



UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ

**RELACIÓN ENTRE EL REVESTIMIENTO
DEL ELECTRODO Y LA GENERACIÓN
DE POROSIDADES EN EL CORDÓN DE
SOLDADURA SOBRE EL ACERO
ESTRUCTURAL AISI 1010,
UTILIZANDO EL PROCESO SMAW**

Autor: Mercatudo S. Juan
C.I: 19.365.997

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

**RELACIÓN ENTRE EL REVESTIMIENTO DEL ELECTRODO
Y LA GENERACIÓN DE POROSIDADES
EN EL CORDÓN DE SOLDADURA SOBRE EL ACERO ESTRUCTURAL
AISI 1010, UTILIZANDO EL PROCESO SMAW**

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

Autor: Mercatudo S. Juan
C.I: 19.365.997

San Diego, Noviembre 2017



Universidad José Antonio Páez
Facultad de Ingeniería

FI-M-058-2017-2

Valencia, 07 de Julio de 2017.

Ciudadano:
Mercatudo Juan Carlos
C.I. 19.365.997
Presente.-

Cumplo con informarle que la Comisión de Trabajo de Grado y Pasantías de la Facultad de Ingeniería en su reunión N° 2-2017 de fecha 07/07/2017 aprobó el proyecto de trabajo de grado titulado "RELACIÓN ENTRE EL REVESTIMIENTO DEL ELECTRODO Y LA GENERACIÓN DE POROSIDADES EN EL CORDÓN DE SOLDADURA SOBRE EL ACERO ESTRUCTURAL AISI 1010, UTILIZANDO EL PROCESO SMAW" presentado por usted como requisito para optar al título de Ingeniero Mecánico.

Se ratifica la designación del Ing. Giovanni Pizzella, C.I. 4.455.859 y la Ing. Alicia Pizzella, C.I. 4.598.880 como Tutores Académicos que lo asesorarán en el desarrollo de este proyecto.

Atentamente.



Ing. José Gregorio Díaz
Decano de la Facultad de Ingeniería

c. c. Coordinación de Pasantías y Trabajo de Grado (2).

JGD/



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

ACEPTACIÓN DEL TUTOR

Quien suscribe, Ingeniero Giovanni Pizzella P. portador de la cédula de identidad N° V-4.455.859, en mi carácter de tutor del Informe de Trabajo Especial de Grado presentado por el ciudadano Mercatudo S. Juan , portador de la Cédula de Identidad C.I. V-19.365.997-, titulado **“RELACIÓN ENTRE EL REVESTIMIENTO DEL ELECTRODO Y LA GENERACIÓN DE POROSIDADES EN EL CORDÓN DE SOLDADURA SOBRE EL ACERO ESTRUCTURAL AISI 1010, UTILIZANDO EL PROCESO SMAW”**. 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 Dieciocho días del mes de Octubre del año dos mil diecisiete.

Ing. Giovanni Pizzella Pierro
C.I.: V- 4.455.859
Tutor Académico

ÍNDICE

CONTENIDO	Pp
LISTA DE CUADROS	x
LISTA DE FIGURAS	xi
RESUMEN	xii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO	
I EL PROBLEMA	
1.1 Planteamiento del Problema.....	3
1.2 Formulación del Problema.....	4
1.3 Objetivos.....	4
1.3.1 Objetivo General.....	4
1.3.2 Objetivos Específicos.....	4
1.4 Justificación.....	5
1.5 Limitaciones.....	6
1.6 Alcance.....	6
II MARCO TEÓRICO	
2.1 Antecedentes.....	8
2.2 Fundamentos Teóricos.....	11
2.2.1 Concepto de Acero.....	11
2.2.2 Diagrama de Fe-C.....	11
2.2.3 Clasificación de los aceros.....	17
2.2.4 Acero estructural AISI 1010.....	18
2.2.5 Soldadura.....	20
2.2.6 Clasificación de la Soldadura.....	20
2.2.7 Soldadura por arco eléctrico revestido.....	21
2.2.8 Soldadura al arco eléctrico SMAW (Shield Metal Arc Welding).....	22
2.2.9 Electroodos.....	23
2.2.10 Defectos en soldadura.....	28
2.2.11 Escoria.....	31
2.2.12 Ventajas y desventajas del proceso.....	32
2.2.13 Metalografía en aceros.....	34
2.2.14 Ensayos mecánicos.....	35
2.2.14.1 Ensayo de Tracción.....	35
2.2.14.2 Ensayo de Doblado.....	39
2.2.14.3 Doblado de Cara.....	40
2.2.15 Ensayos Metalúrgicos.....	40

2.2.15.1 Ensayo de Macroscopía.....	40
2.2.15.2 Ensayo de Microscopia.....	41
2.2.16 Ensayos no destructivos.....	41
2.2.16.1 Técnicas de Inspección Superficial.....	42
2.2.16.2 Técnicas de Inspección Volumétrica.....	42
2.2.16.3 Técnicas de Inspección de la Integridad o hermeticidad.	43
2.2.16.4 Líquidos penetrantes.....	43
2.2.16.5 Radiografía industrial.....	44
2.2.16.6 Ultrasonido.....	46
2.3 Definición de Términos Básicos.....	47
2.4 Símbolos y Abreviaturas de Términos.....	48
III MARCO METODOLÓGICO	
3.1 Tipo de Investigación.....	50
3.2 Nivel de la investigación.....	50
3.3 Diseño de la Investigación.....	51
3.4 Población y muestra.....	51
3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	52
3.6 Técnicas de Procesamiento y Análisis de datos.....	52
3.7 Fases de Desarrollo de la Investigación.....	53
3.7.1. Fases Metodológicas.....	53
IV RESULTADOS	
4.1 Caracterizar el acero AISI 1010 por medio de ensayos de tracción y metalografía.....	64
4.2 Seleccionar los parámetros de soldadura a utilizar y ejecutar los cordones de soldadura por medio del proceso SMAW utilizando diferentes electrodos	67
4.3 Estudiar la estructura del cordón de soldadura mediante el uso de rayos X, ultrasonido o líquidos penetrantes.....	68
4.3.1 Electrodo E-6010.....	68
4.3.2 Electrodo E-6013.....	70
4.3.3 Electrodo E-7018.....	72
4.4 Determinar el comportamiento mecánico y metalográfico, mediante ensayos de tracción, doblado, dureza, macroscopía y microscopía, en uniones soldadas de acero AISI 1010 en función de los parámetros seleccionados.....	73
4.4.1 Ensayos de tracción para los distintos electrodos.....	73
4.4.2 Ensayos de doblado para los distintos electrodos.....	82
4.4.3 Ensayos de dureza para los distintos electrodos.....	86
4.4.4 Ensayos de microscopía para los distintos electrodos.....	89

4.4.4.1	Análisis de las probetas soldadas	91
4.4.5	Ensayo de Macroscopía.....	97
4.5	Analizar y discutir los resultados obtenidos y establecer la influencia del revestimiento en el cordón de soldadura.....	100
V	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
5.1	Conclusiones.....	101
5.2	Recomendaciones	102
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	
	Bibliografía.....	105
	ANEXOS	108

LISTA DE FIGURAS CONTENIDO

FIGURAS

1	Diagrama de Fe-C.....	12
2	Presencia de Cementita (granos claros) y de Perlita (granos oscuros).....	14
3	Microestructura de la Martensita.....	15
4	Presencia de Martensita.....	16
5	Presencia de Vainita.....	16
6	Presencia de Austenita.....	16
7	Clasificación de aceros.....	17
8	Clasificación de los aceros según AISI- SAE.....	19
9	Clasificación de la soldadura.....	21
10	Soldadura SMAW.....	22
11	Clasificación AWS para los metales de aporte SMAW.....	25
12	Defecto de penetración incompleta en soldadura.....	28
13	Defecto de agrietamiento en soldadura.....	29
14	Inclusiones solidas en soldadura.....	30
15	Descripción del proceso SMAW donde se muestra la escoria...	32
16	Gráfico de Eficiencia vs Tipo de electrodo.....	33
17	Máquina de ensayo de tracción	37

18	Comportamiento típico de los materiales Esfuerzo vs Deformación Unitaria.....	38
19	Curva característica Esfuerzo vs Deformación para materiales dúctiles.....	38
20	Dispositivo para Ensayo de Doblado.....	40
21	Esquema de procedimientos.....	53
22	Dimensiones iniciales de la lámina de acero.....	54
23	Biselado de laminas.....	56
24	Película y diagrama de exposición de acero y rayos X.....	59
25	Probetas para tracción, doblado y metalografía.....	60
26	Dimensiones de probetas de doblado.....	62
27	Microestructura del material base a 400x y 1000x de aumento.	64
28	Máquina para ensayo de tracción FRANK.	65
29	Fuerza vs Elongación material base	66
30	Exposición de poros, electrodo E-6010 a 65A.	69
31	Exposición de poros, electrodo E-6010 a 75A.	69
32	Exposición de poros, electrodo E-6010 a 80A.	69
33	Exposición de poros, electrodo E-6013 a 70A.	70
34	Exposición de poros, electrodo E-6013 a 80A.	71
35	Exposición de poros, electrodo E-6013 a 90A	71
36	Exposición de poros, electrodo E-7018 a 70A.	72
37	Exposición de poros, electrodo E-7018 a 90A.	72
38	Exposición de poros, electrodo E-7018 a 100A.	73
39	Esfuerzo vs Deformación E-6010 a 65 A	74
40	Esfuerzo vs Deformación E-6010 a 75 A	74
41	Esfuerzo vs Deformación E-6010 a 80 A	75
42	Comparación Esfuerzo vs Deformación E-6010	75
43	Esfuerzo vs Deformación E-6013 a 60A	77
44	Esfuerzo vs Deformación E-6013 a 70A	77
45	Esfuerzo vs Deformación E-6013 a 80A	78
46	Comparación Esfuerzo vs Deformación E-6013	78
47	Esfuerzo vs Deformación E-7018 a 70A	79
48	Esfuerzo vs Deformación E-7018 a 90A	80
49	Esfuerzo vs Deformación E-7018 a 100A	80
50	Comparación Esfuerzo vs Deformación E-7018	81
51	Doblado de la probeta soldada con E-6010 a 65A	82
52	Doblado de la probeta soldada con E-6010 a 75A	83
53	Doblado de la probeta soldada con E-6010 a 80A	83
54	Doblado de la probeta soldada con E-6013 a 60A	84
55	Doblado de la probeta soldada con E-6013 a 70A	84
56	Doblado de la probeta soldada con E-6013 a 80A	85
57	Doblado de la probeta soldada con E-7018 a 70A	85
58	Doblado de la probeta soldada con E-7018 a 90A	86

59	Doblado de la probeta soldada con E-7018 a 100A	86
60	Grafica ensayo de microdureza Vickers para probetas con electrodo E-6010.....	87
61	Grafica ensayo de microdureza Vickers para probetas con electrodo E-6013.....	88
62	Grafica ensayo de microdureza Vickers para probetas con electrodo E-7018.....	89
63	Áreas de estudio de las probetas para el análisis microestructural.....	90
64	Microestructura del Metal Base. Acero AISI 1010 a 400X.	90
65	Microestructura del material con electrodo E-6010 a 65A.	91
66	Microestructura del material con electrodo E-6010 a 75A	91
67	Microestructura del material con electrodo E-6010 a 80A.	92
68	Microestructura del material con electrodo E-6013 a 60A.	93
69	Microestructura del material con electrodo E-6013 a 70A.	93
70	Microestructura del material con electrodo E-6013 a 80A.	94
71	Microestructura del material con electrodo E-7018 a 70A.	95
72	Microestructura del material con electrodo E-7018 a 90A.	96
73	Microestructura del material con electrodo E-7018 a 100A	97

LISTA DE TABLAS CONTENIDO

TABLAS

1	Composición química de la colada del acero AISI 1010...	18
2	Propiedades del electrodo E-6010 (Valores típicos).....	25
3	Diámetros disponibles del electrodo E-6010.....	26
4	Propiedades del electrodo E-6013 (Valores típicos).....	25
5	Diámetros disponibles del electrodo E-6013.....	27
6	Propiedades del electrodo E-7018 (Valores típicos)	27
7	Diámetros disponibles del electrodo E-7018.....	28
8	Composición química de la lámina AISI 1010.....	55
9	Electrodos e intensidades de corriente seleccionadas.....	57
10	Distribución de probetas para ensayo de tracción.....	61
11	Comparacion de la microdureza del material base ensayado con el teorico.....	65
12	Fuerzas soportadas por el material sin soldar.....	66
13	Propiedades Mecánicas del material sin soldar.....	67
14	Intensidades de corriente seleccionadas.....	68
15	Propiedades mecánicas de probetas soldadas con electrodo E-	

	6010.....	76
16	Propiedades mecánicas de probetas soldadas con electrodo E-6013.....	79
17	Propiedades mecánicas de probetas soldadas con electrodo E-7018.....	81
18	Ensayo de microdureza Vickers para probetas con electrodo E-6010.....	87
19	Ensayo de microdureza Vickers para probetas con electrodo E-6013.....	88
20	Ensayo de microdureza Vickers para probetas con electrodo E-7018.....	88
21	Resultados ensayos de macroscopía.....	97



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

**RELACIÓN ENTRE EL REVESTIMIENTO DEL ELECTRODO
Y LA GENERACIÓN DE POROSIDADES
EN EL CORDÓN DE SOLDADURA SOBRE EL ACERO ESTRUCTURAL
AISI 1010, UTILIZANDO EL PROCESO SMAW**

Autor: Mercatudo S. Juan Carlos D.

Tutor: Pizzella P., Giovanni

Fecha: Noviembre de 2017

RESUMEN

Este trabajo de investigación se fundamenta en la manera en que influye el revestimiento del electrodo en el proceso de generación de porosidades en la soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido SMAW. En una primera instancia se procederá a realizar las uniones soldadas con tres tipos de electrodos distintos los cuales a su vez se trabajarán con tres intensidades de corrientes distintas pero teniendo en cuenta no salirse del rango de valores recomendados por el fabricante. Los electrodos seleccionados fueron el E-6010 (65A, 75A, 80A), el E-6013 (60A, 70A, 80A) y el E-7018(70A, 90A, 100A) todos de un diámetro de 2,38 mm (3/32 pulgadas). Luego de esto se procederá a realizar el ensayo de Rayos X el cual es vital para poder hacer un análisis más acertado de las muestras estudiadas. Finalmente se procederá a realizar los ensayos de tracción, doblado y metalografía para realizar un análisis más detallado de las propiedades mecánicas y de la microestructura de los cordones estudiados y de esta manera dar mayor confiabilidad a los resultados obtenidos.

Descriptores: ensayos, material base, rayos X, metalografía, probetas, uniones soldadas.

INTRODUCCIÓN

En la fabricación y diseño 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, surgen ciertos defectos no deseados como la formación de porosidades que se producen generalmente como resultado de reacciones químicas durante la soldadura por el desprendimiento de gases, y como consecuencia del rápido enfriamiento del metal del baño de fusión, dichos gases no pueden salir al exterior o lo hacen cuando el metal está empezando a solidificar, estos pueden estar diseminados en ciertas zonas como en los primeros centímetros, al final o en forma regular sobre toda la longitud del cordón de soldaduras. Algunas causas frecuentes de la aparición de poros pueden ser: 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 porosidades en soldaduras de acero estructural.

Cabe resaltar, que las porosidades son un defecto común en la soldadura con arco eléctrico revestido, una de las posibles causas que las generan se debe a la incorrecta selección de los parámetros de soldadura como la corriente o defectos en los electrodos. Existen muchos métodos para la inspección de porosidades desde la inspección visual, la utilización de químicos, el uso de partículas magnéticas, equipos de rayos X y ultrasonido hasta métodos destructivos como ensayos de tracción y doblado, algunos de los cuales serán utilizados para emitir juicios y comparar eficazmente los resultados.

Con esta investigación se pretende relacionar la generación de porosidades con la selección correcta de parámetros de soldadura y de electrodos tomando como material base una lámina de acero estructural AISI 1010.

Es necesario resaltar que la investigación será expuesta en cuatro capítulos, a saber en el 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 porosidades en el cordón de soldadura sobre el acero estructural AISI 1010 utilizando soldadura SMAW.

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 Recursos necesarios para lograr los objetivos.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

Este capítulo está dedicado a detallar las razones que motivaran la realización de este proyecto de grado, los objetivos que se plantearan al comienzo de la investigación, su justificación y las limitaciones que condicionaran este proyecto.

1.1 Planteamiento del problema.

En la fabricación y en el diseño 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.

Cabe destacar, que en este tipo de soldadura surgen ciertos defectos no deseados como la formación de porosidades que se producen generalmente como resultado de reacciones químicas durante la soldadura por el desprendimiento de gases, y como consecuencia del rápido enfriamiento del metal del baño de fusión, dichos gases no pueden salir al exterior o lo hacen cuando el metal está empezando a solidificar, estos pueden estar diseminados en ciertas zonas como en los primeros centímetros, al final o en forma regular sobre toda la longitud del cordón de soldaduras. Algunas causas frecuentes de la aparición de poros pueden ser: 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 porosidades en soldaduras de acero estructural.

La forma en que el soldador conduce el electrodo, así como el correcto ajuste de la corriente para el diámetro empleado, son decisivos para el aspecto y la calidad del cordón terminado. En los catálogos de electrodos está indicado el amperaje máximo que de ninguna manera debe excederse. Los amperajes normales son inferiores a estos valores en

aproximadamente 20%. En efecto, si se realiza el cordón con una oscilación demasiado pronunciada o una separación excesiva entre los bordes de los metales a soldar, el metal de aporte se solidifica por exceso de aire e insuficiente protección de la escoria, volviéndose poroso. Sin embargo, como la porosidad severa puede debilitar la soldadura un buen soldador debería conocer cuando tiende a ocurrir y cómo combatirla.

Con el apoyo en estos factores se deduce que cuando hay un proceso de soldadura, ya sea para construcciones o reparaciones, se generan alteraciones en la microestructura del metal por lo que es necesario tomar en cuenta sus consecuencias nocivas. Es por esto que se recurre a formar cordones de mayor tamaño sobre diseñando y en ocasiones agregando impurezas al cordón de soldadura haciéndolo más vulnerable a la generación de porosidades. De acuerdo con lo antes expuesto, la presente investigación debe responder a la siguiente interrogante.

1.2 Formulación del problema.

¿A través de qué proceso se puede determinar la relación entre el tipo de revestimiento del electrodo y la formación de porosidades en un cordón de soldadura sobre un acero estructural AISI 1010?

1.3 Objetivos de la investigación.

1.3.1 Objetivo General.

Determinar la relación existente entre el tipo de revestimiento de electrodo y la generación de porosidades en el cordón de soldadura sobre el acero estructural AISI 1010 utilizando el proceso SMAW.

1.3.2 Objetivos Específicos.

1. Caracterizar el acero AISI 1010 por medio de ensayos de tracción y metalografía (macroscopía y microscopía).
2. Seleccionar los parámetros de soldadura a utilizar y ejecutar los cordones de soldadura por medio del proceso SMAW utilizando diferentes electrodos.
3. Estudiar la estructura del cordón de soldadura mediante el uso de rayos X, ultrasonido o líquidos penetrantes.

4. Determinar el comportamiento mecánico y metalográfico, mediante ensayos de tracción, doblado, dureza, macroscopía y microscopía, en uniones soldadas de acero AISI 1010 en función de los parámetros seleccionados.
5. Analizar y discutir los resultados obtenidos y establecer la influencia del revestimiento en el cordón de soldadura.

1.4 Justificación del Problema.

La presente investigación está enfocada en determinar cuál revestimiento del electrodo es el que disminuye la cantidad de porosidades en el cordón de soldadura y de esta forma propiciar una adecuada utilización de los mismos al momento de utilizarlos en cualquier proceso industrial.

Las constantes innovaciones en la ingeniería de los materiales requieren un mejoramiento continuo en los procesos de fabricación y conformado de metales. Los aceros al carbono en particular son aleaciones de hierro y carbono que contienen otros elementos en pequeñas cantidades tales como: silicio, manganeso, fósforo entre otros. Dichos materiales unidos aumentan su resistencia en conjunto con su templabilidad cuando se someten a procesos de soldadura ya que por lo general las partes son sometidas a rápidas velocidades de enfriamiento.

Tomando en cuenta las características estructurales del material de aporte con su revestimiento (electrodo) y el material base (en este caso una lámina plana de acero AISI 1010 de 5 mm) existe la necesidad de determinar cuál es el revestimiento que genera la menor cantidad de porosidades en un área determinada, contemplando que el electrodo E-6010 posee revestimiento celulósico y permite una profunda penetración en cualquier posición de soldadura y es adecuado para los cordones de tanques, láminas gruesas, recipientes a presión y tuberías en general. Aunque el electrodo E-7018 tiene bajo contenido de hidrógeno tiene alta ductibilidad y al realizarle pruebas de rayos X los resultados son buenos haciéndolo apto en las soldaduras de acero de bajo y medio carbono y en aplicaciones como construcción y reparación de calderas, tanques y recipientes sometidos a grandes presiones, tuberías de vapor y piezas de acero aleado.

Por lo general cuando se realice un proyecto que requiera soldadura, esta debe seguir los límites pautados por el fabricante (amperaje, diámetro, avance, etc.) para que de esta forma no se generen defectos indeseados.

Se pretende demostrar las ventajas de esta soldadura en el material analizado, el cual es muy utilizado en la industria, principalmente en las aplicaciones estructurales, siendo uno de los aceros al carbono más utilizados en la fabricación de tubos, ductos, vigas y estructuras.

Es importante destacar que con la realización de este trabajo se afianzan los conocimientos adquiridos durante toda la carrera.

1.5 Limitaciones.

Conseguir un soldador que este calificado por la American Welding Society (AWS), es una limitante importante, además de la disponibilidad de las máquinas y herramientas de ensayo, en un laboratorio de materiales calificado, por el uso que éste tiene en el periodo de clases, si es en la Universidad José Antonio Páez o en la Universidad de Carabobo o por razones económicas, si es en una empresa privada como TREXA C.A donde se encuentran la soldadores calificados.

Por otra parte los reactivos y materiales utilizados en la preparación de las probetas y el costo de las láminas de acero AISI 1010.

El tiempo de la 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.

1.6 Alcance.

El estudio que se desea realizar es para determinar la relación existente entre el tipo de revestimiento de electrodo y el nivel de porosidades en el cordón de soldadura sobre el acero estructural AISI 1010 mediante el uso de rayos X, ultrasonido o líquidos penetrantes en el cual se pretende adquirir los conocimientos científicos en esta materia.

Se trabajará con tres electrodos de revestimiento diferente (celuloso, rutilico y de bajo hidrogeno). Para cada electrodo, se utilizarán tres intensidades de corriente, y se realizaran ensayos de tracción (según su respectiva norma) y doblado (según su respectiva norma) para verificar la buena ejecución del cordón de soldadura únicamente. Luego de esto para el

estudio de las porosidades se realizará una evaluación por rayos x, líquido penetrante o ultrasonido según la disponibilidad que se pueda conseguir.

Se analizarán 9 probetas para rayos X, ultrasonido o líquidos penetrantes, luego estas serán cortadas en 27 probetas para tracción, 27 probetas para doblado, 9 para macroscopía, 9 para microscopía dando un total de 72 probetas.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

La finalidad de este capítulo es presentar los antecedentes necesarios para definir el contexto de esta investigación, y por el otro, desarrollar los fundamentos y herramientas teóricas requeridas para la realización de este trabajo especial de grado.

2.1 Antecedentes de la investigación.

Se inicia este estudio con los investigadores, Barranco y Miranda (2006), en su trabajo de grado titulado **“Influencia del tratamiento térmico de recocido post-soldadura en las propiedades mecánicas y metalúrgicas en juntas soldadas de acero de bajo carbono ASTM – A36”**, realizado en la Universidad de Carabobo, los autores se plantearon caracterizar el acero ASTM A36 determinando su composición química y propiedades mecánicas en el estado inicial, para luego, aplicar el tratamiento térmico de recocido a temperaturas variables a las probetas soldadas y luego establecer la influencia de dicho tratamiento. Los autores concluyeron que el metal adquiere una mayor dureza cuando se emplea el menor amperaje seleccionado ya que hay menor incidencia de calor y el enfriamiento es más rápido, además luego del tratamiento térmico observaron que no existe variación significativa en la microestructura del metal debido a que el rango de temperaturas usado no permite la recristalización de los granos de la zona afectada por el calor ni el crecimiento de los mismos en el material base ni en la zona fundida.

El antecedente es relevante ya que los autores utilizaron un acero ASTM A36 que es más tenaz que el acero AISI 1010 pero que resulta igualmente de buena soldabilidad.

Así mismo, Aponte y Hernández (2009), en su trabajo de grado titulado, **“Determinación del efecto de la temperatura de precalentamiento sobre la sensibilidad al agrietamiento en caliente para cordones de soldadura en acero estructural utilizando electrodos E – 6010 y E- 7018”**, realizado en la Universidad de

Carabobo, tuvieron como objetivo determinar el porcentaje de agrietamiento en la zona fundida del cordón de los electrodos estudiados variando la temperatura de precalentamiento y la intensidad de corriente. Notaron que el material más susceptible al agrietamiento fue el electrodo E-6010 y en general concluyeron que el aumento de la intensidad de corriente para una misma temperatura de precalentamiento aumento las longitudes promedio de las grietas en ambos electrodos.

El aporte de esta investigación es estudiar el comportamiento de dos electrodos, el E-6010 y el E-7018 que igualmente se estudiaran en esta investigación.

Seguidamente, Andrade (2010), en su investigación titulada **“Determinación de esfuerzos residuales en soldadura a tope por arco eléctrico con electrodo revestido en acero ASTM A-36”**, trabajo de grado en la Universidad de Carabobo, realizó ensayos de tracción a las probetas soldadas con distinto espesor de cordón para obtener valores reales de esfuerzos en función de las tensiones aplicadas, con esto determinaron la relación entre el esfuerzo residual y el espesor del cordón de soldadura. Concluyendo que mientras más grueso sea el cordón soldado los esfuerzos que se registren serán mayores en comparación a un grosor inferior, además la capacidad de elongación será mayor.

Esta investigación aportara valiosa información respecto a los ensayos de tracción necesarios en la investigación del autor.

En este mismo orden de ideas, Riveros, Castillo, Bermont, y Laffertte (2.003), en su trabajo cuyo título es **“Influencia del Tratamiento Térmico de Recocido Post-soldadura en las Propiedades Mecánicas y Metalúrgicas en Juntas Soldadas de Acero de Bajo Carbono ASTM A-36”**, presentada en el Simposio Materia 2003, en la ciudad de Bariloche Argentina, estudiaron la influencia de los Tratamientos Térmicos Post Soldaduras en fundiciones nodulares a través de cupones, en forma de barras, unidos mediante soldadura de arco en forma manual a los cuales se les aplico ferritizado, normalizado, austemperizado, temple y revenido. A dichas probetas se les realizaron ensayos de Dureza, Tracción, Análisis Metalográfico y Fractográfico arrojando como resultado que los tratamientos térmicos modifican en distinta magnitud la dureza de la Zona Afectada Térmicamente (ZAT) y el metal base, mientras que el cordón de soldadura

presenta valores de dureza similares entre si y además dichos tratamientos térmicos disminuyen el gradiente de dureza de la Zona Afectada Térmicamente (ZAT) disminuyendo así el riesgo de fractura en esta zona.

El aporte de esta investigación a la presente radica en estudiar cómo afecta el calor aportado por la soldadura los valores de dureza, tracción y la metalografía de las probetas de acero AISI 1010.

Por último, Bruno y Viñones (2.007), en su trabajo de investigación titulado **“Estudio Comparativo de las Propiedades Mecánicas y Metalúrgicas de Uniones Soldadas Mediante los Procesos SMAW y SAW en los Aceros ASTM A-36 y ASTM A-516-70”**. Trabajo realizado en Argentina y publicado en la Revista ESAB – CONARCO, en donde los autores ejecutaron un estudio de las propiedades mecánicas y microestructurales en las uniones soldadas realizadas con tres tipos de electrodos revestidos (bajo hidrogeno celulósico y rutilico), cada uno de ellos sometido a cuatro condiciones ambientales diferentes (1h de humedad, 4h de humedad, ambiente y 100°C), en un acero ASTM-36, para poder obtener una base de comparación del comportamiento del cordón de soldadura de los diferentes electrodos a determinada condición. En el análisis de las propiedades mecánicas y de la microestructura de las muestras soldadas se utilizaron los ensayos de tracción, dobléz, estudio microscópico y el estudio de Microscopía óptica. Luego de realizar los mencionados ensayos, se pudo llegar a la conclusión de las uniones soldadas realizadas con tres tipos de electrodos en la condición de 100 °C resulta ser la más satisfactoria desde el punto de vista de las propiedades mecánicas, esto es debido a la disminución de la humedad presente en dichos electrodos.

El aporte de esta investigación a la presente radica en estudiar cómo afecta el cordón de soldadura el uso de los diferentes electrodos a determinada condición, los valores de dureza, dobléz, tracción y la metalografía de las probetas de acero AISI 1010.

2.2 Fundamentos teóricos.

2.2.1 Concepto de Acero.

Es una aleación o combinación de Hierro y Carbono alrededor de 0,05% hasta menos de un 2%. Algunas veces otros elementos de aleaciones específicas tales como el Cr (Cromo) o Ni (Níquel) se agregan con propósitos determinados, por lo cual es básicamente Hierro altamente refinado de más de 98%, comenzando su fabricación con la reducción de Hierro o producción de Arrabio, que más tarde es convertido en acero.

Desde el punto de vista de su composición los aceros se pueden clasificar en dos grandes grupos: aceros aleados y aceros al Carbono (de bajo, medio y alto contenido en

carbono). Los aceros al carbono constituyen la mayor parte de todo el acero fabricado. Contienen al menos del 0,25% del peso de C. La microestructura consiste en Ferrita y Perlita. Por tanto son relativamente blandos y pocos resistentes, pero con extraordinaria ductilidad y tenacidad. Son de fácil mecanizado, soldables y económicos. Se utilizan para fabricar vigas, carrocerías de automóviles y láminas para tuberías de edificios y puentes. Vera J. y Henríquez D. (2.007).

2.2.2 Diagrama de Fe-C

En el diagrama de equilibrio o de fases hierro-carbono (Fe-C) (ver Figura 1) se representan las transformaciones que sufren los aceros al carbono con la temperatura, admitiendo que el calentamiento (o enfriamiento) de la mezcla se realiza muy lentamente de modo que los procesos de difusión (homogeneización) tienen tiempo para completarse.

Estos diagramas Fe-C se obtiene experimentalmente identificando los puntos críticos (temperaturas a las que se producen las sucesivas transformaciones) por métodos diversos.

Alotropia del Hierro.

