



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica

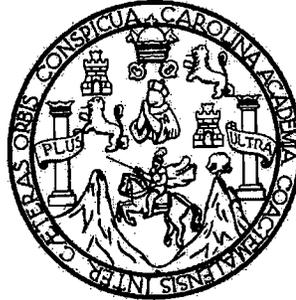
**SOLDADURA DE ACEROS INOXIDABLES Y ANÁLISIS  
PRÁCTICO POR MEDIO DE LOS ENSAYOS DESTRUCTIVOS**

**Alejandro Gabriel Girón Muñoz**

Asesorado por el Ing. Hugo Leonel Ramírez Ortiz

Guatemala, abril de 2011

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**SOLDADURA DE ACEROS INOXIDABLES Y ANÁLISIS PRÁCTICO POR  
MEDIO DE LOS ENSAYOS DESTRUCTIVOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**ALEJANDRO GABRIEL GIRÓN MUÑOZ**

ASESORADO POR EL ING. HUGO LEONEL RAMÍREZ ORTIZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO MECÁNICO**

GUATEMALA, ABRIL DE 2011

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Luis Pedro Ortiz de León
VOCAL V	P. A. José Alfredo Ortiz Herincx
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Raúl Guillermo Izaguirre Noriega
EXAMINADOR	Ing. Gilberto Enrique Morales Baiza
EXAMINADOR	Ing. Carlos Enrique Chicol Cabrera
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley orgánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **SOLDADURA DE ACEROS INOXIDABLES Y ANÁLISIS PRÁCTICO POR MEDIO DE LOS ENSAYOS DESTRUCTIVOS**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha de 6 de octubre de 2009.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Alejandro Gabriel Girón Muñoz', with a large, stylized flourish above the name.

**Alejandro Gabriel Girón Muñoz**

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

Guatemala, 22 de noviembre del 2,010

Ingeniero  
Julio César Campos Paiz  
Director de Escuela de Ingeniería Mecánica  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Respetable Ingeniero Campos:

Atentamente me dirijo a usted para presentarle el trabajo de graduación titulado: **"SOLDADURA DE ACEROS INOXIDABLES Y ANÁLISIS PRÁCTICO POR MEDIO DE ENSAYOS DESTRUCTIVOS"**, realizado por el estudiante de Ingeniería Mecánica, Alejandro Gabriel Girón Muñoz, el cual revisé y estoy satisfecho de su contenido.

A mi juicio el presente trabajo cumple con los objetivos planteados, y creo necesario destacar la utilidad que el mismo puede tener como material de apoyo para el curso de Metalurgia y Metalografía que actualmente se imparte en esta facultad.

Sin otro particular, me suscribo a usted como su seguro y atento servidor.

Ing. Hugo Leonel Ramírez Ortiz  
Asesor de Trabajo de Graduación  
Colegiado 5545

Ing. Hugo Ramírez  
COL. No. 5545

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

El Coordinador del Área de Materiales de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado, **SOLDADURA DE ACEROS INOXIDABLES Y ANÁLISIS PRÁCTICO POR MEDIO DE ENSAYOS DESTRUCTIVOS** del estudiante Alejandro Gabriel Girón Muñoz, recomienda su aprobación.

**ID Y ENSEÑADA A TODOS**

Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez  
**Coordinador de Área**



Guatemala, noviembre de 2010.

/behdei.

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA**



**FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA**

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, después de conocer el dictamen del asesor, con la aprobación del Coordinador del Área de Materiales, al Trabajo de Graduación titulado **SOLDADURA DE ACEROS INOXIDABLES Y ANÁLISIS PRÁCTICO POR MEDIO DE LOS ENSAYOS DESTRUCTIVOS**, del estudiante Alejandro Gabriel Girón Muñoz, procede a la autorización del mismo.

**ID Y ENSEÑAD A TODOS**

Ing. Julio César Campos Paiz  
**DIRECTOR**

Guatemala, abril del 2011

JCCP/behdei

MA Ing. Julio César Campos Paiz  
**DIRECTOR**  
Esc. Ingeniería Mecánica



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al trabajo de graduación titulado: **SOLDADURA DE ACEROS INOXIDABLES Y ANÁLISIS PRÁCTICO POR MEDIO DE LOS ENSAYOS DESTRUCTIVOS**, presentado por el estudiante universitario **Alejandro Gabriel Girón Muñoz**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Murphy Olympo Paiz Recinos', written over a large, empty oval shape.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
Decano

Guatemala, abril de 2011



/cc  
cc. archivo

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Dios</b>	Por brindarme el regalo de la vida, porque Él no es necesario, es indispensable.
<b>Mis padres</b>	Porque son los pilares de mi familia y mi ejemplo a seguir. Por su apoyo incondicional, lucha diaria, amor sin igual y por la sabiduría que me transmiten en sus consejos.
<b>Mis hermanos</b>	Por los momentos de felicidad que brindan a mi vida y la unión inquebrantable que hemos formado en los momentos de angustia a través de los años.
<b>Mis abuelos</b>	Por el cariño y amor dado a mi persona en los momentos de alegrías y tristezas.
<b>Mi novia</b>	Por ser una persona que me ha demostrado amor, respeto, fidelidad y confiabilidad en el tiempo que hemos convivido juntos.
<b>Mis amigos</b>	Por las incontables alegrías que traen a mi vida, las experiencias y vivencias que a lo largo de mi carrera me han obsequiado.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	III
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XVII
OBJETIVOS	XXI
INTRODUCCIÓN	XXIII
1. ACERO INOXIDABLE	1
1.1. Concepto del acero inoxidable	1
1.2. Clasificación de los aceros inoxidables	2
1.2.1. Aceros inoxidables austeníticos	3
1.2.2. Aceros inoxidables martensíticos	6
1.2.3. Aceros inoxidables ferríticos	7
1.3. Factores de selección de los aceros inoxidables	8
2. SOLDADURA AL ARCO DE LOS ACEROS INOXIDABLES	11
2.1. Concepto de soldadura	11
2.2. Concepto de soldadura al arco	11
2.3. Soldadura eléctrica de los aceros inoxidables	12
2.3.1. Soldadura de aceros inoxidables austeníticos	15
2.3.2. Soldadura de aceros inoxidables martensíticos	19
2.3.3. Soldadura de aceros inoxidables ferríticos	21
2.4. Metales de aportación para aceros inoxidables	23
2.5. Selección de los metales de aportación	27
2.6. Defectos en la soldadura	27

