



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

## ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

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

### ANÁLISIS NUMÉRICO EXPERIMENTAL EN LA EVALUACIÓN DE ESFUERZOS RESIDUALES EN PROCESOS DE SOLDADURA TIG, MIG Y RAYO LÁSER

**T E S I S**  
PARA OBTENER EL GRADO DE:  
**MAESTRO EN CIENCIAS**  
CON ESPECIALIDAD EN  
INGENIERÍA 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. 2011





**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



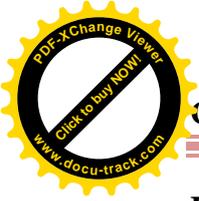
INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL  
COORDINACIÓN GENERAL DE POSGRADO E  
INVESTIGACION

**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: **"ANÁLISIS NUMÉRICO-EXPERIMENTAL EN LA EVALUACIÓN DE ESFUERZOS RESIDUALES EN PROCESOS 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 **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



### 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.

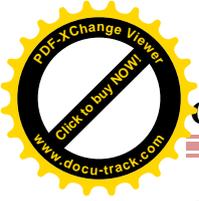
El primer Capítulo está compuesto por el estado del arte en el cual se describe desde la primera aplicación así como la evolución a través del tiempo. Los factores que impulsaron su aplicación en el sector industrial convirtiéndose en un proceso fundamental en la unificación de materiales.

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



## Contenido

---

---



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.

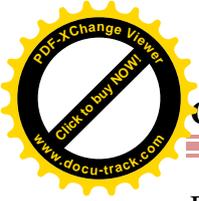
The first chapter is composed of the state of the art which describes the first application and the evolution over time. The factors that prompted its application in industry becoming a fundamental process in the unification of materials.

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.



## Contenido

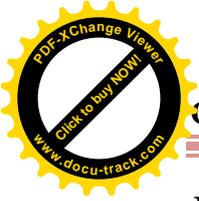
---

---

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.

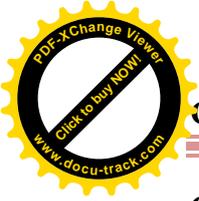
As microdeformaciones record obtained through the Wheatstone bridge so that the graph of the curve obtained is introduced to a program FORTRAM computing platform, the results were plotted so that efforts will be obtained depending on the depth of cuts made to the specimen.

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.



## 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 del proceso de soldadura, en los procesos más comunes como lo son el proceso de soldadura TIG y MIG en 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.



### 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.



### 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.

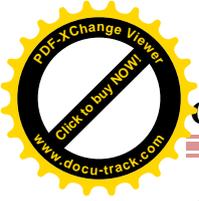
En la evaluación de esfuerzos residuales existen diversos métodos, los cuales pueden ser del tipo experimental (destrutivo, semi-destrutivo y no destructivo), analíticos y numéricos. La importancia de realizar un método experimental consiste en obtener el campo de esfuerzos residuales causados en materiales 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 extensométricas 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 *FORTRAM* >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.



## Contenido

---

---

*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 I



**Estado del arte en los  
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



## Capítulo I

---

---

trabajo de investigación se fundamenta 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 remonta 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***



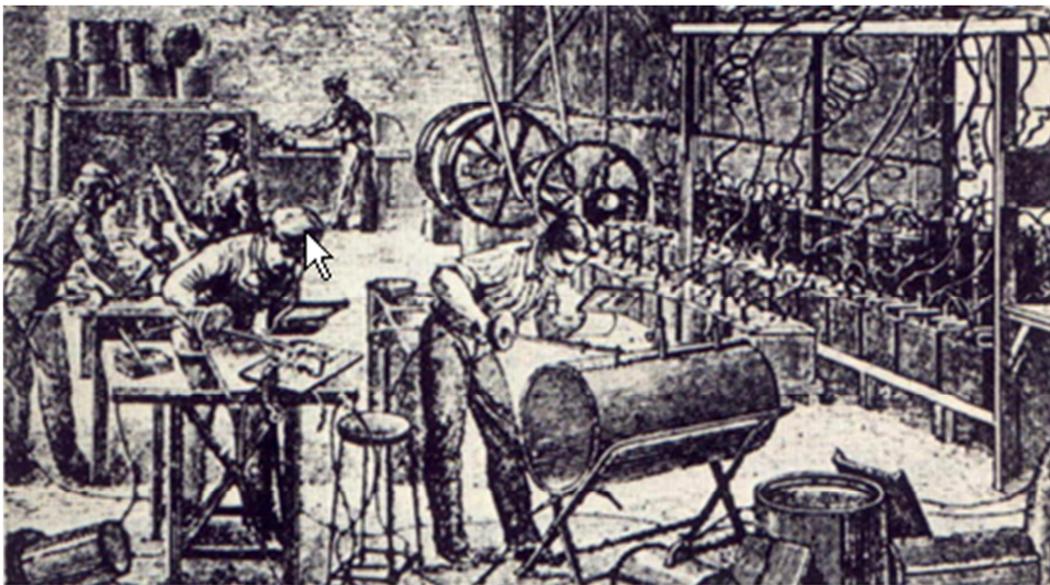
## Capítulo I

---

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].

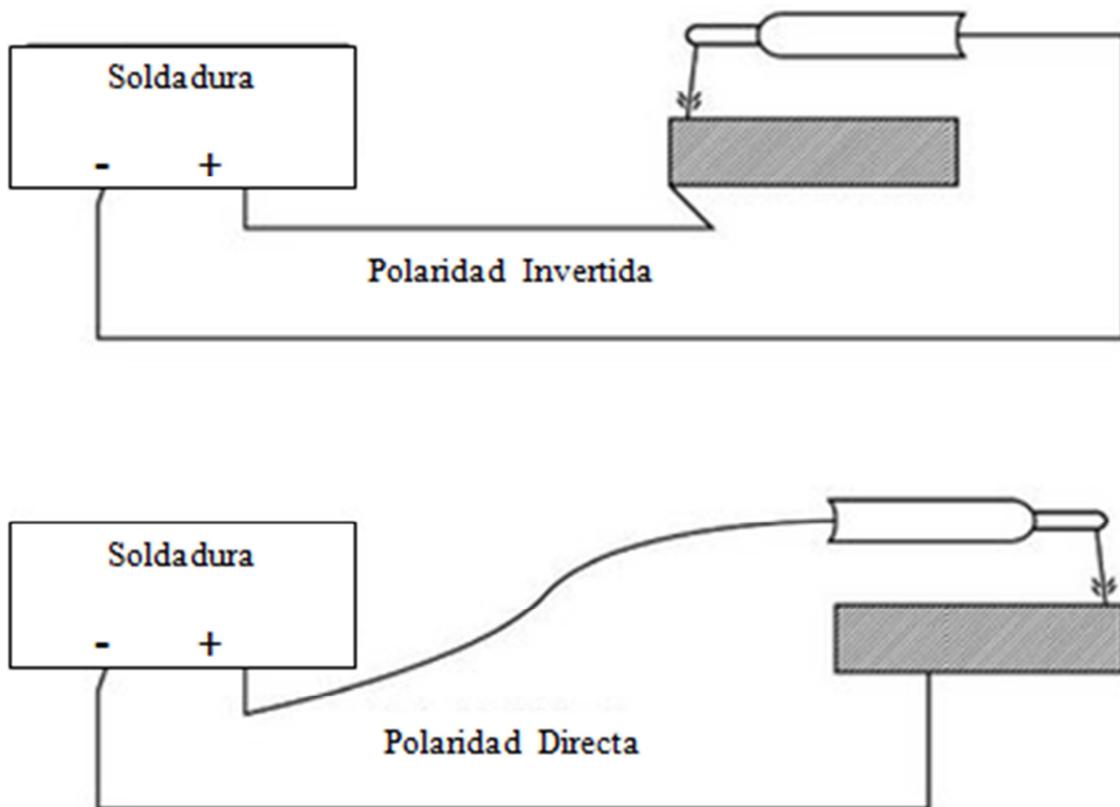


**Figura I.3.-** Reproducción de un antiguo gravado de un taller de soldadura



## Capítulo I

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.



## Capítulo I

---

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].



**Figura I.5.-** Soldadura por aplicación de soplete

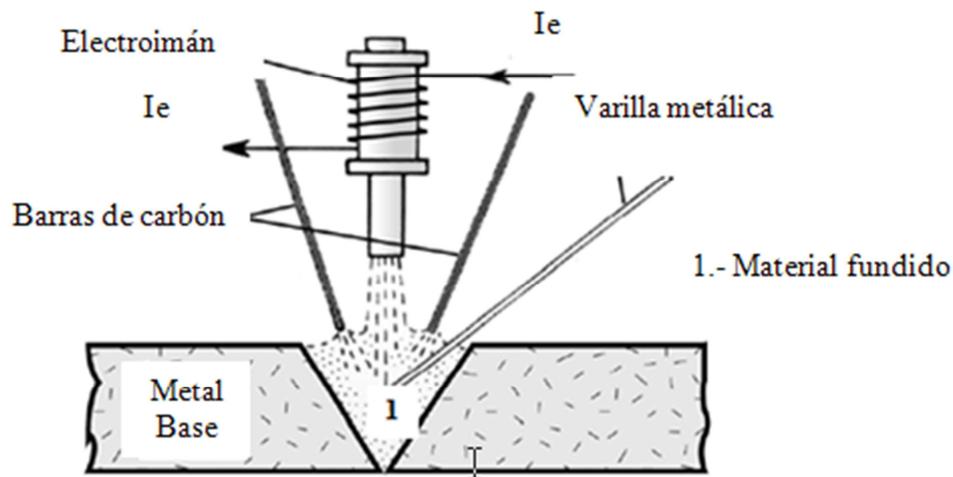
Cuando este tipo de proceso inició a efectuarse con más formalidad en la unificación de piezas metálicas, se requirió de forma indispensable que este procedimiento se realizara en condiciones óptimas. Lo anterior con la finalidad de tener como resultado del proceso, una unión metálica libre de defectos 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].

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. Zerener*. Al ensayar un tipo de



## Capítulo I

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).



**Figura I.6.-** Soldadura por arco soplado

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].

### 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/cem<sup>2</sup> [I.14]. Este método trabaja empleando tres dinamos de 55° Amperes cada uno y con un potencial de 150 Volts, los cuales

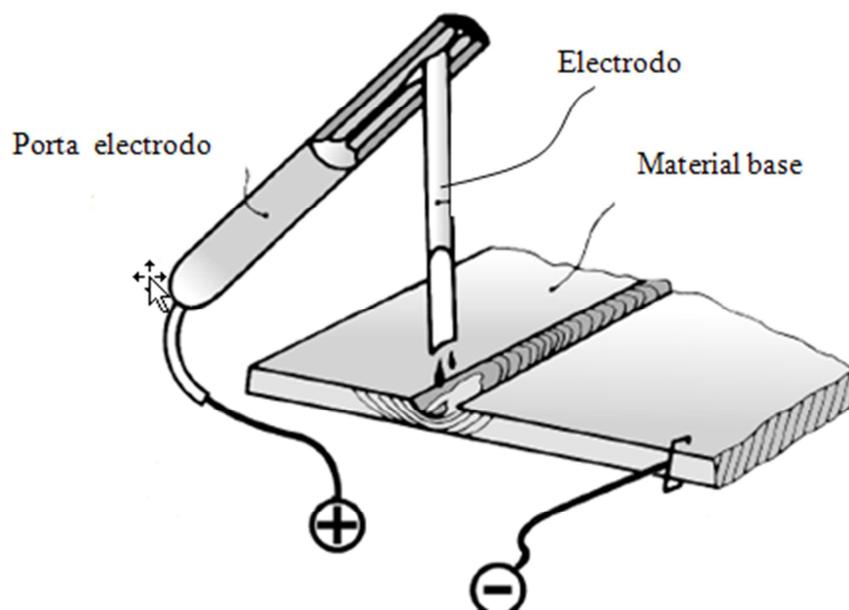


## Capítulo I

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].

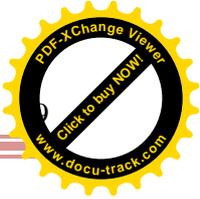
De manera industrial este proceso se aplicó por primera vez como soldadura por arco eléctrico en una fábrica de los Estados Unidos en el año de 1902 con electrodo de Carbón, el cual tenía por nombre; *The Baldwin Locomotive Works* [I.16] (Figura I.8).



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



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



## Capítulo I

---

---

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.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.

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].



## Capítulo I

---

---

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. Así mismo, 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].

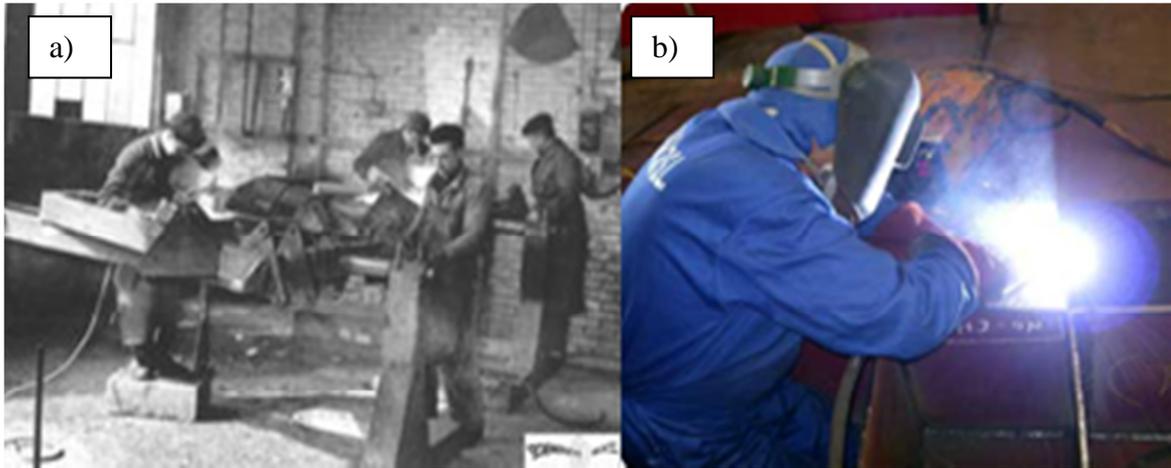
La soldadura como proceso de unificación de materiales metálicos, ha sido de gran importancia para la humanidad, pero la evolución de este proceso radica fundamental mente en los materiales y dispositivos; esto quiere decir que el mecanismo de aplicación es básicamente es el mismo desde sus inicios,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

---

---

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

## Capítulo I



**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.

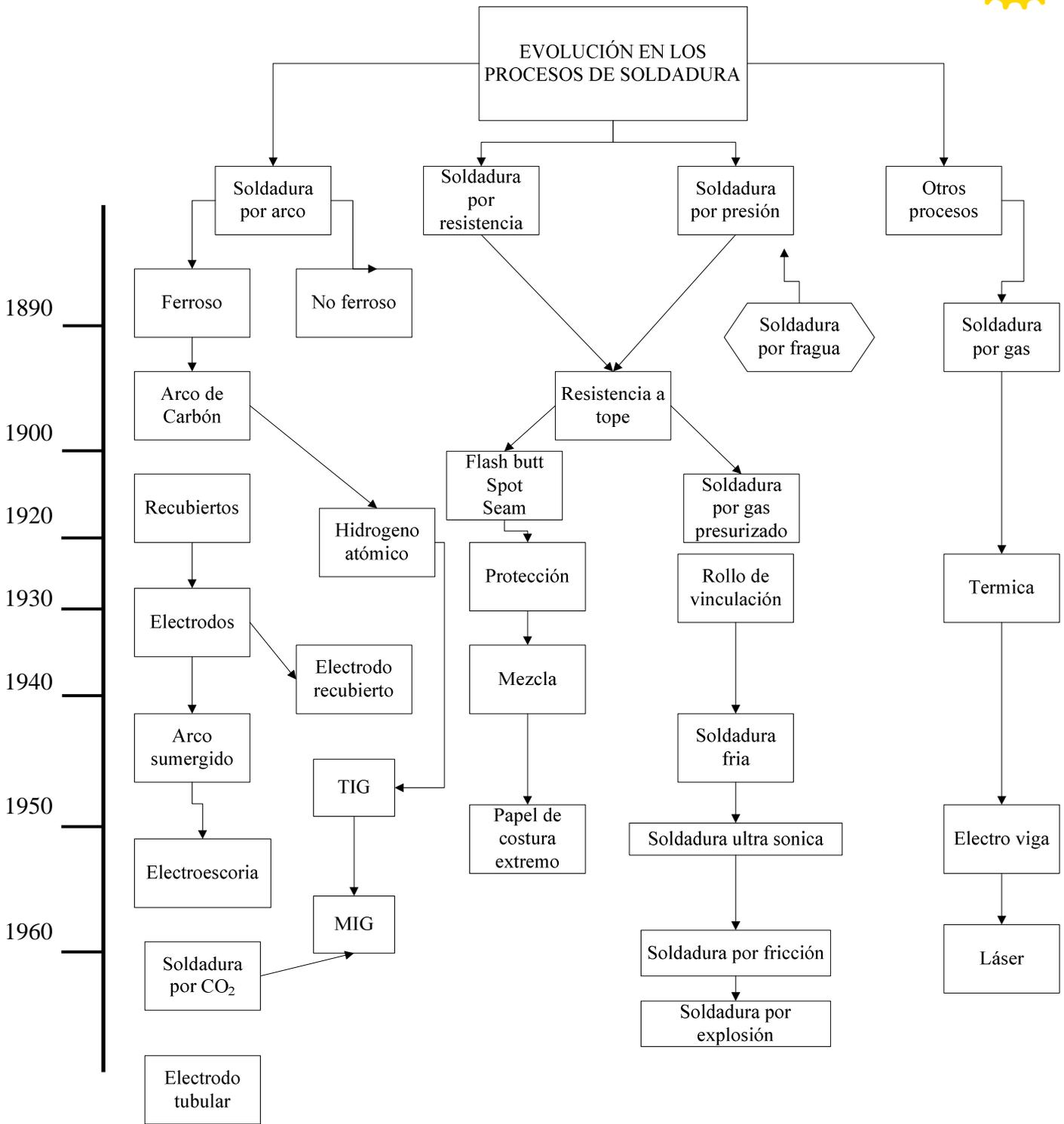


Figura I.10.- Historia de la soldadura. [I.23]

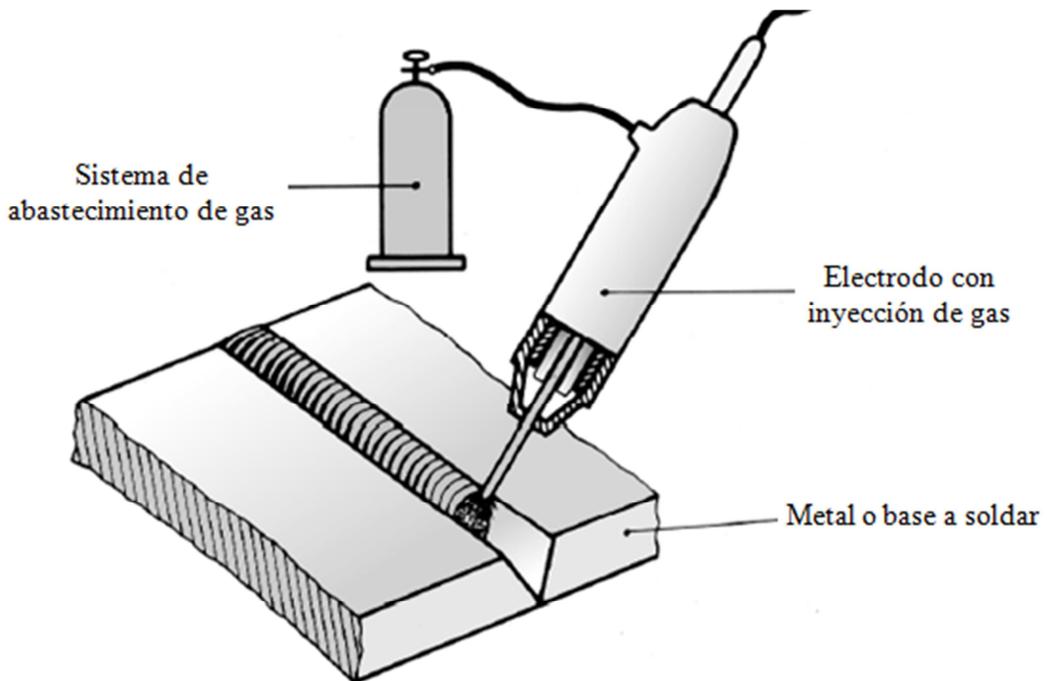


## Capítulo I

### 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 delo 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.



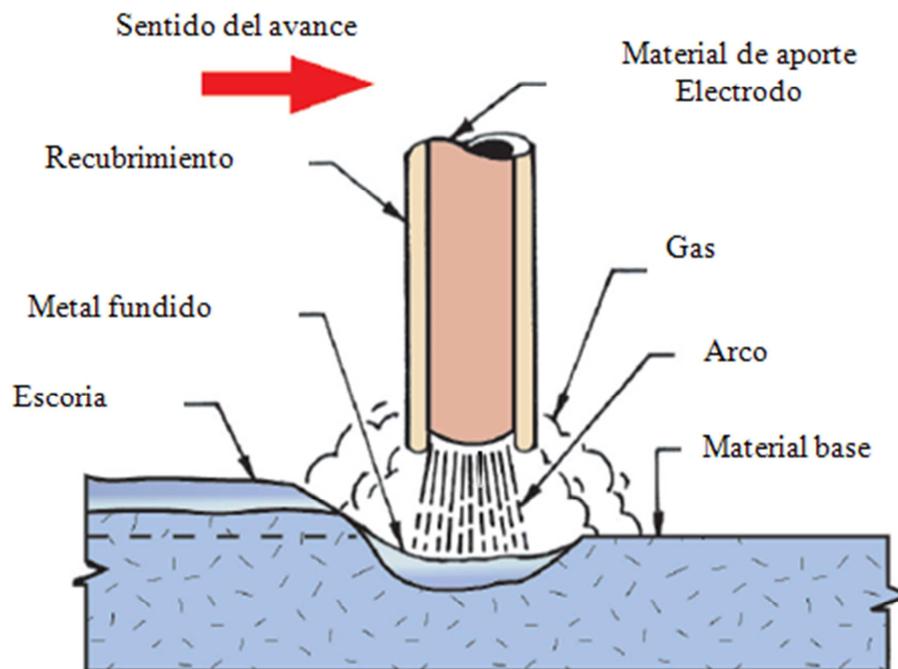
**Figura I.11.-** Sistema implementado para soldar por medio de electrodo con recubrimiento

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



## Capítulo I

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



## Capítulo I

---

---

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 CO<sub>2</sub>.

Este descubrimiento llevó rápidamente a la utilización de CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> se volvió comercialmente disponible a mediados de los '50. Aproximadamente para el mismo tiempo la protección con CO<sub>2</sub> 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].



## Capítulo I

---

---

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



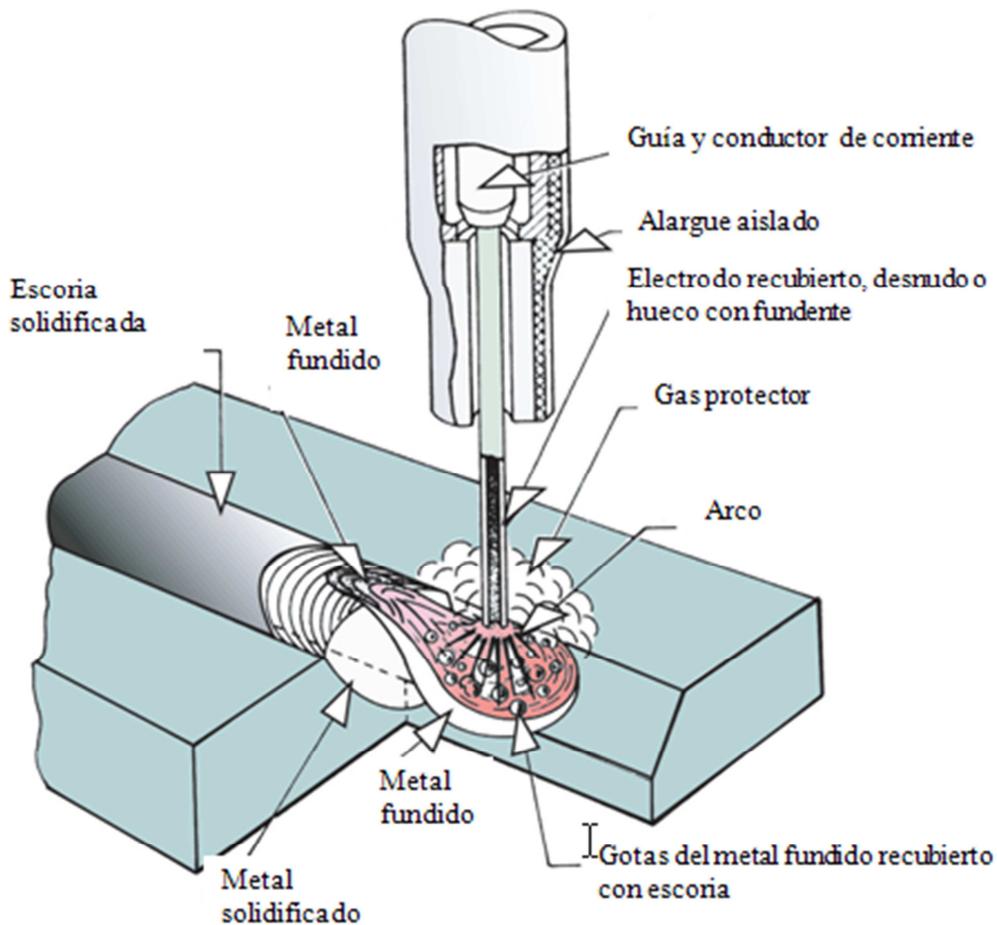
## Capítulo I

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 otorgo una patente a un fantástico sistema de soldadura, el cual alimentaba el proceso de de forma constante (Electrodo en forma de rollo).

El electrodo tenía forma de alambre para realizar el soldará 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 ingles son GMAW (Gas Metal Arc Welding) [I.9].



**Figura I.13.-** Proceso MIG.



## Capítulo I

---

Este proceso de unificación a 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.

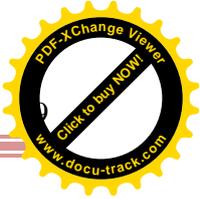
Estas son por inmersión o corto circuito, esto se produce cuando sin haberse producido el arco al tocar el electrodo con la pieza, este se queda pegado produciéndose un cortocircuito. Por tal motivo la corriente se incrementa demasiado y esta es capaz de fundir el electrodo, teniendo como resultado una 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



## Capítulo I

---

### 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 más 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]

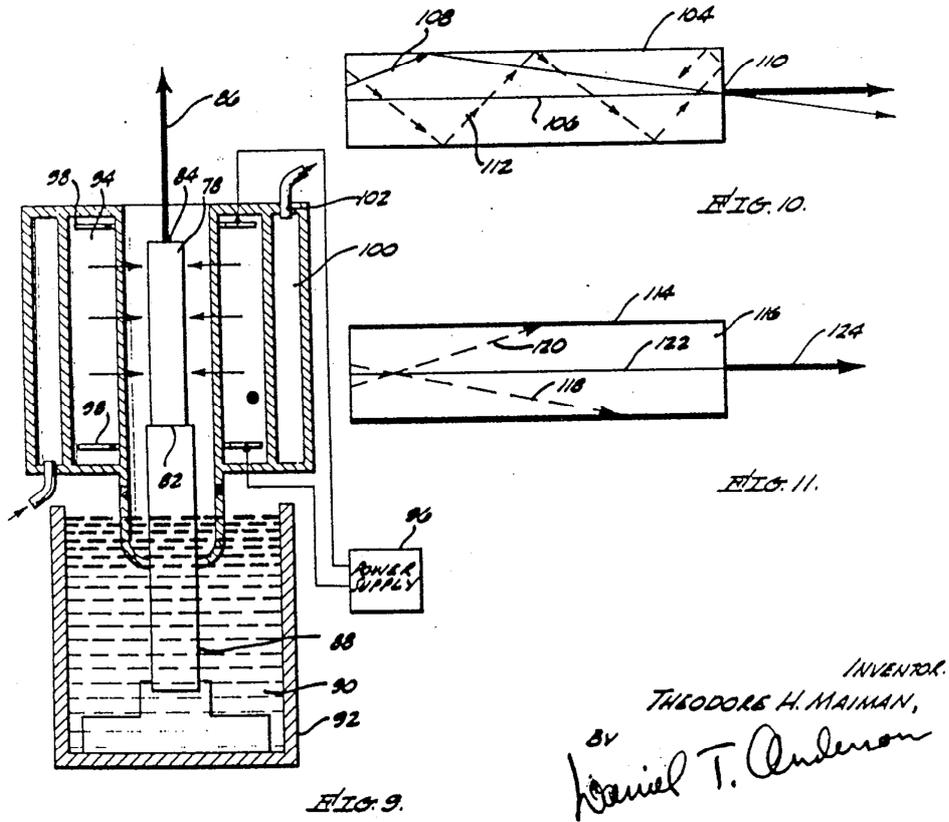
La patente se otorgo el 14 de Noviembre de 1967 a *Theodoro H. Maiman* por su sistema de rayo laser utilizando como medio el Rubí en los Ángeles California [I.34].

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



# Capítulo I

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.



## Capítulo I

---

---

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.

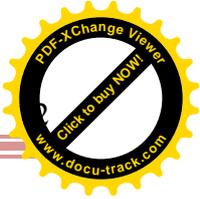
Esto genera una inducción de un efecto de cascada y esta hará que el nivel de esta luz coherente llegue al valor de umbral, (esto es el punto en el que la ganancia de amplificación de la luz que se produce comienza a exceder pérdidas de luz que puedan estar ocurriendo simultáneamente), en el cual el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



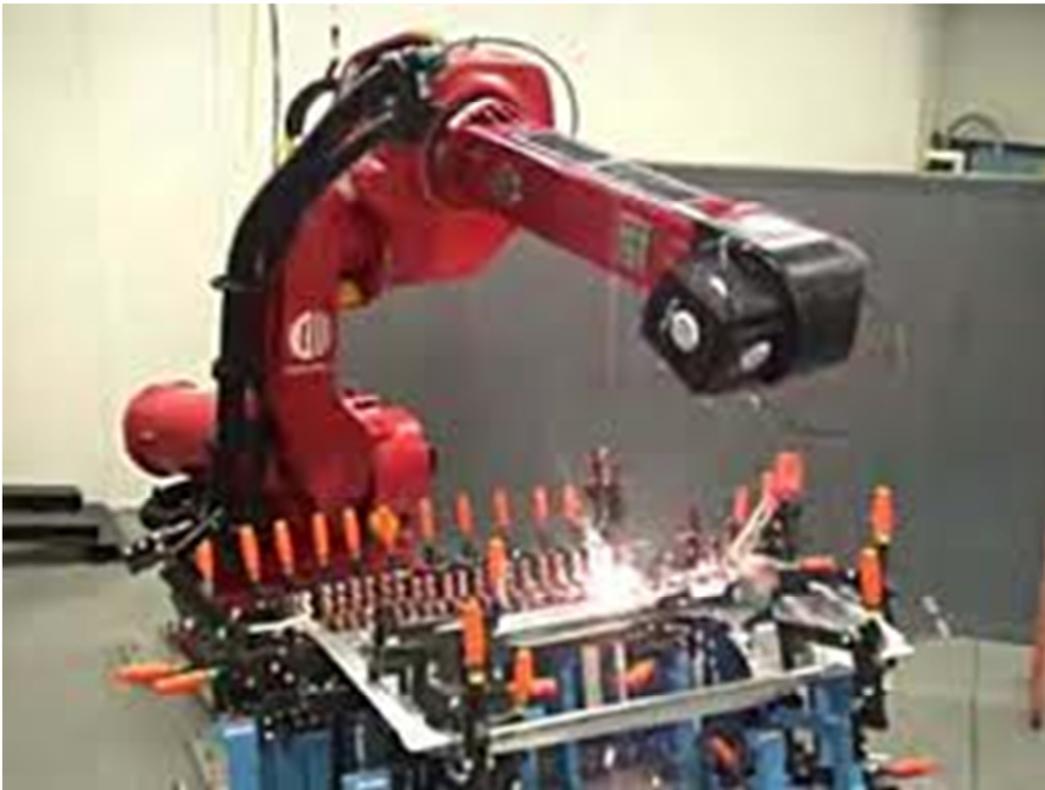
## Capítulo I

---

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. Actual mente en el mercado existen láseres de Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ) 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.



# Capítulo I

## 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.

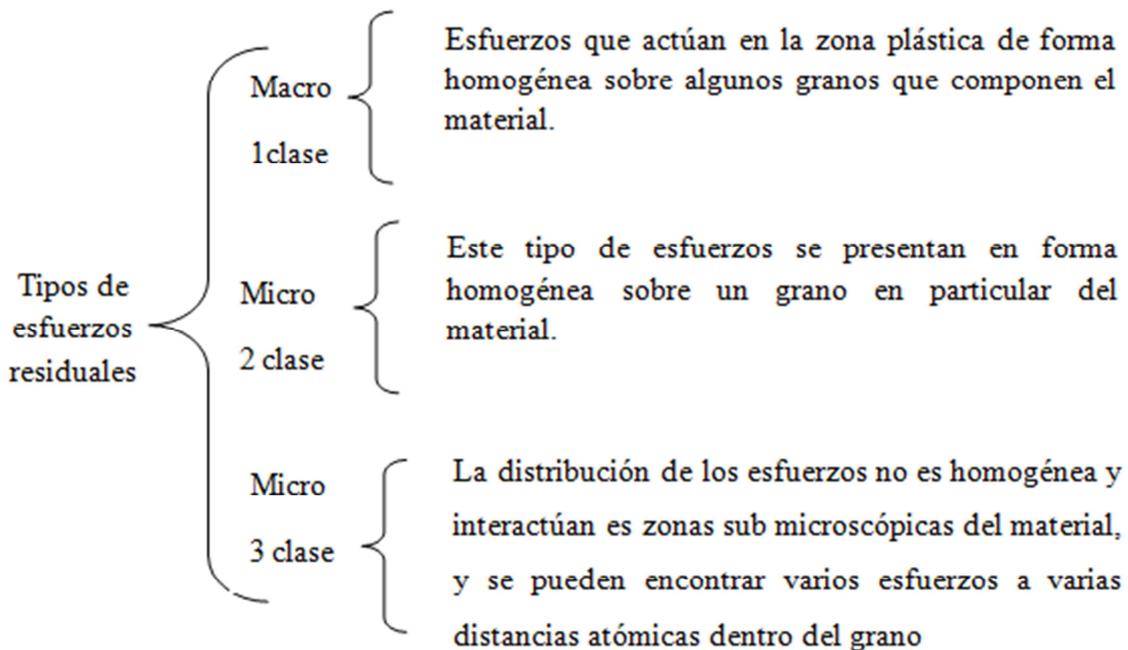


Figura I.14.- Clasificación de esfuerzos residuales.

## 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.



## Capítulo I

---

---

En el proceso de soldadura están presente diferentes 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 ocasionan 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].

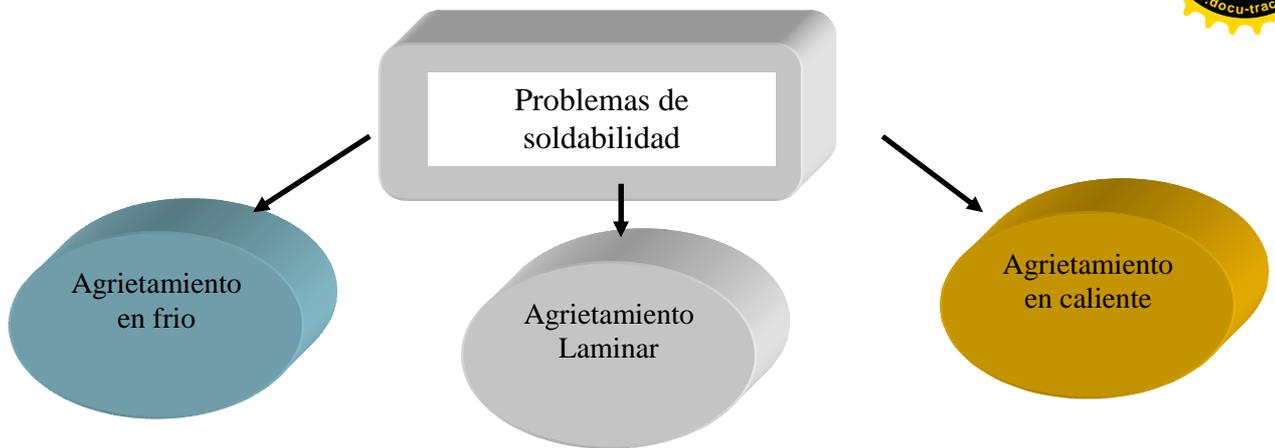
Las distorsiones y esfuerzos residuales que se generan en este proceso no solo dependen de lo mencionado anteriormente, también es importante el considerar las propiedades del material, así como las condiciones de borde estructural, tipo de soldadura y condiciones de soldadura, estos factores se mencionaran 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 adecuadamente 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 frío como en caliente. [I.39]

## Capítulo I



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

El carbono 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:

- Pre calentamiento 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]



## Capítulo I

---

---

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 frío 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]

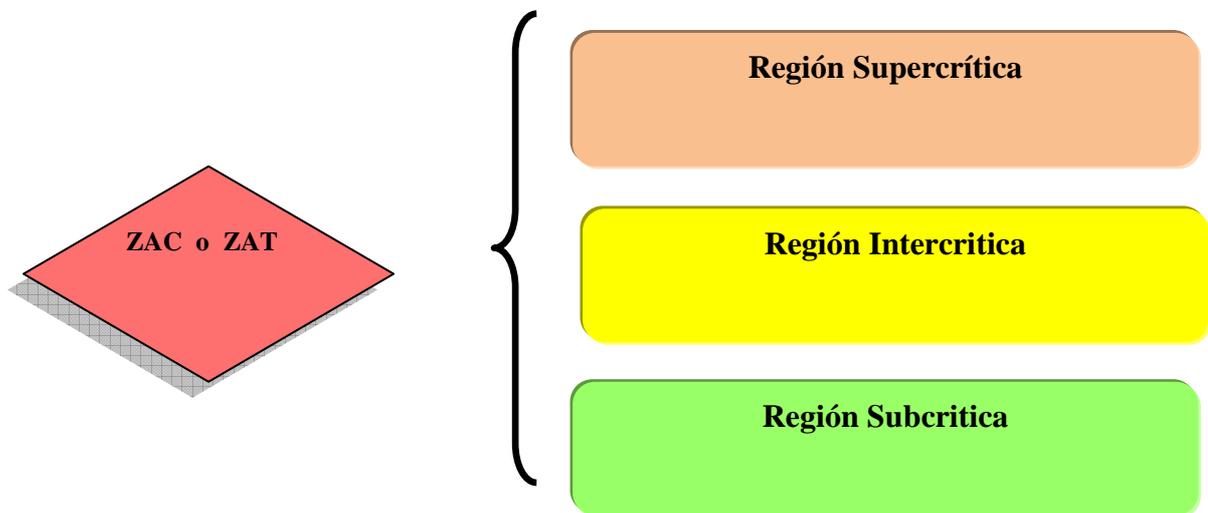
Al realizar el proceso de unificación, en aceros al carbono existe un gradiente micro estructural el cual inicia desde el centro del cordón de soldadura hasta el metal base, esto a consecuencia de los ciclos que se producen en los ciclos térmicos experimentados en función de los parámetros de soldadura empleados, de esta forma se puede identificar la zona afectada térmicamente (ZAT) y el metal base no afectado. [I.44]

Principal mente 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.

## Capítulo I

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 micro estructuras.

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

**Región Subcrítica:** en esta región general mente no ocurren cambios microestructurales apreciables, esto solo puede ser posible por una esferoidización de la perlita, pero esta es muy difícil de detectar por microscopia 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 laser CO2 y por arco metálico con gas (GMAW). En la cual se encontró una



## Capítulo I

---

---

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.