El hierro puro está presente en tres estados alotrópicos a medida que se incrementa la temperatura desde la temperatura ambiente:

Hasta los 911 °C (temperatura crítica AC3), el hierro ordinario cristaliza en el sistema cúbico de cuerpo centrado y recibe la denominación de hierro α (alfa) o ferrita. Es un material dúctil y maleable responsable de la buena forjabilidad de las aleaciones con bajo contenido en carbono y es ferromagnético hasta los 770 °C (temperatura de Curie a la que pierde dicha cualidad; se suele llamar también AC2). La ferrita puede disolver pequeñas cantidades de carbono. Entre 911 y 1400 °C cristaliza en el sistema cúbico de caras centradas y recibe la denominación de hierro γ (gamma) o Austenita. Dada su mayor compacidad la Austenita se

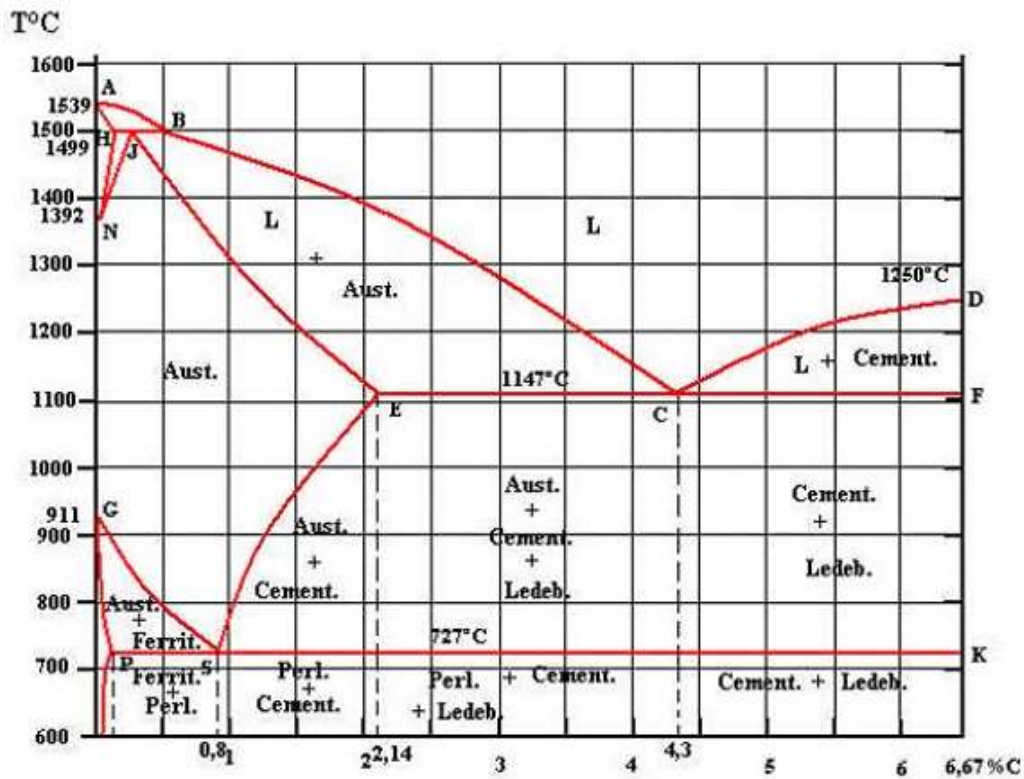


Figura 1: Diagrama de Fe-C.

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

deforma con mayor facilidad y es paramagnética. Entre 1400 y 1538 °C cristaliza de nuevo en el sistema cúbico de cuerpo centrado y recibe la denominación de hierro δ (delta), que es en esencia el mismo hierro alfa pero con parámetro de red mayor por efecto de la temperatura. A mayor temperatura el hierro se encuentra en estado líquido.

Si se añade carbono al hierro, aumenta su grado de acidez y sus átomos podrían situarse simplemente en los intersticios de la red cristalina de éste último; sin embargo en los aceros aparece combinado formando carburo de hierro (Fe_3C), es decir, un compuesto químico definido y que recibe la denominación de Cementita de modo que los aceros aleados al carbono están constituidos realmente por ferrita y Cementita.

Transformación de Austenita

El diagrama de fases Fe-C de la Figura 1 muestra dos composiciones singulares:

- Un eutéctico (composición para la cual el punto de fusión es mínimo) que se denomina Ledeburita y contiene un 4,3% de carbono (64,5 % de Cementita). La Ledeburita aparece entre los constituyentes de la aleación cuando el contenido en carbono supera el 2% (región del diagrama no mostrada) y es la responsable de la mala forjabilidad de la aleación marcando la frontera entre los aceros con menos del 2% de C (forjables) y las fundiciones con porcentajes de carbono superiores (no forjables y fabricadas por moldeo). De este modo se observa que por encima de la temperatura crítica A3, los aceros están constituidos sólo por Austenita, una solución sólida de carbono en hierro y su microestructura en condiciones de enfriamiento lento dependerá por tanto de las transformaciones que sufra ésta.
- Un Eutectoide en la zona de los aceros, equivalente al eutéctico pero en el estado sólido, donde la temperatura de transformación de la Austenita es mínima. El Eutectoide contiene un 0,80 %C (13,5% de Cementita) y se denomina perlita. Está constituido por capas alternas de ferrita y Cementita, siendo sus propiedades mecánicas intermedias entre las de la Ferrita y la Cementita. (Ver la figura 2).

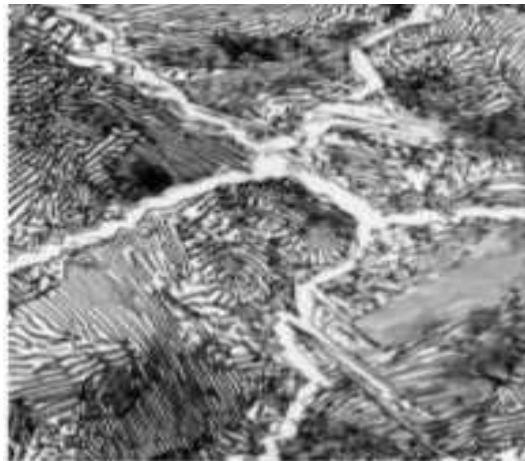


Figura 2: Presencia de Cementita (granos claros) y de Perlita (granos oscuros)

Fuente: <http://www.utp.edu.co/~publio17/aceros.htm>

La existencia del Eutectoide permite distinguir dos tipos de aleaciones de acero:

- Aceros Hipoeutectoides (menor a 0,80% C). Al enfriarse por debajo de la temperatura crítica A3 comienza a precipitar la ferrita entre los granos de Austenita y al alcanzar la temperatura crítica A1 la Austenita restante se transforma en perlita. Se obtiene por tanto a temperatura ambiente una estructura de cristales de perlita embebidos en una matriz de ferrita.
- Aceros Hipereutectoides (mayor a 0,80% C). Al enfriarse por debajo de la temperatura crítica se precipita el carburo de hierro resultando a temperatura ambiente cristales de perlita embebidos en una matriz de Cementita. Pues ya que este es un tratamiento térmico y su temperatura se eleva hasta dicha temperatura. .

Las texturas básicas descritas (Perlíticas) son las obtenidas enfriando lentamente aceros al carbono, sin embargo modificando las condiciones de enfriamiento (base de los tratamientos térmicos) es posible obtener estructuras cristalinas diferentes:

- La Martensita es el constituyente típico de los aceros templados y se obtiene de forma casi instantánea al enfriar rápidamente la Austenita. Es una solución sobresaturada de carbono en hierro alfa con tendencia, cuanto mayor es el carbono, a la sustitución de la estructura cúbica centrada en el cuerpo por tetragonal centrada en el cuerpo. Tras la Cementita (y los carburos de otros metales) es el constituyente más duro de los aceros. (Ver las figuras 3 y 4).



Figura 3: Microestructura de la Martensita.

Fuente: <http://www.utp.edu.co/~publio17/aceros.htm>

- Velocidades intermedias de enfriamiento dan lugar a la Bainita, estructura similar a la Perlita formada por agujas de Ferrita y Cementita pero de mayor ductilidad y resistencia que aquélla. (Ver Figura 5).
- También se puede obtener Austenita por enfriamiento rápido de aleaciones con elementos gammágenos (que favorecen la estabilidad del hierro γ) como el níquel y el manganeso, tal es el caso por ejemplo de los aceros inoxidable Austeníticos. (Ver figura 6)

Antaño se identificaron también la Sorbita y la Troostita que han resultado ser en realidad perlitas de muy pequeña distancia interláminar por lo que dichas denominaciones han caído en desuso.

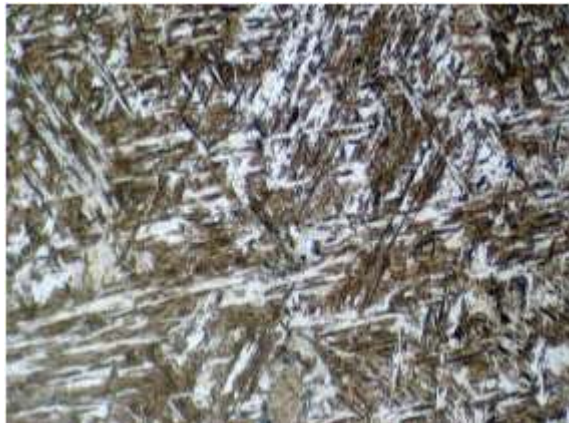


Figura 4: Presencia de Martensita

Fuente: Osmond R. (1902).



Figura 5: Presencia de Bainita

Fuente: Tierno López A. (2.015)



Figura 6: Presencia de Austenita.

Fuente: <http://throwate.blogspot.com/2014/02/los-aceros.html>(2016)

2.2.3 Clasificación de los aceros

La clasificación es la identificación específica de cada grado, tipo, o clase de acero dado por un número, letras, símbolos, nombre, o su combinación para la completa designación de un acero en particular.

En el sistema AISI-SAE, los aceros se clasifican con cuatro dígitos. El primer dígito especifica la aleación principal, el segundo modifica al primero y los dos últimos dígitos, dan la cantidad de carbono en centésimas. En algunos aceros al cromo de alto carbono hay números de cinco dígitos, los tres últimos dan el porcentaje de carbono (ver Figura 7).

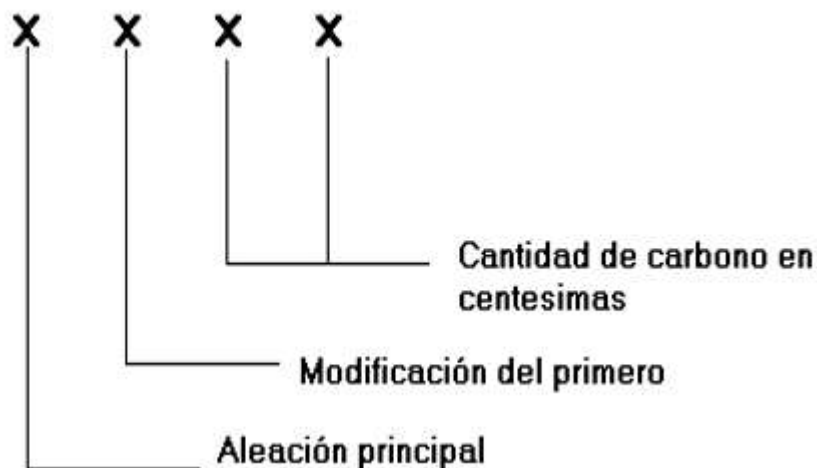


Figura 7: Clasificación de aceros.

Fuente: American Handbook Welding

La clasificación de los aceros según las normas CONVENIN, se basa en:

Composición química: los aceros se clasifican de acuerdo a su composición química en:

Aceros de carbono: los aceros de carbono se clasifican a su vez en aceros al carbono comunes, aceros **sulfurados** y **aceros sulfurados y refosforados**.

Proceso de obtención: a efecto de esta norma, los aceros se clasifican de acuerdo a su proceso de obtención en:

Acero Thomas

Acero Bessemer

Aceros básicos al oxígeno

Aceros eléctricos

Aceros Siemens – Martin

Grado de oxidación: Estos se clasifican según su grado de oxidación en:

Aceros calmados

Aceros efervescentes

Aceros semicalmados

2.2.4 Acero estructural AISI 1010.

El Acero AISI 1010 es un acero estructural al carbono, de alta ductilidad y buena soldabilidad, utilizado en construcción de estructuras metálicas, tuberías, construcción de maquinarias cuando es endurecido superficialmente mediante tratamiento de cementación o carbonitrurado seguido de temple y revenido. La composición química de una colada de acero AISI 1010 puede verse en la tabla 1.

Minerales	% de composición
Carbono (C)	0,08-0,13%
Manganeso (Mn)	0,30 -0,60%
Fósforo(P)	0,04% máx.

Azufre(S)	0,04% máx.
Silicio(Si)	0,15-0,35 %

Tabla 1:. Composición química de la colada del acero AISI 1010.

Fuente: ASTM international standards Worldwide (2.016)

Propiedades del acero AISI 1010

Como la mayoría de los aceros, el AISI 1010 tiene una densidad de $7,87 \text{ gr/cm}^3$ ($0,284 \text{ lb/pulg}^3$), el acero AISI 1010 en barras, planchas y perfiles estructurales con espesores menores a 20,32 cm (8 pulg) tiene un límite de fluencia mínimo de 300 MPa (44 ksi), un límite de rotura mínimo de 370 MPa (53 ksi) y con una dureza Brinell de 105 HB.

En la figura 8 puede verse una clasificación de aceros según las normas AISI-SAE.

DESIGNACIÓN	TIPO
10XX	Aceros ordinarios al carbón
11XX	Aceros al carbono re sulfurados de fácil maquinado
13XX	Aceros con 1.75% de Mn (1.5-2%)
15XX	Aceros al manganeso (1.0-1.65%)
23XX	Aceros al níquel, 3.5% de Ni (3.25-3.75%)
25XX	Aceros al níquel, 5% de Ni (4.75-5.25%)
31XX	Aceros al níquel-Cromo, 1.25% Ni y 0.65% Cr
33XX	Aceros al níquel-Cromo, 3.5% Ni y 1.60% Cr
40XX	Aceros al molibdeno, 0.25% Mo.
41XX	Aceros con Cr (0.4-1.2%), Mo (0.08-0.25%)
43XX	Aceros al Ni-Cr-Mo (1.8%Ni, 0.65%Cr, 0.25%Mo)
44XX	Molibdeno, (0.4-0.53%)
45XX	Molibdeno, (0.55%)
46XX	Níquel- Molibdeno, (1.8%Ni, 0.2%Mo)
47XX	Níquel- Cromo- Molibdeno, (1.05%Ni, 0.45%Cr, 0.2%Mo)
48XX	Níquel- Molibdeno, (3.5%Ni, 0.25%Mo)
50XX	Aceros al Cromo (bajo cromo, 0.28-0.40%)
51XX	Medio Cromo, (0.8-1.05%)
50XXXX	Acero resistente al desgaste, 0.5% Cr
51XXXX	Acero resistente al desgaste, medio Cr 1%
52XXXX	Acero resistente al desgaste, alto Cr 1.45%
61XX	Aceros al Cromo-Vanadio, (0.75% Cr, 0.15%V)
8XXXX	Aceros de triple aleación
81XX	0.3%Ni, 0.4%Cr, 0.12%Mo
86XX	0.55%Ni, 0.50%Cr, 0.20%Mo
87XX	0.55%Ni, 0.50%Cr, 0.25%Mo
88XX	0.55%Ni, 0.50%Cr, 0.35%Mo
92XX	Acero al Silicio-Manganeso, (2%Si y 0.8%Mn)
93XX	Aceros de triple aleación, 3.25%Ni, 1.2%Cr, 0.12%Mo
98XX	Aceros de triple aleación, 1%Ni, 0.8%Cr, 0.25%Mo
XXBXX	Aceros con Boro, (mínimo 0.0005% B)
50BXX	0.5% Cr
51BXX	0.8% Cr
81BXX	0.3%Ni, 0.45%Cr, 0.12%Mo
XXBVXX	Acero al Boro-Vanadio
XXLXX	Acero con plomo
XXXH	Acero con banda de templabilidad
EX	Nuevos tipos de acero con designación temporal

Figura 8: Clasificación de los aceros según AISI- SAE

Fuente: AWS Welding handbook (2008)

Formas

El acero AISI 1010 se produce en una amplia variedad de formas, que incluyen: Planchas, Perfiles estructurales, Tubos, Láminas.

Métodos de unión

Las piezas hechas a partir de acero AISI 1010 son fácilmente unidas mediante casi todos los procesos de soldadura. Los más comúnmente usados para el AISI 1010 son los menos costosos y rápidos como la Soldadura por Arco Metálico Protegido (SMAW, Shielded Metal Arc Welding), Soldadura con Arco Metálico y Gas (GMAW, Gas Metal Arc Welding), y soldadura oxiacetilénica. El acero AISI 1010 es también comúnmente atornillado y remachado en las aplicaciones estructurales: edificios, puentes, torres, etc.

2.2.5 Soldadura.

La soldadura es un proceso de unión permanente de materiales en el cual se funden las superficies de contacto de dos o más partes mediante la aplicación conveniente de calor, presión o ambas a la vez. La integración de las partes que se unen mediante la soldadura se denomina un ensamble soldado. En algunos casos se agrega un material de aporte o relleno para facilitar la fusión. La soldadura se asocia por lo regular con partes metálicas, pero el proceso también se usa para unir plásticos. Aunque este estudio se basará en el análisis de la soldadura en la unión de metales.

2.2.6 Clasificación de la Soldadura.

Se pueden distinguir primeramente los siguientes tipos de soldadura:

Soldadura heterogénea: Se efectúa entre materiales de distinta naturaleza, con o sin metal de aportación: o entre metales iguales, pero con distinto metal de aportación. Puede ser blanda o fuerte. (ver figura 10)

Soldadura homogénea: Los materiales que se sueldan y el metal de aportación, si lo hay, son de la misma naturaleza. Puede ser oxiacetilénica, eléctrica (por arco voltaico o por resistencia), etc. Si no hay metal de aportación, las soldaduras homogéneas se denominan autógenas.

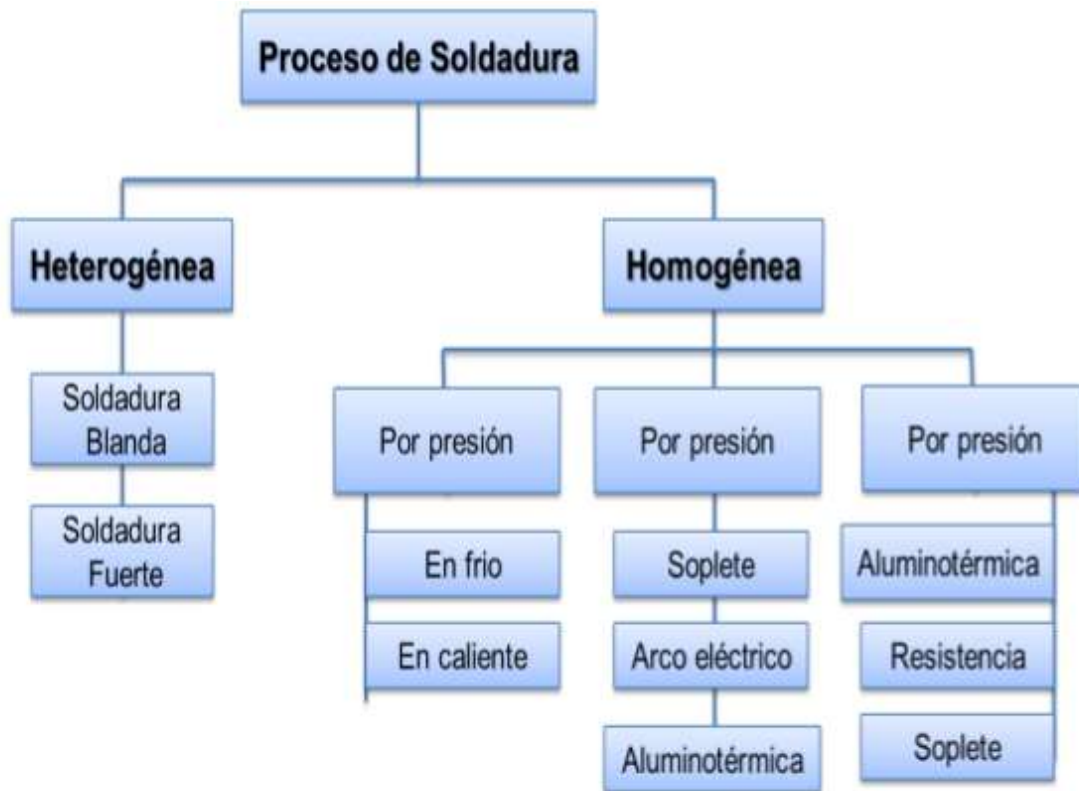


Figura 9: Clasificación de la soldadura

Fuente: <http://www.mapfre.com/fundacion/html/revistas/seguridad/n124/articulo1.html>

2.2.7 Soldadura por arco eléctrico revestido

El sistema de soldadura por arco, se define como el proceso en que se unen dos metales mediante una fusión localizada, aprovechando la energía térmica desarrollada por la corriente eléctrica variable del equipo de soldadura y es denominada por arco, cuando se obtiene la fusión de las partes que se sueldan haciendo saltar el salto voltaico o la chispa de alta frecuencia entre un electrodo y la pieza que se suelda, puesta está o no en comunicación con tierra, según la clase de corriente especificada de tipo alterna o continua.

En un principio se utilizaba una varilla metálica descubierta que servía de metal de aporte, pero por la acción del aire, el metal (acero) por ejemplo, pierde parte de su carbono y manganeso por lo que se oxida y se endurece con la notable disminución de las condiciones mecánicas del cordón de soldadura. Debido a esto, se usan hoy electrodos revestidos de material más refractario que la varilla metálica los cuales contribuyen a la

formación de cráter que protege el extremo de la varilla produciendo escorias que cubren la soldadura en fusión y al entrar en contacto en materias orgánicas, produce una llama que protege el interior del arco de los efectos negativos del aire

2.2.8 Soldadura al arco eléctrico SMAW (Shield Metal Arc Welding)

Este tipo de soldadura es uno de los procesos de unión de metales más antiguos que existe, su inicio data de los años 90 de siglo XVIII. En la que se utilizaba un electrodo de carbón para producir el arco eléctrico, pero no es sino hasta 1907, cuando el fundador de ESAB1. Oscar Kjellberg desarrolla el método de soldadura con electrodo recubierto, también conocido como método SMAW por sus siglas en ingles. (Ver Figura 11).

Consiste en la utilización de un electrodo con un determinado recubrimiento, según sea las características específicas. A través del mismo se hace circular un determinado tipo de corriente eléctrica, ya sea esta de tipo alterna o directa. Se establece un corto circuito entre el electrodo y el material base que se desea soldar o unir, este arco eléctrico puede alcanzar temperaturas del orden de los 5500 °C, depositándose el núcleo del electrodo fundido al material que se está soldando, de paso se genera mediante la combustión del recubrimiento, una atmosfera que permite la protección del proceso, esta protección se circunscribe a evitar la penetración de humedad y posibles elementos contaminantes. También se produce una escoria que recubre el cordón de soldadura generado.

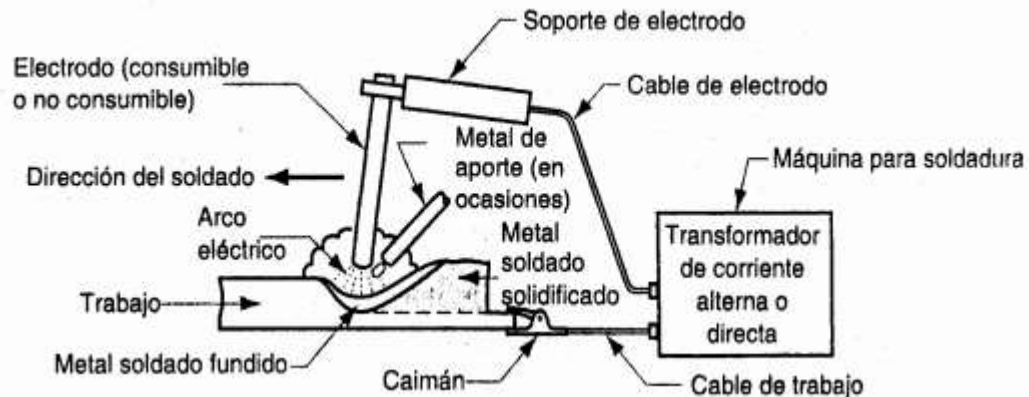


Figura 10: Soldadura SMAW.

Fuente: [Procesos de Soldadura - Materias FCyT UMSS \(2.016\)](#)

2.2.9 Electrodo

El electrodo consiste en una varilla metálica rodeada por una capa de revestimiento donde su núcleo es transferido hacia el metal base a través de una zona eléctrica generada por la corriente de soldadura. El revestimiento del electrodo que determina las

características mecánicas y químicas de la unión, está constituido por un conjunto de componentes minerales y orgánicos que permiten producir gases protectores para evitar el impacto nocivo sobre la atmosfera y gases ionizantes para dirigir y mantener el arco además de producir escoria para proteger el metal ya depositado hasta su solidificación y suministrar materiales desoxidantes, elementos de aleación y hierro pulverizado. Además de establecer el arco y proporcionar metal de aporte para el depósito de soldadura, el electrodo introduce otros materiales para el arco o sus inmediaciones. El electrodo consiste en un núcleo o varilla metálica, rodeado por una capa de revestimiento, donde el núcleo es transferido hacia el metal base a través de una zona eléctrica generada por la corriente de soldadura.

Fabricación de la varilla:

- Alambión de 6 a 8 mm de diámetro.
- En rollos o bobinas, de aproximadamente 1.000 Kg.
- Los diámetros de alma son normalmente 1,6; 2; 2,5; 3; 3,25; 4; 5 y 6mm.
- El corte de las varillas se realiza a un ritmo entre 580 y 1400 cortes/minuto, en función de su diámetro.

Fabricación del revestimiento:

- Se suelen utilizar hasta cuarenta minerales y sustancias distintas.
- Para electrodos básicos, después de este secado previo se pasan a hornos convencionales de aire para darles un secado final a 400-450 °C, con el fin de que el contenido de H₂O a 1.000 °C según AWS, sea inferior a 0,4%.

Composición del revestimiento:

- Óxidos naturales: óxidos de hierro, ilemita (50% óxido férrico y 50% óxido de titanio), rutilo (óxido de titanio), sílice (óxido de silicio).
- Silicatos naturales: caolín, talco, mica, feldepasto.
- Productos volátiles: celulosa, serrín. Fundente.
- Productos químicos: carbonato, óxidos.
- Ferroaleaciones: de Mn, Si, Ti.

- Aglomerantes: Silicato Sódico, Silicato Potásico

El revestimiento del electrodo, que determina las características mecánicas y químicas de la unión, está constituido por un conjunto de componentes minerales y orgánicos que cumplen las siguientes funciones:

- Producir gases protectores para evitar la contaminación atmosférica y gases ionizantes para dirigir y mantener el arco.
- Producir escoria para proteger el metal ya depositado hasta su solidificación.
- Suministrar materiales desoxidantes, elementos de aleación y hierro en polvo.

“Composición del revestimiento”.

Las especificaciones más comunes para la clasificación de electrodos revestidos de acero al carbono y aceros de baja aleación según la norma AWS son: las AWS A5.1-91 y la AWS A5.5-96 respectivamente. En la especificación para aceros al carbono de electrodos revestidos, el sistema de clasificación está basado en la resistencia a la tracción del depósito. La identificación de la clasificación, está compuesta de la letra E y cuatro dígitos. Esta letra significa “electrodo”, los primeros dos dígitos indican la resistencia mínima a la tracción del metal depositado en miles de libras por pulgada cuadrada, aunque los dos últimos dígitos señalan las características del electrodo, es necesario considerarlos separadamente ya que el tercer dígito indica la posición para soldar del electrodo. Se representa de esta forma: EXX1X - toda posición. EXX2X – posición plana y horizontal. EXX4X – toda posición, vertical descendente. El último dígito indica el tipo de revestimiento del electrodo.

La denominación por la AWS se realiza según lo indica la figura 11.

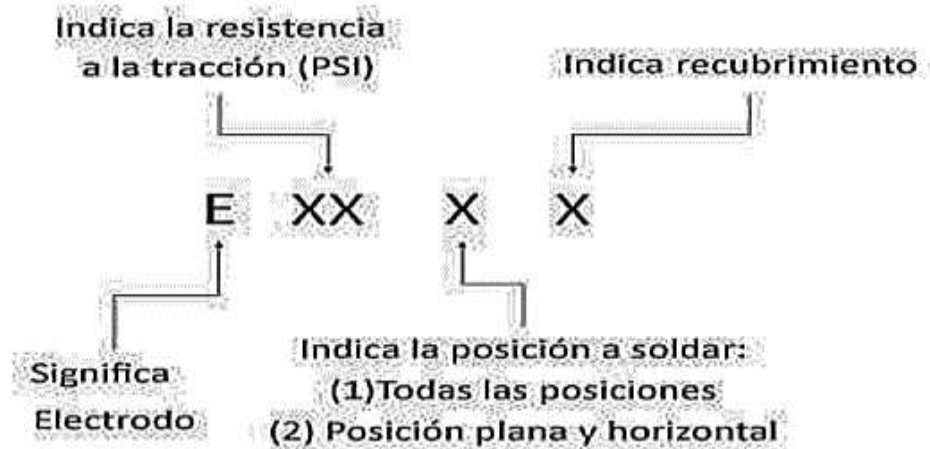


Figura 11: Clasificación AWS para los metales de aporte SMAW.

Fuente: http://soldadurayestructuras.com/2184409_Procesos-de-soldadura-y-corte.html. (2.015)

Electrodo AWS E-6010

Electrodo de revestimiento celulósico que genera alta energía en el arco, lo cual asegura una profunda penetración en todas las posiciones, facilitando el trabajo en montajes donde las condiciones de soldadura no son ideales, tal como la preparación defectuosa de las juntas. Sus depósitos están libres de poros e inclusiones de escoria, lo cual proporciona seguridad en la inspección radiográfica. Presenta arco estable con moderada densidad de salpicaduras, de fácil encendido y reencendido (Ver tabla 2).

Composición química C: 0.10% Mn: 0.60% Si: 0.30%
Resistencia a la tracción: (510-580) N/mm² ó (72,86-84,36 ksi)
Limite elástico: (430-490) N/mm² ó (60-70) ksi
Alargamiento (L=5d) (24-28)%
Resistencia al impacto (40-60)N m a -30°C

Tabla 2: Propiedades del electrodo E-6010 (Valores típicos)

Fuente: Catálogo Lincoln Electric (2012)

Estos electrodos están disponibles en los siguientes diámetros según Tabla 3 de Lincoln Electric:

Diámetro (mm)	Diámetro (pulg)	Longitud (mm)	Intensidad (A)	Peso paq. (Kg)
2,50	3/32	350	50-80	10
3,25	1/8	350	75-120	10
4,00	5/32	350	110-160	10
5,00	3/16	350	140-200	10

Tabla 3: Diámetros disponibles del electrodo E-6010

Fuente: Catálogo Lincoln Electric (2012)

Electrodo AWS E-6013

Electrodo de revestimiento rutílico, que presenta un arco muy suave de fácil encendido y reencendido, con escasa salpicadura. Sus depósitos, de penetración media, presentan excelente apariencia con escoria de muy fácil remoción. Diseñado especialmente para facilitar los trabajos de herrería y carpintería metálica en general, tales como: fabricación de puertas, marcos de puertas y ventanas, rejas protectoras, ensamblaje y reparación de carrocerías, soldadura de estructuras livianas con perfiles angulares o tubulares de espesores delgados (Ver tabla 4).

