



UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ

**ANÁLISIS DE EFECTOS QUE INFLUYEN EN UNA  
JUNTA SOLDADA DE ACERO AISI 1010 CON  
ELECTRODO REVESTIDO EMPLEANDO EL  
MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**

**Autores:** Francisco González  
C.I: 24.424.016  
Walter Sousa  
C.I: 24.347.716

Urb. Yuma II, calle N°3, Municipio San Diego  
Teléfono (0241) 8714240 (master) – Fax: (0241) 8712394



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA  
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA INGENIERÍA MECÁNICA

**ANÁLISIS DE EFECTOS QUE INFLUYEN EN UNA JUNTA SOLDADA DE  
ACERO AISI 1010 CON ELECTRODO REVESTIDO EMPLEANDO EL MÉTODO  
DE ELEMENTOS FINITOS**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de  
INGENIERO MECÁNICO**

**Autores:** Francisco González  
C.I: 24.424.016  
Walter Sousa  
C.I: 24.347.716

**Tutor:** Donato Romanello  
C.I:4131877

San Diego, Marzo 2018



Universidad José Antonio Páez  
Facultad de Ingeniería

---

FI-M-075-2018-1

Valencia, 25 de Enero de 2018.

Ciudadanos:

**Francisco González**

**C.I: 24.424.016**

**Walter Sousa**

**C.I: 24.347.716**

Presente.-

Cumplo con informarle que la Comisión de Trabajo de Grado y Pasantías de la Facultad de Ingeniería en su reunión N° 1-2018 de fecha 25/01/2018 aprobó el proyecto de trabajo de grado titulado "ANÁLISIS DE EFECTOS QUE INFLUYEN EN UNA JUNTA SOLDADA DE ACERO AISI 1010 CON ELECTRODO REVESTIDO EMPLEANDO EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS" presentado por usted(es) como requisito para optar al título de Ingeniero Mecánico

Se ratifica la designación del Ing. Donato Romanello, C.I. 4.131.877 y la Ing. Alicia Yanez de Pizzella, C.I. 4.598.880 como Tutores Académicos que lo asesorarán en el desarrollo de este proyecto.

Atentamente,

**Prof. Zulay Salcedo**

**Decana de la Facultad de Ingeniería**



c. c. Coordinación de Pasantías y Trabajo de Grado (1)

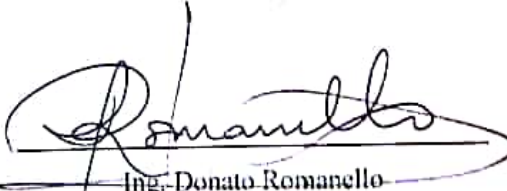


REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA  
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA INGENIERÍA MECÁNICA

### ACEPTACIÓN DEL TUTOR

Quien suscribe, Ingeniero Donato Romanello, portador de la cédula de identidad C.I. V-4131877, en mi carácter de tutor del Informe de Trabajo Especial de Grado presentado por los ciudadanos González, Francisco, portador de la Cédula de Identidad C.I. V-24.424.016 y Sousa, Walter, portador de la Cédula de Identidad C.I. V-24.347.716, titulado "ANÁLISIS DE EFECTOS QUE INFLUYEN EN UNA JUNTA SOLDADA DE ACERO AISI 1010 CON ELECTRODO REVESTIDO EMPLEANDO EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS". Presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Mecánico, considero que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del jurado examinador que se designe.

En San Diego, a los 19 del mes de Marzo del año dos mil dieciocho

  
Ing. Donato Romanello  
C.I.: V- 4131877  
Tutor Académico

## **AGRADECIMIENTOS**

Queremos dar las gracias a Dios por estar en nuestro lado en todo nuestro progreso universitario y por proporcionar las fuerzas necesarias para superar todos los obstáculos que se nos presentaron a lo largo de nuestra preparación, mostrándonos siempre el camino correcto y protegiéndonos con su bendición.

Con el apoyo incondicional y único que solo personas tan especiales como nuestros padres nos otorgaron, nuestro agradecimiento es tan grande como el amor y cariño que les tenemos, por ellos seguimos los ejemplos correctos, con su paciencia y amor nos enseñaron cosas que nadie en la vida puede quitar y con sus consejos seguiremos nuestros caminos con una sensación de satisfacción por haber cumplido con ellos.

Damos las gracias a nuestro tutor de tesis por su apoyo constante y dedicación el Profesor Donato Romanello, nos dio la guía para cumplir con nuestros objetivos planteados y nos prestó parte de su tiempo para nuestro entendimiento, convirtiéndose en una persona muy apreciada por nosotros.

A nuestros hermanos, familiares y seres queridos, por habernos brindado su apoyo en cada una de las decisiones tomadas en nuestro camino.

A nuestros compañeros de clases y amigos que estuvieron en todo momento y nos prestaban su apoyo a lo largo de nuestra carrera, por todos los momentos vividos, consejos, risas y paciencia, siendo participes en todo este tiempo de las experiencias vividas.

Agradecemos a nuestros profesores que nos educaron a lo largo de la Universidad, brindándonos todos sus conocimientos y para crecer como profesionales y como personas.

A cada una de las personas que nos encontramos en este viaje que por una u otra razón nos impulsaron a cumplir nuestras metas.

## ÍNDICE

<b>CONTENIDO</b>	<b>PP</b>
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	ix
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	ix
<b>RESUMEN</b> .....	xii
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>CAPÍTULO</b>	
<b>I EL PROBLEMA</b>	
1.1 Planteamiento del problema.....	3
1.2 Formulación del problema .....	4
1.3 Objetivos de la investigación:.....	5
1.3.1 Objetivo general.....	5
1.3.2 Objetivos Específicos.....	5
1.4 Justificación de la investigación. ....	5
1.5 Limitaciones. ....	6
1.6 Alcance. ....	6
<b>II MARCO TEÓRICO</b>	
2.1 Antecedentes.....	7
2.2 Bases Teóricas .....	10
2.2.1 Soldadura .....	10
2.2.2 Tipos de Soldadura.....	11

2.2.3 Electroodos.....	18
2.2.3.1 Clasificación de los electrodos. ....	18
2.2.4 Biseles .....	22
2.2.5 Acero.....	27
2.2.6 Diagrama Hierro-Carbono .....	27
2.2.7 Proceso de fabricación del acero.....	30
2.2.7.1 Clasificación de los aceros. ....	32
2.2.8 Fallas características de soldaduras.....	37
2.2.9 Grietas. ....	38
2.2.9.1 Criterio para evaluar el riesgo del agrietamiento en caliente. ....	39
2.2.9.2 Naturaleza del agrietamiento en caliente.....	39
2.2.9.3 Fisuramiento en caliente (FC) del metal de soldadura. ....	40
2.2.9.4 Fisuras de solidificación (FS). ....	41
2.2.9.5 Fisura de licuación.....	42
2.2.10 Método de elementos finitos. ....	42
2.2.10.1 Etapas básicas en la utilización del método de los elementos finitos..	42
2.2.10.2 Aplicaciones del método. ....	49
2.3 Definición de Términos Básicos.....	50

### **III MARCO METODOLÓGICO**

3.1 Tipo de investigación.....	51
3.2 Nivel de la investigación.....	51
3.3 Diseño de investigación.....	52

3.4 Población y muestra.....	52
3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos. ....	52
3.7 Fases de Desarrollo de la Investigación.....	53
<b>IV RESULTADOS</b> .....	<b>55</b>
4.1 Estudiar de forma detallada los resultados experimentales obtenidos previamente. ....	55
4.2 Crear modelos numéricos usando un software comercial y análisis de los respectivos resultados .....	59
4.3 Analizar por medio de una simulación que configuración conlleva a mayores esfuerzos en el cordón de soldadura sobre el Acero AISI 1010.....	65
4.4 Verificar mediante el software los resultados obtenidos con resultados experimentales previos. ....	71
<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>75</b>
<b>RECOMENDACIONES</b> .....	<b>76</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>77</b>
<b>ANEXOS</b> .....	<b>79</b>
ANEXO A.....	80
ANEXO B .....	82

## LISTA DE TABLAS

<b>TABLAS</b>		<b>PP</b>
1	Propiedades de los Materiales.....	12
2	Relación entre el Amperaje y el Internal Heat Generation. ....	13
3	Probeta E-6010-80A.....	14
4	Probeta E-6010-100A.....	15
5	Probeta E-6010-120A.....	16
6	Probeta E-6013-80A.....	19
7	Probeta E-6013-100A.....	20
8	Probeta E-6013-120A.....	20
9	Probeta E-7018-90A.....	23
10	Probeta E-7018-120A.....	23
11	Probeta E-7018-150A.....	28
12	Dureza según esfuerzos en las probetas soldadas con electrodo E-6010.....	29
13	Dureza según esfuerzos en las probetas soldadas con electrodo E-6013.....	729
14	Dureza según esfuerzos en las probetas soldadas con electrodo E-7018.	30

## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA</b>		<b>PP</b>
1	Soldaduras Homogénea y Heterogénea. ....	12
2	Soldadura oxiacetilénica. ....	13
3	Soldadura por arco con electrodo revestido (SMAW).....	14
4	Soldadura GMAW. ....	15
5	Soldadura por arco sumergido. ....	16

<b>6</b>	Clasificación AWS de electrodos. ....	19
<b>7</b>	Electrodos para soldadura de aceros de baja aleación. ....	20
<b>8</b>	Tipo de corriente y revestimiento del electrodo.....	20
<b>9</b>	Material de aporte para procesos de soldadura con protección gaseosa (MIG/MAG, TIG y plasma). ....	23
<b>10</b>	Tipos de biseles (continuación)	28
<b>11</b>	Diagrama hierro-carbono. ....	28
<b>12</b>	Esquema Aceros Hipoeutectoides.....	29
<b>13</b>	Esquema Aceros Eutectoides. ....	29
<b>14</b>	Esquema Aceros Hipereutectoides.....	30
<b>15</b>	Clasificación de los Aceros al Carbono	34
<b>16</b>	Composición química del acero AISI 1010. ....	37
<b>17</b>	Discretización del dominio con diferentes elementos finitos. ....	44
<b>18</b>	Sistemas de referencia usados en el método de los elementos finitos. ....	46
<b>19</b>	Ejemplos de elementos finitos subparamétricos, isoparamétricos y superparamétricos .....	47
<b>20</b>	Coordenadas nodales (i, j, k) y desplazamientos de los nodos. ....	49
<b>21</b>	Ensayos de Tracción. ....	55
<b>22</b>	Ensayo de microdureza Vickers para probetas con electrodo E-6010.....	56
<b>23</b>	Gráfico ensayo de microdureza Vickers para probetas con electrodo E-6010. 56	
<b>24</b>	Ensayo de Microdureza Vickers para probetas con electrodo E-6013. ....	57
<b>25</b>	Gráfico ensayo de microdureza Vickers para probetas con electrodo E-6013 .57	
<b>26</b>	Ensayo de microdureza Vickers para probetas con electrodo E-7018.....	57

<b>27</b>	Gráfico ensayo de microdureza Vickers para probetas con electrodo E-7018.	58
<b>28</b>	Pantalla inicial de Autodesk Inventor 2015 .....	60
<b>29</b>	Pantalla inicial de Ansys Workbench 2018 .....	60
<b>30</b>	Medidas de una probeta para ensayos de tracción .....	61
<b>31</b>	Probeta en Autodesk Inventor 2015 .....	62
<b>32</b>	Probeta Importada en Ansys 2018 .....	62
<b>33</b>	Parámetros del Steady-State Thermal .....	63
<b>34</b>	Internal Heat Generation .....	64
<b>35</b>	Parámetros del Static Structural .....	65
<b>36</b>	Sección seleccionada para estudio de los esfuerzos equivalentes.....	66
<b>37</b>	Probeta E-6010-80A, esfuerzos equivalentes por zona.....	66
<b>38</b>	Probeta E-6010-100A, esfuerzos equivalentes por zona.....	67
<b>39</b>	Probeta E-6010-120A, esfuerzos equivalentes por zona.....	67
<b>40</b>	Probeta E-6013-80A, esfuerzos equivalentes por zona.....	68
<b>41</b>	Probeta E-6013-100A, esfuerzos equivalentes por zona.....	68
<b>42</b>	Probeta E-6013-120A, esfuerzos equivalentes por zona.....	69
<b>43</b>	Probeta E-7018-90A, esfuerzos equivalentes por zona.....	70
<b>44</b>	Probeta E-7018-120A, esfuerzos equivalentes por zona.....	70
<b>45</b>	Probeta E-7018-150A, esfuerzos equivalentes por zona.....	70
<b>46</b>	Procedimiento de selección en tabla propiedades mecánicas de los aceros al carbono según su dureza.....	72



REPUBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA  
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA INGENIERÍA MECÁNICA

## **ANÁLISIS DE EFECTOS QUE INFLUYEN EN UNA JUNTA SOLDADA DE ACERO AISI 1010 CON ELECTRODO REVESTIDO EMPLEANDO EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**

**Autores:** González, Francisco y Sousa, Walter

**Tutor:** Romanello, Donato

**Fecha:** septiembre 25 de 2017

### **RESUMEN**

Este trabajo de investigación se fundamentó en la manera en que influye el revestimiento del electrodo en el proceso de generación discontinuidades y defectos en la soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido SMAW a través de una simulación utilizando el método de elementos finitos. En primera instancia se procedió a realizar los modelos numéricos a través de un software comercial, luego de esto se ratificó que configuración conlleva a menos defectos en la soldadura, utilizando tres tipos de electrodos distintos los cuales a su vez se trabajó con tres intensidades de corrientes distintas. Los electrodos seleccionados fueron el E-6010 (80A, 100A, 120A), el E-6013 (80A, 100A, 120A) y el E-7018(90A, 120A, 150A) Más adelante se procedió a realizar una comparación de los resultados obtenidos y tabulados, con los resultados experimentales obtenidos a través de ensayos de rayos X, tracción, doblado y metalografía para así tener certeza de que tan preciso pudo llegar a ser el software con respecto a los ensayos destructivos.

**Descriptores:** Simulación, elementos finitos, modelo numérico, software, uniones soldadas.

## INTRODUCCIÓN

En la fabricación de estructuras es necesario la unión permanente de piezas metálicas, en numerosas circunstancias se utiliza la soldadura por arco eléctrico que se describe como la creación y sostenimiento de un arco eléctrico entre varilla recubierta llamada electrodo y la pieza a soldar. En este tipo de soldadura, denominada SMAW (Shield Metal Arc Welding) por sus siglas en inglés, suelen generarse ciertos defectos no deseados como la formación de porosidades, grietas, inclusiones, estos pueden originarse en el tipo de electrodos utilizados, o por las deformaciones producidas por el intenso calor aportado y las anomalías o discontinuidades del cordón, que pueden malograr el aspecto y configuración tanto interna como externa de la soldadura presencia de humedad, los metales de aportación están contaminados, la presencia de gases, aceite o pintura en el metal a soldar, y una característica fundamental la cual será el enfoque de esta investigación como lo es el revestimiento del electrodo y su relación con la formación de discontinuidades en soldaduras de acero estructural

El estudio y la evaluación de estas tensiones y deformaciones residuales sobre muestras de componentes reales soldados, supone un elevado coste debido sobre todo al material ensayado (material base y material del cordón). Una forma de reducir este coste y mejorar la técnica de soldadura SMAW prediciendo la aparición de estas discontinuidades y defectos, es mediante la utilización de modelos que recreen virtualmente el proceso de soldeo. Uno de los modelos que más se suele utilizar en la mejora de procesos de fabricación de cualquier componente mecánico, son los modelos basados en el Método de los Elementos Finitos (MEF) En este trabajo, se muestra el desarrollo y ajuste de un modelo de elementos finitos soldadura SMAW sobre dos placas de acero y trabajando con distintos tipos de electrodos a distintas intensidades de corriente.

Con esta investigación se pretende relacionar la generación de discontinuidades y defectos con la selección correcta de parámetros de soldadura y de electrodos tomando como material base una lámina de acero estructural AISI 1010, mediante un modelo

matemático que ayude a contemplar cual opción es más viable a la hora de escoger los parámetros de la soldadura sin incurrir en gastos.

Es necesario resaltar que la investigación será expuesta en cuatro capítulos, en el Capítulo I se plantea y formula el problema y los objetivos de la investigación, los cuales están dirigidos a evaluar la influencia que tiene el revestimiento del electrodo y la generación de discontinuidades y defectos en el cordón de soldadura sobre el acero estructural AISI 1010 con soldadura SMAW, utilizando el método de simulación de elementos finitos.

En el Capítulo II se presentan las bases teóricas y prácticas relacionadas con el trabajo de investigación.

En el Capítulo III se describe la metodología realizada con el fin de lograr los objetivos propuestos.

En el Capítulo IV se tienen los resultados y el desarrollo propiamente de las fases estipuladas en el capítulo anterior donde se muestra los esfuerzos equivalentes por cada zona, los cambios que pueden existir al variar el tipo de electrodo o simplemente el amperaje, la mayor resistencia a la tracción por probeta y hasta donde es capaz de llegar el software en los procesos de simulación de soldadura.

# CAPÍTULO I

## EL PROBLEMA

### 1.1 Planteamiento del problema

Muchos de los problemas que un ingeniero puede encontrarse en su labor habitual pueden caracterizarse por sistemas más o menos complejos expresados en modelos matemáticos en los que intervienen un conjunto de parámetros, un método muy conocido para resolver, analizar, investigar comportamientos en soldaduras es por el método de análisis de elementos finitos donde permite resolver casi cualquier situación física que pueda formularse bajo un sistema de ecuaciones diferenciales.

Utilizando el método de elementos finitos FEA por sus siglas en inglés, para una junta soldada de Acero AISI 1010 con electrodo revestido, utilizando como referencia el trabajo de grado de los autores Fajardo Javier y Santo Gilberto titulada “Influencia del Tipo de Revestimiento del Electrodo Sobre la Sensibilidad al Agrietamiento en Caliente de una Junta Soldada de Acero AISI 1010” en la universidad José Antonio Páez, se analizó el comportamiento que se obtuvo según las variables del proceso, prediciendo así el comportamiento de dicha junta sin realizar ensayos destructivos y obteniendo resultados que fueron comparados con resultados experimentales previos y así estudiar y optimizar el proceso de soldadura.

En la actualidad, el campo de la soldadura por arco eléctrico se ha desenvuelto en el desarrollo de nuevos procesos y consumibles que den como resultado mejores propiedades y mayor productividad, en un contexto más amigable con el medio ambiente, Dentro de este tipo de soldadura tenemos la SMAW (Shield Metal Arc Welding) el cual utiliza un electrodo revestido con un material compuesto por distintos elementos que ayudan a que el cordón no se contamine por agentes externos presentes en el ambiente.

Para este proceso de soldadura es importante seleccionar de manera correcta todas variables del proceso, como lo es el electrodo; el cual debe ser seleccionado según el material a soldar, el amperaje, la velocidad de desplazamiento, la polaridad y el tipo de corriente. De no realizar una buena elección las variables mencionadas anteriormente, se pueden crear en la soldadura discontinuidades como lo son las inclusiones, las porosidades, y las Grietas tanto en el material base, como en el cordón mismo.

Las grietas son las más perjudiciales de todas, ya que no son aceptables, es decir, no existe tolerancia. Las grietas en una soldadura, o en la proximidad de una soldadura, indican que el proceso no fue llevado a cabo de la manera correcta y deben ser tratados con urgencia. Un análisis cuidadoso de las características de la grieta hará que sea posible determinar la causa y tomar las medidas correctivas más satisfactorias.

El agrietamiento en la soldadura se produce cerca o durante el momento de la fabricación. Las grietas en calientes son las que ocurren a temperaturas elevadas y son por lo general relacionadas con la solidificación, y las grietas en frío son aquellas que se producen después de que el metal de soldadura se ha enfriado a temperatura ambiente y tienen que ver generalmente con el hidrógeno. Ninguna de ellas es resultado de operaciones en servicio, a su vez las grietas también se pueden clasificar por su dirección, estas pueden ser transversales o longitudinales.

Con esto se determinó en esencia cómo influye en la zona afectada las variables del proceso de soldadura, para obtener una mejor calidad de unión entre el acero AISI 1010 y poder establecer correlaciones en cada caso a estudiar, que permita optimizar y tener mayor criterio a la hora de saber qué decisión tomar cuando se desee seleccionar electrodos, amperaje, tener en cuenta las ventajas que estos ofrecen para el acero de trabajo y poder evitar las posibles grietas que puedan presentarse

## **1.2 Formulación del problema**

¿Cómo afecta en las juntas de soldadura la composición química del revestimiento de los electrodos en el proceso de soldadura SMAW?

### **1.3 Objetivos de la investigación:**

#### **1.3.1 Objetivo general.**

Analizar los efectos que influyen en una junta soldada de acero AISI 1010 con electrodo revestido empleando el método de elementos finitos.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos.**

1. Estudiar de forma detallada los resultados experimentales obtenidos previamente.
2. Crear modelos numéricos usando un software comercial y análisis de los respectivos resultados
3. Analizar por medio de una simulación que configuración conlleva a mayores esfuerzos en el cordón de soldadura sobre el Acero AISI 1010
4. Verificar mediante el software los resultados obtenidos con resultados experimentales previos.

### **1.4 Justificación de la investigación.**

Debido al gran número de procesos en los cuales se encuentran uniones soldadas, surge la necesidad de disponer información respecto al comportamiento mecánico y metalúrgico del acero AISI 1010 cuando se realizan uniones por el método de soldadura SMAW y a su vez comparar dichas propiedades, para definir criterios al momento de estudiar el proceso que se utilizó con este tipo de material.

La necesidad de estudiar la influencia que tienen las variables de la soldadura sobre el acero AISI 1010 mediante un software, se ha desarrollado con la finalidad de tener un mejor acabado, mejores propiedades, bajo costo y una microestructura óptima, es decir, una mejor calidad de soldadura en menos tiempo, sobre todo en las industrias con procesos que son de gran riesgo, como lo es la industria petrolera, esto conllevaría a ensayos computarizados que aseguraran una alta confiabilidad de la soldadura y evitando dentro de lo posible las discontinuidades que pueden convertirse en defectos.

La finalidad es demostrar los esfuerzos que sufren las probetas en las diferentes zonas de la misma mediante el software, determinando que parámetros para cada electrodo se consiguen mayores esfuerzos.

### **1.5 Limitaciones.**

El tiempo de investigación está estipulado en ocho meses, sin embargo, en el transcurso del desarrollo de la investigación pueden surgir nuevas variables que tiendan a extender este período de investigación. En la presente investigación se pueden presentar algunas condiciones y restricciones que limiten su desarrollo satisfactorio y correcto

### **1.6 Alcance.**

En el presente estudio se utilizó un proceso de soldadura SMAW en un software de simulación con diferentes variables a tomar en cuenta en aceros AISI 1010, comparando los modelos de la investigación con los resultados obtenidos experimentalmente y verificar estos resultados mediante el uso del método de elementos finitos.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Antecedentes.

Los antecedentes reflejan los avances y el estado actual del conocimiento en un área determinada y sirven de modelo o ejemplo para futuras investigaciones, en este caso la sustentación teórica de la investigación es fundamentada bajo la recopilación de investigaciones realizadas en la posteridad y que se desenvuelven en el ámbito de la simulación y la soldadura. La finalidad es hallar la relación existente entre los trabajos y la investigación desarrollada.