3.	MÁQUINAS DE ENSAYO	37
3.1.	Máquina universal de ensayo de tensión y compresión	37
3.1.1.	Propiedades de una máquina universal	37
3.1.2.	Características de una máquina universal	41
3.1.3.	Tipos de ensayo	42
3.2.	Máquina de prueba de impacto	43
3.2.1.	Propiedades de una máquina de prueba de impacto	46
3.2.2.	Característica de una máquina de prueba de impacto	46
3.2.3.	Tipos de ensayo	49
4.	ENSAYOS DE LA SOLDADURA DE ACERO INOXIDABLE	53
4.1.	Ensayo 1. Tensión	53
4.1.1.	Fabricación de placas del ensayo de tensión	57
4.1.2.	Pulido de placas del ensayo de tensión	59
4.1.3.	Análisis del ensayo de tensión	60
4.1.4.	Análisis metalográfico del ensayo de tensión	64
4.2.	Ensayo 2. Doblado	73
4.2.1.	Fabricación de placas del ensayo de doblado	74
4.2.2.	Pulido de placas del ensayo de doblado	75
4.2.3.	Análisis del ensayo de doblado	76
4.2.4.	Análisis metalográfico del ensayo de doblado	79
	CONCLUSIONES	85
	RECOMENDACIONES	87
	BIBLIOGRAFÍA	89
	APÉNDICE	91

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Estructura cristalina aceros inoxidables austeníticos	4
2.	Estructura cristalina aceros inoxidables martensíticos	7
3.	Estructura cristalina aceros inoxidables ferríticos	8
4.	Soldadura de un acero inoxidable	12
5.	Biselado para soldaduras	14
6.	Porosidad en soldaduras	29
7.	Inclusiones de escoria en soldadura	30
8.	Falta de fusión en soldadura	31
9.	Falta de penetración en soldadura	32
10.	Socavado en soldadura	33
11.	Agrietamiento en soldadura	34
12.	Soplo magnético en soldadura	35
13.	Máquina universal	37
14.	Inversor de una máquina universal de ensayos	39
15.	Esquema hidráulico general de la máquina universal WPM ZD 40	39
16.	Funcionamiento del dinamómetro	41
17.	Máquina de prueba de impacto	44
18.	Sistema de péndulo	45
19.	Ensayo de Charpy	50
20.	Ensayo de Izod	51
21.	Máquinas para ensayos Charpy e Izod	51
22.	Curva Esfuerzo-Deformación para materiales	57
23.	Ángulo de biselado unión a tope en V doble	58

24.	Ensayo de tensión probeta sin soldadura, laboratorio CII	61
25.	Probetas al finalizar el ensayo de tensión	62
26.	Falla de probeta sin soldadura	63
27.	Falla de probeta soldada	63
28.	Probetas de ensayo de tensión pulidas con lija 1000	67
29.	Probetas de ensayo de tensión pulidas con lija 2000	67
30.	Diseño volumétrico de probeta con soldadura	67
31.	Diseño volumétrico de probeta sin soldadura	68
32.	Operación de pulido de probetas	68
33.	Micrografía No. 1A. Probeta acero inoxidable AISI 304. Ensayo de tensión, muestra con soldadura. 5% de HCL con 95% desnaturalizado	70
34.	Micrografía No. 1B. Probeta acero inoxidable AISI 304. Ensayo de tensión, muestra sin soldadura. 5% de HCL con 95% alcohol desnaturalizado	70
35.	Micrografía No. 2A. Probeta acero inoxidable AISI 304. Ensayo de tensión, muestra con soldadura. 10% de HCL con 90% alcohol desnaturalizado	71
36.	Micrografía No. 2B. Probeta acero inoxidable AISI 304. Ensayo de tensión, muestra sin soldadura. 10% de HCL con 90% alcohol desnaturalizado	71
37.	Micrografía No. 3A. Probeta acero inoxidable AISI 304. Ensayo de tensión, muestra con soldadura. 15% de HCL con 85% alcohol desnaturalizado	72
38.	Micrografía No. 3B. Probeta acero inoxidable AISI 304. Ensayo de tensión, muestra sin soldadura. 15% de HCL con 85% Alcohol desnaturalizado	72
39.	Partes del microscopio	73
40.	Angulo de biselado unión a tope en V doble	74

41.	Probeta de ensayo de doblado pulida con lija 1000	75
42.	Probeta de ensayo de doblado pulida con lija 2000	76
43.	Probeta para ensayo de doblado	77
44.	Ensayo de doblado, laboratorio CII	77
45.	Diseño volumétrico de probeta para ensayo de doblado	80
46.	Micrografía No. 4A. Probeta acero inoxidable AISI 304. Ensayo de doblado. 5% de HCL con 95% alcohol desnaturalizado	82
47.	Micrografía No. 4B. Probeta acero inoxidable AISI 304. Ensayo de doblado. 10% de HCL con 90% alcohol desnaturalizado	83
48.	Micrografía No. 4C. Probeta acero inoxidable AISI 304. Ensayo de doblado. 15% de HCL con 85% alcohol desnaturalizado	83

## TABLAS

I.	Influencia de las propiedades físicas en la soldadura de aceros inoxidables austeníticos, comparados con el acero al carbono	5
II.	Composición química (%) de los aceros inoxidables austeníticos y aleaciones de níquel	9
III.	Propiedades y utilidades de los aceros austeníticos	24
IV.	Propiedades y utilidades de los aceros martensíticos	25
V.	Propiedades y utilidades de los aceros ferríticos	26
VI.	Medidas de probeta soldada	58
VII.	Medidas de probeta material base	59
VIII.	Resultados ensayo de tensión	61
IX.	Medidas de probeta de ensayo de doblado	75
X.	Resultados ensayo de doblado	76