Composición química: C: 0.10% Mn: (0,50-0,80)%
Resistencia a la tracción: (510-560) N/mm² ó (72,86-81,45)ksi
Limite elástico: (420-480)N/mm² ó (58.60-66.98)ksi
Alargamiento (L=5d): (23-27)%
Resistencia al impacto: No requerida por AWS

Tabla 4: Propiedades del electrodo E-6013 (Valores típicos)

Fuente: Catalogo Lincoln Electric (2012)

Electrodo AWS E-7018

Electrodo de revestimiento básico con alto contenido de hierro en polvo que genera un rendimiento de 120%. Sus depósitos son de bajo hidrógeno, tenaces, resistentes al agrietamiento, libres de poros e inclusiones de escoria, lo cual queda demostrado al realizar el análisis radiográfico. Presenta arco estable de poca salpicadura, cordones de apariencia uniforme con fácil remoción de escoria.

Los electrodos E-6013 están disponibles en los siguientes diámetros según la tabla 5 de la Lincoln Electric:

Diámetro (mm)	Diámetro (pulg)	Longitud (mm)	Intensidad (A)	Peso paq. (Kg)
2,50	3/32	350	60-90	10
3,25	1/8	350	90-130	10
4,00	5/32	350	120-170	10
5,00	3/16	350	170-240	10

Tabla 5: Diámetros disponibles del electrodo E-6013

Fuente: Catálogo Lincoln Electric (2012)

Los electrodos E-7018 son perfectos para soldadura de aceros de bajo y medio carbono hasta 0.45%C, aceros al carbono-manganeso, aceros de baja aleación con resistencia a la tracción hasta 70000 psi, aceros con alto contenido de azufre y fósforo considerados difíciles de soldar. Soldadura de aceros fundidos, aceros de grano fino. Su campo de aplicación abarca temperaturas de trabajo desde -30 °C hasta 350 °C (Ver tabla 6).

Composición química: C: 0,08% Mn: (1,0-1,40)% Si: (0,30-0,60)%
Resistencia a la tracción: (540-610) N/mm² ó (77,14-88,73)ksi
Limite elástico: (450-510)N/mm² ó (62,79-72,86)ksi
Alargamiento (L=5d): (25-29)%
Resistencia al impacto: (120-160) N m a -30°C

Tabla 6: Propiedades del electrodo E-7018 (Valores típicos)

Fuente: Catálogo Lincoln Electric (2012)

Estos electrodos están disponibles en los siguientes diámetros según la tabla 7 de la Lincoln Electric:

Diámetro (mm)	Diámetro (pulg)	Longitud (mm)	Intensidad (A)	Peso paq. (Kg)
2,50	3/32	350	60-100	10
3,25	1/8	350/450	90-140	10
4,00	5/32	350/450	120-190	10
5,00	3/16	350/450	160-230	10
6,00	1/4	350	210-300	10

Tabla 7. Diámetros disponibles del electrodo E-7018

Fuente: Catálogo Lincoln Electric (2012)

2.2.10 Defectos en soldadura

- **Penetración excesiva:** En una soldadura simple desde un solo lado esta discontinuidad representa un exceso de metal aportado en la raíz de la soldadura que da lugar a desprendimiento de metal fundido.
- **Penetración incompleta:** el material de aporte no llena completamente la cavidad entre las piezas a unir.

La penetración incompleta puede ser causada por: a) Velocidad excesiva de electrodo. Se avanza demasiado rápido con el electrodo por lo que el material de aporte se enfría con mucha rapidez. b) Selección de diámetro inadecuado de electrodo. c) Corriente insuficiente. d) Junta mal preparada. (Ver Figura 12).

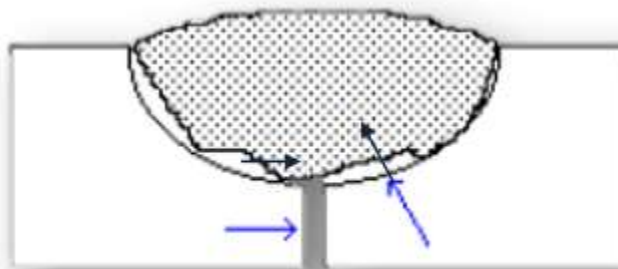


Figura 12: Defecto de penetración incompleta en soldadura

Fuente: Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales (2006)

- **Agrietamiento:** el agrietamiento puede ocurrir a medida que el cordón se enfría hasta alcanzar la temperatura ambiente. El agrietamiento puede deberse a la contracción térmica del metal por enfriamiento, lo cual puede ocasionar esfuerzos en el cordón. Estas grietas se forman generalmente en la zona afectada con el calor, y sus posibles causas son la presencia de hidrogeno en metales base endurecibles, falta de holgura en la unión para compensar la contracción térmica lo cual origina esfuerzos residuales y posteriormente grietas, y formación de martensita en aceros endurecibles a causa de enfriamiento rápido de la unión. (Ver Figura 13)

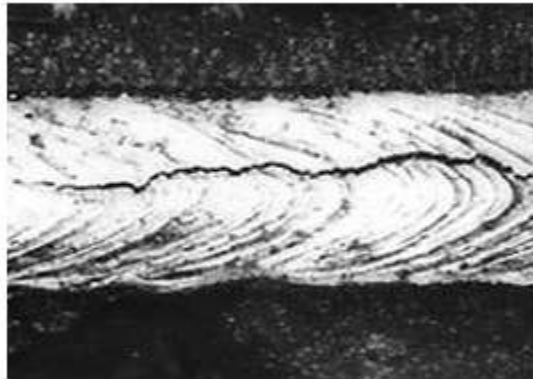


Figura 13: Defecto de agrietamiento en soldadura

Fuente: <http://www.ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn100.html>

- **Inclusiones solidas:** Son sólidos no metálicos atrapados en el metal de soldadura o entre el metal de soldadura y el metal base. Pueden encontrarse en soldaduras hechas por cualquier proceso de arco. En general, estas inclusiones resultan por fallas en la técnica de soldadura, en el diseño de la junta tal que no permita un acceso adecuado, o en una limpieza inadecuada entre los cordones de la soldadura. Normalmente, la escoria disuelta fluirá hacia la parte superior de la soldadura, pero muescas agudas en la interfase de metal base y de soldadura, o entre los cordones de soldadura, frecuentemente provocan que la escoria quede atrapada bajo el metal de soldadura. (Ver Figura 14).

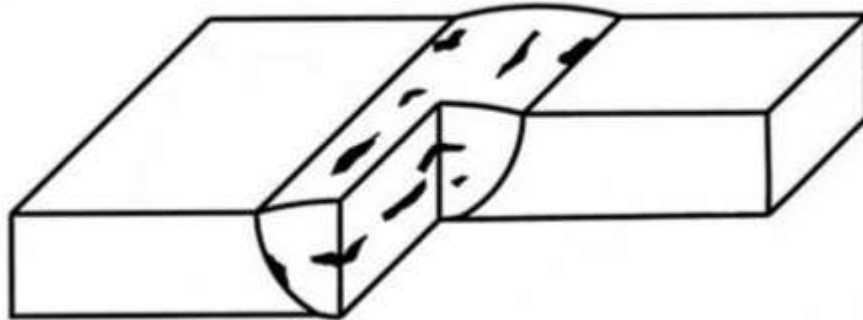


Figura 14: Inclusiones solidas en soldadura

Fuente: <http://soldargen.blogspot.com/2012/05/fisuras-causas-y-soluciones-lasfisuras.html>

- **Socavación:** Asociadas generalmente con técnicas inapropiadas y/o corrientes excesivas de soldadura. La socavación es una muesca o canaleta o hendidura ubicada en los bordes de la soldadura; es un concentrador de tensiones y además disminuye el espesor de las planchas o caños, todo lo cual es perjudicial. Pueden darse en la raíz o en la cara de la soldadura. Cuando la socavación es controlada, su longitud está dentro de los límites especificados y no constituye una muesca profunda, no es considerada un defecto de soldadura.
- **Efectos residuales:** Los esfuerzos residuales que se originan en el proceso de soldadura son consecuencia de dilataciones y contracciones que aparecen como producto de un calentamiento local del material, así como por cambios dimensionales causados por diversas transformaciones microestructurales que se presentan. Las tensiones residuales pueden ser macroscópicas o microscópicas, por ejemplo las tensiones macroscópicas pueden presentarse debido al calentamiento del material, en tanto que las tensiones microscópicas se generan debido a transformaciones microestructurales.
- **Porosidades:** Discontinuidad del tipo de cavidad formada por gas atrapado durante la solidificación del metal de soldadura. Se divide a su vez en cuatro tipos:

a) Porosidad uniformemente dispersa: Es porosidad uniformemente distribuida a lo largo de la soldadura; causada por la aplicación de una técnica de soldadura incorrecta o por materiales defectuosos. Si la soldadura se enfría lo suficientemente lento para permitir que la mayor parte del gas pase a la superficie antes de la solidificación, habrá unos pocos poros en la soldadura.

b) Porosidad agrupada: Es un agrupamiento localizado de poros. Generalmente resulta por un inicio o fin inadecuado del arco de soldadura.

c) Porosidad alineada: Frecuentemente ocurre a lo largo de la interfase metal de soldadura / metal base, la interfase entre cordones de soldadura, o cerca de la raíz de soldadura, y es causada por la contaminación que provoca el gas por su evolución en esos sitios.

d) Porosidad vermicular o tipo gusanos: Es un poro de gas alargado. Este tipo de porosidad de soldadura se extiende desde la raíz hasta la superficie de la soldadura. Cuando uno o más poros son vistos en la superficie de la soldadura, un cuidadoso descarte puede también revelar porosidad sub superficial. De todas formas, muchas de las porosidades vermiculares encontradas en soldaduras no se extienden hasta la superficie.

2.2.11 Escoria.

El recubrimiento también forma escoria en la parte superior del metal fundido que se suelda, la cual protege al metal fundido durante el enfriamiento y también ayuda a configurar la soldadura. Se elimina después de que se ha enfriado la soldadura. La escoria, además de formar una capa protectora sobre la soldadura, también debe poseer las siguientes características:

- Tener un punto de fusión más alto que el del metal que se suelda. De lo contrario, hay el peligro de que la escoria se solidifique antes que el metal de aporte depositado.
- Tener una densidad, en su estado fundido, que sea menor que la del metal de soldadura, para que pueda flotar en la superficie.

- Debe tener superficie viscosidad para que no fluya sobre una superficie muy grande. Sirve para evitar la contaminación del metal de la soldadura con el aire atmosférico.

En la Figura 15 se muestra la escoria generada por el proceso de soldadura SMAW.

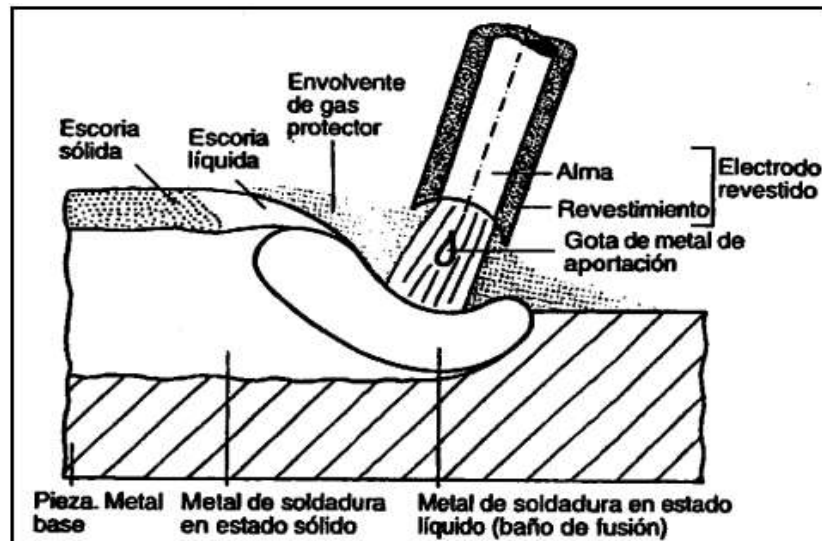


Figura 15: Descripción del proceso SMAW donde se muestra la escoria

Fuente: Departamento de Formación Lincoln-KD, S.A (2.016)

2.2.12 Ventajas y desventajas del proceso.

Ventajas:

- El equipo es relativamente simple, portátil y económico.
- La protección del metal de aporte y del charco de soldadura está incluida en el electrodo revestido.
- No requiere del suministro externo de un gas de protección o fundente granular.
- Es menos sensible a las corrientes de aire que los procesos que requieren de protección con gas.
- Puede ser utilizado en áreas de acceso limitado.
- Para la mayoría de las aleaciones comerciales existe disponibilidad de electrodos.

Desventajas:

- El operador requiere de una mayor habilidad que en los procesos de alambre.
- La aplicación es más lenta que los procesos de alambre.
- Se requiere de mayor tiempo de limpieza para los cordones.
- El electrodo revestido tiene la eficiencia más baja.

La desventaja de la soldadura metálica con arco protegido como operación de producción proviene del uso de varillas de electrodos consumibles, porque estos deben cambiarse en forma periódica a causa del desgaste. Esto reduce el tiempo de arco eléctrico en este proceso de soldadura. Otra limitación es el nivel de corriente que puede usarse, porque la longitud del electrodo varía durante la operación y ésta afecta al calentamiento de la resistencia del electrodo, los niveles de corriente deben mantenerse dentro de un rango seguro o el recubrimiento se sobrecalienta y fundirá prematuramente cuando se empieza a usar una nueva varilla de soldadura. En la Figura 16 se muestra un gráfico de Eficiencia Vs Tipo de electrodo.

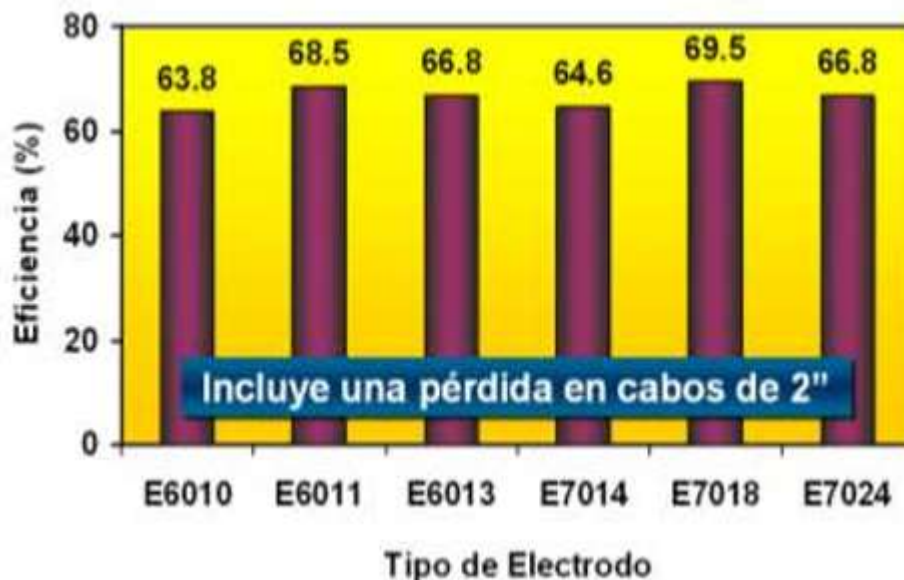


Figura 16: Gráfico de Eficiencia vs Tipo de electrodo.

Fuente: http://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm12/ejercicios12_3.html (2.015)

Algunos de los otros procesos de soldadura con arco eléctrico superan las limitaciones de la longitud de la varilla de soldadura en este proceso, usando un electrodo de alambre que se alimenta en forma continua.

Un buen procedimiento de soldadura está caracterizado por la poca presencia de porosidad, buena fusión, y una terminación libre de grietas o quebraduras, es una de las causas más frecuentemente citadas de una soldadura pobremente ejecutada, es causada por el exceso de oxígeno de la atmósfera, creada por el gas usado en el proceso y cualquier contaminación en el metal base, que combinado con el carbón en el metal soldado forma diminutas burbujas de monóxido de carbono (CO). Algunas de estas burbujas de CO pueden quedar atrapadas en la soldadura fundida después que se enfría y se convierten en poros mejor conocidos como porosidad.

2.2.13 Metalografía en aceros

Es una ciencia que estudia la constitución estructural de los metales y aleaciones metálicas con el auxilio de un microscopio óptico y de la fotografía.

Para realizar un examen metalográfico, se debe preparar la superficie metálica cortándola a una dimensión establecida y puliéndolas cuidadosamente hasta que quede una superficie lisa, exenta de irregularidades y un brillo tipo espejo utilizando para esto papeles abrasivos cuyo grano de papel se relaciona con la numeración de este, que da cuenta del número de partículas por pulgada cuadrada, con una secuencia de 180 hasta 2000, y químicos en el pulido de la probeta, utilizando suspensión de alúmina Al_2O_3 con ayuda de una pulidora de mesa para finalmente tocarlas con reactivos adecuados, cuyo ataque químico general para el acero al carbono, es el compuesto Nital, lo que permite corroer ciertos componentes y dejar en relieve otros, como la organización o límite de los granos que dan lugar a la microestructura del material y la aparición de posibles grietas o microgrietas.

Una vez realizado esto se procede a observar la muestra en un microscopio óptico con cámara. Otro instrumento usado para la microscopía es el microscopio electrónico de barrido el cual es un instrumento que a partir de un cañón de electrones, produce un haz de electrones en una columna de vacío, el cual es enfocado y dirigido de modo que lo haga

incidir sobre un pequeño punto exacto de la superficie de una muestra y luego recoge y exhibe en pantalla las señales eléctricas que son emitidas por el material.

La imagen con elevaciones y depresiones tiene una profundidad de campo superior en unas 300 veces la del microscopio óptico.

2.2.14 Ensayos mecánicos.

2.2.14.1 Ensayo de Tracción.

La prueba de tracción es la que se realiza con más frecuencia, para determinar las propiedades mecánicas de los materiales. Consiste en realizar esfuerzos a tensión a un material hasta su ruptura. Las cargas en la probeta y en el alargamiento de estas se miden continuamente a medida que aumenta la carga. El esfuerzo al cual se somete la probeta se determina dividiendo la fuerza aplicada por el área transversal nominal de la misma, y la deformación unitaria se obtiene dividiendo el alargamiento total por una longitud inicial de referencia. Como resultado de este ensayo se obtiene un diagrama esfuerzo-deformación.

El ensayo destructivo más importante es el ensayo de tracción, en donde se coloca una probeta en una máquina especial para este ensayo, que consiste en dos (2) mordazas, una fija y una móvil. Se procede a medir la carga mientras se aplica el desplazamiento de la mordaza móvil. El ensayo de tracción es el apropiado para uso general en el caso de la mayoría de los metales y aleaciones no ferrosas, fundidas, laminados o forjados. (Ver Figura 17).

La curva Esfuerzo vs. Deformación a la tracción se obtiene por la acción de la carga fija sobre una probeta estándar. Otro método para obtener la curva es especificar la rapidez de deformación como variable independiente, en cuyo caso la rapidez de carga se ajusta en forma continua para mantener la deformación requerida. En la mayoría de los materiales de ingeniería, la curva tendrá una región elástica lineal, en la cual la deformación es reversible e independiente del tiempo.

La máquina para realizar el ensayo de tracción impone la deformación desplazando el cabezal móvil a una velocidad seleccionada. La celda de carga conectada a la mordaza fija entrega una señal que representa la carga aplicada, algunas máquinas poseen una impresora que gráfica en un eje el desplazamiento y en el otro eje la carga leída.

Las ecuaciones para determinar las propiedades mecánicas con este ensayo son las siguientes:

$$S_i = \frac{P}{A_0} \quad \text{Ec. 1}$$

$$\delta = \frac{L_f - L_0}{L_0} \quad \text{Ec. 2}$$

$$\sigma_r = \frac{P_i}{A_i} \quad \text{Ec.3}$$

Dónde:

A_0 = Área inicial (mm^2)

L_0 = Longitud inicial (mm)

L_f = Longitud final (mm)

S_i = Esfuerzo de Ingeniería (MPa)

σ_r = Esfuerzo Real (MPa)

δ = Deformación Unitaria (mm/mm)

A_i = Área instantánea (mm^2)

P = Carga (N)

P_i = Carga instantánea (N)

Este ensayo además da como resultado, un gráfico que permite deducir puntos y zonas características que revisten gran importancia, dicho grafico se obtiene directamente de la máquina representando alargamiento, en función de la carga o la fuerza estática aplicada. Sin embargo, a partir de él se puede obtener el diagrama esfuerzo- deformación, el cual destaca las propiedades mecánicas más importantes del material. La curva típica del ensayo se observa en la Figura 18.



Figura 17: Máquina de ensayo de tracción marca Sistemas de Ensayos, S.L
Modelo MEM-101-10-SDC
Fuente: Trexa, C.A. (2017)

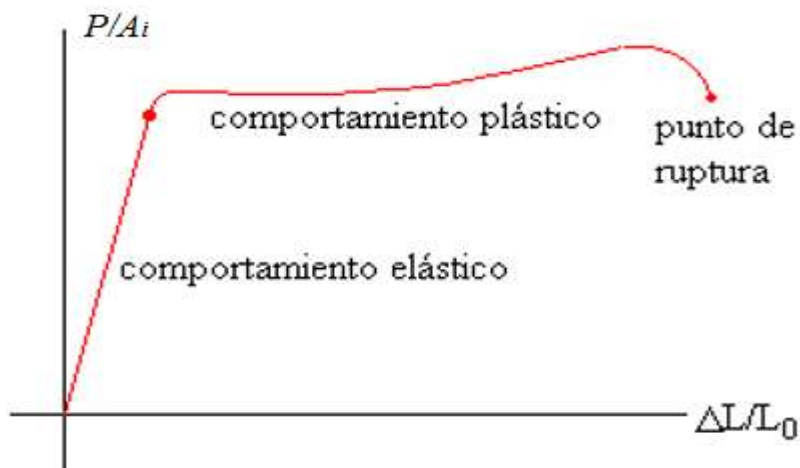


Figura 18: Comportamiento típico de los materiales
Esfuerzo vs Deformación unitaria.

Fuente: Askeland, Ingeniería y Ciencia de los materiales, (2.004)

En los materiales dúctiles (materiales que pueden deformarse sostenidamente sin romperse), si se posee su curva característica es posible obtener propiedades que servirán para su estudio. (Ver Figura 19).

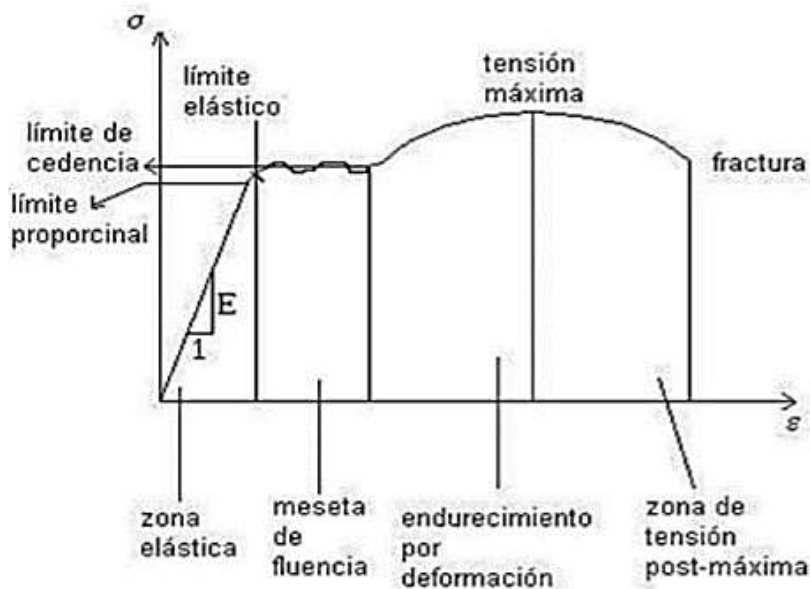


Figura 19: Curva característica Esfuerzo vs Deformación
para materiales dúctiles.

Fuente: Askeland, Ingeniería y Ciencia de los materiales, (2.004)

- **Módulo de Young E:** representa la relación entre la tensión y la deformación en la zona proporcional.
- **Límite de rotura:** máximo valor de la tensión observable en un diagrama tensión-deformación. Es la máxima tensión que soporta la probeta.
- **Límite de proporcionalidad:** la tensión a partir de la cual deja de cumplirse la relación proporcional entre tensión y deformación.
- **Límite de fluencia:** Valor de la tensión que soporta la probeta en el momento de producirse el fenómeno de la fluencia.
- **Estricción:** Es la reducción de la sección que se produce en la zona de la rotura.

2.2.14.2 Ensayo de Doblado.

Este ensayo se utiliza para medir la capacidad de deformación de la soldadura en una probeta al flexionarla alrededor de un punzón, ocasionalmente se toma el alargamiento de la fibra exterior para evaluar la capacidad de deformación.

Generalmente para estos ensayos se utiliza una prensa hidráulica donde se ubica el material entre dos apoyos y se hace bajar la prensa haciendo actuar el punzón.

En este ensayo es colocada la probeta en dos apoyos, se somete a una carga progresiva en el centro de la misma, se dobla hasta la aproximación de las grietas o hasta que se considere suficiente, el ángulo de doblado, los pliegues y demás detalles de esa zona proporcionan información útil sobre el comportamiento de ese material en trabajos de flexión. (Ver Figura 20).

El doblado a temperatura ambiente es un ensayo tecnológico derivado del de flexión, se realiza para determinar la ductilidad de los materiales metálicos (de él no se obtiene ningún valor específico). Este ensayo es solicitado por las especificaciones en la recepción de los aceros en barras y perfiles, para la comprobación de la tenacidad de los mismos y después de haber sido sometido al tratamiento térmico de recocido. El material se coloca entre los soportes cilíndricos, aplicando la carga lentamente hasta obtener el ángulo de doblado del mismo, o bien se observa la aparición de las primeras fisuras en la cara inferior o la sometida a la tracción. Avner, S. (1.989).



Figura 20: Dispositivo para Ensayo de Doblado.

Fuente: Laboratorio de procesos de fabricación
Facultad de Ingeniería - Universidad de Carabobo

El ángulo de doblez depende de los siguientes factores:

- Forma y fabricación de la probeta: a la forma y dimensiones de la probeta, estado de la superficie (sin considerar el cordón); ángulo del chaflán en V o en X.
- Realización del Ensayo: posición de la costura de la raíz del ensayo, distancia entre apoyos, diámetros del punzón, velocidad de deformación en el ensayo.

2.2.14.3 Doblado de cara.

Se utiliza para comprobar la calidad de la fusión, es decir, es para ver si la soldadura está libre de porosidad, inclusiones y falta de fusión. Para realizar el ensayo de cara se sitúa la probeta sobre los soportes cilíndricos de tal manera que la parte más ancha del cordón de soldadura se coloque hacia abajo y se aplica la presión hasta que la probeta quede en forma de U.

2.2.15 Ensayos Metalúrgicos.

2.2.15.1 Ensayo de Macroscopía.

El objetivo de un examen macroscópico es el de detectar ciertos aspectos e imperfecciones observables a simple vista, que generan información sobre las características del material en estudio; esta información permite concluir cualitativamente acerca de las características mecánicas y de los procesos de conformación utilizados en los metales y aleaciones, la preparación de la muestra debe hacerse previa al examen.

2.2.15.2 Ensayo de Microscopía.

La microscopía es la técnica de producir imágenes visibles, de estructuras o detalles demasiados pequeños para ser percibidos a simple vista. Para realizar la revisión microscópica de las muestras, previamente se deben preparar de acuerdo a ciertas normas, luego se exponen a la acción química de un reactivo y como último paso, se observa la muestra en el microscopio metalográfico. La confiabilidad de la información, sobre la microestructura y los constituyentes del material en estudio, está íntimamente vinculada con el proceso antes descrito, de no ser así, el ensayo puede arrojar datos que disten de la realidad.

Sin duda alguna el microscopio es la herramienta más importante del metalurgista tanto desde el punto de vista científico como el técnico, ya que es posible mediante este determinar las características de la estructura de un metal o aleación, pudiéndose determinar el tamaño de grano y el tamaño, forma y distribución de las diversas fases e inclusiones, características íntimamente relacionadas con las propiedades mecánicas de los materiales.

Este ensayo se basa en la amplificación de la superficie mediante instrumentos ópticos (microscopio), para observar características estructurales microscópicas (micro-estructura). Este tipo de examen permite realizar el estudio o controlar el proceso térmico al que ha sido sometido el metal, debido a que los mismos nos ponen en evidencia la estructura o los cambios estructurales que sufren es dicho proceso. Guzmán F. (2016).

2.2.16 Ensayos no destructivos

Es una disciplina tecnológica que consiste en reunir una serie de métodos que permiten obtener una información sobre propiedades, estructuras y condiciones de un material o componente, sin modificar su aptitud para el servicio. Entre sus principales funciones se encuentran las siguientes:

- Detectar discontinuidades en materiales y estructuras sin destrucción de los mismos.
- Determinar la ubicación, orientación, forma, tamaño y tipo de discontinuidades.
- Establecer la calidad del material, basándose en el estudio de los resultados y en la severidad de las discontinuidades y/o defectos de acuerdo a las normas de calidad y los objetivos del diseño.

De acuerdo a su aplicación, los ensayos no destructivos se divide en:

2.2.16.1 Técnicas de Inspección Superficial.

Mediante las técnicas de inspección visual sólo se comprueba la integridad superficial de un material. Por tal razón su aplicación es conveniente cuando es necesario detectar discontinuidades que están en la superficie, abiertas a ésta o a profundidades menores de 3 mm. Este tipo de inspección se realiza por medio de cualquiera de los siguientes Ensayos no Destructivos:

- Inspección visual (VT).
- Líquidos Penetrantes (PT).
- Partículas Magnéticas (MT).
- Electromagnetismo (ET).
- Corrientes Inducidas.
- Termografía.

2.2.16.2 Técnicas de Inspección Volumétrica

Su aplicación permite conocer la integridad de un material en su espesor y detectar discontinuidades internas que no son visibles en la superficie de la pieza. Este tipo de inspección se realiza por medio de cualquiera de los siguientes ensayos:

- Radiografía Industrial (RT)
- Ultrasonido Industrial (UT)
- Radiografía Neutrónica (NT)
- Emisión Acústica (AET)

2.2.16.3 Técnicas de Inspección de la Integridad o hermeticidad.

Son aquellas en las que se comprueba la capacidad de un componente o de un recipiente para contener un fluido (líquido o gaseoso) a una presión superior, igual o inferior a la atmosférica, sin que existan pérdidas apreciables de presión o de volumen del fluido de prueba en un período previamente establecido. Este tipo de inspección se realiza empleando cualquiera de los siguientes ensayos:

Pruebas por cambio de presión: Hidrostática y Neumática.

