MIG.

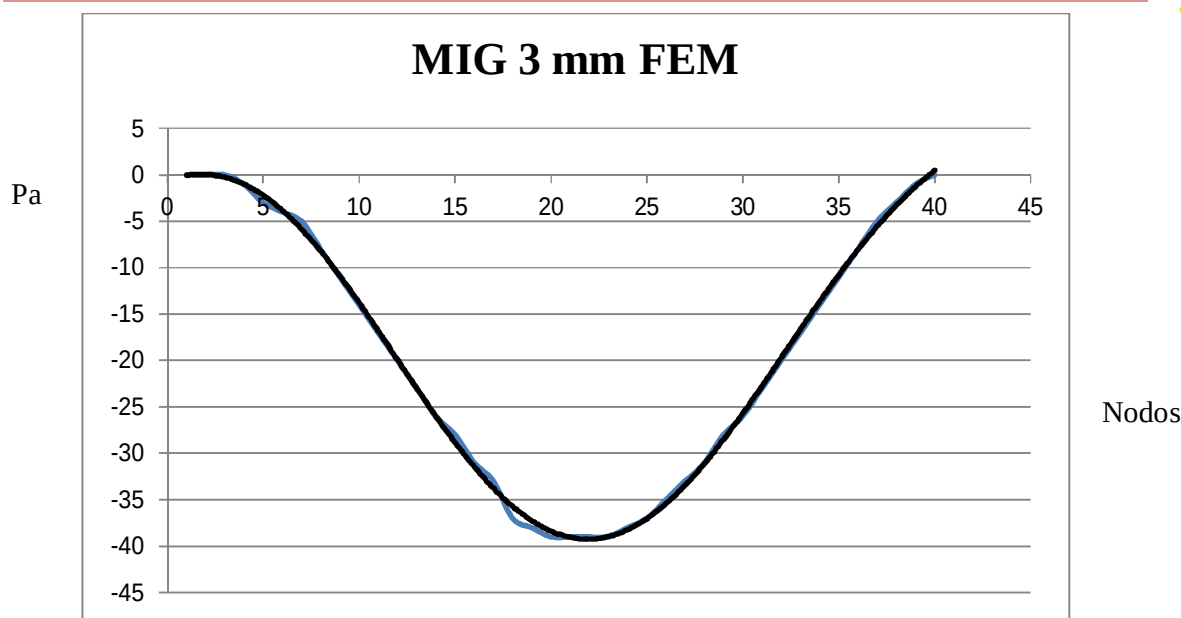


Figura VII.78.- Grafica de resultados longitudinales a 3 mm MIG

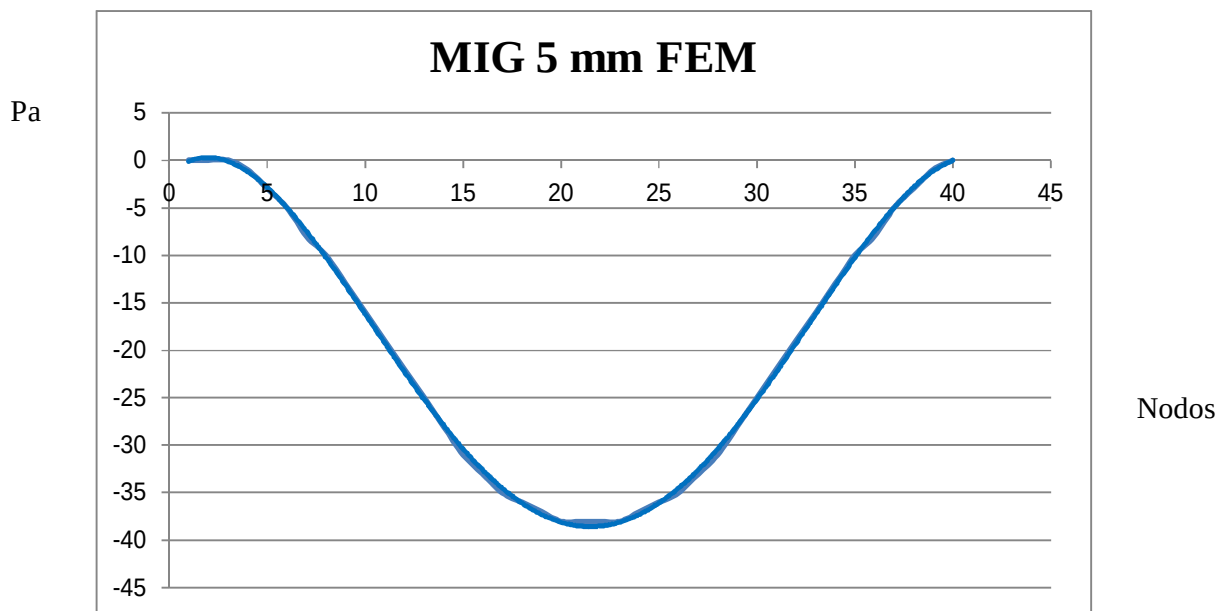


Figura VII.79.- Grafica de resultados longitudinales a 5 mm MIG