A continuación, se presentan autores que efectuaron un análisis o proyectos relacionados:

Calderón Williams y Sepúlveda Aquiles (2010) en su trabajo **“Modelación del Proceso de Soldadura por Medio del Método de Elementos Finitos”** en la Universidad de Chile, señala desarrollar una metodología para modelación del proceso de soldadura al arco por medio de elementos finitos en una geometría plana 2D, plana 3D y un cilindro. El modelo involucrara: el movimiento de una fuente de calor que simule de forma aproximada el efecto de la soldadura, propiedades termodependientes del material, transferencia de calor transitoria, estados tensionales y estado de deformaciones. La realización de la simulación se logró utilizando el software comercial COMSOL Multiphysics en su versión 3.5a. Con este software se realizó desde la elaboración de la geometría, pasando por el análisis hasta el post-procesamiento de los resultados. Además, para otorgar las propiedades de comportamiento esfuerzo-deformación en función de la temperatura fue necesaria la utilización del software Matlab 6.5. En conclusión, fue posible aproximar el proceso de soldadura respecto a su comportamiento térmico como mecánico en geometrías planas tanto bidimensional como tridimensional. Los modelos incluyen la integración de distintas propiedades para los materiales, ya sea con información obtenida por medio de tablas o

funciones. Además fue posible la reproducción de distintas fuentes de calor como aproximación al efecto de la soldadura, las cuales variaron desde funciones simples dependientes de una variable (t), hasta funciones complejas dependiente de hasta cuatro variables (x, y, z, t)

Por otra parte Rodríguez Adrián Martín (2011) realizó un trabajo de grado titulado **“Simulación Mediante el Método de los Elementos Finitos de una Estructura Metálica”** en la Universidad Carlos III de Madrid, cuyo objetivo es el análisis de una estructura real mediante el método de los elementos finitos. El programa de elementos finitos que se ha usado para este análisis es el programa de simulación ANSYS. En este análisis de la estructura, se va a comprobar si se cumplen los distintos parámetros de diseño que se establecen en la normativa, de igual manera, se concluyó que los modelos de elementos finitos son útiles para resolver una gran cantidad de problemas de ingeniería independientemente de su carácter. En este caso el problema a resolver ha sido la resolución de distintas simulaciones estáticas de estructuras. Cada uno de estos problemas o simulaciones ha supuesto distintos modos de resolución y de diseño, los cuales nos han aportado una gran cantidad de resultados, que deberá ser siempre interpretada por alguien con los suficientes conocimientos como para que esa información que nos aporta el modelo sea útil.

A su vez Valentín Rubén, Barragán Carlos y Aragón María (2012) realizaron su tesis de grado titulada **“Modelado por el Método de los Elementos Finitos de un cordón de soldadura MAG”** en la Universidad de la Rioja Pedro Villanueva-Roldán de Navarra, cuyo objetivo es evaluar las tensiones y deformaciones residuales sobre probetas soldadas. El ajuste del modelo de elementos finitos (modelo FE) del proceso de soldadura MAG se basó en los datos obtenidos de ensayos reales. En este caso, estos datos fueron la distribución de temperaturas en una serie de puntos de la unión durante el proceso de soldadura y las deformaciones producidas por la contracción del metal de aportación una vez soldadas y enfriadas las piezas. Conforme a este criterio, se eligió una unión soldada a tope formada por dos placas de acero apoyadas en una superficie refractaria. El material elegido para las placas fue el de un acero al carbono de tipo St.37-2 y las dimensiones de

éstas fueron de 30 mm de anchura, 50 mm de longitud y 6 mm de espesor. Así mismo, en uno de los laterales de estas placas se realizó un chaflán a 45° hasta la mitad de su espesor con el objetivo de facilitar la penetración del cordón de soldadura. En conclusión se muestra el ajuste y validación de un modelo FE de un único cordón de soldadura MAG en base a las temperaturas registradas durante el proceso de soldeo y al ángulo final formado por las placas soldadas, empleando técnicas basadas en GA. En el apartado de resultados se aprecia como las temperaturas y el ángulo final obtenido del modelo FE se aproxima con gran precisión a los resultados obtenidos experimentalmente. A pesar de ser un modelo FE sencillo, puede ser la base para estudiar nuevas uniones soldadas de geometrías mucho más complejas, como uniones en T o uniones de otro tipo.

Por último Buendía Guía Juan Francisco (2013) en su tesis de maestría titulado **“Predicción de la Vida Útil de Elementos Estructurales Sometidos a Fatiga Fabricados con Aceros Trip, Unidos Mediante el Proceso de Soldadura por Arco GMAW para su Aplicación en la Industria Automotriz”** en la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales, cuyo objetivo es predecir la resistencia a la fatiga de una unión de soldadura a traslape de aceros avanzados de alta resistencia de plasticidad inducida por transformación, siendo comparado y validado con la realización de pruebas reales, se logró mediante la revisión del estado del arte de los métodos de: predicción de fatiga, metal base, proceso de soldadura, pruebas de fatiga en uniones soldadas, la simulación y resolución de ecuaciones para la predicción de ciclos de vida para la iniciación y la propagación de la grieta

En conclusión Todas las fracturas en las probetas se localizaron al pie de la soldadura, esto debido principalmente a la geometría y a su mayor concentración de esfuerzos en la zona de fractura, la microestructura a pesar de tener cambios importantes, para este estudio no se considera de mayor importancia debido a que no hubo un cambio significativo de esta en las diferentes probetas y que los esfuerzos no se aproximaban a los límites de cedencia del material para el caso de bajo esfuerzo alto ciclo

## **2.2 Bases Teóricas**

### **2.2.1 Soldadura**

La Soldadura es un procedimiento por el cual dos o más piezas de metal se unen por aplicación de calor, presión, o una combinación de ambos, con o sin aporte de otro metal, llamado metal de aportación, cuya temperatura de fusión es inferior a la de las piezas que han de soldarse.

Los procesos de soldadura aplicados a la industria se realizan en función de cómo los metales de relleno son alimentados en la soldadura. De esta manera, se consigue un charco de material fundido que, al enfriarse, se convierte en un empalme sólido y fuerte. Para el proceso de soldadura se pueden utilizar fuentes de energía diferentes: una llama de gas, un arco eléctrico, un láser, un rayo de electrones o procesos de fricción con ultrasonidos. La energía necesaria para unir dos piezas de metal generalmente proviene de un arco eléctrico. Al ser una parte de algún proceso industrial, la soldadura puede realizarse en ambientes distintos: al aire libre, bajo el mar o en el espacio. Como se trata de una técnica con cierto peligro, es imprescindible adoptar medidas de seguridad para evitar quemaduras, descargas eléctricas o la sobreexposición a la luz ultravioleta.

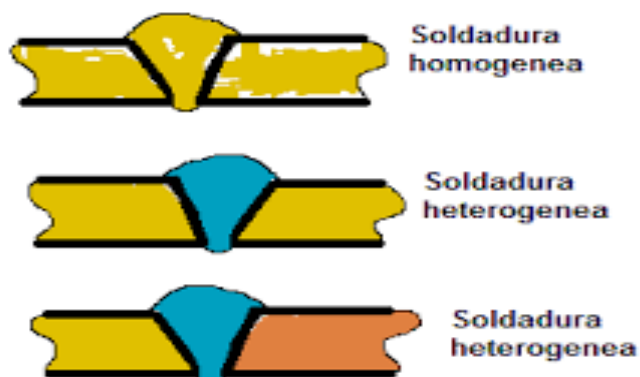
Los efectos de la soldadura resultan determinantes para la utilidad del material soldado. El metal de aportación y las consecuencias derivadas del suministro de calor pueden afectar a las propiedades de la pieza soldada. Deben evitarse porosidades y grietas añadiendo elementos de aleación al metal de aportación, y sujetando firmemente las piezas que se quieren soldar para evitar deformaciones. También puede suceder que la zona afectada por el calor quede dura y quebradiza. Para evitar estos efectos indeseables, a veces se realizan precalentamientos o tratamientos térmicos posteriores. Por otra parte, el calor de la soldadura causa distorsiones que pueden reducirse al mínimo eligiendo de modo adecuado los elementos de sujeción y estudiando previamente la secuencia de la soldadura.

El fisuramiento en caliente puede ocurrir como efecto de la contracción térmica, característica de cualquier proceso de soldadura que involucre calentamiento o enfriamiento

localizado, por la falta de ductilidad del metal a temperaturas elevadas como para soportar dichas tensiones.

Matemáticamente la variación del calor aportado durante la soldadura se debe a la variación de voltaje, intensidad de corriente y velocidad de pasada, el cual se puede determinar mediante la ecuación recomendada por la ASME SECCIÓN IX QW-409.1, donde definen al calor como:

$$Q = \frac{V \times I \times 60}{S \times 1000} \times$$

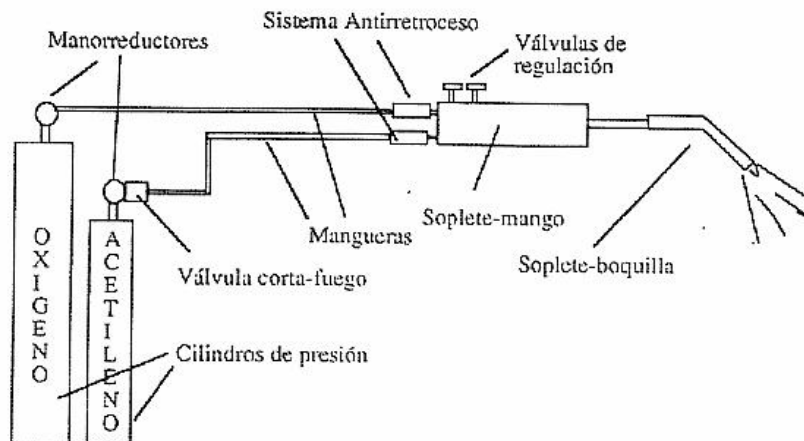


**Figura 1:** Soldaduras Homogénea y Heterogénea.

**Fuente:** Tipos de Soldadura, colegio tabasco

**Soldadura por presión.** La soldadura en frío es un tipo de soldadura donde la unión entre los metales se produce sin aportación de calor. Puede resultar muy útil en aplicaciones en las que sea fundamental no alterar la estructura o las propiedades de los materiales que se unen. Se puede realizar de las siguientes maneras: Por presión en frío o en caliente. Consiste en limpiar concienzudamente las superficies que hay que unir, y, tras ponerlas en contacto, aplicar una presión sobre ellas hasta que se produzca la unión. Por fricción. Se hace girar el extremo de una de las piezas y, después se pone en contacto con la otra. El calor producido por la fricción une ambas piezas por deformaciones plásticas.

**Soldadura por gas.** La soldadura por gas o con soplete utiliza el calor de la combustión de un gas o una mezcla gaseosa, que se aplica a las superficies de las piezas y a la varilla de metal de aportación. Este sistema tiene la ventaja de ser portátil ya que no necesita conectarse a la corriente eléctrica. Según la mezcla gaseosa utilizada se distingue entre oxiacetilénica (oxígeno/acetileno) (Ver figura 2), y oxhídrica (oxígeno/hidrógeno), entre otras. En la soldadura oxiacetilénica, el calor aportado se debe a la reacción de combustión de acetileno ( $C_2H_2$ ) que resulta ser fuertemente exotérmica, pues se alcanzan temperaturas del orden de los  $3500\text{ }^\circ\text{C}$ .



**Figura 2:** Soldadura oxiacetilénica.

**Fuente:** Escuela Politécnica Nacional de Quito, Escuela de Ingeniería Mecánica.

**Soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido.** El proceso de electrodo revestido (Manual), identificado por la AWS como SMAW (Shield Metal Arc Welding), es un proceso de soldadura por arco eléctrico entre un electrodo revestido y un metal base.

El arco produce una temperatura aproximadamente de 3500°C en la punta del electrodo, superior a la necesaria para fundir la mayoría de los metales. El calor funde el metal base y el electrodo revestido, de esta manera se genera una pileta líquida o baño de fusión, que va solidificando a medida que el electrodo se mueve a lo largo de la junta.

En la soldadura de electrodos revestidos el amperaje queda fijado por el diámetro del electrodo y tipo de revestimiento, el voltaje por la longitud del arco. (Ver figura 3).

Las funciones que cumple el revestimiento son las siguientes:

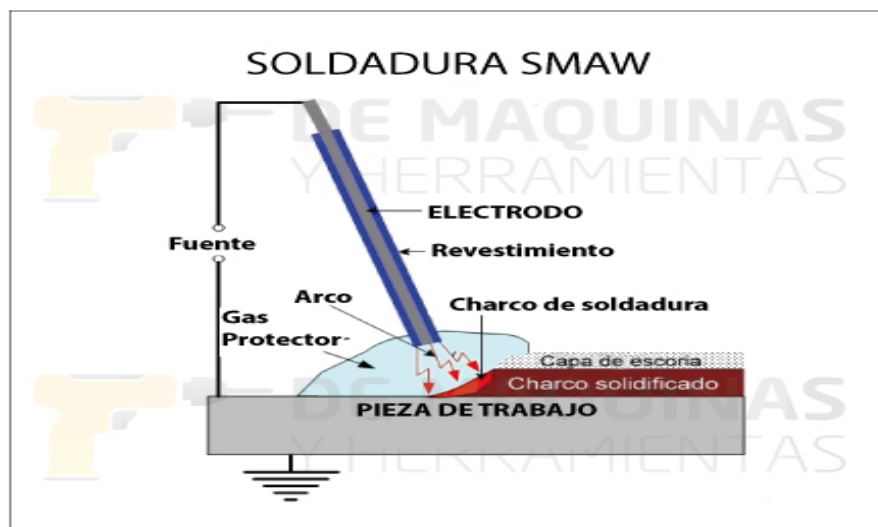
Protección del metal fundido a través de la generación de gas, de la escoria, provee desoxidantes, provee elementos de aleación, facilita el inicio del arco y su estabilidad, determina la forma del cordón y su penetración, establece la posición de soldadura, transmite mayor o menor calor y determina la viscosidad y fusión de la escoria.

El factor principal que hace de este proceso de soldadura un método tan útil es su simplicidad y, por lo tanto, su bajo precio. A pesar de la gran variedad de procesos de soldadura disponibles, la soldadura con electrodo revestido no ha sido desplazada del

mercado. La sencillez hace de ella un procedimiento práctico; todo lo que necesita un soldador para trabajar es una fuente de alimentación, cables, un porta electrodo y electrodos. El soldador no tiene que estar junto a la fuente y no hay necesidad de utilizar gases comprimidos como protección. El procedimiento es excelente para trabajos, reparación, fabricación y construcción.

Además, la soldadura SMAW es muy versátil. Su campo de aplicaciones es enorme: casi todos los trabajos de pequeña y mediana soldadura de taller se efectúan con electrodo revestido; se puede soldar metal de casi cualquier espesor y se pueden hacer uniones de cualquier tipo.

Sin embargo, el procedimiento de soldadura con electrodo revestido no se presta para su automatización o semi-automatización; su aplicación es esencialmente manual. La longitud de los electrodos es relativamente corta: de 230 a 700 mm. Por lo tanto, es un proceso principalmente para soldadura a pequeña escala. El soldador tiene que interrumpir el trabajo a intervalos regulares para cambiar el electrodo y debe limpiar el punto de inicio antes de empezar a usar electrodo nuevo. Sin embargo, aún con todo este tiempo muerto y de preparación, un soldador eficiente puede ser muy productivo.

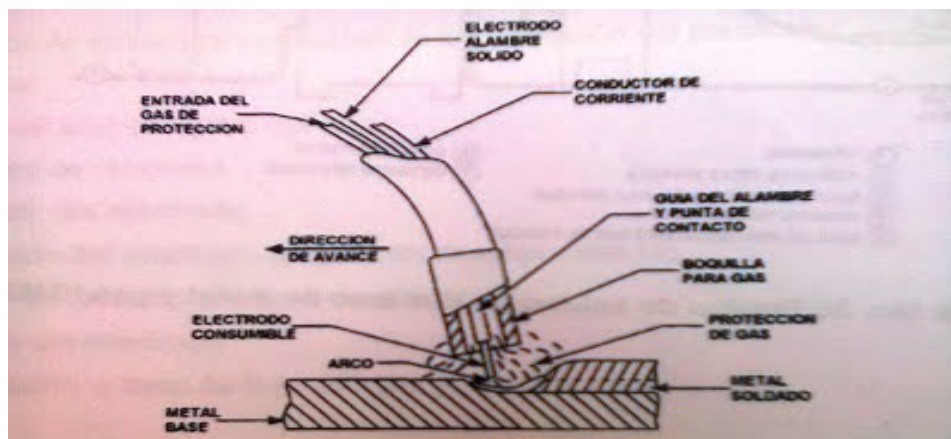


**Figura 3:** Soldadura por arco con electrodo revestido (SMAW).

Fuente: Escuela Politécnica Nacional de Quito, Escuela de Ingeniería Mecánica.

**Soldadura por arco eléctrico con protección gaseosa.** Es la que utiliza un gas para proteger la fusión del aire de la atmósfera. Según la naturaleza del gas utilizado se distingue entre soldadura MIG, si utiliza gas inerte, y soldadura MAG, si utiliza gas activo, también llamada GMAW. Los gases inertes utilizados como protección suelen ser argón y helio, los gases activos suelen ser mezclas con dióxido de carbono. El proceso se basa en la alimentación de un electrodo continuo consumible que se protege mediante un gas de procedencia externa. Los únicos controles manuales que el soldador requiere para la operación semiautomática son los de velocidad y dirección de desplazamiento, así como también el posicionamiento de la pistola.

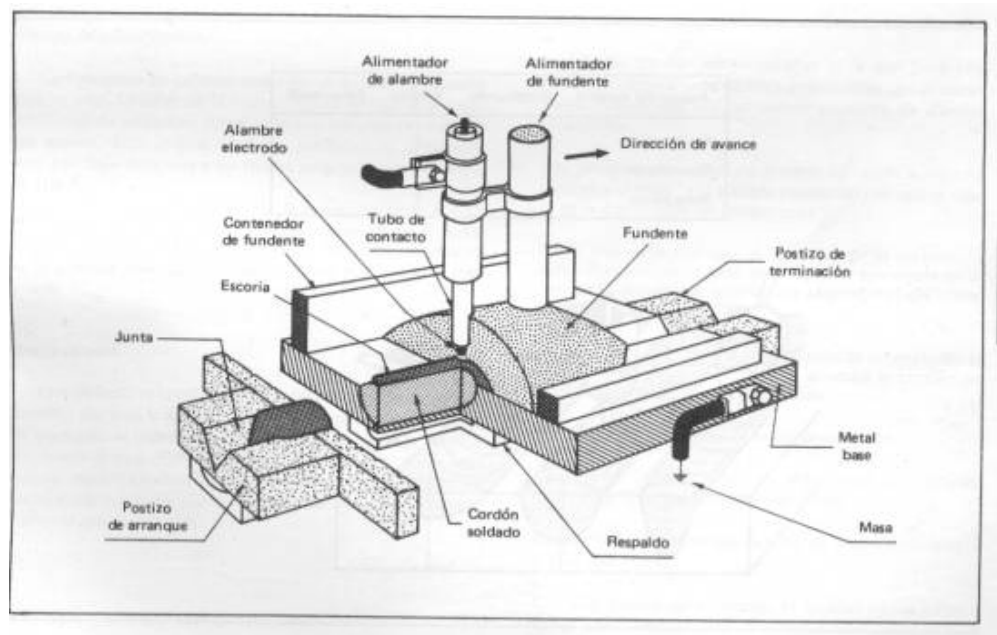
Los componentes básicos del equipo son la unidad de pistola soldadora y cables, la unidad de alimentación del electrodo, la fuente de potencia y la fuente de gas protector. Este proceso puede ser usado con la mayoría de los metales comerciales, incluyendo aceros al carbono, aleaciones, aceros inoxidable, aluminio, magnesio, cobre, hierro, titanio y zirconio. Es el proceso preferido para la soldadura de aluminio, magnesio, cobre y muchas de las aleaciones de metales reactivos. La mayoría de los hierros y aceros de baja aleación pueden ser satisfactoriamente unidos por este proceso de soldadura. La soldadura puede ser semiautomática, usando una pistola por la cual el electrodo es alimentado automáticamente, o usando equipo totalmente automático. (Ver figura 4).



**Figura 4: Soldadura GMAW.**

**Fuente:** Escuela Politécnica Nacional de Quito, Escuela de Ingeniería Mecánica.

**Soldadura por arco sumergido.** Este es un proceso en el cual el calor es aportado por un arco eléctrico generado entre uno o más electrodos y la pieza de trabajo. El arco eléctrico está sumergido en una capa de fundente granulado que lo cubre totalmente protegiendo el metal depositado durante la soldadura. Se puede emplear varios electrodos de alambre desnudo y el polvo sobrante se utiliza de nuevo, por lo que es un procedimiento muy eficaz. Una ventaja de este proceso es que, estando el arco completamente encerrado, pueden utilizarse intensidades de corriente extremadamente elevadas sin chisporroteo o arrastre de aire. Las intensidades elevadas producen una penetración profunda y el proceso es térmicamente eficiente, puesto que la mayor parte del arco está bajo la superficie de la plancha, en este proceso de alta dilución, aproximadamente se funde dos veces más metal base que electrodo. (Ver figura 5).



**Figura 5:** Soldadura por arco sumergido.

**Fuente:** Universidad Tecnológica Nacional de Argentina.

**Soldadura aluminotérmica.** El calor necesario para este tipo de soldadura se obtiene de la reacción química de una mezcla de óxido de hierro con partículas de aluminio

muy finas. El metal líquido resultante constituye el metal de aportación. Se emplea para soldar roturas y cortes en piezas pesadas de hierro y acero, y es el método utilizado para soldar rieles de trenes.

La temperatura teórica para producir la reacción es de 3100°C, sin embargo por la adición de compuestos no reactivos, la pérdida de calor por conducción y radiación, la temperatura se reduce a unos 2480 °C. La cual se considera cercana a la máxima tolerable, ya que el aluminio se evapora a 2500 °C, no obstante esta reducción en la temperatura debe regularse, la escoria de aluminio solidifica a los 2040 °C. Para mejorar el proceso se pueden adicionar ferroaleaciones compatibles a la química de las piezas a soldar, ya sea para aumentar la fluidez o para disminuir la temperatura de solidificación de la escoria.

**Soldadura por arco en atmósfera inerte.** Este procedimiento se basa en aislar el arco y el metal fundido de la atmósfera, mediante un gas inerte (helio, argón, hidrógeno, anhídrido carbónico, etc.). Existen varios procedimientos: Con electrodo refractario (método TIG). El arco salta entre el electrodo de Wolframio o tungsteno (que no se consume) y la pieza, el metal de aportación es una varilla sin revestimiento de composición similar a la del metal base. Con electrodo consumible (método MIG y MAG). Aquí se sustituye el electrodo refractario de wolframio por un hilo de alambre continuo y sin revestimiento que se hace llegar a la pistola junto con el gas. Según sea el gas así recibe el nombre, (MIG = Metal Inert Gas) o MAG si utiliza anhídrido carbónico que es más barato.