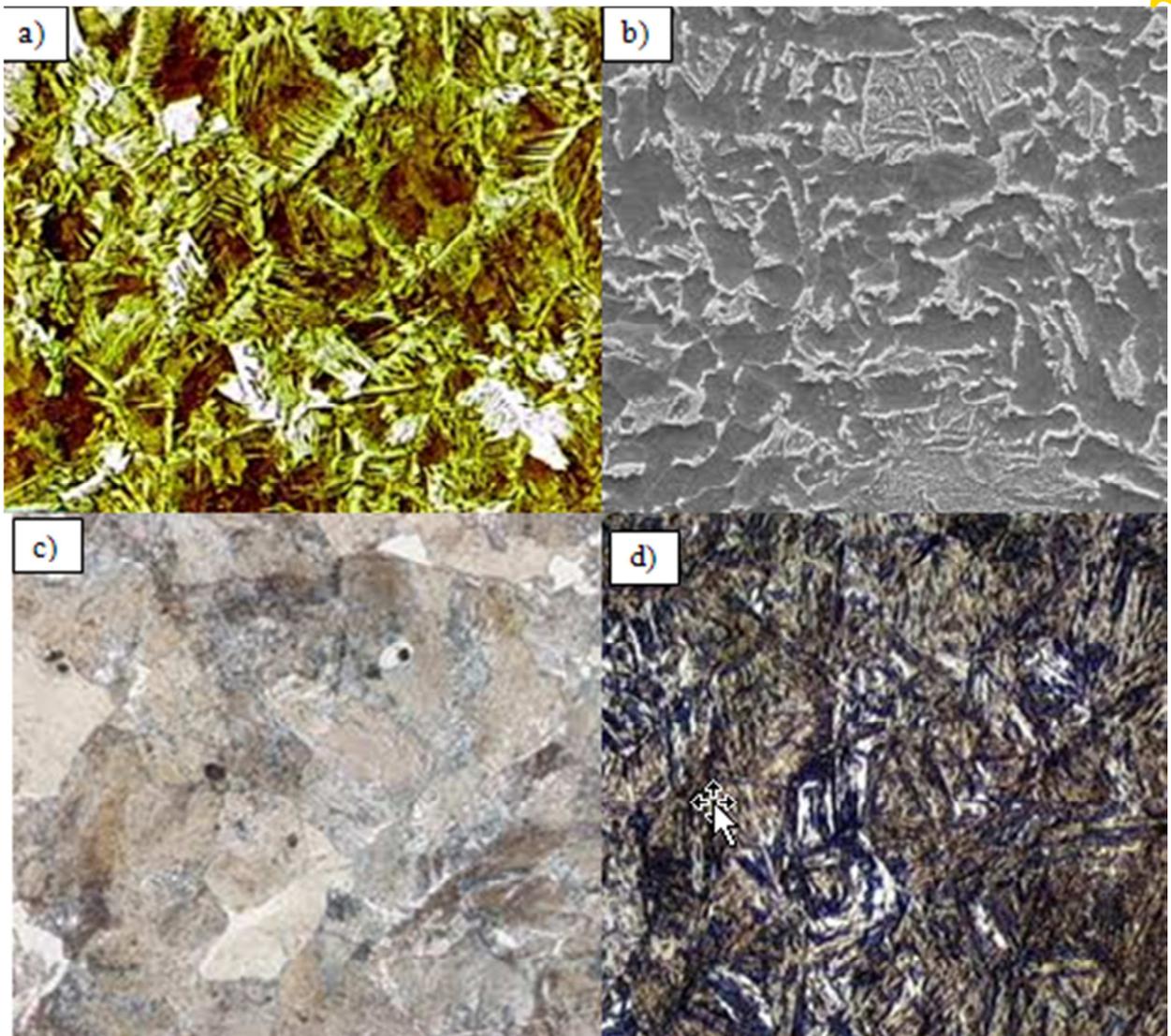
Se le denomina perlita a la microestructura formada por capas o laminas alternas a las dos fases ( $\alpha$  y cementita) durante el enfriamiento lento a temperatura eutectoide, se le da este nombre porque tiene la apariencia de una perla al observarse microscópicamente.

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 eutectoide, 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]

## Capítulo I



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

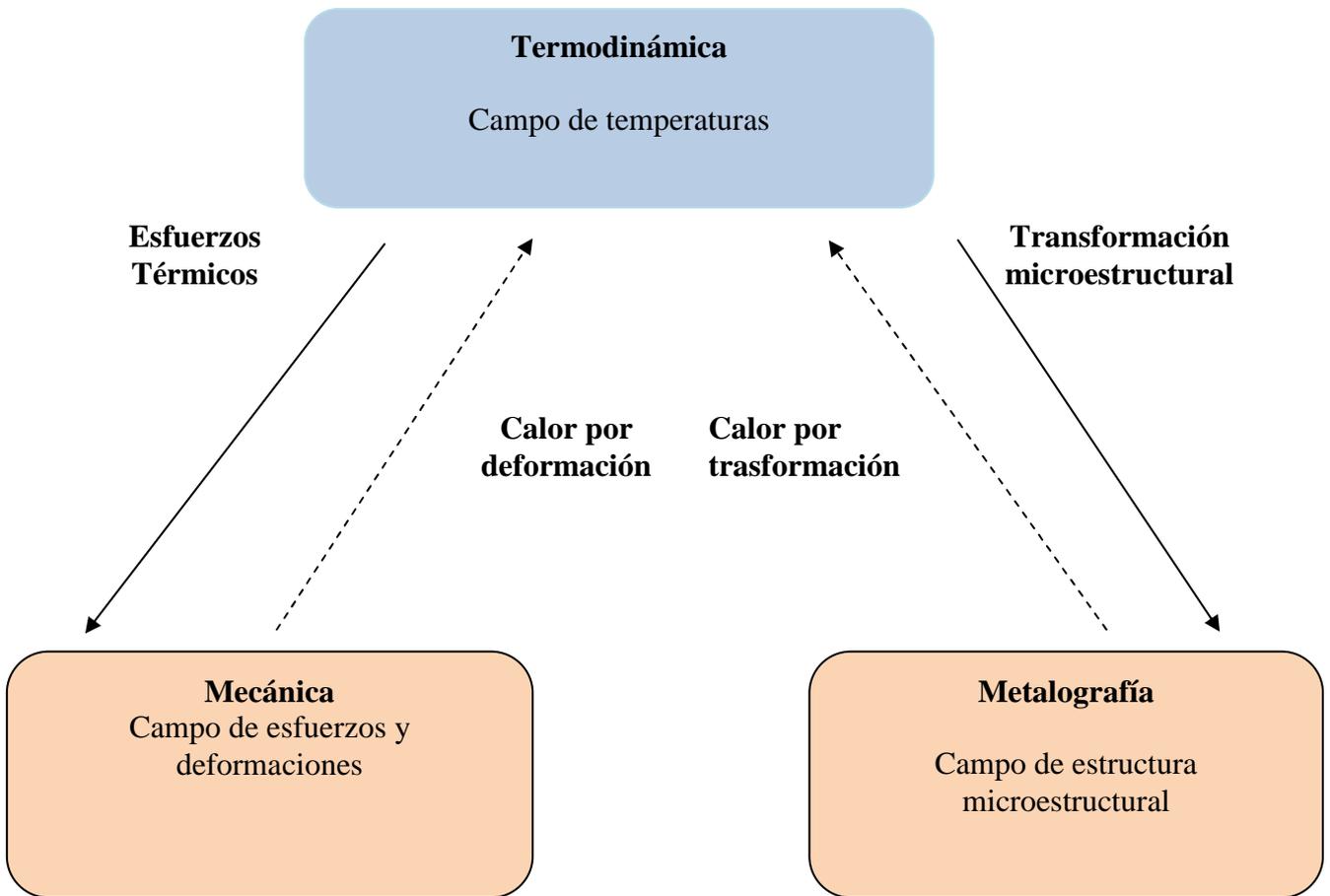
### I.4.2.- Influencia de campos involucrados en el proceso de soldadura.

*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]



## Capítulo I

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]



## Capítulo I

---

---

### **I.5.-Diversos métodos utilizados en la medición de esfuerzos residuales en procesos de 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



## Capítulo I

---

---

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 realizo una evaluación en su planta de energía nuclear en donde se realizo un análisis por el método de elemento finito en donde las fisuras en este tipo de reactores de hidrotatamiento 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



## Capítulo I

---

---

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 que 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 inglés se conoce como Crack Compliance Method.[I.59]

J. L. Garcia empleo explosivos para aliviar de tensiones 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 realizó por galgas y el puente de Wheastone como circuito fundamental, en esta prueba se realizó 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



## Capítulo I

---

---

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.
- 2.- Howard B. C. y Scott Helzer, *Tecnología moderna de la soldadura*, Río superior de la silla de montar, Ed. Educación de 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 (1994).
- 6.- Hunt-Robert, *Humphry Davy, (1778–1829), Natural philosopher*, Dictionary of Nacional Biography, Published 1888.
- 7.- Charles S, *Diccionario de Biografía Científica*, Consejo Americano de Sociedades Científicas, Vol. 2, pp. 67, 1981.
- 8.- Groover-Michael P., Orígenes de la Soldadura, *Fundamentos de Manufactura moderna*, pp.713-714.



## Capítulo I

---

---

- 9.- Rodríguez-Claudio 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, 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.- CE. JACKSON, *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 (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, volumen 1, pp. 34-56, 1987 .*
- 23.-
- 24.-Guiachino W. J. y Weeks W., *Técnica y práctica de la soldadura*, Ed. Reverte, pp. 166, 1981.
- 25.- Cueto-José, *Manual de soldadura TIG*, Ed. Ceysa, pp. 4-6, 2003.
- 26.- Don-Geary, *Welding*, Ed. Mc Graw Hill, pp. 1-3, 2000.
- 27.- Cueto-José, *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.



## Capítulo I

---

---

- 31.- Marshall L. S., *Láser: Tecnología y aplicaciones*, Ed. Reverte S. A., pp.4, 1972.
- 32.- Martin-Cooper, *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, 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-Ling F., *Mechanical Engineering Series*, Ed. Editor-in-Chief, pp.14.
- 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., and 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*, London 2000.
- 42.- Kasuya T. and 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. and 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.



## Capítulo I

---

---

- 46.- Yerania P. G., Medina R. A. y Valdez, H. F., Integridad estructural del acero TRIP800 soldado mediante procesos laser CO2 y GMAW, *Ingenierias ISSN 1405-0676, vol 13*, pp. 62, 2010.
- 47.- Pere-Molera S. *Tratamiento térmico de los metales*, Ed. Productica Barcelona, pp. 17-21, España, 1991.
- 48.- Gil-Mur F. J, y Manero-Panella J. M., *Metalografía*, Ed. Edicions 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.- Ramón Martínez C. y Estrada-Arias 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. Conferencia sobre tecnología y conocimiento*, Colombia, 2003.
- 54.- Sema-Giraldo C., Monitoreo de uniones soldadas de acero estructural utilizando ruido magnético de Barhausen, *IV Conferencia panamericana de END Buenos Aires*, 2007.



## Capítulo I

---

---

55.- Pérez – Medina G., Reyes-Vadés H., Integridad estructural de un acero TRIP800 soldado mediante proceso Láser Co2 y GMAW, *Ingenierías*, ISSN 1405-0676, Vol., 13 pp. 62, 2010.

56.- Casasola-López 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. and 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, *Soldagem, San Pablo*, Vol.2 No. 2 pp. 170-175, 2005.



## Capítulo I

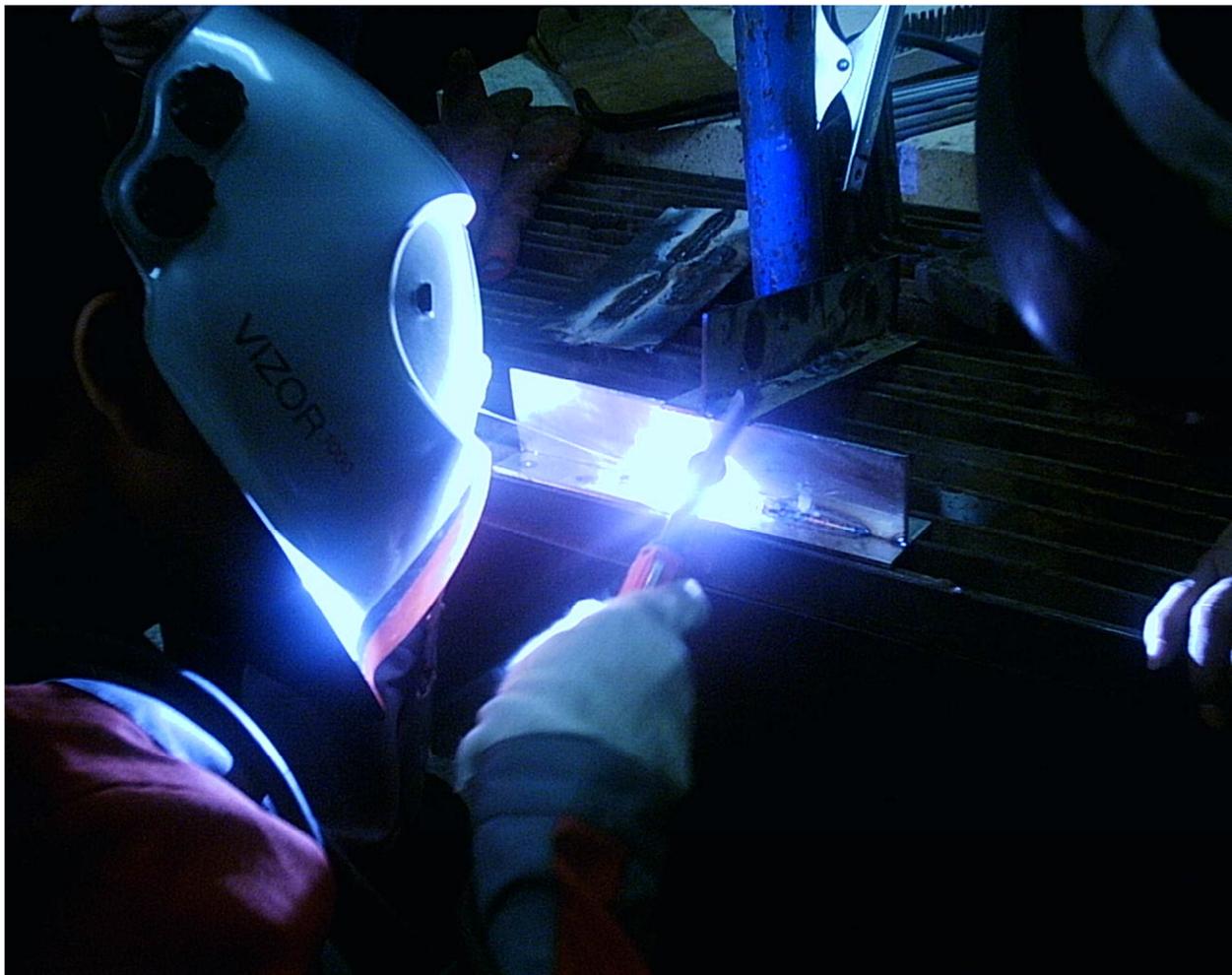
---

---

- 39.- 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.
- 40.- Urriolagoitia-Sosa G. and 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.
- 41.- 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, *Soldagem, San Pablo*, Vol.2 No. 2 pp. 170-175, 2005.



# Capítulo II



**Marco conceptual en los procesos de soldadura TIG MIG y Rayo Láser**



## Capítulo II

---

---

### 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]



## Capítulo II

### 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]

<b>Metal a soldar</b>	<b>Gas</b>
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 densa la capa de 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

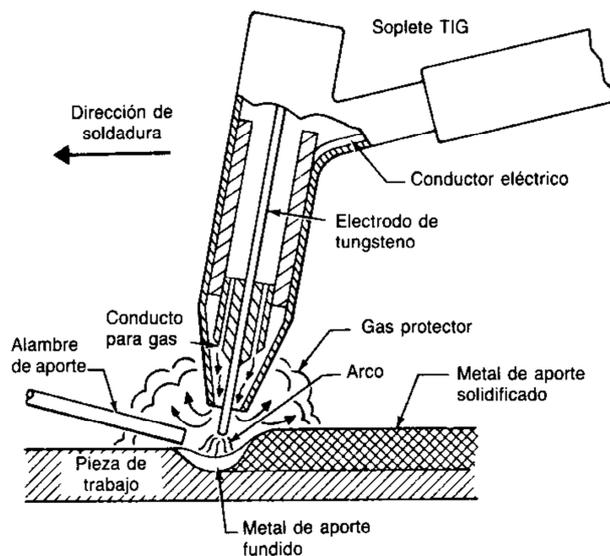


## Capítulo II

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

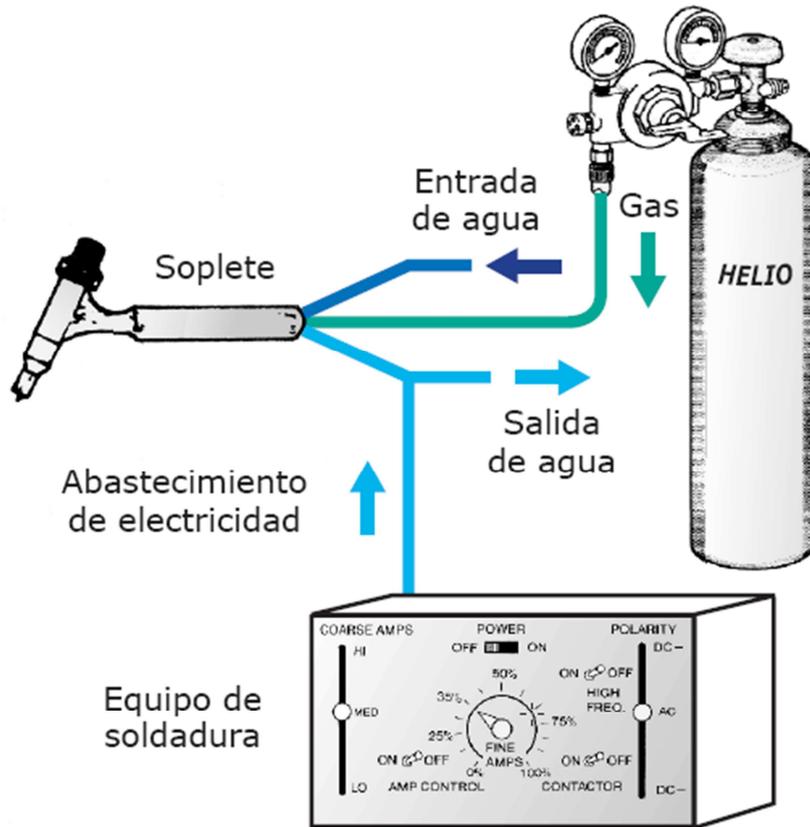
La fuente principal de calor se produce en el arco eléctrico y este a su vez se produce como consecuencia por el paso de la corriente eléctrica a través del gas protector ionizado que conduce electricidad. Una vez establecido el arco eléctrico, el calor generado funde el metal base, generando en ese punto un charco de soldadura, por lo cual es necesario mover el

## Capítulo II

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:

- a) Soplete.
- b) Electrodo.
- c) Gas protector.
- d) 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



## Capítulo II

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 habitualmente 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

<b>Metal a soldar</b>	<b>Corriente preferida</b>	<b>Corriente opcional</b>
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]:



## Capítulo II

---

---

- 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  $45^\circ$  respecto al plano de soldadura. Se acercará el electrodo de Tungsteno a la pieza mediante un

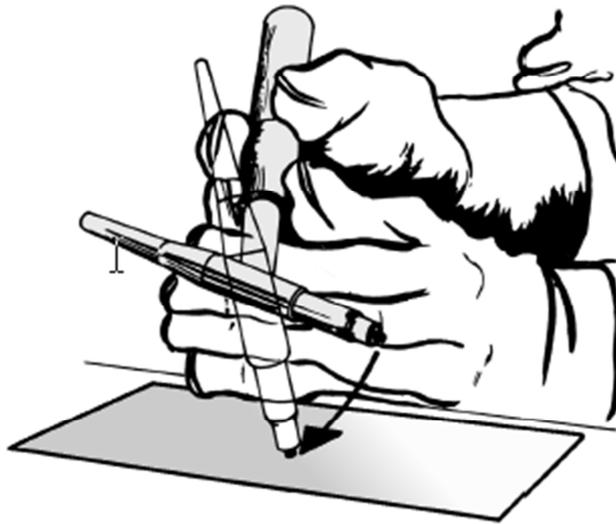


## Capítulo II

---

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	3/16	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 óxido:

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

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



## Capítulo II

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]:



## Capítulo II

---

---

- Las soldaduras tienen la cualidad de ser más dúctiles y resistentes contra la 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 inoxidable 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]:



## Capítulo II

---

---

- 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.

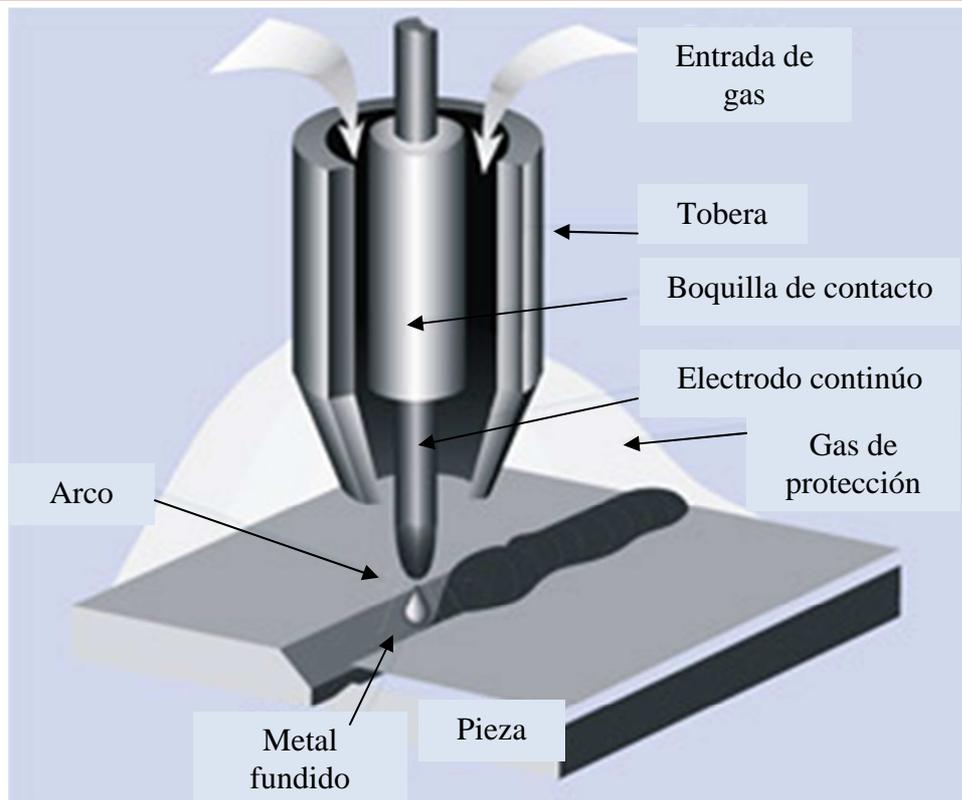
### **II.3.- Proceso de soldadura Gas Arco Metal (MIG)**

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 aspersion [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.



## Capítulo II

---

---

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  $5^{\circ}$  a  $10^{\circ}$ . De no ser así, el gas no protegerá la zona de metal fundido.

### **II.3.1.- Equipo utilizado en el proceso MIG**

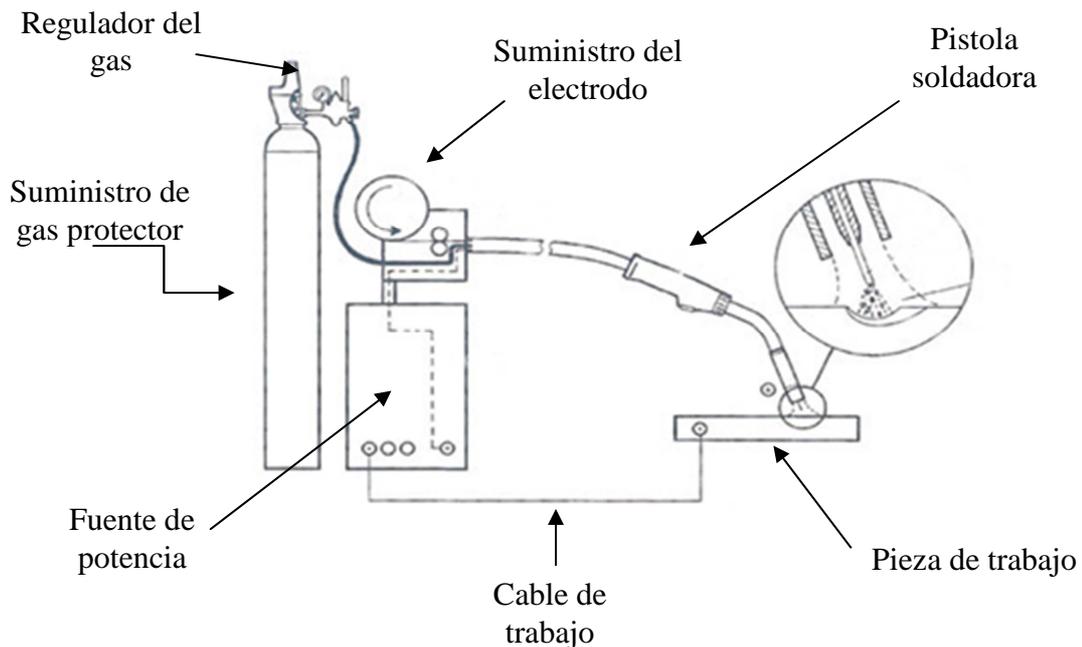
Está constituida por [II.12]:

- 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.



## Capítulo II

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



## Capítulo II

---

---

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 aspersion.
- b) Trasterencia 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 aspersion**

Con un escudo rico en gas Argón, es posible producir una modalidad de transferencia de roció 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 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



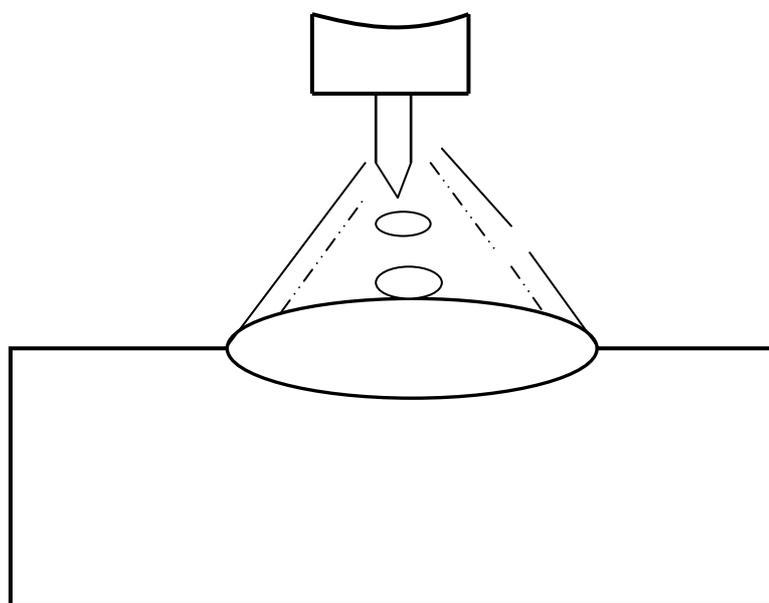
## Capítulo II

---

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 las 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 aspersion, 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, además 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].

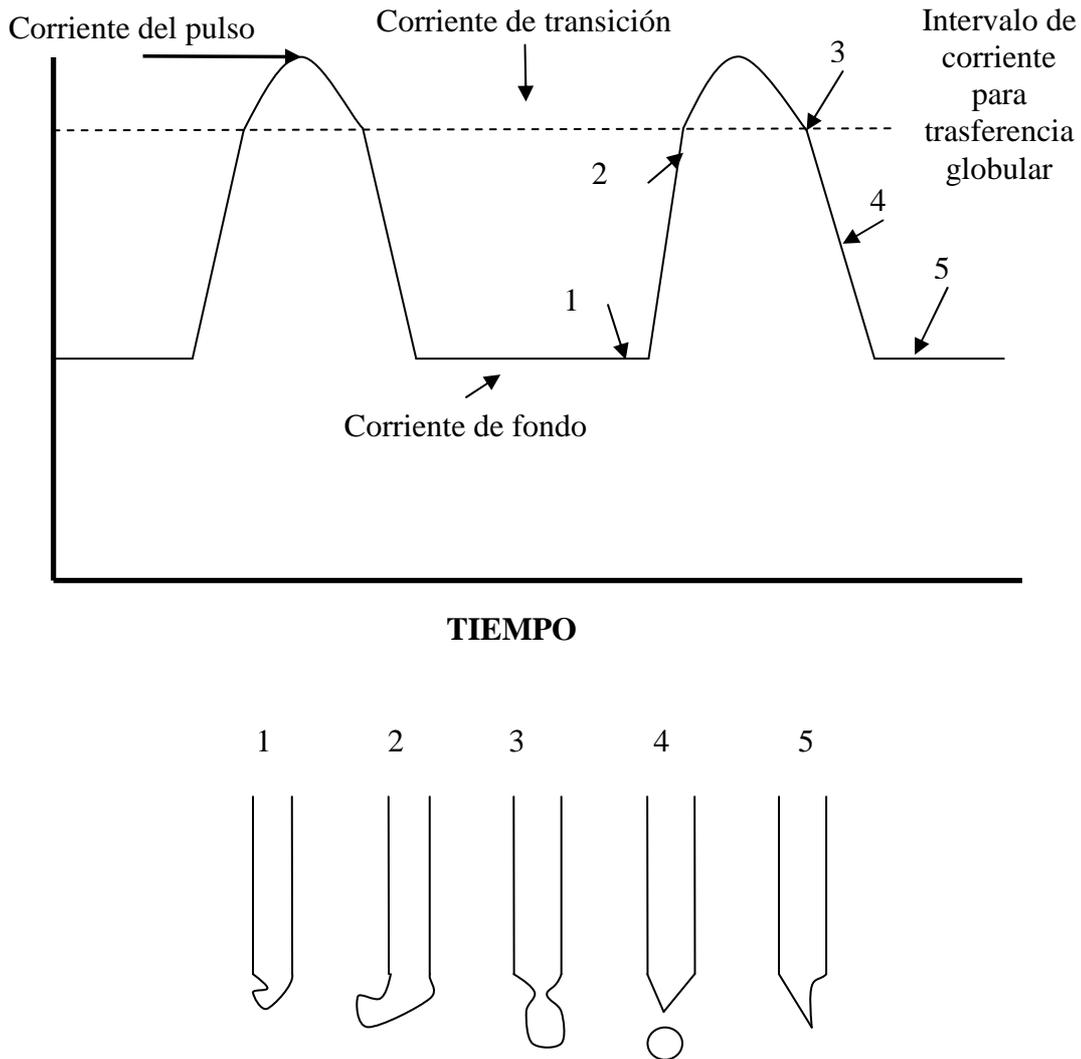


**Figura II.6.-** Transferencia por aspersion axial

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 máquinas producen formas de onda y frecuencias cuidadosamente controladas

## Capítulo II

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 aspersion [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 aspersion para diversos electrodos.



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

<b>Tipo de electrodo de alambre</b>	<b>Diámetro del electrodo en Pulgadas</b>	<b>Diámetro del electrodo en milímetros</b>	<b>Gas protector</b>	<b>Corriente del arco de rocío, mínima (A)</b>
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

### II.3.2.2.- Transferencia globular

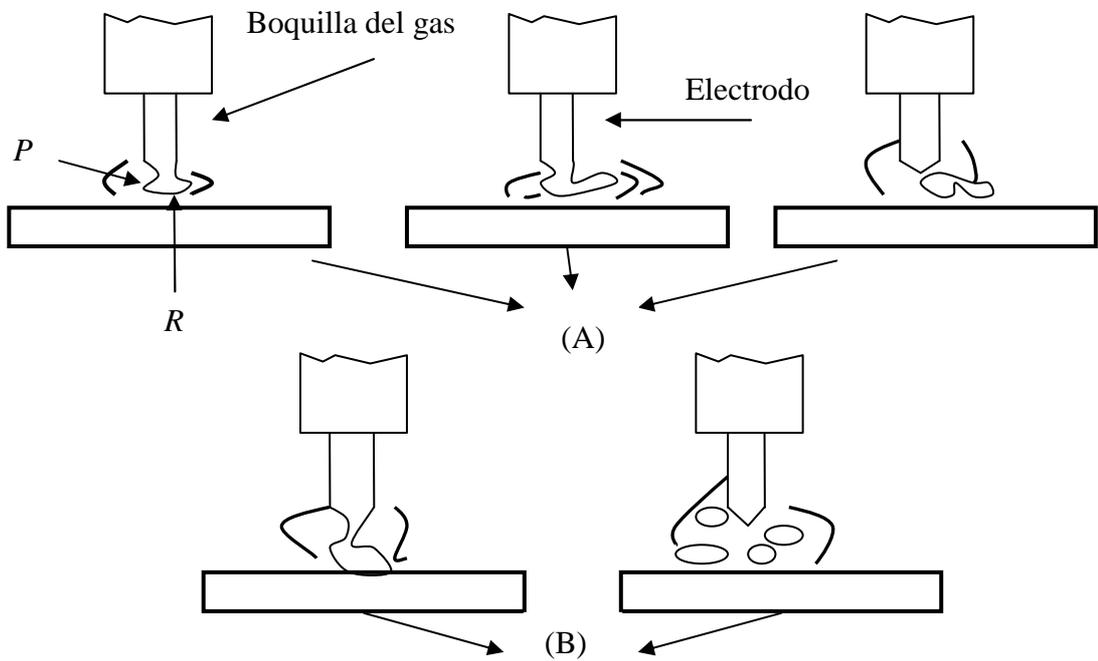
Se le llama transferencia globular cuando la corriente es relativamente baja, sea cual sea el gas protector empleado. Sin embargo, con el dióxido de Carbón y Helio este tipo de transferencia ocurre con todas las corrientes de soldadura útiles. La transferencia globular se caracteriza por un tamaño mayor 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

## Capítulo II

excesivo refuerzo. Esto lo limita considerablemente en aplicaciones de producción continua [II.2].

La protección con dióxido de Carbono 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]

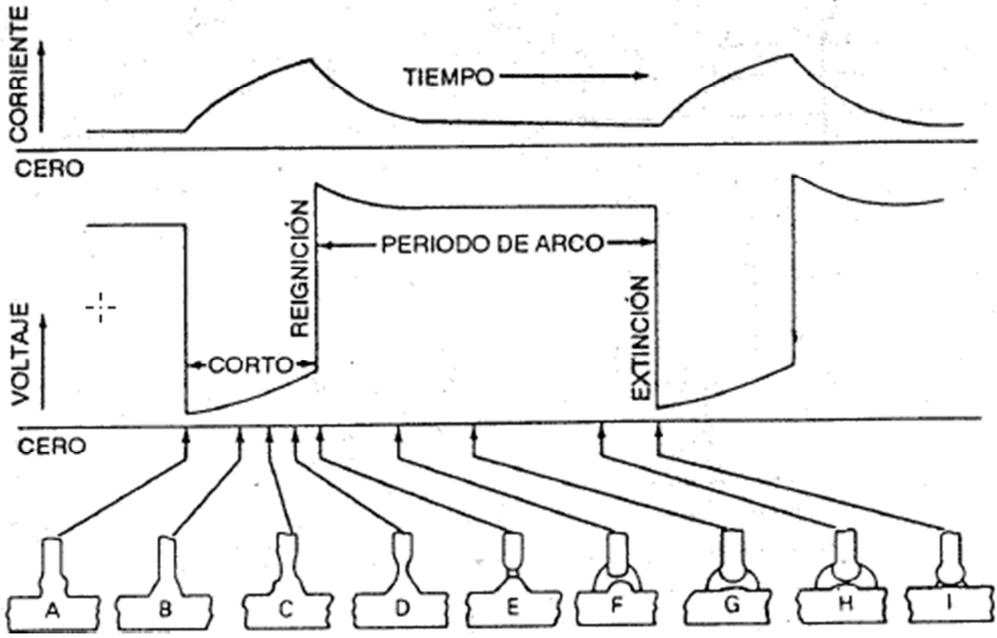
Se debe de considerar que la magnitud de la fuerza de estrangulamiento es función directa de la corriente de soldadura y del diámetro del alambre. Por lo regular es la que causa la separación de las gotas. Con protección de CO<sub>2</sub>, la corriente de soldadura se conduce a través de la gota fundida 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<sub>2</sub> en muchas aplicaciones comerciales. No obstante el CO<sub>2</sub> 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.-** Representación esquemática de la 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.



## Capítulo II

---

---

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. Además 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  $\text{CO}_2$  también promueven la penetración. Para lograr un buen término medio entre salpicaduras y penetración a menudo se usan mezclas de  $\text{CO}_2$  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.



Capítulo II

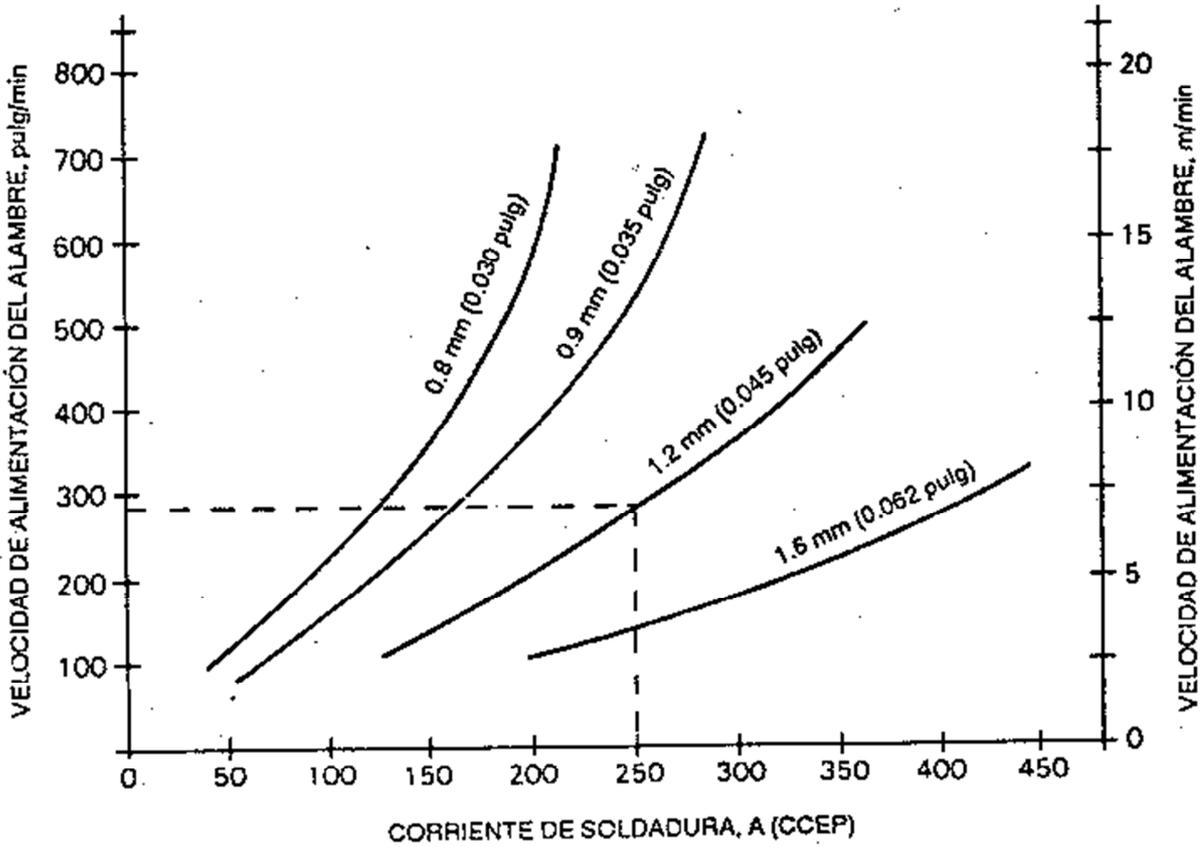


Figura II.10.- Corrientes de soldadura típicas contra las velocidades de alimentación del alambre para electrodos de acero inoxidable de la serie 300. [II.14]

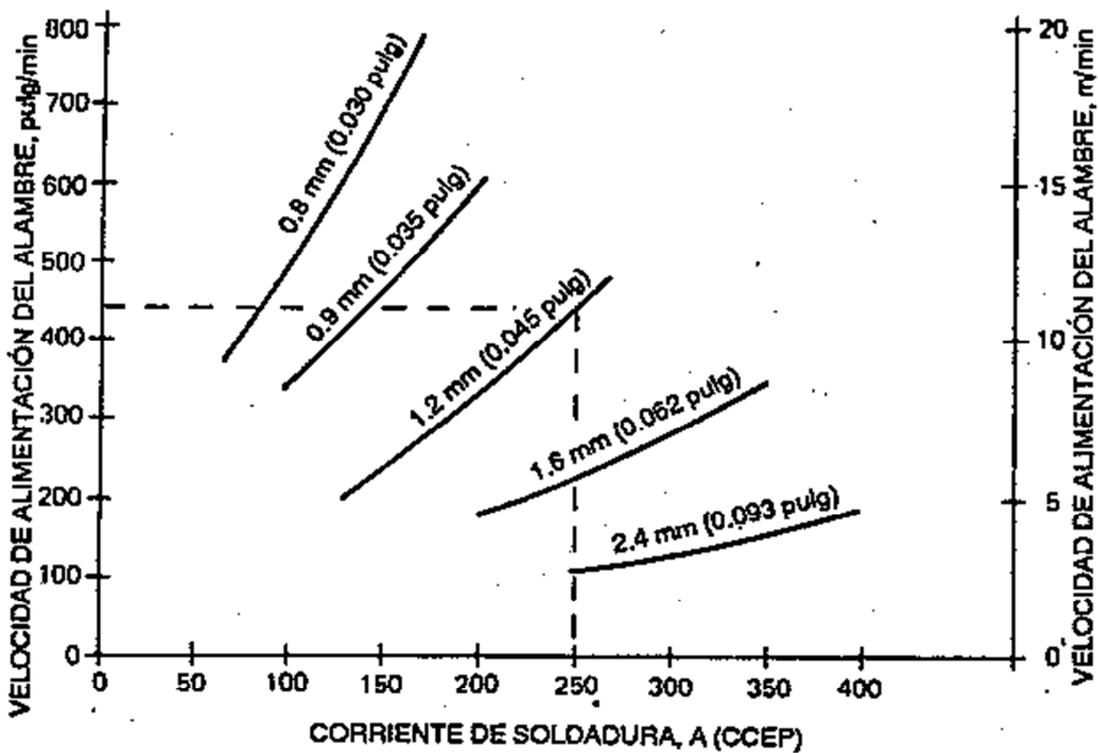


Figura II.11.- Corrientes de soldadura contra velocidad de alimentación del alambre para electrodos de acero Aluminio ER4043 [II.14]

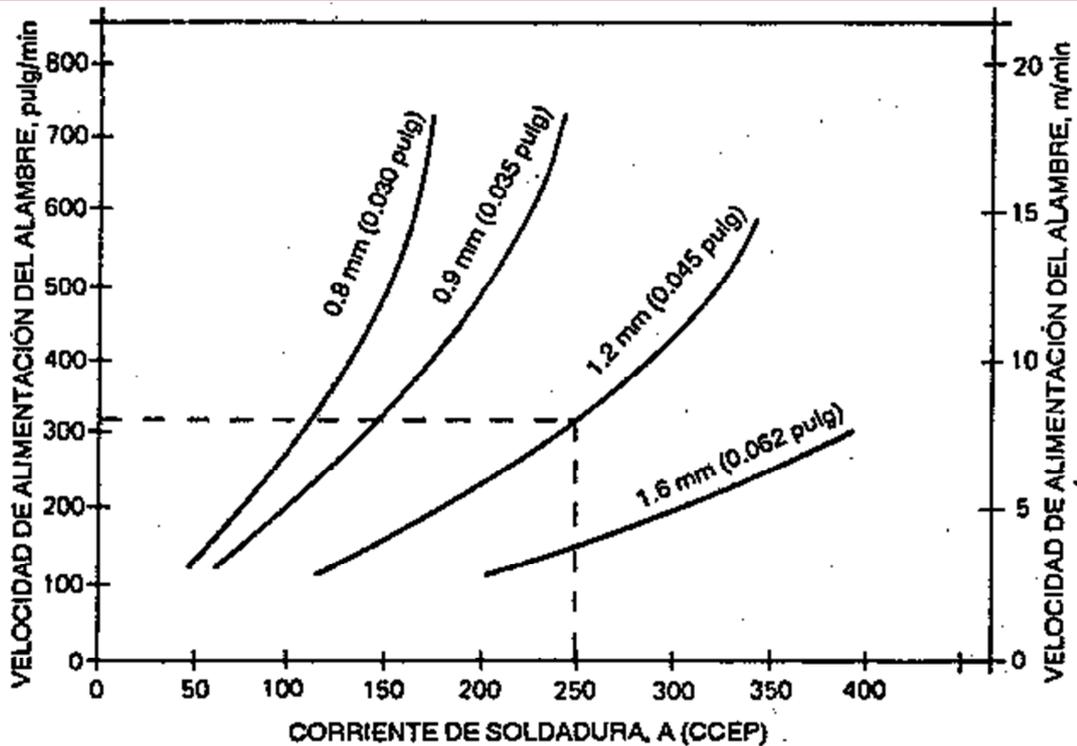


Figura II.12.- Corrientes de soldadura típicas contra las velocidades de alimentación del alambre para electrodos de acero inoxidable de la serie 300. [II.14]

### II.3.4.- Polaridad

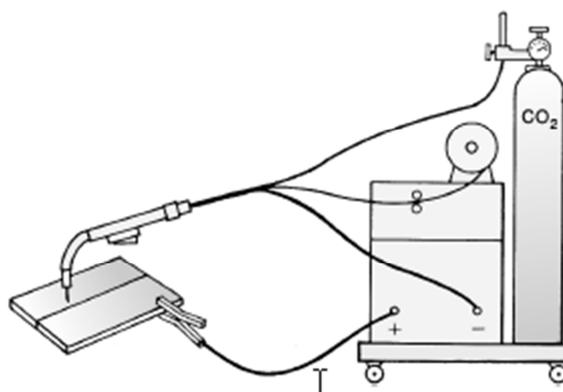
Esto describe la conexión eléctrica de la pistola soldadora en relación con las terminales de una fuente de potencia de corriente continua. Si el cable de potencia de la terminal positiva, la polaridad se designa como corriente continua con el electrodo positivo (CCEP) y se le ha dado arbitrariamente 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 llamó 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 aspersion axial sin efectuar modificaciones que no han gozado de mucha aceptación comercial [II.16].