Pruebas por pérdida de fluido: Cámara de burbujas, Detector de Halógenos, Espectrómetro de Masas, Detector Ultrasónico, cámara de vacío.

2.2.16.4 Líquidos penetrantes

La inspección por Líquidos Penetrantes es empleada para detectar e indicar discontinuidades que afloran a la superficie de los materiales examinados. En términos generales, esta prueba consiste en aplicar un líquido coloreado o fluorescente a la superficie a examinar, el cual penetra en las discontinuidades del material debido al fenómeno de

capilaridad. Después de cierto tiempo, se remueve el exceso de penetrante y se aplica un revelador, el cual generalmente es un polvo blanco, que absorbe el líquido que ha penetrado en la discontinuidad y sobre la capa de revelador se delinea el contorno de ésta.

El principio básico de la inspección por líquidos penetrantes consiste en tres pasos principales:

a) Aplicación del penetrante: El penetrante se aplica por cualquier método que humedezca totalmente la superficie que se va a inspeccionar, dependiendo del tamaño de las piezas, de su área y de la frecuencia del trabajo. Se puede seleccionar el empleo de rociado, inmersión, brocha, etc., cualquiera que sea la elección, ésta debe asegurar que el penetrante cubra totalmente la superficie.

b) Remoción del exceso: Consiste en la eliminación del exceso de penetrante que no se introdujo en las discontinuidades. Esta etapa reviste gran importancia pues de ella depende en gran parte la sensibilidad del método.

c) Aplicación del Revelador: La función del revelador es absorber o extraer el penetrante atrapado en las discontinuidades, aumentando o provocando la visibilidad de las indicaciones.

Además de esto deben considerarse otros aspectos pre y post inspección como: la limpieza previa de la pieza a inspeccionar, la correcta selección del líquido penetrante y del revelador

a utilizar, el tiempo de revelado, limpieza final.

2.2.16.5 Radiografía industrial

El caso de la Radiografía Industrial (RT), como prueba no destructiva, es muy interesante; pues permite asegurar la integridad y confiabilidad de un producto; además, proporciona información para el desarrollo de mejores técnicas de producción y para el perfeccionamiento de un producto en particular.

La Inspección por RT se define como un procedimiento de inspección no destructivo de tipo físico, diseñado para detectar discontinuidades macroscópicas y variaciones en la estructura interna o configuración física de un material.

Al aplicar RT, normalmente se obtiene una imagen de la estructura interna de una pieza o componente, debido a que este método emplea radiación de alta energía, que es capaz de penetrar materiales sólidos, por lo que el propósito principal de este tipo de inspección es la obtención de registros permanentes para el estudio y evaluación de discontinuidades presentes en dicho material. Por lo anterior, esta prueba es utilizada para detectar discontinuidades internas en una amplia variedad de materiales.

Entre los principales componentes de los equipos de rayos x se encuentran los siguientes: **Carcasa protectora:** el tubo de rayos X, siempre está montado en una carcasa protectora, formada de plomo, y diseñada para controlar los serios peligros que afectaron a la

radiología en sus principios, (exposición excesiva a la radiación, descarga eléctrica). La carcasa protectora proporciona también un soporte mecánico al tubo de rayos X, y lo protege frente al posible daño producido por la manipulación descuidada. Cuando se producen, los rayos X son emitidos con la misma intensidad en todas las direcciones, pero nosotros solo empleamos los emitidos a través de una sección especial del tubo de rayos X, llamada ventana. Los rayos X emitidos a través de la ventana se conocen como haz útil, los restantes que se escapan a través de la carcasa protectora son, la radiación de fuga.

Envoltura de cristal: el de rayos X, es un tipo especial de tubo de vacío, los componentes del tubo se encuentran dentro de una envoltura de cristal. Esta envoltura, que debe de ser fabricada de un vidrio que pueda soportar el tremendo calor generado, mantiene el vacío, lo cual hace posible una producción más eficaz de rayos X, y prolonga la vida del tubo. Si estuviera lleno de gas, disminuiría el flujo de electrones que van del cátodo al ánodo, se producirían menos rayos X y se crearía más calor. La ventana del tubo es de un cristal más fino que deja filtrar los rayos X. Es un segmento que permite una máxima emisión de rayos X con absorción mínima por la envoltura de cristal.

Cátodo: parte negativa del tubo de rayos X, tiene dos partes principales; el filamento y la copa de enfoque.

Ánodo: es el lado positivo del tubo de rayos X, el cual tiene tres funciones en el tubo de rayos X: 1- Es un conductor eléctrico 2- Proporciona soporte mecánico al blanco. 3- Debe ser un buen conductor térmico, cuando los electrones chocan con el ánodo, más del 99% de su energía cinética se convierte en calor, que debe ser eliminado rápidamente antes de que pueda fundir el ánodo. El cobre es el material más utilizado en el ánodo.

Punto focal: es el área del blanco desde la que se emiten los rayos X. Constituye la fuente de radiación.

Blanco: es el área del ánodo con la que chocan los electrones procedentes del cátodo. En los tubos de ánodo estacionario, el blanco consiste en una pequeña placa de tungsteno que se encuentra encastrado en un bloque de cobre. En los tubos de ánodo rotatorio, el disco que gira es el blanco, normalmente está formado por una aleación de Tungsteno mezclada con Torio, que proporciona una resistencia adicional para soportar el esfuerzo de la rotación rápida.

2.2.16.6 Ultrasonido

La inspección por ultrasonido es un método no destructivo en el cual un haz o un conjunto de ondas de alta frecuencia son introducidos en los materiales para la detección de fallas en la superficie y sub-superficie. Las ondas de sonido viajan a través del material disminuyéndose paulatinamente y son reflejadas a la interface. El haz reflejado es mostrado y analizado para definir la presencia y localización de fallas y discontinuidades. El grado de

reflexión depende grandemente en el estado físico de los materiales que forman la interface. Por ejemplo: las ondas de sonido son reflejadas casi totalmente en las interfaces gas/metal. Por otro lado existe una reflectividad parcial en las interfaces metal/sólido.

Grietas, laminaciones, poros, socavados y otras discontinuidades que producen interfaces reflectivas pueden ser detectadas fácilmente. Inclusiones y otras partículas extrañas pueden ser también detectadas causando baja reflexión. Su principal aplicación es la detección de discontinuidades y defectos internos, aunque también es utilizado para detectar defectos superficiales, para definir características de la superficie tales como: medida de corrosión y espesor. Y con frecuencias menores se sirve para determinar el tamaño de grano, estructura, y constantes elásticas.

Equipo básico

La mayoría de los equipos de inspección por ultrasonido incluyen el siguiente equipo básico:

- Generador electrónico de señal que produce ráfagas de voltaje alternadas. □
Transductor que emite un haz de ondas ultrasónicas cuando las ráfagas de voltaje alternado son aplicadas.
- Acoplador para transferir la energía de las ondas de ultrasonido a la pieza de trabajo.
- Un acoplador que transfiere la salida de las ondas de sonido (energía acústica) de la pieza al transductor.
- Transductor (puede ser el mismo que el transductor que inicia las ondas ultrasónicas o puede ser otro diferente) para aceptar y convertir la ondas de ultrasonido de salida de la pieza de trabajo en ráfagas de voltaje. En la mayoría de los sistemas un transductor simple actúa como emisor y receptor.
- Dispositivo electrónico para amplificar y modificar las señales del transductor.
- Un dispositivo de salida que muestre la información resultante y la proyecte ya sea impresa o en pantalla.
- Un reloj electrónico o un cronómetro para controlar la operación de varios componentes del sistema.

2.3 Definición de Términos Básicos.

Acero: es una aleación de hierro-carbono con un contenido de carbono no mayor a 20,11%, y que posee otros aleantes como Cr, Si, Mn, etc.

Agrietamiento: fractura y fisura de un material.

Alargamiento: Distancia que una probeta o muestra de material se dilata antes de romperse. Normalmente se expresa como un porcentaje de la longitud original de la distancia entre las señales.

Aleación: sustancia con propiedades metálicas compuesta por dos o más elementos químicos de los cuales al menos uno es un metal.

Amperaje (A): medida de unidades eléctricas que indica el flujo de energía eléctrica que pasa a través de un circuito.

Arco eléctrico: es el espacio entre la punta del electrodo o alambre y la pieza que se va a soldar, por el cual pasa la corriente que crea el calor necesario para la fusión.

Biselado: proceso en el cual se realiza un corte oblicuo en el borde de una superficie.

Cementita: carburo de hierro constituyente de las estructuras del acero (Fe_3C).

Ductilidad: es la capacidad que tiene un material para ser deformado plásticamente sin que este se fracture.

Dureza: resistencia de un material a ser penetrado superficialmente.

Escoria: residuos no deseados dejados por el proceso de soldadura.

Esfuerzo: fuerza por unidad de área.

Ferrita: es un componente del acero el cual posee un color blancuzco, cuya composición es aproximadamente 99.95% de hierro y el resto de carbono.

Ferrita Widmanstaetten: es una microestructura ferrítica la cual posee una apariencia del grano vasto, es una microestructura frágil.

Grano: cristales estructurales que según su tamaño, puede representar zonas de enfriamiento.

Indentador: penetrador utilizado en los ensayos de dureza y microdureza; en el caso de microdureza Vickers, es un penetrador de diamante en forma piramidal con un ángulo de 135° .

Microestructura: disposición microscópica de granos, límites de granos, inclusiones, defectos, etc. Observados en el acero luego de ser pulido y atacado químicamente.

Perlita: microconstituyente de los aceros formados por ferrita y cementita, se presenta en forma de láminas alternadas.

Vernier: dispositivo empleado para efectuar mediciones de precisión y basado en dos escalas graduales de movimientos relativos.

2.4 Símbolos y Abreviaturas de Términos.

VARIABLE	DESCRIPCIÓN
A	Ampere
AWS	American Welding Society

ASTM	American Society for Testing and Materials
C	Carbono
Cu	Cobre
Fe	Hierro
Fe ₃ C	Cementita
Hv	Índice de dureza Vickers
I	Intensidad de corriente medida en Ampere
Kg	Kilogramos
L	Longitud (m)
Lo	Longitud calibrada (m)
MB	Metal Base
Mo	Molibdeno
Mn	Manganeso
N	Newton
Ni	Níquel
P	Fósforo
Pulg.	Pulgadas
S	Azufre
Si	Silicio
SMAW	Soldadura manual por arco revestido
ZAC	Zona Afectada por el Calor
ZF	Zona de fusión

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1 Tipo de investigación

Según Arias F. (2.012): “La Investigación experimental es un proceso que consiste en someter a un objeto o grupo de individuos, a determinadas condiciones, estímulos o tratamiento (variable independiente), para observar los efectos o reacciones que se producen (variable dependiente), para observar los efectos o reacciones que se producen (variable dependiente)” y “La investigación documental es un proceso en la búsqueda, recuperación, análisis, crítico e interpretación de datos secundarios, es decir, los obtenidos y registrados por otros investigadores en fuentes documentales: impresos, audiovisuales o electrónicos. Como en toda investigación, el propósito de este diseño es el aporte de nuevos conocimiento”. Este estudio es una investigación experimental y documental ya que se buscaron referencias previas y se realizaron una serie de ensayos mecánicos y metalúrgicos ya normalizados al material antes y luego de ser sometido al proceso de soldadura SMAW.

Este trabajo se basó en una investigación experimental debido a que se realizarán varios ensayos como estudio a las probetas de acero AISI 1010.

3.2 Nivel de la investigación.

Según Arias F. (2.012): “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.”

Igualmente según Arias F. (2.012): “La Investigación explicativa se encarga de buscar el porqué de los hechos mediante el establecimiento de relaciones causa-efecto. En este sentido, los estudios explicativos pueden ocuparse tanto de la determinación de las causas (investigación post facto), como de los efectos (investigación experimental), mediante la prueba de hipótesis. Sus resultados y conclusiones constituyen el nivel más profundo de conocimientos”.

Este trabajo especial de grado puede definirse como de tipo descriptivo y explicativo. Descriptiva porque consiste en la caracterización de un hecho o fenómeno estableciendo su

estructura o comportamiento. En esta investigación se analizó el comportamiento mecánico del material y la metalurgia de uniones soldadas por el método SMAW en el acero AISI 1010. Trata de explicar los fenómenos ocurridos en el cordón de soldadura y en el metal base, de manera que se pueda establecer las posibles ventajas de aplicación del mismo a las piezas soldadas. Además es Explicativa porque consiste en buscar el porqué de los hechos mediante el establecimiento de relaciones causa-efecto. Para alcanzar los objetivos planteados en este trabajo se siguen los lineamientos de investigación documental, esto quiere decir, que se recurrió a la revisión bibliográfica y al análisis que se fundamenta en el ensayo mecánico normalizado y estudio de las muestras de manera empírica.

3.3 Diseño de investigación

Según Arias F. (2.012): “El diseño de investigación es la estrategia general que adopta el investigador para responder al problema planteado. En atención al diseño, la investigación se clasifica en: documental, de campo y experimental”

El diseño de investigación que identifica este trabajo, es el de tipo experimental 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 las causas para caracterizar las juntas soldadas de estudio, con el fin de establecer su microestructura y comportamiento mecánico, de esta manera realizar el análisis comparativo entre los distintos tipos de electrodos buscando verificar el comportamiento mecánico de dichos electrodos con el material base.

3.4 Población y muestra

Según Arias (2012): “la población, o en términos más precisos población objetivo, es un conjunto finito o infinito de elementos con características comunes para los cuáles serán extensivas las conclusiones de la investigación. Esta queda delimitada por el problema y por los objetivos del estudio”. (p.81). “La muestra es un subconjunto representativo y finito que se extrae de la población accesible” (Arias, 2.012, p. 83). Tomando esto de referencia tenemos que la muestra es un grupo que será seleccionado en la zona de estudio del proyecto que representara a la población total.

El acero AISI 1010 representa la población a estudiar, mientras que las muestras están la constituidas por veintisiete (27) , veintisiete (27) probetas para doblado, nueve (9) para macroscopía y nueve (9) para microscopía, teniéndose un total de setenta y dos (72) probetas como muestra.

3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.

Arias (2.012) afirma:

“Se entenderá por técnica de investigación, el procedimiento o forma particular de obtener datos o información”. También manifiesta que: “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”.

En esta investigación se utilizará la observación directa para recolectar los datos arrojados en la aplicación de ensayos mecánicos y metalúrgicos en el material base y en el cordón de soldadura.

Así mismo, los instrumentos utilizados para la recolección de los datos serán: computadores, microscopio óptico, máquina de tracción, equipo especializados para ensayos no destructivos (rayos X).

3.6 Técnicas de Procesamiento y Análisis de datos.

Una vez organizados los datos obtenidos de cada ensayo, se procederá a aplicar técnicas de procesamiento de datos tales como tablas, imágenes y gráficos con el fin de determinar las tendencias de la información registrada, se realizaron comparaciones para establecer de esta manera las diferencias que presentaron cada muestra.

El procesamiento y análisis de estos datos estará dado de acuerdo a las normas que se mencionaran más adelante en el procedimiento experimental, referidas a cada ensayo o pruebas realizadas. Estas normas refieren parámetros y guías.

A continuación se presentan los pasos a seguir para cumplir con el objetivo fundamental de la investigación, incluyendo los procedimientos para la preparación de las probetas y ensayos necesarios para su posterior análisis. (Ver Figura 21)



Figura 21: Esquema de procedimientos
Fuente: Mercatudo J. (2.017)

Es importante señalar que un aspecto importante dentro de la ejecución de la soldadura es la velocidad con la que el cordón de soldadura es realizado, por lo que será medida durante el desarrollo de la misma.

3.7 Fases de Desarrollo de la Investigación

El desarrollo de la presente investigación está 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.

3.7.1. Fases Metodológicas.

Fase I: Caracterizar el acero AISI 1010 por medio de ensayos de tracción y metalografía (macroscopía y microscopía).

Mecanizado de las láminas.

Inicialmente se tomó una lámina de acero estructural AISI 1010 de dimensiones 90 cm x 60 cm de la cual se extrajeron nueve (9) piezas de 20 cm x 30 cm las cuales serán cortadas y biseladas a 30° (ver Figura 20).

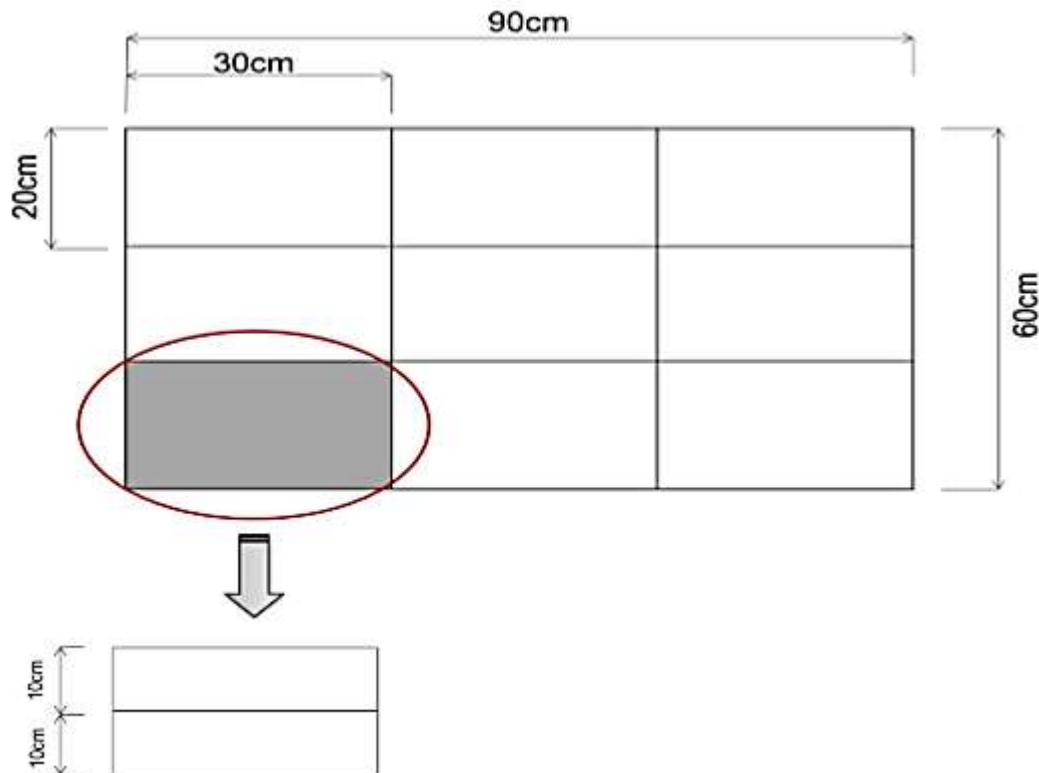


Figura 22: Dimensiones iniciales de la lámina de acero.

Fuente: Mercatudo J. (2.017)

El procedimiento experimental se inicia con la caracterización del material base a manipular en la investigación, el cual es una lámina de Acero Estructural AISI 1010 de 5

mm de espesor y 30 cm x 20 cm, de la cual se obtendrán tres probetas para ensayo de tracción iguales a las de los ensayos para probetas soldadas, como se verá en la Fase 4 y se detallarán sus medidas según las normas ASTM E-8M. El Acero AISI 1010 es un acero estructural al carbono, de alta ductilidad y buena soldabilidad, utilizado en construcción de estructuras metálicas, tuberías, construcción de maquinarias cuando es endurecido superficialmente mediante tratamiento de cementación o carbonitrurado seguido de temple y revenido. La composición química de una colada de acero AISI 1010 puede verse en la Tabla 9. Las propiedades químicas fueron aportadas por la empresa SUMIMSE C.A, quien suministró el material.

Tabla 8: Composición química de la lámina AISI 1010.

Composición Química	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Nb
AISI 1010	,08	,34	,008	,003	,005				

Fuente: SUMIMSE C.A (2.017)

Propiedades

Como la mayoría de los aceros, el AISI 1010 tiene una densidad de $7,87 \text{ gr/cm}^3$ ($0,284 \text{ lb/pulg}^3$), el acero AISI 1010 en barras, planchas y perfiles estructurales con espesores menores a 20,32 cm (8 pulg) tiene un límite de fluencia mínimo de 300 MPa (44 ksi), un límite de rotura mínimo de 370 MPa (53 ksi) y con una dureza Brinell de 105 HB.

Formas

El acero AISI 1010 se produce en una amplia variedad de formas, que incluyen: Planchas, Perfiles estructurales, Tubos, Láminas.

Métodos de unión

Las piezas hechas a partir de acero AISI 1010 son fácilmente unidas mediante casi todos los procesos de soldadura. Los más comúnmente usados para el AISI 1010 son los menos costosos y rápidos como la Soldadura por Arco Metálico Protegido (SMAW,

Shielded Metal Arc Welding), Soldadura con Arco Metálico y Gas (GMAW, Gas Metal Arc Welding), y soldadura oxiacetilénica. El acero AISI 1010 es también comúnmente atornillado y remachado en las aplicaciones estructurales: edificios, puentes, torres, etc.

El bisel se realizará a lo largo de cada pieza obteniéndose 9 pares de ellas para su posterior soldadura, todas con un borde en V de 60° y separación de la raíz de 2 mm aproximadamente como lo indica la norma ANSI/AWS A1.498 (ver Figura 21).

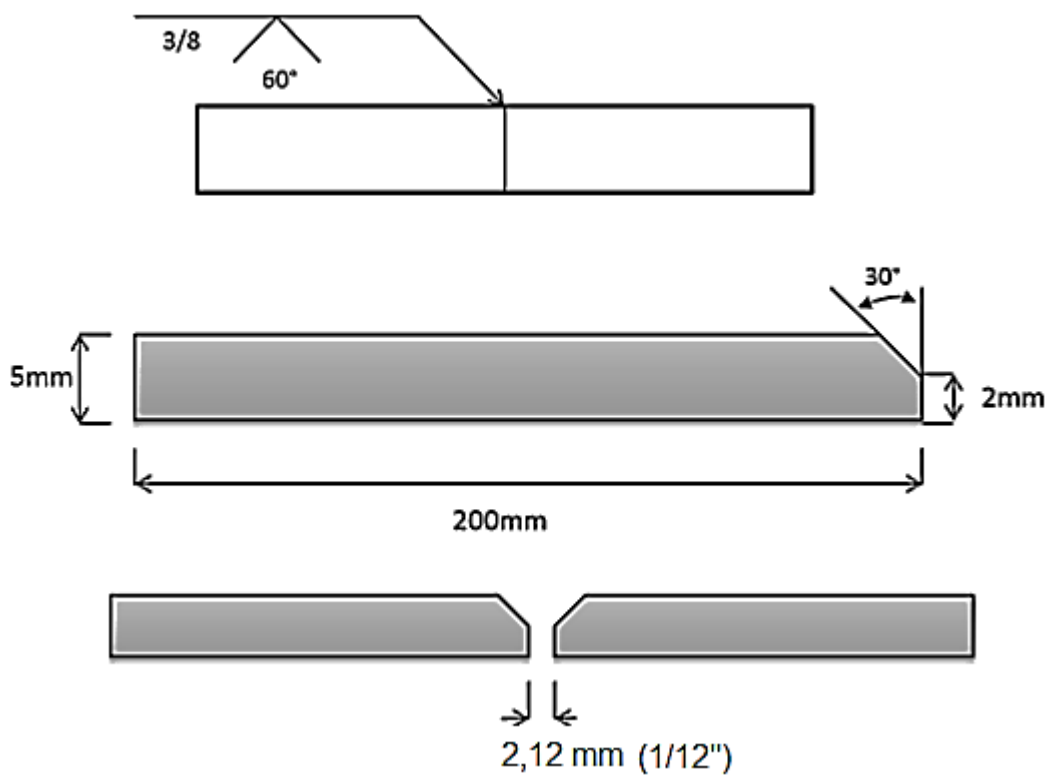


Figura 23: Biselado de láminas.
Fuente: Mercatudo J. (2.017)

Fase II. Seleccionar los parámetros de soldadura a utilizar y ejecutar los cordones de soldadura por medio del proceso SMAW utilizando diferentes electrodos.

Ejecución de soldadura

La soldadura será realizada a tope, utilizando el método de soldadura por arco eléctrico revestido (SMAW). Respecto a los parámetros de soldeo fueron seleccionadas tres

intensidades de corriente distinta para cada electrodo las cuales se encuentran dentro del rango de valores característicos de cada electrodo. De allí, se seleccionó un valor bajo, medio y alto de intensidad para cada electrodo (ver Tabla 10).

Se realiza la soldadura en posición plana, colocando el electrodo perpendicular a la superficie de las láminas a soldar, siendo esta posición la más cómoda y además de que los tres tipos de electrodos pueden trabajarse de esta forma. Después del proceso de soldadura se obtuvieron nueve (9) especímenes de 20cm x 30cm.

Tabla 9: Electrodo e intensidades de corriente seleccionadas

	I1 (A)	I2 (A)	I3 (A)	N° cupón
E6010	65	75	80	3
E6013	60	70	80	3
E7018	70	90	100	3

Fuente: Mercatudo J. (2.017).

Fase III: Estudiar la estructura del cordón de soldadura mediante el uso de rayos X, ultrasonido o líquidos penetrantes.

Se seleccionó el método de Rayos X por ser este método de inspección de la soldadura uno de los más efectivos para visualizar las zonas más afectadas por las porosidades tanto externas como internas. Inicialmente se procederá a determinar los parámetros correctos de tensión, corriente y tiempo de exposición de las muestras de soldadura. Dichos parámetros dependen del espesor del material y la curva es dada por la máquina de ensayos.

Procedimiento del ensayo

Inicialmente se procede a insertar la película de revelado dentro de un sobre negro el cual internamente tiene otra película de plomo que garantiza la calidad del revelado. Todo este proceso se realiza dentro de un cuarto totalmente oscuro para evitar que la radiografía final salga manchada por efectos luminosos.

Una vez que se ha sellado el sobre ya se puede encender la luz y se procede a identificar la lámina soldada con letras de plomo y un indicador patrón de espesor de grietas para

luego ponerlo debajo de la plancha soldada de forma centrada. Luego se procede a cerrar la puerta de esta zona para resguardarse de la radiación, se enciende el tablero de mando desde donde se establecen los parámetros de ataque tales como tiempo de exposición, corriente y tensión para realizar el ensayo.

Una vez realizado el ataque a la muestra se procede a revelar las radiografías nuevamente

en un cuarto totalmente oscuro para evitar un mal revelado. Este proceso se lleva a cabo en tres etapas como se indica:

- 1) Se procede a extraer la película del sobre negro para sumergirlo y agitarlo durante un tiempo de 5 minutos en el líquido revelador.
- 2) Luego se retira del líquido revelador se sumerge y se agita nuevamente la película en una solución fijadora durante un tiempo de 3 minutos.
- 3) Finalmente se retira la película del líquido fijador y se enjuaga en agua para eliminar residuos y por último se deja secar en un horno a temperatura controlada para evitar manchas durante el proceso de secado.

Cálculo de los parámetros del ensayo

En vista de que se trabajará con una lámina soldada de 5mm de espesor se procede a calcular los valores indicados de tensión, corriente y tiempo de la siguiente manera:



Figura 24. Película y diagrama de exposición de acero y rayos X.

Fuente: Catalogo Philips de Rayos X Industriales.

El gráfico anterior corresponde al tipo de película usada en el ensayo por lo tanto se procede a seleccionar con el espesor de 5 mm cualquier valor de tensión que tenga una valor dentro del rango de los kV disponibles, es decir, se puede usar 200 kV, 180 kV, 160 kV, 140 kV, 120 kV y 100kV ya que estos arrojan un valor de exposición apreciable. Luego se lee el valor de mA-min correspondiente y automáticamente se obtiene el tiempo de exposición.

Fase IV: Determinar el comportamiento mecánico y metalográfico, mediante ensayos de tracción, doblado, dureza, macroscopía y microscopía, en uniones soldadas de acero AISI 1010 en función de los parámetros seleccionados.

Después de haber realizado el proceso de soldadura y la inspección de rayos X, se procede al corte de probetas según las normas ASTM E-8M (ver figura 23) donde se indican las dimensiones estandarizadas para la realización del ensayo de tracción asegurando de esta manera la validez de los resultados. Para obtener la forma final de las probetas se utilizará corte por chorro de agua ya que es uno de los métodos que menos afectan las propiedades de resistencia del acero al momento de ser mecanizado. Así mismo, las probetas de doblado se mecanizaron igualmente por chorro de agua con la dimensiones 38mm x 152mm,

Tabla 10: Distribución de probetas para ensayo de tracción

	Intensidad (A)	Cant. Probetas
E 6 0 1 0	65	3
	75	3
	80	3
E 6 0 1 3	60	3
	70	3
	80	3
E 7 0 1 8	70	3
	90	3
	100	3

Fuente: Mercatudo J. (2.017).

Para realizar el ensayo de tracción se seguirán los siguientes pasos:

1. Marcar la probeta en la zona calibrada, midiendo su longitud inicial, ancho y espesor con un vernier.
2. Estriar los extremos de la probeta con la finalidad de evitar deslizamientos en las mordazas durante el ensayo.
3. Sujetar firmemente los extremos de la probeta a la mordaza de la máquina de tracción.
4. Aplicar la carga estirando la probeta hasta que se rompa.
5. Obtener datos de carga vs deformación.
6. Tomar nuevamente las medidas entre las marcas realizadas.

Se compararon los resultados para cada tipo de probeta con su respectivo tipo de electrodo e intensidad de corriente.

Ensayo de doblado: Las probetas fueron mecanizadas según la norma ASTM E-190. Sus dimensiones fueron 38mm por 152mm, como se muestra en la figura 24.

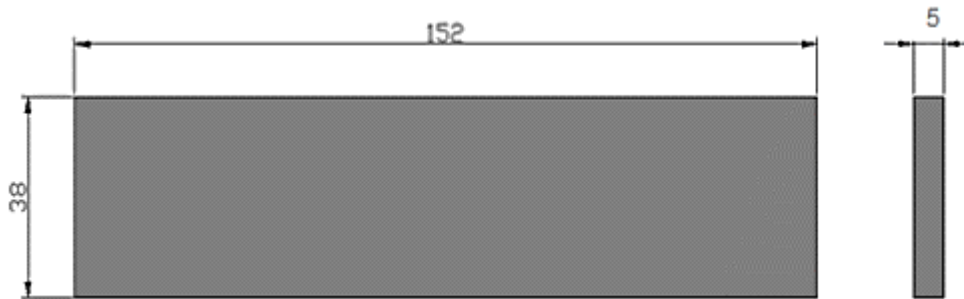


Figura 26: Dimensiones de probetas de doblado.
Fuente: Mercatudo J. (2.017).