**Soldadura por resistencia.** Para este tipo de soldadura las temperaturas de las partes a unir y del metal de aporte se puede lograr por medio de resistencia a la corriente (puntos), por inducción (costura) o por arco eléctrico. En los tres métodos el calentamiento se da por el paso de la corriente entre las piezas metálicas a unir. Para cada tipo se usa un tipo de máquina diferente. Soldadura por puntos: las piezas (generalmente chapas) quedan soldadas por pequeñas zonas circulares aisladas y regularmente espaciadas que debido a su relativa pequeñez se denomina puntos. Soldadura por costura: la soldadura eléctrica por costura se basa en el mismo principio que la soldadura por puntos, pero en este caso las

puntas de los electrodos se sustituyen por rodillos, entre los cuales y presionadas por el borde de estos, pasan las piezas a soldar.

### **2.2.3 Electroodos**

Son dispositivos que conducen electricidad y que también pueden actuar como metal de soporte. En la soldadura por arco se emplea el electrodo como un polo del circuito eléctrico y en su extremo se genera el arco eléctrico. En algunos tipos de electrodo, se utiliza también como material fundente. El electrodo es una varilla metálica que suele ir recubierta de diferentes materiales. Estos materiales de recubrimiento dependen del tipo de soldadura que se requiera realizar. Las funciones pueden ser: función eléctrica para conseguir una buena ionización, función física para facilitar la formación de cordón de soldadura y función metalúrgica para conseguir propiedades contra la oxidación.

#### **2.2.3.1 Clasificación de los electrodos.**

La AWS y la ASME son las máximas autoridades en el mundo de la soldadura que dictan las normas de clasificación de los electrodos para soldadura eléctrica más reconocidas internacionalmente.

La especificación AWS A5.1, que se refiere a los electrodos para soldadura de aceros al carbono, trabaja con la siguiente designación para electrodos revestidos: E XXYZ – 1HZR, donde, E indica que se trata de un electrodo para soldadura eléctrica manual, XX son dígitos (o tres si se trata de un numero de electrodo de cinco dígitos) que designan la mínima resistencia a la tracción, sin tratamiento térmico post soldadura, del metal depositado en Ksi (Kilo libras/*pulgadas*<sup>2</sup>), por ejemplo, E 60XX indica 62.000 lbs/*pulg*<sup>2</sup> mínimo. Y el tercer digito indica la posición en la que se puede soldar satisfactoriamente con el electrodo en cuestión. Así si vale 1 (por ejemplo, E6011) significa que el electrodo es apto para soldar en todas posiciones (plana, vertical, techo y horizontal), 2 si sólo es aplicable para posiciones planas y horizontal; y si vale 4 (por ejemplo E 7048) indica que el electrodo es conveniente para posición plana, pero especialmente apto para vertical descendente. Z, el último dígito, que está íntimamente relacionado con el anterior, es indicativo del tipo de corriente eléctrica y polaridad en la que mejor trabaja el electrodo, e

identifica a su vez el tipo de revestimiento, el que es calificado según el mayor porcentaje de materia prima contenida en el revestimiento. Por ejemplo, el electrodo E 6010 tiene un alto contenido de celulosa en el revestimiento, aproximadamente un 30% o más, por ello a este electrodo se le califica como un electrodo tipo celulósico.

Por otro lado, los códigos para designación que aparecen después del guion son opcionales e indican lo siguiente: **1**, designa que el electrodo (E 7016, E 7018 ó E 7024) cumple con los requisitos de impacto mejorados E y de ductilidad mejorada en el caso E 7024, **HZ** indica que el electrodo cumple con los requisitos de la prueba de hidrógeno difusible para niveles de "Z" de 4.8 ó 16 ml de H<sub>2</sub> por 100gr de metal depositado (solo para electrodos de bajo hidrógeno), **R** indica que el electrodo cumple los requisitos de la prueba de absorción de humedad a 80°F y 80% de humedad relativa (sólo para electrodos de bajo hidrógeno). (Ver figura 6).

Última cifra	Tipo de corriente	Tipo de Revestimiento	Tipo de Arco	Penetración
E XX10	CCPI Polaridad inversa	Orgánico <sup>(1)</sup>	Fuerte	Profunda <sup>(2)</sup>
E XX11	CA ó CCPI Polaridad inversa	Orgánico	Fuerte	Profunda
E XX12	CA ó CCPD Polaridad directa	Rutilo	Mediano	Mediana
E XX13	CA ó CC Ambas polaridades	Rutilo	Suave	Ligera
E XX14	CA ó CCPI Polaridad inversa	Rutilo	Suave	Ligera
E XX15	CCPI Polaridad inversa	Bajo Hidrógeno	Mediano	Mediana
E XX16	CA ó CCPI Polaridad inversa	Bajo Hidrógeno	Mediano	Mediana
E XX17	CCPI Polaridad inversa	Bajo Hidrógeno	Suave	Mediana
E XX18	CA ó CCPI Polaridad inversa	Bajo Hidrógeno	Mediano	Mediana

**Figura 6:** Clasificación AWS de electrodos.

**Fuente:** American Welding Society.

La especificación AWS A5.5. Que se aplica a los electrodos para soldadura de aceros de baja aleación utiliza la misma designación de la AWS A5.1. Con excepción de los

códigos para designación que aparecen después del guion opcionales. En su lugar, utiliza sufijos que constan de una letra o de una letra y un número (por ejemplo A1, B1, B2, C1, G, M, etc.), los cuales indican el porcentaje aproximado de aleación en el depósito de soldadura. (Ver Figura 7).

A1	0.5% Mo
B1	0.5% Cr, 0.35% Mo
B2	1.25% Cr, 0.5% Mo
B3	2.25% Cr, 1.0% Mo
B4	2.0% Cr, 0.5% Mo
B5	0.5% Cr, 1.0% Mo
C1	2.5% Ni
C2	3.25% Ni
C3	1.0% Ni, 0.35% Mo, 0.15% Cr
D1 y D2	0.25-0.45% Mo, 1.75% Mn
G(*)	0.5% mín. Ni, 0.3% mín. Cr, 0.2% mín Mo, 0.1% mín. V, 1.0% mín Mn

**Figura 7:** Electrodo para soldadura de aceros de baja aleación.

Fuente: American Welding Society.

A continuación se adjunta una tabla resumen donde se indica el tipo de corriente y revestimiento del electrodo según la norma AWS: (Ver figura 8)

Clasificación AWS	Tipo de Revestimiento	Posición de soldeo	Corriente eléctrica
E 6010	Alta celulosa, sodio	F, V, OH, H	CC (+)
E 6011	Alta celulosa, potasio	F, V, OH, H	CA ó CC(+)
E 6012	Alto titanio, sodio	F, V, OH, H	CA, CC (-)
E 6013	Alto titanio, potasio	F, V, OH, H	CA, CC (+) ó CC (-)
E 6020	Alto óxido de hierro	H-Filete	CA, CC (-)
E 6020	Alto óxido de hierro	F	CA, CC (+) ó CC (-)
E 7014	Hierro en polvo, titanio	F, V, OH, H	CA, CC (+) ó CC (-)
E 7015	Bajo hidrógeno, sodio	F, V, OH, H	CC (+)
E 7016	Bajo hidrógeno, potasio	F, V, OH, H	CA ó CC (+)
E 7018	Bajo hidrógeno, potasio, hierro en polvo	F, V, OH, H	CA ó CC (+)
E 7018M	Bajo hidrógeno, hierro en polvo	F, V, OH, H	CC (+)
E 7024	Hierro en polvo, titanio	H-Filete, F	CA, CC (+) ó CC (-)
E 7027	Alto óxido de hierro, hierro en polvo	H-Filete	CA, CC (-)
E 7027	Alto óxido de hierro, hierro en polvo	F	CA, CC (+) ó CC (-)
E 7028	Bajo hidrógeno, potasio	H-Filete, F	CA ó CC (+)
E 7028	Hierro en polvo		
E 7048	Bajo hidrógeno, potasio	F, V, OH, H	CA ó CC (+)
E 7047	Hierro en polvo	F, V, OH, HV- Descendente	

**Figura 8:** Tipo de corriente y revestimiento del electrodo.

Fuente: American Welding Society.

La especificación AWS A5.4 dicta las normas de clasificación de electrodos para soldar aceros inoxidable. Como los casos anteriores, el sistema de clasificación de estos electrodos también es numérico, como muestras de clasificación de estos tipos de electrodos son, por ejemplo, E 308-15, ó E 310-16. Antes de entrar en la explicación del sistema, es conveniente resaltar que los aceros inoxidable sean identificados de acuerdo a lo que indica la AISI. Así por ejemplo, el acero inoxidable AISI 310 corresponde a un acero cuya composición química es del 25% de Cr y el 20% de Ni, entre sus elementos principales.

La especificación AWS A5.4, que se refiere a los electrodos para soldadura de aceros inoxidable, trabaja con la siguiente designación para electrodos revestidos: **EXX-YZ**, **E** indica que se trata de un electrodo para soldadura por arco, **XXX** indica la numeración que se corresponde a la clase AISI de acero inoxidable, para el cual está destinado el electrodo, **Y** el penúltimo número indica la posición en que puede utilizarse. Así de los ejemplos E 308-15, ó E 310-16, el "1" indica que el electrodo es apto para todas las posiciones, **Z** el último número de los ejemplos anteriores (5 y 6) señala el tipo de revestimiento, la clase de corriente y la polaridad a utilizarse, en la forma siguiente: 5 significa que el electrodo tiene un revestimiento alcalino que debe utilizarse únicamente con corriente continua y polaridad inversa (el cable del porta-electrodo al polo positivo), 6 significa que el electrodo tiene un revestimiento de titanio, que podrá emplearse con corriente alterna o corriente continua. En caso de utilizarse con corriente continua ésta debe ser una polaridad inversa (el cable del porta-electrodo al polo positivo).

La especificación AWS A5.15 dicta las normas de clasificación de electrodos para soldar metales no ferrosos, en este caso el sistema de clasificación de estos electrodos es simbólico, es decir, que se indica el símbolo químico del elemento o elementos metálicos predominantes en el análisis del núcleo metálico del electrodo. El sistema utiliza el prefijo E, que significa que el producto es un electrodo para soldar, seguido de los elementos considerados significativos. Por último, el caso concreto para soldadura de hierro fundido, la denominación del electrodo termina con las letras CI. Por ejemplos, E ni-CI, E ni Fe-CI, etc.

La especificación AWS A5.17 dicta las normas de clasificación de electrodos por proceso de arco sumergido para aceros al carbono. Esta especificación identifica los electrodos con el prefijo E (electrodo para arco eléctrico), seguido de la letra que indica el contenido de manganeso y que puede ser L (bajo), M (medio) ó H (alto) a continuación sigue uno o dos dígitos que dan el contenido nominal de carbono en centésima de porcentaje. Finalmente, algunos electrodos traerán una letra K para significar que es un producto obtenido de un acero calmado al silicio.

La especificación AWS A5.18 dicta las normas de clasificación del material de aporte para procesos de soldadura con protección gaseosa (MIG/MAG, TIG y plasma). En este caso, los electrodos se denominan de la siguiente forma: **ERXX-SX**, donde cada término significa lo siguiente: **E** indica electrodo para soldadura por arco (sólo caso MIG/MAG), **R** indica aporte que funde por un medio diferente que el que conduce la corriente del arco eléctrico (sólo caso TIG y plasma), **XX** indica la resistencia a la tracción nominal del depósito de soldadura (igual para todos los casos), **S** indica que el electrodo es sólido, **X** último número que indica la composición química del electrodo. (Ver figura 9).

#### **2.2.4 Biseles**

El bisel es un corte inclinado en el borde de una lámina o tubo con el fin de realizar un buen proceso de soldadura; cumple una función importante en este proceso, debido a que en ocasiones el soldador no posee el nivel de penetración suficiente por parte del material de aporte en la zona de la soldadura, que conlleva a una mala unión soldada. Este biselado se hace normalmente con la ayuda de la pulidora o del esmeril, ya sea en las dos láminas a unir o en solo una de ellas. (Ver figura 10).

En otras palabras es un proceso preparatorio para posteriores soldaduras. En la industria nos encontramos con dos tipos de trabajo bien definidos, uno de ellos es el biselado en línea recta y el segundo, un poco más complejo, es el biselado de contornos interiores o exteriores con cualquier forma. Las personas que maniobran con biselado deben estar concentrados en la actividad, con el objeto de responder en forma oportuna y coordinada a cualquier movimiento brusco durante el movimiento realizado.

AWS Clasificación	Gas Protector	Corriente y Polaridad	Resistencia a la Tracción
<b>GRUPO A: ELECTRODOS DE ACERO DE BAJO CARBONO</b>			
E 60S-I	Argón-Ia 5% O <sub>2</sub>	C.C. Polaridad Inversa	62 000
E 60S-2	Argón-Ia 5% O <sub>2</sub> ó CO <sub>2</sub>	C.C. Polaridad Inversa	62 000
E 60S-3	Argón-Ia 5% O <sub>2</sub> ó CO <sub>2</sub>	C.C. Polaridad Inversa	62 000
E 70S-4	CO <sub>2</sub>	C.C. Polaridad Inversa	72 000
E 70S-5	CO <sub>2</sub>	C.C. Polaridad Inversa	72 000
E 70S-6	CO <sub>2</sub>	C.C. Polaridad Inversa	72 000
E 80S-G	No especifica	No especifica	72 000
<b>GRUPO B: ELECTRODOS DE BAJA ALEACIÓN</b>			
E 70S - IB	CO <sub>2</sub>	C.C. Polaridad Inversa	72 000
E 70S - GB	No especifica	No especifica	72 000
<b>GRUPO C: ELECTRODOS EMISIVOS</b>			
E 70 U-I	Argón-Ia 5% O <sub>2</sub> ó Argón	C.C. Polaridad Directa	72 000
<b>ELECTRODOS TUBULARES</b>			
E 70T-I	CO <sub>2</sub>	C.C. Polaridad Inversa	72 000
E 70T-2	CO <sub>2</sub>	C.C. Polaridad Inversa	72 000
E 70T-3	Ninguno	C.C. Polaridad Inversa	72 000
E 70T-4	Ninguno	C.C. Polaridad Inversa	72 000
E 70T-5	CO <sub>2</sub> Ninguno	C.C. Polaridad Inversa	72 000
E 70T-G	No especifica	No especifica	72 000

**Figura 9:** Material de aporte para procesos de soldadura con protección gaseosa (MIG/MAG, TIG y plasma).

**Fuente:** American Welding Society.

Una soldadura con bisel es, “una soldadura hecha en un bisel entre las piezas”. Hay ocho tipos de soldadura con bisel:

Bisel recto

A tope con inglete

Bisel en V

Bisel en 1/2 V

Bisel en U

Bisel en J

Bisel en V ensanchado

Bisel en 1/2 V ensanchado

Sus nombres implican como las configuraciones actuales se ven cuando son vistas en sección transversal. Todos estos tipos de soldadura con bisel pueden ser aplicados a juntas que son soldadas de un solo lado o de ambos lados. La Figura 9 ilustra las configuraciones típicas para una junta soldada de bisel simple y doble. Como es de imaginarse, una junta soldada simple es una “junta soldada fusionada que ha sido soldada de un solo lado”. De la misma manera, una junta soldada doble es “una junta soldada fusionada que ha sido soldada de ambos lados”. Soldaduras con bisel de diferentes tipos son usadas en varias combinaciones.

La selección está influenciada por la accesibilidad, economía, adaptación al diseño estructural, distorsión esperada y el tipo de proceso de soldadura usado. Las soldaduras con bisel recto son las más económicas de usar, pero están limitadas por el espesor de los componentes.

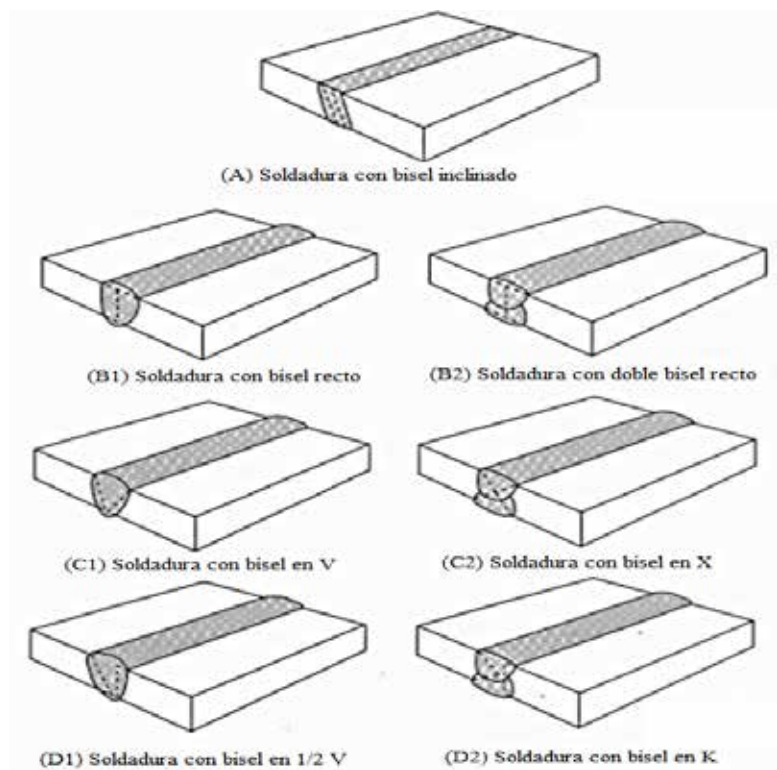
La soldadura con bisel recto con penetración total, soldada de un solo lado, generalmente no es usada para material más fino que  $\frac{1}{4}$  de pulgada. Materiales finos requieren la selección de geometría de juntas que acomoden otros tipos de soldaduras con bisel. En juntas finas la geometría particular debe proveer accesibilidad para soldar, asegurando la solidez y resistencia de la soldadura, y minimizando la cantidad de metal removido.

Por razones económicas, estos diseños de juntas deben ser elegidos con abertura de raíz y ángulo de bisel que requieran la mínima cantidad de metal de soldadura, pero que aún reúnan las condiciones de servicio de la soldadura. La selección de las aberturas de raíz y

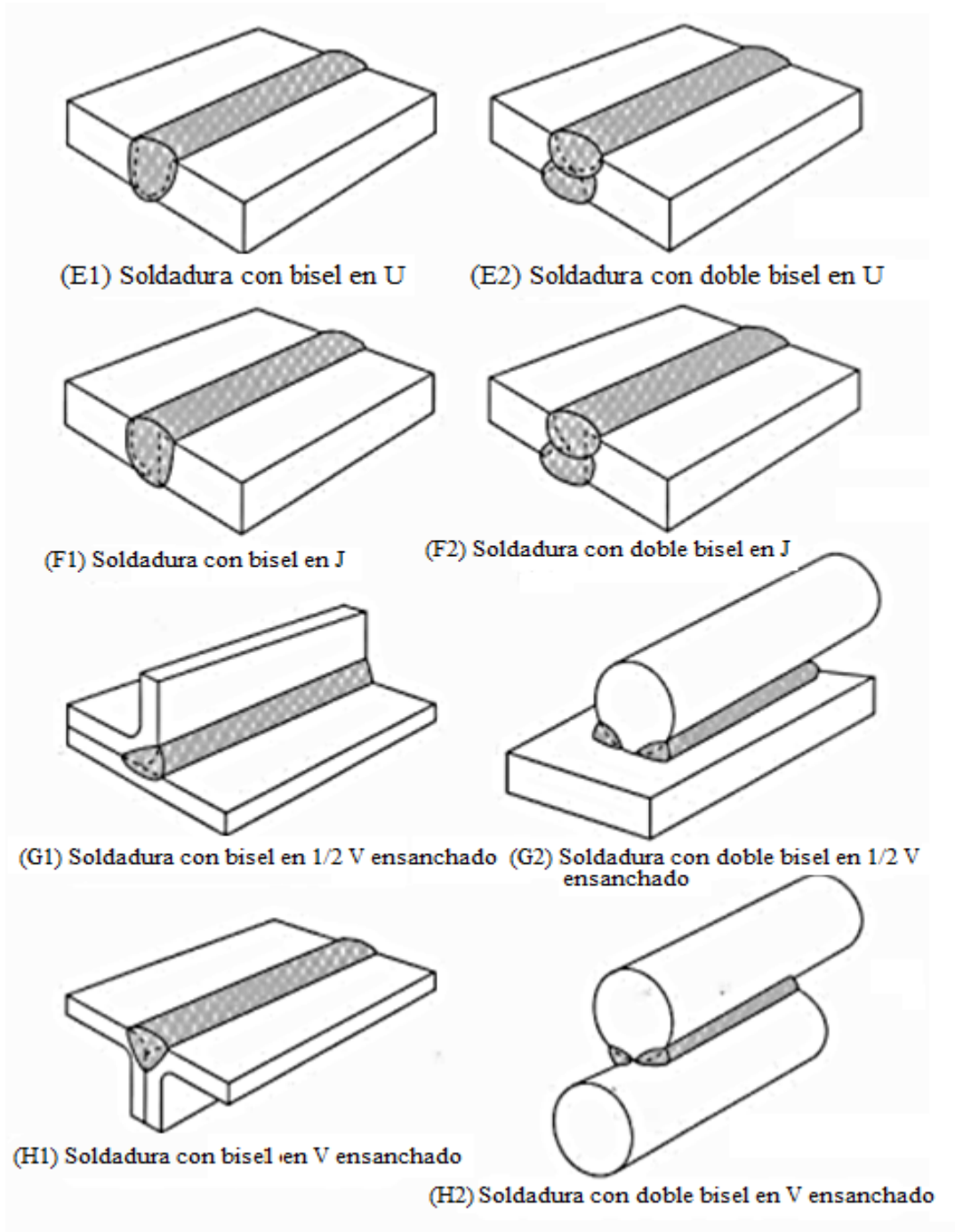
ángulos de bisel es influenciada por el metal a ser unido, la ubicación de la junta dentro de la soldadura, y las condiciones de servicio requeridas.

Las soldaduras con biseles en J o U pueden ser usadas para minimizar los requerimientos de metal de soldadura cuando los factores económicos excedan en valor el costo de la preparación del borde.

Estos tipos de soldaduras son especialmente útiles en secciones de poco espesor. Soldaduras con bisel en 1/2 V y con bisel en J son más difíciles de soldar que aquellas con bisel en V o en U, debido al borde vertical. Soldaduras con bisel en V ensanchado y bisel en 1/2 V ensanchado son usadas en conexión con componentes de bordes curvos o redondeados. “Soldadura Protocolo”. (2.008). (Ver figura 10).



Continuación



**Figura 10:** Tipos de biseles (continuación)

Fuente: ANSI/AWS A3.0, Standard Welding Terms and Definitions.

### **2.2.5 Acero**

El acero es una aleación de hierro con una cantidad de carbono que puede variar entre 0,03% y 1,075% en peso de su composición, dependiendo del grado.