## Capítulo II

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



## Capítulo II

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 <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	Argón	Ar-O <sub>2</sub> (1-5%O <sub>2</sub> )	75% Ar 25% CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
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 - Níquel	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	----	----	----



## Capítulo II

---

---

(\*) En la variación a pulsos de la transferencia por aspersion, 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

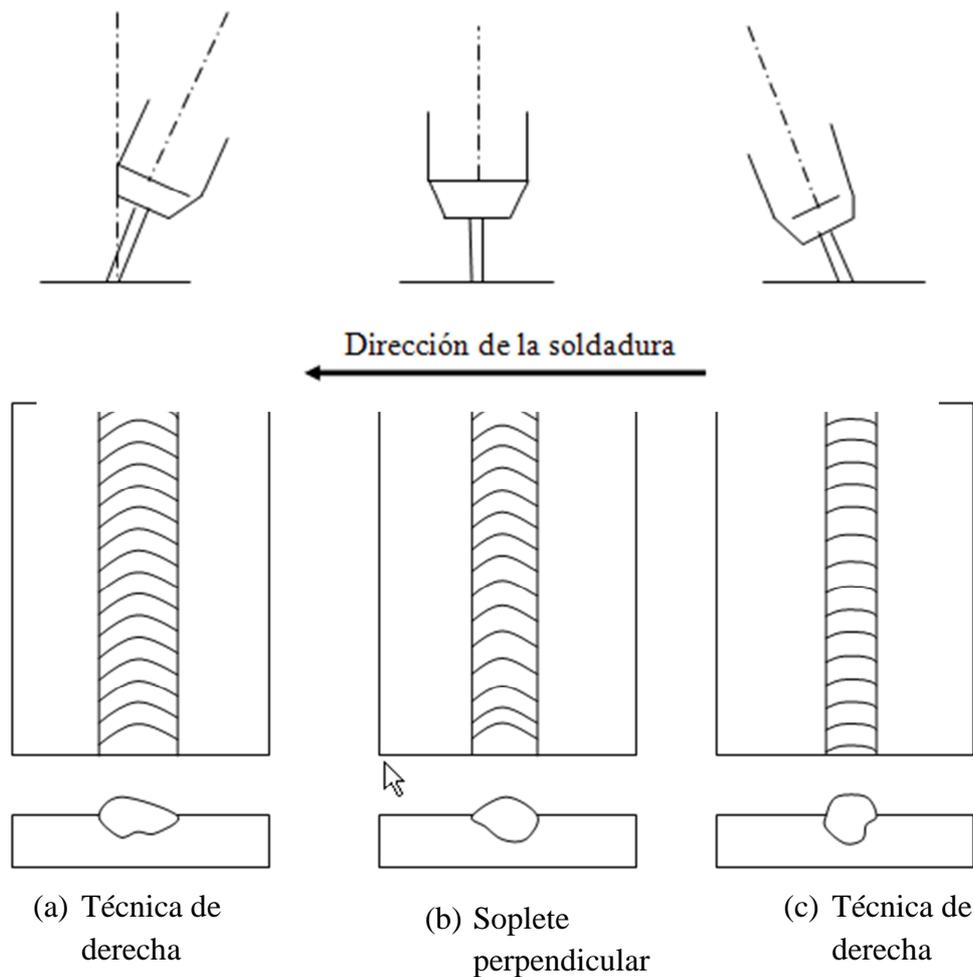
En todos los procesos de soldadura por arco, la orientación del electrodo con respecto a su unión por soldar afecta la forma y la penetración del arco de soldadura, y este efecto sobre la franja de soldadura, este efecto sobre la franja es mayor que el voltaje del arco o el de la velocidad de recorrido.

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]

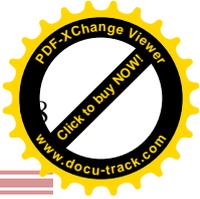


**Figura II.14.-** Efecto de la posición del electrodo y de la técnica de soldadura.

### II.3.6.- 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



## Capítulo II

---

---

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 inoxidable, 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 aspersion 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%



## Capítulo II

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]

<b>Metal</b>	<b>Gas protector</b>	<b>Espesor</b>	<b>Ventajas</b>
Acero al Carbón	75% Argón+25 % CO <sub>2</sub>	Menos de 3.2 mm (1/8 pulg)	Altas velocidades de soldadura sin perforación.
Acero al Carbón	75% Argón+25 % CO <sub>2</sub>	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 <sub>2</sub>	_____	Penetración más profunda; más altas velocidades de soldadura.
Acero inoxidable	90% Helio +7.5% Argón+ 2.5% CO <sub>2</sub>	_____	Zona afectada térmicamente pequeña; mínima distorsión.
Acero de baja aleación	60-70% Helio+25-35% Argón+4.5% CO <sub>2</sub>	_____	Excelente tenacidad y estabilidad del arco, pocas salpicaduras.
Acero de baja aleación	75 % Argón +25% CO <sub>2</sub>	_____	Buena tenacidad, excelente 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.



## Capítulo II

---

---

- 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 aspersion, 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.



## Capítulo II

---

---

- 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 Láser (Laser beam welding)**

En 1960, el científico norteamericano *Theodore Maiman* anunció al mundo la operación del primer laser. Las aplicaciones del láser 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].

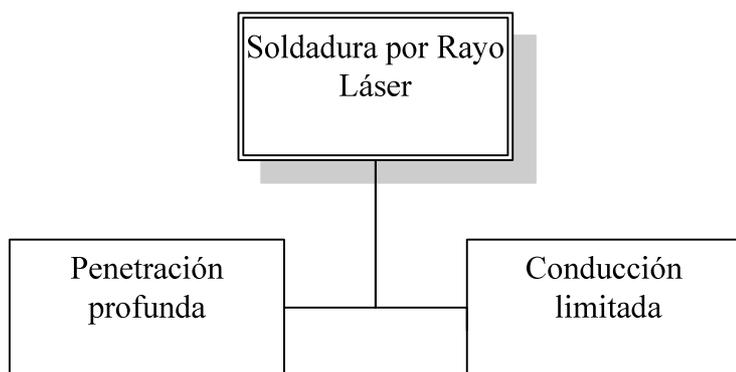
En la actualidad las industrias que impulsan fuertemente la evolución tecnológica, como automotriz, naval y aeroespacial, han incorporado el Láser en sus cadenas de montaje para soldar una gran variedad de materiales. Dentro de estos se encuentran metales y aleaciones preciosas, Plomo, Cobre y sus aleaciones,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



## Capítulo II

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 láser: 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.- Tipos de soldadura por rayo Láser**

El método de conducción limitada utiliza una potencia moderada del CO<sub>2</sub> y trabaja normalmente a menos de 1KW de potencia. Por otra parte en el proceso de penetración profunda requiere una muy alta potencia del CO<sub>2</sub>, 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 láser 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

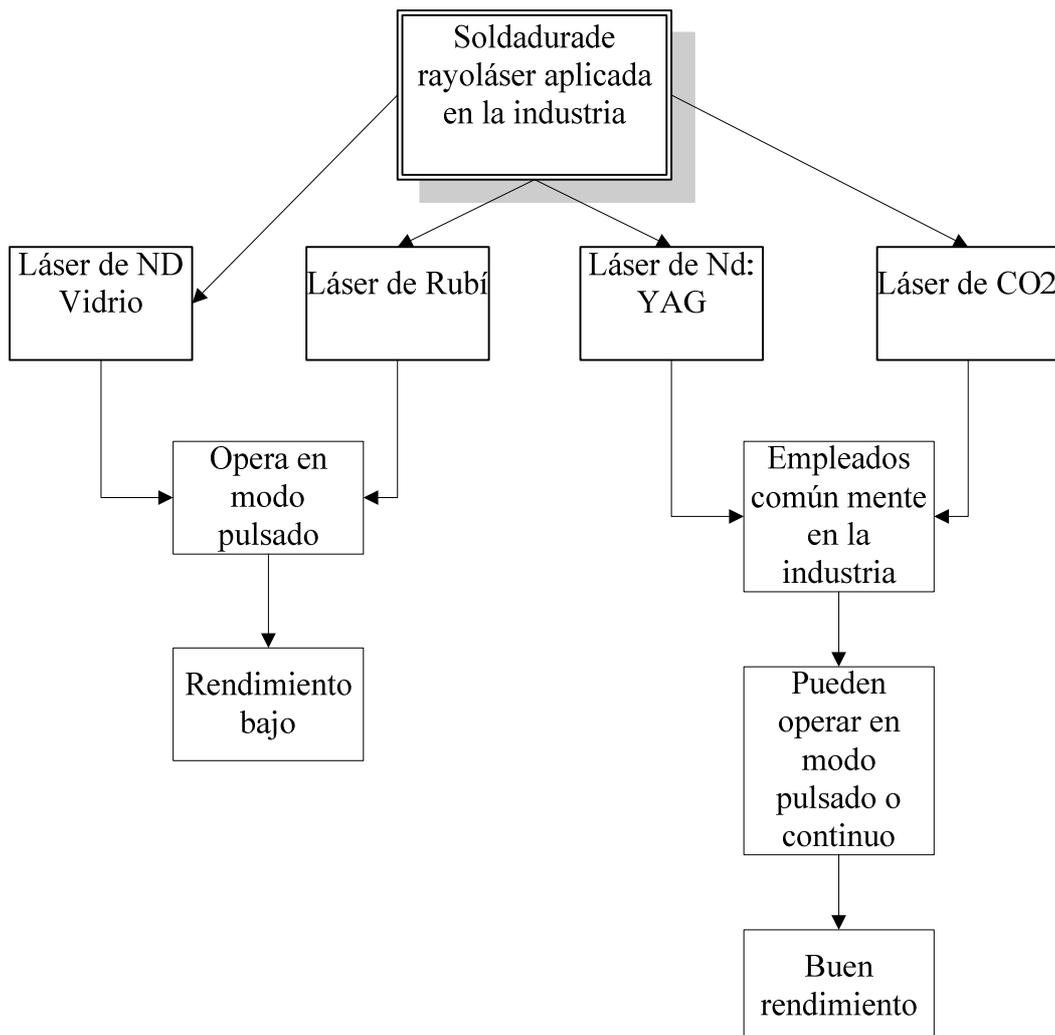
En el mercado se encuentran cuatro tipos de Láseres útiles para el proceso de soldadura [II.22]:



## Capítulo II

- Láser de ND vidrio.
- Láser de rubí.
- Láser de Nd: YAG.
- Láser de CO<sub>2</sub>.

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 láser de Nd YAG (Sólido) y el láser de CO<sub>2</sub> (Gas).





### **Figura II.16.-** Tipos de soldadura por Rayo Láser empleados 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  $\text{CO}_2$ .

#### **II.4.2.- Láser de gas**

Se puede establecer que el Láser más eficiente en la actualidad para aplicaciones en procesos de materiales el Láser de  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$  utiliza una carga eléctrica. El más sencillo de  $\text{CO}_2$  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  $1 \mu\text{m}$  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,



## Capítulo II

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]

<b>Material</b>	Propiedades ópticas de la superficie de la radiación Propiedades térmicas como conductividad Difusión, temperatura de fusión y ebullición
<b>Geometría de la unión</b>	Diseño Tolerancias Accesibilidad.
<b>Láser</b>	Potencia, promedio de pico, modo continuo o pulsante, Modo de distribución espacial de la potencia Longitud de onda
<b>Proceso</b>	Velocidad de soldadura Longitud focal utilizada Posición relativa del punto focal y de la pieza Tipo del gas de aporte

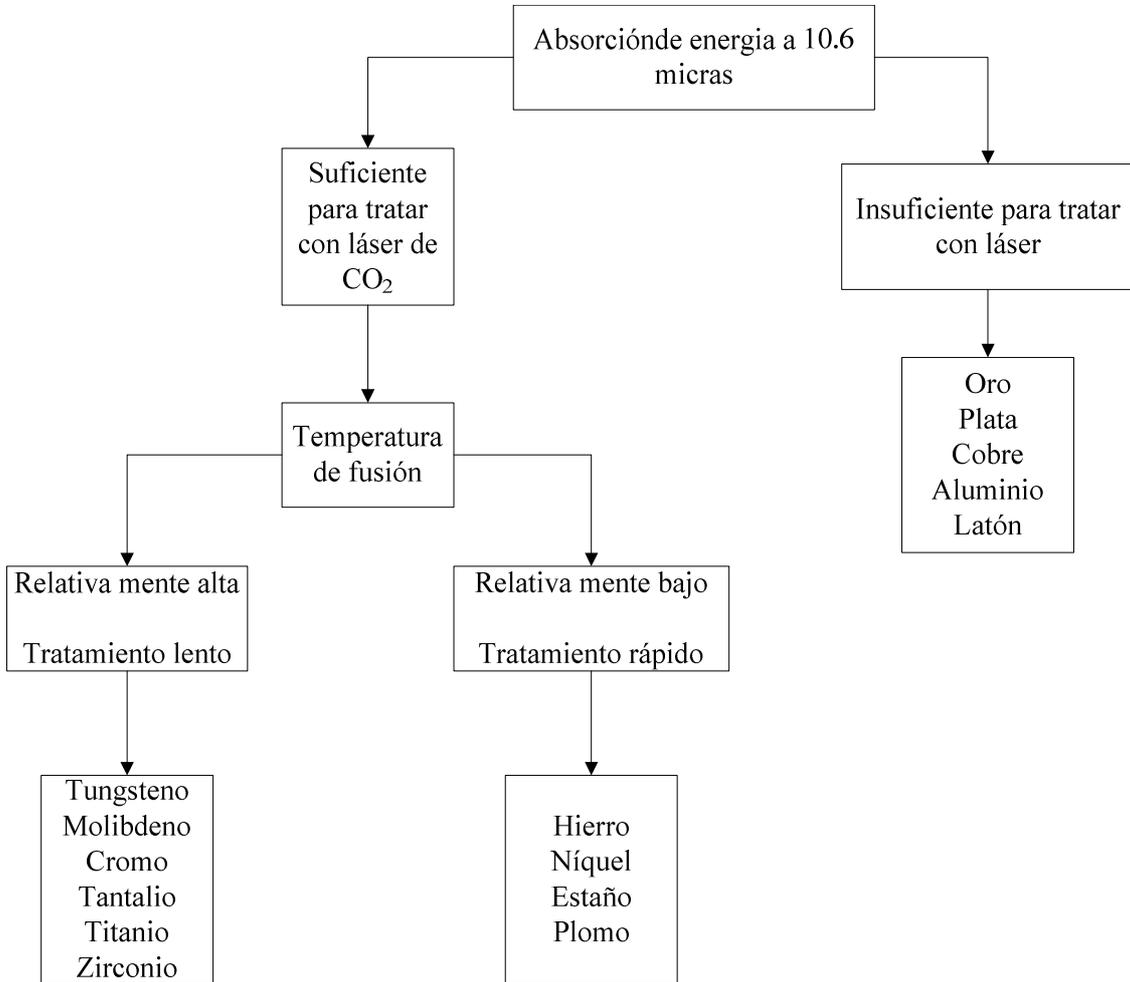
### II.4.4.- Interacción Láser y metal a soldar

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<sub>2</sub>. 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



## Capítulo II

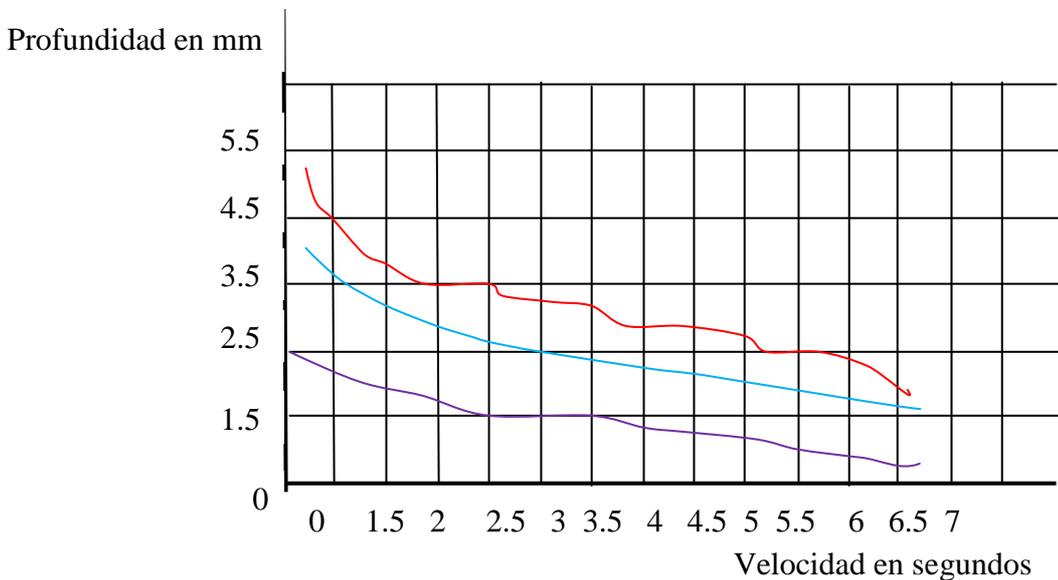
coeficiente térmico de acoplamiento y se pueden alcanzar incrementos en la eficiencia entre la interacción del Láser con el metal [II.19].



**Figura II.15.-** Clasificación de los metales según su respuesta a los Láseres de CO<sub>2</sub> [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 Figura 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]



**Tabla II.9.-** Tabla de velocidad contra profundidad en el proceso de rayo Láser

#### 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



## Capítulo II

---

---

- 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.- **Claudio-Rodríguez, P.**, *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<sup>®</sup>, pp 18-25, 2010.
- 5.- *Manual de electrodos para soldar*, Electrodo Infra<sup>®</sup>, pp 69-73 y 116, 2011.
- 6.- *Tecnología en soldadura: Soldadura TIG*, Manual de usuario Sunarc<sup>®</sup>, pp 4-7 y 11-19, 2009.



## Capítulo II

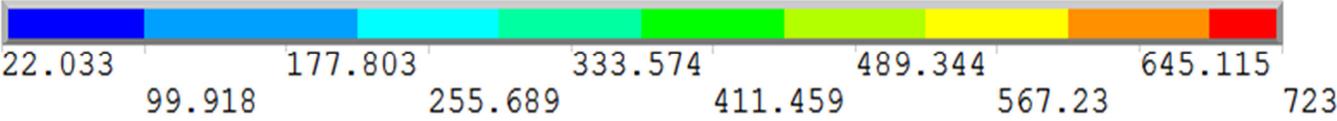
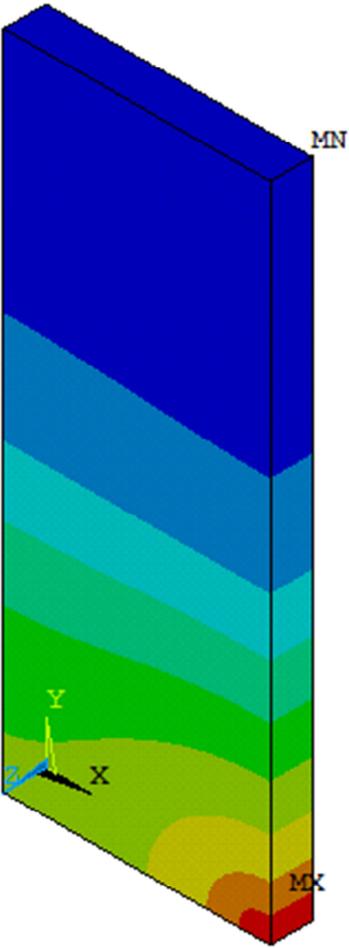
---

---

- 7.- *Manual de instrucciones para soldadora de arco*, Manual de usuario Cebora<sup>®</sup>, pp 18-20, 2009.
- 8.- *Manual de conceptos básicos en soldadura y corte*, Manual de usuario Infra<sup>®</sup>, 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<sup>®</sup>, 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<sup>®</sup>, 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<sup>®</sup>, 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<sup>®</sup>, 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.
- 22.-
- 23.- González, E., *El Láser principios básicos*, Ed. Universidad de Santo Tomas, Colombia, pp 39-51, 2003.



# Capítulo III



**Análisis Numéricos Térmicos en  
procesos de soldadura TIG, MIG y  
Rayo Láser**



## Capítulo III

---

---

### 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 común mente 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 común mente a 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 detallada mente 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.- *Ansys*, 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. *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* ya que constituye una potente herramienta, como el caso de *Bezerra* [III.5] quien utiliza este software en busca de una caracterización del comportamiento dinámico en estructuras soldadas.



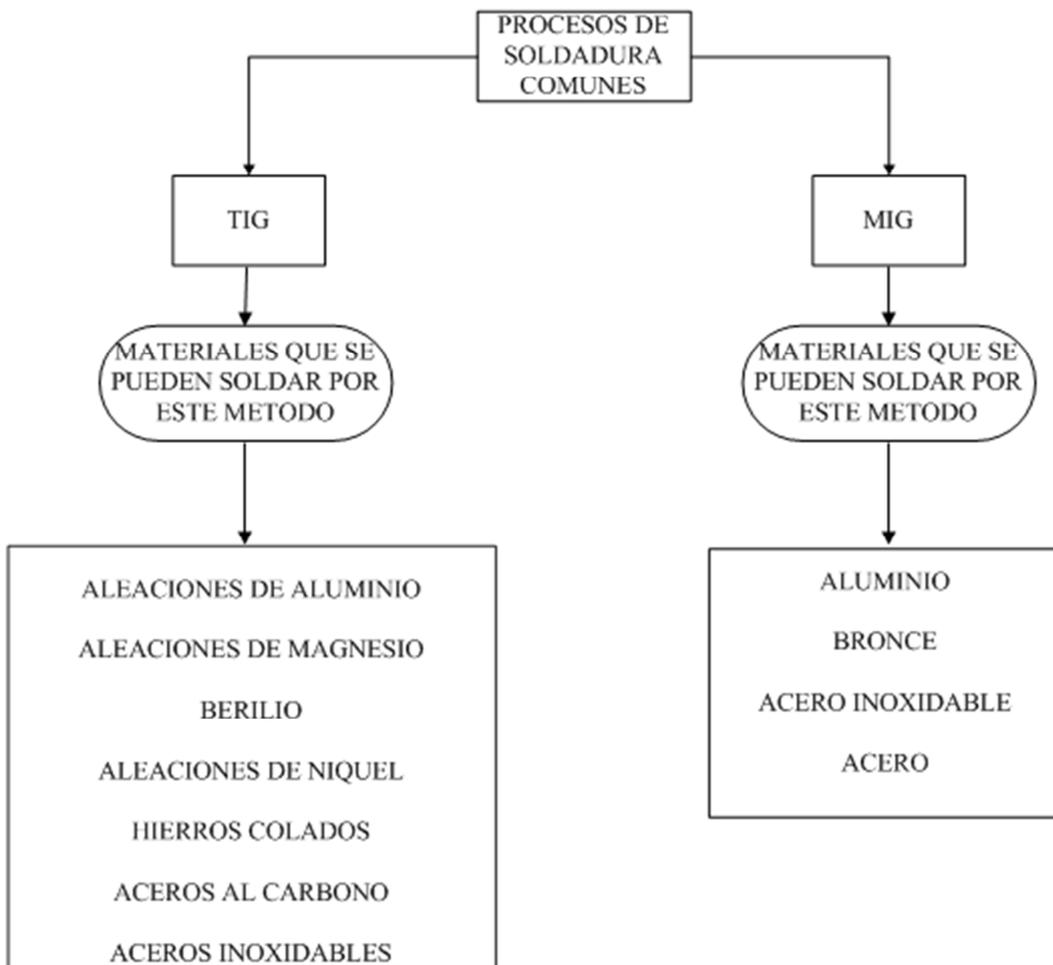
### Capítulo III

Las dudas que aún existen en cuanto la aplicación del método de elemento finito en procesos de soldadura son los 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.

Así que 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]



## Capítulo III

---

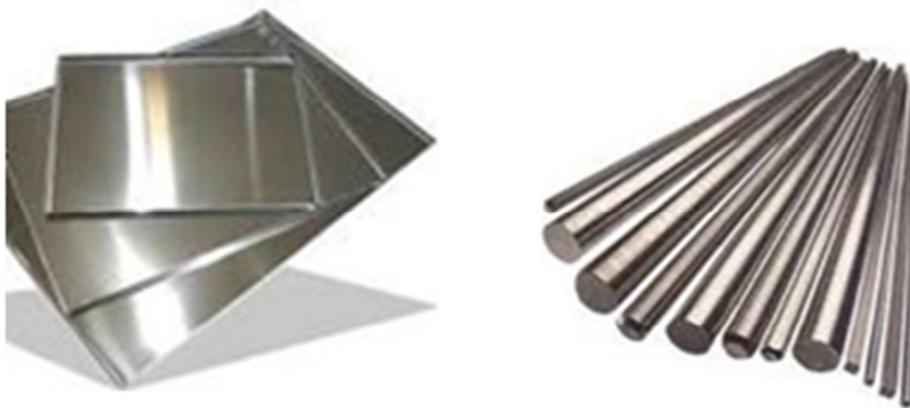
Como se puede observar en la figura mm, el proceso de soldadura TIG y MIG, tienen en común el poder unificar Aceros y Aluminios.

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 304 L, pero la adición de Mo mejora su resistencia a 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 aun en estado de recalentado.



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

### Tratamientos térmicos

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”.

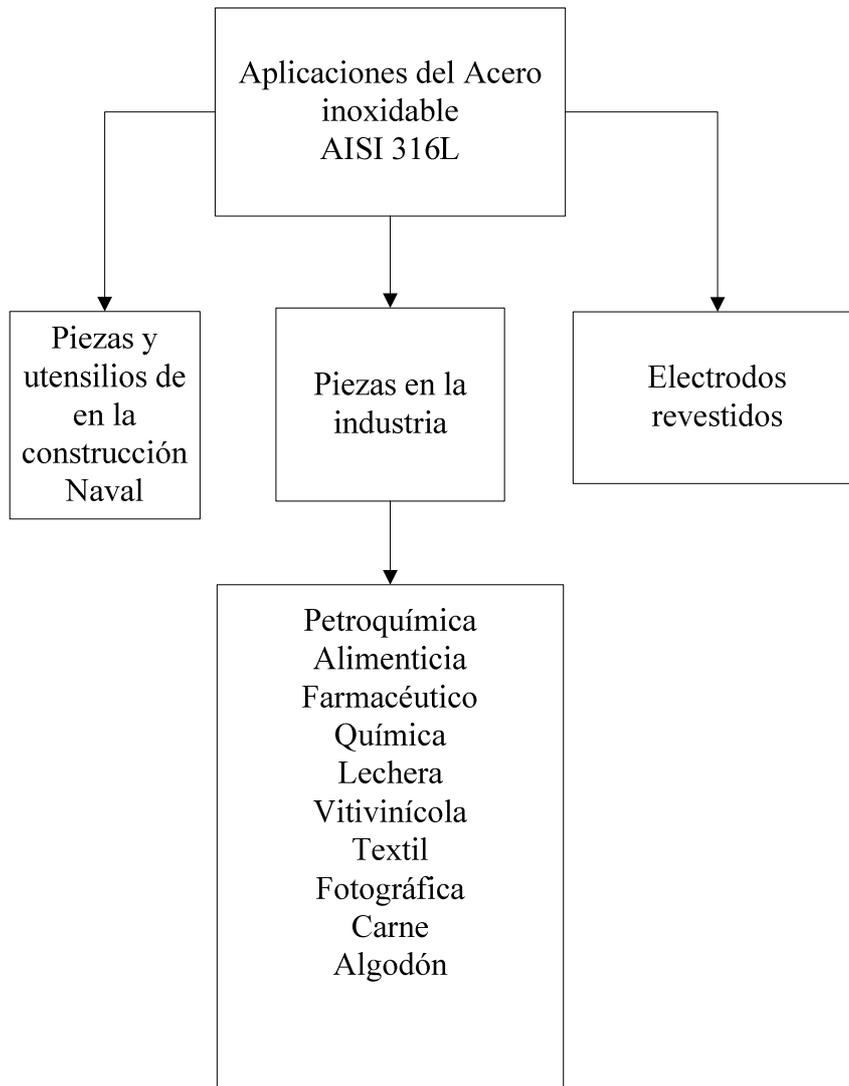


### Capítulo III

- 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 316 L

### 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. Ya que esto también permite que el software genere resultados aproximados a el método experimental.

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

<b>Dureza</b>	138 HBN
<b>Esfuerzo de fluencia</b>	370 MPa (53700 PSI)
<b>Esfuerzo máximo</b>	440 MPa (63800 PSI)
<b>Elongación</b>	15 % en 50mm
<b>Reducción de área</b>	40 %
<b>Módulo de elasticidad</b>	205 GPa (29700 KSI)
<b>Maquinabilidad</b>	75 %

### III. 3.4.- Propiedades químicas

Los elementos que conforman el Acero inoxidable 316L, regulan su comportamiento ante factores externos. Básicamente este material está conformado químicamente como se muestra en la siguiente tabla:



Capítulo III

**Tabla III.2.-** Propiedades Químicas del Acero inoxidable AISI 316 L

% C	Cr	Ni	Mo
0.03%	17.5%	10.5 %	2.80 %

**II.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.3.-** Propiedades Físicas del Acero inoxidable AISI 316 l

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

**Tabla III.4.-** Propiedades termo dependientes del acero 316L

Coeficiente de expansión térmica	15.9	100°C
	16.2	315°C
	17.5	500°C
	19.9	871°C
Módulo de elasticidad	193 Gpa	22°C



Capítulo III

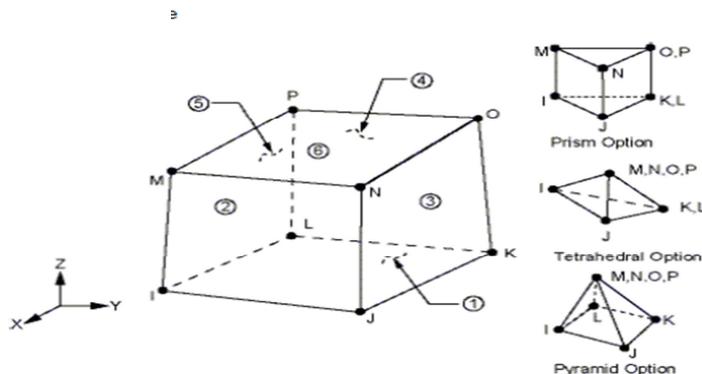
Límite de fluencia	241 Mpa	204°C
	190 Mpa	427°C
	110 Mpa	871°C
Coefficiente de Poisson	0.28	22°C

**III.4.- Desarrollo del análisis térmico en 3-D para el proceso TIG en Ansys.**

Con la finalidad de simular procesos de soldadura TIG y MIG de forma real y lógica de forma 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 3-D.**

Se elige un tipo de elemento, que posea la temperatura como grado de libertad, permitiendo simular el flujo de calor en el material de forma idónea. 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 3-D, además de contar con ocho nodos, con un solo grado de libertad, la temperatura en cada uno de los nodos. Como se muestra en la siguiente figura III.5.



**Figura III.5.- Elemento Solid 70**



## Capítulo III

### III.4.2.- Inducción de Propiedades Mecánicas en *Ansys*

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:

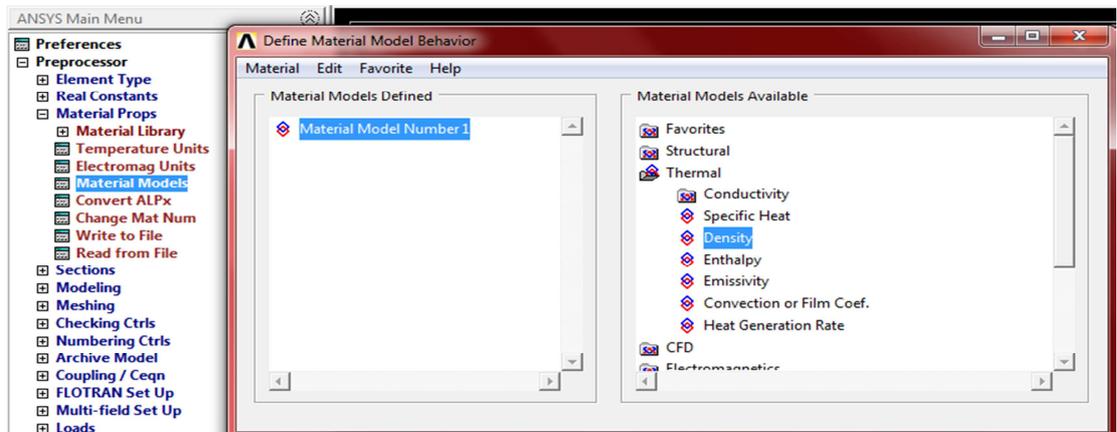
- Densidad
- Calor específico
- Conductividad térmica

Esto se hace en el preprocesador de *Ansys* en la sección de Material 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
- Specific Heat for Material Number 1= 500
- Density for 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.

La figura III.6.- Muestra la ventanilla en la que se puede ingresar los datos mencionados anteriormente.



**Figura III.6.-** Datos mecánicos para el análisis térmico

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.7.

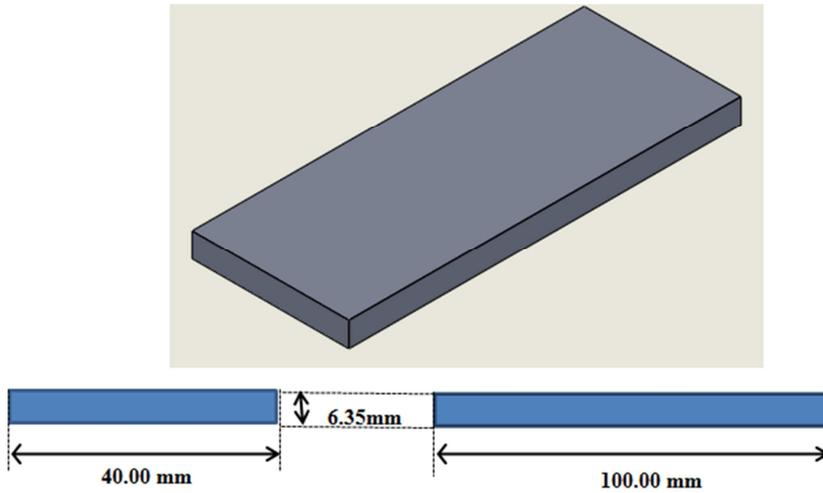


Figura III.7.- Medidas del espécimen

#### III.4.3.- Modelado y mallado de la probeta en Ansys

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.8.

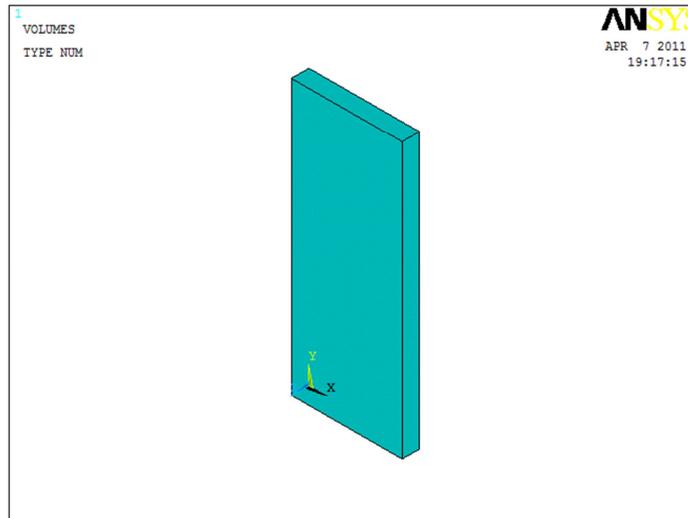
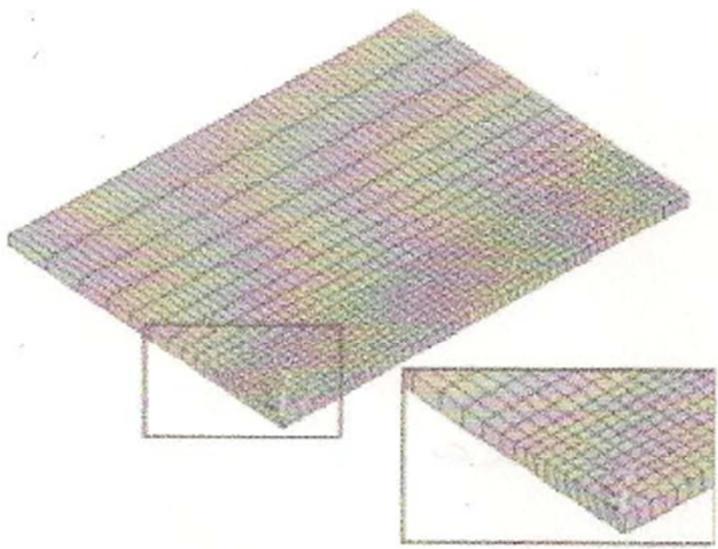


Figura III.8.- Modelado de probetas en Ansys para proceso TIG, MIG y Rayo Láser.



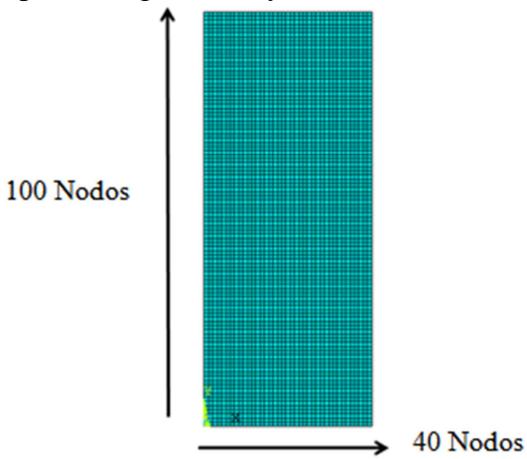
### Capítulo III

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.9



**Figura III.9.-** Mallado utilizado por *Pozo-Morejón* en el cual la zona afectada térmicamente es más fina

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.10.



**Figura III.10.-** Mallado utilizado



### III.4.4.-Inducción de cargas térmicas en el espécimen 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 Analysis type como se muestra en la figura III-11, donde se declara que es un análisis transitorio.