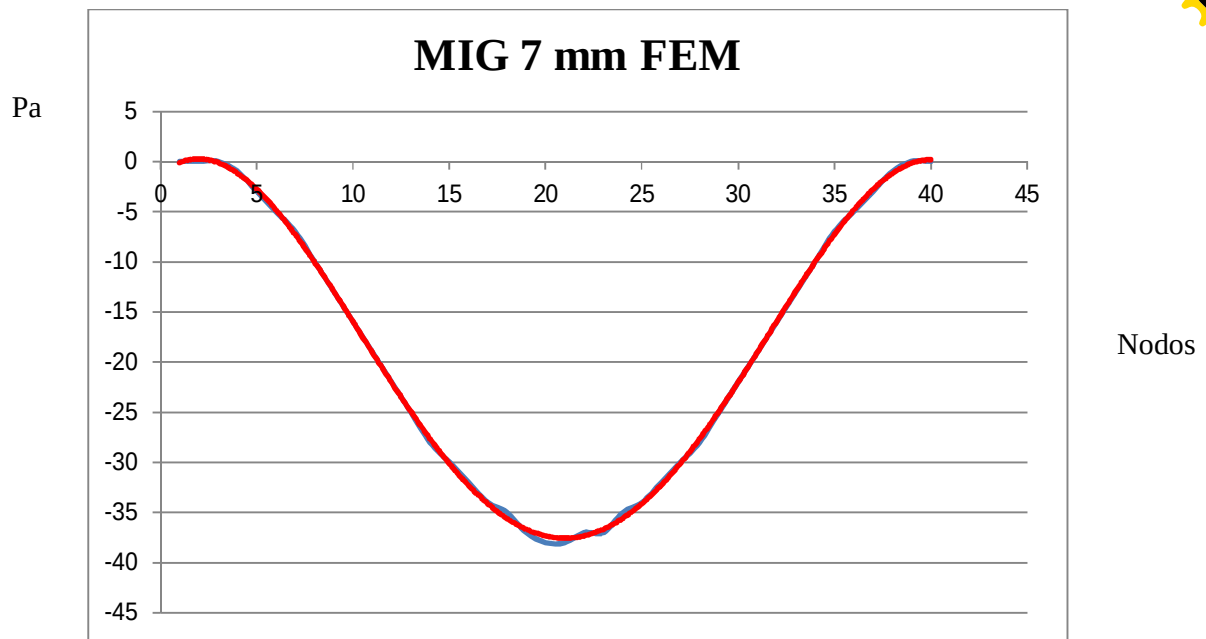
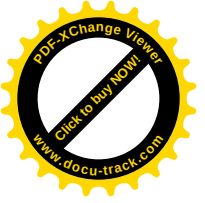


Figura VII.80.- Grafica de resultados longitudinales a 7 mm MIG

Los resultados del análisis transversal del proceso de soldadura por rayo laser son los siguientes:

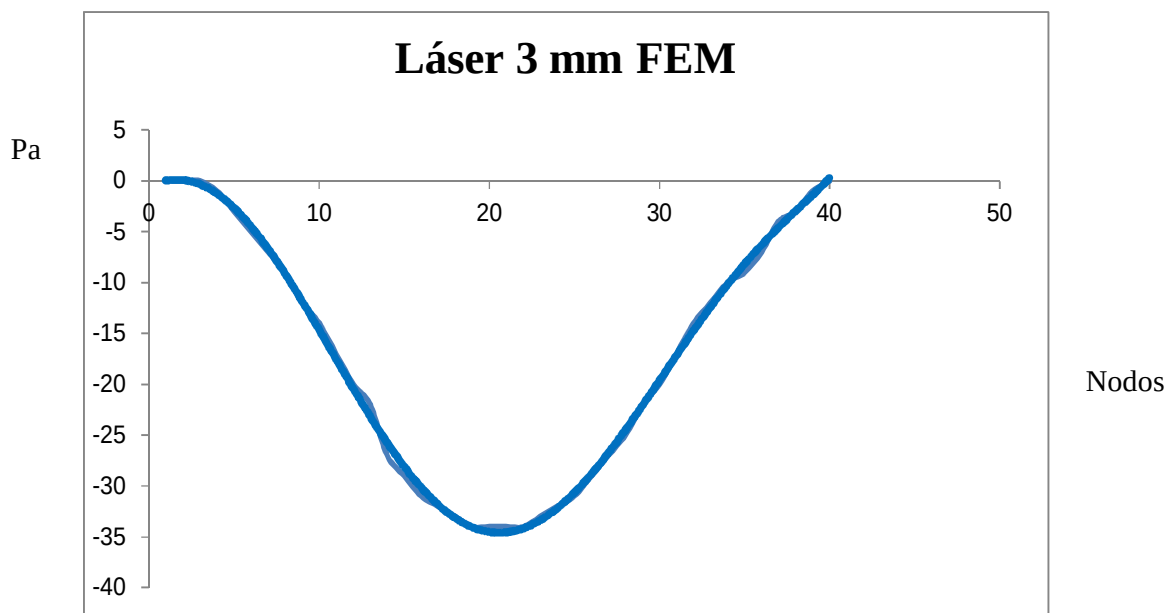


Figura VII.81.- Grafica de resultados longitudinales a 3 mm Láser

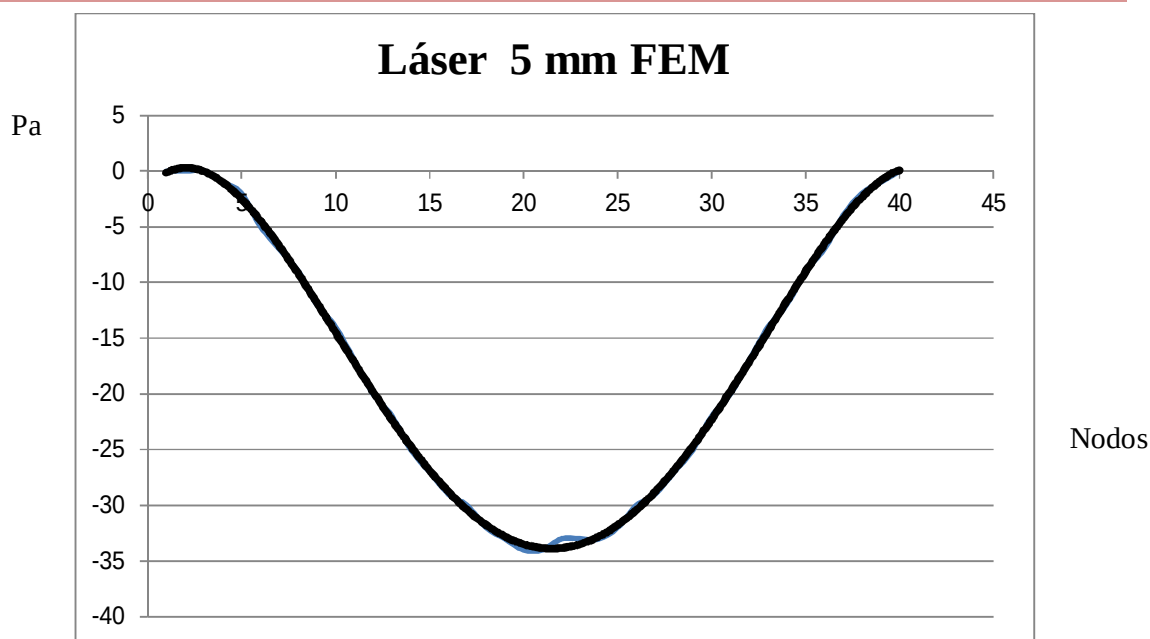


Figura VII.82.- Grafica de resultados longitudinales a 5 mm Láser

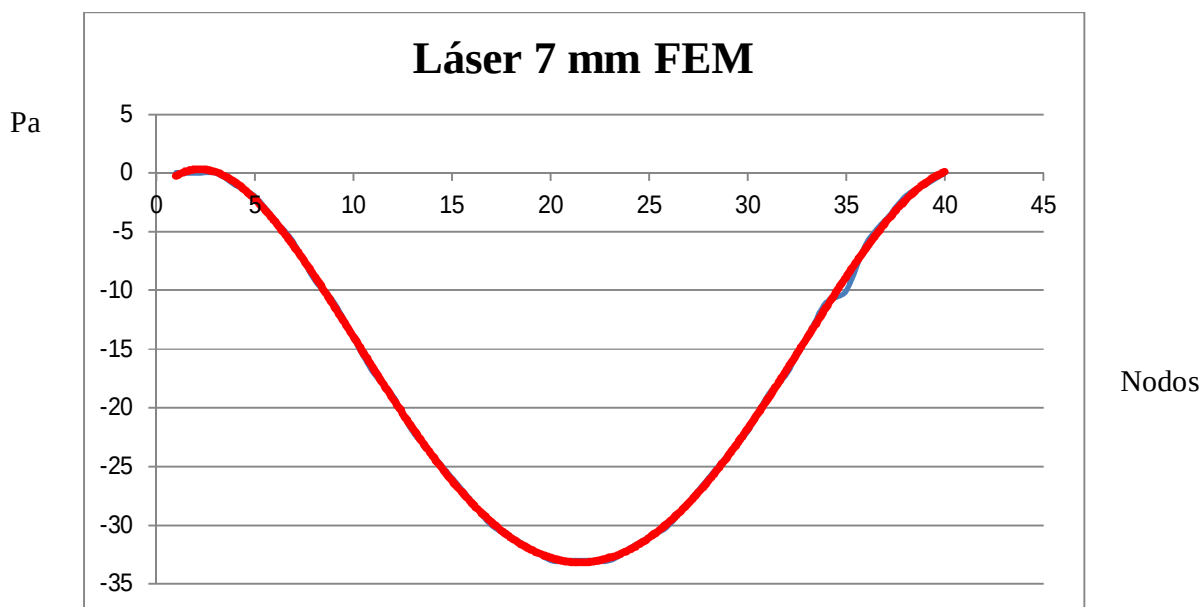


Figura VII.83.- Grafica de resultados longitudinales a 7 mm Láser

Se puede observar que los esfuerzos disminuyen en el proceso de soldadura por rayo Láser y son más grandes en el proceso TIG. El análisis de los esfuerzos transversales en la metodología experimental se encuentra limitada por la longitud, ya que al inducir un corte por