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>HCl</b>	Ácido clorhídrico
<b>Cr-Ni</b>	Aleación entre cromo y níquel
<b>C</b>	Carbono
<b>cm</b>	Centímetro
<b>cm<sup>2</sup></b>	Centímetro cuadrado
<b>CII</b>	Centro de Investigaciones de Ingeniería
<b>Cu</b>	Cobre
<b>AC</b>	Corriente alterna
<b>DC</b>	Corriente directa
<b>Cr</b>	Cromo
<b>Fig.</b>	Figura
<b>°</b>	Grados
<b>AISI</b>	Instituto Americano del Hierro y el Acero
<b>Kg</b>	Kilogramo
<b>Kgf</b>	Kilogramo fuerza
<b>Kg/mm<sup>2</sup></b>	Kilogramo por milímetro cuadrado
<b>Lb</b>	Libra
<b>Mn</b>	Manganeso
<b>MPa</b>	Mega pascal
<b>m</b>	Metro
<b>ml</b>	Mililitros
<b>mm</b>	Milímetros
<b>Mo</b>	Molibdeno

<b>Ni</b>	Níquel
<b>N</b>	Nitrógeno
<b>%</b>	Porcentaje
<b>Se</b>	Selenio
<b>Si</b>	Silicio
<b>ASTM</b>	Sociedad Americana de Ensayos y Materiales
<b>AWS</b>	Sociedad Americana de Soldadura
<b>°C</b>	Temperatura en grados Centígrados
<b>°F</b>	Temperatura en grados Fahrenheit

## **GLOSARIO**

### **ACERO ESTABILIZADO**

Las zonas térmicamente afectadas por operaciones de soldado son particularmente sensibles a la corrosión, ya que durante el ciclo térmico de soldado parte del material es mantenido en la franja crítica de temperaturas. La consideración de este fenómeno llevó al desarrollo de los inoxidables austeníticos extra bajo en carbono, en los cuales el tenor de carbono es controlado en un máximo de 0,03%, quedando así extremadamente reducido la posibilidad de sensibilización. La utilización de estabilizadores tiene también la finalidad de evitar el problema de la sensibilización. El titanio, adicionado como elemento de aleación, inhibe la formación de carburo de cromo debido al hecho de tener una afinidad mayor por el carbono que aquella que tiene el cromo. Así, se precipita carburo de titanio y el cromo permanece en solución sólida. Con la misma finalidad puede ser utilizado el niobio. Tanto el titanio como el niobio son estabilizadores del carbono y los aceros inoxidables así obtenidos, son conocidos como aceros inoxidables estabilizados. Se utilizan para aplicaciones en

equipos que operan entre 400 y 900 °C, los aceros inoxidable estabilizados son los más recomendados, ya que conservan mejores propiedades mecánicas en esas temperaturas que los aceros de extra bajo carbono.

### **ACERO SENSIBILIZADO**

Son aceros calentados o enfriados lentamente dentro del rango de temperaturas de 500 a 800 °C (rango de sensibilizado). En ese intervalo de temperaturas los carburos de cromo pueden precipitar en los límites de grano con lo que se llega a la condición de acero sensibilizado.

### **ACICULAR**

Es el término empleado en botánica para designar a las hojas largas, delgadas y puntiagudas a modo de aguja.

### **AISI**

Es una clasificación de aceros y aleaciones de materiales no ferrosos. Es la más común en los Estados Unidos. AISI es el acrónimo en inglés de *American Iron and Steel Institute* (Instituto americano del hierro y el acero). En este sistema los aceros se clasifican con cuatro dígitos. El primero especifica la aleación principal, el segundo indica el porcentaje aproximado del elemento principal y con los dos últimos dígitos se conoce la cantidad de carbono presente en la aleación.

**ALEACIÓN**

Es una mezcla sólida homogénea de dos o más metales, o de uno o más metales con algunos elementos no metálicos.

**ASTM**

Desde su establecimiento en 1898, ASTM es una de las organizaciones de desarrollo de normas internacionales más grande del mundo. En ASTM se reúnen productores, usuarios, consumidores, entre otros, para crear normas consensuales voluntarias. Las normas de *ASTM International* se usan en investigaciones y proyectos de desarrollo, sistemas de calidad, comprobación y aceptación de productos y transacciones comerciales alrededor del mundo. Son los componentes integrales de las estrategias comerciales competitivas de hoy en día.

**AWS**

*American Welding Society*, es una organización sin fines de lucro dedicada a promover la ciencia, la tecnología y la aplicación de la soldadura y sus aliados de unión y procesos de corte, incluyendo soldadura fuerte, soldadura y fumigación térmica.

**CONDUCTIVIDAD**

Capacidad de un medio o espacio físico de conducir la electricidad.

**CORROSIÓN**

Se define como el deterioro de un material a consecuencia de un ataque electroquímico por su entorno. De manera más general, puede entenderse como la tendencia general que tienen los materiales a buscar su forma más estable o de menor energía interna.

**DINAMÓMETRO**

Es un instrumento utilizado para medir fuerzas. Fue inventado por Isaac Newton y no debe confundirse con la balanza (instrumento utilizado para medir masas), aunque sí puede compararse a la báscula.

**DUCTILIDAD**

Es una propiedad que presentan algunos materiales, como las aleaciones metálicas o materiales asfálticos, los cuales bajo la acción de una fuerza, pueden deformarse sosteniblemente sin romperse permitiendo obtener alambres o hilos de dicho material.

**ELASTICIDAD**

Es la propiedad que tienen algunos cuerpos de volver a su posición inicial tras su tracción.

**ESTRUCTURA BCC**

Es una estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo, en esta celda unidad las esferas sólidas representan los centros donde los átomos están localizados e indican sus posiciones relativas. En esta celda unidad el átomo central está rodeado de 8 vecinos más

cercanos. Cada una de estas celdas unidad tiene el equivalente de 2 átomos por celda unidad. Un átomo completo está localizado en el centro de la unidad, y un octavo de esfera está localizado en cada vértice de la celda unidad, haciendo el equivalente de otro átomo.

### **ESTRUCTURA FCC**

Es una estructura cristalina cúbica centrada en las caras, en esta celda hay un punto reticular en cada vértice del cubo y otro en el centro de cada cara del cubo. El modelo de esferas sólidas indica que los átomos de esta estructura están unidos del modo más compacto posible. El APF de esta estructura de empaquetamiento compacto es 0.74. Esta celda tiene el equivalente a 4 átomos por celda unidad.