El ensayo se efectuará utilizando la máquina de ensayo (prensa hidráulica) que se encuentra en el Laboratorio de Proceso de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, donde se aplicara la carga hasta que el doblado sea de 180° (teniendo la forma del punzón). Este procedimiento se realizó para cada tipo de electrodo con su respectiva intensidad corriente establecida. A su vez, se realizara un ensayo de cara y de raíz para cada una de las probetas.

Ensayos metalográficos

Estos ensayos se encuentran divididos en dos: microscopia y macroscopía.

Ensayo de macroscopía: Se realizará con un aumento máximo de 10X. Se realiza un desbaste en la superficie de las probetas y luego se realiza un ataque químico de Yoduro de potasio al 10% atacando hasta magnificar y hacer visibles las discontinuidades que pudieran encontrarse en las muestras.

Ensayo de microscopia: El primer paso para la preparación de probetas para la observación microscópica, es la obtención de las mismas a partir del material en estudio bajo la norma ASTM E3-01 y ASTM E407-99. La preparación de la superficie de las probetas se realizará de la siguiente manera:

- **Desbaste inicial:** se realiza con el objetivo de reducir el espesor del cordón de soldadura, para ello se utiliza una desbastadora de cinta con granulometría de 180.
- **Desbaste grueso:** se utiliza el banco de pulido con papel de lija con granulometría 240, consiguiéndose colocar al descubierto la superficie contenida en el cordón de soldadura.

- **Desbaste intermedio:** para este procedimiento se utiliza papel de carburo de silicio (papel de lija) cuyo tamaño de grano fue de 300. El final de esta operación es determinada al momento de la desaparición de las líneas producidas por la lija del desbaste anterior.
- **Desbaste final:** se utiliza lija 600 hasta 1000 obteniendo una superficie tipo espejo. En función del acabado de superficie el operador debe girar la muestra 90° a fin de que desaparezcan las rayas que dejó la lija anterior.
- **Pulido:** una vez obtenido el acabado tipo espejo se coloca en el banco de pulido paños de fieltro con superficie gruesa y delgada respectivamente por las cuales se pasaran todas las muestras. Para este procedimiento se impregnan los fieltros con alumina gruesa y fina (con tamaño de partícula de 1 μ m y 0,5 μ m respectivamente).
- **Ataque químico:** se ejecuta sobre la superficie de la muestra pulida utilizando como reactivo Nital al 2%, compuesto por 2ml de HNO₃ y 98ml de etanol, cuyo tiempo de exposición sobre la superficie muestra fue de 10s, inmediatamente después se limpió la muestra rociándola con Etanol al 98%. Este ataque químico permite revelar la microestructura del metal.

Fase V: Analizar y discutir los resultados obtenidos y establecer la influencia del revestimiento en el cordón de soldadura.

Existe una variedad de ensayos a través de los cuales se pueden obtener distintas propiedades mecánicas de los materiales, en este caso, de uniones soldadas, estas propiedades permiten la adecuada selección del material para una aplicación determinada, donde se necesitan unir permanentemente piezas, que en conjunto tendrán una función determinada. Con todos los resultados obtenidos se procederá a analizar cada una de las setenta y dos (72) probetas estudiadas, el comportamiento de dichos ensayos realizados en el acero AISI 1010 soldado por el proceso SMAW, se podrá observar el dominio que cada una de las probetas presenta mediante los ensayos de rayos X, mecánicos y metalúrgicos aplicados. Así como también se podrá concluir cómo influyen dichas preparaciones sobre las propiedades de las uniones soldadas.

CAPÍTULO IV RESULTADOS

En este capítulo se analizaron los resultados obtenidos en los diversos ensayos tanto destructivos como no destructivos (Rayos X, tracción, microdureza, doblado, microscopía y macroscopía, Con el fin de comprobar si las uniones soldadas presentan algún tipo de defecto y de esta manera determinar cuál de los electrodos objeto de estudio y sus diversas intensidades de corrientes exponen la menor sensibilidad al agrietamiento respecto al acero AISI 1010.

4.1 Caracterizar el acero AISI 1010 por medio de ensayos de tracción y metalografía (macroscopía y microscopía).

A continuación se presenta en las dos imágenes de la Figura 30 la microestructura del material base AISI 1010.

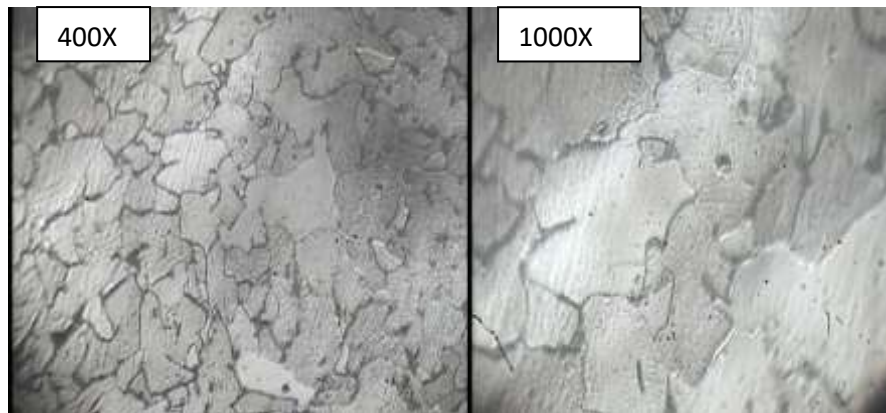


Figura 27: Microestructura del material base a 400x y 1000x de aumento.

Fuente: Mercatudo J. (2017)

Observación: En las fotos de la figura 27 se puede observar una estructura que presenta zonas que contienen perlita (parte oscura) y zonas que contienen ferrita (parte clara).

Análisis de microdureza para caracterizar el material

Para realizar el ensayo de microdureza Vickers se procedió a realizar la indentación al material base, y cuyo resultado se puede observar en la tabla 11.

Tabla 11: Comparación de la microdureza del material base ensayado con el teórico.

Material AISI 1010	Microdureza Vickers (Hv)
1	128
2	124
3	125
4	127
5	126
Promedio	126
AISI 1010 (teórico)	125

Fuente: Mercatudo J. (2017).

Ensayo de Tracción para caracterizar el material.

El ensayo fue realizado en la facultad de ingeniería de la Universidad de Carabobo de la ciudad de Valencia, en el municipio naganagua. En la Figura 28 se muestra la maquina empleada para la realización de dicho ensayo.



Figura 28: Máquina para ensayo de tracción FRANK.

Fuente: Laboratorio de Materiales Universidad de Carabobo (2.017)

Caracterización del material base.

Se procedió a realizar el ensayo de tracción para conocer las propiedades mecánicas del material estudiado. Durante la realización del ensayo se miden repetidamente las cargas aplicadas y el alargamiento que presenta la probeta para luego generar la curva de fuerza vs deformación.

Las cargas que se midieron se tabularon en la siguiente tabla:

Tabla 12: Fuerzas soportadas por el material sin soldar.

Fuerza de Fluencia (N)	15281,4
Fuerza Máxima (N)	16305,72
Fuerza de Ruptura(N)	7885,57

Fuente: Mercatudo J. (2017)

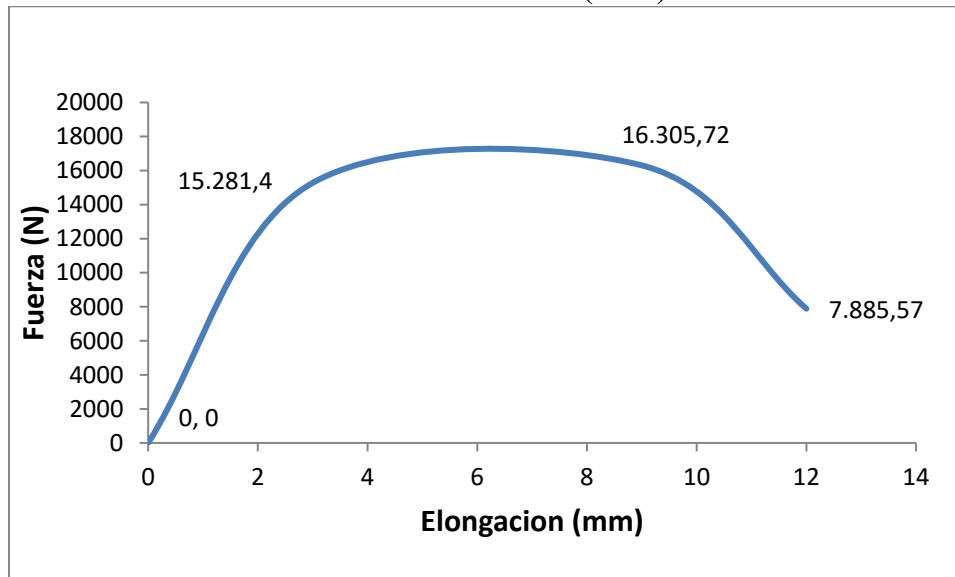


Figura 29: Fuerza vs Elongación material base

Fuente: Mercatudo J. (2017)

Cálculos tipo:

Esfuerzo de fluencia: $S_y = \frac{P}{A_0}$

$$S_y = \frac{15.281,4 N}{60 mm^2} = 254,69$$

Deformación Unitaria: $\delta = \frac{L_f - L_0}{L_0}$

$$\delta = \frac{61,9 \text{ mm} - 50 \text{ mm}}{50 \text{ mm}} = 23,8$$

Esfuerzo Máximo: $\sigma = \frac{P_i}{A_i}$

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{P_{m\acute{a}x}}{A_i} = \frac{15.911,28 \text{ N}}{49 \text{ mm}^2} = 324,72$$

Esfuerzo de Ruptura $S_u = \frac{P_{rup}}{A_i} = \frac{7885,57 \text{ N}}{33,25 \text{ mm}^2} = 237,16$

Tabla 13: Propiedades Mecánicas del material sin soldar

Esfuerzo de Fluencia (MPa)	254,69
Esfuerzo Máximo (MPa)	324,72
Esfuerzo de Ruptura (MPa)	237,16
Deformación Unitaria (δ)	23,8%

Fuente: Mercatudo J. (2017)

4.2 Seleccionar los parámetros de soldadura a utilizar y ejecutar los cordones de soldadura por medio del proceso SMAW utilizando diferentes electrodos.

Respecto a los parámetros de soldeo fueron seleccionadas tres intensidades de corriente distinta para cada electrodo con la finalidad de estudiar los cambios correspondiente, las cuales se encuentran dentro del rango de valores característicos de cada electrodo.

De allí, se seleccionó un valor bajo, medio y alto de intensidad para cada electrodo.

En la Tabla 14 se muestran los valores de intensidad de corriente seleccionados para cada electrodo.

Se realizó la soldadura en posición plana, colocando el electrodo perpendicular a la superficie de las láminas a soldar, siendo esta posición la más cómoda y además porque los tres tipos de electrodos pueden trabajarse de esta forma. Después del proceso de soldadura se obtuvieron nueve (9) especímenes de 20cm x 30cm.

Tabla 14: Intensidades de corriente seleccionas

	I1 (A)	I2 (A)	I3 (A)	Nº cupón
E6010	65	75	80	3
E6013	60	70	80	3
E7018	70	90	100	3

Fuente: Mercatudo J. (2017)

La selección se realizó con el fin de obtener un margen amplio de variación entre las diferentes soldaduras

Durante el proceso de soldadura se procedió a cronometrar el tiempo que demoraba el soldador en realizar cada uno de los cordones, obteniéndose un promedio de todas las mediciones de una velocidad de soldadura de 5 mm/seg.

4.3 Estudiar la estructura del cordón de soldadura mediante el uso de rayos X, ultrasonido o líquidos penetrantes.

Siguiendo el proceso descrito en la fase 3 del Capítulo III se obtuvieron las radiografías de las nueve (9) muestras ensayadas para realizar el conteo de porosidades por unidad de área como se muestra a continuación:

4.3.1 Electrodo E-6010.

En la figuras 30, 31 y 32 se muestran las distintas radiografías con las tres intensidades de corriente distintas, para este electrodo.



Figura 30: Exposición de poros, electrodo E-6010 a 65A.

Fuente: Mercatudo J. (2017).



**Figura 31: Exposición de poros, electrodo E-6010 a 75A.
Fuente: Mercatudo J. (2017).**



**Figura 32: Exposición de poros, electrodo E-6010 a 80A.
Fuente: Mercatudo J. (2017).**

Para el electrodo E-6010 a las tres condiciones de intensidades estudiadas se observan los siguientes detalles:

Para la condición de estudio de 65A la zona seleccionada comprende 10cm aproximadamente (la misma dimensión para todas las muestras), se puede resaltar que hay una falta de penetración en el cordón de soldadura y se observan defectos externos al cordón como el chisporroteo mas no se observa ningún otro tipo de discontinuidad como grietas.

Para la condición de estudio de 75A la zona seleccionada tiene las mismas dimensiones donde, se observa la falta de penetración así como el chisporroteo fuera del cordón mas no se observan grietas.

Para la condición de estudio de 80A la zona seleccionada tiene las dimensiones ya mencionadas donde se observan la falta de penetración mas no se observan grietas.

4.3.2 Electrodo E-6013.



**Figura 33: Exposición de poros, electrodo E-6013 a 60A.
Fuente: Mercatudo J. (2017).**



**Figura 34: Exposición de poros, electrodo E-6013 a 70A.
Fuente: Mercatudo J. (2017).**



Figura 35: Exposición de poros, electrodo E-6013 a 80A.

Fuente: Mercatudo J. (2017)

Para el electrodo E-6013 a las tres condiciones de intensidad de corriente estudiada se observan los siguientes detalles:

Para la condición de estudio de 60A la zona seleccionada comprende 10cm de longitud aproximadamente, se observa falta de penetración en el cordón mas no se observa otro tipo de defecto como grietas.

Para la condición de estudio de 70A la zona seleccionada tiene las mismas dimensiones mencionadas donde se observa el chisporroteo fuera del cordón mas no se observan grietas.

Para la condición de estudio de 80A la zona seleccionada tiene las dimensiones ya mencionadas donde se observan el chisporroteo fuera del cordón y la falta de penetracion mas no se observan defectos como grietas.

4.3.3 Electrodo E-7018

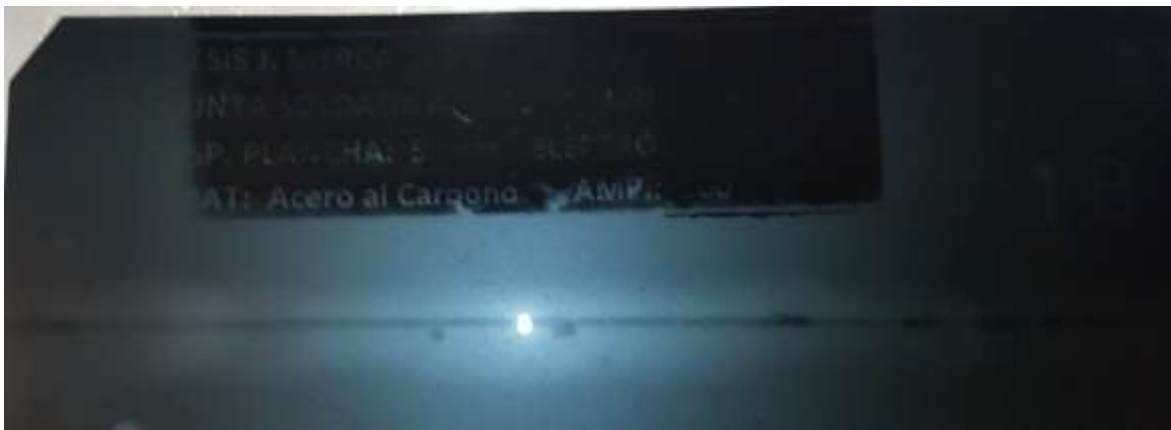


Figura 36: Exposición de poros, electrodo E-7018 a 70A.

Fuente: Mercatudo J. (2017)



**Figura 37: Exposición de poros, electrodo E-7018 a 90A.
Fuente: Mercatudo J. (2017)**



**Figura 38: Exposición de poros, electrodo E-7018 a 100A.
Fuente: Mercatudo J. (2017)**

Para el electrodo E-7018 a las tres condiciones de intensidad de corriente estudiadas se observan los siguientes detalles:

Se observa un chisporroteo normal en los alrededores cercanos como en todos los casos anteriores así como también la falta de penetración, sin embargo para este tipo de electrodo la cristalización del cordón fue totalmente perfecta ya que no se observó ninguna porosidad a lo largo de todo el cordón de soldadura lo que demuestra la calidad del revestimiento y del material de aporte. Además de esto no se observan grietas ni otro tipo de discontinuidades.

4.4 Determinar el comportamiento mecánico y metalográfico, mediante ensayos de tracción, doblado, dureza, macroscopía y microscopía, en uniones soldadas de acero AISI 1010 en función de los parámetros seleccionados.

4.4.1 Ensayos de tracción para los distintos electrodos

Electrodo E - 6010

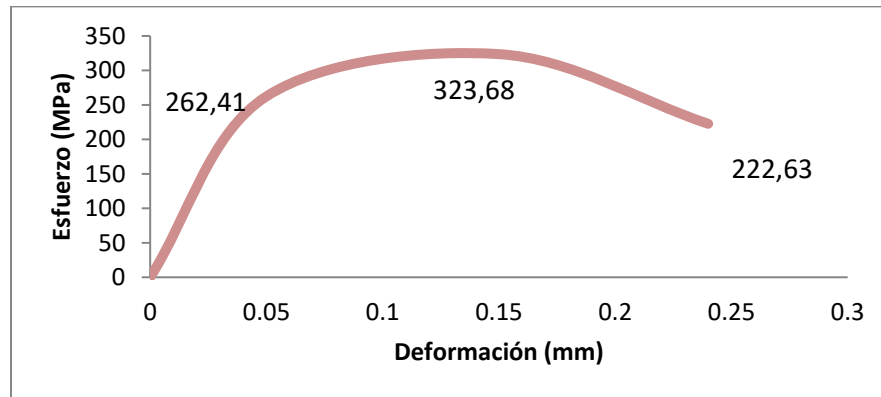


Figura 39: Esfuerzo vs Deformación E-6010 a 65 A (promedio)
Fuente: Mercatudo J. (2017)

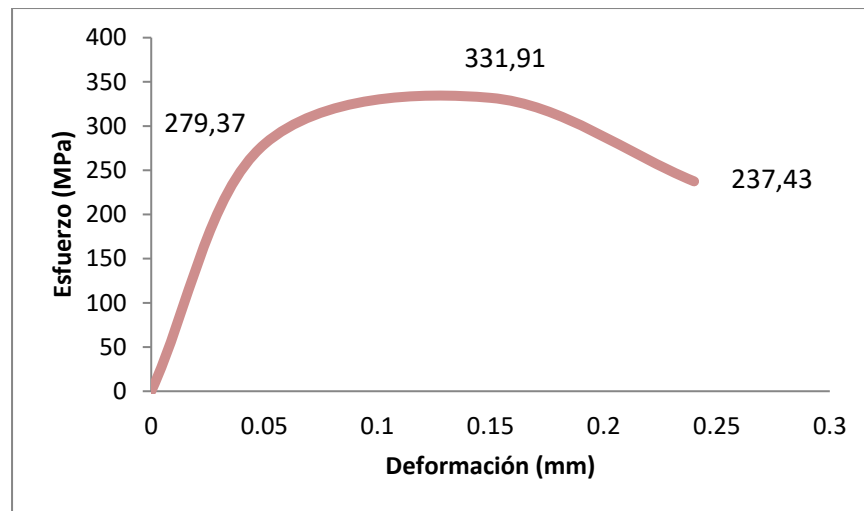


Figura 40: Esfuerzo vs Deformación E-6010 a 75 A (promedio)
Fuente: Mercatudo J. (2017)

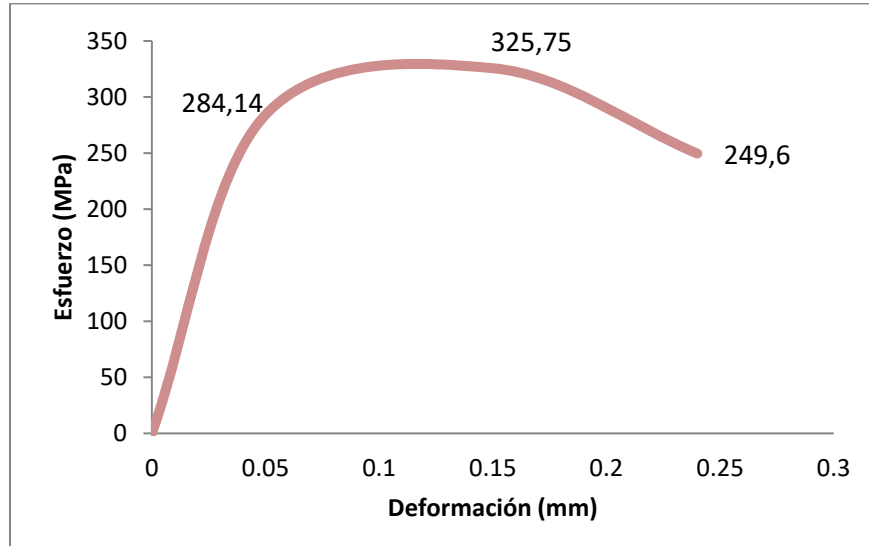


Figura 41: Esfuerzo vs Deformación E-6010 a 80 A (promedio)
Fuente: Mercatudo J. (2017)

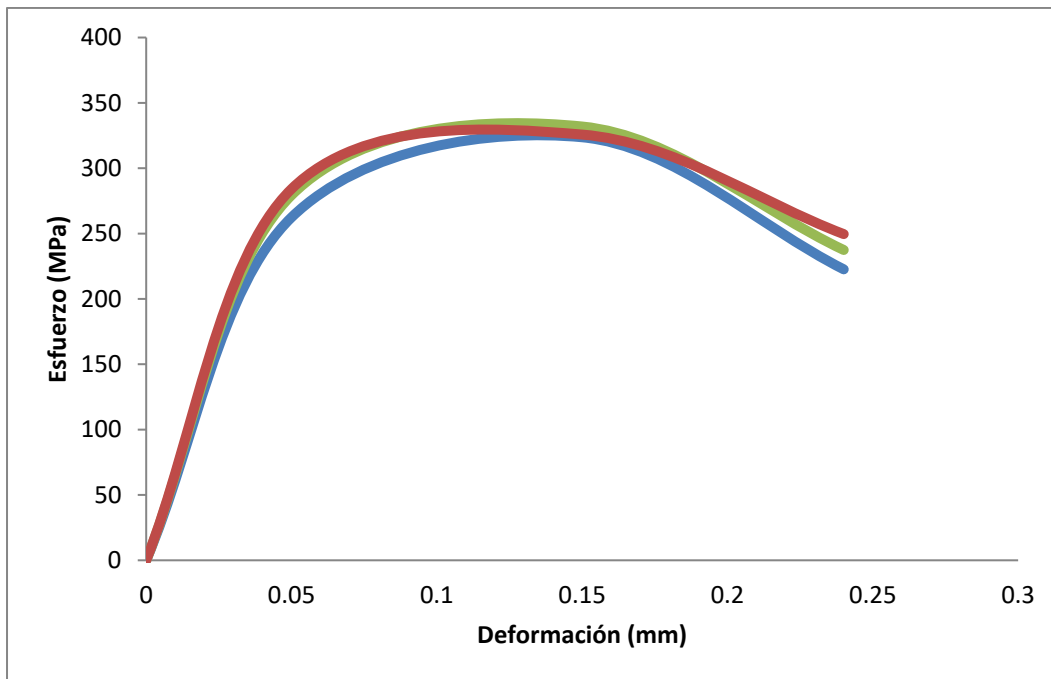


Figura 42: Comparación Esfuerzo vs Deformación E-6010
Fuente: Mercatudo J. (2017)

Tabla 15: Propiedades mecánicas de probetas soldadas con electrodo E-6010

Propiedades	Intensidad (A)		
	65	75	80
Esfuerzo de Fluencia (MPa)	262,4 1	279,3 7	284,1 7
Esfuerzo Máximo (MPa)	323,6 8	331,9 1	325,7 5
Esfuerzo de Ruptura (MPa)	222,6 3	237,4 3	249,6
Deformación Unitaria (δ)	22,6	24,1	25,8

Fuente: Mercatudo J. (2017)

Las propiedades mecánicas obtenidas de las probetas soldadas con E-6010 son muy semejantes a pesar de que el esfuerzo de fluencia más alto se obtuvo con las probetas soldadas a 80A cuyo valor alcanzó 284,17MPa, los esfuerzos máximos se dieron en un rango muy cerrado entre 323,68 y 331,91MPa siendo este último correspondiente al cordón realizado a 65A. Con respecto a la deformación, a una intensidad de 80A la máxima deformación fue de 25,8% la cual corresponde a una elongación total de 13,1mm para la condición mencionada.

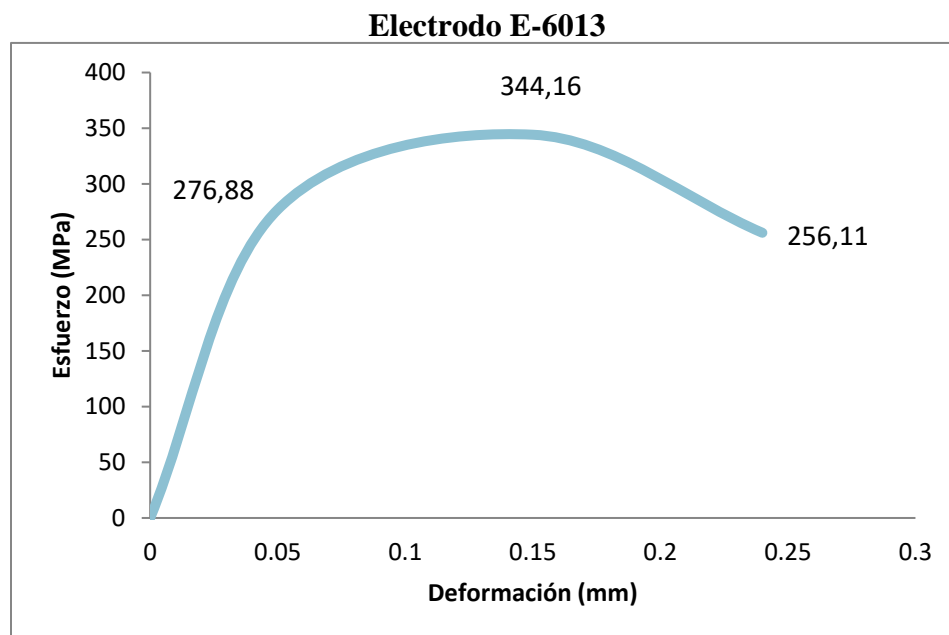


Figura 34: Esfuerzo vs Deformación E-6013 a 60A (promedio)

Fuente: Mercatudo J. (2017)

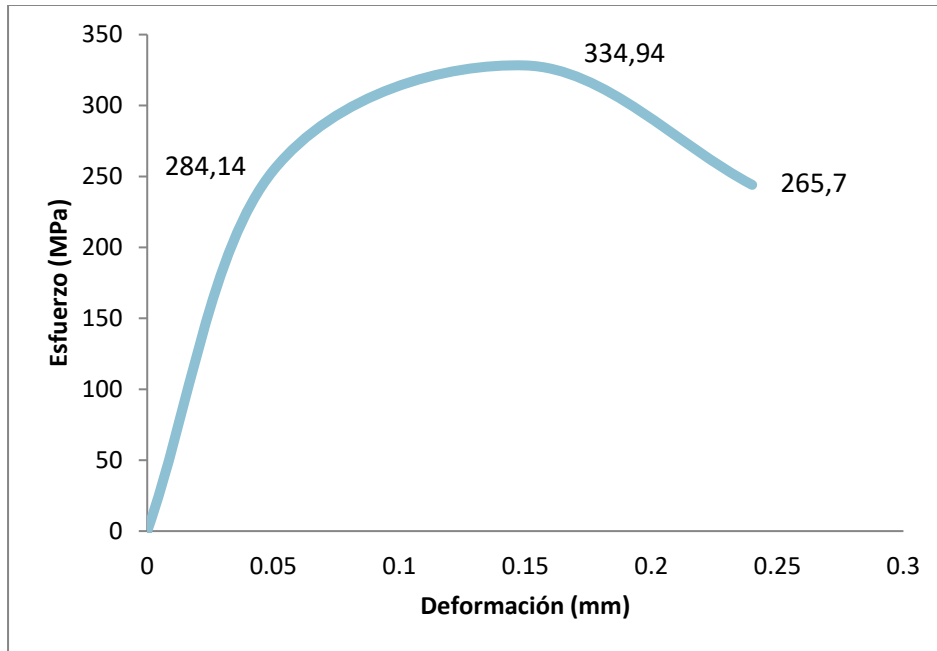


Figura 44: Esfuerzo vs Deformación E-6013 a 70A (promedio)
Fuente: Mercatudo J. (2017)

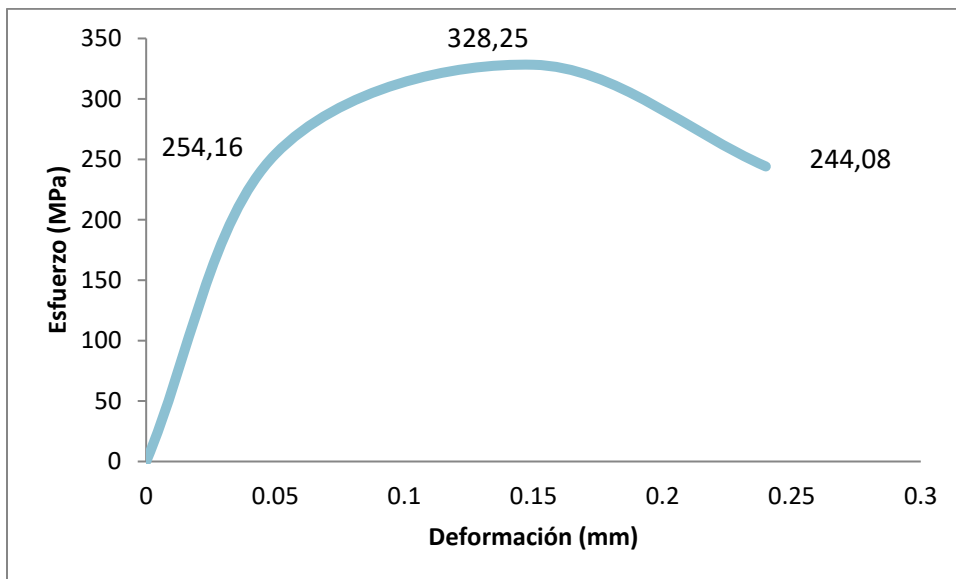


Figura 45: Esfuerzo vs Deformación E-6013 a 80A (promedio)
Fuente: Mercatudo J. (2017)

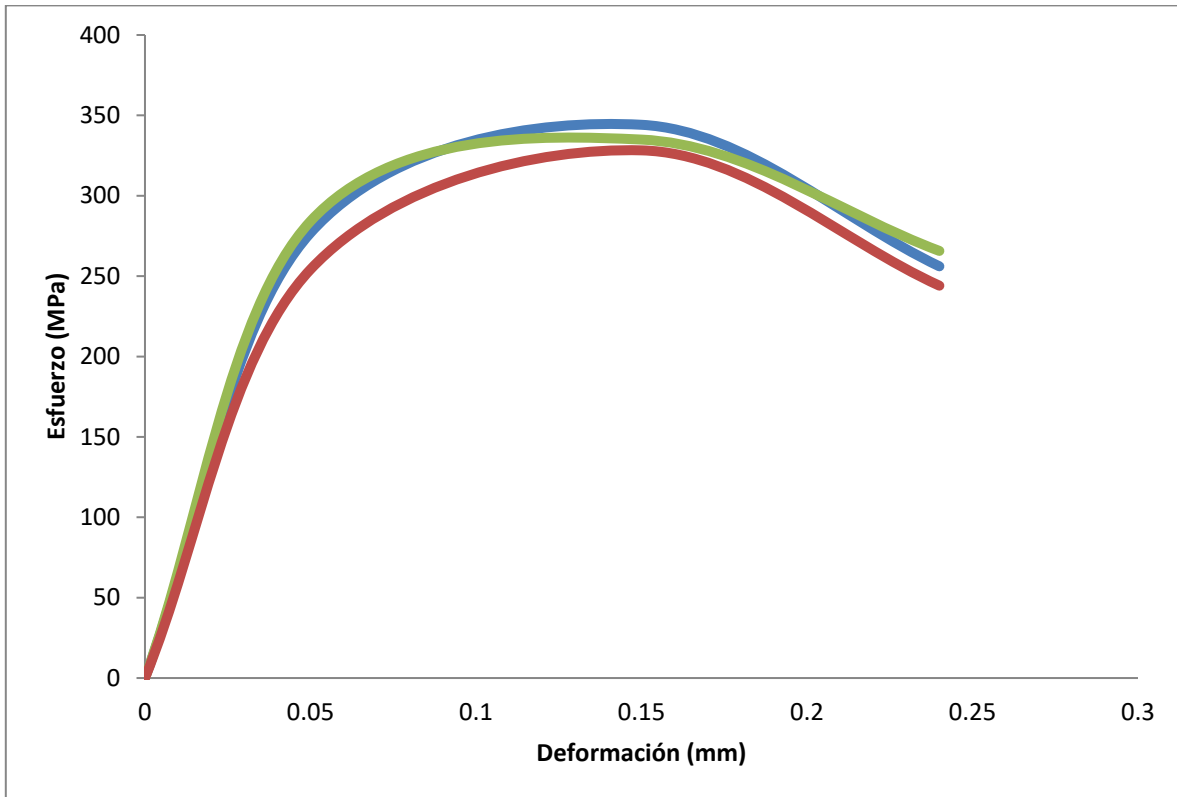


Figura 46: Comparación Esfuerzo vs Deformación E-6013
Fuente: Mercatudo J. (2017)

Tabla 16: Propiedades mecánicas de probetas soldadas con electrodo E-6013

Propiedades	Intensidad (A)		
	60	70	80
Esfuerzo de Fluencia (MPa)	276,88	284,14	254,16
Esfuerzo Máximo (MPa)	344,16	334,94	328,25
Esfuerzo de Ruptura (MPa)	256,11	265,70	244,08
Deformación Unitaria (δ)	24,04	22,91	25,63

Fuente: Mercatudo J. (2017)

El esfuerzo de fluencia más alto para las uniones soldadas con electrodos E-6013 fue a una intensidad de 70A igual a 284,14MPa. El mayor esfuerzo máximo se obtuvo a 60A

siendo este de 344,16MPa. La deformación a las tres intensidades fue muy parecida, entre 22,91 y 25,63% la cual corresponde a una elongación total comprendida entre 11,73 y 13,12mm para la condición mencionada.