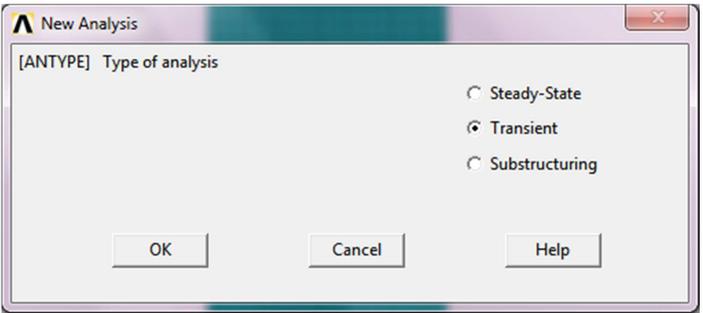


Figura III.11.- declaración de análisis transitorio

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  $22^\circ\text{C}$  como se muestra en la Figura III.12.

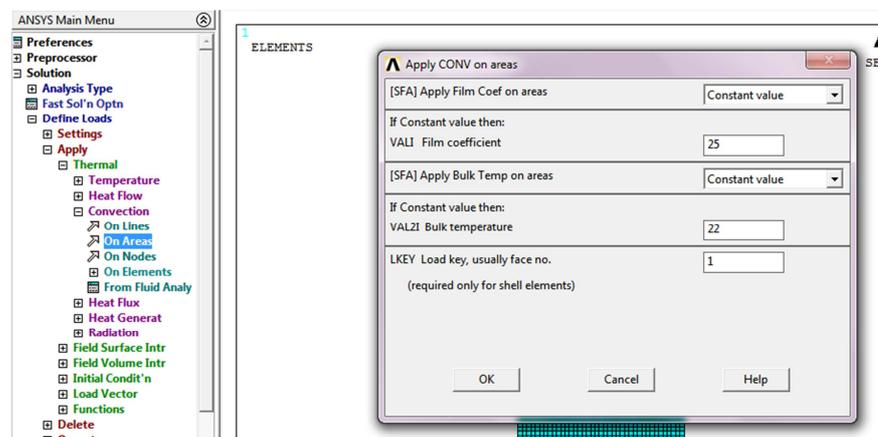
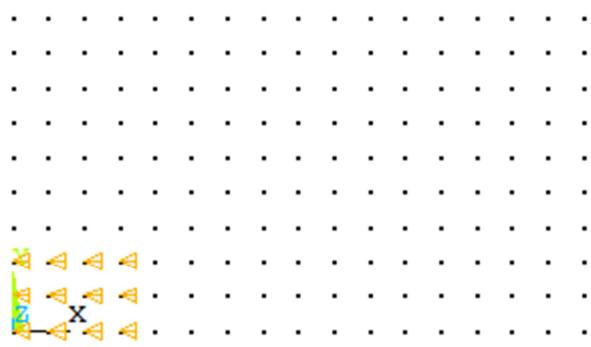


Figura III.12.- Condición de frontera.



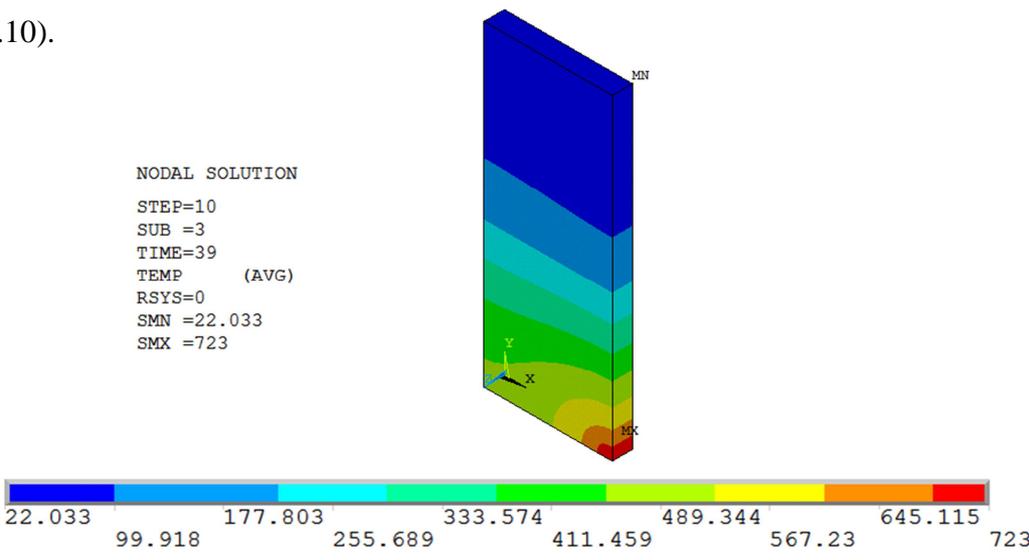
### Capítulo III

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, como se muestra en la Figura III-13.



**Figura III.13.-** 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. 14, en la cual se puede visualizar el paso de la fuente térmica en el último paso de carga (Figura III.10).



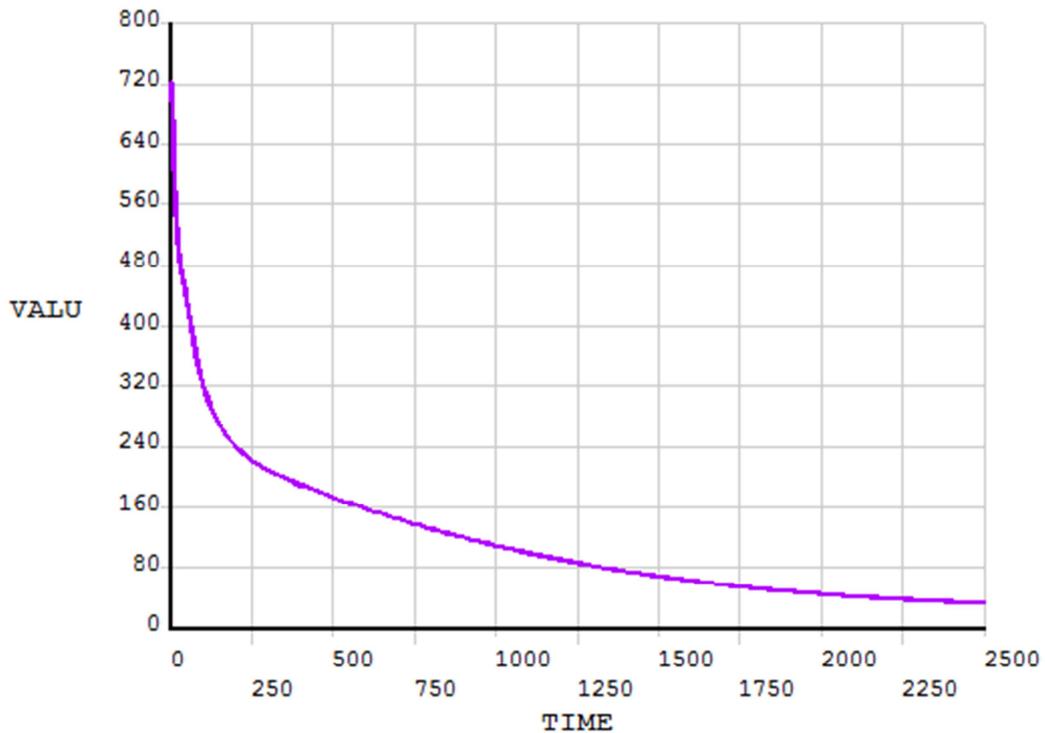
**Figura III.14.-** Colocación de carga térmica en el último paso TIG



### Capítulo III

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

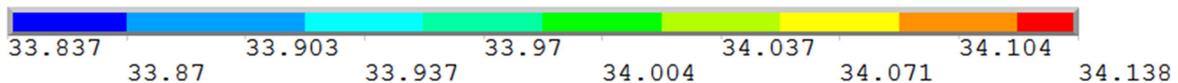
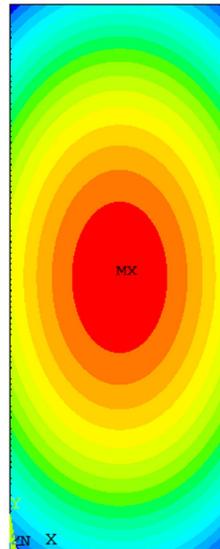
Contemplando que la simulación del proceso de soldadura sea lo más cercano a la realidad, se debe contemplar en el análisis térmico un equilibrio térmico, ya que este trabajo de investigación está estructurado en un análisis acoplado, el cual se estructura en su primera fase en un análisis trascendente y un estático. La figura 16 muestra la temperatura en el espécimen justo cuando este alcanza su equilibrio térmico a los 34 °C.



## Capítulo III

NODAL SOLUTION

STEP=11  
SUB =164  
TIME=2500  
TEMP (AVG)  
RSYS=0  
SMN =33.837  
SMX =34.138



**Figura III.16.-** Temperatura del espécimen a los 2500 segundos

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

Es importante desarrollar un análisis en 2-D, 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 3-D, 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
- Specific Heat for Material Number 1= 500
- Density for material Number1 = 8000

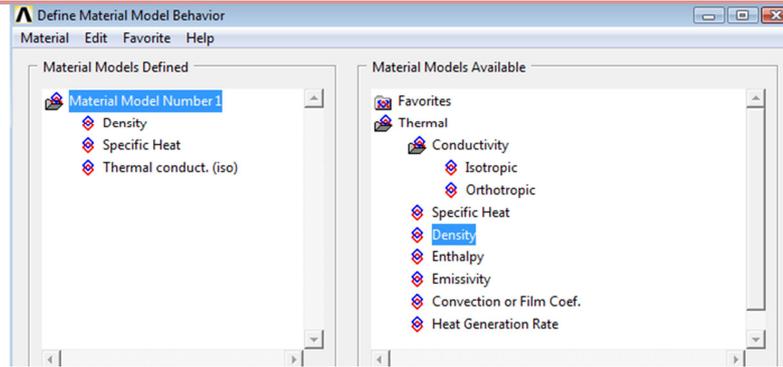


Figura III.17.- Propiedades mecánicas para Ansys

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

El elemento Plane 55 (Figura III.18), puede ser utilizado como un elemento plano o como un elemento de simetría axial con excelentes cualidades para la conducción térmica en un análisis 2-D. 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 2-D 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]

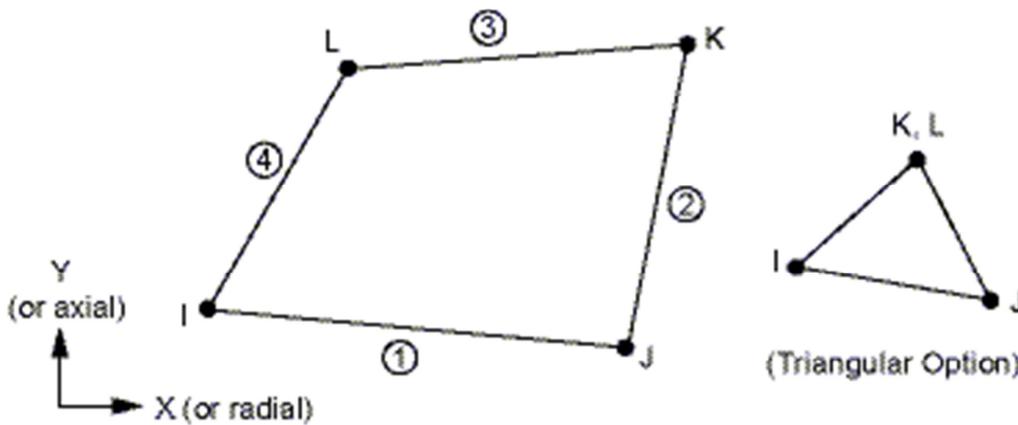
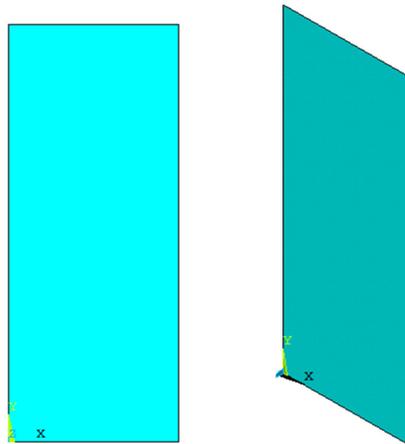


Figura III.18.- Elemento Plane 55



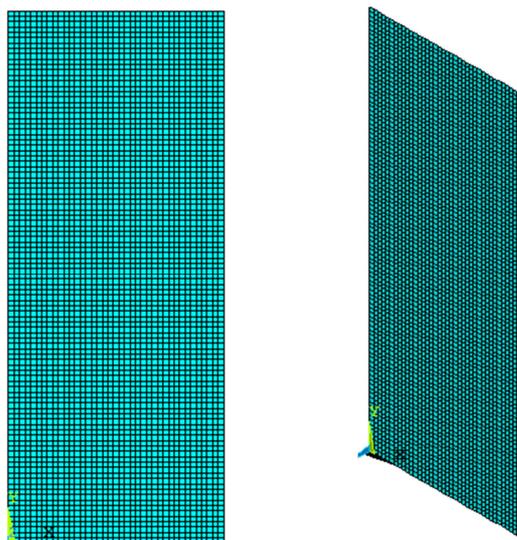
**III.5.2.- Modelado y mallado del espécimen TIG en 2-D**

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 19 la cual es similar a la modelada en 3-D, solo que en este modelo se descarta el espesor.



**Figura III.19.-**Modelado de espécimen en 2-D para el análisis térmico del proceso TIG

El mallado aplicado es exactamente igual al espécimen utilizado en el proceso 3- D TIG como se muestra en la figura III.20.

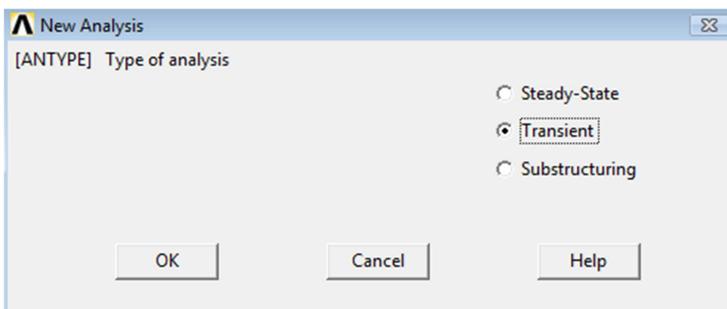


**Figura III.20.-**Mallado en el espécimen 2-D TIG



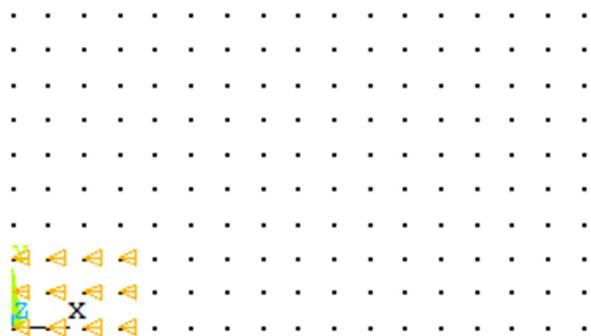
**III.5.3.-Inducción de temperaturas al espécimen 2-D TIG**

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 estarán en función del tiempo, al igual que la convección térmica con el medio ambiente. La figura III.21 muestra cuando se declara el análisis transitorio.



**Figura III.21.-Análisis transitorio en 2-D**

La condición inicial del espécimen considera la temperatura ambiente en 22 °C, además de considerar una película de Convección de  $25W/(m^2 * °C)$ . 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.22.- Aplicación de carga térmica en los nodos en el primer paso**



### Capítulo III

La figura III.23 muestra la simulación justo en el primer paso de carga térmica, considerando una fuente térmica de 723°C.

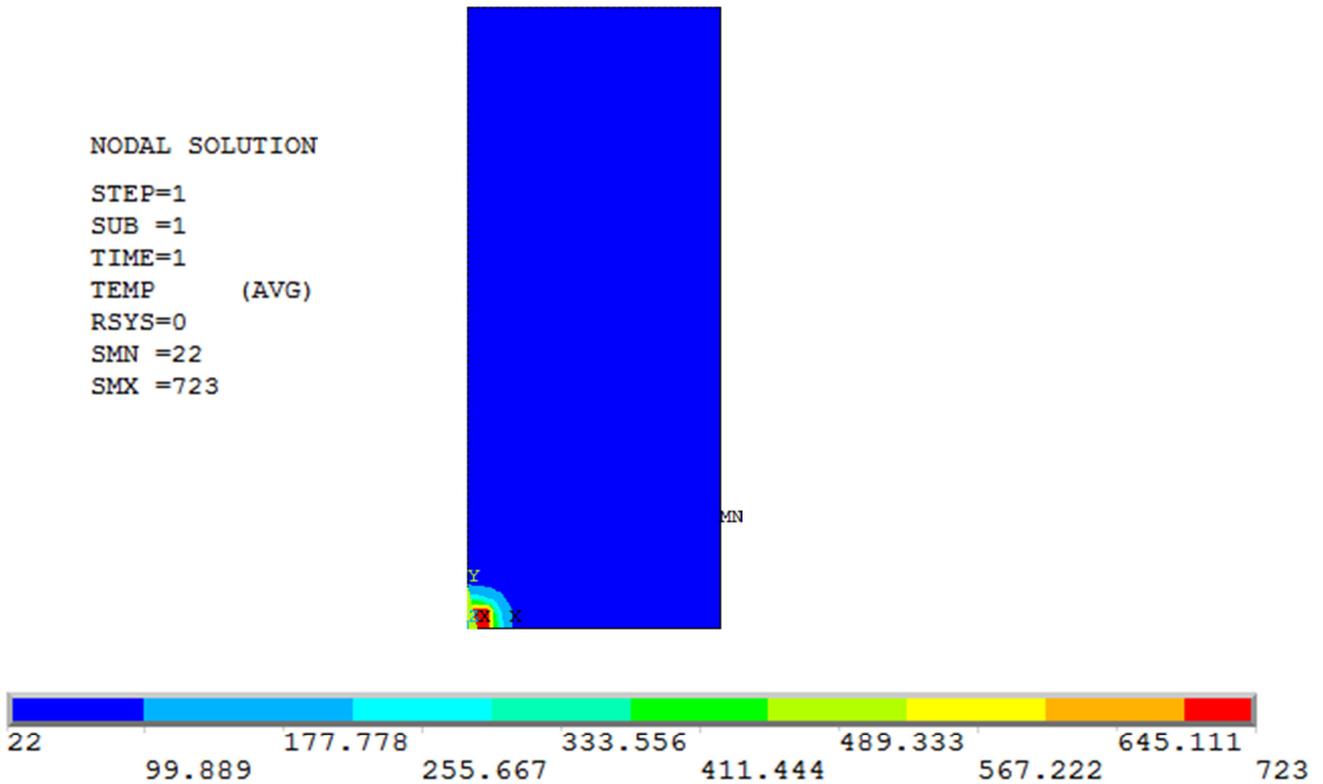


Figura III.23.-Primer paso de carga térmico en análisis 2-D TIG

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 3-D.

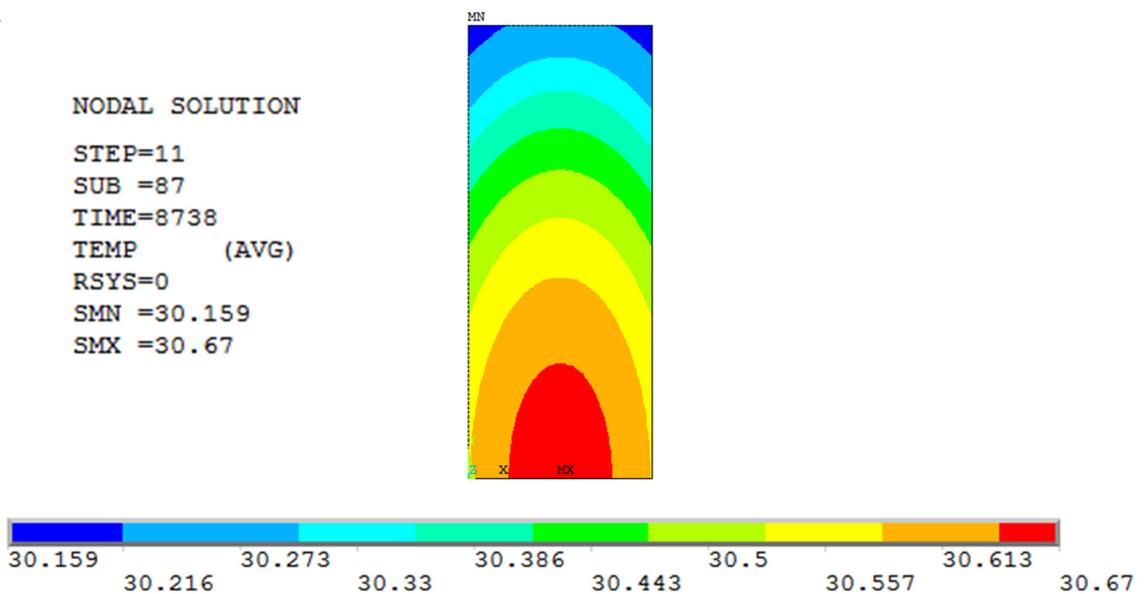


Figura III.24.-Especimen en equilibrio térmico



### Capítulo III

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

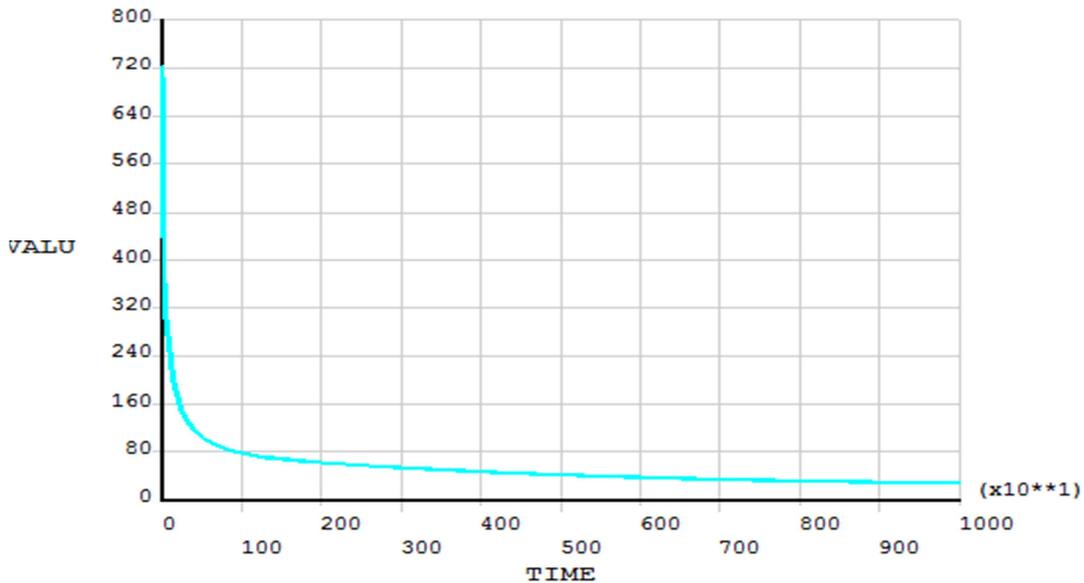


Figura III.25.-Comportamiento de temperatura con respecto al tiempo

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

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. Estos datos se insertan de la manera mencionada anteriormente la cual consiste en:

Preprocessor > Material Props> Material Models; tal y como muestra la figura III.26.

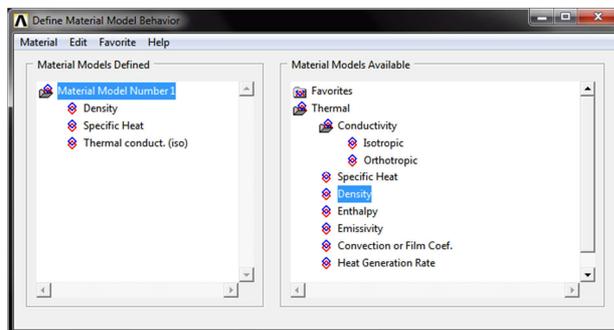


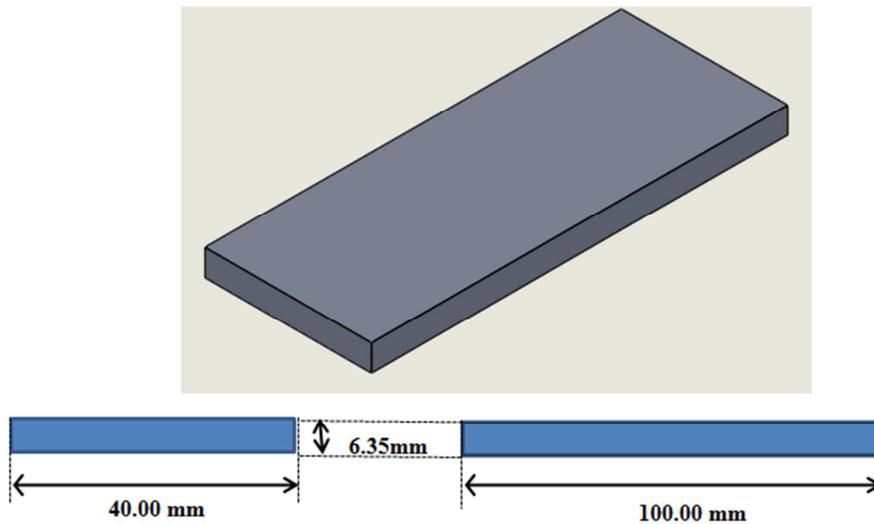
Figura III.26.- Propiedades mecánicas en Ansys.

## Capítulo III

Los datos que se ingresan en *Ansys* son los que aparecen en la parte izquierda, en la parte inferior donde hace referencia al material 1.

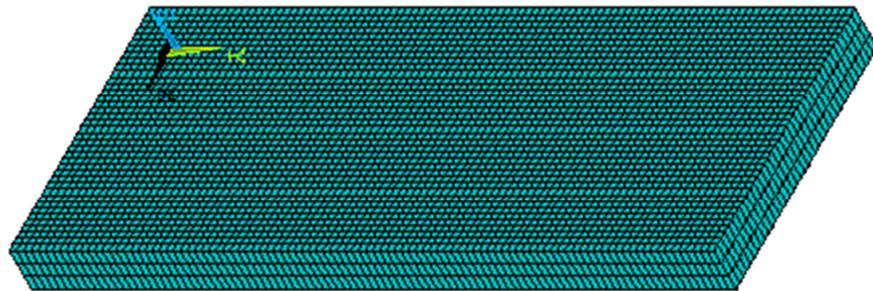
### III.6.1.- Modelado y mallado utilizado en el espécimen MIG

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.27), y mallado las cuales son:



**Figura III.27.-** 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 figura III.28.



**Figura III.28.-** Mallado utilizado en espécimen MIG.

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

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 *Ansys* es la siguiente:

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

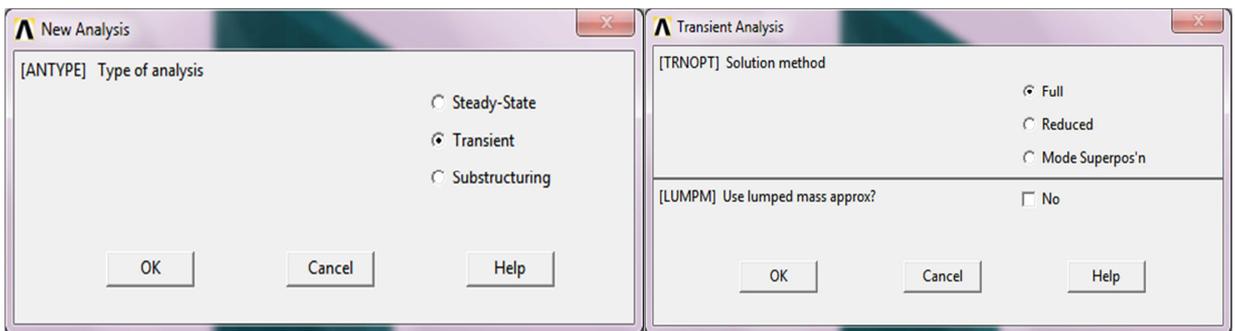


Figura III.28.- Declaración de análisis trascendental

### 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:



### Capítulo III

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, Is es la corriente de soldeo empleado (A) y Va el voltaje del arco. [III.9]

$$Q = 0.65 * 125 * 20$$

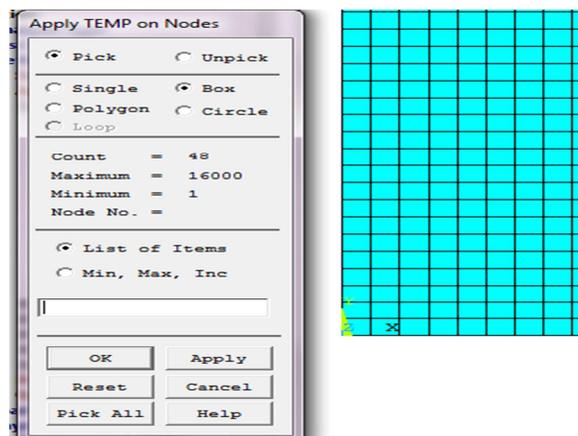
$$Q = 1625 (W)$$

Esta potencia térmica se induce en el programa *Ansys*, como Heat Flow 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 nodos (box) > Ok

La carga se aplica seleccionando los nodos en una caja (Figura III.29), permitiendo que la carga no solo se aplique en los nodos de la superficie, ya que esto no sucede en el fenómeno real.

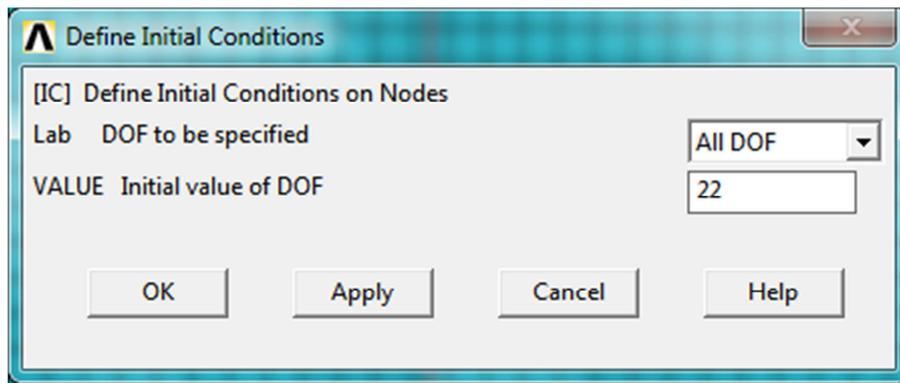


**Figura III.29.-**Induccion de la temperatura



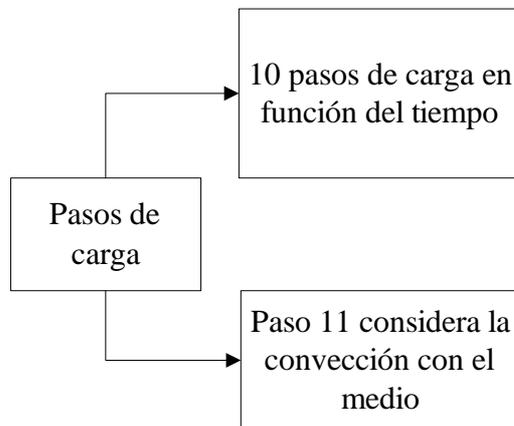
### Capítulo III

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  $25\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ , como muestra la figura III.30.



**Figura III.30.-**Condicion inicial de temperatura.

La figura III.31 muestra el concepto de los 11 pasos de carga.



**Figura III.31.-**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.

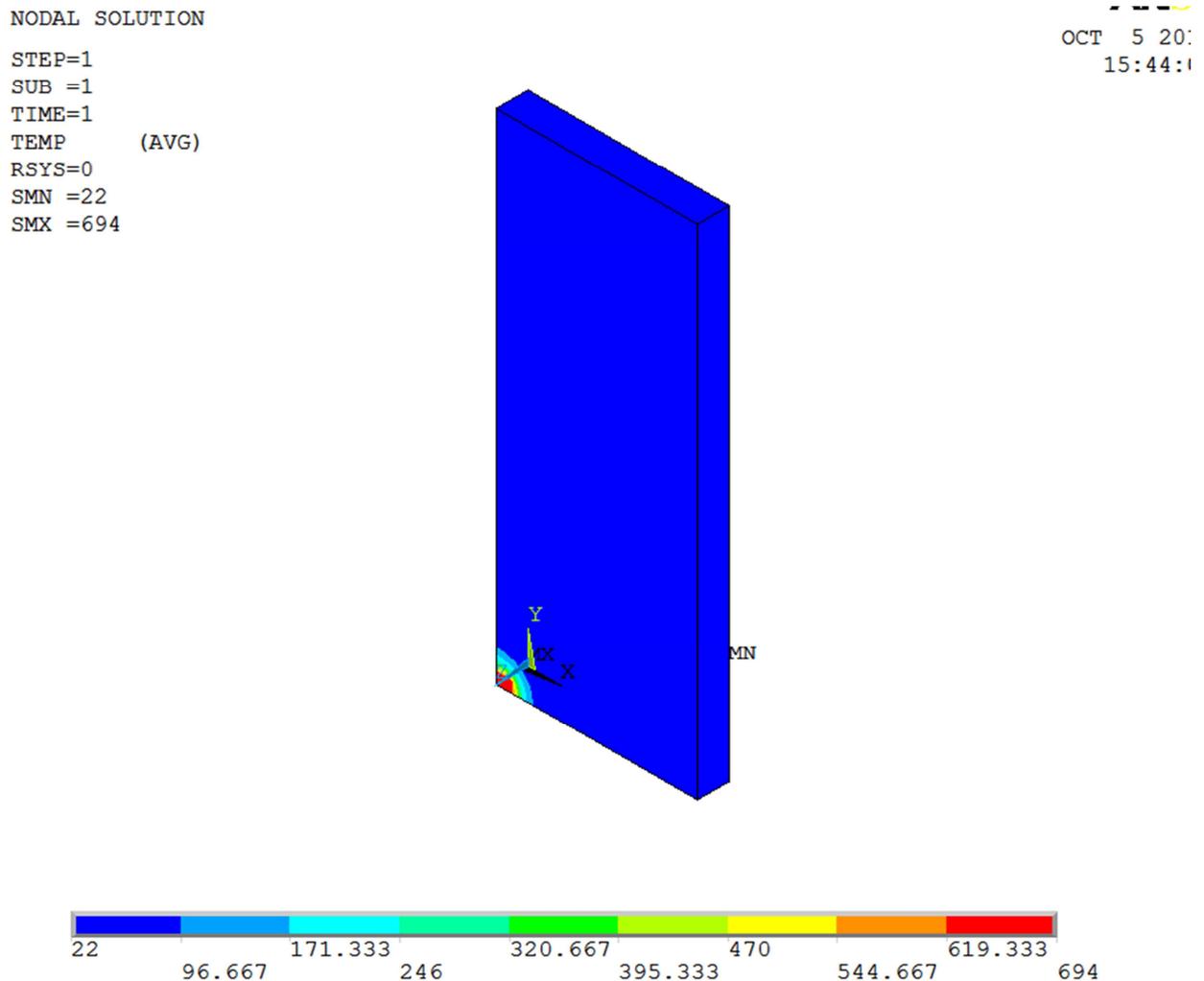


### Capítulo III

Al crear todos los pasos de carga se procede a que el programa computacional *Ansys* lo 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.32.-** Primer paso carga en el análisis 3-D MIG.

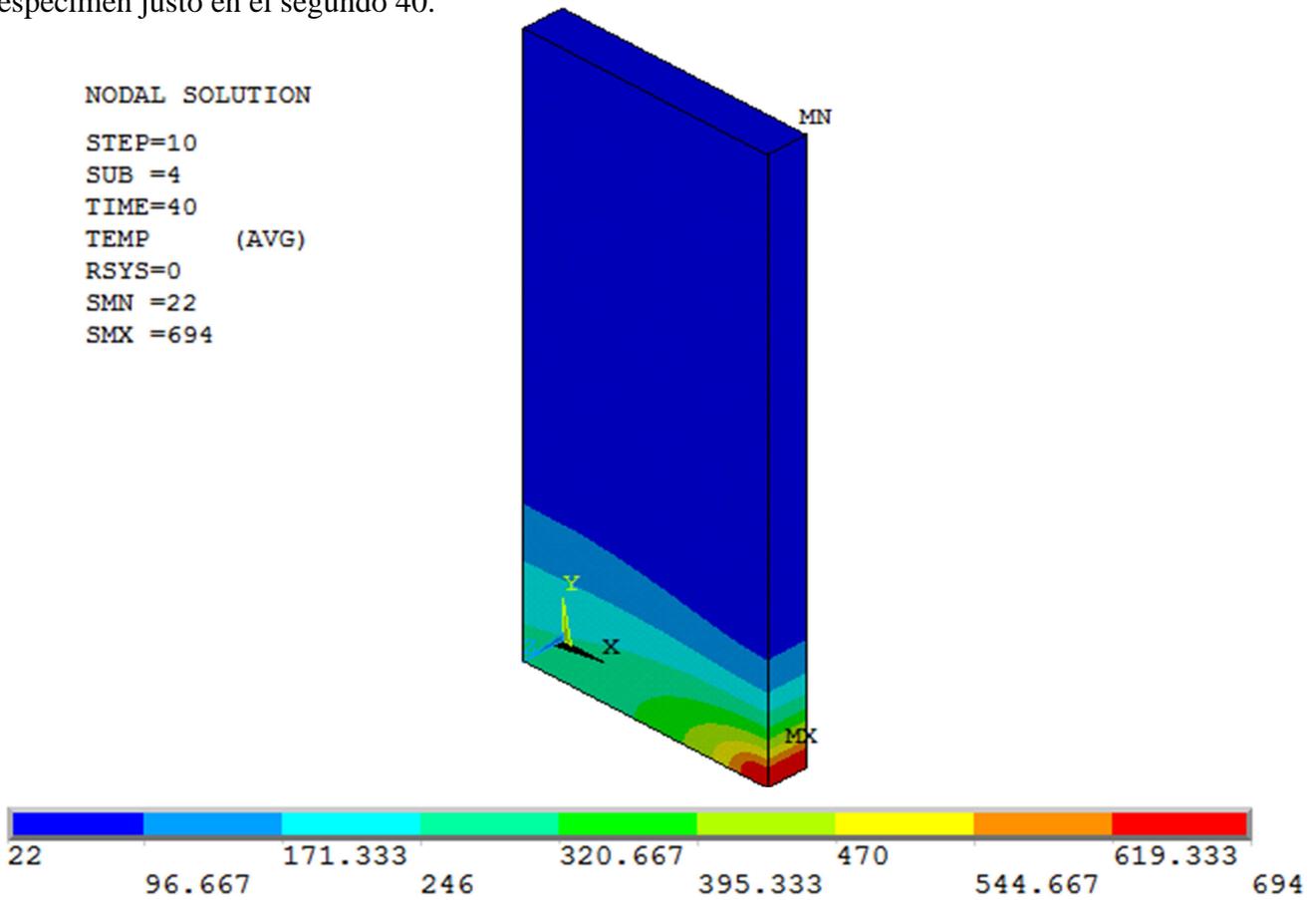
En la figura anterior se puede observar la simulación al inicio del proceso de temperatura en el cual la mayoría del espécimen se encuentra a 22°C y solo en la esquina inferior izquierda,



### Capítulo III

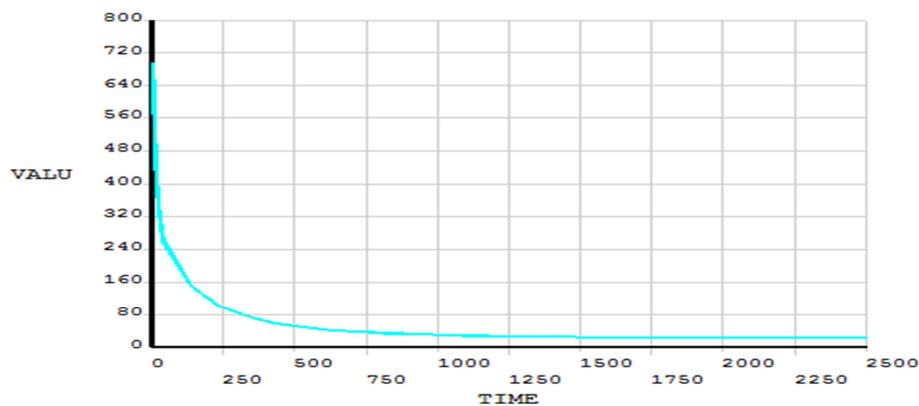
se empieza a inducir la fuente térmica de 694°C, esta imagen contempla un tiempo de 4 segundos al iniciarse el proceso de soldadura.

La figura III.33 muestra el último paso de la fuente térmica o arco eléctrico sobre el espécimen justo en el segundo 40.



**Figura III.33.-** 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.34.-** Grafica de comportamiento térmico en función del tiempo

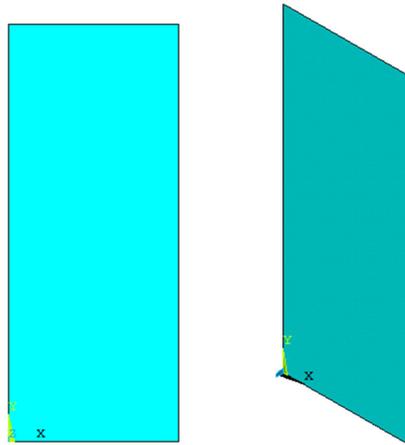


### III.7.- Análisis en 2-D del proceso MIG

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 2-D.