### **ESTRUCTURA HCP**

Es una estructura cristalina hexagonal compacta. Los metales no cristalizan en la estructura hexagonal sencilla porque el APF es demasiado bajo, el APF es 0.74 ya que los átomos están empaquetados de un modo en que se encuentren lo más cercano posible. Cada átomo está rodeado de otros 12 átomos y por tanto su número de coordinación es 12.

<b>FERROMAGNÉTICOS</b>	Fenómeno físico en el que se produce ordenamiento magnético de todos los momentos magnéticos de una muestra, en la misma dirección y sentido.
<b>GONIÓMETRO</b>	Es un instrumento de medición con forma de semicírculo o círculo graduado en 180° o 360°, utilizado para medir o construir ángulos.
<b>INSUFLAN</b>	Introducir a soplos un gas, un líquido ó una sustancia pulverizada en un órgano ó una cavidad.
<b>METALES FERROSOS</b>	Metal que contiene hierro. El acero es el metal ferroso más popular en la industria.
<b>METALES NO FERROSOS</b>	Metales que no contienen hierro. El aluminio y el cobre son metales no ferrosos bastante comunes.
<b>MORDAZAS</b>	Mecanismo usado en máquinas herramientas para la sujeción de piezas.
<b>OXIDACIÓN</b>	Es el proceso mediante el cual átomos traspasan electrones a otro átomo o molécula.
<b>PELÍCULA PASIVADORA</b>	Indica la regeneración de una capa protectora de oxidación en un acero inoxidable.

**PÉNDULO**

Es un sistema físico que puede oscilar bajo la acción gravitatoria u otra característica física y que está configurado por una masa suspendida de un punto o de un eje horizontal fijo mediante un hilo, una varilla, u otro dispositivo.

**PERMEABILIDAD**

Es la capacidad de un material para que un fluido lo atraviese sin alterar su estructura interna. Se afirma que un material es permeable si deja pasar a través de él una cantidad apreciable de fluido en un tiempo dado, e impermeable si la cantidad de fluido es despreciable.

**PRECIPITACIÓN**

Reacción química en la cual se produce un sólido a partir de líquidos.

**RECOCIDO**

Es el tratamiento térmico que, en general, tiene como finalidad una temperatura que permita obtener plenamente la fase estable a falta de un enfriamiento lo suficientemente lento como para que se desarrollen todas las reacciones completas.

**REVENIDO**

Es un tratamiento térmico que sigue al de templado del acero. Tiene como fin reducir las tensiones internas de la pieza originadas por el temple o por deformación en frío. Mejora las

características mecánicas reduciendo la fragilidad, disminuyendo ligeramente la dureza, esto será tanto más acusado cuanto más elevada sea la temperatura de revenido.

## **REVESTIMIENTO**

Colocación de una capa de cualquier material para proteger una superficie.

## **TEMPLADO**

Es un tratamiento térmico al que se somete al acero, concretamente a piezas o masas metálicas ya conformadas en el mecanizado, para aumentar su dureza, resistencia a esfuerzos y tenacidad. El proceso se lleva a cabo calentando el acero a una temperatura aproximada de 915°C en el cual la perlita se convierte en austenita, después la masa metálica es enfriada por lo general rápidamente, sumergiéndola o rociándola en agua, en aceite, aire positivo o en otros fluidos o sales.

## **TRACCIÓN**

En ingeniería se denomina tracción al esfuerzo a que está sometido un cuerpo por la aplicación de dos fuerzas que actúan en sentido opuesto, y tienden a estirarlo.

## RESUMEN

Este trabajo de graduación consiste en analizar los diferentes aspectos de la soldadura de una pieza de acero inoxidable, para la cual se tomó como material base un acero AISI 304 y como material de aporte un electrodo E-308.

Este acero austenítico seleccionado tiene una buena resistencia a la corrosión en atmósferas industriales y marinas. Resiste casi todos los agentes de corrosión utilizados en la industria. Se suelda fácilmente, ya que su soldadura se puede alinear con materiales no ferrosos aleados al acero inoxidable austenítico ya sea con un porcentaje de cromo y níquel.

Para realizar un análisis sobre las propiedades mecánicas de dicho acero, se realizaron ensayos destructivos y análisis metalográficos. Con los ensayos destructivos se trabajó de la siguiente manera; se fabricó una probeta con las especificaciones definidas por la norma ASTM E8 Y A370, sobre ensayos de materiales.

Realizando una comparación entre una probeta realizada únicamente con material base y una probeta soldada en el centro de gravedad con un material de aporte E308, determinado mediante el proceso de selección basado en la tabla de metales de aportación para aceros inoxidables detallada en el capítulo 2. Esto se realizó para determinar la falla; que es prácticamente el daño de una pieza que no le permite continuar en servicio, causando la sustitución prematura de los componentes; refiriéndose a prematuro por la sustitución de la pieza antes de haber alcanzado su vida útil especificada en el diseño. La falla de los

materiales puede producirse por defectos de fabricación, errores de operación o inadecuada selección de materiales.

Determinando así las cargas máximas, esfuerzos máximos y elongaciones entre las 2 probetas, dando lo siguiente;

- Probeta con soldadura. Carga Máxima 30 000 Kg. Esfuerzo Máximo 601.63 Mpa. Elongación 5%
- Probeta sin soldadura. Carga Máxima 35 000 Kg. Esfuerzo Máximo 685.10 Mpa. Elongación 32%

Teniendo como resultados mejores propiedades mecánicas en una pieza metálica sin proceso de soldadura, dando así una resistencia mecánica a la falla de 84 Mpa mayor de la probeta sin soldadura comparada con la soldada.

Tomando en cuenta que las propiedades mecánicas dieron como resultado datos con diferencias aceptables entre una y otra probeta, ya que esto tiene lugar a basarse en lo que es el biselado o corte en bisel de la pieza a soldar para obtener igualdad de características entre las 2 piezas, generalmente éste es un proceso preparatorio para posteriores soldaduras. En la industria se encuentran dos tipos de trabajo bien definidos, uno de ellos es el biselado en línea recta y el segundo, un poco más complejo, es el biselado de contornos interiores o exteriores con cualquier forma.

Al definir su estructura cristalina mediante un microscopio metalográfico se pudo observar una estructura cristalina austenita y debido a eso su estructura es cúbica centrada en las caras FCC. Esta fase permite un proceso de difusión con el carbono mucho más rápido, tiene una solubilidad máxima de carbono del 2.11% a 1 148 °C; tomando en cuenta los cambios que sufrió el acero AISI 304,

mediante la temperatura de soldadura a la cual fue sometido durante el tiempo de soldado.