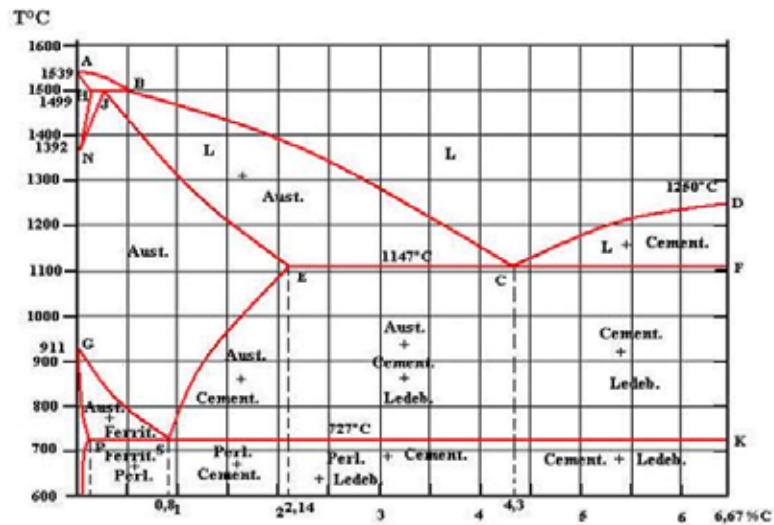
Acero no es lo mismo que hierro. Y ambos materiales no deben confundirse. El hierro es un metal relativamente duro y tenaz, con diámetro atómico (dA) de 2,48 Å, con temperatura de fusión de 1535 °C y punto de ebullición 2740 °C. La diferencia principal entre el hierro y el acero se halla en el porcentaje de carbono: el acero es hierro con un porcentaje de carbono de entre el 0,03% y el 1,075%, el acero conserva las características metálicas del hierro en estado puro, pero la adición de carbono y de otros elementos tanto metálicos como no metálicos mejora sus propiedades físico-químicas, sobre todo su resistencia.

Existen muchos tipos de acero según el/los elemento/s aleante/s que estén presentes. Cada tipo de acero permitirá diferentes aplicaciones y usos, lo que lo hace un material versátil y muy difundido en la vida moderna, donde podemos encontrarlo ampliamente.

Los dos componentes principales del acero se encuentran en abundancia en la naturaleza. El acero se puede reciclar indefinidamente sin perder sus atributos, lo que favorece su producción a gran escala. Esta variedad y disponibilidad lo hace apto para numerosos usos como la construcción de maquinaria, herramientas, edificios y obras públicas, aeronáutica, industria automotriz, instrumental médico, etc... contribuyendo al desarrollo tecnológico de las sociedades industrializadas, pues ningún material logra igualarlo cuando se trata de resistencia al impacto o la fatiga.

### **2.2.6 Diagrama Hierro-Carbono**

Es un diagrama de equilibrio en el que se representa el comportamiento de la aleación de hierro y carbono en función del porcentaje de carbono contenido en la mezcla y de la temperatura, composición química y presión atmosférica. (Ver figura 11).



**Figura 11:** Diagrama hierro-carbono.

Fuente: Askeland, Donald R. and Phule, Pradeep P. (2004).

El acero puede tener las siguientes fases de equilibrio:

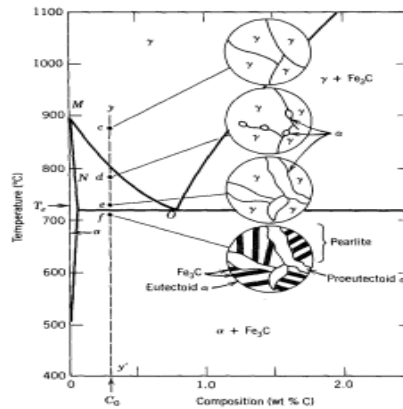
1. cristalina BCC y átomos de carbono en los sitios intersticiales. La cantidad de átomos de carbono presentes en la ferrita es pequeña. La ferrita es una fase muy suave, difícil y magnética.
2. Austenita ( ). Consiste en átomos de hierro con estructura FCC y átomos de carbono en los sitios intersticiales. presenta menor suavidad y ductilidad que la ferrita. Es una fase no magnética.
3. Cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ). También se llama Carburo de Hierro. Es un compuesto intermetálico. Es una fase muy dura y frágil.
4. Perlita. Es una fase que resulta de la reacción eutectoide del acero. La reacción eutectoide permite que la austenita en estado sólido se transforme en ferrita y cementita, ambas también en estado sólido. Esta transformación es similar a la reacción eutéctica, por lo que la fase resultante tiene una apariencia similar al sólido eutéctico.

En función de las fases presentes, los aceros pueden clasificarse de la siguiente forma.

1. Aceros hipoeutectoides. Son aquellos que poseen menos de 0,77% de carbono. La microestructura presente en estos aceros consiste de ferrita y perlita. (Ver figura 12).

$$\% \text{ de ferrita} = \frac{0,77 - \%C}{0,77 - 0,022} \times 100 \quad (\text{ec. 2})$$

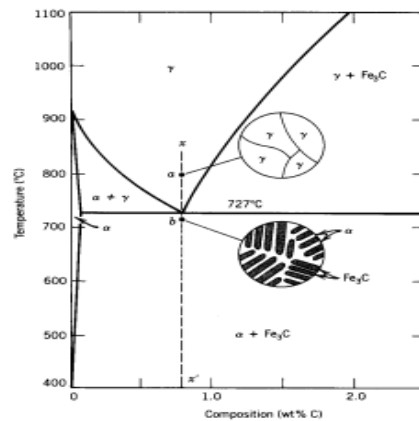
$$\% \text{ de perlita} = \frac{\%C - 0,022}{0,77 - 0,022} \times 100 \quad (\text{ec. 3})$$



**Figura 12:** Esquema Aceros Hipoeutectoides.

**Fuente:** Universidad Católica de Argentina, Escuela de Ingeniería.

2. Aceros eutectoides. Son aquellos que poseen exactamente 0,77% de carbono. Su microestructura está formada totalmente de perlita. (Ver figura 13).



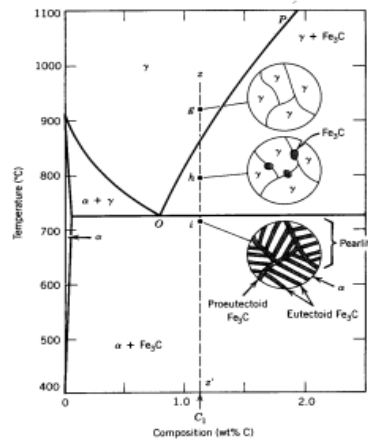
**Figura 13:** Esquema Aceros Eutectoides.

**Fuente:** Universidad Católica de Argentina, Escuela de Ingeniería.

3. Aceros hipereutectoides. Son aquellos que poseen más de 0,77% de carbono. Su microestructura consiste en cementita y perlita. (Ver figura 14).

$$\% \text{ de cementita} = \frac{\%C - 0,77}{6,67 - 0,77} \times 100 \quad (\text{ec. 4})$$

$$\% \text{ de perlita} = \frac{6,67 - \%C}{6,67 - 0,77} \times 100 \quad (\text{ec. 5})$$



**Figura 14:** Esquema Aceros Hipereutectoides.

**Fuente:** Universidad Católica de Argentina, Escuela de Ingeniería.

### 2.2.7 Proceso de fabricación del acero

A partir del mineral de hierro (formado por óxidos de Fe y ganga) se obtiene en los altos hornos el arrabio (hierro con un 4 % aproximadamente de carbono). El arrabio es duro pero muy frágil (interesa más un material dúctil, que “avisa” de su estado tensional), para reducir el % de carbono sin perder resistencia se afina el arrabio en convertidores (se quema el carbono sobrante), obteniéndose el acero en bruto con un % de carbono en torno al 2%. Posteriormente se vierte en lingoteras para su enfriamiento y posterior acabado.

El proceso de acabado puede ser por: forja, moldeo, trefilado o laminación; para ello se calienta previamente o bien, viene directamente del convertidor mediante un proceso de colada continua, evitando así las lingoteras, el desmoldado y posterior calentamiento.

Tras este proceso se pueden aplicar tratamientos térmicos (templado, recocido, revenido) para alcanzar las propiedades mecánicas y químicas deseadas. El acero más empleado en la construcción es el laminado. Askeland y Phule (2.007).

### **Elementos de Aleación**

**Carbono:** Es el elemento que tiene más influencia en el comportamiento del acero; al aumentar el porcentaje de carbono, mejora la resistencia mecánica, la Templabilidad y disminuye la ductilidad.

**Boro:** El Boro que se encuentra en el acero proviene exclusivamente de las adiciones voluntarias de este elemento en el curso de su fabricación. Ejerce una gran influencia sobre la templabilidad del acero, bastando porcentajes muy pequeños, a partir de 0.0004%, para aumentarla notablemente.

**Azufre:** Aumenta la maquinabilidad, ya que forma inclusiones no metálicas llamadas sulfuros de magnesio, discontinuidades en la matriz metálica que favorecen la formación de viruta corta.

**Cromo:** Es un gran formador de carburos, aumenta la dureza y la resistencia al desgaste, y solo reduce la ductilidad. Mejora la resistencia a la alta temperatura y a la formación de cascarilla. En cantidades mayores al 12%, hace al acero resistente a la corrosión.

**Fósforo:** Incrementa la resistencia y reduce la ductilidad de la ferrita. Aumenta la brillantez. Este elemento, en cantidades superiores al 0.004%, disminuye todas las propiedades mecánicas del acero.

**Molibdeno:** Formador de carburos, reduce el crecimiento del grano, mejora la resistencia al desgaste y la capacidad de conservar la dureza a temperaturas altas.

**Cobalto:** Elemento que desplaza las curvas TTT hacia la izquierda, aumentando la velocidad crítica y disminuyendo la templabilidad. Aumenta la dureza, y asociado al níquel o al cromo, forman aceros de débil coeficiente de dilatación, cercano al vidrio. Aumenta la velocidad crítica de enfriamiento y en los aceros para trabajo en caliente y rápidos incrementa la disipación de temperatura.

**Manganeso:** Mejora la resistencia a la tracción y al desgaste, tiene buena influencia en la forja, la soldadura y la profundidad de temple. Facilita el mecanizado. Askeland y Phule (2.007).

#### **2.2.7.1 Clasificación de los aceros.**

Los aceros se clasifican en cinco grupos principales: aceros al carbono, aceros aleados, aceros de baja aleación ultra resistente, aceros inoxidable y aceros de herramientas.

##### **Aceros aleados.**

Estos aceros están compuestos por una proporción de determinada de vanadio, molibdeno y otros elementos; además de cantidades mayores de manganeso, silicio y cobre que los aceros al carbono. Estos aceros se emplean para fabricar engranajes, ejes, cuchillos, etc.

##### **Aceros de baja aleación ultra resistentes.**

Estos aceros son más baratos que los aceros convencionales debido a que contienen menor cantidad de materiales costosos de aleación.

Sin embargo, se les da un tratamiento especial que hace que su resistencia sea mucho mayor que la del acero al carbono. Este material se emplea para la fabricación de vagones porque al ser más resistente, sus paredes son más delgadas, con lo que la capacidad de carga es mayor. Además, al pesar menos, también se pueden cargar con un mayor peso. También se emplea para la fabricación de estructuras de edificio.

##### **Aceros inoxidables.**

Estos aceros contienen cromo, níquel y otros elementos de aleación que los mantiene brillantes y resistentes a la oxidación. Algunos aceros inoxidables son muy duros y otros muy resistentes, manteniendo esa resistencia durante mucho tiempo a temperaturas extremas. Debido a su brillo, los arquitectos lo emplean mucho con fines decorativos. También se emplean mucho para tuberías, depósitos de petróleo y productos químicos por su resistencia a la oxidación y para la fabricación de instrumentos quirúrgicos o sustitución de huesos porque resiste a la acción de los fluidos corporales. Además, se utiliza para la fabricación de utensilios de cocina.

### **Aceros de herramientas.**

Estos aceros se emplean para fabricar herramientas y cabezales de corte y modelado de máquinas. Contienen wolframio, molibdeno y otros elementos de aleación que le proporcionan una alta resistencia, dureza y durabilidad.

### **Aceros al carbono.**

El 90% de los aceros son aceros al carbono. Estos aceros contienen una cantidad diversa de carbono, menos de un 1,65% de manganeso, un 0,6% de silicio y un 0,6% de cobre. Con este tipo de acero se fabrican máquinas, carrocerías de automóvil, estructuras de construcción, etc. El acero al carbono es el más común barato y apreciable de los metales que se emplean en la industria. Tienen una ductilidad excelente, lo que permite que se utilice en muchas operaciones de formado en frío. El acero también se puede soldar con facilidad.

Los grados de acero que se emplean comúnmente en la industria de procesos químicos tienen una resistencia a la tracción de 245 MPa a 480 MPa (50.000 a 70.000 *lbf pulg<sup>2</sup>*) con buena ductilidad. Es posible alcanzar niveles de resistencia todavía más altos con trabajo en frío, con aleaciones y con tratamiento térmico. Los aceros de alta resistencia se utilizan mucho en proyectos de ingeniería civil. Los aceros pueden clasificarse con base en su composición o según la forma en que han sido procesados. Los aceros al carbono contienen hasta 2% C. Estos aceros también pueden contener otros elementos como, por ejemplo, silicio (máximo 0,6%), cobre (hasta 0,6%) y manganeso (hasta 1,65%). Los aceros de ultra-bajo carbono contienen un máximo de 0,03% C, también contienen niveles muy reducidos de otros elementos, como silicio (Si) y manganeso (Mn). Los aceros de bajo carbono contienen de 0,04 a 0,15% en peso. Estos aceros de bajo carbono se utilizan para fabricar carrocerías automotrices y cientos de otras aplicaciones. Los aceros dulces (suaves) contienen de 0,15 a 0,3% de carbono. Este acero se utiliza en edificios, puentes, tuberías, etc. Los aceros de medio carbono contienen de 0,3 a 0,6% en peso. Estos se utilizan en la construcción de maquinaria, tractores y equipos para minas, etc. Los aceros de alto carbono

contienen más de 0,6% en peso, se utilizan en la fabricación de muelles, ruedas para carros de ferrocarril y similares. (Ver figura 15).

### **Soldabilidad de aceros al carbono.**

Comprender el fenómeno químico y físico que ocurre en la soldadura, es necesario para soldar los aceros modernos. Por lo tanto, la influencia de parámetros operacionales, ciclos térmicos y factores metalúrgicos sobre las transformaciones del metal soldado y la susceptibilidad de agrietamiento en frío y en caliente son de importancia para obtener uniones soldadas resistentes. Los aceros de bajo carbono son principalmente usados en aplicaciones estructurales. Aceros al carbono que contienen menos de 0,30% en peso de C y 0,05 % en peso pueden soldarse generalmente por la mayoría de los métodos con poca atención en mediciones especiales para prevenir grietas en la unión.

<b>NOMBRE COMÚN</b>	<b>%C</b>	<b>USOS</b>	<b>SOLDABILIDAD</b>
<b>Aceros de bajo contenido de carbono</b>	0,15% máximo	Electrodos para soldadura, laminas y chapa	Excelente
<b>Aceros suaves</b>	0,15 a 0,30%	Perfiles y barras estructurales laminadas	Buena
<b>Acero de medio carbono</b>	0,30 a 0,50%	Partes de maquinaria	Poca (precalentar y postcalentar)
<b>Aceros de alto contenido de carbono</b>	0,50 a 1%	Resortes, troqueles, rieles de ferrocarril	Poca (difícil soldar sino se precalienta y postcalienta adecuadamente)

**Figura 15:** Clasificación de los aceros al carbono

Fuente: Aguilera y Estrada (2.015)

El proceso de soldadura en secciones mayores a 25 mm (1pulg) de espesor particularmente si el contenido de carbono del metal base excede de 0.22% en peso, puede requerir que el acero sea precalentado hasta aproximadamente 40°C (100°F) y un relevado de esfuerzos a 525 a 675°C (1000 a 1250°F). Tradicionalmente, han sido desarrolladas ecuaciones empíricas para expresar la soldabilidad. El carbono equivalente (CE) es una de esas expresiones, ésta se desarrolló para estimar la susceptibilidad al agrietamiento durante el proceso de soldadura y determinar si el acero necesita pre y pos calentamiento y así evitarlo.

El Instituto Internacional de Soldadura (IIW) presenta esta ecuación de CE:

$$CE = C + Mn/6 + Ni/15 + Cu/15 + Cr/5 + Mo/5 + V/5 \quad (\text{ec. 6})$$

Donde la concentración de los elementos aleantes está dada en porcentaje en peso. Aceros con valores de CE bajos generalmente presentan buena soldabilidad. Cuando el CE de un acero es menor a 0.45 % en peso, es imposible que haya agrietamiento en la soldadura y no se requiere un tratamiento de calentamiento. Cuando el CE está entre 0.45 y 0.60 % en peso, el agrietamiento en la soldadura es posible y se recomienda un calentamiento en el intervalo de 95 a 400°C, (200 a 750°F). Cuando el CE de un acero es mayor que 0.60 % en peso. Hay una alta probabilidad de agrietamiento en la soldadura y ambos tratamiento de precalentamiento y post-calentamiento son requeridos para obtener una soldadura de calidad.

#### **Acero Estructural AISI 1010.**

El acero al carbono AISI 1010 es un acero al carbono simple con un contenido de carbono del 0.10%. Este acero tiene una resistencia relativamente baja pero se puede enfriar y templar para aumentar la resistencia. La maquinabilidad del acero al carbono AISI 1010, especialmente en estado estirado en frío o trabajado en frío, se considera bastante buena, tiene una buena capacidad de formación y ductilidad, y se puede formar fácilmente usando métodos convencionales. La composición química se puede ver en la figura 15.

### **Tratamiento Térmico**

El acero al carbono AISI 1010 se usa principalmente en el estado recocido o endurecido. Sin embargo, también puede tratarse térmicamente, templarse y templarse pero el costo para realizar estos procesos es muy alto.

#### **Forja**

El forjado se puede realizar en acero al carbono AISI 1010 entre 1260 y 982 ° C (2300 y 1800 ° F).

#### **Trabajo caliente**

La capacidad de trabajo en caliente del acero al carbono AISI 1010 está entre los rangos de 482 a 93 ° C (900 a 200 ° F).

#### **Composición química**

El acero AISI 1010, su composición química está dada por porcentajes de hierro, manganeso, azufre, fósforo, carbono. (Ver figura 16).

#### **Trabajo en frío**

La capacidad de trabajo en frío del acero al carbono AISI 1010 es buena. En los casos en que se realiza un trabajo en frío severo, se debe realizar un alivio de tensión o un recocido completo.

#### **Recocido**

Se puede realizar un proceso de recocido completo para el acero al carbono AISI 1010 a 871 a 982 ° C (1600 a 1800 ° F), seguido de un lento proceso de enfriamiento en el horno. También se puede hacer un proceso de recocido de alivio de tensión a 538 ° C (1000 ° F) y luego se enfría gradualmente. El acero al carbono AISI 1010 en estado completo recocido tiene una resistencia a la tracción de aproximadamente 45 ksi.

#### **Templado**

El revenido se puede realizar en acero al carbono AISI 1010, después de que se complete el proceso de endurecimiento, a 316 a 593 ° C (600 a 1100 ° F). Esto depende del nivel de fuerza requerido. Cuando el revenido se realiza a 538 ° C (1000 F), la resistencia a la tracción será de aproximadamente 75 ksi.

### **Endurecimiento**

El acero al carbono AISI 1010 puede endurecerse tanto con el trabajo en frío como con el tratamiento térmico.

### **Aplicaciones**

El acero al carbono AISI 1010 se utiliza principalmente para aplicaciones tales como sujetadores y pernos con cabeza fría.

<b>Elemento</b>	<b>Contenido (%)</b>
Hierro, fe	99,18-9,62%
Manganeso, mn	0.30-0.60%
Azufre s	≤0.050%
Fósforo, p	≤0.040%
Carbono, c	0.080-0.13%

**Figura 16:** Composición química del acero AISI 1010.

**Fuente:** AZO Materials (2.012).

### **2.2.8 Fallas características de soldaduras.**

Para entender la soldabilidad, es necesario conocer las diferentes regiones de soldadura. La soldadura generalmente está dividida en dos regiones principales: la zona de fusión o metal soldado, y la zona afectada por el calor (ZAC). Dentro de la zona de fusión, la temperatura máxima excede el punto de fusión del metal base, y la composición química del metal soldado dependerá sobre el tipo de metal de aporte en la soldadura, relación de dilución del metal base, y las condiciones de operación. En condiciones de enfriamiento rápido y solidificación del metal de soldadura, impurezas y elementos aleantes son segregados ampliamente en el centro de regiones interdendríticas o intercelulares así como en la parte central de la soldadura, resultando, en heterogeneidades químicas locales. En consecuencia, el comportamiento de transformación del metal soldado puede ser bastante diferente en el metal base. La composición química permanece en gran parte sin cambiar en

la ZAC porque la máxima temperatura permanece por debajo del punto de fusión. Sin embargo, el cambio microestructural toma lugar dentro de la ZAC durante la soldadura como resultado de diferentes ciclos térmicos.

El material inmediatamente adyacente a la zona de fusión es calentado dentro del rango de temperatura en la austenita. Los precipitados de micro-aleación que se desarrollaron en la etapa anterior del tratamiento generalmente se disolverán, y la desunión de los límites de grano de la austenita ocurre con el crecimiento substancial de los granos, formando el grano grueso en la ZAC. El tamaño promedio de los granos de austenita, que están en función de la máxima temperatura alcanzada, disminuye con el aumento de distancia de la zona de fusión. La velocidad de enfriamiento también varía de punto a punto en la ZAC; esto aumenta con el incremento del pico de temperatura con un calor de entrada constante y disminuye con el aumento de calor de entrada a temperatura constante. En realidad, la ZAC está compuesta de una zona de granos gruesos (CG), granos finos (FG), zona intercrítica (IC), y zona suscítica (SC). Aguilera J. Estrada H. (2.015).

### **2.2.9 Grietas.**

Existen varios tipos de discontinuidades que pueden producirse en las soldaduras o en la zona afectada por el calor. Las soldaduras pueden contener porosidad, inclusiones de escoria o grietas. De los tres, las grietas son las más perjudiciales. Considerando que existen límites aceptables para las inclusiones de escoria y la porosidad en las soldaduras, las grietas no son aceptables. Las grietas en una soldadura, o en la proximidad de una soldadura, indican que uno o más problemas existen y deben ser tratados con urgencia. Un análisis cuidadoso de las características de la grieta hará que sea posible determinar la causa y tomar las medidas correctivas más satisfactorias.

El agrietamiento en la soldadura se produce cerca o durante el momento de la fabricación. Las grietas en calientes son las que ocurren a temperaturas elevadas y son por lo general relacionadas con la solidificación, y las grietas en frío son aquellas que se producen después de que el metal de soldadura se ha enfriado a temperatura ambiente y tienen que ver generalmente con el hidrógeno.

### **2.2.9.1 Criterio para evaluar el riesgo del agrietamiento en caliente.**

El fisuramiento en caliente puede ocurrir como efecto de la contracción térmica, característica de cualquier proceso de soldadura que involucre calentamiento o enfriamiento localizado, por la falta de ductilidad del metal a temperaturas elevadas como para soportar dichas tensiones. Estas fisuras se pueden presentar en la etapa final de solidificación de la pileta líquida en el metal de soldadura, denominándose grietas de solidificación, o pueden ocurrir en la zona afectada por la zona de soldadura, y se denominan grietas de licuación, ya que se producen por licuación de fases segregadas en bordes de granos muy próximos a la fusión.

### **2.2.9.2 Naturaleza del agrietamiento en caliente.**

Todo material o combinación de materiales tienen un rango de temperaturas características de sensibilidad al agrietamiento en caliente, denominado Rango de Temperaturas de Fragilización (RTF). El límite de este rango sería, en una primera aproximación, la temperatura de sólidos. El límite inferior correspondería a bruscas disminuciones de ductilidad o reacciones particulares para cada aleación.