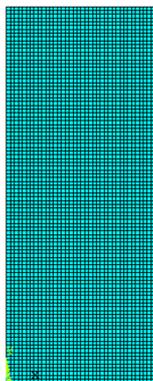
#### III.7.1.- Modelado y mallado del espécimen MIG en 2-D

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 3-D, solo que en este modelo se descarta el espesor.



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

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



**Figura III.36.-**Mallado en el espécimen 2-D TIG



### III.7.2.- inducción de temperaturas al espécimen 2-D 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 estarán en función del tiempo, al igual que la convección térmica con el medio ambiente. La figura III.37, muestra cuando se declara el análisis transitorio.

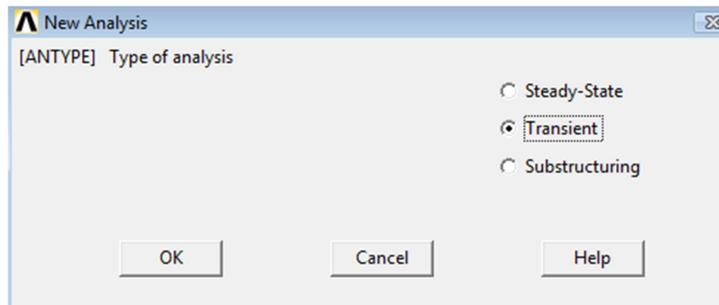


Figura III.37.-Análisis transitorio en 2-D

La condición inicial del espécimen considera la temperatura ambiente en 22 °C, además de considerar una película de Convección de  $25W/(m^2 * °C)$ . 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 la figura III.38.

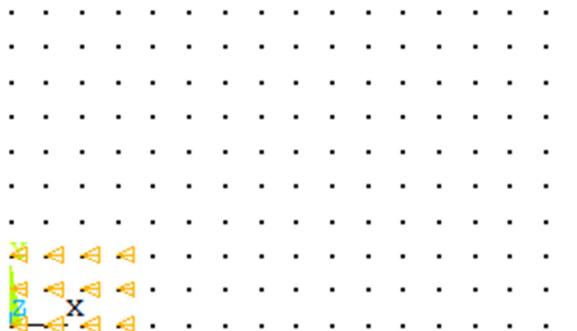
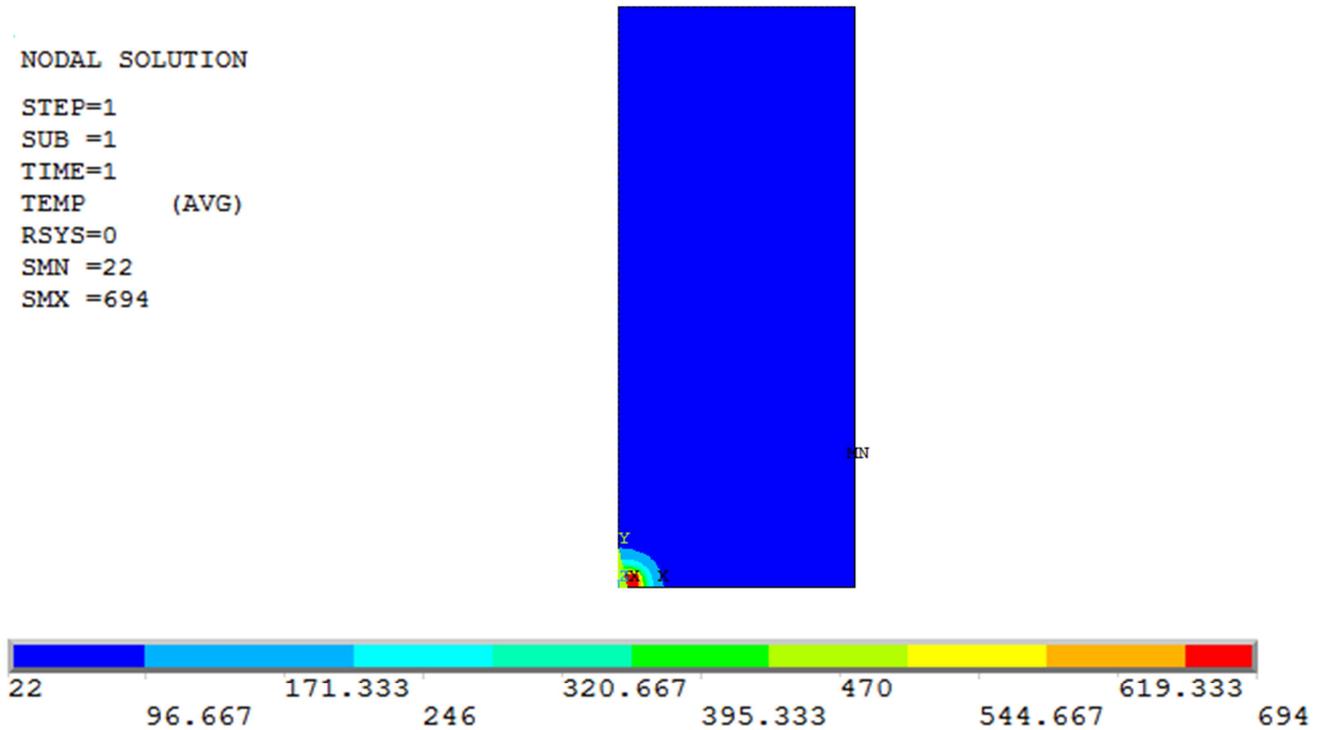


Figura III.38.- Aplicación de carga térmica en los nodos en el primer pasó



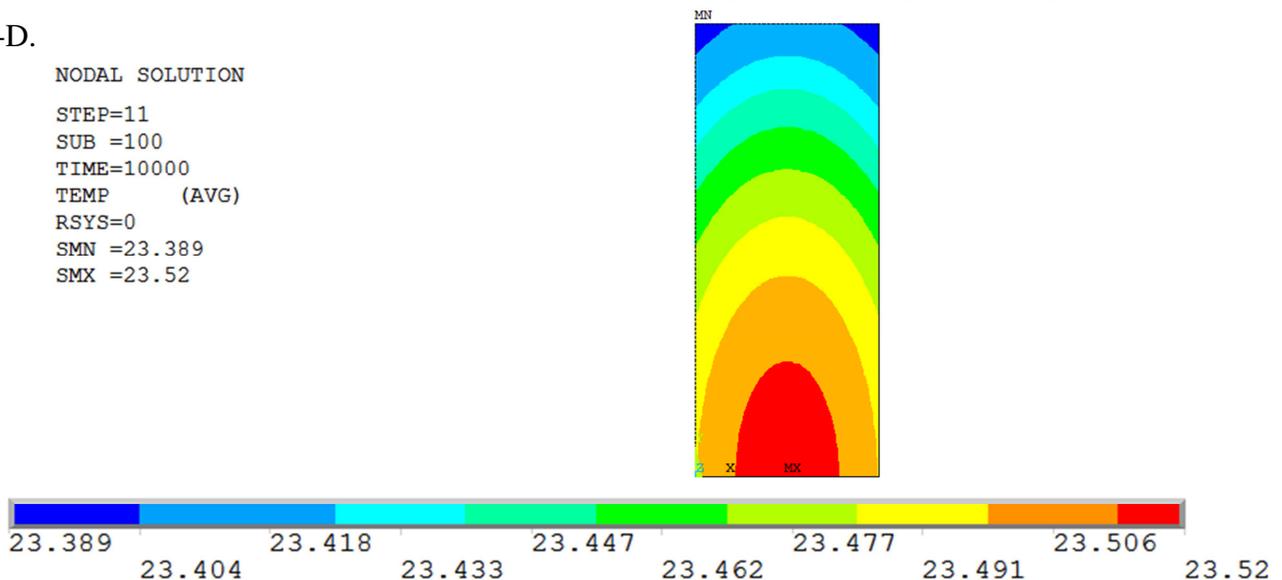
### Capítulo III

La figura III.39 muestra la simulación justo en el primer paso de carga térmica, considerando una fuente térmica de 694°C.

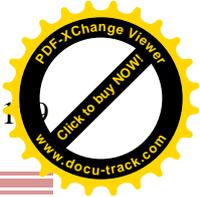


**Figura III.39.-Primer paso de carga térmico en análisis 2-D MIG**

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 3-D.



**Figura III.40.-Especimen en equilibrio térmico**



## Capítulo III

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

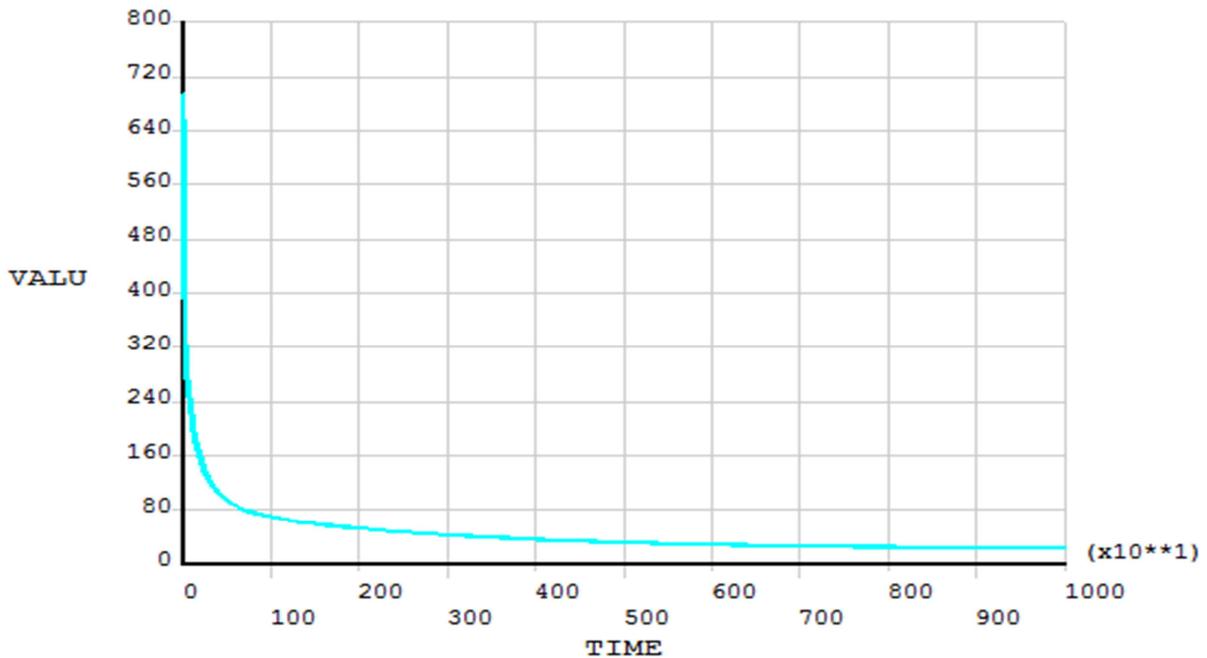


Figura III.40.- Grafica temperatura vs tiempo, proceso MIG 2-D

### III.8.- Análisis en 3-D 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; tal y como muestra la figura III.41.

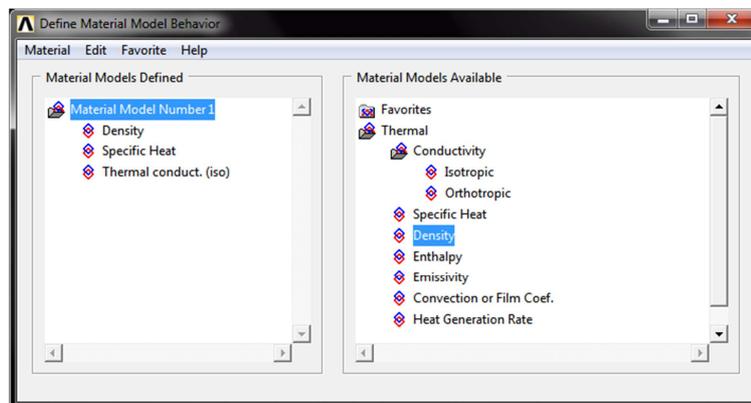
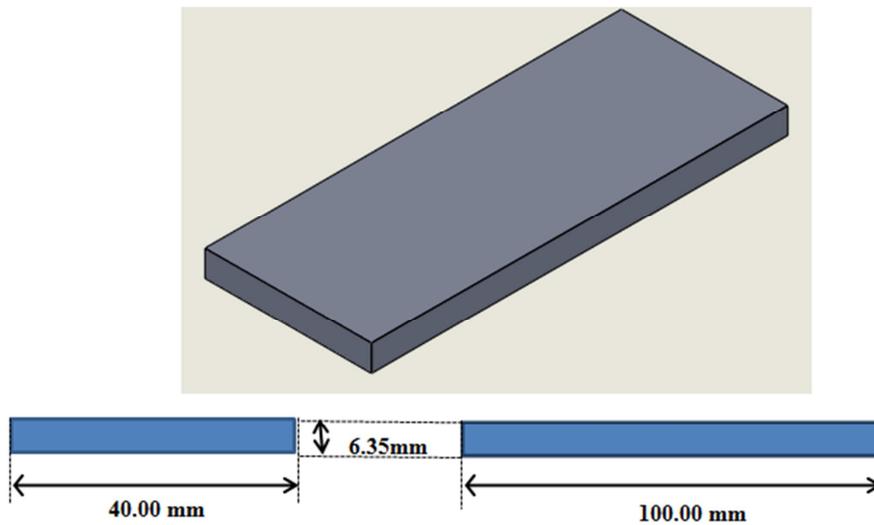


Figura III.41.- Propiedades mecánicas en Ansys.



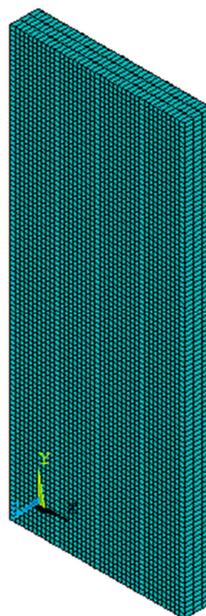
**III.8.1.- Modelado y mallado utilizado en el espécimen MIG**

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.42.-** 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 figura III.43.



**Figura III.43.-** Mallado utilizado en espécimen Láser.

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

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 *Ansys* es la siguiente:

Solution > Analysis Type > New Analysis > Trasient > Ok > Full > Ok.

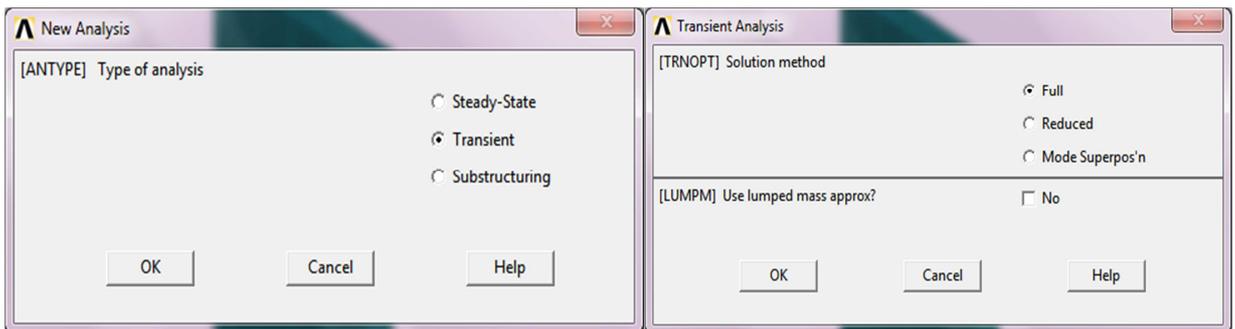


Figura III.44.- Declaración de análisis trascendental

### 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 CO<sub>2</sub>, 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).

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



### Capítulo III

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:

$$FCv = Q/V \text{ (W/ m}^3 \text{)}$$

Dónde:

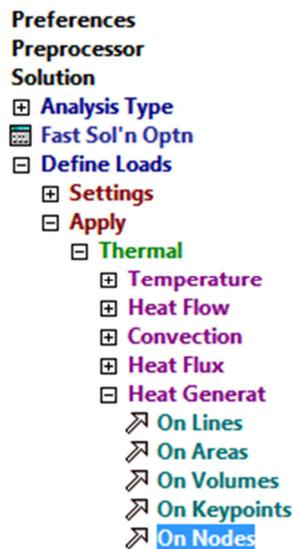
V corresponde al volumen del elemento finito que se encuentra en la trayectoria del Láser por donde se introduce el calor, por lo cual la ecuación queda de la siguiente manera:

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

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

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

Solution > Apply > Thermal > Heat Generat > On nodos > Ok.

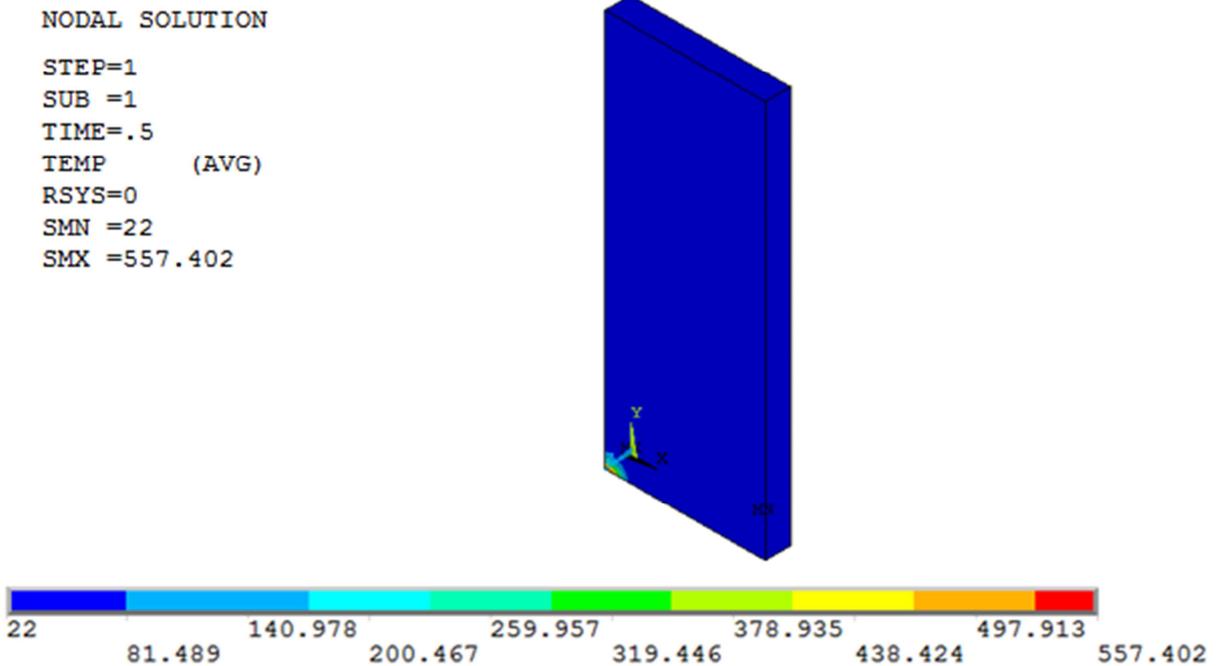


**Figura III.45.-**Inducción de cargas térmicas en *Ansys*



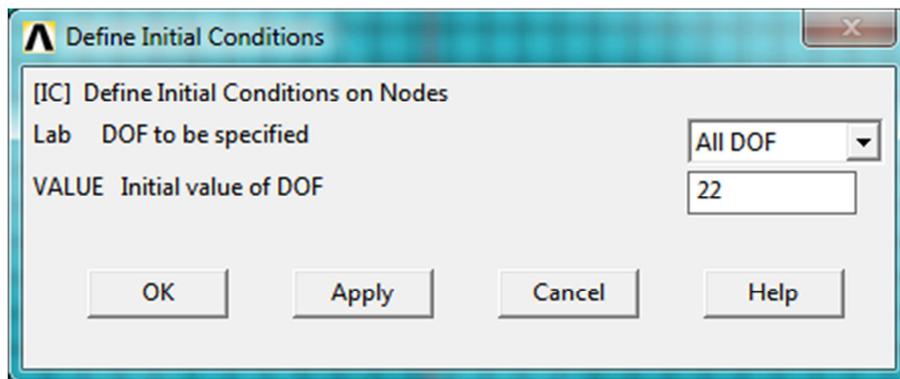
### Capítulo III

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 sera de 0.5 segundos, la figura III.46 muestra el primer paso de carga.



**Figura III.45.-** Proceso de soldadura por rayo Láser en el primer paso de carga.

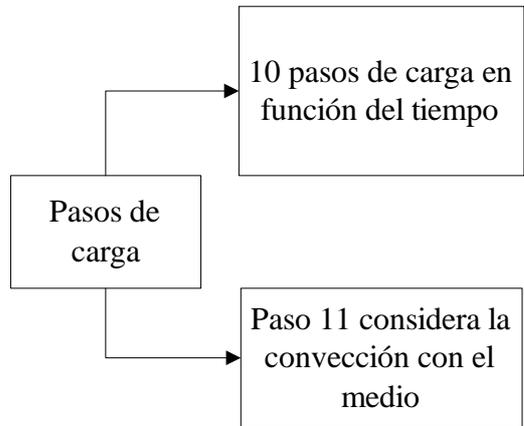
Se crea un último paso (11) el cual consiste en inducción de tiempo sin el rayo Láser, permitiendo así su convección térmica con el medio ambiente y en consecuencia su enfriamiento. Las condiciones iniciales de temperatura son de 22°C y una película de 25W/m<sup>2</sup>\*°C, como muestra la figura III.46.



**Figura III.46.-**Condicion inicial de temperatura.

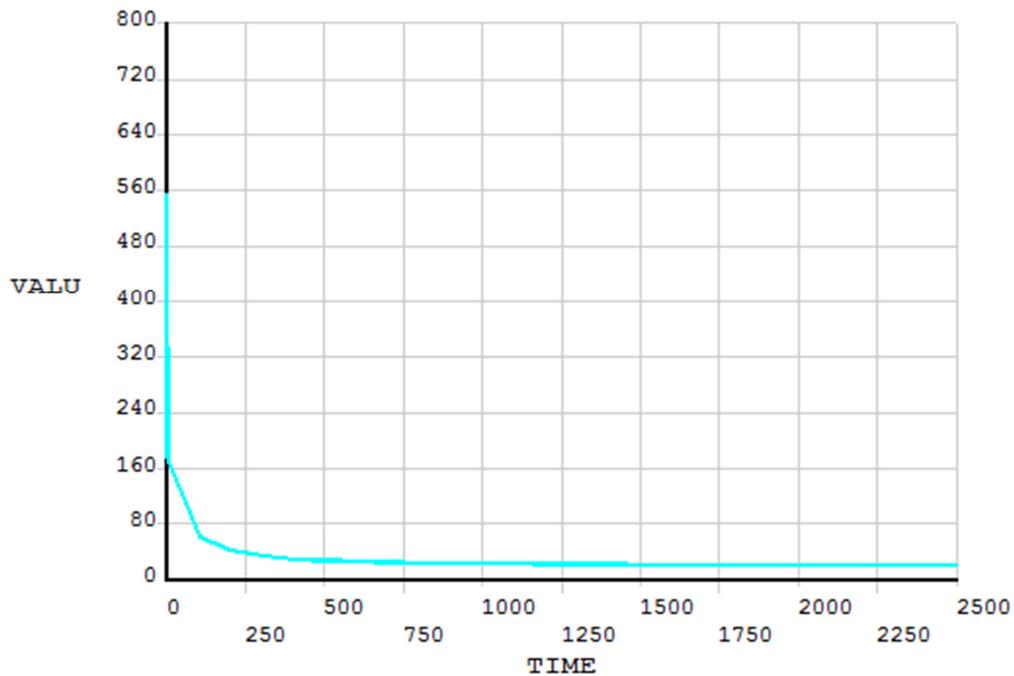


La figura III.47 muestra el concepto de los 11 pasos de carga.



**Figura III.47.-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.

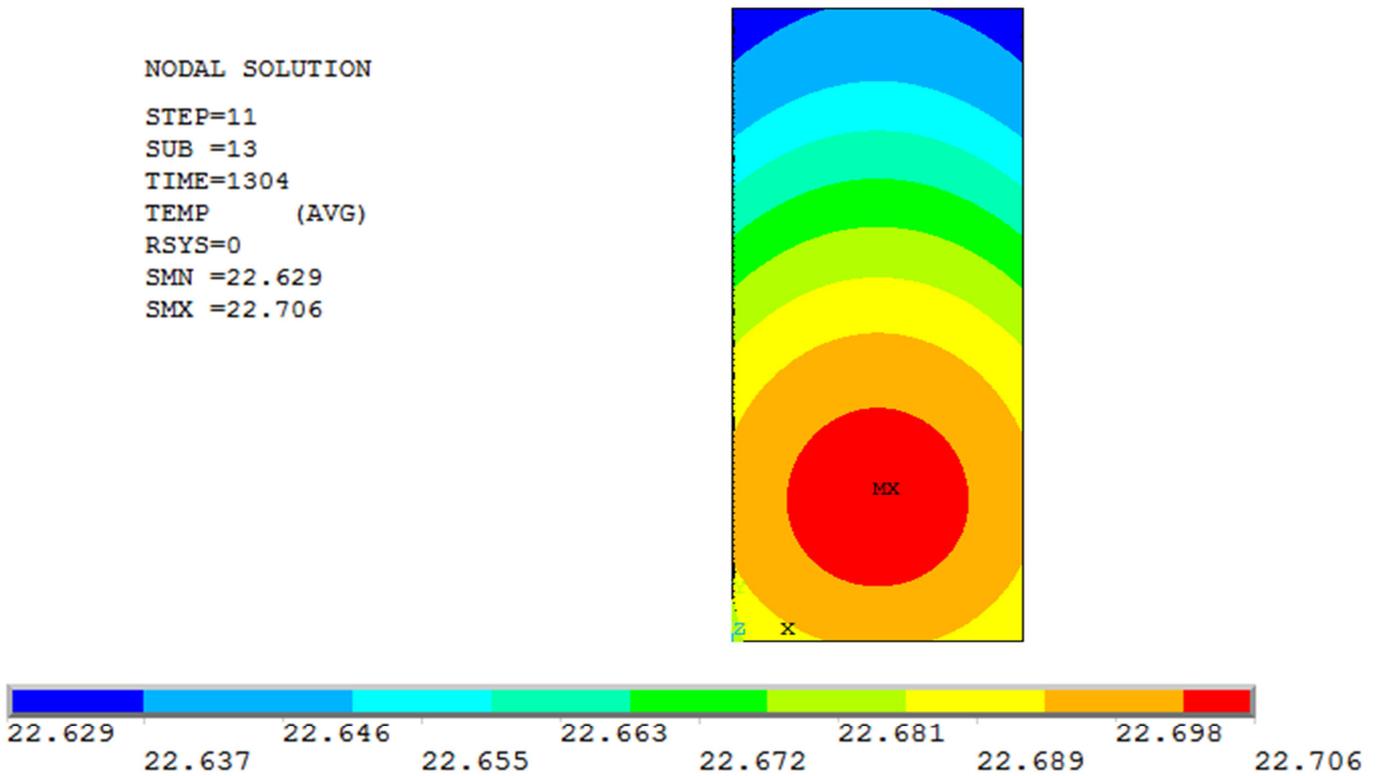


**Figura III.48.-Grafica Temperatura Vs Tiempo en el proceso de soldadura por Láser de gas.**

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

### Capítulo III

acoplado. La figura III.49 muestra el momento justo en el cual la probeta alcanza el equilibrio térmico.



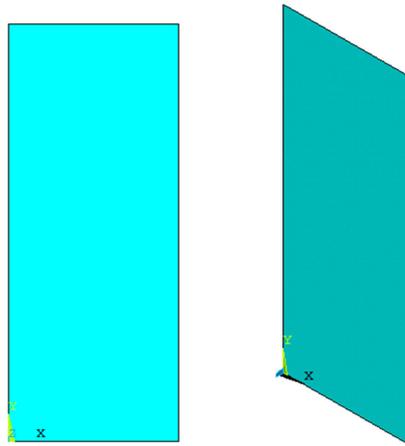
**Figura III.49.-** probeta en equilibrio térmico

### III.9.- Análisis en 2-D 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 2-D.

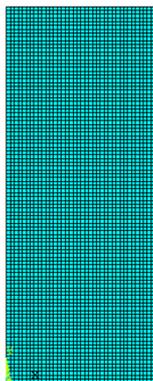
#### III.9.1.- Modelado y mallado del espécimen MIG en 2-D

Se modela el espécimen con la característica de un cuadrado dándole un valore en X de 0.04 metros y en el eje Y de 0.1 metros como se muestra en la figura III.49, la cual es similar a la modelada en 3-D, solo que en este modelo se descarta el espesor.



**Figura III.49.-**Modelado de espécimen en 2-D para el análisis térmico del proceso rayo Láser

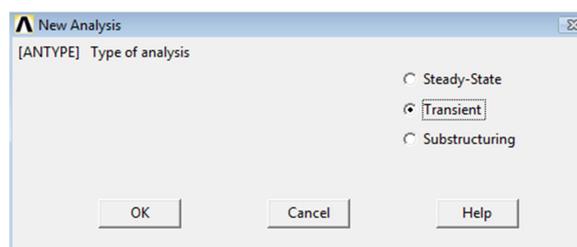
El mallado aplicado es exactamente igual al espécimen utilizado en el proceso 3-D Láser como se muestra en la figura III.50.



**Figura III.50.-**Mallado en el espécimen 2-D rayo Láser

### III.9.2.- Inducción de temperaturas al espécimen 2-D 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 estarán en función del tiempo, al igual que la convección térmica con el medio ambiente. La figura III.51, muestra cuando se declara el análisis transitorio.



**Figura III.51.-**Análisis transitorio en 2-D, rayo Láser



### Capítulo III

La condición inicial del espécimen considera la temperatura ambiente en 22 °C, además de considerar una película de Convección de 25W/(m<sup>2</sup> \* °C). La potencia considerada en este proceso de soldadura será de los 5Kw. Si se retoma la ecuación que representa la potencia térmica (Q).

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

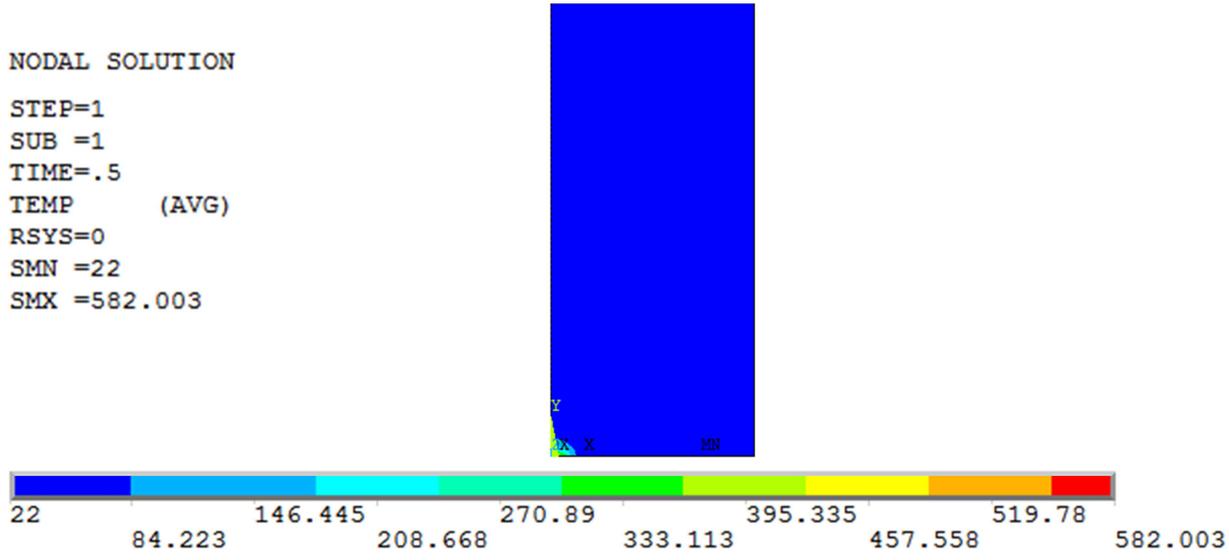
Se puede observar que el resultado está dado en Watts, por lo cual la potencia del láser es igual a:

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

Es muy importante resaltar que este es un análisis en 2-D, por lo cual se induce en *Ansys*, como Heat Flow, 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 > Heat Flow > Ok.

La figura III.52 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.

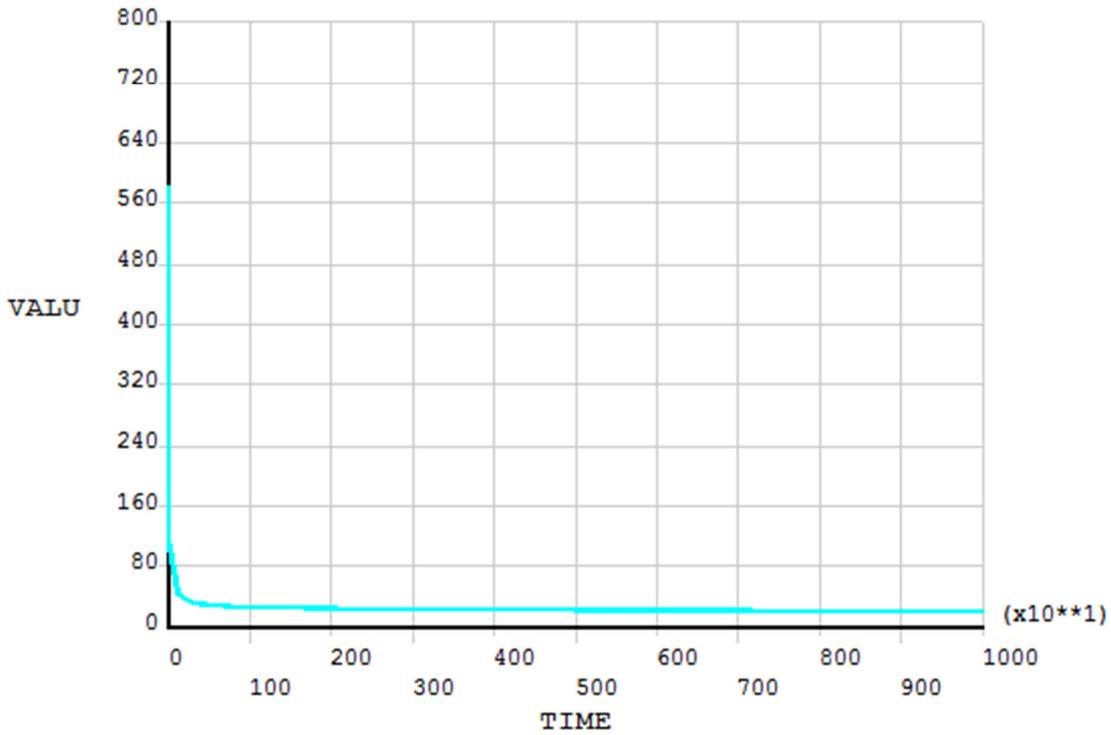


**Figura III.52.-** Primer paso de carga en proceso de soldadura por rayo Láser de gas



### Capítulo III

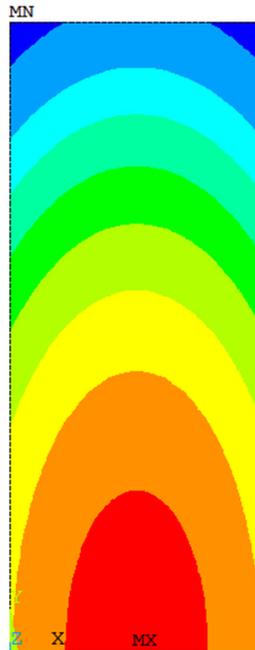
El enfriamiento con el medio ambiente se comporta tal y como muestra la figura III.53.



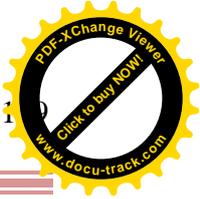
**Figura III.53.-** Grafica Temperatura Vs Tiempo en proceso de rayo Láser

La figura III.54 muestra al espécimen cerca del equilibrio térmico.

```
NODAL SOLUTION
STEP=11
SUB =85
TIME=8505
TEMP (AVG)
RSYS=0
SMN =22.252
SMX =22.276
```



**Figura III.54.-** Equilibrio térmico en proceso de rayo Láser



## Capítulo III

### 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 en *Ansys*. Para cada proceso se desarrolló un análisis en 3-D y 2-D, 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 termo dependientes 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.

#### 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.- Recuperado de:  
[http://www.metalmecanica.com/mm/secciones/MM/ES/MAIN/R/REFERENCIA1/documento\\_HTML.jsp?idDocumento=12322](http://www.metalmecanica.com/mm/secciones/MM/ES/MAIN/R/REFERENCIA1/documento_HTML.jsp?idDocumento=12322), 01 de Febrero 2011.
- 5.- Recuperado de: [http://www.cyclosrl.com.ar/03infdat\\_01.htm](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.





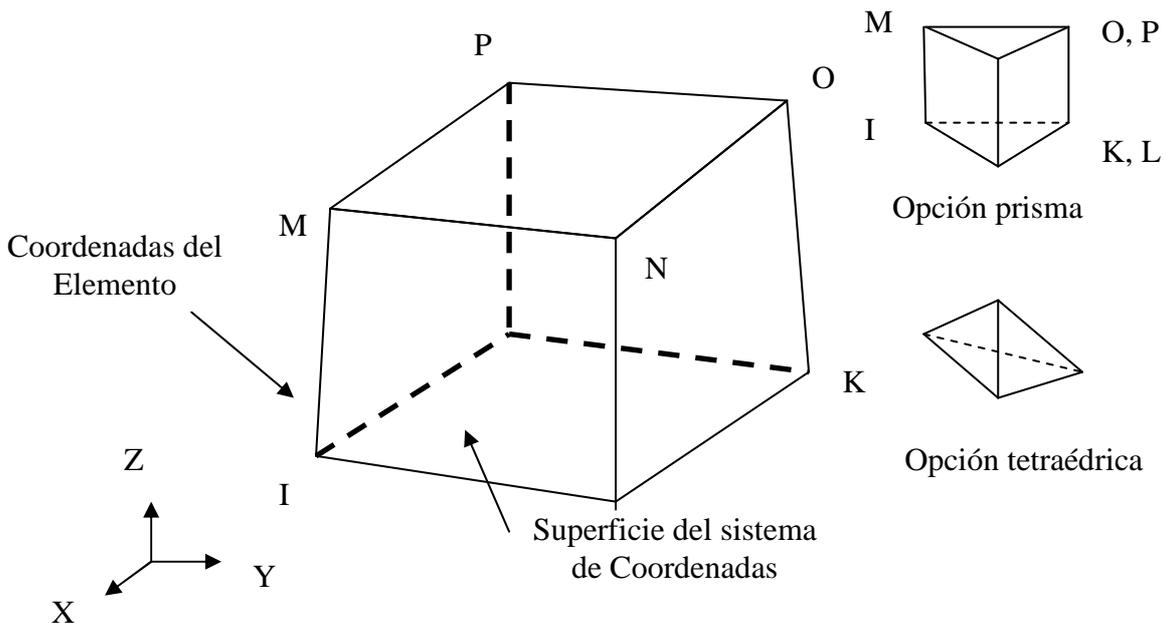
**IV.1.- Generalidades.**

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, 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 anterior mente, tanto en 2-D y 3-D.

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 Solid 45 para análisis estático en 3-D para el proceso de soldadura TIG, MIG y rayo Láser.**

El elemento SOLID45 se utiliza común mente para el modelado 3-D, 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.



**Figura IV.1.-** Elemento Solid 45, utilizado en la simulación estructural.



## Capítulo VI

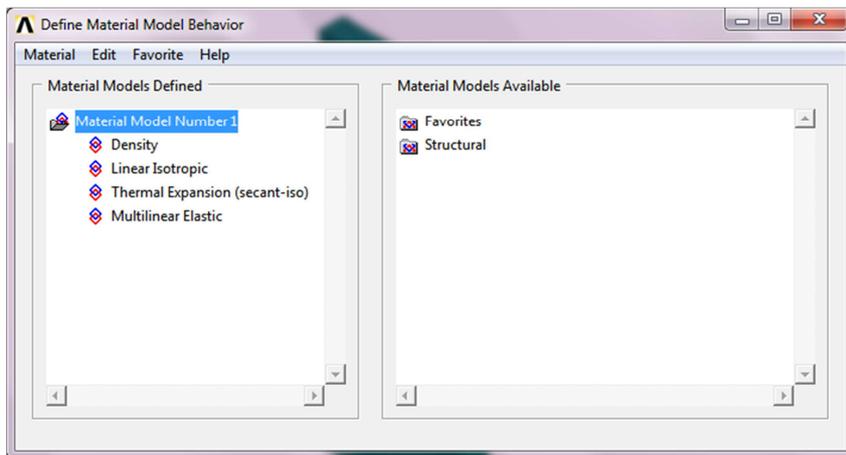
### IV.2.2.- Inducción de Propiedades Mecánicas y termodependientes en *Ansys* para un análisis no lineal en el proceso TIG, MIG y rayo Láser.

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 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:

Preprocessor > Material Models > Structural.



**Figura IV.2.-** Inducción de propiedades mecánicas y termo dependientes en *Ansys*

### 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 e IV.2, obteniendo como consecuencia la realización de un análisis no lineal.