Electrodo

Electrodo E-7018

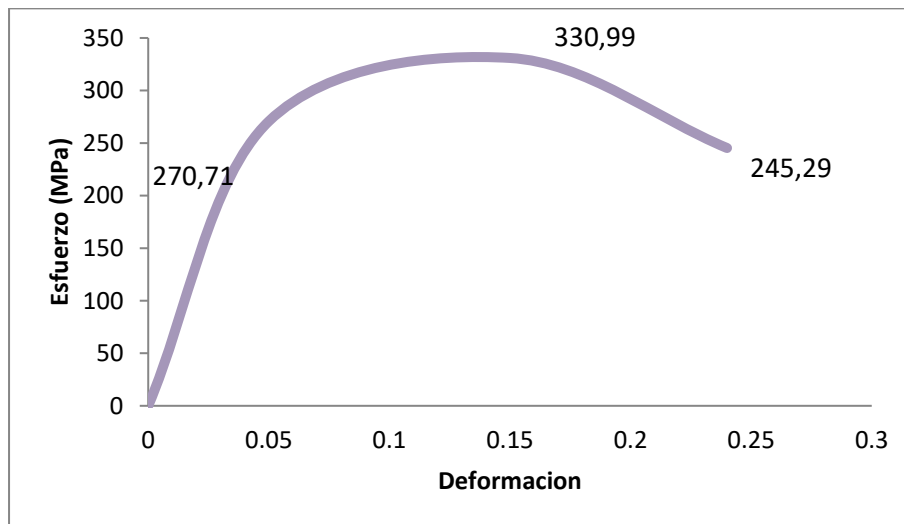


Figura 47: Esfuerzo vs Deformación E-7018 a 70A (promedio)
Fuente: Mercatudo J. (2017)

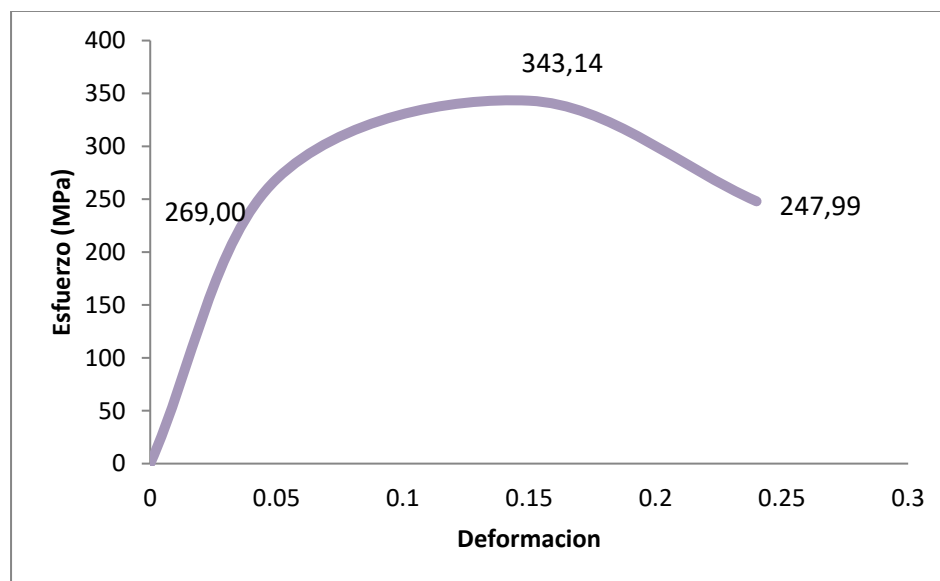


Figura 48: Esfuerzo vs Deformación E-7018 a 90A (promedio)
Fuente: Mercatudo J. (2017)

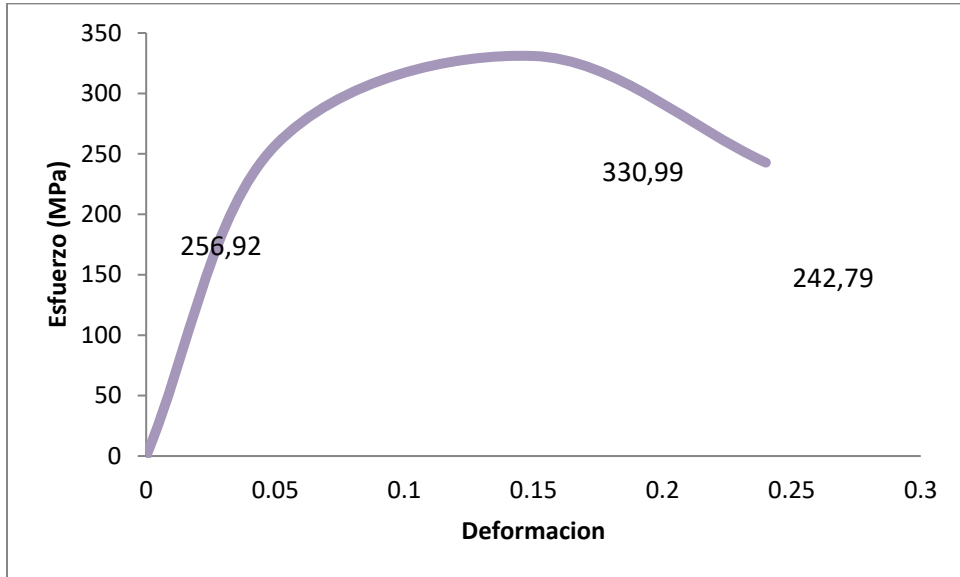


Figura 49: Esfuerzo vs Deformación E-7018 a 100A (promedio)
Fuente: Mercatudo J. (2017)

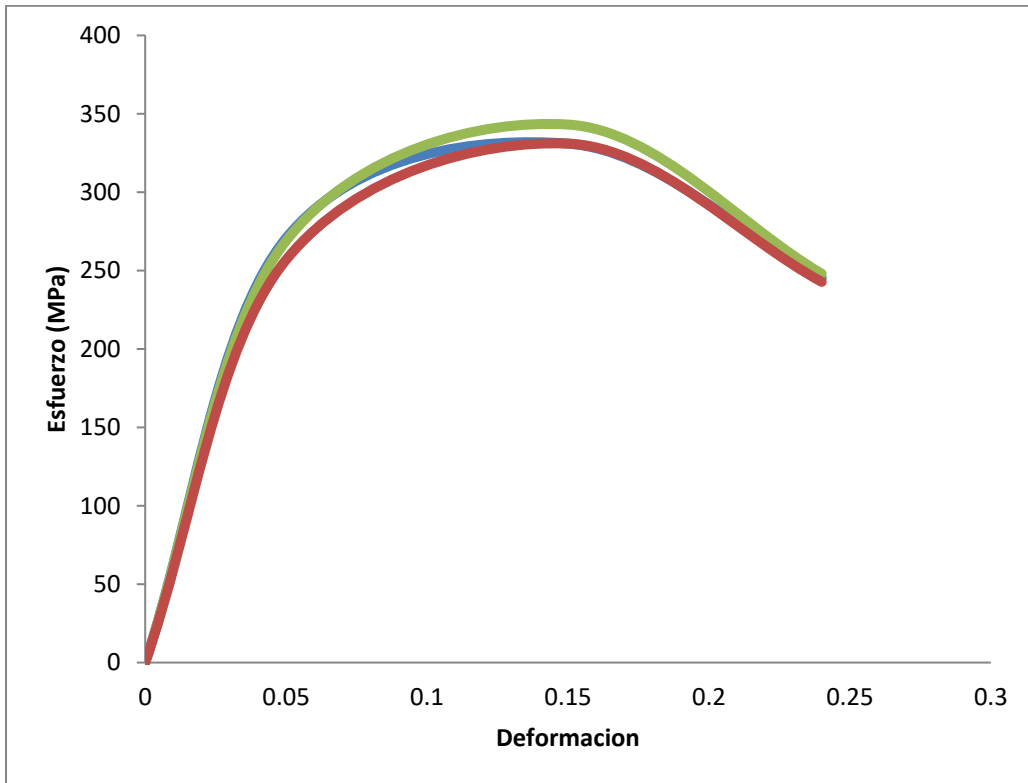


Figura 50: Comparación Esfuerzo vs Deformación E-7018
Fuente: Mercatudo J. (2017)

Tabla 17: Propiedades mecánicas de probetas soldadas con electrodo E-7018

Propiedades	Intensidad (A)		
	70	90	100
Esfuerzo de Fluencia (MPa)	270,7 1	269,0 0	256,9 2
Esfuerzo Máximo (MPa)	330,9 9	343,1 4	330,9 9
Esfuerzo de Ruptura (MPa)	245,2 9	247,9 9	242,7 9
Deformación Unitaria (δ)	21,14	23,16	28,12

Fuente: Mercatudo J. (2017)

Una de las diferencias más notables en los cordones ejecutados con el electrodo E-7018 es el porcentaje de deformación donde el alcanzado por las probetas soldadas a 70A es menor a las de 90 y 100A siendo esta última la mayor con un 28,12%.

Con respecto a los esfuerzos es considerable el esfuerzo de fluencia del cordón realizado a 70A (270,71MPa) respecto a los de 90 y 100A (269,00 y 256,92MPa respectivamente) mientras que los esfuerzos máximos se encuentran en un rango muy cercano como debe ser.

4.4.2 Ensayos de doblado para los distintos electrodos.

A continuación se presentan los ensayos de doblado



Figura 51: Doblado de la probeta soldada con E-6010 a 65A
Fuente: Mercatudo J. (2017)

Observación: No se observó ninguna grieta ni porosidades en el cordón de soldadura.



Figura 52: Doblado de la probeta soldada con E-6010 a 75A
Fuente: Mercatudo J. (2017)

Observación: No se observó ninguna grieta ni porosidades en el cordón de soldadura.



Figura 53: Doblado de la probeta soldada con E-6010 a 80A
Fuente: Mercatudo J. (2017)

Observación: No se observó ninguna grieta ni porosidades en el cordón de soldadura



Figura 54: Doblado de la probeta soldada con E-6013 a 60A
Fuente: Mercatudo J. (2017)

Observación: No se observó ninguna grieta ni porosidades en el cordón de soldadura



Figura 55: Doblado de la probeta soldada con E-6013 a 70A
Fuente: Mercatudo J. (2017)

Observación: No se observó ninguna grieta ni porosidades en el cordón de soldadura



Figura 56: Doblado de la probeta soldada con E-6013 a 80A
Fuente: Mercatudo J. (2017)

Observación: No se observó ninguna grieta ni porosidades en el cordón de soldadura



Figura 57: Doblado de la probeta soldada con E-7018 a 70A
Fuente: Mercatudo J. (2017)

Observación: No se observó ninguna grieta ni porosidades en el cordón de soldadura



Figura 58: Doblado de la probeta soldada con E-7018 a 90A
Fuente: Mercatudo J. (2017)

Observación: No se observó ninguna grieta ni porosidades en el cordón de soldadura



Figura 59: Doblado de la probeta soldada con E-7018 a 100A
Fuente: Mercatudo J. (2017)

Observación: No se observó ninguna grieta ni porosidades en el cordón de soldadura

4.4.3 Ensayos de dureza para los distintos electrodos.

A continuación se presentan los ensayos de dureza en las probetas soldadas.

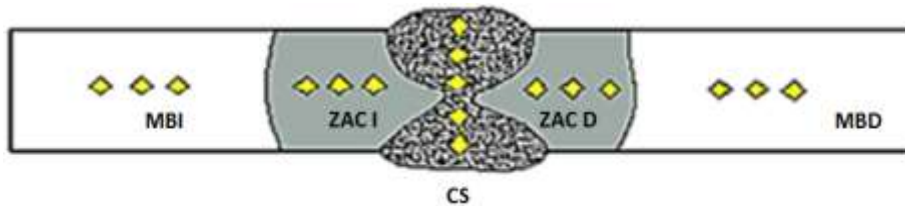


Tabla 18: Ensayo de microdureza Vickers para probetas con electrodo E-6010.

Intensidades de corriente (Amp)	MB I (Hv)	ZA I (Hv)	CS1 (Hv)	CS2 (Hv)	ZA D (Hv)	MB D (Hv)
65	124	155	164	162	152	125
75	127	146	161	162	143	122
80	123	146	161	163	141	126

Fuente: Mercatudo J. (2017).

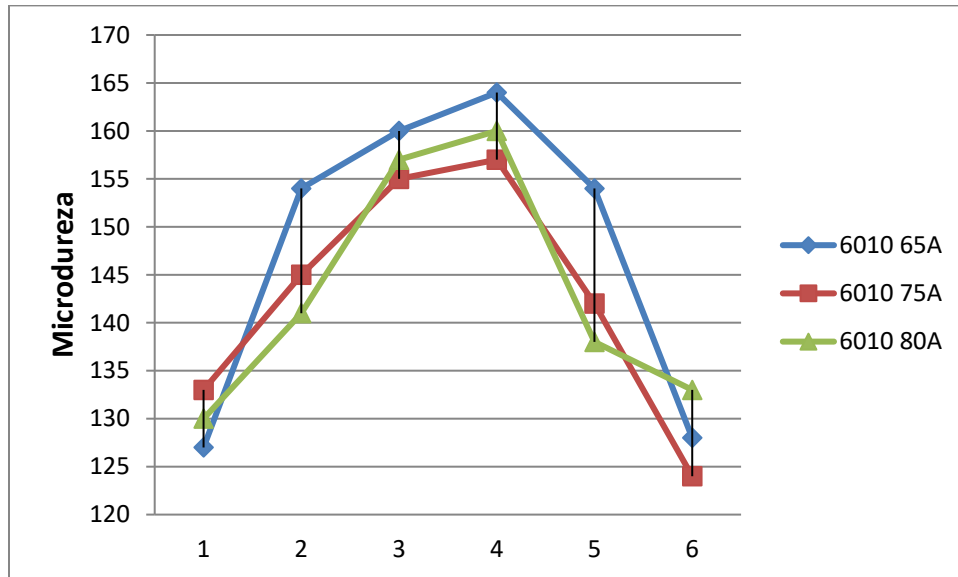


Figura 60: Grafica ensayo de microdureza Vickers para probetas con electrodo E-6010

Fuente: Mercatudo J. (2017)

Observación: Se observó que en la zona cercana al cordón de soldadura la dureza del material aumenta, disminuyendo en la zona afectada por el calor y siendo la más baja en el material base.

Tabla 19: Ensayo de microdureza Vickers para probetas con electrodo E-6013.

Intensidades de corriente (Amp)	MB I (Hv)	ZA I (Hv)	CS1 (Hv)	CS2 (Hv)	ZA D (Hv)	MB D (Hv)
60	122	134	163	162	132	120
70	124	134	166	165	131	123
80	122	169	194	196	169	124

Fuente: Mercatudo J. (2017).

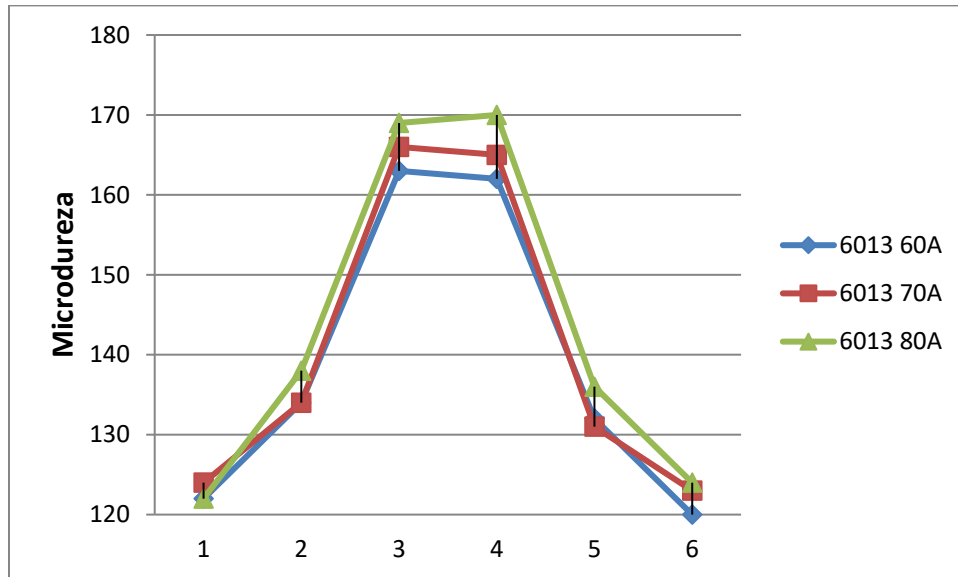


Figura 61: Grafica ensayo de microdureza Vickers para probetas con electrodo E-6013

Fuente: Mercatudo J. (2017)

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

Tabla 20: Ensayo de microdureza Vickers para probetas con electrodo E-7018.

Intensidades de corriente (Amp)	MB I (Hv)	ZA I (Hv)	CS1 (Hv)	CS2 (Hv)	ZA D (Hv)	MB D (Hv)
70	127	159	200	202	168	131
90	128	171	204	206	169	128
100	127	180	207	204	177	128

Fuente: Mercatudo J. (2017).

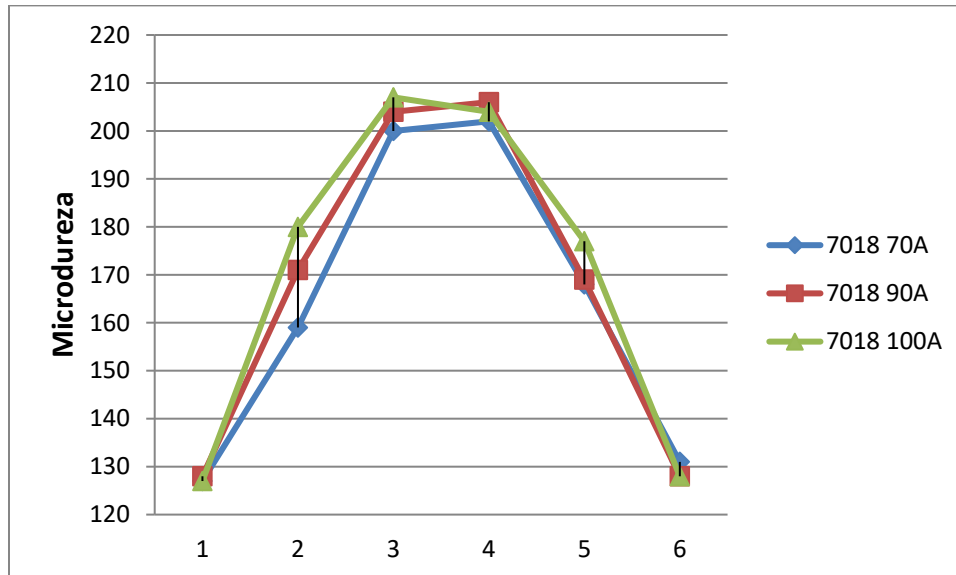


Figura 62: Grafica ensayo de microdureza Vickers para probetas con electrodo E-7018

Fuente: Mercatudo J. (2017)

Observación: 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.

4.4.4 Ensayos de microscopía para los distintos electrodos.

Para realizar el ensayo de microscopía óptica de las probetas soldadas fue necesaria la preparación metalográfica de cada una de ellas, luego se visualizaron las muestras con aumentos de 100, 200, 400 Y 1000x. Se establecieron 3 áreas específicas de trabajo como se muestra:

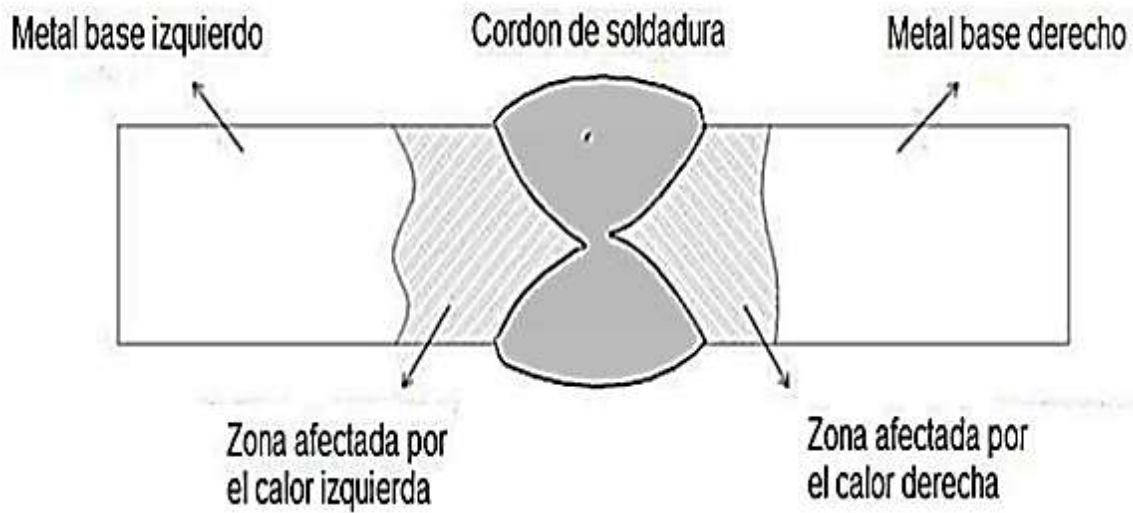


Figura 63: Áreas de estudio de las probetas para el análisis microestructural.
Fuente: Mercatudo J. (2017)

Caracterización del material base

En la figura 39 se muestra la microestructura obtenida en las probetas del metal base, atacada con Nital al 2% y observada con un aumento de 400X.



Figura 64: Microestructura del Metal Base. Acero AISI 1010 a 400X.
Fuente: Mercatudo J. (2017)

4.4.4.1 Análisis de las probetas soldadas

i) Electrodo E-6010 a 65A

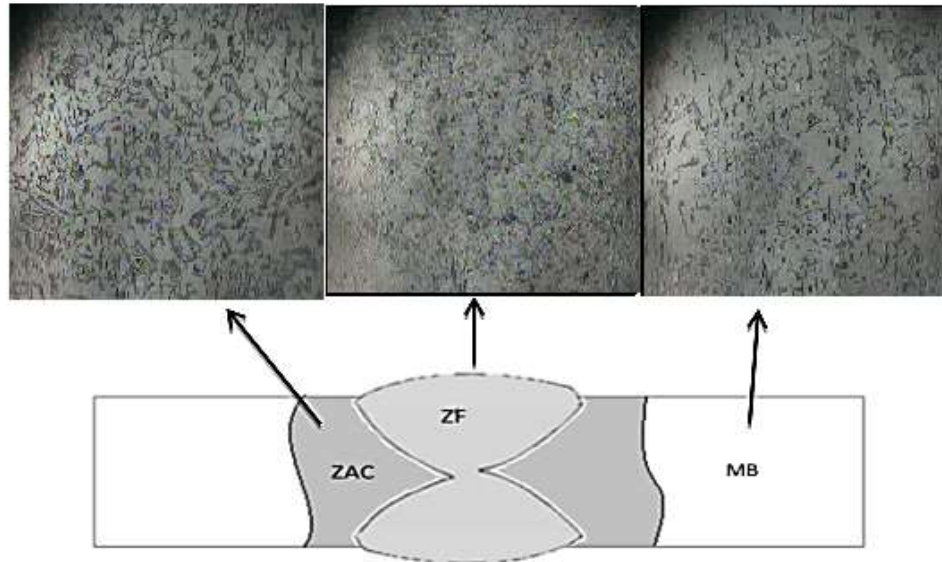


Figura 65: Microestructura del material con electrodo E-6010 a 65A.
Fuente: Mercatudo J. (2017)

ii) Electrodo E-6010 a 75A

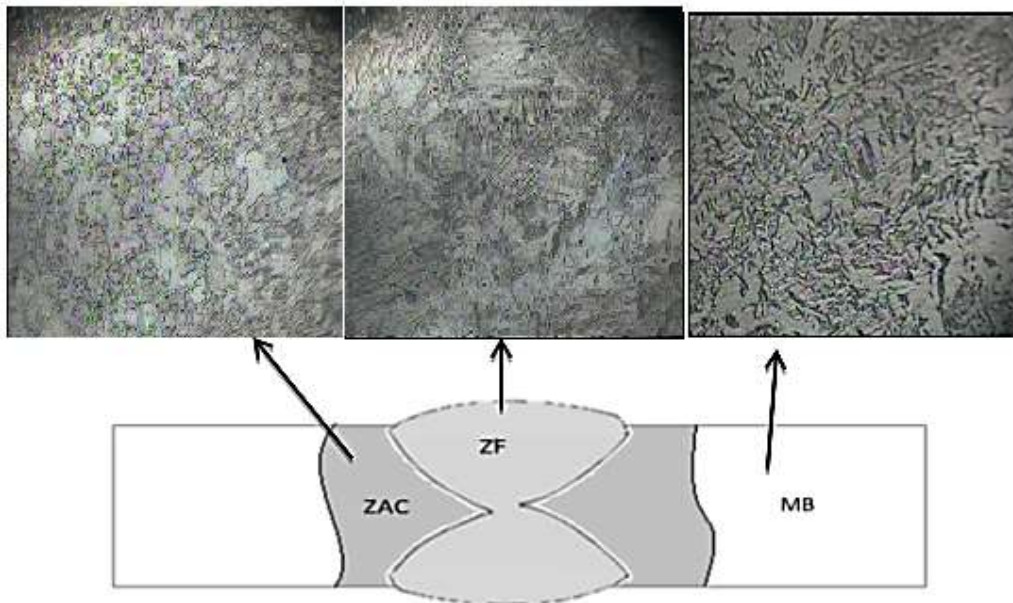
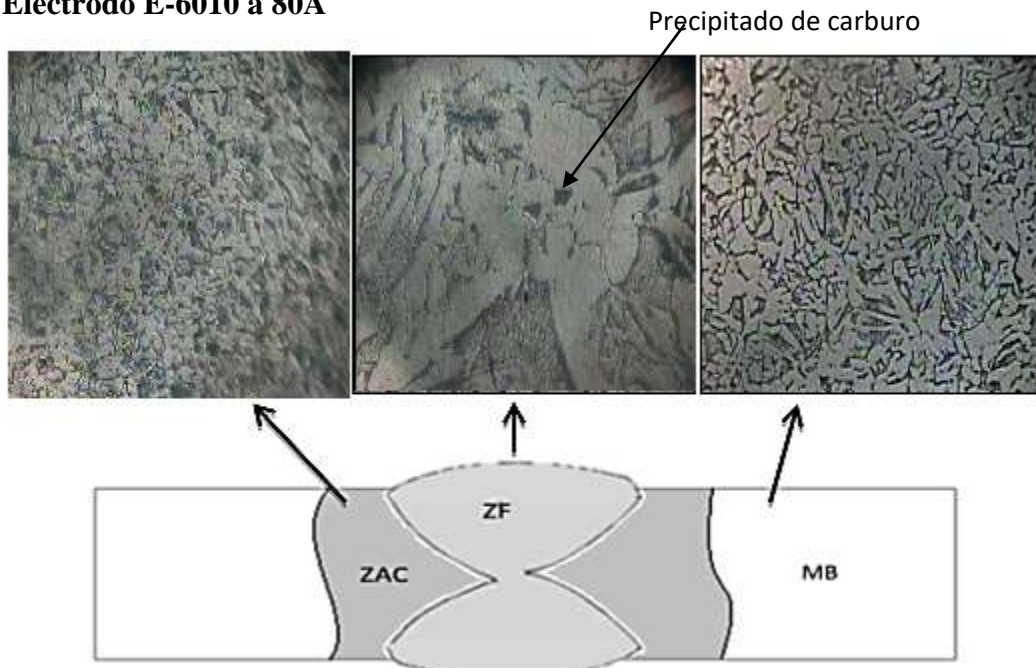


Figura 66: Microestructura del material con electrodo E-6010 a 75A.
Fuente: Mercatudo J. (2017)

iii) Electrodo E-6010 a 80A

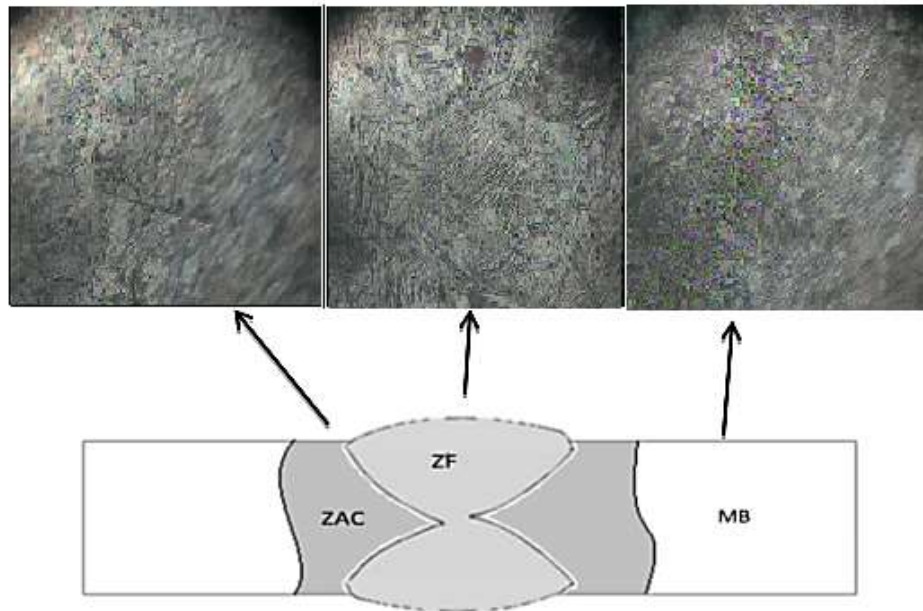


**Figura 67: Microestructura del material con electrodo E-6010 a 80A.
Fuente: Mercatudo J. (2017)**

Para las muestras observadas correspondientes al electrodo E-6010, se detalla que en la zona del metal base se presenta una estructura de granos de perlita (parte oscura), , y ferrita (parte clara) de tamaño desigual. Se evidencian algunos precipitados de carburo (puntos negros en los granos de ferrita). En la zona afectada por el calor se observa una leve redistribución homogénea de los granos provocado por el enfriamiento del metal y posterior enfriamiento (widmanstatten).