El rango de temperatura frágil está caracterizado por una Deformación Crítica (DC) necesaria para provocar el agrietamiento en caliente. A medida que las grietas en caliente se forman durante la solidificación de la soldadura, también se producen deformaciones cuya velocidad desempeña un papel importante. Es posible que se exceda cierto valor crítico de velocidad de deformación antes de la aparición de las grietas, llamado Velocidad de Deformación Crítica (VDC) para una caída de temperatura dada.

Según estos conceptos el RTF se determina por tres criterios característicos:

- Rango de temperatura en el cual se forman las grietas en caliente.
- Deformación crítica.
- Velocidad de deformación crítica para una disminución de temperatura.

En una soldadura, las deformaciones son productos de contracciones en la pileta líquida y las zonas adyacentes, porque depende del proceso de soldadura, del calor aportado y la rigidez del componente, la deformación resultante puede ser diferente. En consecuencia, las

condiciones para la formación de grietas en caliente para un cierto componente no son cuantificables debido a que las condiciones de carga son inciertas.

### **2.2.9.3 Fisuramiento en caliente (FC) del metal de soldadura.**

La soldadura de los aceros estructurales es susceptible a ciertos tipos de fisuras, que poseen las siguientes características:

Fisuras de Solidificación, que tienen lugar a muy altas temperaturas durante el enfriamiento, probablemente antes de los 1200°C.

Fisuras Interdendríticas, las que se desarrollan a lo largo de los límites del grano de la estructura de solidificación.

Ciertas formas de fisuras en el metal de soldadura se pueden distinguir por su apariencia, mientras que otras tienen nombre apropiado. Así por ejemplo se tiene las fisuras de cráter, las cuales están situadas en el cráter de la soldadura y aparecen cuando la operación de soldadura es terminada o interrumpida. Este defecto típico de la soldadura por arco es muy peligroso cuando se deposita la pasada de raíz en una junta de tipo doble V altamente embreada. Por otra parte, las fisuras en estrella pueden ser descritas como finas grietas, generalmente de 1,6 a 2,5 mm de longitud, las que parten radialmente de un punto central, su apariencia similar con las fisuras de cráter sugiere que son debidas a causas similares. Las fisuras longitudinales, que se desarrollan en la dirección de la soldadura y muchas veces según la línea central de la misma, inclinan a sugerir que se producen durante todo el tiempo en que la soldadura se encuentra muy caliente, deteniéndose cuando la misma ha solidificado. Las fisuras longitudinales son generalmente apreciables a primera vista sobre la parte superior de la superficie de la soldadura. Este tipo de fisuras se presentan generalmente en la primera pasada de las juntas soldadas en multipasadas. Pueden originarse también fisuras transversales situadas perpendicularmente a la línea de fusión y producidas por la excesiva tensión longitudinal, las cuales pueden extenderse más allá de la soldadura y penetrar en el metal base. Finalmente están las microgrietas, término reservado a pequeñas grietas que se producen en el metal de soldadura en cualquier dirección, y que frecuentemente solo son observables mediante un examen metalográfico.

#### **2.2.9.4 Fisuras de solidificación (FS).**

Las FS se forman como consecuencia del efecto combinado de factores mecánicos y químicos, es decir, su aparición está afectada por la tecnología de la soldadura aplicada y por la composición química del metal de soldadura. Cuando la composición química es desfavorable, es factible evitar la FS mediante una cuidadosa elección de las condiciones de la soldadura. Por otra parte, la falta de cuidado de la ejecución de la operación de soldadura puede resultar en fisuración, aun en metales que satisfagan estándares normales de composición. La mayoría de los casos de FC que ocurren en la práctica suceden debido a distorsiones que acompañan la soldadura, debido a alguna operación en la vecindad de la soldadura, que genere tensión a través de esta mientras solidifica. En tales casos, la susceptibilidad intrínseca del material puede ser extremadamente baja. Esto demuestra la necesidad de un cuidadoso control de las condiciones extrínsecas durante la operación.

#### **Formas de fisura.**

Las FS aparecen en el metal de soldadura, tanto en formas de fisuras como micro fisuras intergranulares, las cuales, no siempre alcanzan la superficie del metal. Las fisuras pueden ser longitudinales originadas en la solidificación de la pileta líquida, donde el centro de la soldadura es lo último en solidificar, constituyendo la parte más débil a la temperatura la cual se forma la fisura. Otra forma de fisura muy común se presenta en el cráter final, debido a que en esta zona está sujeta a un enfriamiento muy rápido, sin el aporte que podría compensar la contracción durante la solidificación.

#### **Formas de la pileta líquida.**

Durante la soldadura, el metal base es mojado por el metal fundido de la pileta líquida y, siendo la composición similar, actúa como un sustrato sobre el cual puede crecer una estructura de solidificación. De esta manera el líquido cede su calor latente de fusión y los átomos ocupan posiciones correspondientes en los sitios de la red cristalina, extendiendo esta estructura desde el sólido. Este crecimiento se denomina epitaxial, y la dirección preferencial de crecimiento de granos sea aproximadamente paralela al máximo gradiente de temperatura. Los granos de orientación favorable competirán con los granos adyacentes, formándose una estructura columnar, perpendicular a la línea de fusión.

### **2.2.9.5 Fisura de licuación.**

Las tensiones propias de la soldadura, y una composición particular del material, pueden generar la descohesión de los bordes de grano de metal base en la región adyacente a la línea de fusión. Normalmente se encuentran como micro grietas no detectables a simple vista, sino visibles a las tintas penetrantes o al microscopio.

### **2.2.10 Método de elementos finitos.**

El método de elementos finitos es un método de aproximación de problemas continuos, de tal forma que el continuo se divide en un número finito de partes, “elementos”, cuyo comportamiento se especifica mediante un número finito de parámetros asociados a ciertos puntos característicos denominados “nodos”. Estos nodos son los puntos de unión de cada elemento con sus adyacentes. La solución del sistema completo sigue las reglas de los problemas discretos, el sistema completo se forma por ensamblaje de los elementos. Las incógnitas del problema dejan de ser funciones matemáticas y pasan a ser el valor de estas funciones en los nodos. El comportamiento en el interior de cada elemento queda definido a partir del comportamiento de los nodos mediante las adecuadas funciones de interpolación o funciones de forma.

El MEF, por tanto, se basa en transformar un cuerpo de naturaleza continua en un modelo discreto aproximado, esta transformación se denomina discretización del modelo. El conocimiento de lo que sucede en el interior de este modelo del cuerpo aproximado, se obtiene mediante la interpolación de los valores conocidos en los nodos. Es por tanto una aproximación de los valores de una función a partir del conocimiento de un número determinado y finito de puntos.

#### **2.2.10.1 Etapas básicas en la utilización del método de los elementos finitos.**

Independientemente de la naturaleza física del problema, el análisis del mismo mediante el MEF sigue los siguientes pasos:

1. Definición del problema y su dominio.
2. Discretización del dominio.
3. Identificación de la(s) variable(s) de estado.

4. Formulación del problema.
5. Establecimiento de los sistemas de referencia.
6. Construcción de las funciones de aproximación de los elementos.
7. Determinación de las ecuaciones a nivel de cada elemento.
8. Transformación de coordenadas.
9. Ensamblaje de las ecuaciones de los elementos.
10. Introducción de las condiciones de contorno.
11. Solución del conjunto de ecuaciones simultaneas resultante.
12. Interpretación de los resultados.

#### **Definición del problema y su dominio.**

El análisis de un problema dado vía el mef, tiene implícito tres tipos de aproximación. La primera se relaciona con la definición del dominio (física y geométrica) del problema, las otras dos están asociadas a la discretización de las ecuaciones gobernantes, y a los algoritmos empleados en la solución del sistema de ecuaciones algebraicas simultáneas resultante.

Las aproximaciones usadas en la definición de las características físicas de las diferentes regiones del dominio, depende fundamentalmente del tipo de problema a resolver. Sin embargo, la definición geométrica del dominio requiere el establecimiento de ejes coordenados globales en referencia a los cuales se describen las coordenadas de ciertos puntos (nodos), los cuales, a su vez, definen las ecuaciones de las líneas, superficies y/o volumen de los elementos. Este sistema coordenado no necesita ser rectangular y cartesiano, para algunos problemas específicos, resulta más adecuado utilizar algún tipo de sistema coordenado curvilíneo.

El dominio puede ser limitado o no (ciertos dominios se extienden hasta el infinito). Para regiones limitadas del dominio, la idealización se realiza mediante elementos finitos y para las partes de la región ilimitadas, se usan elementos infinitos p elementos de contorno. Muchas veces el dominio entero está constituido de subdominios, como el caso de

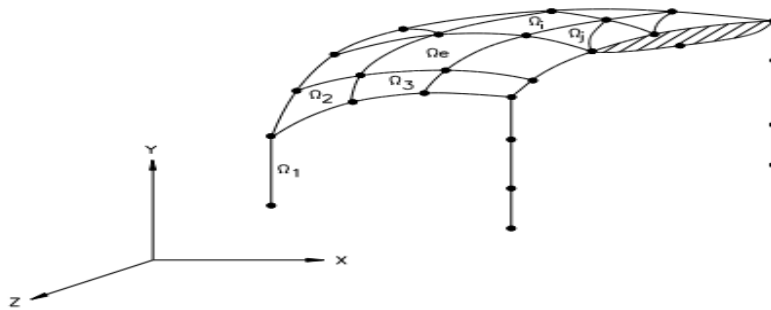
problemas de interacción. Las condiciones de interfaz entre subdominios deben ser definidas, también, a priori de la discretización.

### **Discretización del dominio.**

Puesto que usualmente el problema está definido sobre un dominio continuo, las ecuaciones gobernantes de un problema, con excepción de las condiciones de contorno, son válidos tanto en todo el dominio como en cualquier parte de él. Esto permite idealizar el dominio a través de regiones del tamaño finito (elementos), interconectados de diferentes forma y tamaño, tal como se muestra en la Fig. 17.

### **Identificación de la(s) viable(s) de estado.**

Hasta el momento no se ha hecho referencia a la naturaleza física del problema ya que las tapas anteriores son comunes a cualquier tipo de problema, ya sea este de transferencia de calor, de la mecánica de los fluidos, de la mecánica de los fluidos, de la mecánica de los sólidos, etc.



**Figura 17:** Discretización del dominio con diferentes elementos finitos.

**Fuente:** Universidad Rafael Urdaneta, Maracaibo-Venezuela.

### **Formulación del problema.**

Frecuentemente un problema físico esta formulado a través de un conjunto de ecuaciones diferenciales con sus correspondientes condiciones de contorno, o mediante una ecuación integral (un funcional) sujeto a un requerimiento estacionario (máximo o mínimo). En el primer caso se dice que el problema físico está referido a su forma

diferencial y en el segundo, a su forma variacional. En ambos casos se llega al mismo resultado. En este texto se presentarán las dos formulaciones como forma de establecer las ecuaciones de los elementos.

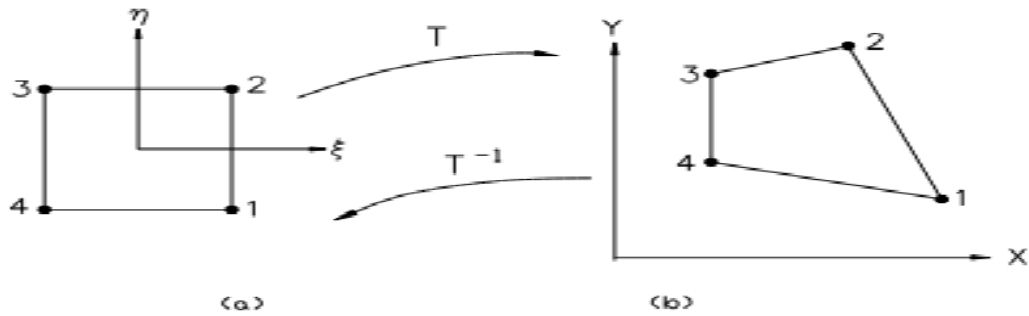
### **Establecimiento de los sistemas de referencia.**

Además de los ejes globales de referencia del sistema completo, existen dos importantes razones para seleccionar, adicionalmente, un sistema de referencia local para los elementos: la facilidad con la que se integra en el interior de los mismos, con respecto al sistema local de cada elemento en particular. Sin embargo, puesto que los elementos se ensamblan en el sistema global de referencia, este paso introduce una transformación de coordenadas.

A pesar que todos los cálculos en el mef se pueden realizar directamente en el sistema global, este procedimiento es muy complicado para cualquier problema de interés práctico y, puesto que la transformación de coordenadas entre cualquiera dos sistemas coordenados está bien definida y es una operación matemáticamente sencilla, se deben deducir las ecuaciones de elementos con relación a su sistema local de referencia el cual puede ser cartesiano o curvilíneo, dependiendo de la forma de un elemento dado. En la figura. 18, se muestra un elemento bidimensional y los sistemas globales y local de referencia.

### **Construcción de las funciones de aproximación de los elementos.**

Una vez que se ha seleccionado el sistema coordenado local y la(s) variable(s) de estado, éstas pueden ser aproximadas de diferentes formas. En el mef, la aproximación tanto del dominio del problema como de las variables involucradas en el mismo se realiza mediante funciones algebraicas.



**Figura 18:** Sistemas de referencia usados en el método de los elementos finitos.

(a) Sistema local de referencia; (b) Sistema global de referencia.

**Fuente:** Universidad Rafael Urdaneta, Maracaibo-Venezuela.

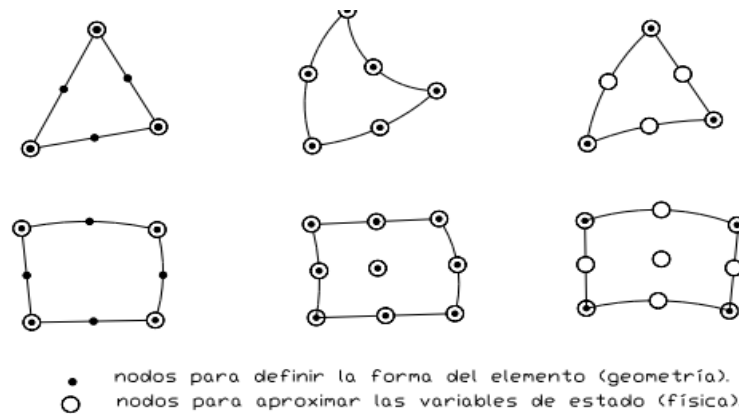
Si el elemento es plano o de lados rectos, las coordenadas de los nodos primarios (los que están localizados en los extremos de los elementos), definirían la forma del mismo. Debido a esto, las discretizaciones del dominio muchas veces se realizan mediante elementos de lados rectos. Sin embargo, para algunos problemas estos elementos pueden producir errores inaceptables y la discretización debe ser realizada con elementos de orden superior, como los que se muestran en la figura. 19.

#### **Determinación de las ecuaciones a nivel de cada elemento.**

A esta altura el modelaje del problema se ha completado. Usando algún modelo matemático, se debe establecer, a continuación, sobre cada elemento, las ecuaciones discretas del problema continuo. Este paso involucra la determinación de la llamada matriz de rigidez de cada elemento con respecto a su sistema local de referencia.

#### **Transformación de coordenadas.**

Una vez determinadas las matrices de rigidez de todos los elementos que conforman la discretización del dominio del problema, y antes de proceder al ensamblaje de todas estas matrices, para así obtener el comportamiento de todo el sistema, es necesario realizar la transformación de coordenadas, que permita transformar las matrices de rigidez de los elementos, desde sus respectivos ejes coordenados locales, al sistema global de referencia.



**Figura 19:** Ejemplos de elementos finitos subparamétricos, isoparamétricos y superparamétricos.

**Fuente:** Universidad Rafael Urdaneta, Maracaibo-Venezuela.

### **Ensamblaje de las ecuaciones de los elementos.**

El ensamblaje de las matrices de las ecuaciones de los elementos se realiza de acuerdo con la configuración topológica de los mismos, después que estas han sido transformadas al sistema global de referencia. Dicha configuración se obtiene a través del establecimiento de una relación entre la numeración local de los nodos de los elementos, y la numeración global de los mismos. El ensamblaje se efectúa considerando únicamente los nodos de las interfaces, los cuales son comunes a los elementos adyacentes. La matriz resultante se denomina matriz global del sistema.

### **Introducción de las condiciones de contorno.**

En este paso se introducen las condiciones de contorno en la matriz global del sistema, con lo cual esta matriz se podrá reducir o condensar a su forma final, aun cuando en algunos casos se prefiere, para no añadir nuevos algoritmos a la solución del problema, dejar el sistema global con su tamaño inicial. Existen algunos algoritmos más refinados que permiten introducir las condiciones de contorno en el paso anterior, con lo cual se reduce tanto el tiempo de ejecución como la memoria requerida, pero dichos algoritmos requieren una programación muy diestra.

### **Solución del sistema de ecuaciones resultantes.**

Independientemente de la naturaleza del problema, el paso final en la solución de un problema mediante el MEF, lo constituye la resolución del sistema de ecuaciones simultáneas resultantes. Debido a la naturaleza determinística del MEF. Los procedimientos de solución de dichos sistemas se pueden clasificar en dos grupos: (a) los métodos directos, tales como los métodos de Gauss y de factorización de Cholesky, los cuales son los más utilizados para sistemas de ecuaciones pequeños o moderados y (b) los métodos iterativos, tales como los métodos de Gauss-Seidel y el de Jacobi, los cuales, a su vez, son más apropiados para sistemas de grandes órdenes. En estos métodos, el tiempo de solución es considerablemente menor que en los métodos directos. Sin embargo, no son adecuados en problemas con múltiples sistemas de cargas, como los que frecuentemente se encuentran en la mecánica de los sólidos. Cuando el sistema de ecuaciones es no-lineal, los procedimientos de solución utilizados son el método de Picard, el método de Newton-Raphson y variaciones del método de Newton (Broyden, quasi-Newton, etc.).

### **Interpretación de los resultados.**

Con la resolución del sistema de ecuaciones se obtienen los valores aproximados de la(s) variable(s) en los puntos discretos (nodos) del dominio. Generalmente, estos valores son interpretados y usados en el cálculo de otras cantidades físicas, tales como los esfuerzos, deformaciones, el flujo de calor, etc., en todo el dominio, o en ciertas partes del mismo. Estos cálculos posteriores se conocen con el nombre de pos-procesamiento.

La comparación de los resultados obtenidos con la evidencia experimental u otros resultados numéricos es, tal vez, una de las tareas más importantes del MEF, ya que debe darse respuesta a las siguientes preguntas: ¿Cuán buenos son los resultados? ¿Qué hacer con ellos? La respuesta a la primera se requiere de la estimación del error y la segunda involucra la naturaleza física del problema. Las respuestas a estas preguntas permitirán decidir si el análisis ha llegado a su fin, o si, por el contrario, se requiere la repetición de algunos de los pasos descritos. En algunos casos, el nuevo análisis comienza en el mismo paso 1.

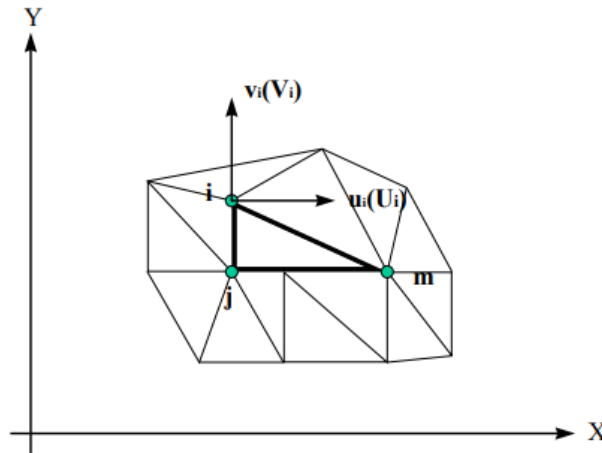
Estos doce puntos completan los pasos necesarios para el análisis de un sistema mediante el mef.

### 2.2.10.2 Aplicaciones del método.

La forma más intuitiva de comprender el método, al tiempo que la más extendida, es la aplicación a una placa sometida a tensión plana. El MEF se entender, desde un punto de vista estructural, como una generalización del cálculo matricial de estructural al análisis de sistemas continuos. De hecho el método nació por evolución de aplicaciones a sistemas estructurales.

Un elemento finito  $e$  viene definido por sus nodos  $(i, j, m)$  y por su contorno formado por líneas que los unen (Ver figura 20). Los desplazamientos  $\mathbf{u}$  de cualquier punto del elemento se aproximan por un vector columna  $\bar{\mathbf{u}}$ .

$$\bar{\mathbf{u}} = N_i \mathbf{a}_i^e = \begin{bmatrix} N_i & N_j & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{a}}_i^e \\ \bar{\mathbf{a}}_j^e \\ \dots \end{bmatrix} = N \mathbf{a}^e \quad (\text{ec. 7})$$



**Figura 20:** Coordenadas nodales  $(i, j, k)$  y desplazamientos de los nodos.

Fuente: Frías Valero (2.004).

### **2.3 Definición de Términos Básicos**

**SMAW:** Shield Metal Arc Welding

**AISI:** American Iron and Steel Institute

**mm:** Milímetros

**MPa:** Mega Pascal

**ZAC:** Zona afectada por el cordón de soldadura

**CS:** Cordón de soldadura

**MB:** Material Base

**MEF:** Modelo de elemento finito

**IIW:** Instituto Internacional de Soldadura

**MIG:** Metal Inert Gas

**MAG:** Metal Active Gas

**TIG:** Tungsten Inert Gas

**AWS:** American Welding Society

**GMAW:** Gas Metal Arc Welding

## CAPÍTULO III

### MARCO METODOLÓGICO

#### **3.1 Tipo de investigación**

Según Palella Santa y Martins Feliberto (2012) “La investigación experimental es aquella según la cual el investigador manipula una variable experimental no comprobada, bajo condiciones estrictamente controladas. Su objetivo es describir de qué modo y porque causa se produce o puede producirse un fenómeno. Busca predecir el futuro, elaborar pronósticos que una vez confirmados, se convierten en leyes y generalizaciones tendentes a incrementar el cúmulo de conocimientos pedagógicos y el mejoramiento de la acción educativa” y “La investigación documental se concreta exclusivamente en la recopilación de información en diversas fuentes. Indaga sobre un tema en documentos-escritos u orales-uno de, los ejemplos más típicos de esta investigación son las obras de historia” En este caso la investigación es documental y experimental, ya que se necesitó de referencias previas y se realizó una simulación mediante el método de elementos finitos que contiene en ella datos del material antes y después de ser soldados con el proceso de soldadura SMAW.

#### **3.2 Nivel de la investigación.**

El trabajo de investigación fue de nivel descriptivo ya que busca medir con la mayor precisión posible los distintos fenómenos a presentes en el trabajo, buscando verificar que tan aproximados son las propiedades y características del material luego de ser sometido al proceso de soldadura, utilizando criterios definidos previamente, teniendo en cuenta que es esencial el reconocimiento de los niveles a estudiar, durante el tiempo destinado a la realización de la investigación. Según Arias F. (2012): “La investigación descriptiva consiste en la caracterización de un hecho, fenómeno, individuo o grupo, con el fin de establecer su estructura o comportamiento. Los resultados de este tipo de investigación se ubican en un nivel intermedio en cuanto a la profundidad de los conocimientos se refiere.”

### **3.3 Diseño de investigación**

Según Palella Santa y Martins Feliberto (2012) El diseño de investigación se refiere a la estrategia que adopta el investigador para responder al problema, dificultad o inconveniente planteado en el estudio. En atención al diseño, la Investigación se clasifica en: documental, experimental y de campo.”