Al realizar el ataque químico, lo que se deseaba era deteriorar el material para buscar la tendencia general que tienen los materiales a buscar su forma más estable ó de menor energía interna.

Hay una enormidad de ataques químicos, para diferentes tipos de metales y situaciones, en este caso el utilizado fue el acero inoxidable AISI 304, el cual fue atacado para revelar su estructura, con un químico llamado ácido clorhídrico el cual tuvo que ser muestreado para determinar la cantidad óptima a utilizar debido a que existían posibilidades de quemar la capa de la probeta al utilizar un porcentaje de 40% mezclado con alcohol desnaturalizado al 99%, ó de revelar una micrografía vaga en su información al utilizar un porcentaje de ácido clorhídrico bajo como lo era un 5%. Se concluye a todo ello con una mezcla que llevará lo siguiente:

- Ácido Clorhídrico – 15%
- Alcohol desnaturalizado (99%) – 85%

Mostrando así la estructura cristalina del acero inoxidable AISI 304 después de realizar ensayos destructivos en la probeta, como lo es el de tensión y doblado.

El principal instrumento utilizado en este trabajo de graduación para la realización de un examen metalográfico lo constituye el microscopio metalográfico, con el cual es posible examinar una muestra con aumentos que varían entre 50x a 1000x. El microscopio metalográfico, debido a la opacidad de los metales y aleaciones, opera con la luz reflejada por el metal. Por lo que para

poder observar la muestra es necesario preparar una probeta y pulir a espejo la superficie.

# OBJETIVOS

## General

Analizar la soldadura de acero inoxidable mediante ensayos destructivos y análisis metalográficos que indiquen sus propiedades mecánicas y características para la utilización en los mercados industriales.

## Específicos

1. Determinar las diferencias entre las propiedades mecánicas al realizar el ensayo destructivo a probetas con y sin soldadura de acero inoxidable.
2. Analizar los cambios metalográficos que sufre un acero inoxidable debido a las altas temperaturas utilizadas en el proceso de soldadura.
3. Demostrar experimentalmente las diferencias entre las propiedades mecánicas de una barra de acero inoxidable 304 soldada en su centro de gravedad con una barra de acero inoxidable como material base.
4. Estudiar la estructura cristalina de un acero inoxidable mediante la utilización de los análisis metalográficos en base al ataque químico requerido por el material utilizado.



## INTRODUCCIÓN

La soldadura es un proceso conocido por todo el campo industrial, como lo es para los profesionales, técnicos y analistas, éste consiste en la unión de dos materiales logrado a través de la fusión, en la cual las piezas son soldadas fundiendo ambas y agregando un material de relleno fundido. Para todo esto se utilizan varias fuentes de energía para formar la unión como lo pueden ser gases, arcos eléctricos, láseres y proceso de fricción.

La mayoría de personas que laboran en la industria están familiarizadas con lo que es un proceso técnico de soldadura, pero pocas son las que tiene el conocimiento de lo que ocurre internamente en su realización. A todo esto existen varios cambios metalográficos como lo puede ser la variación de los tamaños del grano al aumentar la temperatura de las piezas en el proceso de fusión, así como también las zonas adyacentes que se encuentran en ellas.

En este caso se profundizará en la soldadura de un acero que año tras año crece su demanda debido a las propiedades y características que contiene, este es el acero inoxidable, se define como una aleación de acero con un porcentaje de contenido cromo ayudando a alargar el proceso de corrosión o evitándolo de mejor manera.

La soldadura de acero inoxidable y de aceros en general debe llenar requisitos debido a ciertas normativas que se exigen como lo son de calidad, de seguridad y de confiabilidad. Para todo ello día a día la tecnología moderna ha desarrollado sistemas operativos que permiten el análisis de estos procesos mediante ensayos destructivos, los cuales permiten al soldador determinar las

magnitudes a las que podrán estar sometidas las uniones tomando en cuenta si serán cargas estáticas o dinámicas.

A todo esto, el beneficio primordial que se desea ofrecer a la industria es el determinar la forma correcta de soldar un acero inoxidable mediante un análisis metalográfico que nos permita observar la magnitud de la carga máxima a la que puede ser expuesta la soldadura, tomando en cuenta todas las direcciones de las fuerzas que intervendrán en la pieza.

# 1. ACERO INOXIDABLE

## 1.1. Concepto del acero inoxidable

Se denominan así a aquellos aceros que por sus elementos aleantes se vuelven más resistentes a la oxidación, contienen un mínimo de 11% de cromo, para obtener una resistencia a la corrosión semejante a la del cromo puro. Un acero inoxidable con un 11% de cromo no será corroído o no se oxidará cuando esté en condiciones atmosféricas normales. Para obtenerse mayor resistencia a la corrosión se agrega más cromo a la aleación, pudiéndose producir aceros inoxidables con tenores del 15%, 17%, 20% y hasta 27% de cromo.

El cromo forma en la superficie del acero una película pasivadora, extremadamente delgada, continua y estable. Esta superficie deja la superficie inerte a las reacciones químicas. Sin embargo esta capa puede ser afectada por algunos ácidos, dando lugar a que el hierro sea atacado y oxidado por mecanismos intergranulares o picaduras generalizadas. (6)

Tienen una resistencia a la corrosión natural que se forma automáticamente, pero no muy alta. Debido a ello, en el comportamiento de estos es muy importante aplicar el tratamiento térmico respectivo. Si un acero inoxidable no ha recibido el tratamiento que corresponde, su resistencia a la corrosión puede quedar muy disminuida. En general conviene obtener estructuras ferríticas, martensíticas o austeníticas y evitar la formación de carburos de cromo, que en estos aceros, elimina la resistencia a la corrosión.

También tienen una gran resistencia mecánica, de al menos dos veces la del acero al carbono, son resistentes a temperaturas elevadas y a criogénicas. Es un material sólido y no un revestimiento especial aplicado al acero común para darle características inoxidable. Aceros comunes, e incluso otros metales, son a menudo cubiertos con metales blancos como el cromo, níquel o zinc para proteger sus superficies o darles otras características superficiales. Mientras que estos baños tienen sus propias ventajas y son muy utilizados, el peligro radica en que la capa puede ser dañada o deteriorarse de algún modo, lo que anularía su efecto protector.