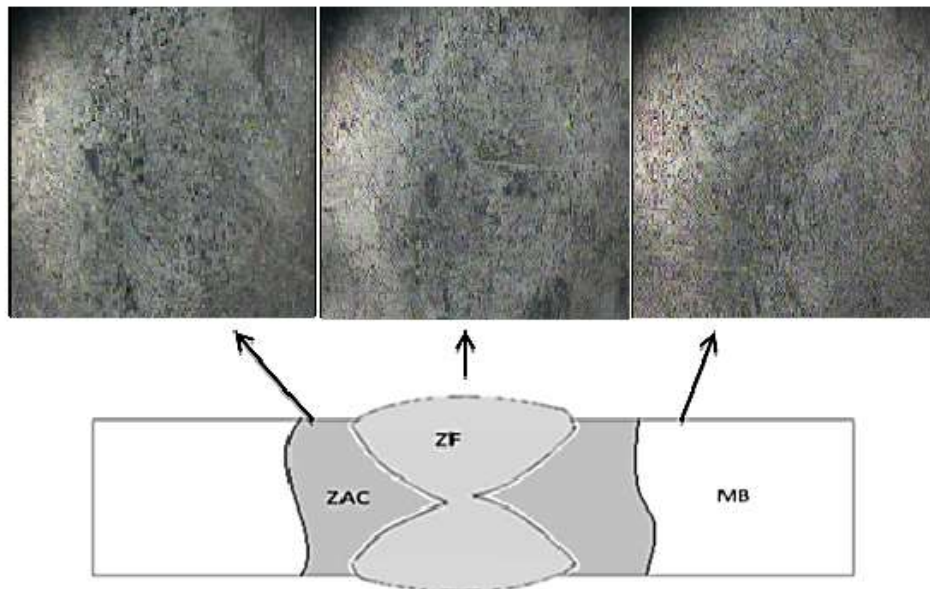
Se observan granos de ferrita y perlita así como también precipitados de carburo. En la zona de fusión se observa la presencia de una estructura ferrítica de granos totalmente columnares en las muestras a 65 y 80A y una estructura de granos equiaxiales y columnares en la muestra de 75A además precipitados de carburo redondos y alargados.

iv) Electrodo E-6013 a 60A



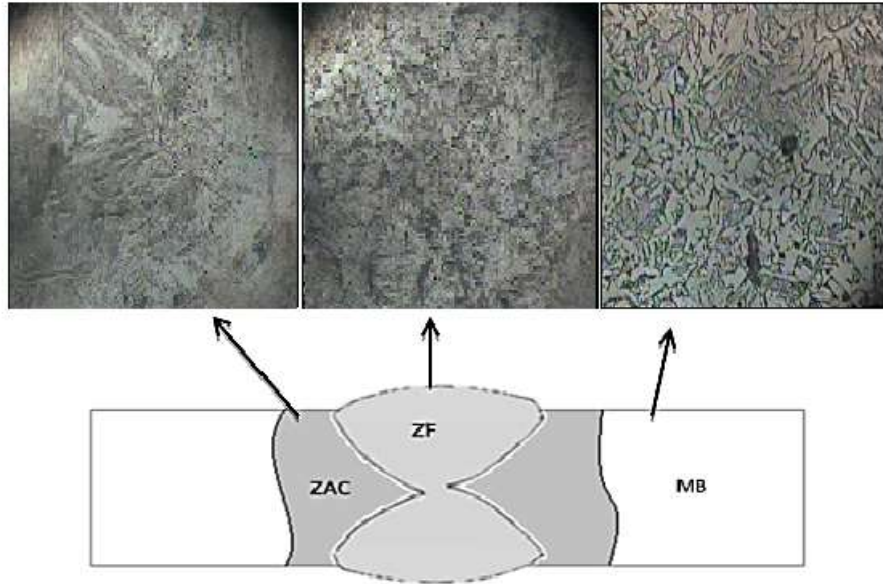
**Figura 68: Microestructura del material con electrodo E-6013 a 60A.
Fuente: Mercatudo J. (2017)**

v) Electrodo E-6013 a 70A



**Figura 69: Microestructura del material con electrodo E-6013 a 70A.
Fuente: Mercatudo J. (2017)**

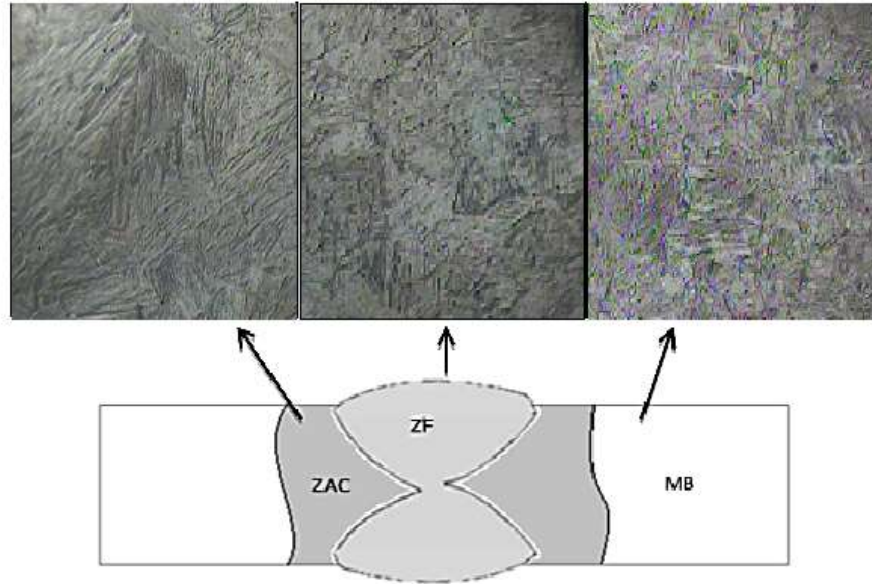
vi) Electrodo E-6013 a 80A



**Figura 70: Microestructura del material con electrodo E-6013 a 80A.
Fuente: Mercatudo J. (2017)**

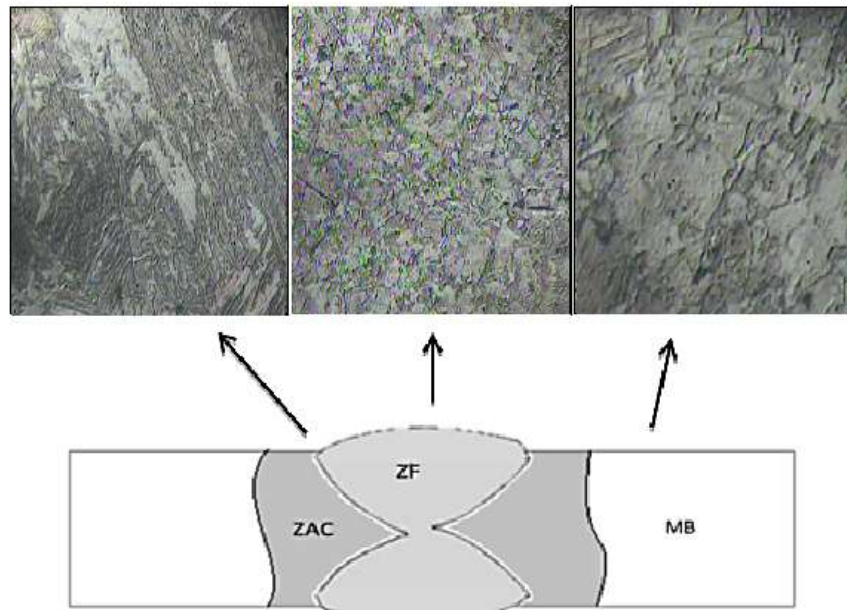
Para las muestras observadas correspondientes al electrodo E-6013, se detalla que en la zona del metal base se presenta una estructura de granos de perlita (parte oscura), y ferrita (parte clara) de tamaño desigual. Se evidencian algunos precipitados de carburo (puntos negros en los granos de ferrita). En la zona afectada por el calor se observa una leve disminución del tamaño de los granos provocado por el calentamiento del metal y posterior enfriamiento el cual se evidencia mayormente en las muestras a 70 y 80A. (widmanstatten), se observan granos de ferrita y perlita. En la zona de fusión se observa la presencia de una estructura ferrítica de granos columnares en las muestras a 60 y 80A y una estructura de granos equiaxiales en la muestra de 70A

vii) Electrodo E-7018 a 70A



**Figura 71: Microestructura del material con electrodo E-7018 a 70A.
Fuente: Mercatudo J. (2017)**

viii) Electrodo E-7018 a 90A



**Figura 72: Microestructura del material con electrodo E-7018 a 90A.
Fuente: Mercatudo J. (2017)**

ix) Electrodo E-7018 a 100A

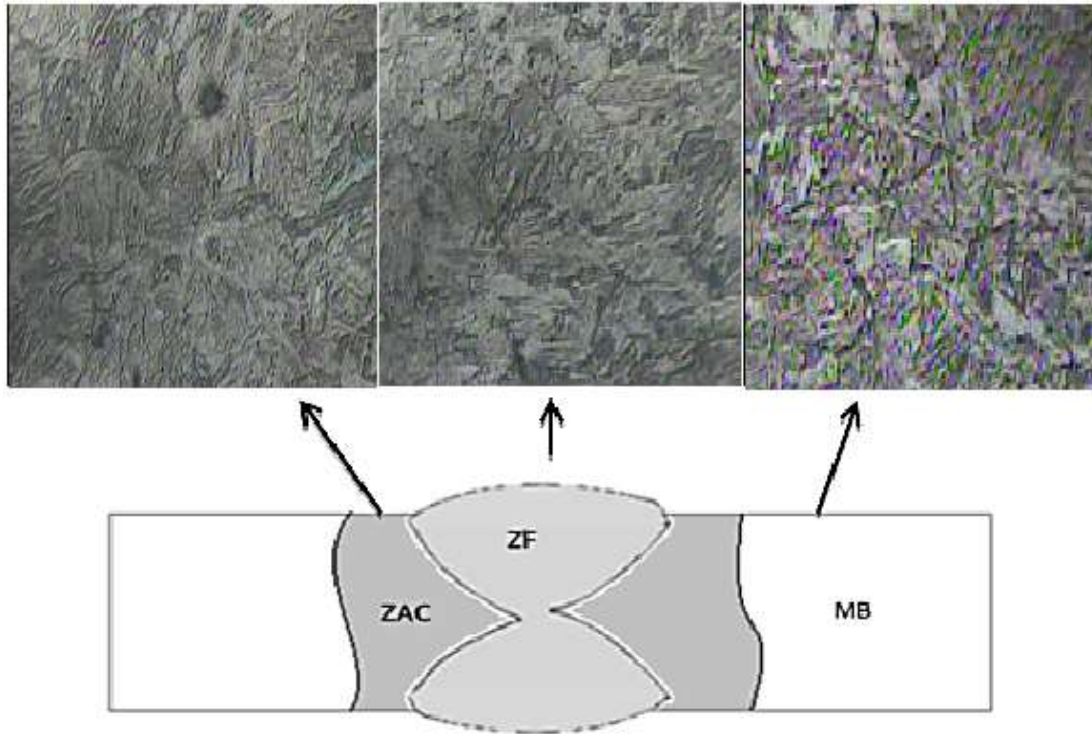


Figura 73: Microestructura del material con electrodo E-7018 a 100A.
Fuente: Mercatudo J. (2017)






Para las muestras observadas correspondientes al electrodo E-7018, se detalla que en la zona del metal base se presenta una estructura de granos de perlita (parte oscura), y ferrita (parte clara) de tamaño desigual. En la zona afectada por el calor se observa una leve disminución del tamaño de los granos provocado por el calentamiento del metal y posterior enfriamiento el cual se evidencia mayormente en las muestras a 90 y 100A. (widmanstatten), se observan granos de ferrita y perlita

En la zona de fusión se observa la presencia de un arreglo homogéneo de los granos, una estructura ferrítica y perlítica de granos equiaxiales y columnares en todas las muestras.

4.4.5 Ensayo de Macroscopía

Para los ensayos de macroscopía se procedió a preparar las probetas como esta lo indica y los resultados se muestran a continuación:

Tabla 21: Resultados de ensayos de macroscopía

E-6010 a 65 A		Se observa una buena unión Entre los elementos evidenciada por una excelente penetración del material de aporte sobre el metal base
E-6010 75A		Se observa una buena unión Entre los elementos evidenciada por una excelente penetración del material de aporte sobre el metal base
E-6010 80A		Se observa una buena unión Entre los elementos evidenciada por una excelente penetración del material de aporte sobre el metal base
E-6013 60A		Se observa una buena unión Entre los elementos evidenciada por una excelente penetración del material de aporte sobre el metal base
E-6013 70A		Se observa una buena unión Entre los elementos evidenciada por una excelente penetración del material de aporte sobre el metal base

E-6013 80A		Se observa una buena unión Entre los elementos evidenciada por una excelente penetración del material de aporte sobre el metal base
E-7018 70A		Se observa una buena unión Entre los elementos evidenciada por una excelente penetración del material de aporte sobre el metal base
E-7018 90A		Se observa una buena unión Entre los elementos evidenciada por una excelente penetración del material de aporte sobre el metal base
E-7018 100A		Se observa una buena unión Entre los elementos evidenciada por una excelente penetración del material de aporte sobre el metal base

Fuente: Mercatudo J. (2017)

Se realizó el ensayo de macroscopía tal y como lo indica la norma obteniéndose unos resultados satisfactorios en la mayoría de las muestras estudiadas. En la figura se muestra solo imagen por condición estudiada ya que el comportamiento de las muestras fue bastante similar.

En términos generales se observa una excelente unión entre los metales gracias a la buena penetración del material de aporte del electrodo sobre el metal base.

Cabe destacar que al observar cada una de las muestras bajo una lupa con aumento de 10X se observaron zonas con tonalidad negra lo cual se puede inferir de que hay presencia

de precipitados de carburo. Esto último no quiere decir que se encuentran presentes en el metal lo cual es evidenciado en el ensayo de microscopía.

Por consiguiente es notable que la cristalización del material de aporte esté orientada hacia el centro de la probeta, lo cual es bastante favorable debido a que de esta manera se evita la formación de grietas y se mejoran las propiedades mecánicas del cordón de soldadura.

4.5 Analizar y discutir los resultados obtenidos y establecer la influencia del revestimiento en el cordón de soldadura.

El material de aporte más susceptible a las porosidades fue el del electrodo E-6010 a una intensidad de corriente de 80 Amperios, esto es debido a que estas probetas presentaron porosidades en la mayoría de las muestras presentadas, esto se pudo observar al momento de realizar el ensayo microscópico.

Igualmente los electrodos E-6010 y E-6013 presentaron porosidades en la zona afectada por el cordón de soldadura en el ensayo de tracción. El electrodo E-7018 a 70 Amperios también presentó poros en el cordón de soldadura.

Si bien los 3 electrodos presentaron porosidades al momento de realizar el ensayo microscópico aun así podemos asegurar que el electrodo E-7018 es el que ofrece la menor cantidad de porosidades en la soldadura.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones.

- Se determinó que en el procedimiento de soldadura SMAW, es importante seleccionar el revestimiento adecuado para cada material para disminuir la presencia de poros en el cordón de soldadura, ya que las mismas se observan reflejadas en la microscopia del cordón de soldadura
- El electrodo menos sensible a la generación de porosidades en el cordón de soldadura sobre el acero estructural AISI 1010 utilizando el proceso SMAW es el E-7018, dando confiabilidad a futuros proyectos con este material.
- El mejor revestimiento de los estudiados resulto ser el del electrodo E-7018 ya que produjo muy poca porosidad o ningún otro defecto en los cordones de soldadura realizados.
- El estudio de rayos X realizado dio como resultado base que no había ninguna aparición de porosidades a nivel interno del material en el área de la soldadura.
- Luego de realizados los ensayos de tracción, doblado, dureza, microscopía y macroscopía se pudo observar la aparición de porosidades, en especial en la microscopia. Dichas porosidades son más notorias en las probetas con la soldadura del electrodo E-6010 y menos notorias en el electrodo E-7018.
- Se observó que en las mayorías de las partes afectadas por el calor genero un crecimiento en el grano de la ferrita, donde también se pudo observar la estructura Widmanstatten (ferrita acicular) el cual se genera por el calor generado en el proceso de soldadura
- El material utilizado se caracterizó mediante los ensayos pertinentes lo cual determinó que si se trataba de un acero estructural AISI 1010 por lo cual el

comportamiento de este una vez sometido al proceso de soldadura y luego a los ensayos de microscopía, macroscopía, doblado, tracción fue el esperado

- Se obtuvo un patrón de generación de poros tal y como se esperaba. Con el apoyo en la microscopía, ya que con los ensayos de rayos X no se pudo observar porosidades posiblemente por el enfoque del lente con poca intensidad buscando poros y grietas más representativas y los micro poros observados en el ensayo microscópico se pasaron por alto en los rayos X.
- En el caso de las probetas de tracción la que obtuvo la mayor elongación fue la del cordón realizado con el electrodo E-7018 a 100 amperios, ya que presentó un porcentaje de deformación de 28,12%.
- En la mayoría de las probetas se observaron patrones ferríticos y perlíticos lo cual es indicativo de la preservación de las propiedades mecánicas de los aceros. Por consiguiente las zonas de fusión presentaron las variaciones esperadas debido al aporte de calor.
- Los parámetros seleccionados para la realización de los cordones de soldadura se consideran satisfactorios ya que durante la aplicación de todos los ensayos no se observaron defectos tales como grietas, los cuales suelen ser característicos cuando se seleccionan amperajes fuera de la norma.

5.2 Recomendaciones

- Sujetar las láminas del material antes y después de realizar el proceso de soldadura para evitar el pandeo por la acción del calor y garantizar una superficie nivelada.
- Comparar los resultados obtenidos con los resultados de otras investigaciones en la cual se hayan usado otros procesos de soldadura.
- El acero AISI 1010 es fácil de manejar en cuanto a soldadura, ensayos y resulta accesible desde el punto de vista económico, sin embargo se recomienda para futuras investigaciones realizar estudios con otro material base.

- Para posteriores trabajos es necesario que el soldador realice pruebas piloto para comprobar que la máquina esté a punto y lograr buenos cordones de soldadura.
- Se recomienda realizar el proceso de inspección mediante el uso de otros métodos no destructivos como líquidos penetrantes, ultrasonidos, partículas magnéticas, entre otros.
- Realizar las pruebas y ensayos necesarios siguiendo las pautas de este trabajo a otros electrodos para así aumentar la cantidad de electrodos evaluados así como también cambiar los amperajes utilizados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade, (2010). **“Determinación de esfuerzos residuales en soldaduras a tope por arco eléctrico con electrodo revestido en acero ASTM A – 36”**. Trabajo Especial de Grado sin publicar. Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela.
- Aponte Z Juan J. (2010). **“Determinación del Efecto de la Temperatura de Pre calentamiento Sobre la Sensibilidad al Agrietamiento en Caliente para Cordones de Soldadura en Acero Estructural utilizando Electrodo E7018 y E6010”**. Trabajo Especial de Grado sin publicar. Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela.”
- Arias, F (2012). **“El proyecto de investigación. Introducción a la Metodología Científica”**. Caracas, 6ta. Edición Editorial Episteme.
- Askeland, Donald R. and Phule, Pradeep P. (2004). **“Ciencia e Ingeniería de los Materiales”**. Editorial Thomson. 4ta Edición. D.F. México. Pág. 231-497.
- ASME. BPVC, **“Welding and Brazing Qualifications.”** Section IX, (2010). pág. 178. Visto en <https://law.resource.org/pub/us/code/ibr/asmе.bpvc.ix.2010.pdf> 10/10/2016.
- Asta, E. (2003) **“Efecto de la temperatura de pre calentamiento en la soldabilidad de un acero ASTM A514 Gr B”**. Congreso nacional de metalurgia. Sociedad argentina de metalurgia. pp. 93 – 96. Buenos Aires. Argentina.
- ASTM E-190. **“Standard Test Method for Guided Bend Test for Ductility of Welds”**. ASTM (2004) Standards\ASTM 2004 PART IA\ASTM 2004 Volume 03.01 Metals -- Mechanical Testing_ Elevated and Low-Temperature Tests_ Metallograph
- ASTM E-8M. **“Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric]”** ASTM (2004) Standards\ASTM 2004 PART IA\ASTM 2004 Volume 03.01 Metals -- Mechanical Testing_ Elevated and Low-Temperature Tests_ Metallograph
- ASTM E-384-99. **“Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials”**. ASTM (2004) Standards\ASTM 2004 PART IA\ASTM 2004 Volume 03.01 Metals -- Mechanical Testing_ Elevated and Low-Temperature Tests_ Metallograph.
- ASTM 407-7. **“Heat –resisting chromium and chromium- Nickel stainless steel plate, sheet, and strip for pressure vessels and for general applications”**. ASTM (2004) Standards\ASTM 2004 PART IA\ASTM 2004 Volume 03.01 Metals -- Mechanical Testing_ Elevated and Low-Temperature Tests_ Metallograph
- AWS Welding Handbook. Ninth Edition volume 2. Welding process, part 1. American Welding Society 550 N.W. LeJeune Road Miami, FL 33126.
- Barranco y Miranda, (2006). **“Influencia del tratamiento térmico de recocido post – soldadura en las propiedades mecánicas y metalúrgicas en juntas soldadas de acero de bajo carbono ASTM A – 36”**. Trabajo Especial de Grado sin publicar. Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela.

Bello, E. y Marchena, M. (2008). **“Determinación de los esfuerzos residuales en uniones soldadas a tope a través de la teoría de Masabuchi”**. Trabajo especial de grado. Universidad de Carabobo, Valencia Venezuela.

Bruno A. y Viñones C. (2007). **“Estudio Comparativo de las Propiedades Mecánicas y Metalúrgicas de Uniones Soldadas Mediante los Procesos SMAW y SAW en los Aceros ASTM A-36 y ASTM A-516-70”**. Rev. ESAB – CONARCO. pp 7 – 8, Argentina Diciembre.

Caraballo, D y Peña, I. (1999). **“Evaluación de la sensibilidad al agrietamiento en aceros inoxidables con diferentes métodos de soldabilidad”**. Universidad de Carabobo, Valencia. Venezuela.

Catalogo Philips de Rayos X Industriales.

“Composición del revestimiento”. [En línea]. [Citada 28/10/2016]. Disponible: <http://www.indura.cl/informacion.asp?tipo=2&idq=2780>.

“Constituyentes de los aceros” [En línea]. [Citada 30/09/2016]. Disponible: <http://throwate.blogspot.com/2014/02/los-aceros.html>

“Esquema del tipo de electrodo y su eficiencia” [En línea]. [Citada 24/10/2016]. Disponible: http://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm12/ejercicios12_3.html.

I.E.S Cristobal de Monroy. Dpto Tecnologia **“Procedimiento de unión: soldadura”**. [Citada 14/10/2016]. Visto en http://www.academia.edu/13443657/Procedimientos_de_uni%C3%B3n_Soldadura.

Gricón, (2003). **“Catálogo de electrodos recubiertos Gricón”**. pp. 5 – 26. USA.

Lincoln Electric. (2.015). **“Electrodos Revestidos Catalogo”**. San Vicente 1, Edo. Aragua Venezuela. Visto en <https://www.lincolnelectric.com.ve>. 14/02/2017.

“Microestructura del acero 1%C, red blanca de cementita” [En línea]. [Citada 30-09-2016]. Disponible: <http://www.utp.edu.co/~publio17/aceros.htm>

Norma COVENIN 0803 – 1989. **“Aceros, definiciones y clasificaciones”**.

“Procesos de soldadura - Materias FCyT UMSS” [En línea]. (Citada 27/10/2016). Disponible: <http://materias.fcyt.umss.edu.bo/tecno-II/PDF/cap-43.pdf>

Riveros S, Castillo R.N, Bermont V.M, & Laffertte J.E, (2003). **“Influencia del tratamiento térmico de recocido post-soldadura en las propiedades mecánicas y metalúrgicas en juntas soldadas de acero de bajo carbono ASTM A-36”**. Rev.

Jornada SAM / CONAMET / Simposio Materia 2003, I. Balseiro UNC, pp 104 – 106,
Bariloche, Argentina.



Designation: E190 – 92 (Reapproved 2008)

Standard Test Method for Guided Bend Test for Ductility of Welds¹

This standard is issued under the fixed designation E190; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope

1.1 This test method covers a guided bend test for the determination of soundness and ductility of welds in ferrous and nonferrous products. Defects, not shown by X rays, may appear in the surface of a specimen when it is subjected to progressive localized overstressing. This guided bend test has been developed primarily for plates and is not intended to be substituted for other methods of bend testing.

1.2 The values stated in inch-pound units are to be regarded as standard. The values given in parentheses are mathematical conversions to SI units that are provided for information only and are not considered standard.

Notes 1—For additional information see Terminology E6, and American Welding Society Standard D 1.1.

1.3 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*²

E6 Terminology Relating to Methods of Mechanical Testing

2.2 AWS Standard:

D1.1 Structural Welding Code, Steel³

3. Summary of Test Method

3.1 The specimen is bent in a U-shaped die by means of a centrally applied force to the weldment in a flat specimen supported at two positions equidistant from the line of force

application. The specimen is forced into the die by a plunger having the shape necessary to produce the desired contour. The convex surface of the bent specimen is examined for cracks or other open defects.

4. Significance and Use

4.1 The guided bend test as described in this test method is used to evaluate the quality of welds as a function of ductility as evidenced by their ability to resist cracking during bending.

5. Apparatus

5.1 The guided bend test jig is shown in Fig. 1 (see Explanatory Notes at end of this test method).

6. Sampling

6.1 Sampling is performed in accordance with the requirements of relevant specifications and codes.

7. Test Specimens

7.1 The types of specimens generally used for guided bend testing are rectangular ones machined from plates and pipes. The face surface of the flat specimen contains the greater width of the weld material, while the opposite side is called the root surface.

7.1.1 *Transverse Side Bend*—The weld is transverse to the longitudinal axis of the specimen which is bent so that either one of the side surfaces becomes the convex surface of the bent specimen (Fig. 2 and Fig. 3).

7.1.2 *Transverse Face Bend*—The weld is transverse to the longitudinal axis of the specimen which is bent so that the weld face surface becomes the convex surface of the bent specimen (Fig. 4).

7.1.3 *Transverse Root Bend*—The weld is transverse to the longitudinal axis of the specimen which is bent so that the weld-root surface becomes the convex surface of the bent specimen (Fig. 4).

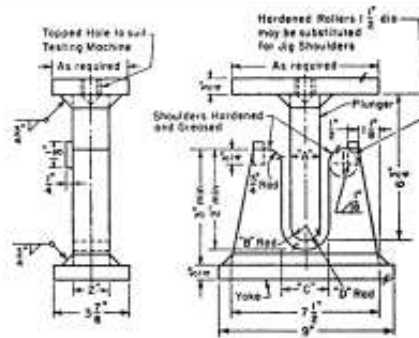
7.1.4 *Longitudinal Face Bend*—The weld is parallel to the longitudinal axis of the specimen which is bent so that the weld-face surface becomes the convex surface of the bent specimen (Fig. 5).

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee E28 on Mechanical Testing and is the direct responsibility of Subcommittee E28.02 on Ductility and Formability.

Current edition approved Sept. 1, 2008. Published January 2009. Originally approved in 1963. Last previous edition approved in 2003 as E190 – 92 (2003). DOI: 10.1520/E0190-02R08.

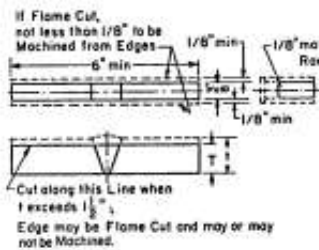
² For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For Annual Book of ASTM Standards volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

³ Available from The American Welding Society (AWS), 550 NW LeJeune Rd., Miami, FL 33126.