electroerosión en esta dirección, representa un tiempo considerable lo cual repercute en su desarrollo, la gran ventaja en elemento finito es que estos valores se pueden obtener de una manera muy sencilla al graficar los resultados de los nodos en esta dirección, la figura VII.84 muestra como se realiza la interpretación de resultados transversales.

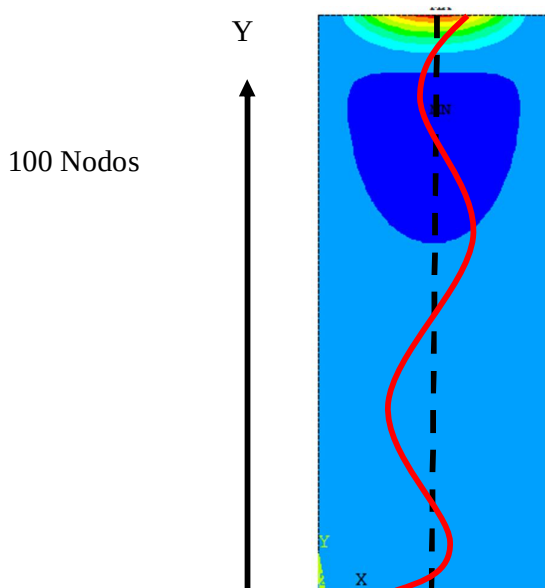


Figura VII.84.- Interpretación de resultados para el análisis transversal en 2-D

En este análisis solo se consideraron los nodos centrales a lo largo del eje Y, por lo cual solo se obtendrá una grafica de cada proceso de soldadura. La figura VII.85 muestra la grafica obtenida del esfuerzo en función del nodo en el análisis TIG.