**Tabla IV.1.-** Propiedades Físicas del Acero inoxidable 316 l

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

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

Coeficiente de expansión térmica	15.9	100°C
	16.2	315°C
	17.5	500°C
	19.9	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

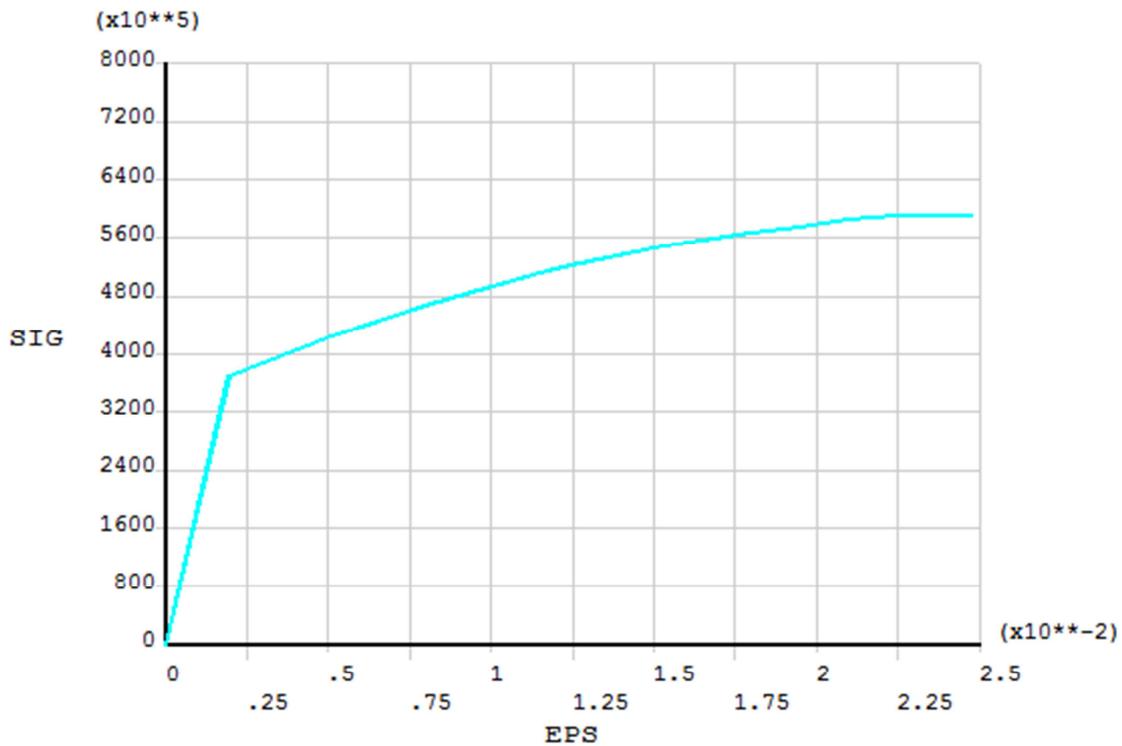
También se debe de ingresar la gráfica esfuerzo contra deformación, con la finalidad de obtener esfuerzos residuales, esto viene a complementar el ingreso de propiedades termodependientes, las cuales tienen como objetivo de realizar un análisis no lineal, los datos que se ingresan se muestran en la tabla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

La imagen IV.3 muestra la gráfica que *Ansys* realiza al ingresar los datos anteriores.

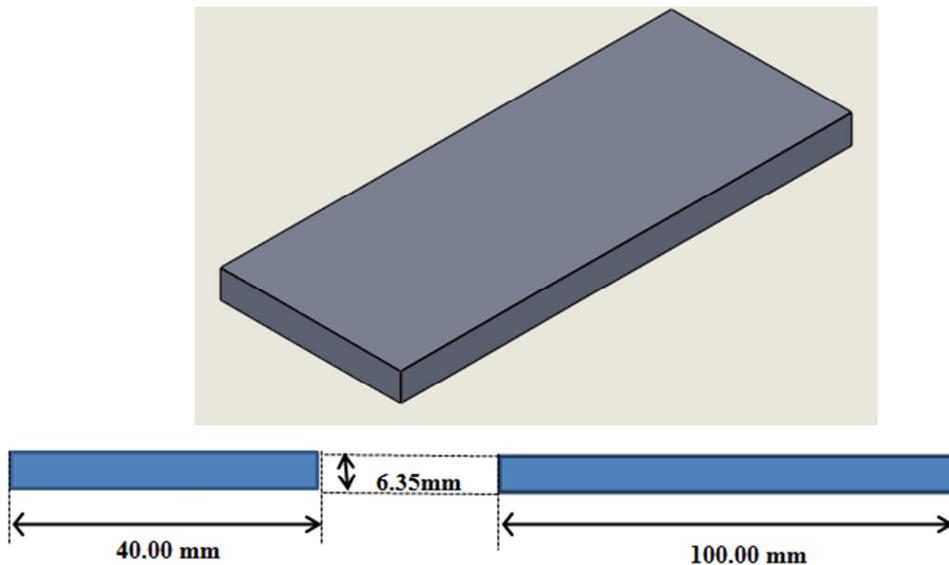


**Figura IV.3.-** Grafica esfuerzo-deformación, empleada en los tres procesos



**IV.2.4.- Modelado y mallado para análisis estático en 3-D 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. Así que se vuelven a retomar las medidas empleadas en el análisis térmico, las cuales son:



**Figura IV.4.-** Medidas del espécimen

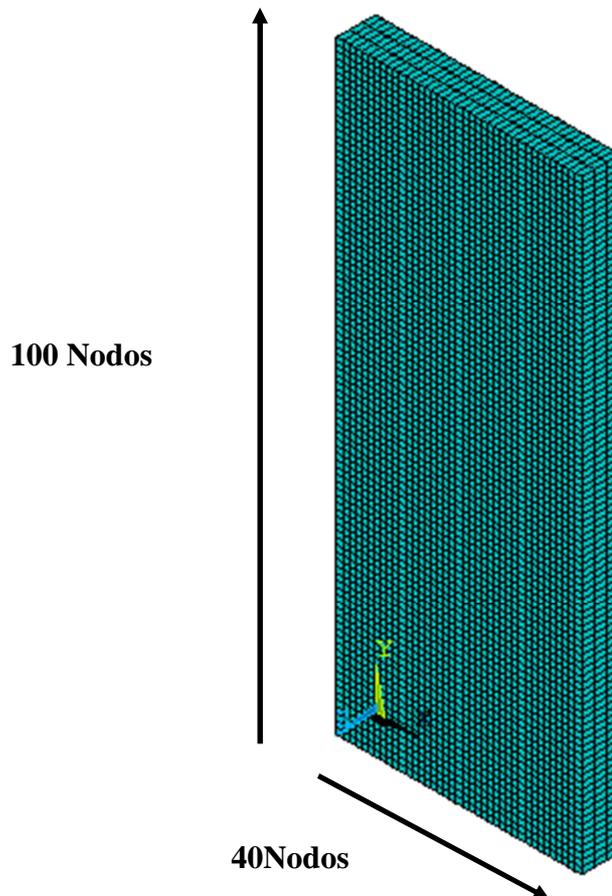
Dando de alta las siguientes coordenadas al modelar un volumen  $X_1(0)$ ,  $X_2(0,0.04)$  en  $Y_1(0)$ ,  $Y_2(0,0.1)$  y en  $Z_1(0)$ ,  $Z_2(0,0.00635)$ , tal y como se muestra en la figura IV.5.



**Figura IV.5.-** Modelado de probetas en *Ansys* para proceso estructural TIG, MIG y Rayo Láser

## Capítulo VI

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, como se muestra en la figura IV.6.



**Figura IV.6.-** Mallado utilizado en análisis estructural 3-D TIG

Básicamente se vuelve a realizar el mallado mencionado en el capítulo anterior tanto en especímenes en 3-D y 2-D, si esto no se realiza se tiene la certeza, que análisis no es correcto y los resultados serán ilógicos.

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

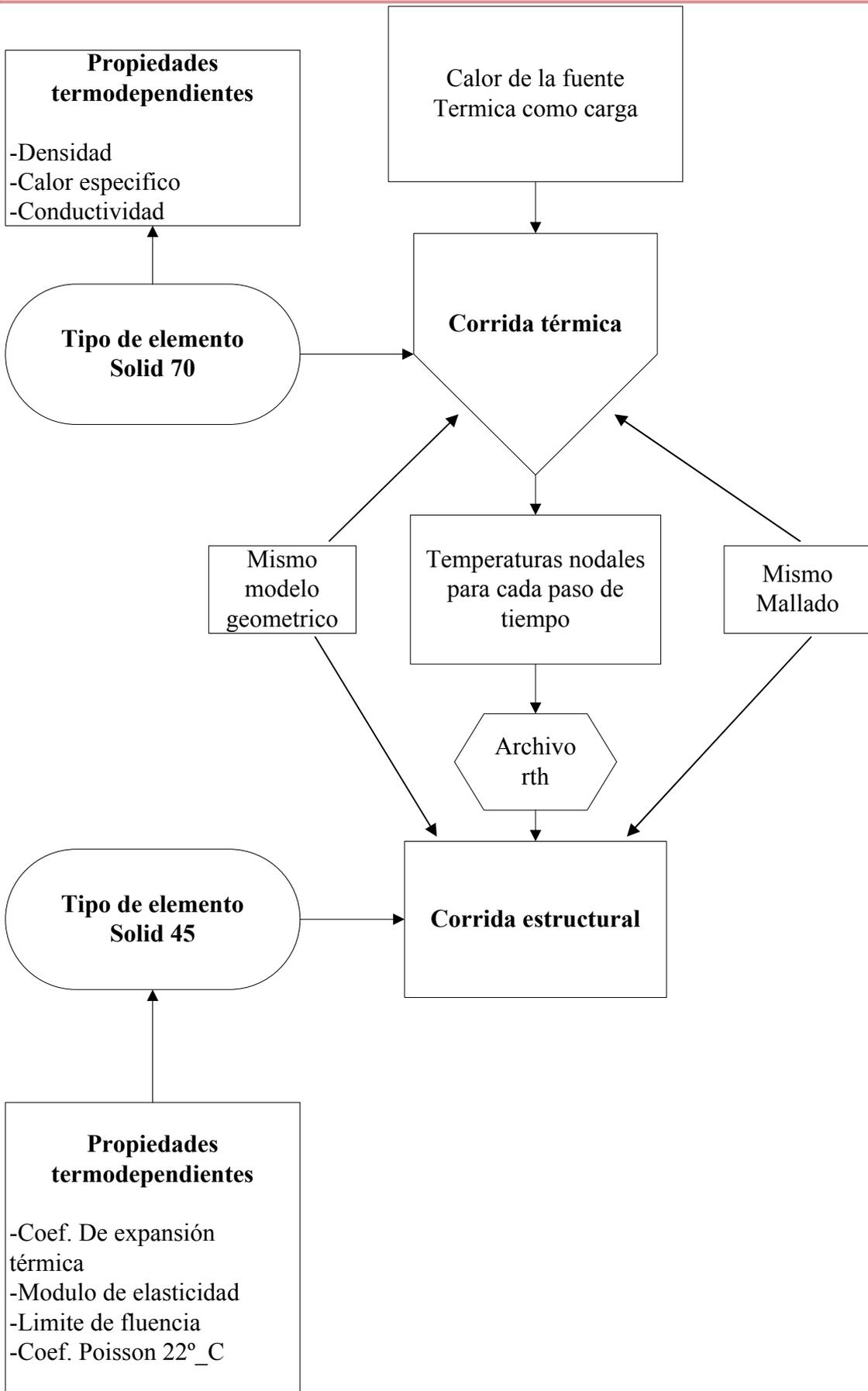


Figura IV.5.- Resumen estructural de un análisis acoplado



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

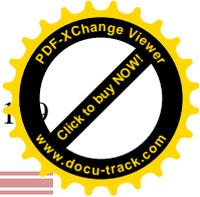
Es de suma importancia el contar con una buena organización de las corridas térmicas (TIG, MIG, Láser) tanto en 2-D y 3-D, ya que los resultados obtenidos se guardan en un archivo con extensión rth (Figura IV.6), el cual puede ser aplicado en el análisis estructural.

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.6.-** Archivo del análisis térmico

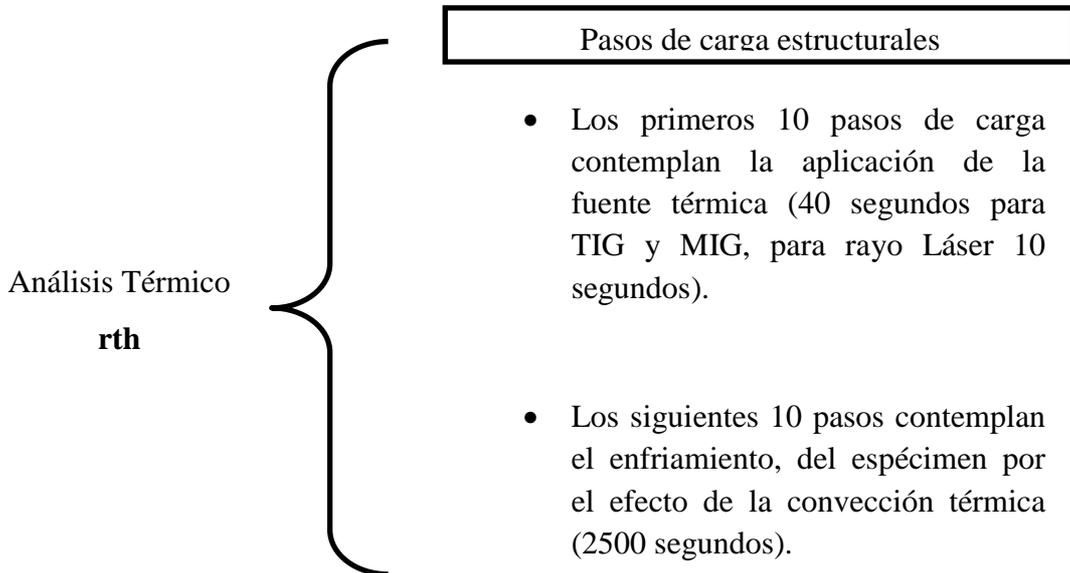
Este archivo guarda los resultados obtenidos en el análisis térmico el cual va a ser utilizado con la finalidad de evaluar los desplazamientos y tensiones para cada paso de tiempo, obteniendo así las deformaciones plásticas desde el inicio del proceso de soldadura hasta cuando este termine y el espécimen 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



## Capítulo VI

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.7 resume el proceso de inducción de cargas.



**Figura IV.7.-** 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 List Result 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	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.8.-** Tiempo y pasos del análisis térmico en *Ansys*

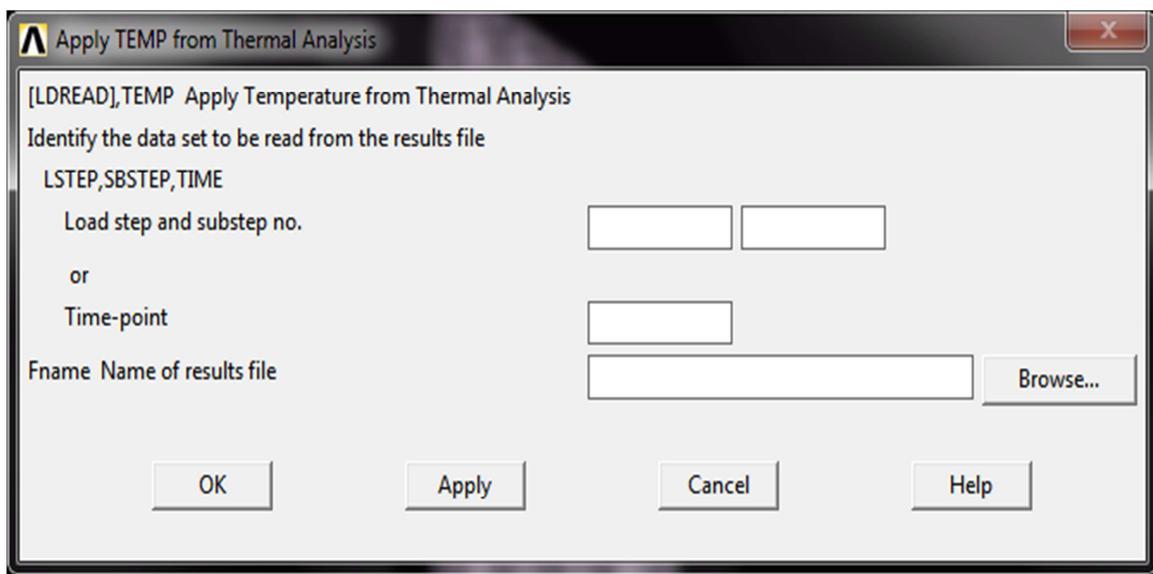


## Capítulo VI

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 Therm Analy

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.



**Figura IV.9.- Inducción de cargas estáticas en función del análisis térmico**

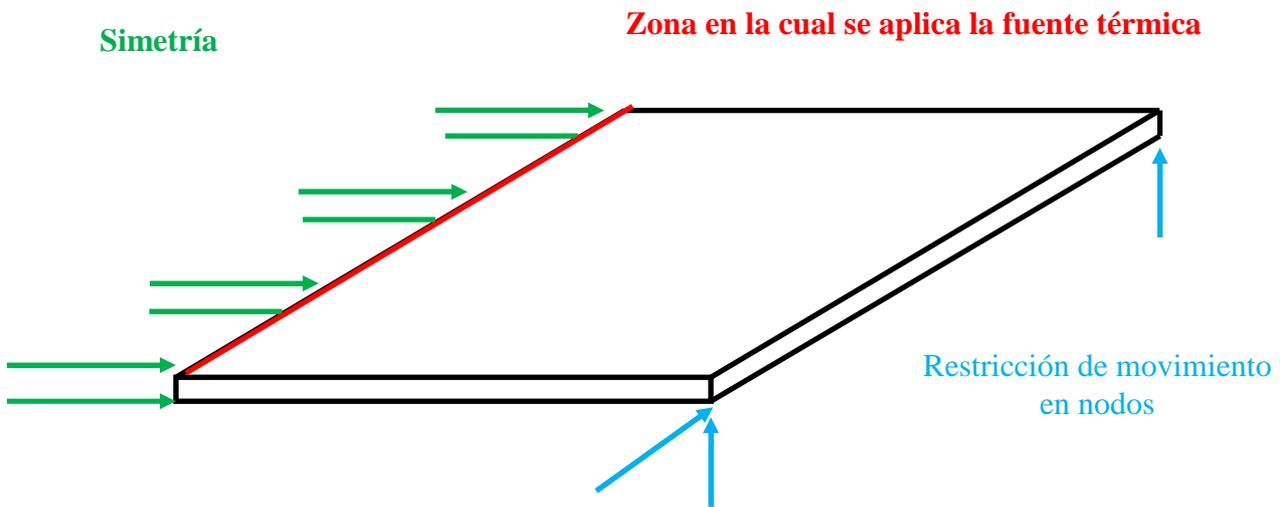
Después de ingresar la carga térmica como un carga estructural obtenida de un análisis térmico se procede a escribir el paso de carga. Mismo que una vez guardado se borrara para dar paso al siguiente, obteniendo así desplazamientos y tensiones para cada pasó de tiempo.

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

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

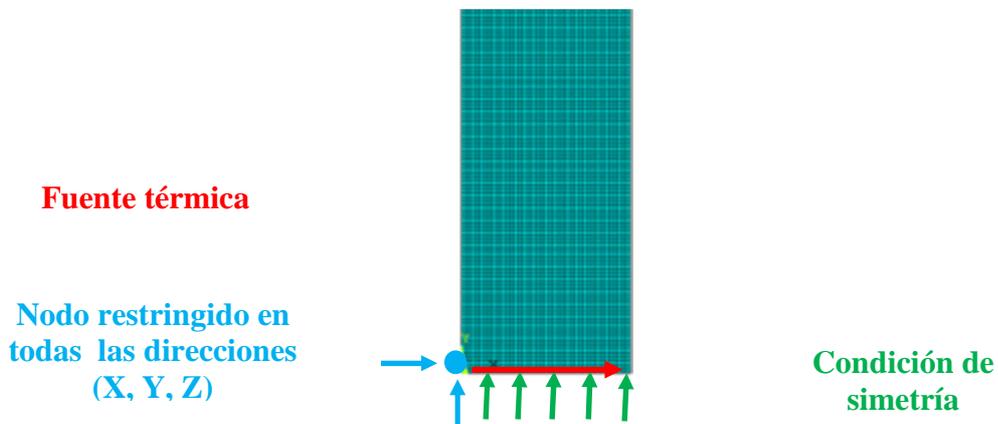
Capítulo VI

modelar y mallar el material a unir. Además propone restringir dos nodos superiores en ambos extremos, tal y como se muestra en la figura IV.10.

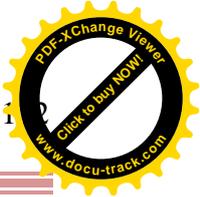


**Figura IV.11.- Restricciones de movimiento impuestas al modelo mecánico por *Pozo Morejón* [ IV.2]**

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.12 muestra la condición de frontera utilizado en los procesos de soldadura TIG y MIG.

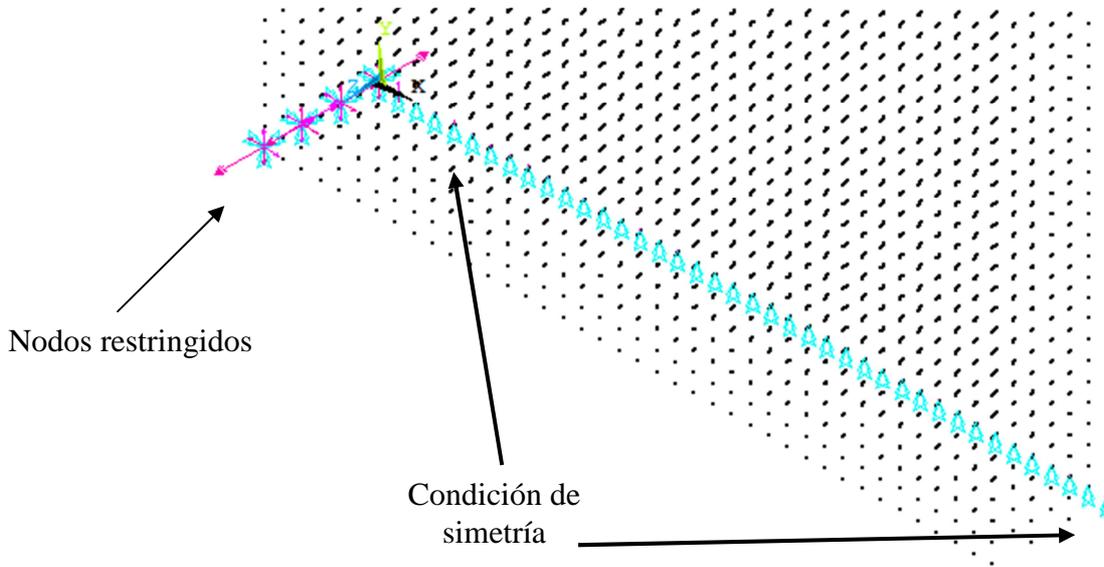


**Figura IV.12.- Condiciones de frontera aplicados al proceso TIG y MIG en 3-D**



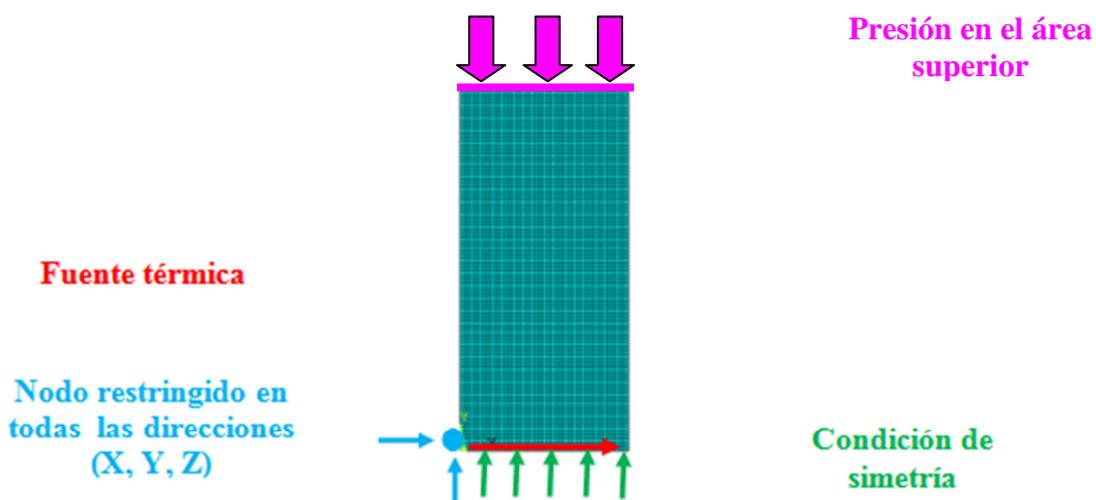
## Capítulo VI

En la figura IV.13, se muestra las condiciones de frontera en *Ansys*.



**Figura IV.13.-** 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.14 muestra la zona en la cual se aplica la presión, en la parte superior del espécimen.



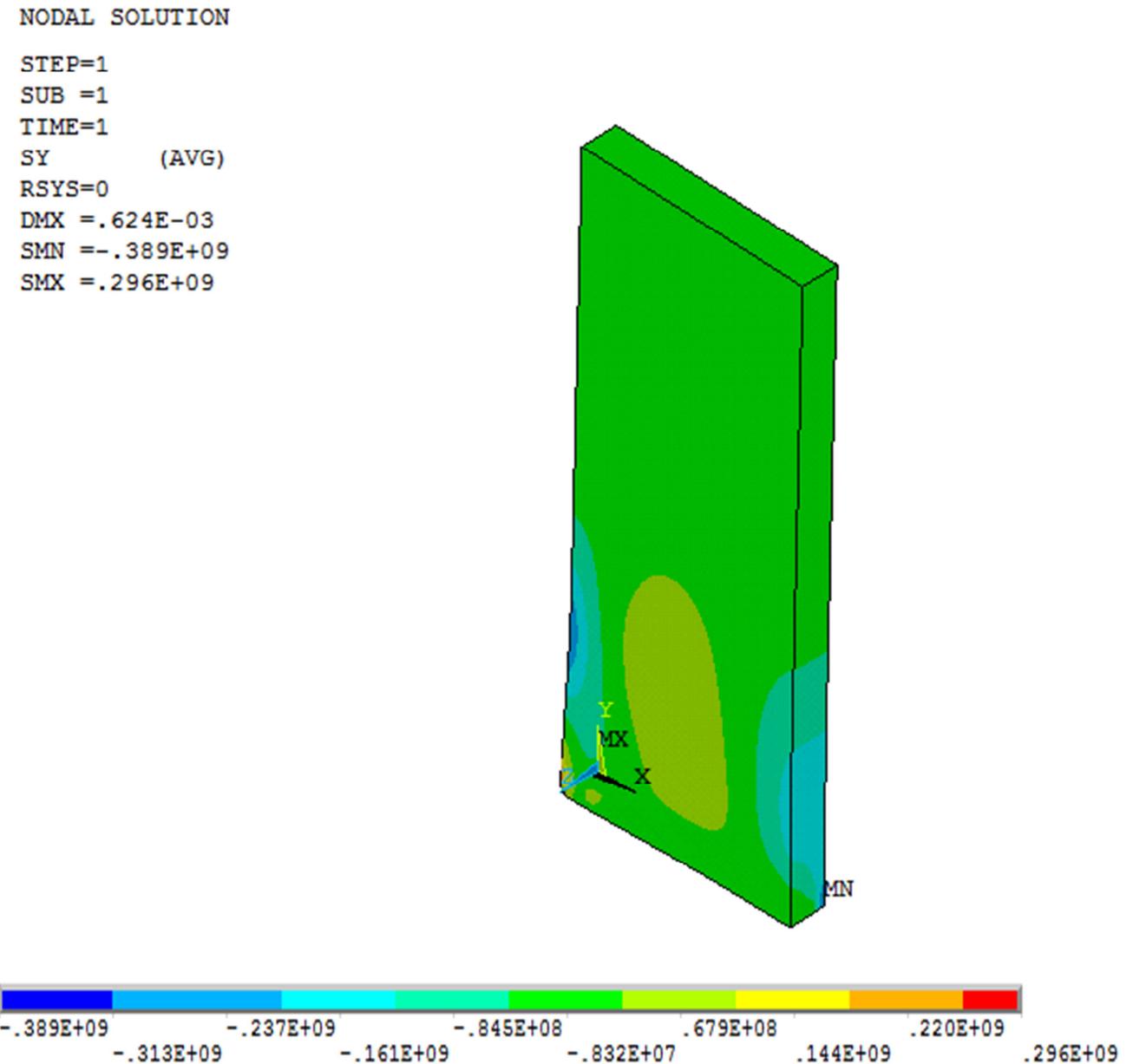
**Figura IV.15.-** Aplicación de presión en el proceso de soldadura Láser



## Capítulo VI

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.15 y IV.16, 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.



**Figura IV.15.-** 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

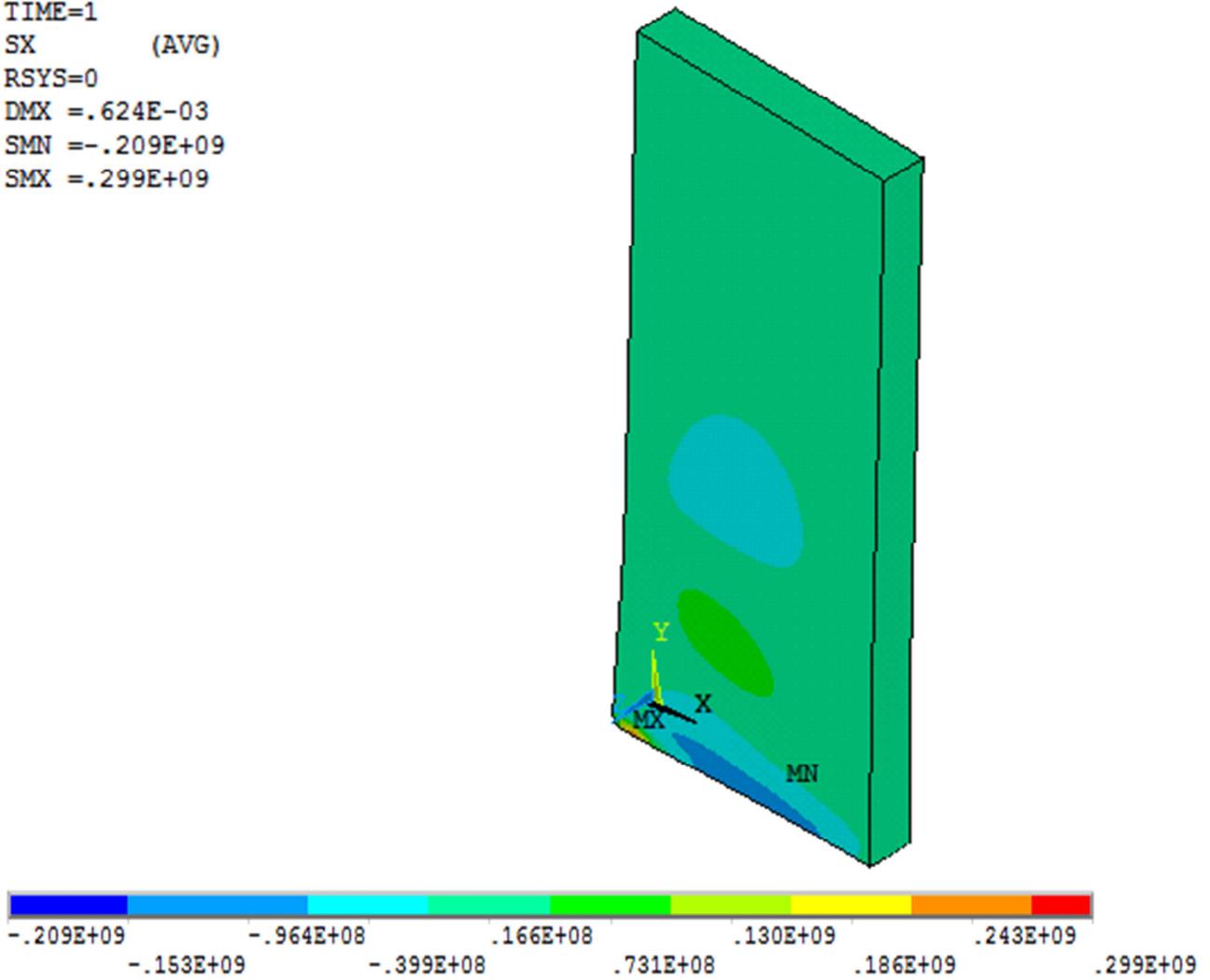
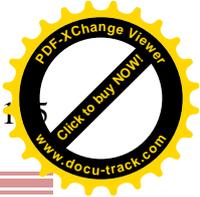


Figura IV.16.- Campo de tensiones longitudinales, para el primer pasó de carga en proceso TIG



## Capítulo VI

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

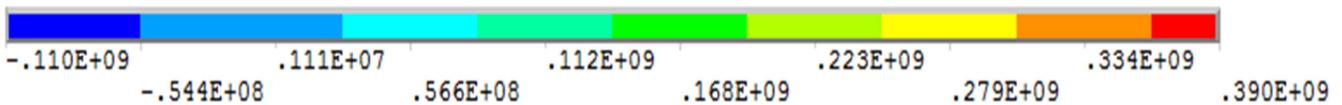
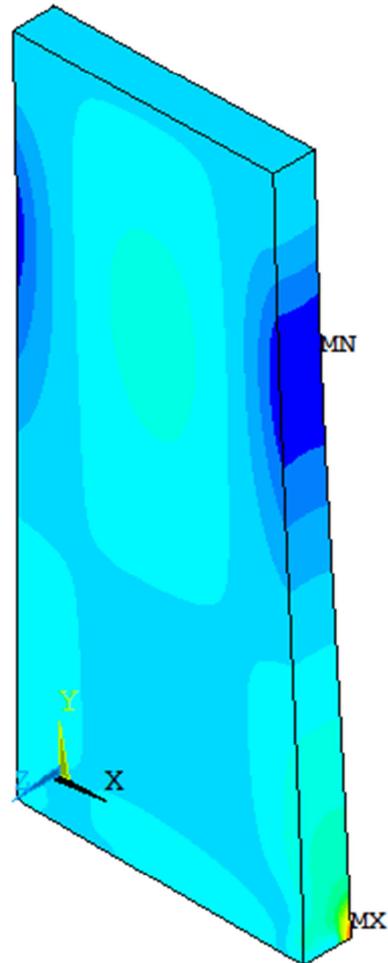
SY (AVG)

RSYS=0

DMX =.501E-03

SMN =-.110E+09

SMX =.390E+09



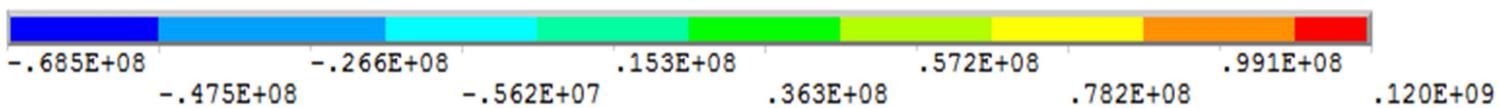
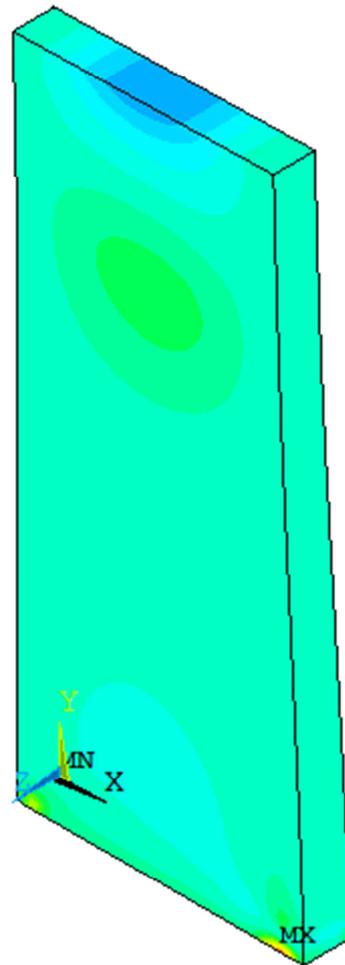
**Figura IV.17.-** Campo de tensiones transversales, para el pasó de carga número 10 en el proceso TIG



## Capítulo VI

### NODAL SOLUTION

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



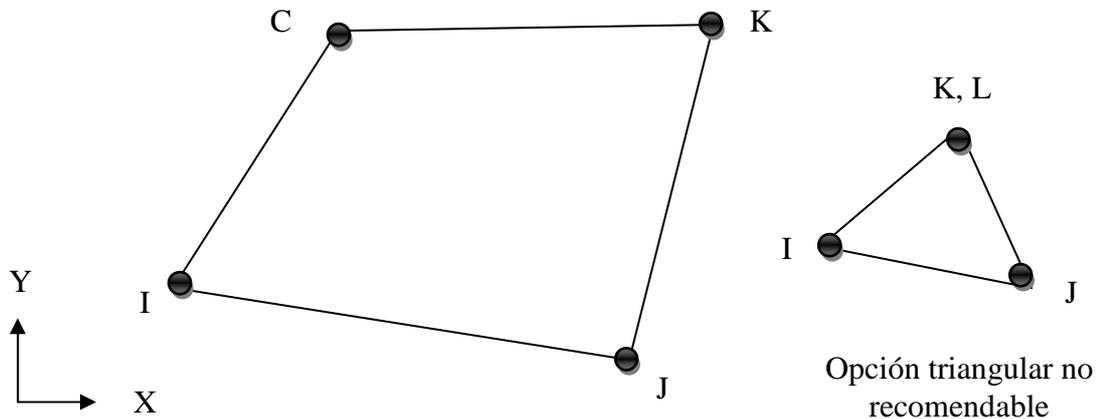
**Figura IV.16.-** Campo de tensiones longitudinales para el pasó de carga número 10 en el proceso TIG



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

Común mente se utiliza para el modelado en 2-D 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 presión. La geometría, la ubicación del nodo, y el sistema de coordenadas de este elemento se muestra en la figura IV.1.



**Figura IV.17.- Elemento Plane 42**

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 2-D**

La inducción de propiedades mecánicas y termodependientes en el análisis 2-D, se realiza de la misma forma que en el análisis 3-D.



## Capítulo VI

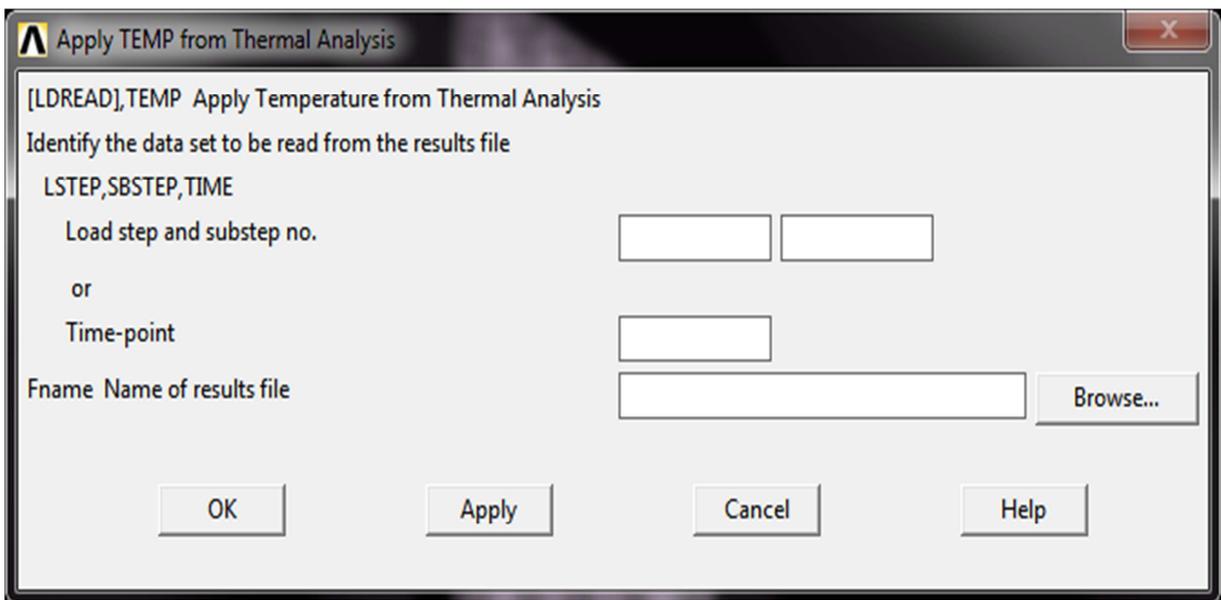
Después de seleccionar el elemento con las propiedades ideales se procede a ingresar las propiedades termodependientes ya que estas determinan el comportamiento del material ante la inducción de temperatura tales como son:

- 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 2-D

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 > From Therm Analy.