El diseño de investigación que identificó este trabajo, es el de tipo experimental y de campo ya que busca controlar variables, para describir la situación y hechos que se pueden presentar, estableciendo un comportamiento de dicho conjunto de variables y así lograr establecer los parámetros para simular las juntas soldadas, con el fin de observar el comportamiento mecánico y de esta manera realizar el análisis comparativo con los tipos de electrodo que conviene más utilizar y con los datos reales obtenidos previamente.

### **3.4 Población y muestra**

Según Palella Santa y Martins Feliberto (2012) “la población de una investigación es el conjunto de unidades de las que se desea obtener información sobre las que se van a generar conclusiones. La población puede ser definida como el conjunto finito o infinito de elementos, personas, o cosas pertinentes a una investigación que generalmente suele ser inaccesible” y “afirma que la muestra representa un subconjunto de la población, accesible y limitado sobre el que realizamos las mediciones o el experimento con la idea de obtener conclusiones generalizables a la población.” En este caso se definió como población el acero al Carbono y como muestra tenemos el acero AISI 1010.

### **3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.**

Según Palella Santa y Martins Feliberto (2012) “las técnicas de la investigación son las distintas maneras, formas o procedimientos utilizados por el investigador para recopilar u obtener los datos o la información que requiere. Constituye el camino hacia el logro de los objetivos planteados para resolver el problema que es investiga” a su vez “Un instrumento de recolección de datos es cualquier recurso, dispositivo o formato (en papel o digital) que se utiliza para obtener, registrar o almacenar información”.

La técnica que se empleó para recolectar la información fue la de observación directa, y se obtuvo la información mediante la data de los ensayos destructivos y no destructivos.

### **3.7 Fases de Desarrollo de la Investigación**

El desarrollo de la presente investigación estuvo comprendido por una serie de fases que permitirán dar respuesta a los objetivos planteados en un determinado orden, brindando a los investigadores una herramienta para la planificación y mejor aprovechamiento del tiempo dedicado al proyecto.

**Fase I: Estudiar de forma detallada los resultados experimentales obtenidos previamente.**

El análisis documental constituye la tarea preparatoria del estudio, donde se estudió los resultados obtenidos de forma experimental del material con diversos electrodos, esta labor consistió en la prospección y síntesis de las fuentes documentales disponibles sobre el tema. Para tal fin, se acudió a sitios de internet, trabajos de grado y consultas con especialistas en el área y en los softwares, entre otras actividades desarrolladas. En este análisis documental se incluyó la búsqueda y selección de las herramientas de simulación a escoger entre las opciones factibles encontradas.

**Fase II: Crear modelos numéricos usando un software comercial y análisis de los respectivos resultados**

Ya seleccionado el programa computarizado ANSYS como la herramienta de simulación a utilizar se procedió al estudio y aprendizaje de estas para la realización de la programación de los modelos matemáticos junto con los datos de entrada del Acero AISI 1010 y los electrodos a distintas intensidades de corriente, E-6010(80A, 100A, 120A), E-6013 (80A, 100A, 120A) y E-7018(90A, 120A, 150A) ya escogidos.

**Fase III: Analizar por medio de una simulación que configuración conlleva a mayores esfuerzos en el cordón de soldadura sobre el Acero AISI 1010**

Con el modelo matemático ya definido se procedió a analizar el comportamiento del material acero AISI 1010 soldado por el proceso SMAW, Se pudo observar el

comportamiento del material bajo las distintas configuraciones a simular y así concluir cómo influyeron dichos electrodos sobre las propiedades de las uniones soldadas.

**Fase IV: Verificar mediante el software los resultados obtenidos con resultados experimentales previos.**

Luego de haberse realizado la simulación, y tener en un cuadro todos los resultados se procedió a compararlos con los valores obtenidos experimentalmente.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS

#### 4.1 Estudiar de forma detallada los resultados experimentales obtenidos previamente.

En esta parte de la investigación se muestra los resultados experimentales de forma detallada del trabajo de grado utilizado como base.

Santo G, Fajardo J (2017), estudiaron experimentalmente la influencia del tipo de revestimiento del electrodo sobre la sensibilidad al agrietamiento en caliente de una junta de acero AISI 1010 estudiada en función de la intensidad de corriente y voltaje.

**Determinar el comportamiento mecánico en tracción y dureza en uniones soldadas de acero al carbono AISI 1010 en función de la intensidad de corriente y el voltaje.**

#### Ensayos de tracción.

A partir de los ensayos realizados para el Acero AISI 1010 por Santos Gilberto y Fajardo Javier en el Laboratorio de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo se puede observar en la figura 21 que los valores obtenidos para el esfuerzo de fluencia y esfuerzo máximo (esfuerzo de ruptura) cumplen con lo establecido en los valores teóricos de la norma ASTM A 1010/A 1010M lo cual son como mínimos,  $\sigma_y = 250\text{MPa}$  y  $\sigma_{max} = 440\text{MPa}$ .

Intensidades de corriente (Amp)	6010 80 Amp	6010 100 Amp	6010 120 Amp	6013 80 Amp	6013 100 Amp	6013 120 Amp	7018 90 Amp	7018 120 Amp	7018 150 Amp
Esf. Fluencia (MPa)	241,6	268,8	234,3	259,4	259,4	265,7	258,4	235,3	247,5
Esf. Máximo (MPa)	318,5	336,8	314,8	328,5	325,3	320,0	326,3	312,7	329,5
Esf. Rotura (MPa)	242,6	245,4	229,0	245,8	241,6	234,3	239,5	229,0	242,6

**Figura 21:** Ensayos de Tracción.

Fuente: Santo G. y Fajardo J. (2017).

Para los diferentes parámetros de soldadura estudiados se observó que los valores arrojados para los esfuerzos tales como, esfuerzo de fluencia, esfuerzo máximo y de ruptura, fueron similares a los arrojados por los ensayos realizados al material base, lo que nos indica que la soldadura en sus diversos parámetros no fue influyente al momento de realizar el ensayo de tracción.

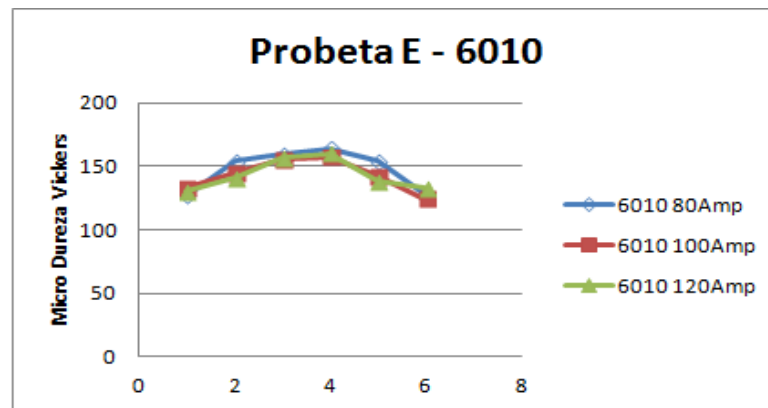
### Microdureza Vickers.

A continuación, se presentan los ensayos realizados de dureza en las probetas soldadas (Ver figuras 22, 23, 24, 25, 26, 27).

Intensidades de corriente (Amp)	MB I (Hv)	ZA I (Hv)	CS1 (Hv)	CS2 (Hv)	ZA D (Hv)	MB D (Hv)
80	127	154	160	164	154	128
100	133	145	155	157	142	124
120	130	141	157	160	138	133

**Figura 22:** Ensayo de microdureza Vickers para probetas con electrodo E-6010.

Fuente: Santo G. y Fajardo J. (2017).



**Figura 23:** Gráfico ensayo de microdureza Vickers para probetas con electrodo E-6010.

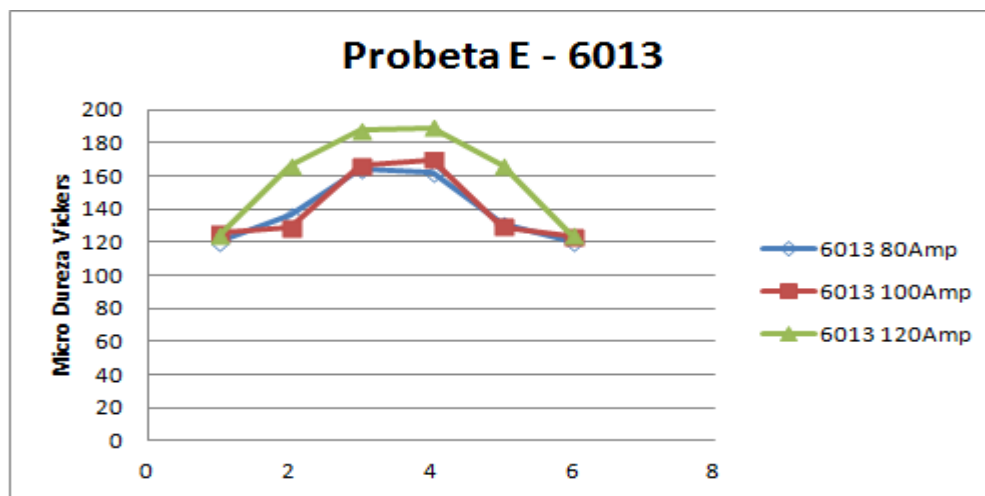
Fuente: Santo G. y Fajardo J. (2017).

Se observó que en la zona cercana al cordón de soldadura la dureza del material aumenta.

<b>Intensidades de corriente (Amp)</b>	<b>MB I (Hv)</b>	<b>ZA I (Hv)</b>	<b>CS1 (Hv)</b>	<b>CS2 (Hv)</b>	<b>ZA D (Hv)</b>	<b>MB D (Hv)</b>
80	120,3	136,3	164	162	131,3	120,6
100	126	128,6	166	170	129,3	123,3
120	124,6	166	187,6	189	166	124

**Figura 24:** Ensayo de Microdureza Vickers para probetas con electrodo E-6013.

Fuente: Santo G. y Fajardo J. (2017).



**Figura 25** Gráfico ensayo de microdureza Vickers para probetas con electrodo E-6013.

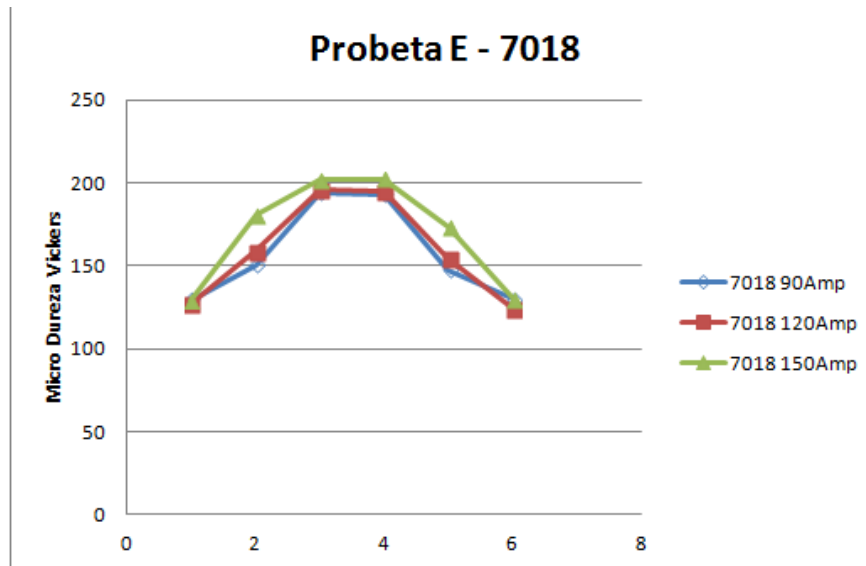
Fuente: Santo G. y Fajardo J. (2017).

Se observó que en la zona cercana al cordón de soldadura la dureza del material aumenta.

<b>Intensidades de corriente (Amp)</b>	<b>MB I (Hv)</b>	<b>ZA I (Hv)</b>	<b>CS1 (Hv)</b>	<b>CS2 (Hv)</b>	<b>ZA D (Hv)</b>	<b>MB D (Hv)</b>
90	129,3	150,6	194	193	147,6	130
120	127	159	195,6	195	154,3	124
150	129	180,6	201,6	202	173,6	129,6

**Figura 26:** Ensayo de microdureza Vickers para probetas con electrodo E-7018.

Fuente: Santo G. y Fajardo J. (2017).



**Figura 27:** Gráfico ensayo de microdureza Vickers para probetas con electrodo E-7018.  
Fuente: Santo G. y Fajardo J. (2017).

Se observó que en la zona cercana al cordón de soldadura la dureza del material aumenta.

### **Análisis del Ensayo de Microdureza Vickers.**

Realizado el ensayo se pudo observar claramente que la mayor dureza se localiza en el cordón de soldadura para las tres intensidades de corriente en los tres distintos electrodos.

En todas las muestras se observó que a medida que se alejaban las indentaciones del cordón de soldadura se obtenían valores de dureza menores, debido a la influencia del calor generado por el proceso SMAW.

**Estudiar el comportamiento microestructural de las uniones soldadas de acero AISI 1010 mediante evaluación macroscópica en función de la intensidad de corriente y el voltaje.**

### **Evaluación macroscópica.**

Probeta soldada con electrodo E-6010 a 80 Amp: se visualizó un cordón de soldadura con fusión completa entre el material base, el cordón de la soldadura, sin presencia de discontinuidades y no presenta grietas.

Probeta soldada con electrodo E-6010 a 100 Amp: se visualizó un cordón de soldadura con fusión incompleta entre el material base, el cordón de la soldadura, sin presencia de discontinuidades y no presenta grietas.

Probeta soldada con electrodo E-6010 a 120 Amp: se visualizó un cordón de soldadura con fusión incompleta entre el material base, el cordón de la soldadura, sin presencia de discontinuidades y no presenta grietas.

Probeta soldada con electrodo E-6013 a 80 Amp: se visualizó un cordón de soldadura con fusión incompleta entre el material base y el cordón de la soldadura y sin presencia de discontinuidades.

Probeta soldada con electrodo E-6013 a 100 Amp: se visualizó un cordón de soldadura con fusión incompleta entre el material base y el cordón de la soldadura y sin presencia de discontinuidades.

Probeta soldada con electrodo E-6013 a 120 Amp: se visualizó un cordón de soldadura con fusión incompleta entre el material base y el cordón de la soldadura y sin presencia de discontinuidades.

Probeta soldada con electrodo E-7018 a 90 Amp: se visualizó un cordón de soldadura con fusión completa entre el material base, el cordón de la soldadura, sin presencia de discontinuidades y no presenta grietas.

Probeta soldada con electrodo E-7018 a 120 Amp: se visualizó un cordón de soldadura con fusión completa entre el material base, el cordón de la soldadura, sin presencia de discontinuidades y no presenta grietas.

Probeta soldada con electrodo E-7018 a 150 Amp: se visualiza un cordón de soldadura con fusión completa entre el material base, el cordón de la soldadura, sin presencia de discontinuidades y no presenta grietas.

#### **4.2 Crear modelos numéricos usando un software comercial y análisis de los respectivos resultados**

La idea de utilizar un software se basa en replicar de manera virtual el proceso de soldadura, incluyendo en el los cambios en las propiedades físicas del material, debido al

intercambio de calor que experimente la probeta, en esta fase se buscó desarrollar el modelo matemático, utilizando variables como lo son, el calor interno generado, la convección del ambiente a 30 °C, para obtener los esfuerzos resultantes de aplicar una fuerza constante de 25KN la cual fue estipulada debido a que es la fuerza más comúnmente utilizada en los ensayos de tracción, realizados en el trabajo de grado de Andrés Montaña y Cesar Mujica, Titulado “Influencia de la preparación de los bordes del metal base sobre las propiedades mecánicas y la microestructura en un acero AISI 1010 soldada por el proceso SMAW”.

Para la realización del modelo matemático fueron utilizados los softwares Autodesk Inventor 2015 y Ansys Workbench 2018 (Ver figura 28 y 29)

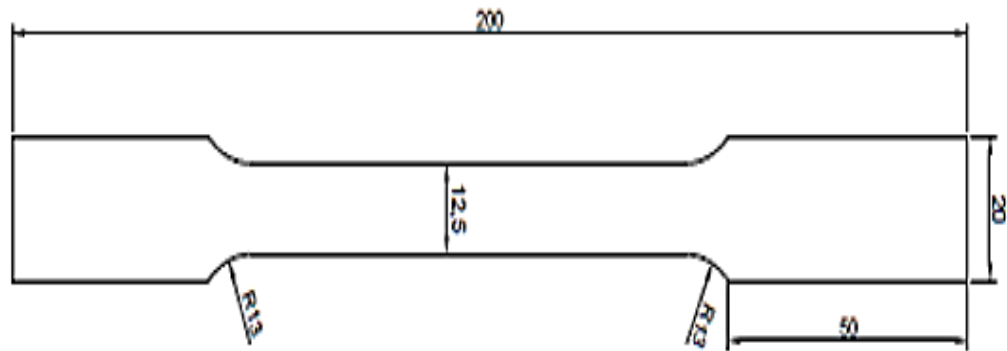


**Figura 28:** Pantalla inicial de Autodesk Inventor 2015  
**Fuente:** González, Sousa (2018)



**Figura 29:** Pantalla inicial de Ansys Workbench 2018  
**Fuente:** González, Sousa (2018)

Para la geométrica de la probeta se utilizó la norma de COVENIN 7:2-001, probeta tipo A-2, cuyas dimensiones se muestran en la figura 30 con un espesor 3 mm y utilizando como herramienta el software Inventor



**Figura 30:** Medidas de una probeta para ensayos de tracción

Fuente: COVENIN

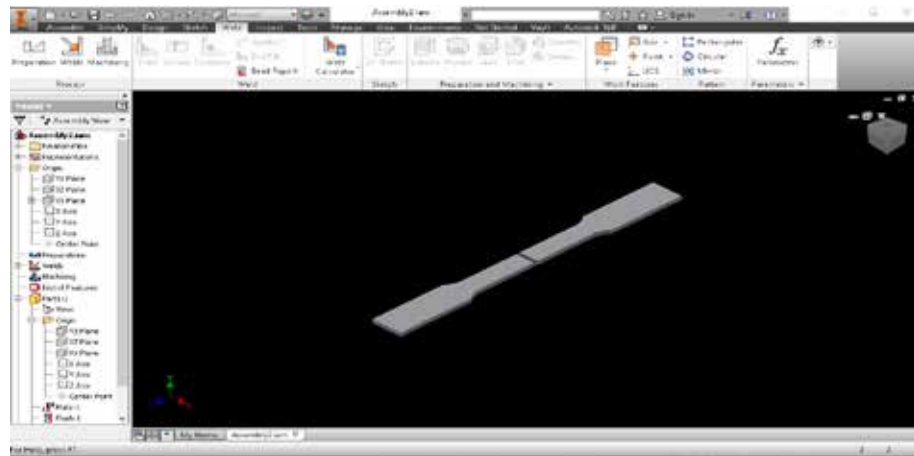
Paralelo a este proceso, se tabularon las propiedades de los materiales a simular, como lo son, el Acero al carbono AISI 1010 obtenidos de matweb y los electrodos E-6010, E-6013 y E-7018 que fueron conseguidos en el catálogo de electrodos revestidos de la Lincoln Electric que fueron ingresados en el software (Ver tabla 1).

**Tabla 1:** Propiedades de los Materiales

NOMBRE	DENSIDAD	ESFUERZO A FLUENCIA (MPA)	ESFUERZO ULTIMO (MPA)	MODULO DE ELASTICIDAD (GPA)	POISSON RATIO	CONDUCTIVIDAD TERMICA (W/m*K)
AISI 1010	7.87	305	365	205	0.29	49.8
E-6010	7.85	430	510	206	0.29	51.9
E-6013	7.85	440	540	210	0.30	51.9
E-7018	7.845	560	580	200	0.29	41.7

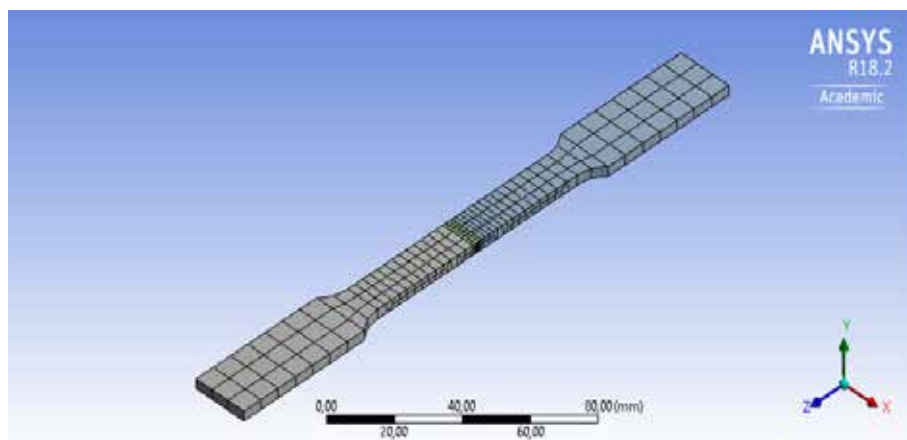
Fuente: González, Sousa (2018)

Seguidamente se exporto la probeta hacia el software Ansys en el que se desarrolló el CAE, en el que luego de introducir los materiales en las geometrías (Anexo A) correspondientes se procedió a desarrollar el mallado de la probeta (Ver figura 31 y 32)



**Figura 31:** Probeta en Autodesk Inventor 2015

Fuente: González, Sousa (2018)

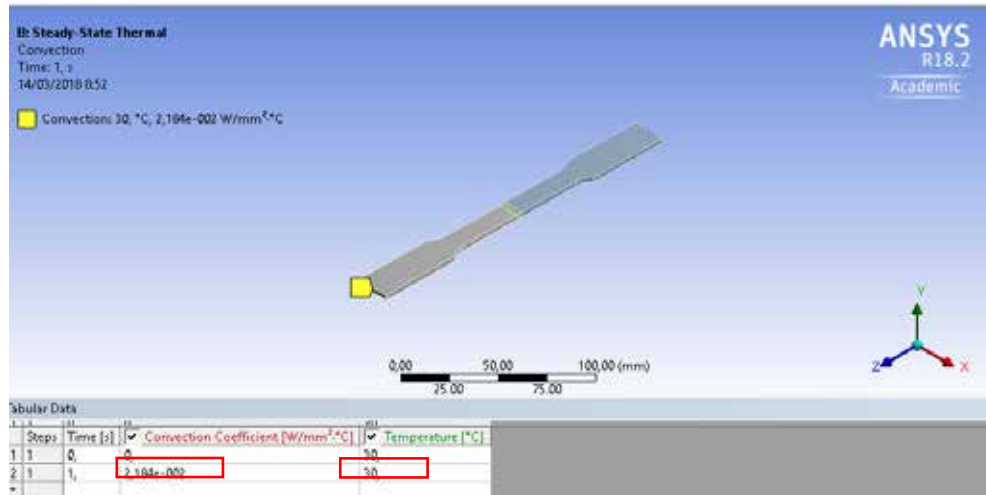


**Figura 32:** Probeta Importada en Ansys 2018

Fuente: González, Sousa (2018)

Para simular el proceso de soldadura se utilizó el estudio de Steady-State Thermal donde se estipulo un valor constante para una convección natural el cual fue 0.02184

$W/mm^2\text{°C}$  a una temperatura del ambiente  $30\text{°C}$ , dichos valores fueron obtenidos del libro “fundamentos de transferencia de calor” de Frank Incropera (Ver figura 33)



**Figura 33:** Parámetros del Steady-State Thermal

Fuente: González, Sousa (2018)

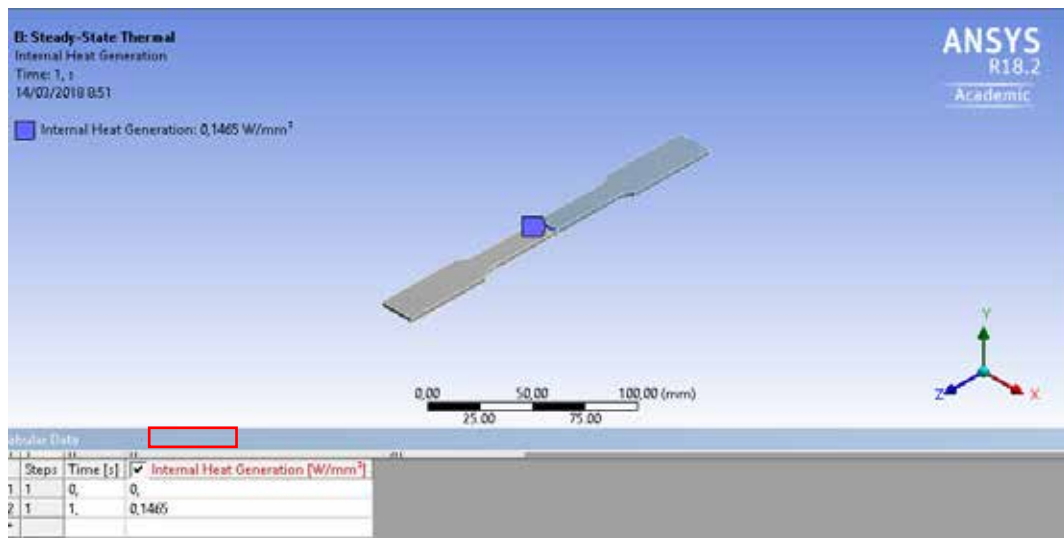
Así como también se tomó la variable generación de calor interna (internal heat generation) (Ver figura 34) que depende directamente del amperaje utilizado para la soldadura, multiplicado por el voltaje y dividido entre el volumen de la probeta, los distintos parámetros para la generación de calor interno se muestran en la tabla 2 y fueron introducidos como lo muestra el anexo B.