La apariencia del acero inoxidable variará y dependerá en la manera que esté fabricado y en su acabado superficial. (9)

Algunos tipos de aceros inoxidables contienen además otros aleantes; manganeso, silicio, carbono, azufre, cobre, aluminio, titanio, nitrógeno, vanadio, selenio, plumbanio, pero los principales son el níquel y el molibdeno. (6)

## **1.2. Clasificación de los aceros inoxidables**

Existen 5 tipos de aceros inoxidables a conocer en la industria, y estos son los siguientes:

- Aceros inoxidables austeníticos
- Aceros inoxidables martensíticos
- Aceros inoxidables ferríticos
- Aceros inoxidables endurecidos por precipitación
- Aceros inoxidables dúplex

Siendo los 3 primeros los de mayor interés, se realizará una descripción de los mismos. (6)

### **1.2.1. Aceros inoxidables austeníticos**

Son los más utilizados por su amplia variedad de propiedades, se obtienen agregando níquel a la aleación, por lo que la estructura cristalina del material se transforma en austenita, debido a esto es una estructura cristalina cúbica centrada en las caras FCC y de aquí adquieren el nombre. Esta estructura metalográfica se encuentra en estado recocido, debido a esto no son magnéticos y no son atraídos por un imán.

El contenido de cromo varía de 16 a 28%, el de níquel de 3.5 a 22% y el de molibdeno de 1.5 a 6%. Este último elemento es aleado para mejorar su resistencia a la corrosión por cloruros, la presencia del molibdeno permite la formación de una capa pasiva más resistente. Los tipos más comunes de aceros inoxidables austeníticos son el AISI 304, 304L, 316, 316L, 310, 317 y 317L.

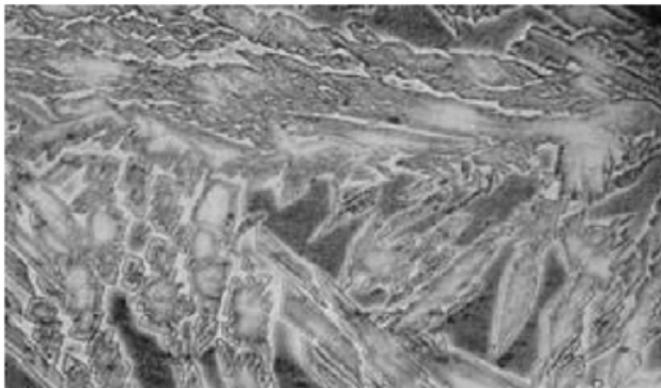
Cuando están sometidos por algún tiempo a las temperaturas entre 450 y 850°C, los aceros inoxidables austeníticos están sujetos a la precipitación de carburos de cromo en sus contornos de grano, lo que los torna sensibilizados. Debido a ello se consideró seriamente este fenómeno y se desarrollaron los aceros con extra bajo carbono, 304L, 316L y 317L, en los cuales la cantidad de carbono es controlado en un máximo de 0.03%, quedando así extremadamente reducida la posibilidad de sensibilización. (15)

Estos aceros son dúctiles y pueden soldarse fácilmente obteniéndose soldaduras tenaces y seguras. Tienen una resistencia a la tracción

aproximadamente de 65 Kg/mm<sup>2</sup>, y un límite de fluencia aproximadamente de 25 Kg/mm<sup>2</sup>.

Los aceros inoxidable austeníticos se pueden endurecer por deformación, pasando su estructura metalográfica a contener martensita. Y en este caso se convierten parcialmente en magnéticos, lo que en algunos casos dificulta el trabajo en los artefactos eléctricos. (6)

**Figura 1. Estructura cristalina aceros inoxidable austeníticos**



Fuente: [http://www.scielo.org.ve/scielo.php?pid=S0798-40652006000200007&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.ve/scielo.php?pid=S0798-40652006000200007&script=sci_arttext)

Estos aceros inoxidable tienen un coeficiente de conductividad térmica menor, lo cual causa que el calor se concentre en una zona pequeña adyacente a la soldadura. Los aceros inoxidable austeníticos también tienen coeficientes de expansión térmica aproximadamente 50% más grandes que los aceros al carbono, lo cual requiere más atención en el control de la distorsión y deformación. (11)

**Tabla I. Influencia de las propiedades físicas en la soldadura de aceros inoxidables austeníticos, comparados con el acero al carbono**

	Aceros inoxidables austeníticos	Aceros al carbono	Observaciones
Punto de fusión (Tipo 304)	1400 - 1450 °C	1540 °C	El Tipo 304 requiere menos calor para producir la fusión, lo cual significa una soldadura más rápida para el mismo calor, o menos calor para la misma velocidad
Respuesta magnética	No magnético a todas las temperaturas <sup>(1)</sup>	Magnético hasta más de 705 °C	Los aceros inoxidables al níquel no están sujetos a la soldadura de arco
Velocidad de conductividad térmica A 100 °C A 650 °C	28% 66%	100 % 100%	El Tipo 304 conduce el calor mucho más lentamente que los aceros al carbono, lo cual produce gradientes de temperatura más pronunciados. Esto acelera la deformación. Una difusión más lenta del calor a través del metal de base significa que la zona soldada permanece caliente por más tiempo, resultado de lo cual puede ser una mayor precipitación de carburos, a menos que se usen medios artificiales para extraer el calor, tales como barras enfriadoras, etc
Resistencia Eléctrica (aleado) (microhm.cm, aprox.) a 20 °C a 885 °C	72.0 126.0	12.5 125	Esto es importante en los métodos de fusión eléctrica. La resistencia eléctrica más grande del tipo 304 resulta en la generación de más calor para la misma corriente, o la misma cantidad de calor con menos corriente, comparado con los aceros al carbono. Esta propiedad, junto con una menor velocidad de conductividad térmica, resulta en la efectividad de los métodos para soldadura por resistencia del Tipo 304
Expansión térmica en el rango indicado pulg./pulg./°C x 10 <sup>-5</sup>	17.6 (20 - 500 °C)	11.7 (20 - 628 °C)	El tipo 304 se expande y contrae a una velocidad más alta que el acero al carbono, lo cual significa que se debe permitir expansión y contracción a fin de controlar la deformación y el desarrollo de tensiones térmicas después del enfriamiento. Por ejemplo, para el acero inoxidable deben usarse más puntos de soldadura que para el acero al carbono

Fuente: <http://www.cientificosaficionados.com/libros/solinox1.pdf>

Las propiedades físicas de los aceros al carbono y los inoxidables austeníticos son bastante diferentes, y esto requiere una revisión de los procesos de soldadura. En la tabla I, se incluyen algunas características como el punto de fusión, expansión térmica, conductividad térmica y otros que no cambian significativamente con el tratamiento térmico o mecánico. Como se ilustra en esta figura, el punto de fusión de los grados austeníticos es menor, así que se requiere menos calor para lograr la fusión. Su resistencia eléctrica es mayor que la de los aceros comunes, así que se requiere menos corriente eléctrica para la soldadura.