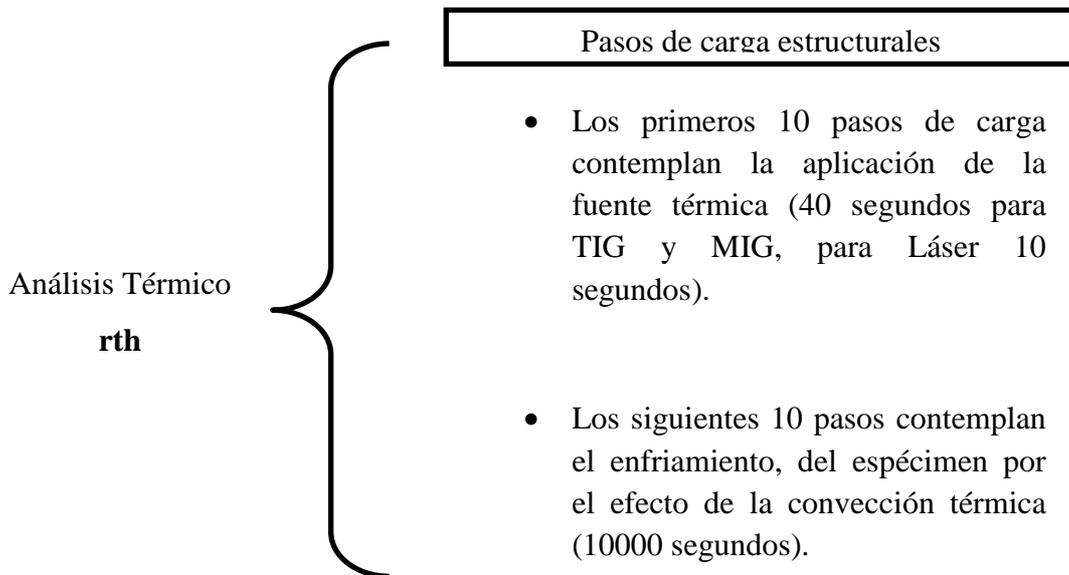


**Figura IV.18.-**Aplicación de cargas obtenidas del análisis térmico (*rth*), al análisis estático.



## Capítulo VI

Al igual que en el análisis estático en 3-D, 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.19.-** 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 3-D.

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

Se retoman las condiciones explicadas en los análisis 3-D, 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. 21 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.

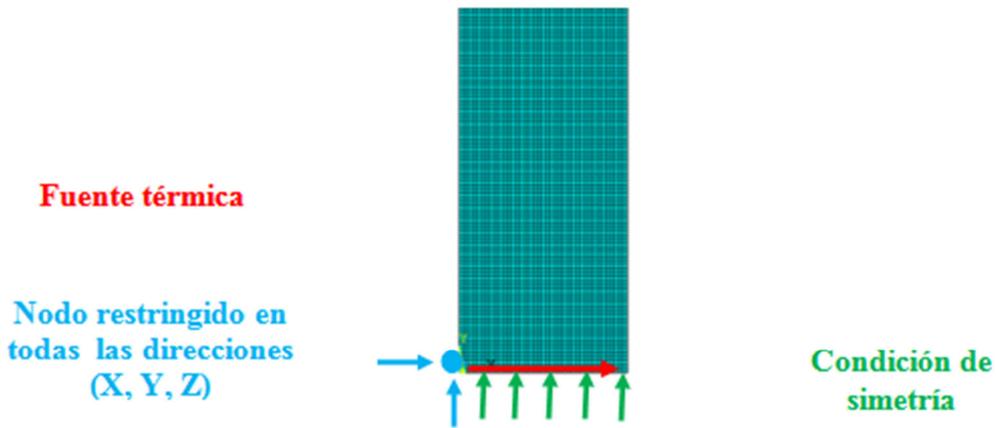


Figura IV.20.- Condiciones de frontera en análisis TIG y MIG 2-D

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

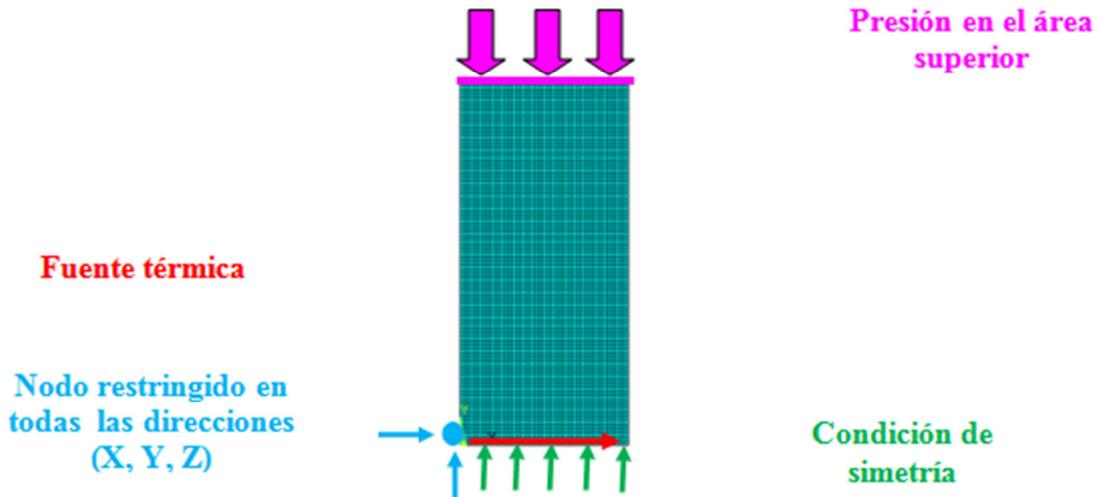
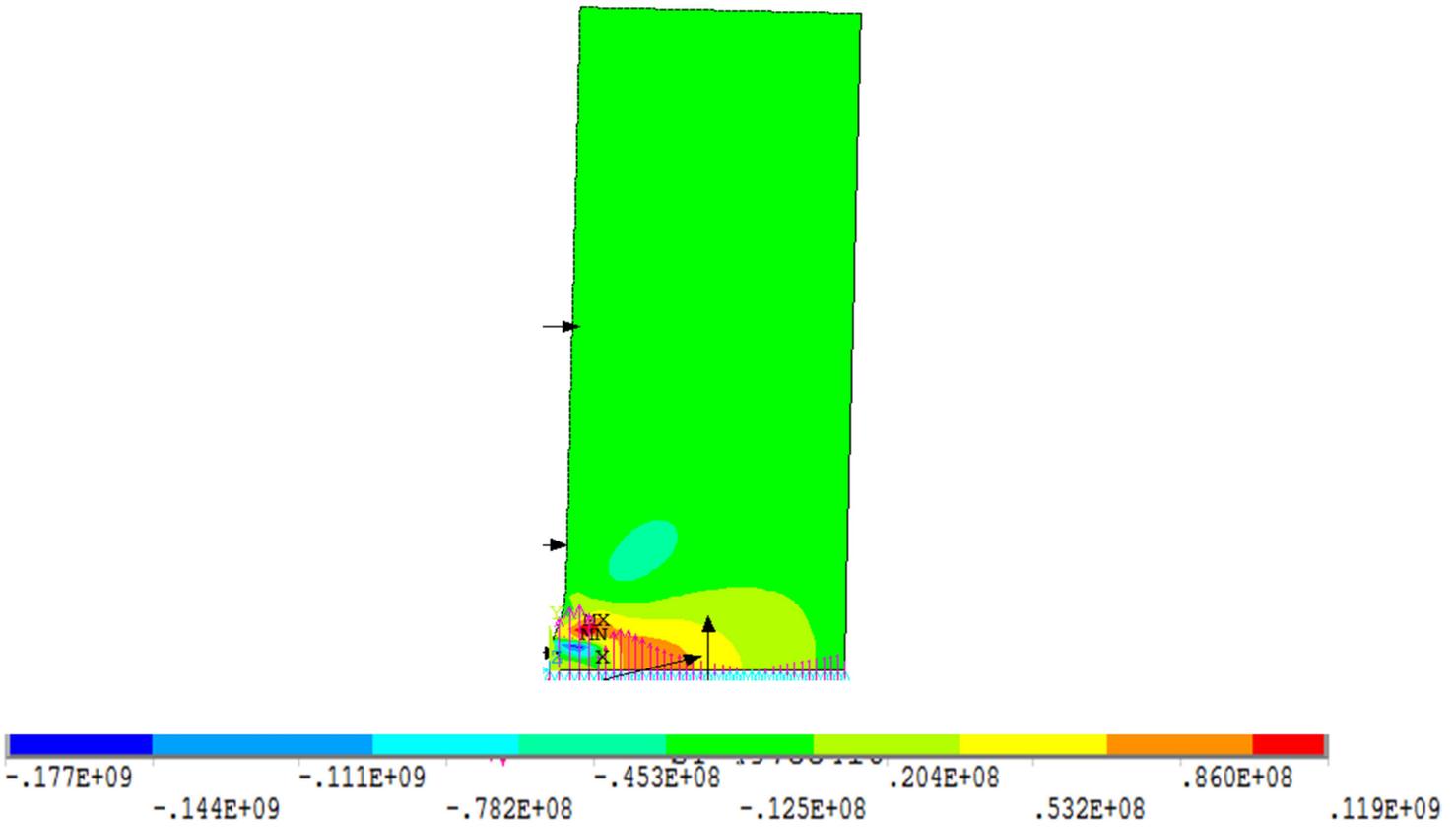
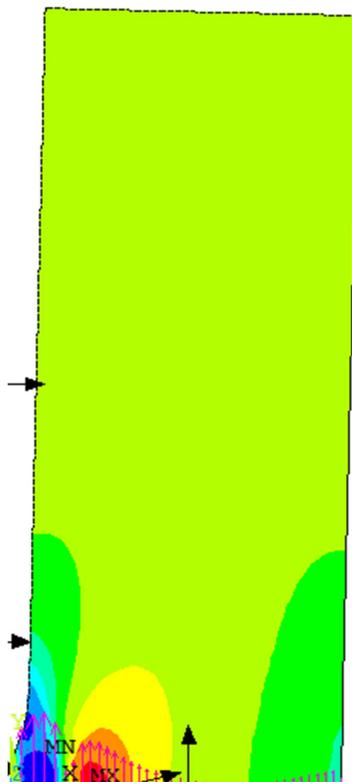


Figura IV.22.- Condiciones de frontera en análisis estructural en soldadura Láser 2-D

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.23.-** Primer paso de carga en proceso de soldadura TIG 2-D (Longitudinal)



**Figura IV.24.-** Primer paso de carga en proceso de soldadura TIG 2-D (Transversal)



## Capítulo VI

### 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 aplicarían 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 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.
- 3.- *Ansys 12® tutorial element Plane 55*.





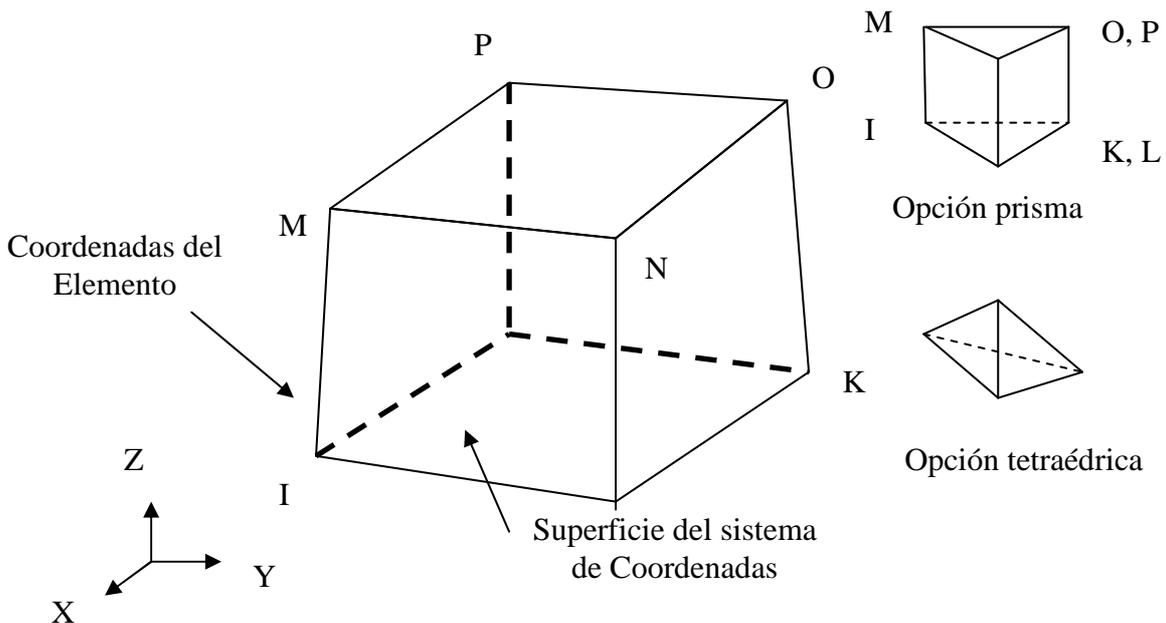
**IV.1.- Generalidades.**

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, 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 anterior mente, tanto en 2-D y 3-D.

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 Solid 45 para análisis estático en 3-D para el proceso de soldadura TIG, MIG y rayo Láser.**

El elemento SOLID45 se utiliza común mente para el modelado 3-D, 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.



**Figura IV.1.-** Elemento Solid 45, utilizado en la simulación estructural.



## Capítulo VI

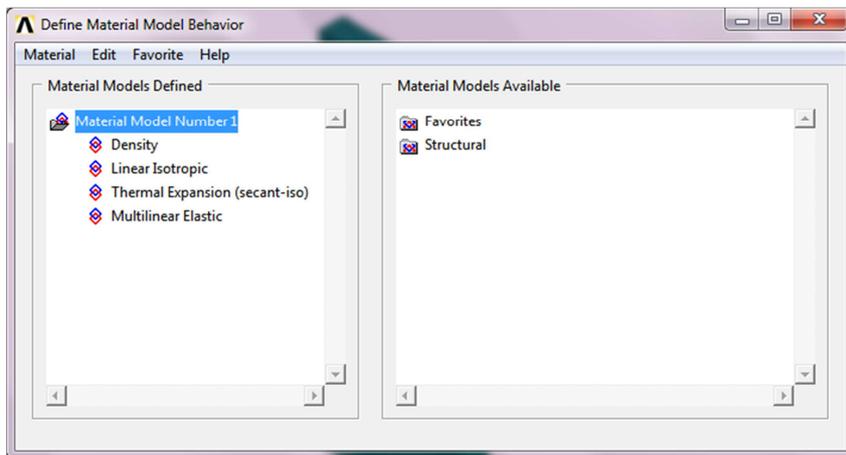
### IV.2.2.- Inducción de Propiedades Mecánicas y termodependientes en *Ansys* para un análisis no lineal en el proceso TIG, MIG y rayo Láser.

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 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:

Preprocessor > Material Models > Structural.



**Figura IV.2.-** Inducción de propiedades mecánicas y termo dependientes en *Ansys*

### 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 e IV.2, obteniendo como consecuencia la realización de un análisis no lineal.



**Tabla IV.1.-** Propiedades Físicas del Acero inoxidable 316 l

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

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

Coeficiente de expansión térmica	15.9	100°C
	16.2	315°C
	17.5	500°C
	19.9	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

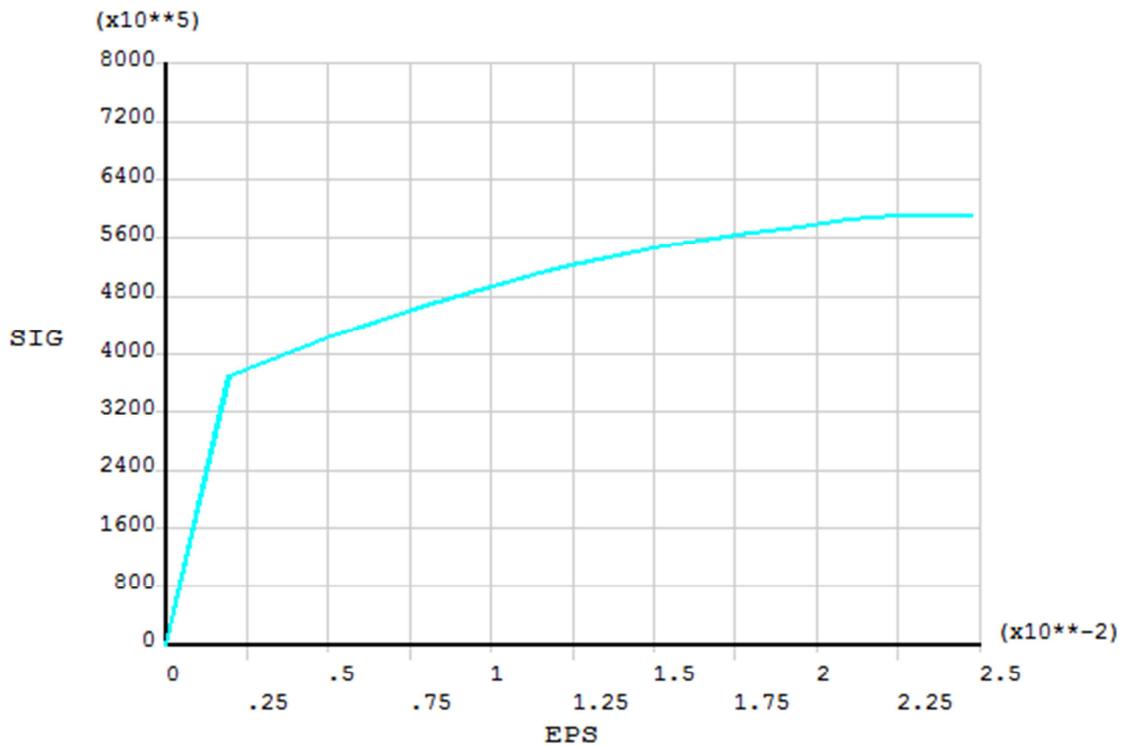
También se debe de ingresar la gráfica esfuerzo contra deformación, con la finalidad de obtener esfuerzos residuales, esto viene a complementar el ingreso de propiedades termodependientes, las cuales tienen como objetivo de realizar un análisis no lineal, los datos que se ingresan se muestran en la tabla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

La imagen IV.3 muestra la gráfica que *Ansys* realiza al ingresar los datos anteriores.

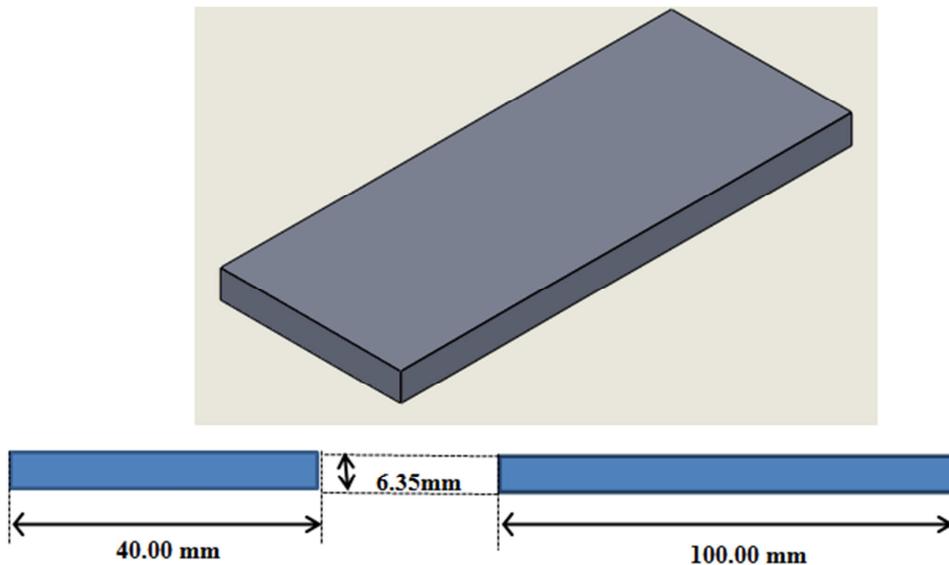


**Figura IV.3.-** Grafica esfuerzo-deformación, empleada en los tres procesos



**IV.2.4.- Modelado y mallado para análisis estático en 3-D 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. Así que se vuelven a retomar las medidas empleadas en el análisis térmico, las cuales son:



**Figura IV.4.-** Medidas del espécimen

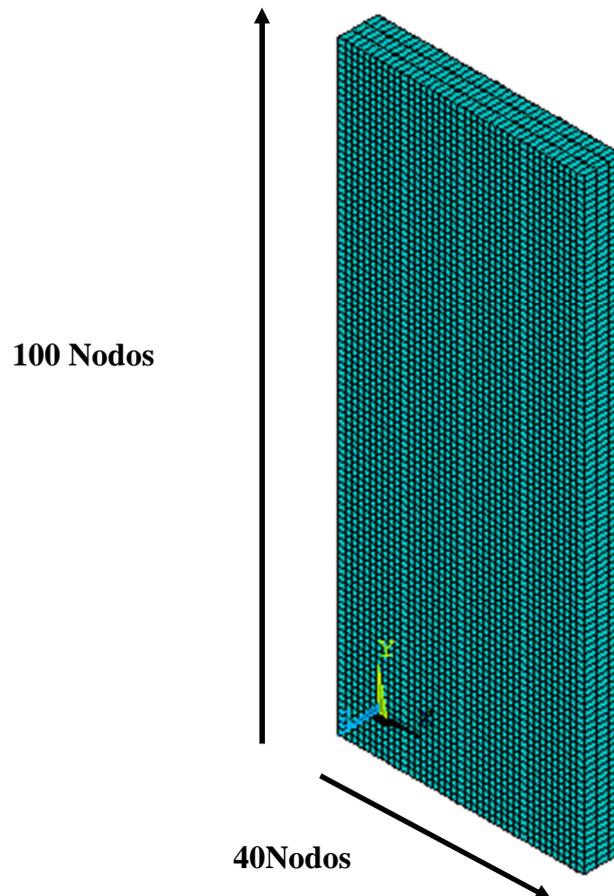
Dando de alta las siguientes coordenadas al modelar un volumen  $X_1(0)$ ,  $X_2(0,0.04)$  en  $Y_1(0)$ ,  $Y_2(0,0.1)$  y en  $Z_1(0)$ ,  $Z_2(0,0.00635)$ , tal y como se muestra en la figura IV.5.



**Figura IV.5.-** Modelado de probetas en *Ansys* para proceso estructural TIG, MIG y Rayo Láser

## Capítulo VI

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, como se muestra en la figura IV.6.



**Figura IV.6.-** Mallado utilizado en análisis estructural 3-D TIG

Básicamente se vuelve a realizar el mallado mencionado en el capítulo anterior tanto en especímenes en 3-D y 2-D, si esto no se realiza se tiene la certeza, que análisis no es correcto y los resultados serán ilógicos.

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

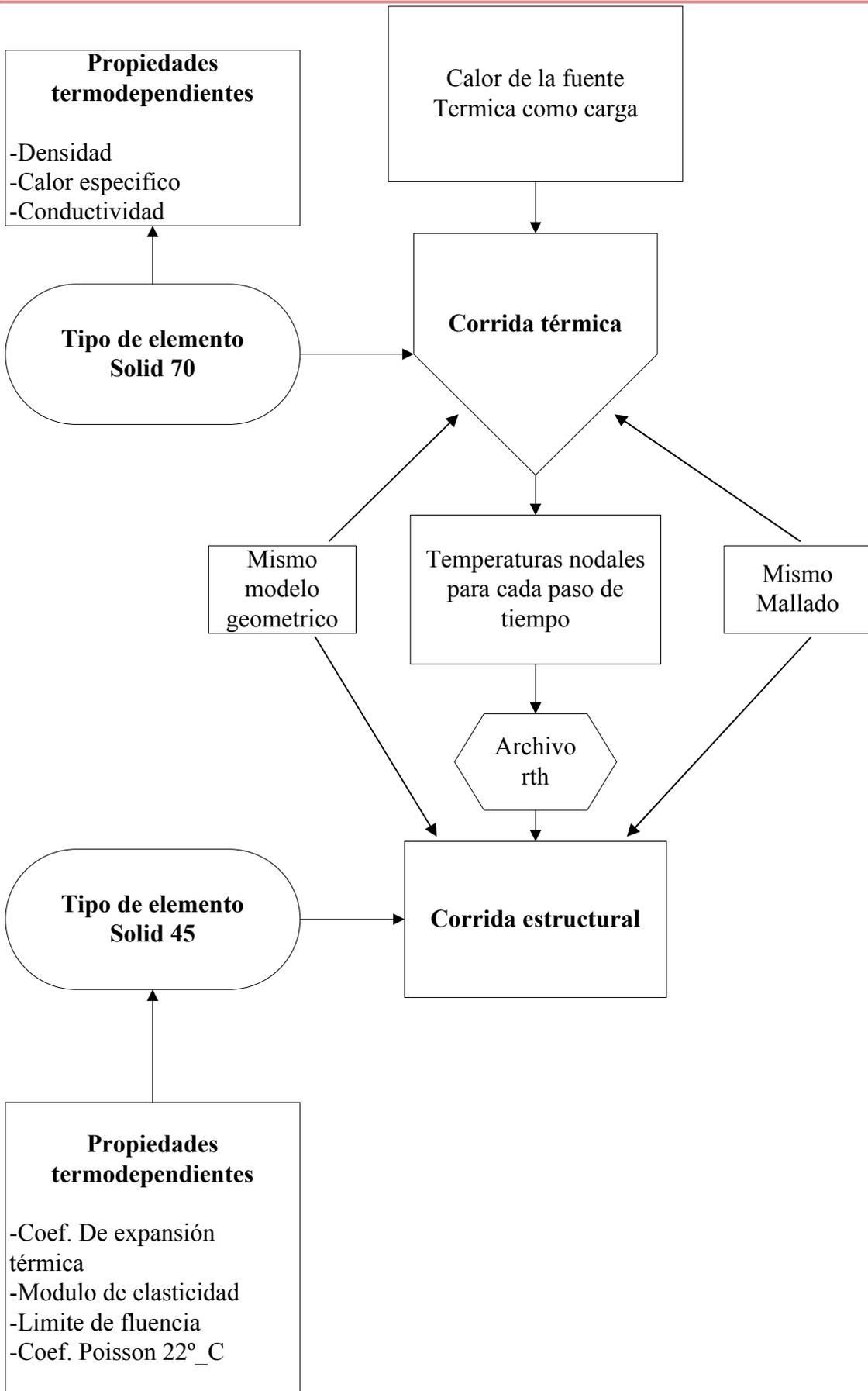


Figura IV.5.- Resumen estructural de un análisis acoplado



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

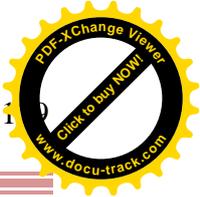
Es de suma importancia el contar con una buena organización de las corridas térmicas (TIG, MIG, Láser) tanto en 2-D y 3-D, ya que los resultados obtenidos se guardan en un archivo con extensión rth (Figura IV.6), el cual puede ser aplicado en el análisis estructural.

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.6.-** Archivo del análisis térmico

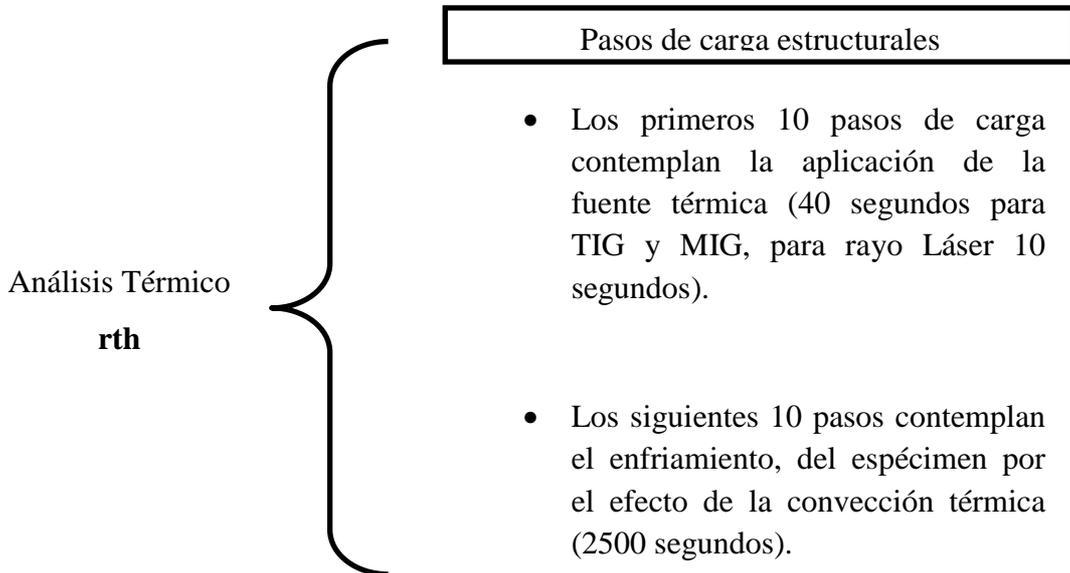
Este archivo guarda los resultados obtenidos en el análisis térmico el cual va a ser utilizado con la finalidad de evaluar los desplazamientos y tensiones para cada paso de tiempo, obteniendo así las deformaciones plásticas desde el inicio del proceso de soldadura hasta cuando este termine y el espécimen 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



## Capítulo VI

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.7 resume el proceso de inducción de cargas.

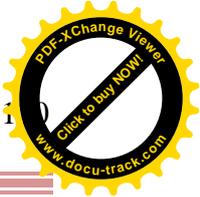


**Figura IV.7.-** Proceso de inducción de cargas

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 List Result 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	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.8.-** Tiempo y pasos del análisis térmico en *Ansys*

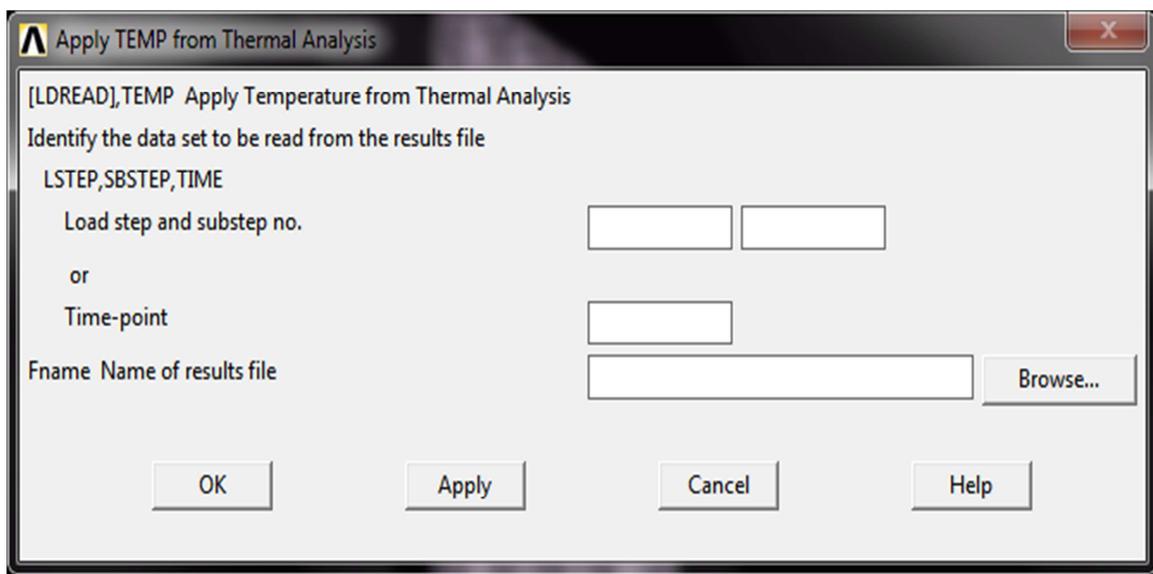


## Capítulo VI

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 Therm Analy

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.



**Figura IV.9.- Inducción de cargas estáticas en función del análisis térmico**

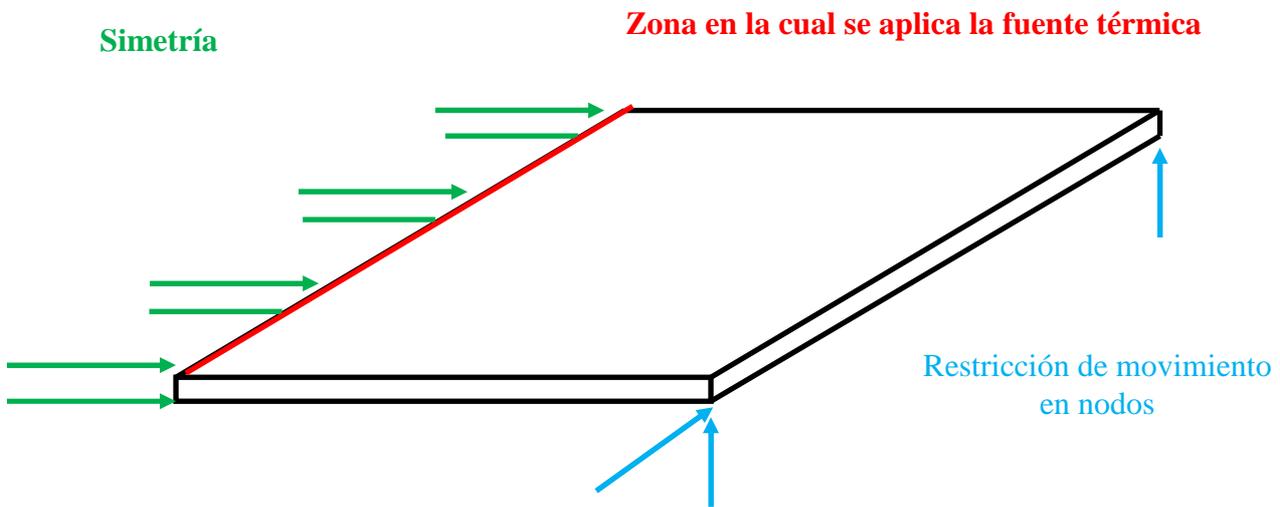
Después de ingresar la carga térmica como un carga estructural obtenida de un análisis térmico se procede a escribir el paso de carga. Mismo que una vez guardado se borrara para dar paso al siguiente, obteniendo así desplazamientos y tensiones para cada pasó de tiempo.

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

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

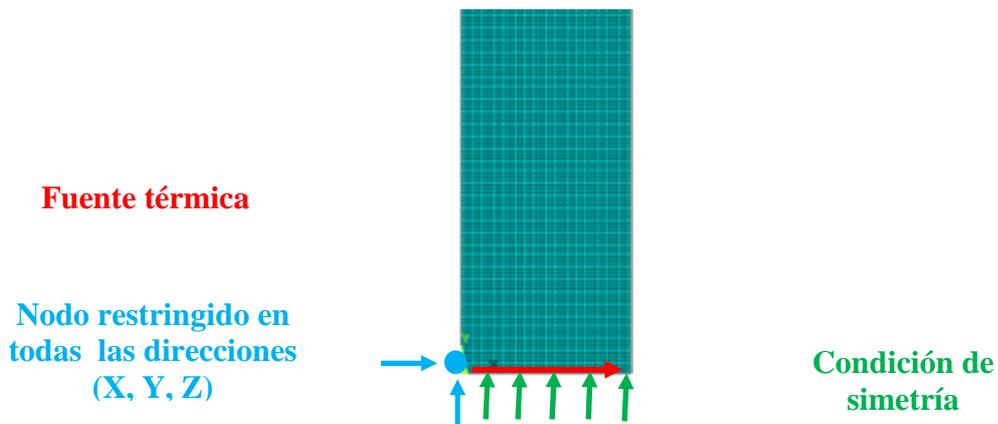
Capítulo VI

modelar y mallar el material a unir. Además propone restringir dos nodos superiores en ambos extremos, tal y como se muestra en la figura IV.10.



**Figura IV.11.- Restricciones de movimiento impuestas al modelo mecánico 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.12 muestra la condición de frontera utilizado en los procesos de soldadura TIG y MIG.

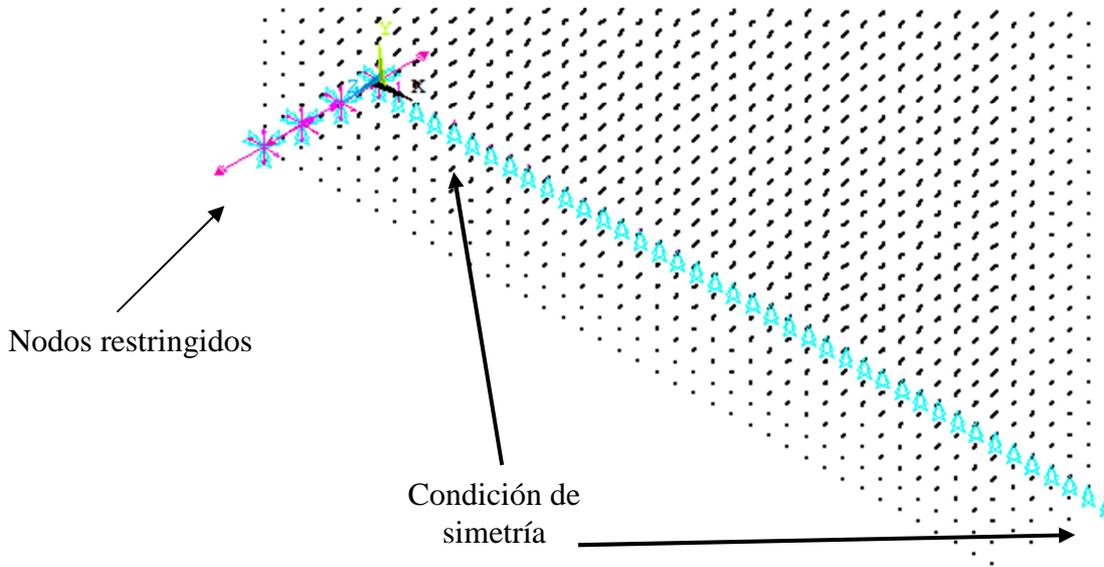


**Figura IV.12.- Condiciones de frontera aplicados al proceso TIG y MIG en 3-D**



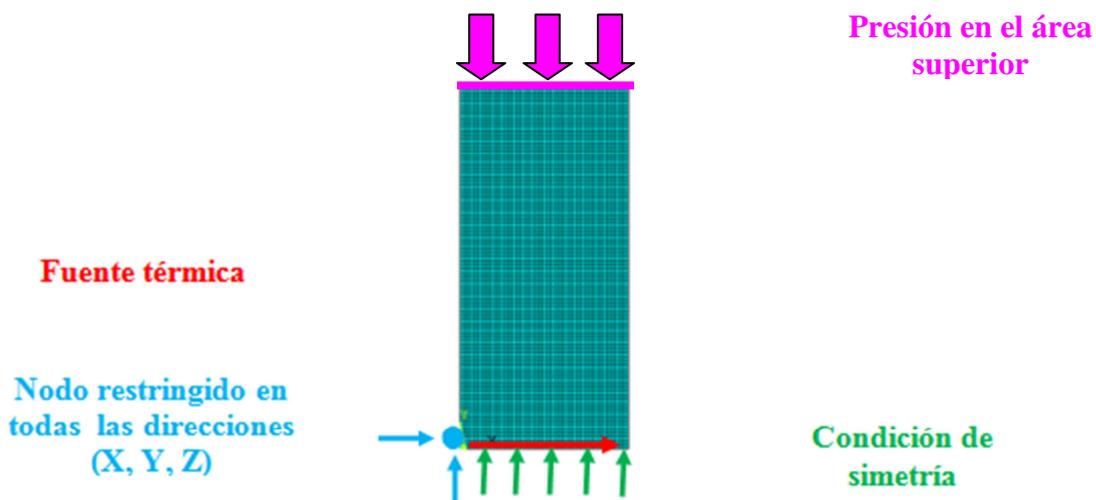
## Capítulo VI

En la figura IV.13, se muestra las condiciones de frontera en *Ansys*.



**Figura IV.13.-** 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.14 muestra la zona en la cual se aplica la presión, en la parte superior del espécimen.



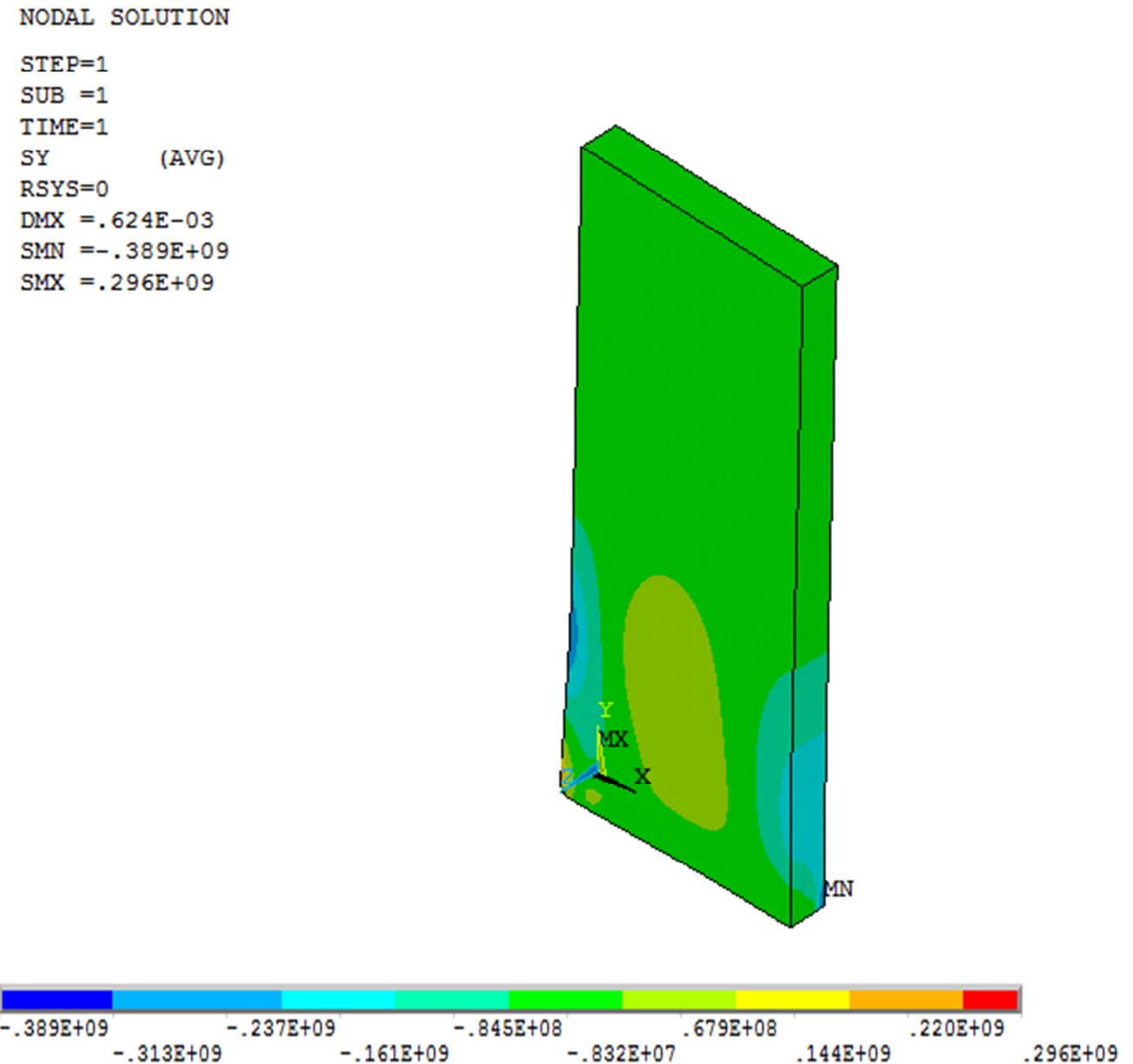
**Figura IV.15.-** Aplicación de presión en el proceso de soldadura Láser



## Capítulo VI

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.15 y IV.16, 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.