Según ensayos de campo realizados en el trabajo de grado de Kevin Bencomo y Robert Molina, titulado “Modelo para la predicción del comportamiento de la resistencia a la tracción de un cordón de soldadura (smaw) afectado por un defecto para un acero AISI 1010” los valores de los voltajes más favorables a utilizar van en el rango de 18V hasta 24.5V.

**Tabla 2:** Relación entre el Amperaje y el Internal Heat Generation

A=Amperaje(A)	E=Voltaje(V)	Volumen (mm <sup>3</sup> )	Internal Heat generation (W/mm <sup>3</sup> )
80	18	9829	0,146505245
90	19	9829	0,173974972
100	20	9829	0,203479499
120	22	9829	0,268592939
150	24	9829	0,366263099

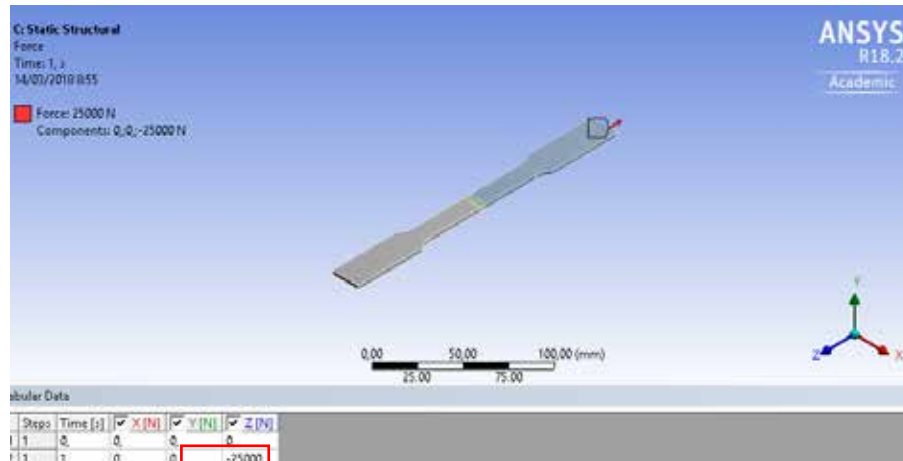
Fuente: González, Sousa (2018)



**Figura 34:** Internal Heat Generation

Fuente: González, Sousa (2018)

Para la segunda parte de la simulación se utilizó el estudio de static structural para obtener de manera directa los esfuerzos que sufre la probeta aplicando la fuerza de 25KN en un extremo y aplicando un soporte rígido en el otro (Ver figura 35)



**Figura 35:** Parámetros del Static Structural

Fuente: González, Sousa (2018)

Una vez introducidos todos los parámetros (Anexo B) se procedió a realizar el proceso de simulación en el cual se obtuvieron los esfuerzos equivalentes, con el proceso de soldadura muy aproximado a lo que representa un proceso perfecto, sin posibles condiciones ambientales o dependiente del soldador que pueda afectar de forma abrupta al cordón, basándonos en que el material tiene un 100% de soldabilidad afectando los parámetros del metal.

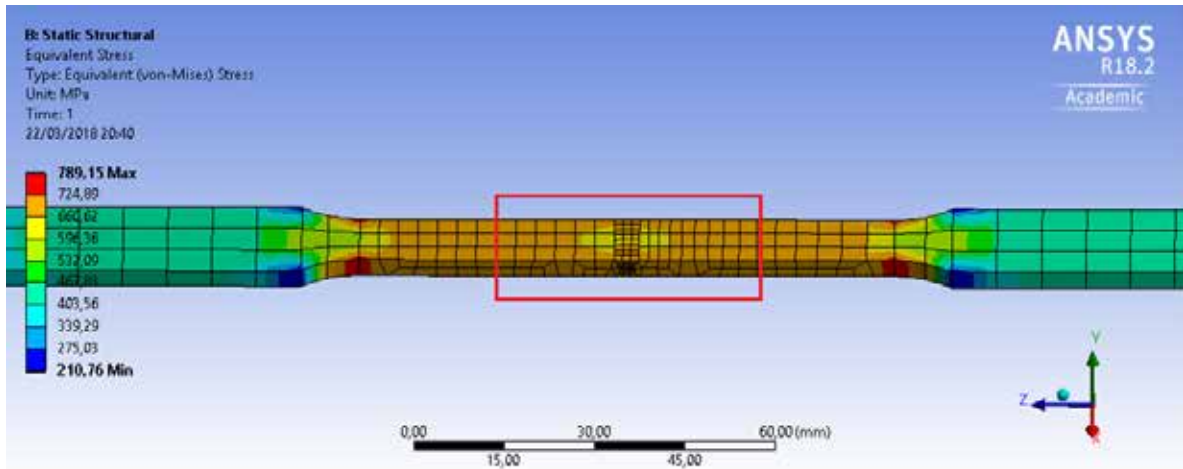
Es importante resaltar que este modelo matemático es única y exclusivamente para el material, condiciones y variables dadas.

#### **4.3 Analizar por medio de una simulación que configuración conlleva a mayores esfuerzos en el cordón de soldadura sobre el Acero AISI 1010**

Para la obtención de los resultados de los esfuerzos en la probeta, se utilizó únicamente el software ANSYS, tomando en cuenta los cambios térmicos debido a la soldadura sobre el material base donde se alteran sus propiedades iniciales.

Para ello se siguieron ciertos pasos comenzando por la asignación de los materiales a la geometría, tanto la del cordón de soldadura, como la del material base para que tengan las propiedades reales en cada una de ellas (Anexo A)

En la figura 36 se señala la sección de estudios para los esfuerzos equivalentes con la finalidad de estudiar las zonas adyacentes al cordón de soldadura.



**Figura 36:** Sección seleccionada para estudio de los esfuerzos equivalentes.  
**Fuente:** González, Sousa. (2018)

### Electrodo E-6010

Se simuló a los diferentes amperajes, en las tablas 3, 4, 5 se presentan los datos obtenidos para las diferentes condiciones estudiadas.

**Tabla 3:** Probeta E-6010-80A

	Amperaje	MB I	ZA I	CS 1	CS 2	ZA D	MB D
	80 A	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)
		666,93	676,48	697,66	695,21	676,63	666,95

**Fuente:** González, Sousa. (2018)

En la figura 37 se muestra la probeta soldada a 80A con los esfuerzos resultantes debido a la carga aplicada, mostrando además como está dividida en zonas indicando los esfuerzos para cada una.



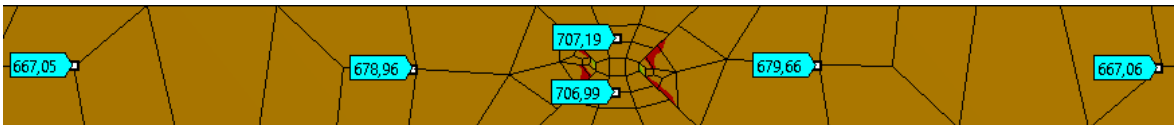
**Figura 37:** Probeta E-6010-80A, esfuerzos equivalentes por zona.  
**Fuente:** González, Sousa. (2018)

**Tabla 4:** Probeta E-6010-100A

	Amperaje	MB I	ZA I	CS 1	CS 2	ZA D	MB D
		Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)
		667,05	678,96	707,19	706,99	679,66	667,06

Fuente: González, Sousa. (2018).

En la figura 38 se muestra la probeta soldada a 100A con los esfuerzos resultantes debido a la carga aplicada, mostrando además como está dividida en zonas indicando los esfuerzos para cada una.



**Figura 38:** Probeta E-6010-100A, esfuerzos equivalentes por zona.

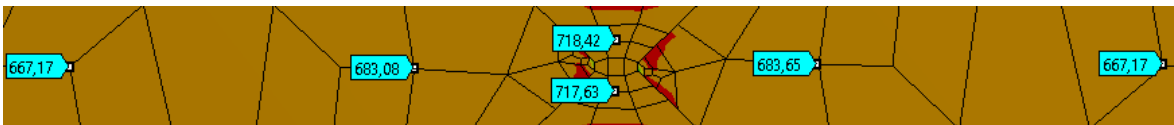
Fuente: González, Sousa. (2018).

**Tabla 5:** Probeta E-6010-120A

	Amperaje	MB I	ZA I	CS 1	CS 2	ZA D	MB D
	120 A	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)
		667,17	683,08	718,42	717,63	683,65	667,17

Fuente: González, Sousa. (2018).

En la figura 39 se muestra la probeta soldada a 120A con los esfuerzos resultantes debido a la carga aplicada, mostrando además como está la misma dividida en zonas indicando los esfuerzos para cada una.



**Figura 39:** Probeta E-6010-120A, esfuerzos equivalentes por zona.

Fuente: González, Sousa. (2018).

### Electrodo E-6013

Se simuló el ensayo de tracción a los diferentes amperajes, en las tablas 6, 7, 8 se presentan los datos obtenidos para las diferentes condiciones estudiadas.

En la figura 40 se muestra la probeta soldada a 80A con los esfuerzos resultantes debido a la carga aplicada, mostrando además dividida en zonas indicando los esfuerzos para cada una.

**Tabla 6:** Probeta E-6013-80A

	Amperaje	MB I	ZA I	CS 1	CS 2	ZA D	MB D
	80 A	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)
		666,94	675,95	697,4	697,41	676,16	666,95

Fuente: González, Sousa. (2018).



**Figura 40:** Probeta E-6013-80A, esfuerzos equivalentes por zona.

Fuente: González, Sousa. (2018).

**Tabla 7:** Probeta E-6013-100A

	Amperaje	MB I	ZA I	CS 1	CS 2	ZA D	MB D
	100 A	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)
		667,05	679,34	707,51	707,11	679,48	667,06

Fuente: González, Sousa. (2018).

En la figura 41 se muestra la probeta soldada a 100A con los esfuerzos resultantes debido mostrando además como está dividida en zonas indicando los esfuerzos para cada una.



**Figura 41:** Probeta E-6013-100A, esfuerzos equivalentes por zona.

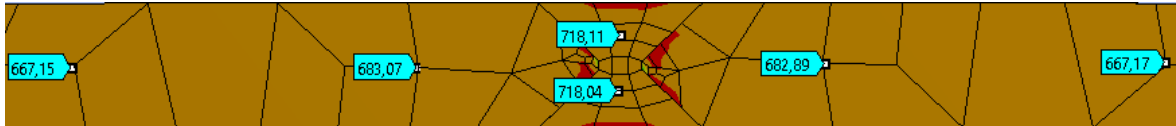
Fuente: González, Sousa. (2018).

**Tabla 8:** Probeta E-6013-120A

	Amperaje	MB I	ZA I	CS 1	CS 2	ZA D	MB D
	120 A	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)
		667,15	683,07	718,11	718,04	682,89	667,17

Fuente: González, Sousa. (2018).

En la figura 42 se muestra la probeta soldada a 120A con los esfuerzos resultantes debido a la carga aplicada, mostrando además como está dividida en zonas indicando los esfuerzos para cada una.

**Figura 42:** Probeta E-6013-120A, esfuerzos equivalentes por zona.

Fuente: González, Sousa. (2018).

### Electrodo E 7018

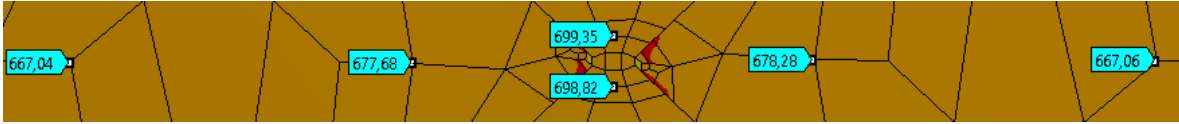
Se realizó la simulación del ensayo de tracción con el electrodo E-7018 a 90, 120 y 150 Amperes obteniendo una variación de los esfuerzos dependiendo del amperaje utilizado (Ver tabla 9, 10,11)

**Tabla 9:** Probeta E-7018-90A

	Amperaje	MB I	ZA I	CS 1	CS 2	ZA D	MB D
	90 A	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)
		667,04	677,68	699,35	698,82	678,28	667,06

Fuente: González, Sousa. (2018).

En la figura 43 se muestra la probeta soldada a 90A con los esfuerzos resultantes debido a la carga aplicada, mostrando además como está dividida en zonas indicando los esfuerzos para cada una.



**Figura 43:** Probeta E-7018-90A, esfuerzos equivalentes por zona  
**Fuente:** González, Sousa. (2018).

**Tabla 10:** Probeta E-7018-120A

	Amperaje	MB I	ZA I	CS 1	CS 2	ZA D	MB D
	120 A	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)
		667,2	683,07	715,14	713,66	683,61	667,25

**Fuente:** González, Sousa. (2018).

En la figura 44 se muestra la probeta soldada a 120A con los esfuerzos resultantes debido, mostrando además como está dividida en zonas indicando los esfuerzos para cada una.



**Figura 44:** Probeta E-7018-120A, esfuerzos equivalentes por zona  
**Fuente:** González, Sousa. (2018).

**Tabla 11:** Probeta E-7018-150A

	Amperaje	MB I	ZA I	CS 1	CS 2	ZA D	MB D
	150 A	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)
		667,38	688,91	731,72	731,41	689,06	667,41

**Fuente:** González, Sousa. (2018).

En la figura 45 se muestra la probeta soldada a 150A con los esfuerzos resultantes debido a la carga aplicada, mostrando además como está dividida en zonas indicando los esfuerzos para cada una.



**Figura 45:** Probeta E-7018-150A, esfuerzos equivalentes por zona.  
**Fuente:** González, Sousa. (2018).

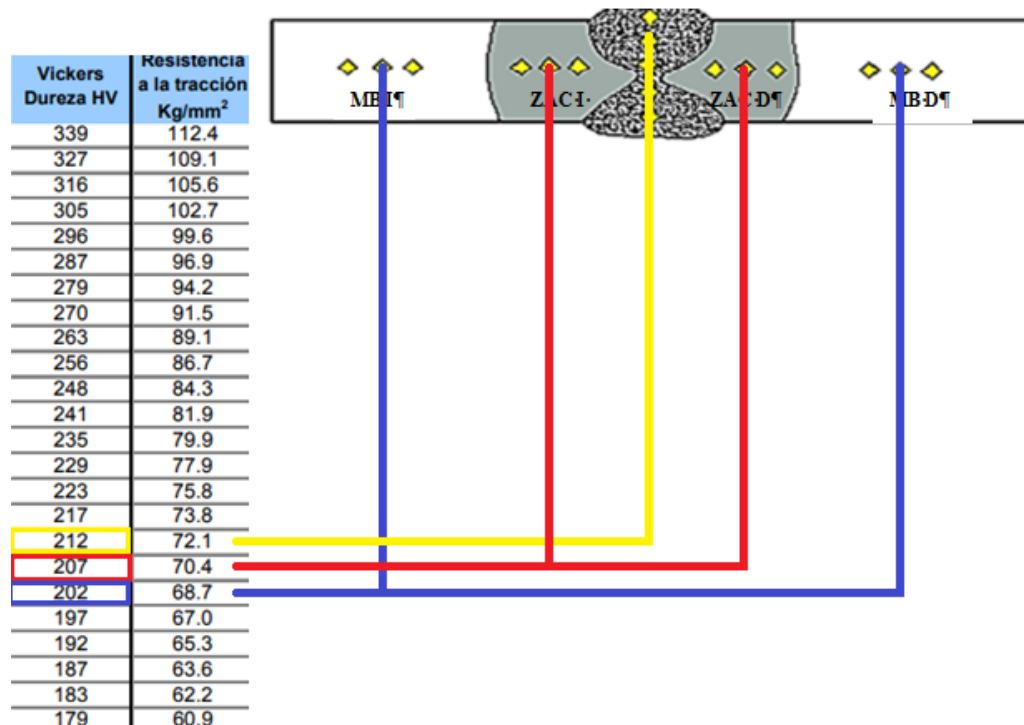
Para los diferentes parámetros de soldadura se pudo observar mediante la simulación los diferentes valores del esfuerzo equivalente según el electrodo. Estos esfuerzos son elevados debido a las condiciones con las que trabaja el software, ya que no se toma en cuenta la habilidad humana que pueda influir en el cordón o en su defecto simula la mejor forma de ser soldada. También se observó que en las probetas según los valores del amperaje y el voltaje varían los esfuerzos equivalentes, tomando en cuenta que las zonas afectadas por el calor cercanas a la soldadura presentan los menores esfuerzos, prediciendo así que la probeta fallara por esa zona, es decir, a menor esfuerzo más posibilidad de falla existe ya que la resistencia a la tracción es menor

#### **4.4 Verificar mediante el software los resultados obtenidos con resultados experimentales previos.**

Para esta fase se procedió a comparar los valores de dureza experimentales con los obtenidos a través de la simulación, para esto se separó la probeta por zonas, ellas son el metal base (MB), la zona afectada por el calor (ZAC) y en el cordón de soldadura (CS), tanto por la derecha como por la izquierda, como se indicó anteriormente.

Se tomaron los esfuerzos existentes obtenidos en la fase anterior, se convirtieron los valores de esfuerzos de MPa a  $\text{Kg/mm}^2$  y con una tabla de propiedades de equivalencias entre durezas y la resistencia a la tracción (Figura 46), se aproximó a la dureza de cada zona, obteniendo de esta forma los valores de dureza mediante la simulación, llamados dureza teórica, en los casos donde el esfuerzo no sea exactamente igual al de la tabla se procedió a interpolar

Una vez obtenidos los distintos valores de dureza por zona de la probeta se procedió a tabularlos por electrodo y por amperaje con la finalidad de comparar los valores de dureza teórica contra los valores de dureza obtenidos experimentalmente (ver tabla 12,13 ,14)



**Figura 46:** Procedimiento de selección en tabla propiedades mecánicas de los aceros al carbono según su dureza.

Fuente: González, Sousa (2018)

**Tabla 12:** Dureza según esfuerzos en las probetas soldadas con electrodo E-6010.

	Amperaje	Dureza Teórica en base a la simulación(Hv)					
		MB I	ZA I	CS 1	CS 2	ZA D	MB D
E-6010	80A	199,965	202,829	209,182	208,447	202,874	199,971
	100A	200	203,574	212,038	211,979	203,782	200,002
	120A	200,035	204,809	215,406	215,171	204,979	200,035

Fuente: González, Sousa. (2018).

Es posible observar que los mayores números de dureza se encuentran en el cordón de soldadura indicando que en esa zona la resistencia a la tracción es mayor como se mostró en los resultados anteriores, viendo una concordancia tanto con los valores arrojados por la simulación como con los experimentales que bien es cierto son más elevados pero el patrón

es el mismo, ya que las zonas adyacentes al cordón de soldadura son más susceptibles a fracturar debido a los grandes concentradores de esfuerzos que allí se encuentran y no por el mismo cordón.

**Tabla 13:** Dureza según esfuerzos en las probetas soldadas con electrodo E-6013.

	Amperaje	Dureza Teórica en base a la simulación(Hv)					
		MB I	ZA I	CS 1	CS 2	ZA D	MB D
E-6013	80A	199,968	202,671	209,103	209,106	202,732	199,971
	100A	200	203,685	212,135	212,015	203,729	200,003
	120A	200,029	204,806	215,315	215,294	204,75	200,035

Fuente: González, Sousa. (2018).

Se observa de igual manera que los mayores números de dureza se encuentran en el cordón de soldadura indicando que en esa zona la resistencia a la tracción es mayor como se mostró en los resultados anteriores, viendo una concordancia tanto con los valores arrojados por la simulación como con los experimentales que bien es cierto son más elevados pero el patrón es el mismo, ya que las zonas adyacentes al cordón de soldadura son más susceptibles a fracturar debido a los grandes concentradores de esfuerzos que allí se encuentran y no por el mismo cordón.

**Tabla 14:** Dureza según esfuerzos en las probetas soldadas con electrodo E-7018.

	Amperaje	Dureza Teórica en base a la simulación(Hv)					
		MB I	ZA I	CS 1	CS 2	ZA D	MB D
E-7018	90A	199,997	203,188	209,688	209,529	203,368	200,003
	120A	200,044	204,806	214,424	213,979	204,968	200,062
	150A	200,097	206,556	219,445	219,349	206,597	200,109

Fuente: González, Sousa. (2018)

Se observa que los mayores números de dureza se encuentran en el cordón de soldadura indicando que en esa zona la resistencia a la tracción es mayor como se mostró en los resultados anteriores, viendo una concordancia tanto con los valores arrojados por la simulación como con los experimentales que bien es cierto son más elevados pero el patrón es el mismo, ya que las zonas adyacentes al cordón de soldadura son más susceptibles a fracturar debido a los grandes concentradores de esfuerzos que allí se encuentran y no por el mismo cordón.

Las durezas obtenidas mediante la simulación son más elevadas a las experimentales, esto debido al proceso de aplicación de soldadura en la probeta ya que en el software no es posible considerar condiciones externas como las ambientales que afectan directamente al cordón, es decir, este proceso es un escenario aproximado a lo ideal, aumentando de esta manera la magnitud de los esfuerzos y su dureza. Además se muestra como a medida que el amperaje cambia los valores de durezas son mayores para todos los electrodos.