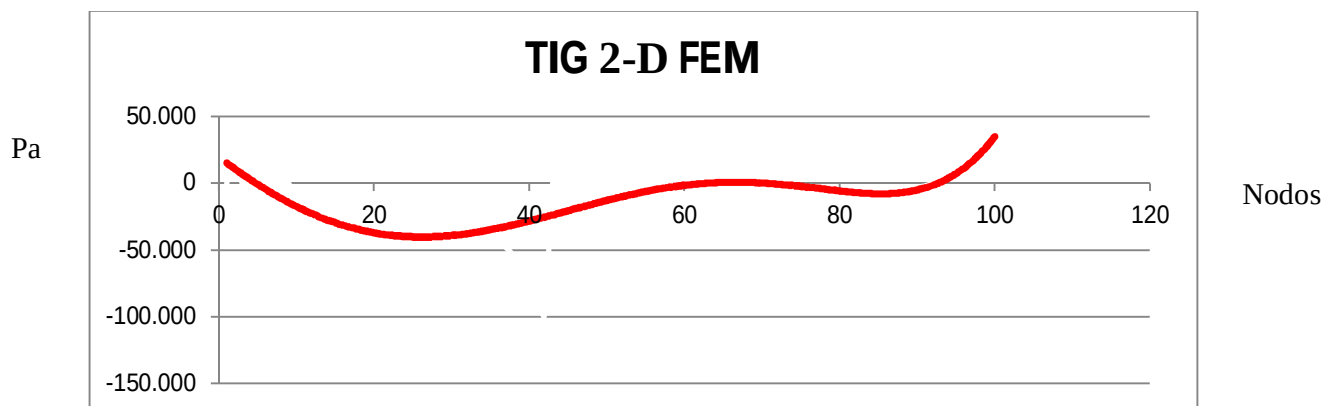
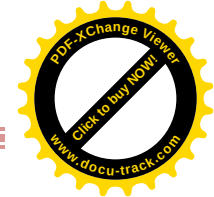
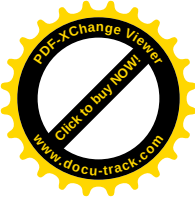
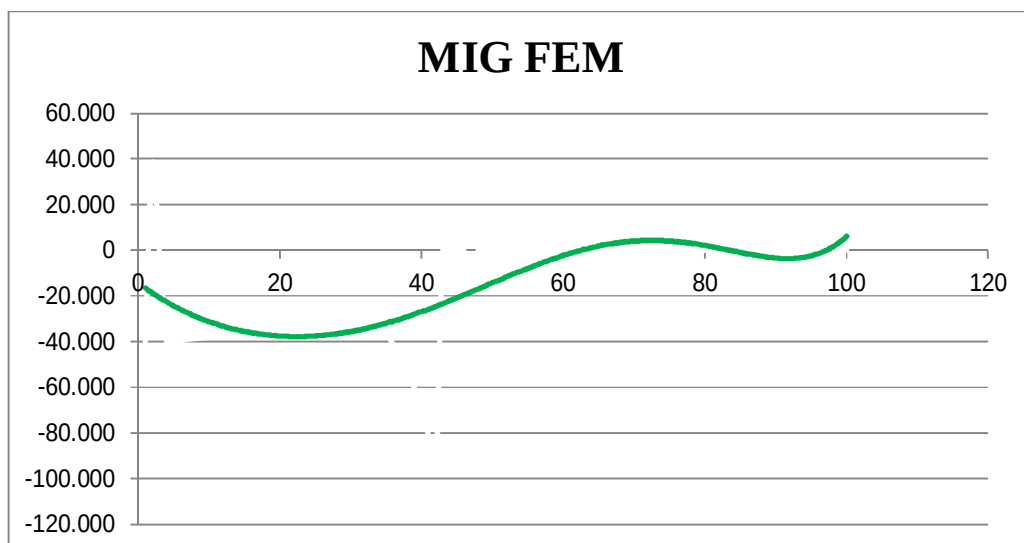