Thickness of Specimen in. (mm)	A, in. (mm)	B, in. (mm)	C, in. (mm)	D, in. (mm)
3/8 (9.5)	1 1/2 (38)	3/4 (19)	2 3/4 (69)	1 3/4 (38)
1/2 (12.7)	2 1/4 (57)	1 1/4 (27)	2 3/4 (69)	1 3/4 (38)
t	4t	2t	6t + 1/4 (+ 3.2)	3t + 1/4 (+ 1.8)

FIG. 1 Guided Bend Test Jig



t, in. (mm)	T, in.
3/8 to 1 1/2 (9.5 to 38)	t
>1 1/2 (38)	See Note

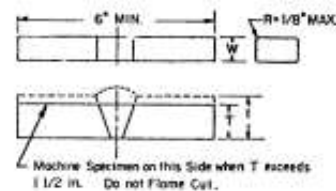
Note 1—For plates over 1 1/2 in. (38 mm) thick, cut specimen into approximately equal strips between 3/8 and 1 1/2 in. (19 and 38 mm) wide and test each strip.

FIG. 2 Side-Bend Specimen for Ferrous Materials

7.1.5 **Longitudinal Root Bend**—The weld is parallel to the longitudinal axis of the specimen which is bent so that the weld root surface becomes the convex surface of the bent specimen (Fig. 5).

8. Procedure

8.1 Bend the guided-bend specimens in a test jig that is substantially in accordance with Fig. 1. Place transverse specimens on the die member of the jig with the weld at midspan. Place face-bend specimens with the face of the weld directed toward the gap; place root-bend specimens with the root of the weld directed toward the gap; and place side-bend specimens with the side showing the greater defects toward the gap. If no significant defects are evident, either side may be chosen.



t, in. (mm)	T, in.
3/8 to 1 1/2 (9.5 to 38)	t
>1 1/2	See Note

Note 1—For plates over 1 1/2 in. (38 mm) thick, cut specimen into approximately equal strips between 3/8 and 1 1/2 in. (19 to 38 mm) wide and test each strip.

FIG. 3 Side-Bend Specimen for Nonferrous Materials

8.2 Any convenient means may be used for moving the plunger with relation to the die; but it must be steady and without any significant lateral motion. Apply the force until the specimen conforms to a U-shape, and until a 1/8-in. (3.2 mm) diameter wire cannot be inserted between the specimen and any point on the curvature of the plunger member of the jig, unless the specimen fails earlier.

9. Interpretation of Results

9.1 Examine the convex surface of the bent specimen for cracks or other open defects.

9.1.1 When the test is conducted as an acceptance criterion, the allowable crack size shall be specified by the code or specification requiring the test.

9.1.2 When the test is conducted for informational purposes, report the size and location of all cracks visible to the unaided eye.

 Designation: E 407 – 07

Standard Practice for Microetching Metals and Alloys¹

This standard is issued under the fixed designation E 407; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last approval. A superscript symbol (n) indicates an editorial change since the last revision or approval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope

1.1 This practice covers chemical solutions and procedures to be used in etching metals and alloys for microscopic examination. Safety precautions and miscellaneous information are also included.

1.2 This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use. For specific cautionary statements, see 6.1 and Table 2.

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:²

- D 1193 Specification for Reagent Water
- E 7 Terminology Relating to Metallography
- E 2014 Guide on Metallographic Laboratory Safety

3. Terminology

3.1 Definitions:

3.1.1 For definition of terms used in this standard, see Terminology E 7.

3.2 Definitions of Terms Specific to This Standard:

3.2.1 *stain etch*—an immersion etchant that produces color contrast, often selective to a particular constituent in the microstructure, due to a thin oxide, sulfide, molybdate, chromate or elemental selenium film on the polished surface that reveals the structure due to variations in light interference effects as a function of the film thickness (also called a “stain etch”).

3.2.2 *vacuum deposition interference layer method*—a technique for producing enhanced contrast between microstructural constituents, usually in color, by thin films formed by vacuum

deposition of a dielectric compound (such as ZnTe, ZnSe, TiO₂, ZnS or ZnO) with a known index of refraction, generally due to light interference effects (also known as the “Pepperhoff method”).

4. Summary of Practice

4.1 Table 1 is an alphabetical listing of the metals (including rare earths) and their alloys for which etching information is available. For each metal and alloy, one or more etchant numbers and their corresponding use is indicated. Alloys are listed as a group or series when one or more etchants are common to the group or series. Specific alloys are listed only when necessary. When more than one etchant number is given for a particular use, they are usually given in order of preference. The numbers of electrolytic etchants are italicized to differentiate them from nonelectrolytic etchants.

4.2 Table 2 is a numerical listing of all the etchants referenced in Table 1 and includes the composition and general procedure to be followed for each etchant.

4.3 To use the tables, look up the metal or alloy of interest in Table 1 and note the etchant numbers corresponding to the results desired. The etchant composition and procedure is then located in Table 2 corresponding to the etchant number.

4.4 If the common name of an etchant is known (Marble’s, Vilella’s, etc.), and it is desired to know the composition, Table 1 contains an alphabetical listing of etchant names, each coded with a number corresponding to the etchant composition given in Table 2.

5. Significance and Use

5.1 This practice lists recommended methods and solutions for the etching of specimens for metallographic examination. Solutions are listed to highlight phases present in most major alloy systems.

6. Safety Precautions

6.1 Before using or mixing any chemicals, all product labels and pertinent Material Safety Data Sheets (MSDS) should be read and understood concerning all of the hazards and safety precautions to be observed. Users should be aware of the type of hazards involved in the use of all chemicals used, including those hazards that are immediate, long-term, visible, invisible,

¹This practice is under the jurisdiction of ASTM Committee E09 on Metallography, and is the direct responsibility of Subcommittee E09.01 on Specimen Preparation.

²Current edition approved May 1, 2007. Published May 2007. Originally approved in 1995. Last previous edition approved in 1999 as E 407-99.

³For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For Annual Book of ASTM Standards volume information, refer to the standard’s Document Summary page on the ASTM website.

Copyright © ASTM International, 100 Bar Harbor Drive, PO Box C70, West Conshohocken, PA 19380-0200, United States.

and with or without odors. See Guide E 2014 on Metallographic Laboratory Safety for additional information on: Chemical Safety, Electrolytic Polishing/Etching, and Laboratory Ventilation/Fume Hoods.

6.1.1 Consult the product labels and MSDSs for recommendations concerning proper protective clothing.

6.1.2 All chemicals are potentially dangerous. All persons using any etchants should be thoroughly familiar with all of the chemicals involved and the proper procedure for handling, mixing, and disposing of each chemical, as well as any combinations of those chemicals. This includes being familiar with the federal, state, and local regulations governing the handling, storage, and disposal of these chemical etchants.

6.2 Some basic suggestions for the handling and disposing of etchants and their ingredients are as follows:

6.2.1 When pouring, mixing, or etching, always use the proper protective equipment, (glasses, gloves, apron, etc.) and it is strongly recommended to always work under a certified and tested fume hood. This is imperative with etchants that give off noxious odors or toxic vapors that may accumulate or become explosive. In particular, note that solutions containing perchloric acid must be used in an exclusive hood equipped with a wash down feature to avoid accumulation of explosive perchlorates. See Guide E 2014 on Metallographic Laboratory Safety for additional information on safety precautions for electrolytes containing perchloric acid.

6.2.2 No single type of glove will protect against all possible hazards. Therefore, a glove must be carefully selected and used to ensure that it will provide the needed protection for the specific etchant being used. In some instances it may be necessary to wear more than one pair of gloves to provide proper protection. Information describing the appropriate glove may be obtained by consulting the MSDS for the chemical being used. If that does not provide enough detailed information, contact the chemical manufacturer directly. Additionally, one can contact the glove manufacturer or, if available, consult the manufacturer's glove chart. If the chemical is not listed or if chemical mixtures are being used, contact the glove manufacturer for a recommendation.

6.2.3 Use proper devices (glass or plastic) for weighing, mixing, containing, and storage of solutions. A number of etchants generate fumes or vapors and should only be stored in properly vented containers. Storage of fuming etchants in sealed or non-vented containers may create an explosion hazard.

6.2.4 When mixing etchants, always add reagents to the solvent unless specific instructions indicate otherwise.

6.2.5 When etching, always avoid direct physical contact with the etchant and specimen; use devices such as tongs to hold the specimen (and tufts of cotton, if used).

6.2.6 Methanol is a cumulative poison hazard. Where ethanol or methanol, or both are listed as alternates, ethanol is the preferred solvent. Methanol should be used in a properly designed chemical fume hood.

6.2.7 When working with HF always be sure to wear the appropriate gloves, eye protection and apron. Buying HF at the lowest useable concentration will significantly reduce risk. Additionally, it is recommended that a calcium gluconate

cream or other appropriate HF neutralizing agent be available for use if direct skin contact of the etchant occurs.

6.2.8 The EPA states that human studies have clearly established that inhaled chromium (VI) is a human carcinogen, resulting in an increased risk of lung cancer. Animal studies have shown chromium (VI) to cause lung tumors via inhalation exposure. Therefore, when working with Cr(VI) compounds such as $K_2Cr_2O_7$ and CrO_3 , always use a certified and tested fume hood. Additional information can be obtained at the EPA website¹.

6.2.9 For safety in transportation, picric acid is distributed by the manufacturer wet with greater than 30% water. Care must be taken to keep it moist because dry picric acid is shock sensitive and highly explosive especially when it is combined with metals such as copper, lead, zinc, and iron. It will also react with alkaline materials including plaster and concrete to form explosive compounds. It should be purchased in small quantities suitable for use in six to twelve months and checked periodically for lack of hydration. Distilled water may be added to maintain hydration. It must only be stored in plastic or glass bottles with nonmetallic lids. If dried particles are noted on or near the lid, submerge the bottle in water to re-hydrate them before opening. It is recommended that any bottle of picric acid that appears dry or is of unknown vintage not be opened and that proper emergency personnel be notified.

6.2.10 Wipe up or flush any and all spills, no matter how minute in nature.

6.2.11 Properly dispose of all solutions that are not identified by composition and concentration.

6.2.12 Store, handle and dispose of chemicals according to the manufacturer's recommendations. Observe printed cautions on reagent bottles.

6.2.13 Information pertaining to the toxicity, hazards, and working precautions of the chemicals, solvents, acids, bases, etc. being used (such as material safety data sheets, MSDS) should be available for rapid consultation. A selection of useful books on this subject is given in Refs. (I-III)².

6.2.14 Facilities which routinely use chemical etchants should have an employee safety training program to insure the employees have the knowledge to properly handle chemical etchants.

6.2.15 When working with etchants always know where the nearest safety shower, eye-wash station, and emergency telephone are located.

7. Miscellaneous Information

7.1 If you know the trade name of an alloy and need to know the composition to facilitate the use of Table 1, refer to a compilation such as Ref (12).

7.2 Reagent grade chemicals shall be used for all etchants. Unless otherwise indicated, it is intended that all reagents conform to specifications of the Committee on Analytical Reagents of the American Chemical Society where such specifications are available. Other grades, such as United States

¹ <http://www.epa.gov/bca/air01/bh01/crchrom.htm>

² The boldface numbers in parentheses refer to the list of references at the end of this standard.



Designation: E 8M – 00a
METRIC

Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric]¹

This standard is issued under the fixed designation E 8M; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reappraisal. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reappraisal.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope *

1.1 These test methods cover the tension testing of metallic materials in any form at room temperature, specifically, the methods of determination of yield strength, yield point elongation, tensile strength, elongation, and reduction of area.

NOTE 1—These test methods are the metric companion of Test Methods E 8. Committee E-28 was granted an exception in 1997 by the Committee on Standards to maintain E8 and E8M as separate companion standards rather than combining standards as recommended by the Form and Style manual.

NOTE 2—These metric test methods are essentially the same as those in Test Methods E 8, and are compatible in technical content except that gage lengths are required to be 5D for most round specimens rather than 4D as specified in Test Methods E 8. Test specimens made from powder metallurgy (P/M) materials are exempt from this requirement by industry-wide agreement to keep the pressing of the material to a specific projected area and density.

NOTE 3—Exceptions to the provisions of these test methods may need to be made in individual specifications or test methods for a particular material. For examples, see Test Methods and Definitions A 370 and Test Methods B 557M.

NOTE 4—Room temperature shall be considered to be 10 to 38°C unless otherwise specified.

1.2 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

A 356/A356M Specification for Steel Castings, Carbon, Low Alloy, and Stainless Steel, Heavy-Walled for Steam Turbines²

A 370 Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products³

B 557M Test Methods of Tension Testing Wrought and Cast

¹ These test methods are under the jurisdiction of ASTM Committee E-28 on Mechanical Testing and are the direct responsibility of Subcommittee E28.04 on Uniaxial Testing.

Current edition approved May 10, 2000. Published August 2000. Originally published as E 8M – 84. Last previous edition E 8M – 99.

² Annual Book of ASTM Standards, Vol 01.02.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vol 01.03.

Aluminum- and Magnesium-Alloy Products [Metric]⁴

E 4 Practices for Force Verification of Testing Machines⁵

E 6 Terminology Relating to Methods of Mechanical Testing⁵

E 8 Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials⁵

E 29 Practice for Using Significant Digits in Test Data to Determine Conformance with Specifications⁶

E 83 Practice for Verification and Classification of Extensometers⁵

E 345 Test Methods of Tension Testing of Metallic Foil⁵

E 691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method⁶

E 1012 Practice for Verification of Specimen Alignment Under Tensile Loading⁵

3. Terminology

3.1 *Definitions*—The definitions of terms relating to tension testing appearing in Terminology E 6 shall be considered as applying to the terms used in these test methods of tension testing. Additional terms being defined are as follows:

3.1.1 *discontinuous yielding*—a hesitation or fluctuation of force observed at the onset of plastic deformation, due to localized yielding. (The stress-strain curve need not appear to be discontinuous.)

3.1.2 *lower yield strength, LYS* [FL^{-2}]—the minimum stress recorded during discontinuous yielding, ignoring transient effects.

3.1.3 *upper yield strength, UYS* [FL^{-2}]—the first stress maximum (stress at first zero slope) associated with discontinuous yielding.

3.1.4 *yield point elongation, YPE*—the strain (expressed in percent) separating the stress-strain curve's first point of zero slope from the point of transition from discontinuous yielding to uniform strain hardening. If the transition occurs over a range of strain, the YPE end point is the intersection between (a) a horizontal line drawn tangent to the curve at the last zero slope and (b) a line drawn tangent to the strain hardening portion of the stress-strain curve at the point of inflection. If there is no point at or near the onset of yielding at which the

⁴ Annual Book of ASTM Standards, Vol 02.02.

⁵ Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.01.

⁶ Annual Book of ASTM Standards, Vol 14.02.

*A Summary of Changes section appears at the end of this standard.

Norma ASTM E -8M

slope reaches zero, the material has 0 % YPE.

4. Significance and Use

4.1 Tension tests provide information on the strength and ductility of materials under uniaxial tensile stresses. This information may be useful in comparisons of materials, alloy development, quality control, and design under certain circumstances.

4.2 The results of tension tests of specimens machined to standardized dimensions from selected portions of a part or material may not totally represent the strength and ductility properties of the entire end product or its in-service behavior in different environments.

4.3 These test methods are considered satisfactory for acceptance testing of commercial shipments. The test methods have been used extensively in the trade for this purpose.

5. Apparatus

5.1 *Testing Machines*—Machines used for tension testing shall conform to the requirements of Practices E 4. The forces used in determining tensile strength and yield strength shall be within the verified force application range of the testing machine as defined in Practices E 4.

5.2 *Gripping Devices*:

5.2.1 *General*—Various types of gripping devices may be used to transmit the measured force applied by the testing machine to the test specimens. To ensure axial tensile stress within the gage length, the axis of the test specimen should coincide with the center line of the heads of the testing machine. Any departure from this requirement may introduce bending stresses that are not included in the usual stress computation (force divided by cross-sectional area).

NOTE 5—The effect of this eccentric force application may be illustrated by calculating the bending moment and stress thus added. For a standard 12.5-mm diameter specimen, the stress increase is 1.5 % for each 0.025 mm of eccentricity. This error increases to about 2.5 %/0.025 mm for a 9-mm diameter specimen and to about 3.2 %/0.025 mm for a 6-mm diameter specimen.

NOTE 6—Alignment methods are given in Practice E 1012.

5.2.2 *Wedge Grips*—Testing machines usually are equipped with wedge grips. These wedge grips generally furnish a satisfactory means of gripping long specimens of ductile metal and flat plate test specimens such as those shown in Fig. 1. If, however, for any reason, one grip of a pair advances farther than the other as the grips tighten, an undesirable bending stress may be introduced. When liners are used behind the wedges, they must be of the same thickness and their faces must be flat and parallel. For best results, the wedges should be supported over their entire lengths by the heads of the testing machine. This requires that liners of several thicknesses be available to cover the range of specimen thickness. For proper gripping, it is desirable that the entire length of the serrated face of each wedge be in contact with the specimen. Proper alignment of wedge grips and liners is illustrated in Fig. 2. For short specimens and for specimens of many materials, it is generally necessary to use machined test specimens and to use a special means of gripping to ensure that the specimens, when under load, shall be as nearly as possible in uniformly distributed pure axial tension (see 5.2.3, 5.2.4, and 5.2.5).

5.2.3 *Grips for Threaded and Shouldered Specimens and Brittle Materials*—A schematic diagram of a gripping device for threaded-end specimens is shown in Fig. 3, while Fig. 4 shows a device for gripping specimens with shouldered ends. Both of these gripping devices should be attached to the heads of the testing machine through properly lubricated spherical-seated bearings. The distance between spherical bearings should be as great as feasible.

5.2.4 *Grips for Sheet Materials*—The self-adjusting grips shown in Fig. 5 have proved satisfactory for testing sheet materials that cannot be tested satisfactorily in the usual type of wedge grips.

5.2.5 *Grips for Wire*—Grips of either the wedge or snubbing types as shown in Fig. 5 and Fig. 6 or flat wedge grips may be used.

5.3 *Dimension-Measuring Devices*—Micrometers and other devices used for measuring linear dimensions shall be accurate and precise to at least one half the smallest unit to which the individual dimension is required to be measured.

5.4 *Extensometers*—Extensometers used in tension testing shall conform to the requirements of Practice E 83 for the classifications specified by the procedure section of this test method. Extensometers shall be used and verified to include strains corresponding to the yield strength and elongation at fracture (if determined).

5.4.1 Extensometers with gage lengths equal to or shorter than the nominal gage length of the specimen (dimensions shown as “G-Gage Length” in the accompanying figures) may be used to determine the yield behavior. For specimens without a reduced section (for example, full cross sectional area specimens of wire, rod, or bar), the extensometer gage length for the determination of yield behavior shall not exceed 80 % of the distance between grips. For measuring elongation at fracture with an appropriate extensometer the gage length of the extensometer shall be equal to the nominal gage length required for the specimen being tested.

6. Test Specimens

6.1 *General*:

6.1.1 *Specimen Size*—Test specimens shall be either substantially full size or machined, as prescribed in the product specifications for the material being tested.

6.1.2 *Location*—Unless otherwise specified, the axis of the test specimen shall be located within the parent material as follows:

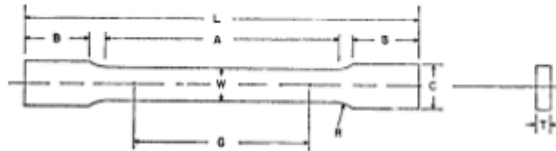
6.1.2.1 At the center for products 40 mm or less in thickness, diameter, or distance between flats.

6.1.2.2 Midway from the center to the surface for products over 40 mm in thickness, diameter, or distance between flats.

6.1.3 *Specimen Machining*—Improperly prepared test specimens often are the reason for unsatisfactory and incorrect test results. It is important, therefore, that care be exercised in the preparation of specimens, particularly in the machining, to maximize precision and minimize bias in test results.

6.1.3.1 The reduced sections of prepared specimens should be free of cold work, notches, chatter marks, grooves, gouges, burrs, rough surfaces or edges, overheating, or any other condition which may deleteriously affect the properties to be measured.

E 8M



Nominal Width	Dimensions, mm		
	Plate-Type 40 mm	Standard Specimens Sheet-Type 12.5 mm	Subsize Specimen 6 mm
G—Gage length (Note 1 and Note 2)	200.0 ± 0.2	50.0 ± 0.1	25.0 ± 0.1
W—Width (Note 3 and Note 4)	40.0 ± 2.0	12.5 ± 0.2	6.0 ± 0.1
T—Thickness (Note 5)		thickness of material	
R—Radius of fillet, min (Note 6)	25	12.5	6
L—Overall length, min (Note 2 and Note 7)	450	200	100
A—Length of reduced section, min	225	57	32
B—Length of grip section, min (Note 8)	75	50	30
C—Width of grip section, approximate (Note 4 and Note 9)	50	20	10

NOTE 1—For the 40-mm wide specimen, punch marks for measuring elongation after fracture shall be made on the flat or on the edge of the specimen and within the reduced section. Either a set of nine or more punch marks 25 mm apart, or one or more pairs of punch marks 200 mm apart, may be used.

NOTE 2—When elongation measurements of 40-mm wide specimens are not required, a minimum length of reduced section (A) of 75 mm may be used with all other dimensions similar to the plate-type specimen.

NOTE 3—For the three sizes of specimens, the ends of the reduced section shall not differ in width by more than 0.10, 0.05 or 0.02 mm, respectively. Also, there may be a gradual decrease in width from the ends to the center, but the width at each end shall not be more than 1% larger than the width at the center.

NOTE 4—For each of the three sizes of specimens, narrower widths (W and C) may be used when necessary. In such cases the width of the reduced section should be as large as the width of the material being tested permits; however, unless stated specifically, the requirements for elongation in a product specification shall not apply when these narrower specimens are used.

NOTE 5—The dimension T is the thickness of the test specimen as provided for in the applicable material specifications. Minimum thickness of 40-mm wide specimens shall be 5 mm. Maximum thickness of 12.5-mm and 6-mm wide specimens shall be 19 mm and 6 mm, respectively.

NOTE 6—For the 40-mm wide specimen, a 13-mm minimum radius at the ends of the reduced section is permitted for steel specimens under 690 MPa in tensile strength when a profile cutter is used to machine the reduced section.

NOTE 7—To aid in obtaining axial force application during testing of 6-mm wide specimens, the overall length should be as large as the material will permit, up to 200 mm.

NOTE 8—It is desirable, if possible, to make the length of the grip section large enough to allow the specimen to extend into the grips a distance equal to two thirds or more of the length of the grips. If the thickness of 12.5-mm wide specimens is over 10 mm, longer grips and correspondingly longer grip sections of the specimen may be necessary to prevent failure in the grip section.

NOTE 9—For the three sizes of specimens, the ends of the specimen shall be symmetrical in width with the center line of the reduced section within 2.5, 0.25, and 0.13 mm, respectively. However, for referee testing and when required by product specifications, the ends of the 12.5-mm wide specimen shall be symmetrical within 0.2 mm.

NOTE 10—For each specimen type, the radii of all fillets shall be equal to each other within a tolerance of 1.25 mm, and the centers of curvature of the two fillets at a particular end shall be located across from each other (on a line perpendicular to the centerline) within a tolerance of 2.5 mm.

NOTE 11—Specimens with sides parallel throughout their length are permitted, except for referee testing, provided: (a) the above tolerances are used; (b) an adequate number of marks are provided for determination of elongation; and (c) when yield strength is determined, a suitable extensometer is used. If the fracture occurs at a distance of less than $2W$ from the edge of the gripping device, the tensile properties determined may not be representative of the material. In acceptance testing, if the properties meet the minimum requirements specified, no further testing is required, but if they are less than the minimum requirements, discard the test and retest.

FIG. 1 Rectangular Tension Test Specimens

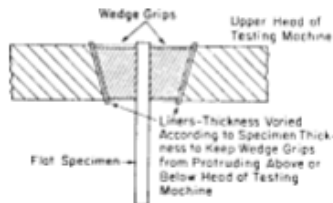


FIG. 2 Wedge Grips with Liners for Flat Specimens

NOTE 7—Punching or blanking of reduced section may produce significant cold work or shear burrs, or both, along the edges which should be removed by machining.

6.1.3.2 Within the reduced section of rectangular specimens, edges or corners should not be ground or abraded in a manner which could cause the actual cross-sectional area of the specimen to be significantly different from the calculated area.

6.1.3.3 For brittle materials, large radius fillets at the ends of the gage length should be used.

6.1.3.4 The cross-sectional area of the specimen should be smallest at the center of the reduced section to ensure fracture within the gage length. For this reason, a small taper is



Designation: E 384 – 99

Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials¹

This standard is issued under the fixed designation E 384; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope

1.1 This test method covers determination of the microindentation hardness of materials, the verification of microindentation hardness testing machines, and the calibration of standardized test blocks.

1.2 This test method covers microindentation tests made with Knoop and Vickers indenters under test forces in the range from 1 to 1000 gf (9.8×10^{-3} to 9.8 N).

1.3 This test method includes an analysis of the possible sources of errors that can occur during microindentation testing and how these factors affect the accuracy, repeatability, and reproducibility of test results.

NOTE 1—While Committee E-4 is primarily concerned with metals, the test procedures described are applicable to other materials.

1.4 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

C 1326 Test Method for Knoop Indentation Hardness of Advanced Ceramics²

C 1327 Test Method for Vickers Indentation Hardness of Advanced Ceramics²

E 3 Methods of Preparation of Metallographic Specimens³

E 7 Terminology Relating to Metallography³

E 122 Practice for Choice of Sample Size to Estimate the Average Quality for a Lot or Process⁴

E 140 Test Method for Hardness Conversion Tables for Metals⁵

E 175 Terminology of Microscopy⁵

E 691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method⁴

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee E-4 on Metallography and is the direct responsibility of Subcommittee E04.05 on Microhardness.

Current edition approved Nov. 10, 1999. Published March 2000. Originally published as E 384 – 69. Last previous edition E 384 – 89.

² Annual Book of ASTM Standards, Vol 15.01.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.01.

⁴ Annual Book of ASTM Standards, Vol 14.02.

⁵ Annual Book of ASTM Standards, Vol 14.01.

E 766 Practice for Calibrating the Magnification of a Scanning Electron Microscope³

3. Terminology

3.1 **Definitions**—For definitions of terms used in this test method, see Terminology E 7.

3.2 Definitions of Terms Specific to This Standard:

3.2.1 **calibrating, *v***—determining the values of the significant parameters by comparison with values indicated by a reference instrument or by a set of reference standards.

3.2.2 **Knoop hardness number, *HK, n***—an expression of hardness obtained by dividing the force applied to the Knoop indenter by the projected area of the permanent impression made by the indenter.

3.2.3 **Knoop indenter, *n***—a rhombic-based pyramidal-shaped diamond indenter with edge angles of $\angle A = 172^\circ 30'$ and $\angle B = 130^\circ 0'$ (see Fig. 1).

3.2.4 **microindentation hardness test, *n***—a hardness test using a calibrated machine to force a diamond indenter of specific geometry into the surface of the material being evaluated, in which the test forces range from 1 to 1000 gf (9.8×10^{-3} to 9.8 N), and the indentation diagonal, or diagonals are measured with a light microscope after load removal; for any microindentation hardness test, it is assumed that the indentation does not undergo elastic recovery after force removal.

NOTE 2—Use of the term microhardness should be avoided because it implies that the hardness, rather than the force or the indentation size, is very low.

3.2.5 **verifying, *v***—checking or testing the instrument to assure conformance with the specification.

3.2.6 **Vickers hardness number, *HV, n***—an expression of hardness obtained by dividing the force applied to a Vickers indenter by the surface area of the permanent impression made by the indenter.

3.2.7 **Vickers indenter, *n***—a square-based pyramidal-shaped diamond indenter with face angles of 136° (see Fig. 2).

3.3 **Formulae**—The formulae presented in 3.3.1-3.3.4 for calculating microindentation hardness are based upon an ideal tester. The measured value of the microindentation hardness of a material is subjected to several sources of errors. Based on Eq 1-9, variations in the applied force, geometrical variations between diamond indenters, and human errors in measuring indentation lengths can affect the calculated material hardness. The amount of error each of these parameters has on the

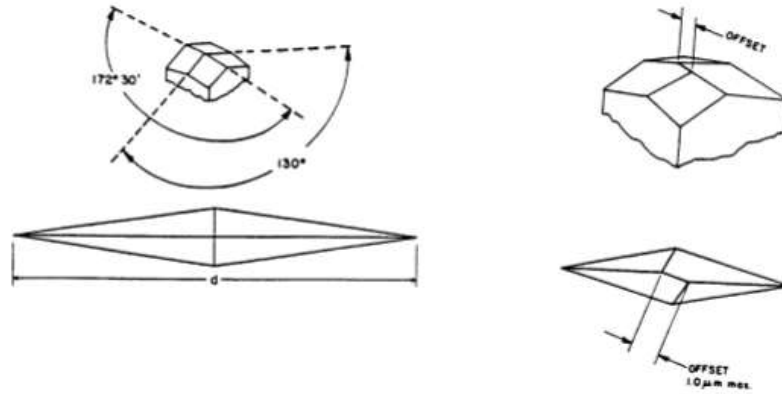


FIG. 1 Knoop Indenter

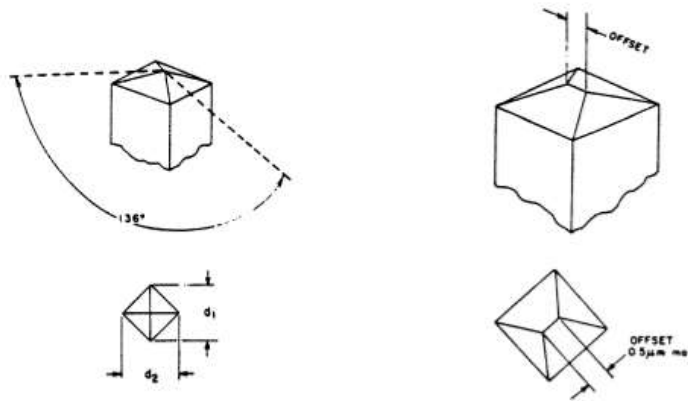


FIG. 2 Vickers Indenter

calculated value of a microindentation measurement is discussed in Section 10.

3.3.1 For Knoop hardness tests, in practice, test loads are in grams-force and indentation diagonals are in micrometres. The Knoop hardness number is calculated using the following:

$$HK = 1.000 \times 10^3 \times (P/A_p) = 1.000 \times 10^3 \times P/(c_p \times d^2) \quad (1)$$

or

$$HK = 14229 \times P/d^2 \quad (2)$$

$$c_p = \frac{\tan\left(\frac{\angle B}{2}\right)}{2 \tan\left(\frac{\angle A}{2}\right)} \quad (3)$$

where:

P = force, gf,

d = length of long diagonal, μm ,

A_p = projected area of indentation, μm^2 ,

$\angle A$ = included longitudinal edge angle, $172^\circ 30'$,

$\angle B$ = included transverse edge angle, $130^\circ 0'$ (see Fig. 1),

and

c_p = indenter constant relating projected area of the indentation to the square of the length of the long diagonal, ideally 0.07028.

NOTE 3—HK values for a 1-gf (9.8×10^{-3} N) test are contained in Appendix X5. To obtain HK values when other test forces are employed, multiply the HK value from Table X5.1 for the d value by the actual test force, g.