## CONCLUSIONES

Se puede decir que el revestimiento en el electrodo generó un cordón de soldadura estable, haciendo así que no se creen porosidades o escoria ya que el software cuenta con limitaciones, influyendo de tal manera en la simulación al no contar con imperfecciones.

Mediante el modelo matemático se logró establecer las mejores condiciones para simular un proceso de soldadura SMAW, estas condiciones fueron establecidas gracias a los parámetros utilizados, destacando la transferencia de calor existente en el proceso y la fuerza aplicada para obtener valores reales de los esfuerzos.

Se constató que cada electrodo según su amperaje logra cambiar los esfuerzos en las zonas de la probeta haciendo así que varíe su dureza y determinando cual electrodo funciona mejor para la situación que se requiera, tomando en cuenta que el electrodo E-7018 a un amperaje de 150A aporta una mayor resistencia a la tracción en la soldadura SMAW para el acero AISI 1010

La mayor resistencia a la tracción para cada probeta según el electrodo fue dada en la soldadura creando una consistencia según los ensayos destructivos que lo indican de igual manera, señalando así la precisión del software.

Gracias al software se logró obtener las durezas en las diferentes zonas de la probeta, cosa que en ensayos experimentales no se puede obtener de forma directa, necesitando saber otros factores como la temperatura y como varía la microestructura de la pieza determinado por los ciclos térmicos que sufre el material.

Mediante el software ANSYS se logra crear cada proceso de simulación facilitando el desarrollo de problemas de diseño, cálculo, entre otros, en un corto tiempo

## **RECOMENDACIONES**

Se recomienda tomar en cuenta las propiedades metalúrgicas para evitar trabajar solo en base a las propiedades físicas de los materiales

Se recomienda utilizar un tipo de software más especializado a lo que es el proceso de soldadura, como lo es Sysweld, ya que con el mismo se lograría obtener resultados más acordes a la realidad.

Es recomendable realizar la continuación del estudio desde el punto de vista microestructural, donde se puede observar que tipo de microestructura existe en cada zona de la probeta.

Se recomienda realizar el estudio con distintos tipos de acero a variando los valores de amperaje, con la finalidad de ver como varia el comportamiento con distintos aceros al carbono.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andrés Montaña y Cesar Mujica, Titulado

. Universidad José Antonio Páez, Valencia,  
Venezuela.

Askeland, Donald R. and Phule, Pradeep P. (2004). Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Editorial Thomson. 4ta Edición. D.F. México.

AWS Inspection Inspección de Soldadura y Certificación Tecnología de Inspección de Soldadura. Visto en <https://es.scribd.com/doc/139144819/AWS-Inspeccion-pdf> el 12/10/2017.

Beltrán Francisco (1999) Visto en <http://www.demecanica.com/TeoriaEst/archivos/TeoriaMEF.pdf> el 11/10/2017.

Bencomo Kevin, Molina Robert (2017)

Universidad José Antonio Páez, Valencia,  
Venezuela.

Buendía Juan (2013)

Visto en <https://comimsa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1022/89/1/Tesis%20Juan%20Francisco%20Buend%20C3%ADa%20G-SIN.pdf> el 08/10/2017.

Fajardo Javier, Santo Gilberto (2017). “

Universidad José Antonio Páez, Valencia, Venezuela.

Farfán Muñoz (2010)

Visto en el 12/10/2017

Fondo Editorial

Visto en <http://www.uru.edu/fondoeditorial/libros/pdf/elementosfinitos/CAP%201%20COMPLETO.pdf> el 10/10/2017

Groover, M. P. (2.007) Fundamentos de Manufactura Moderna. McGrawHill.  
Interamericana de México. 4ta Edición. D.F. México.

Indura S.A (2007) Visto en  
<http://www.indura.com.ar/Descargar/Manual%20de%20Soldadura%20INDURA?path=%2Fcontent%2Fstorage%2Far%2Fbiblioteca%2F57635ba3431f41aea58748d4662f578b.pdf> el 10/10/2017.

I.E.S Cristóbal de Monroy. Dpto. de Tecnología  
Visto en <https://tecnologiafuentenueva.wikispaces.com/file/view/Soldadura.pdf> el 10/10/2017.

Lincoln Electric. (2.015). Electroodos Revestidos Catalogo. San Vicente 1, Edo. Aragua  
Venezuela. Visto en <https://www.lincolnelectric.com.ve> 07/10/2017.

Parella Santa y Martins Feliberto (2012). Metodología de la investigación cuantitativa.  
Editorial Fedupel. 3ra Edición. Caracas

Pérez J., Terán J., Alonso E. y Martínez W. (2014).

. Instituto Mexicano del Transporte. Sanfandila, México. Visto en  
<http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt395.pdf> 09/10/2017.

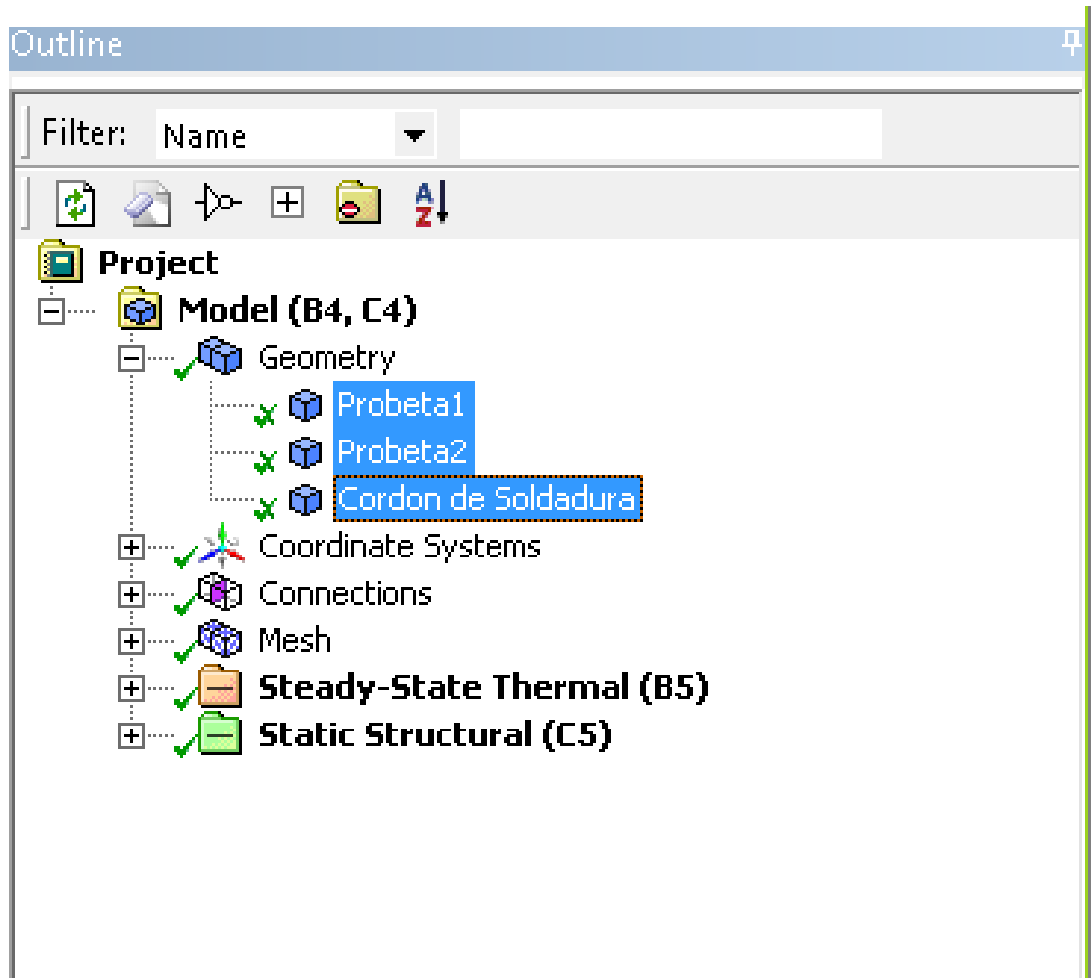
Rodríguez Adrián (2010)  
Visto en <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/11571#preview>  
el 13/10/2010.

Soldadura Protocolo. (2.008). Laboratorio de producción Facultad de Ingeniería. Industrial.  
1era Edición. Colombia.

Valentín Rubén, Barragán Carlos, Ramírez María (2012)  
Visto en  
[http://www.aepro.com/files/congresos/2012valencia/CIIP12\\_2198\\_2209.3880.pdf](http://www.aepro.com/files/congresos/2012valencia/CIIP12_2198_2209.3880.pdf) el 11/10/2017.

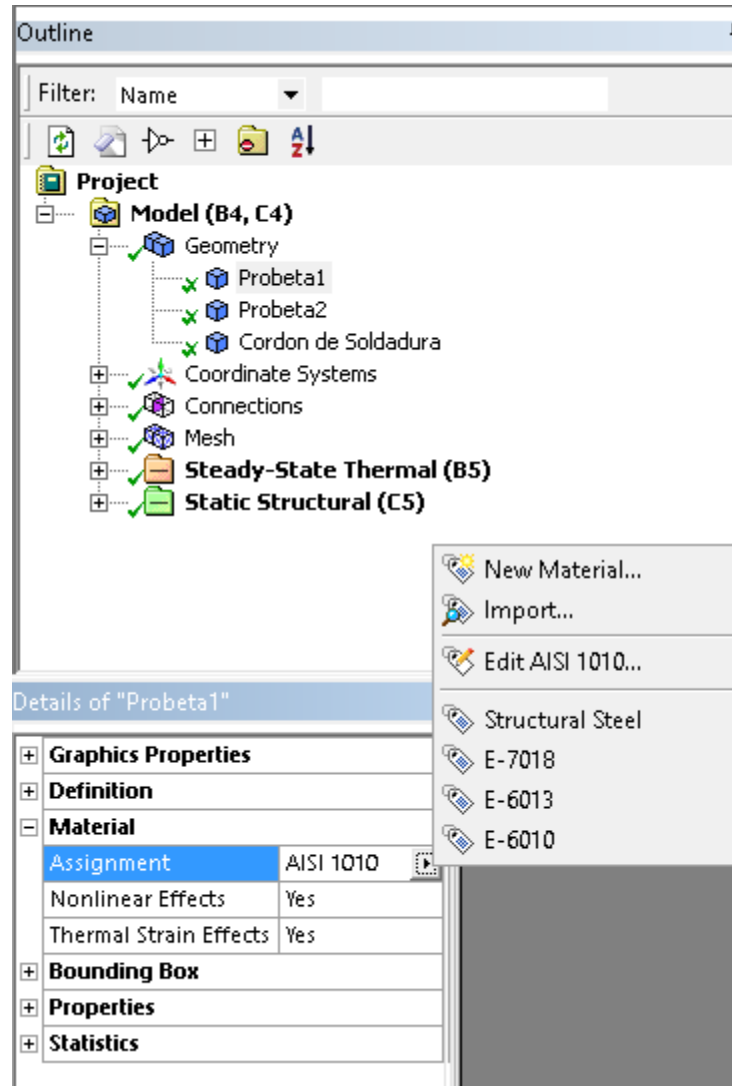
## **ANEXOS**

## ANEXO A



**Anexo A.1** Geometrías que conforman la probeta.

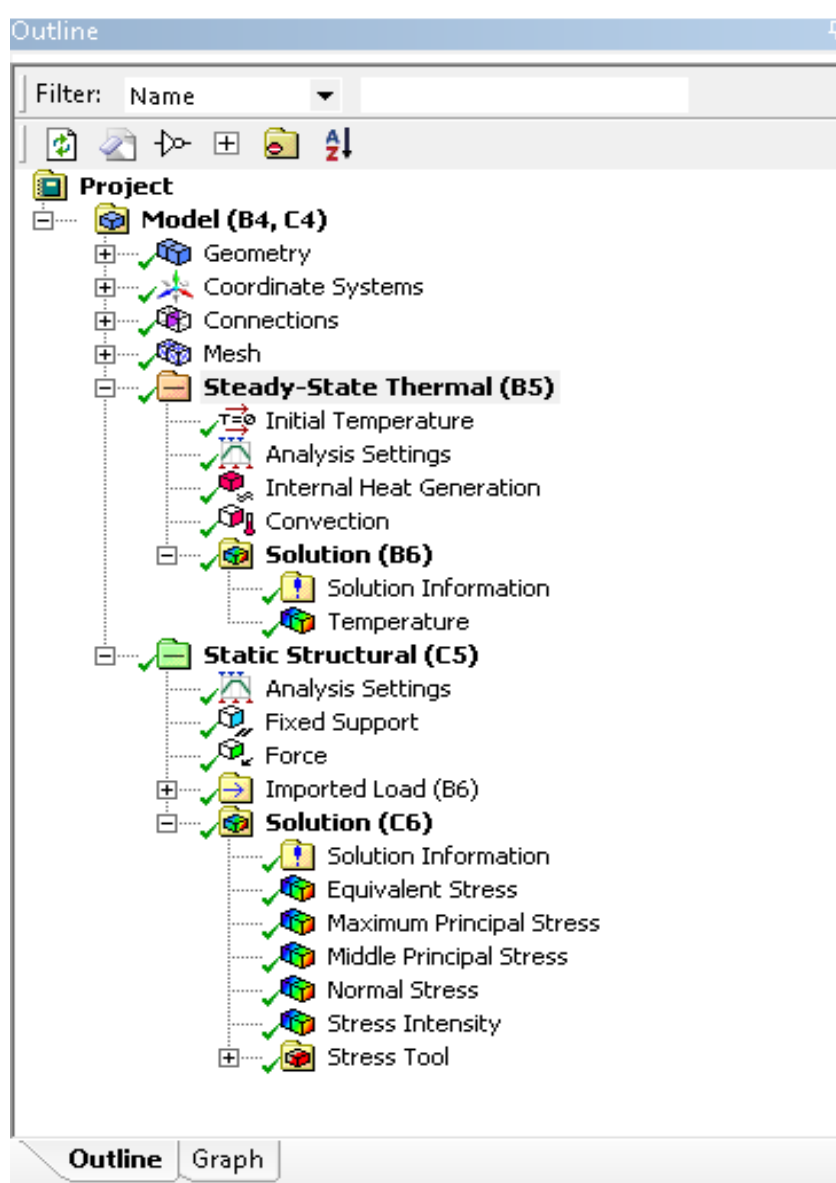
Fuente: González, Sousa. (2018)



**Anexo A.2** Selección de material para cada geometría.

Fuente: González, Sousa. (2018)

## ANEXO B



**Anexo B.1** Parámetros introducidos en la simulación.

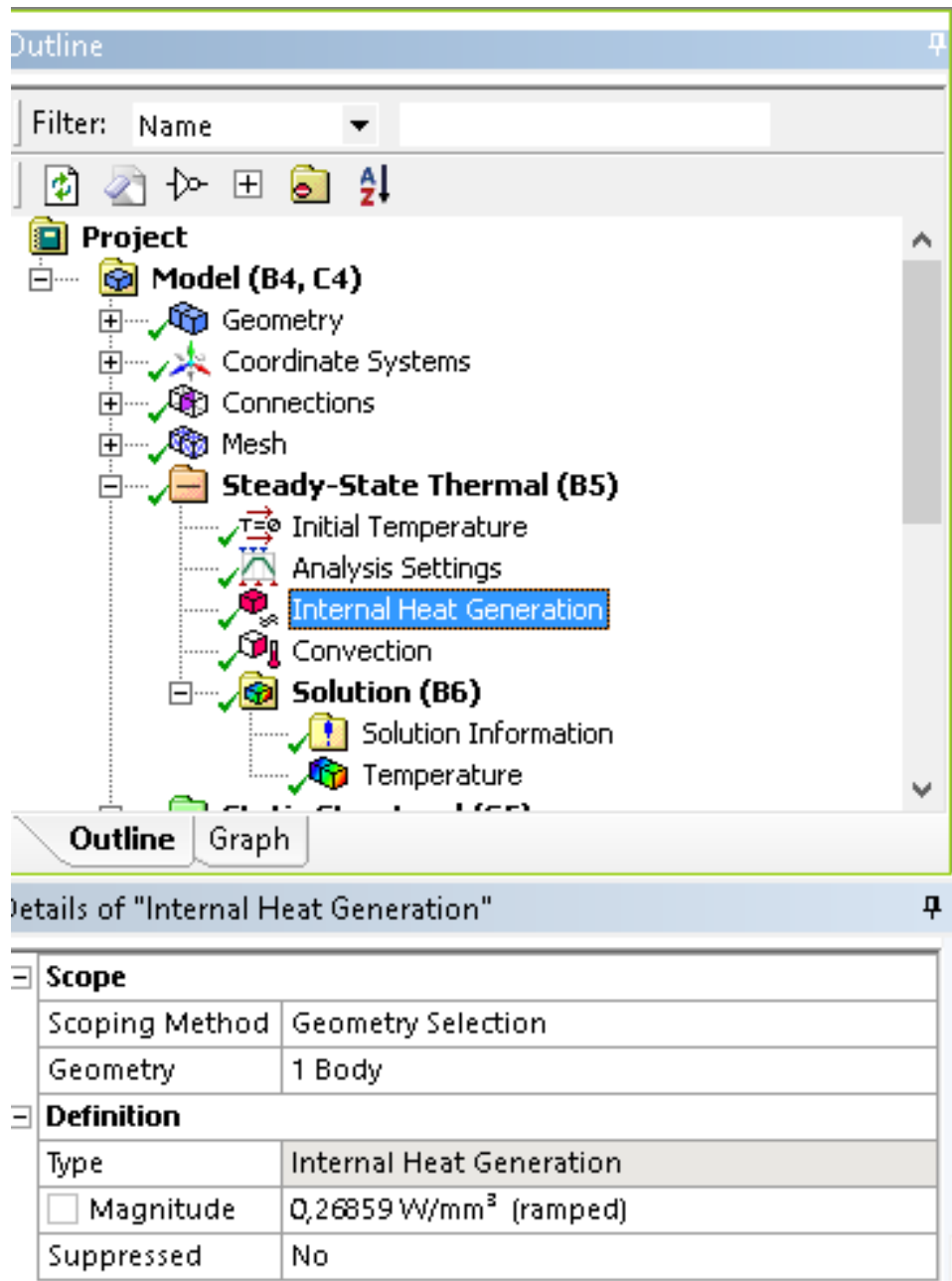
Fuente: González, Sousa. (2018).

The image shows the ANSYS Workbench software interface. The top part is the 'Outline' tree, which lists the project components: Project, Model (B4, C4), Geometry, Coordinate Systems, Connections, Mesh, Steady-State Thermal (B5), Initial Temperature, Analysis Settings, Internal Heat Generation, Convection (highlighted in blue), Solution (B6), Solution Information, Temperature, and Static Structural (C5). Below the tree are tabs for 'Outline' and 'Graph'. The bottom part of the image shows the 'Details of "Convection"' panel, which contains a table with the following data:

<b>Scope</b>	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	2 Faces
<b>Definition</b>	
Type	Convection
<input type="checkbox"/> Film Coefficient	2,184e-002 W/mm <sup>2</sup> .°C (ramped)
<input type="checkbox"/> Ambient Temperature	30, °C (ramped)
Convection Matrix	Program Controlled
Suppressed	No

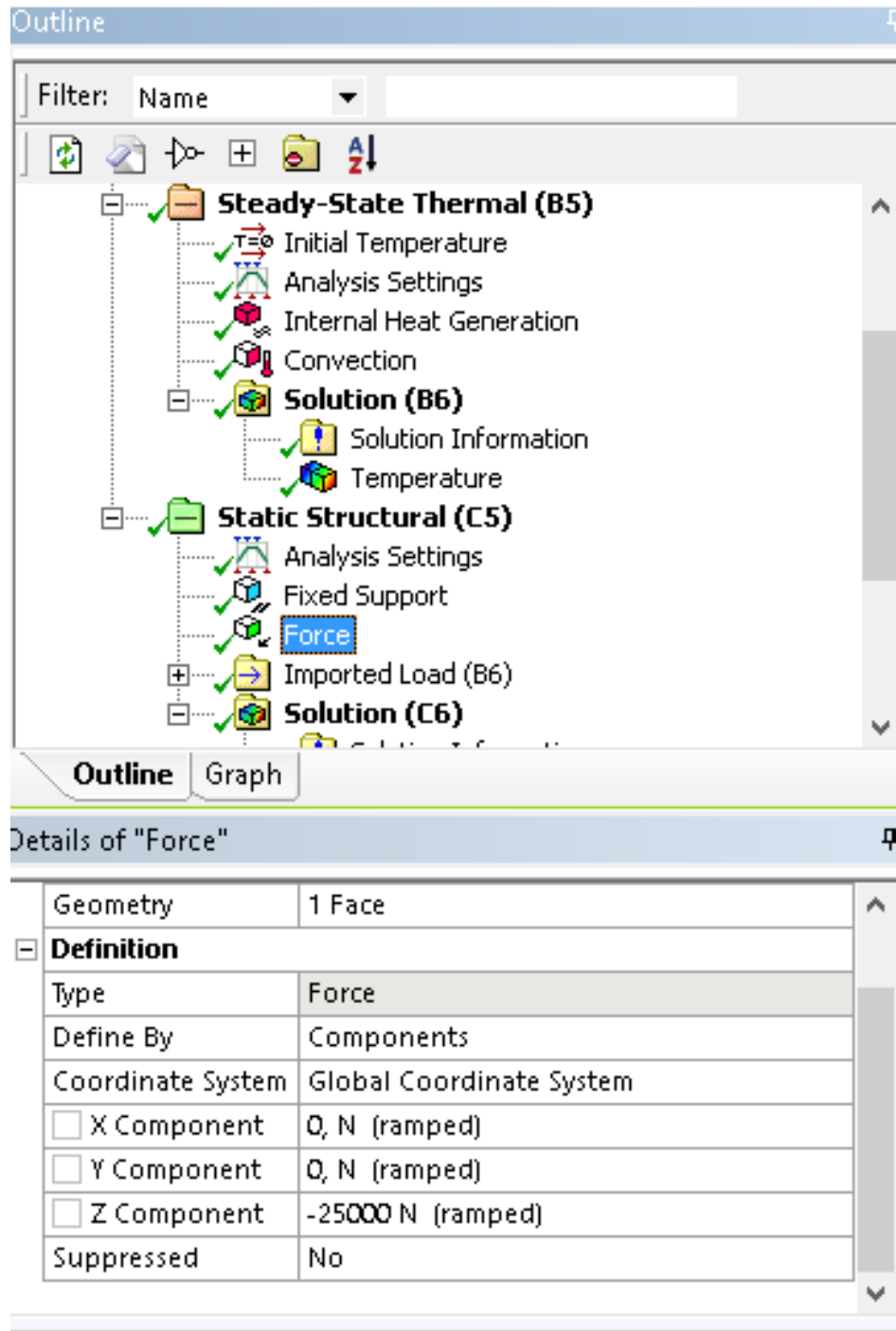
### Anexo B.2 Introducción de parámetro de convección.

Fuente: González, Sousa. (2018).



**Anexo B.3** Introducción de parámetro de internal heat generation.

Fuente: González, Sousa. (2018).



#### Anexo B.4 Introducción de parámetro de la fuerza.

Fuente: González, Sousa. (2018).