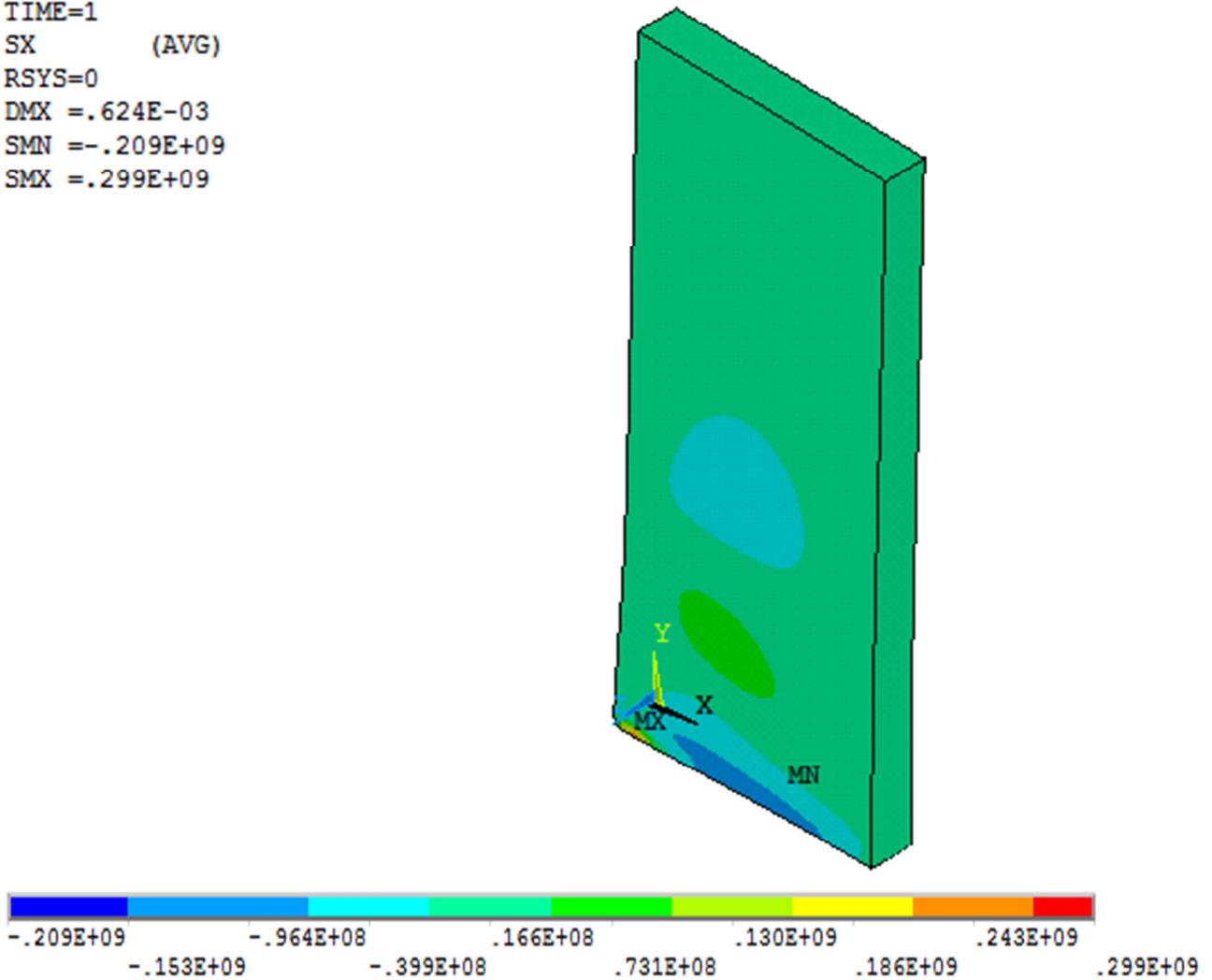
**Figura IV.15.-** Campo de tensiones transversales, para el primer pasó de carga en proceso

TIG

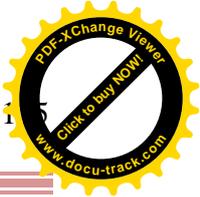


NODAL SOLUTION

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



**Figura IV.16.-** Campo de tensiones longitudinales, para el primer pasó de carga en proceso TIG



## Capítulo VI

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

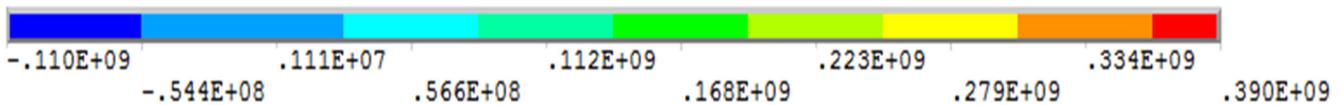
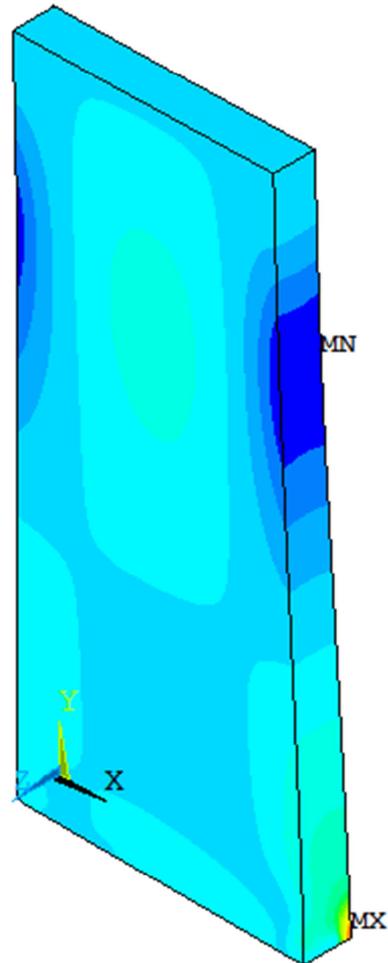
SY (AVG)

RSYS=0

DMX =.501E-03

SMN =-.110E+09

SMX =.390E+09



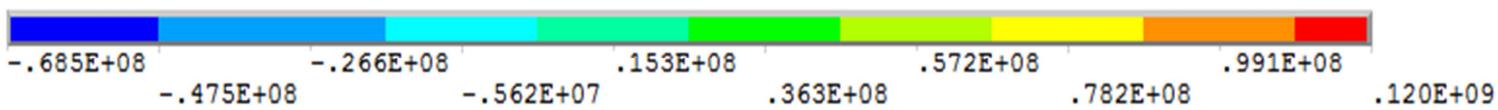
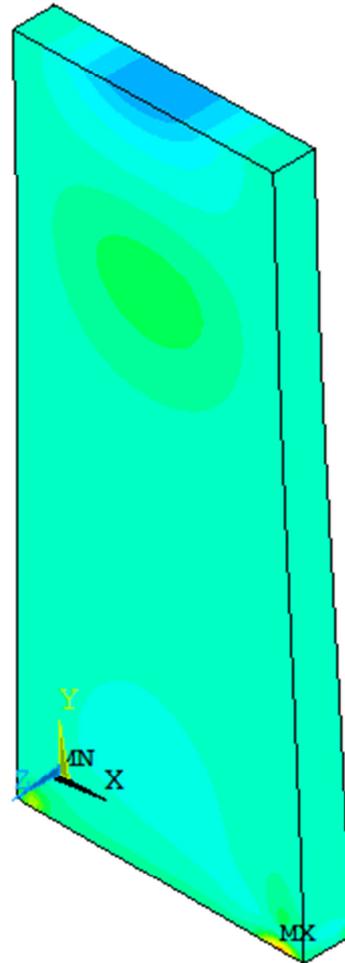
**Figura IV.17.-** Campo de tensiones transversales, para el pasó de carga número 10 en el proceso TIG



## Capítulo VI

### NODAL SOLUTION

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



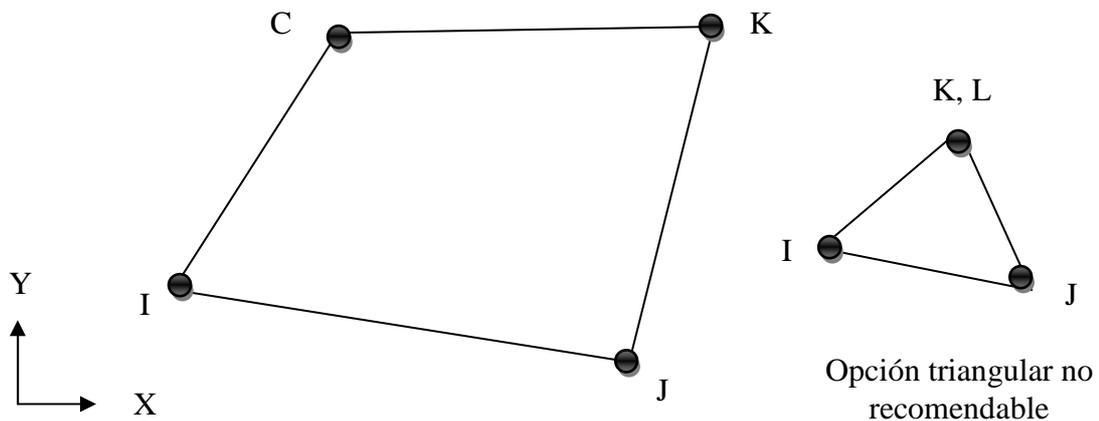
**Figura IV.16.-** Campo de tensiones longitudinales para el pasó de carga número 10 en el proceso TIG



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

Común mente se utiliza para el modelado en 2-D 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 presión. La geometría, la ubicación del nodo, y el sistema de coordenadas de este elemento se muestra en la figura IV.1.



**Figura IV.17.- Elemento Plane 42**

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 2-D**

La inducción de propiedades mecánicas y termodependientes en el análisis 2-D, se realiza de la misma forma que en el análisis 3-D.



## Capítulo VI

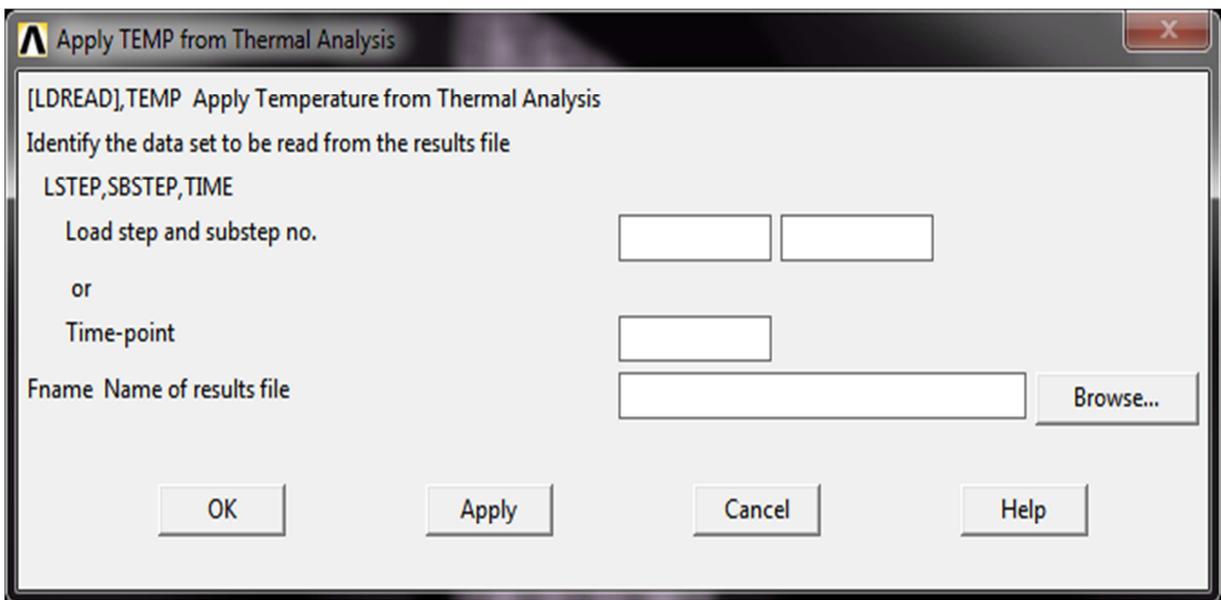
Después de seleccionar el elemento con las propiedades ideales se procede a ingresar las propiedades termodependientes ya que estas determinan el comportamiento del material ante la inducción de temperatura tales como son:

- 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 2-D

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 > From Therm Analy.

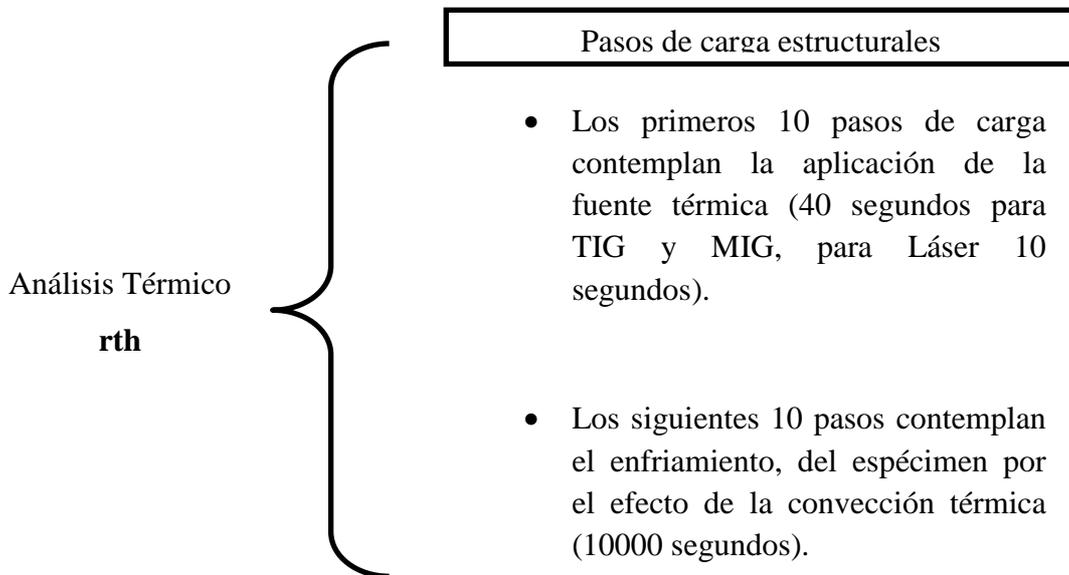


**Figura IV.18.-**Aplicación de cargas obtenidas del análisis térmico (*rth*), al análisis estático.



## Capítulo VI

Al igual que en el análisis estático en 3-D, 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.19.-** 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 3-D.

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

Se retoman las condiciones explicadas en los análisis 3-D, 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. 21 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.

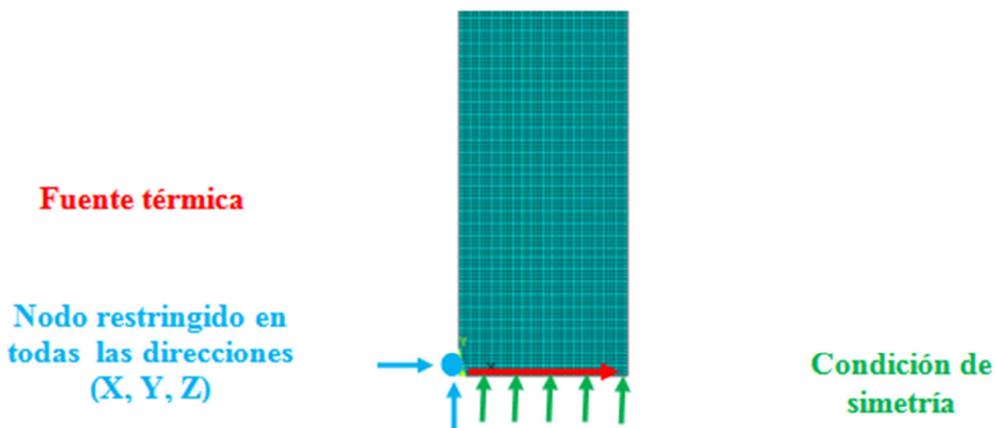
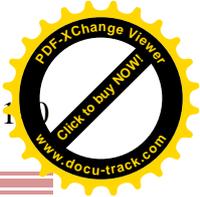


Figura IV.20.- Condiciones de frontera en análisis TIG y MIG 2-D

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

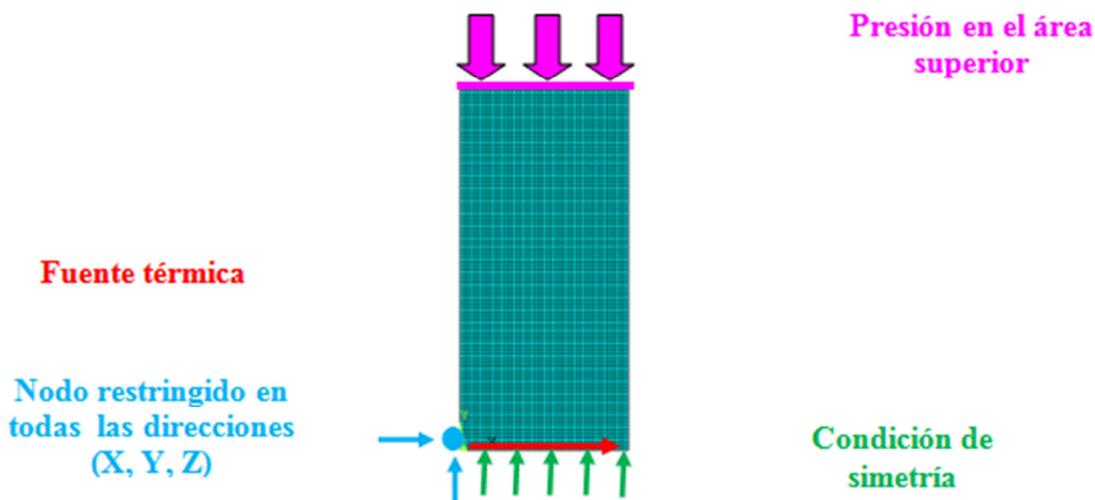
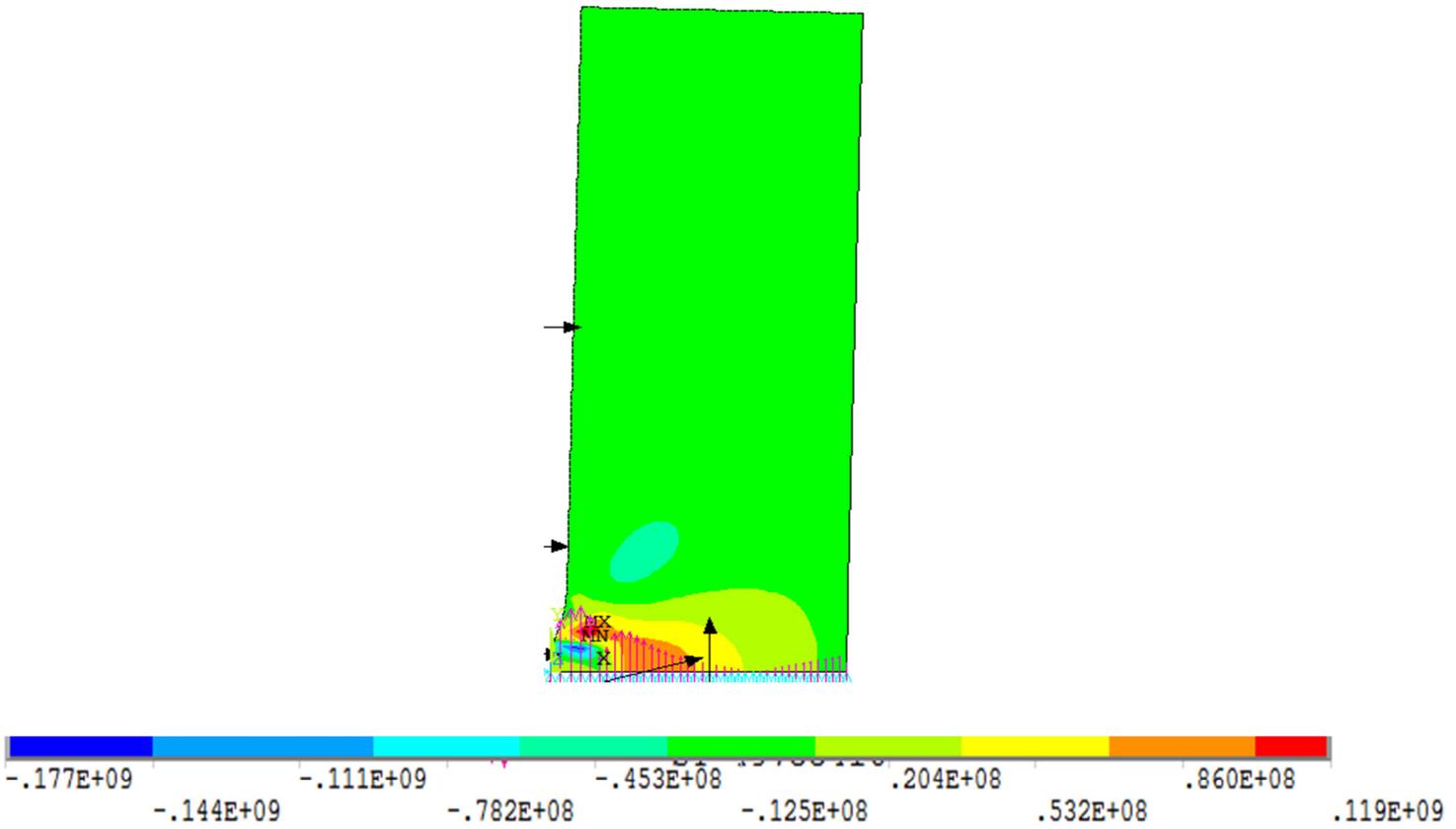
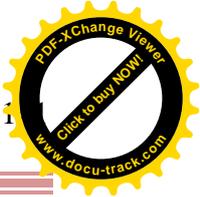
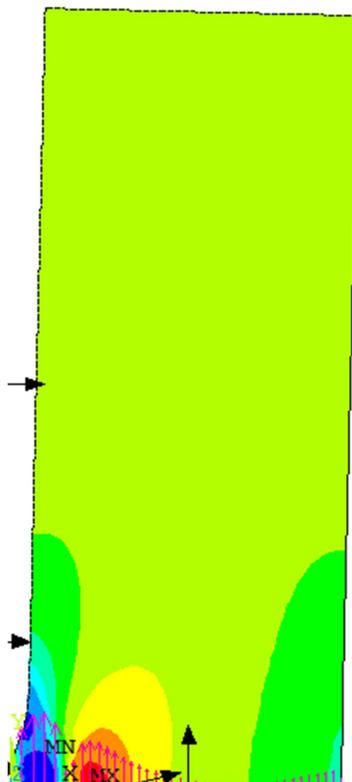


Figura IV.22.- Condiciones de frontera en análisis estructural en soldadura Láser 2-D

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.23.-** Primer paso de carga en proceso de soldadura TIG 2-D (Longitudinal)



**Figura IV.24.-** Primer paso de carga en proceso de soldadura TIG 2-D (Transversal)



## Capítulo VI

---

---

### 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 aplicarían 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 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.
- 3.- *Ansys 12® tutorial element Plane 55*.





## Capítulo V

---

---

### V.1.- Generalidades

En este capítulo se desarrolla el método de respuesta de grieta en *Ansys*, el cual se basa en una prueba de tipo destructiva en el área experimental con 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 reajuste 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 en 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 2-D

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 enfriará al interactuar con el medio ambiente.

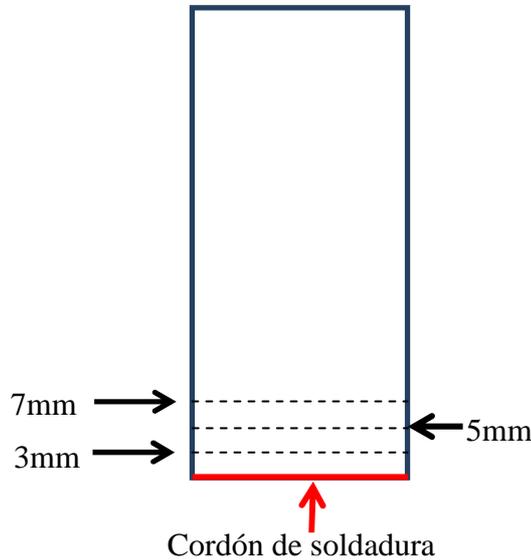
Este análisis se realiza en el último paso de carga del análisis estructural ya que en este paso la probeta se encuentra a temperatura ambiente.



## Capítulo V

### 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)



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

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.

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

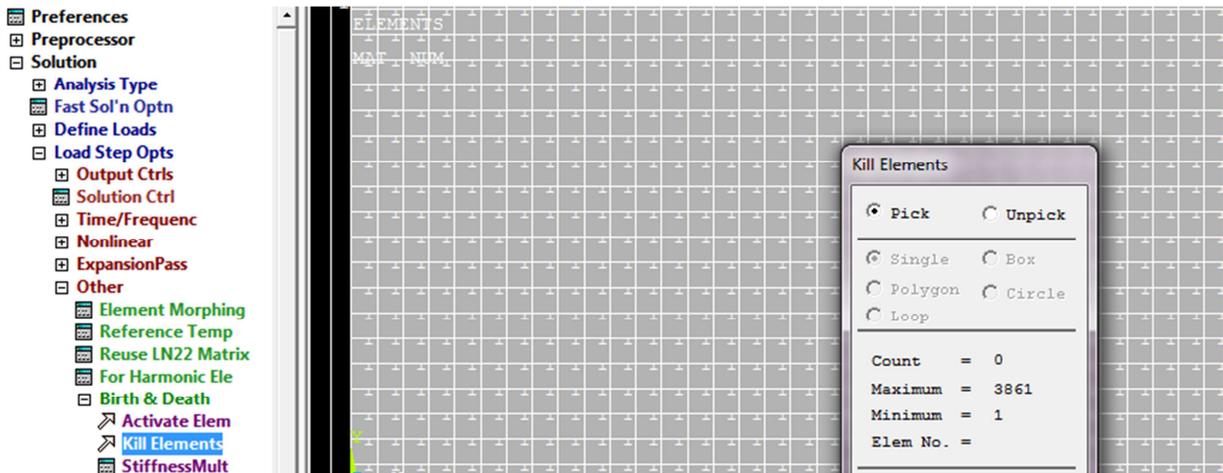
Después de tener los resultados del análisis estructural se procede a realizar el método de respuesta de grieta, en el cual se utiliza el comando *Kill and Death*, es muy importante establecer que el método de respuesta de grieta debe desarrollarse solo en el preprocesador, de lo contrario los resultados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

## Capítulo V

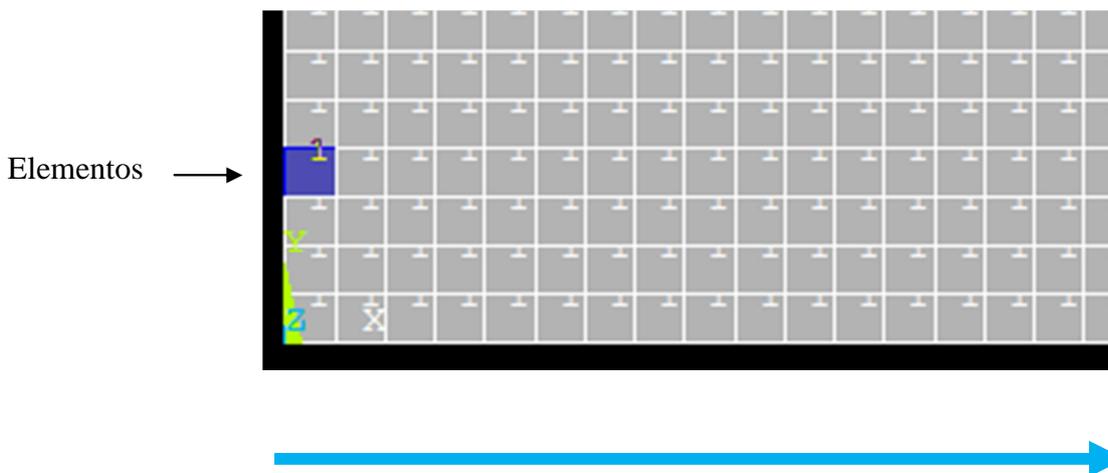
ser eliminado, es importante resaltar que no se deben de ingresar más datos al programa de elemento finito.

- 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.

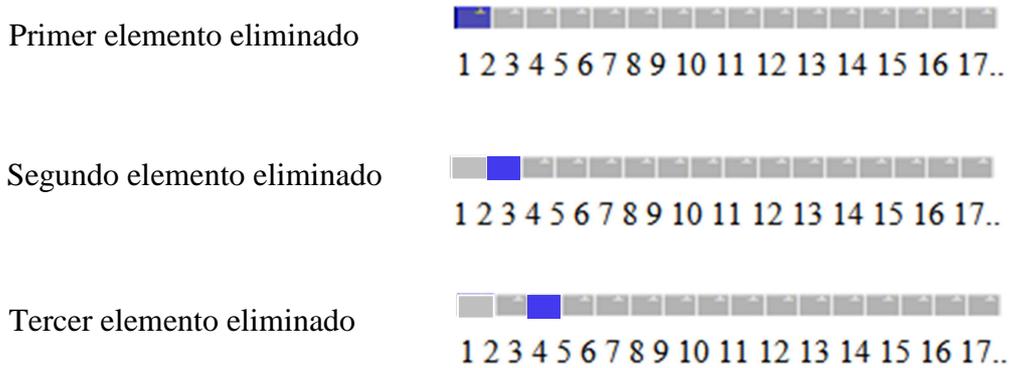


**Figura V.3.-** Dirección del corte



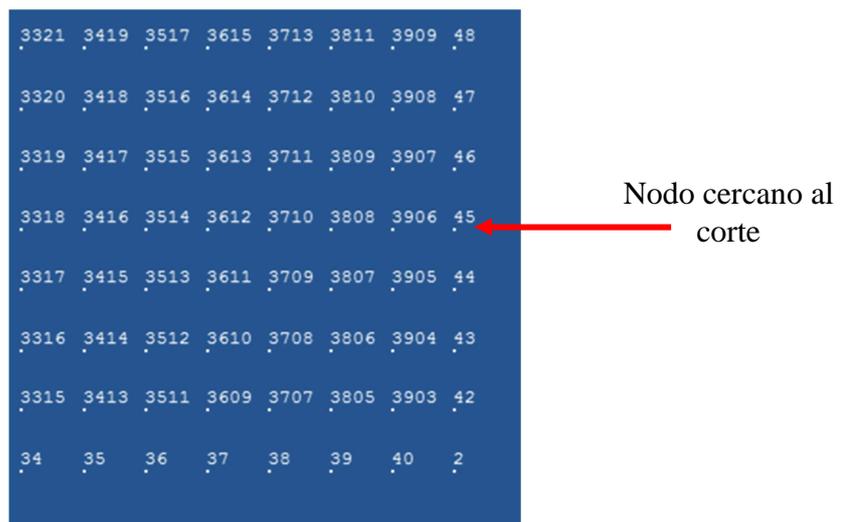
## Capítulo V

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*.

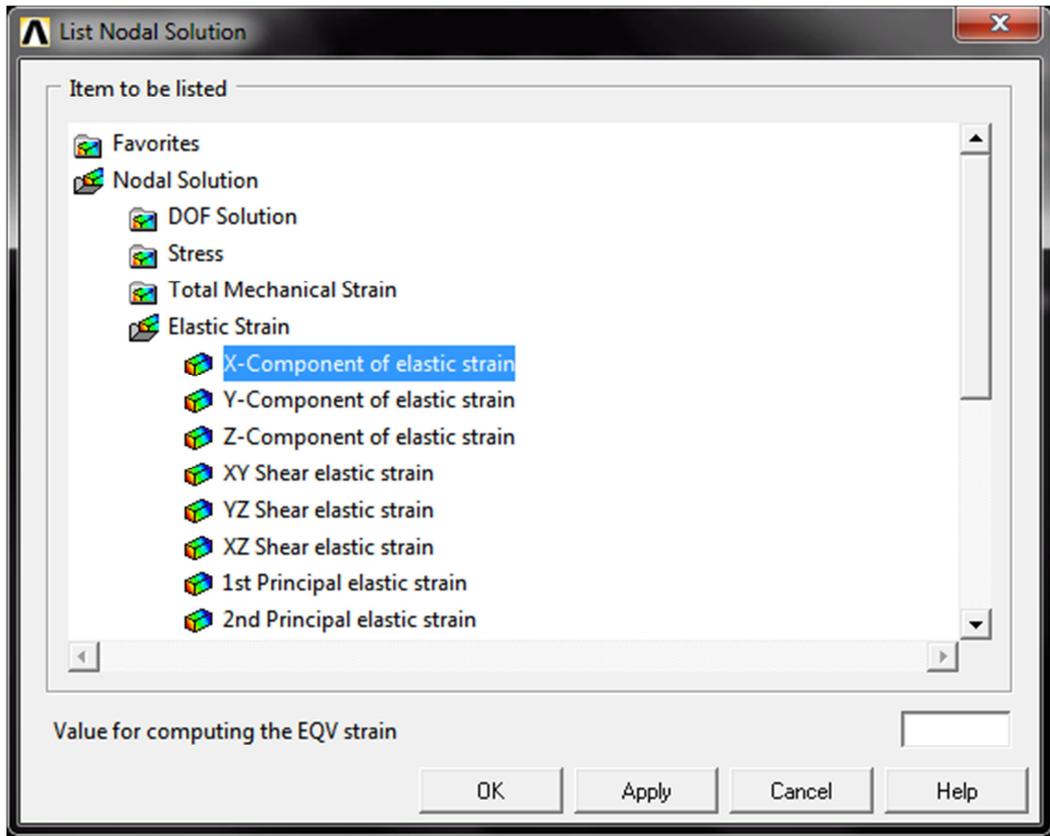


**Figura V.5.-** Nodo 45 seleccionado para la medición de microdeformaciones



## Capítulo V

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.

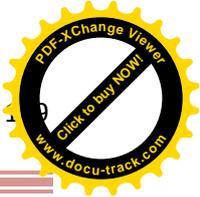


**Figura V.6.-** Lista de resultados por nodos en *Ansys*

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

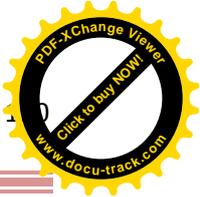


## Capítulo V

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 2-D

Corte	$\epsilon$
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



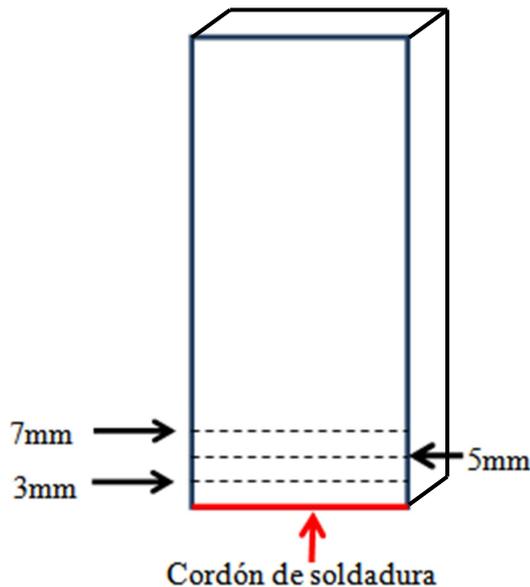
29	-0.12838E-07
30	-0.12996E-07
31	-0.12986E-07
32	-0.12986E-07
33	-0.12786E-07
34	-0.12899E-07
35	-0.13246E-07
36	-0.14081E-07
37	-0.17249E-07
38	-0.34719E-07

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

Básicamente el procedimiento para realizar el método de respuesta de grieta en 3-D es muy similar al 2-D. 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 2-D y 3-D, 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.



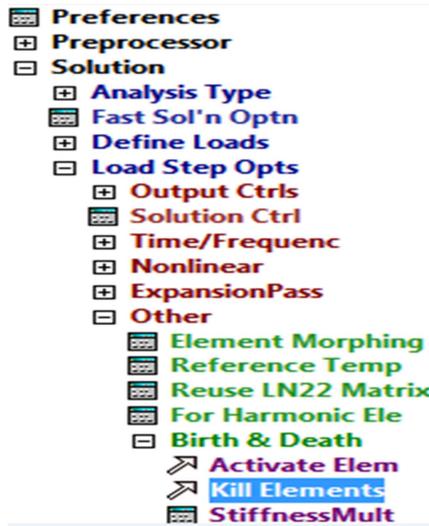
**Figura V.5.-** Casos de estudio para el método de respuesta de grieta en los análisis 3-D



## Capítulo V

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

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 3-D

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*.

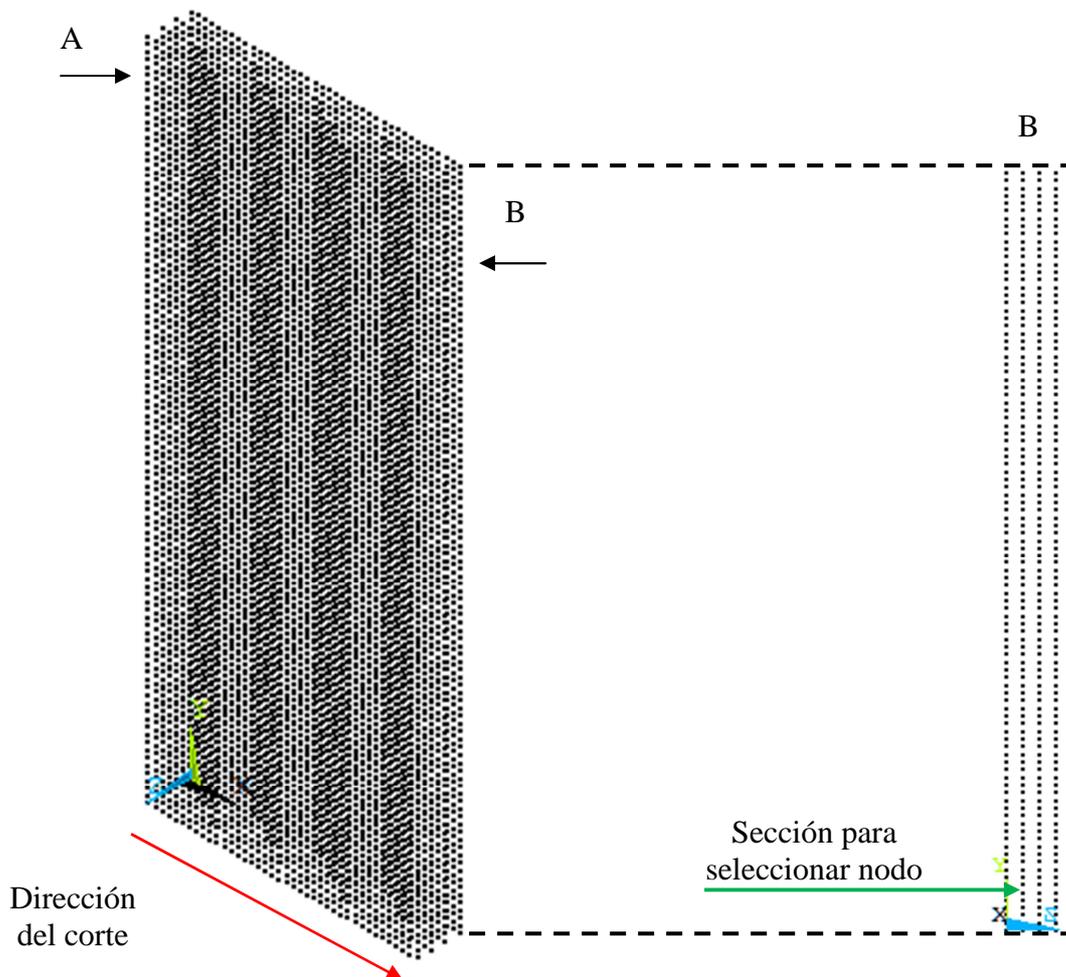


**Figura V.7.-** Probeta utilizada en el análisis experimental TIG



## Capítulo V

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* 3-D, 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.