### **1.2.2. Aceros inoxidables martensíticos**

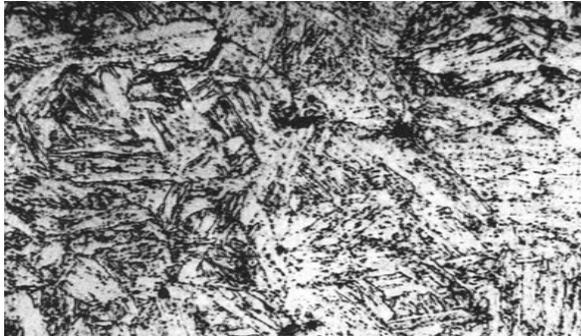
Son aleaciones de hierro, cromo y carbono, con contenidos típicos de carbono mínimo de 0.08% hasta un máximo de 1.2%, cromo del 12 al 14% y níquel de 2.5%.

Estos aceros sufren modificaciones estructurales con la temperatura, por lo que suelen someterse a tratamientos térmicos de temple y revenido. Tras estos procesos, se alcanzan buenas propiedades mecánicas y tienen suficiente resistencia a la corrosión. Según la cantidad de carbono y cromo en la aleación se pueden obtener mediante el calentamiento a temperaturas superiores a la de austenización estructuras completas austeníticas, o estructuras austeníticas más carburos. (12)

En cuanto a características físicas principales de estos aceros se observa que, en general, el peso específico se distingue poco del de los aceros comunes al carbono junto con el módulo de elasticidad, por otra parte la conductividad térmica resulta inferior. La permeabilidad magnética los clasifica entre los materiales ferromagnéticos.

La martensita es una fase rica en carbono, frágil y extraordinariamente dura, y es una estructura de cubo de cuerpo centrado distorsionado que se produce por enfriamiento brusco del acero inoxidable. Estos tipos de aceros tienen la característica común de ser magnéticos, presentando cuando están templados, una microestructura acicular. Están dentro de la serie 400 junto con los aceros ferríticos. Los tipos más comunes son el AISI 410, 420 y 431. (12)

**Figura 2. Estructura cristalina aceros inoxidables martensíticos**



Fuente: [analizandofallas.blogspot.com/2007/06/acero-inoxidable-austentico-magnitico.html](http://analizandofallas.blogspot.com/2007/06/acero-inoxidable-austentico-magnitico.html)

### **1.2.3. Aceros inoxidables ferríticos**

Son las aleaciones que contienen cromo de 11 a 23%, con bajo contenido de carbono de hasta 0.2% máximo. Presentan buena resistencia a la corrosión y resistencia mecánica, se endurecen por trabajo en frío y son magnéticos. Son soldables, pero ciertas zonas de la soldadura quedan cristalizadas con grano grande pudiéndose modificar escasamente con un tratamiento térmico adecuado.

Se llaman ferríticos porque tienen una estructura metalográfica formada básicamente por ferrita, es una estructura del acero a temperatura ambiente de cubo de cuerpo centrado BCC. Aunque presentan buena resistencia a la corrosión, algunas características limitan la utilización de estos en determinadas aplicaciones.

A pesar de tener una menor cantidad de carbono que los martensíticos, se tornan parcialmente austeníticos a altas temperaturas y consecuentemente precipitan martensita durante el enfriamiento. Puede decirse que son parcialmente endurecibles por tratamiento térmico. Como grupo son más

resistentes a la corrosión que los aceros martensíticos, pero menos resistentes a la corrosión que los aceros austeníticos. (13)

**Figura 3. Estructura cristalina aceros inoxidable ferríticos**



Fuente:

[www.ribafarre.com/castellano/listado\\_productos\\_impar.asp?familia=Acero%20Inox%20Fe%20Ni%20Cr%20Mb](http://www.ribafarre.com/castellano/listado_productos_impar.asp?familia=Acero%20Inox%20Fe%20Ni%20Cr%20Mb)

### **1.3. Factores de selección de los aceros inoxidables**

La selección de un acero inoxidable adecuado depende de las características de trabajo a que va a estar sometida la pieza. Por esta razón es muy importante tener en cuenta los siguientes factores y partir de ellos para escoger el más apto a las necesidades:

- Resistencia a la corrosión
- Resistencia a la oxidación y sulfidización
- Esfuerzo y ductilidad a temperatura ambiente y de servicio
- Ser apropiado para determinadas técnicas de fabricación
- Ser apropiado para determinados procedimientos de limpieza
- Estabilidad de sus propiedades en servicio
- Resistencia a la abrasión y erosión
- Resistencia a la raspadura y adhesión

- Acabado superficial y/o reflectividad
- Agudeza (retención del corte de borde)
- Propiedades magnéticas
- Conductividad térmica
- Resistividad eléctrica
- Estabilidad dimensional
- Rigidez
- Tenacidad

Para facilitar de mejor manera la utilización de los aceros inoxidable y su relación con el mercado industrial, se puede visualizar el porcentaje del material que sirve como aleación con el acero inoxidable, ya sea formando una estructura austenítica, ferrítica o martensítica. Esto para adquirir el material que se adecue mejor a nuestros objetivos, determinando porcentajes de composición química obtenidos en la tabla II y así alinear los requerimientos al mejor análisis posible. (6)