Figura VII.85.- Resultados para el análisis transversal en TIG



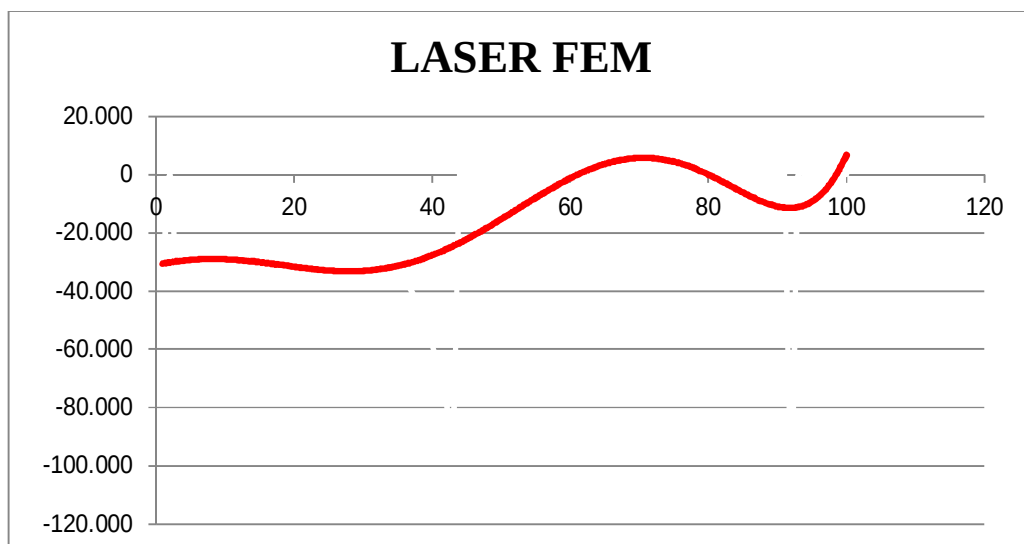
Pa



Nodos

Figura VII.86.- Resultados para el análisis transversal MIG

Pa

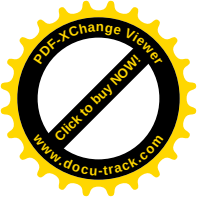


Nodos

Figura VII.87.- Resultados para el análisis transversal Láser

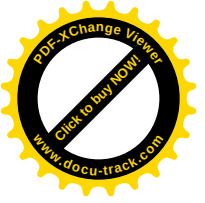
El realizar graficas permite una mejor comprensión del fenómeno que ocurre en el material, en este caso se puede interpretar la magnitud de los esfuerzos residuales causados por el proceso de soldadura.

Los campos de esfuerzos residuales obtenidos a través del método de respuesta de grieta no son exactamente iguales a los encontrados en el método numérico, la ventaja es que estos son pequeños al igual a los encontrados en elemento finito.

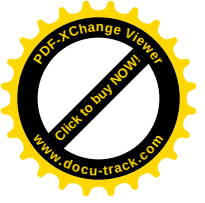


VII.9.- Referencias

1.- Bullón, W., Acosta, J., Franco, R., Valverde Q., Simulación de un proceso de soldadura mediante un modelo termo-mecánico considerando el efecto de esfuerzos residuales utilizando el método de los elementos finitos, *8º Congreso iberoamericano de Ingeniería Mecánica*, Cusco, 2007.



Producción Científica



Nombre de archivo: 17 Capitulo VII .docx
Directorio: C:\Users\Administrador\Desktop\TESIS MAESTRIA
CORREGIDO\PDF
Plantilla: C:\Users\Administrador\AppData\Roaming\Microsoft\Plantil
las\Normal.dotm
Título:
Asunto:
Autor: Mayor
Palabras clave:
Comentarios:
Fecha de creación: 08/01/2011 22:56:00
Cambio número: 81
Guardado el: 13/01/2012 14:13:00
Guardado por: Usuario de Windows
Tiempo de edición: 851 minutos
Impreso el: 15/01/2012 0:33:00
Última impresión completa
Número de páginas: 50
Número de palabras: 4.452 (aprox.)
Número de caracteres: 24.489 (aprox.)