**Tabla II. Composición química (%) de los aceros inoxidable austeníticos y aleaciones de níquel**

GRADO	304	304L	316	316L	317	317L	321	400	825	625	C-276	DUPLEX 2205
Designación UNS	S30400	S30403	S31600	S31603	S31700	S31703	S32100	N04400	N08825	N06625	N10276	S31803
CARBONO (C) max.	0.08	0.035*	0.08	0.035*	0.08	0.035*	0.08	0.30	0.05	0.10	0.02	0.03
MANGANESO (Mn) max.	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	1.00	0.50	1.00	2.00
FOSFORO (P) max.	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	----	----	0.015	0.04	0.03
AZUFRE (S) max.	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.024	0.03	0.015	0.03	0.02
SILICIO (Si) max.	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.50	0.50	0.50	0.08	1.00
CROMO (Cr) max.	18.0 a 20.0	18.0 a 20.0	16.0 a 18.0	16.0 a 18.0	18.0 a 20.0	18.0 a 20.0	17.0 a 20.0	----	19.5 a 23.5	20.0 a 23.0	14.5 a 16.5	21.0 a 23.0
NIQUEL (Ni)	8.0 a 11.0	8.0 a 13.0	10.0 a 14.0	10.0 a 15.0	11.0 a 14.0	11.0 a 15.0	9.0 a 13.0	63.0 a 70.0	38.0 a 46.0	Balance	Balance	4.5 a 6.5
MOLIBDENO (Mo)	----	----	2.0 a 3.0	2.0 a 3.0	3.0 a 4.0	3.0 a 4.0	----	----	2.5 a 3.5	8.0 a 10.0	15.0 a 17.0	2.5 a 3.5
OTROS ELEMENTOS	----	----	----	----	----	----	Ti = 5xC min. y 0.70 max.	Cu=Bal. Fe = 2,50 max.	Fe=Bal. Cu = 1,5 a 3,0 Al = 0,2 max. Ti = 0,6 a 1,2	Fe = 5,0 max. Al = 0,40 max. Ti = 0,40 max. Cb+Ta = 3,15 a 4,15 Co = 1,0 max.	Co = 2,50 max. W = 3,00 a 4,50 Fe = 4,00 a 7,00 V = 0,35 max.	N = 0,08 a 0,20

Fuente: [http://es.wikipedia.org/wiki/Acero\\_inoxidable](http://es.wikipedia.org/wiki/Acero_inoxidable)

El acero inoxidable puede adquirir un aspecto brillante y nuevo aún cuando parte de la chatarra. El acero se recicla, utilizando todo el material desechado como pieza mecánica para la industria, brindándole una nueva vida. Se introducen toneladas de chatarra de acero en una caldera junto con aleaciones de cromo y níquel, para añadirle robustez y protección contra el óxido. Unos enormes electrodos calientan la mezcla hasta el punto de fundición.

Después de varias horas, la mezcla fundida pasa a una caldera de refinado y unas tuberías insuflan argón y oxígeno en su interior, esto convierte algunas impurezas en gas y hace que otras floten en la superficie, así pueden retirarse. Luego se añade más chatarra para espesar la mezcla, mientras se funde, ésta produce una reacción química que ayuda a activar el refinado.

El acero líquido hirviendo sale de la caldera, y unos rodillos lo guían, mientras se convierten en una larga moldura. El resultado es un listón de acero, de aproximadamente 70 metros. Unos sopletes lo dividen en trozos más cortos llamados barras, para que estas barras se muevan hacia otra área para continuar con un nuevo proceso. Estas barras se recalientan para ablandarlas. Una capa de óxido se ha acumulado en la superficie, la retiran con agua a presión, sin enfriar el metal caliente. Para después estirar el acero, tratando de alargarlo a más de 600 metros.

Para finalizar se enrolla la banda de acero inoxidable mediante la rotación de un carrete y se le provee un tratamiento térmico final para aliviar la tensión del metal. (19)

## **2. SOLDADURA AL ARCO DE LOS ACEROS INOXIDABLES**

### **2.1. Concepto de soldadura**

La soldadura es un proceso de fabricación en donde se realiza la unión de dos materiales, generalmente metales o termoplásticos, usualmente logrado a través de la fusión, en la cual las piezas son soldadas fundiendo ambas y agregando un material de relleno fundido, el cual tiene un punto de fusión menor al de la pieza a soldar, para conseguir un baño de material fundido que al enfriarse, se convierte en una unión fija. A veces la presión es usada conjuntamente con el calor, o por sí misma, para producir la soldadura. (1)

### **2.2. Concepto de soldadura al arco**

Estos procesos usan una fuente de alimentación para soldadura para crear y mantener un arco eléctrico entre un electrodo y el material base para derretir los metales en el punto de la soldadura. Pueden usar una corriente continua (DC) ó una alterna (AC), y electrodos consumibles o no consumibles. A veces, la región de la soldadura es protegida por un cierto tipo de gas inerte o semi-inerte, conocido como gas de protección, y el material de relleno a veces es usado también. (1)

El sistema de soldadura eléctrica con electrodo recubierto se caracteriza, por la creación y mantenimiento de un arco eléctrico entre una varilla llamada electrodo, y la pieza a soldar. El electrodo recubierto está constituido por una varilla metálica a la que se le da el nombre de núcleo, generalmente de forma cilíndrica, recubierto de un revestimiento de sustancias no metálicas, cuya

composición química puede ser muy variada, según las características que se requieran en el uso. El revestimiento puede ser básico, rutilico o celulósico.

Para realizar una soldadura por arco eléctrico se induce una diferencia de potencial entre el electrodo y la pieza a soldar, con lo cual se ioniza el aire entre ellos y para ser conductor, de modo que se cierra el circuito. El calor del arco funde parcialmente el material base y funde el material de aporte, el cual se deposita y crea el cordón de soldadura. (1)

**Figura 4. Soldadura de un acero inoxidable**



Fuente: <http://wow-video.ru/index.php?key=SOLDADURA>

### **2.3. Soldadura eléctrica de los aceros inoxidables**

Desde el punto de vista de la soldadura, los aceros inoxidables se clasifican en dos grandes grupos,

- Aceros al cromo: que son los que contienen cromo como único elemento aleante y poseen poca ductilidad al ser soldados. Cuando el porcentaje de cromo es mayor del 18% el material está sujeto a un rápido desarrollo de grano, dando como resultado una

unión propensa a agrietarse cuando sufra alguna deformación o sea doblada.

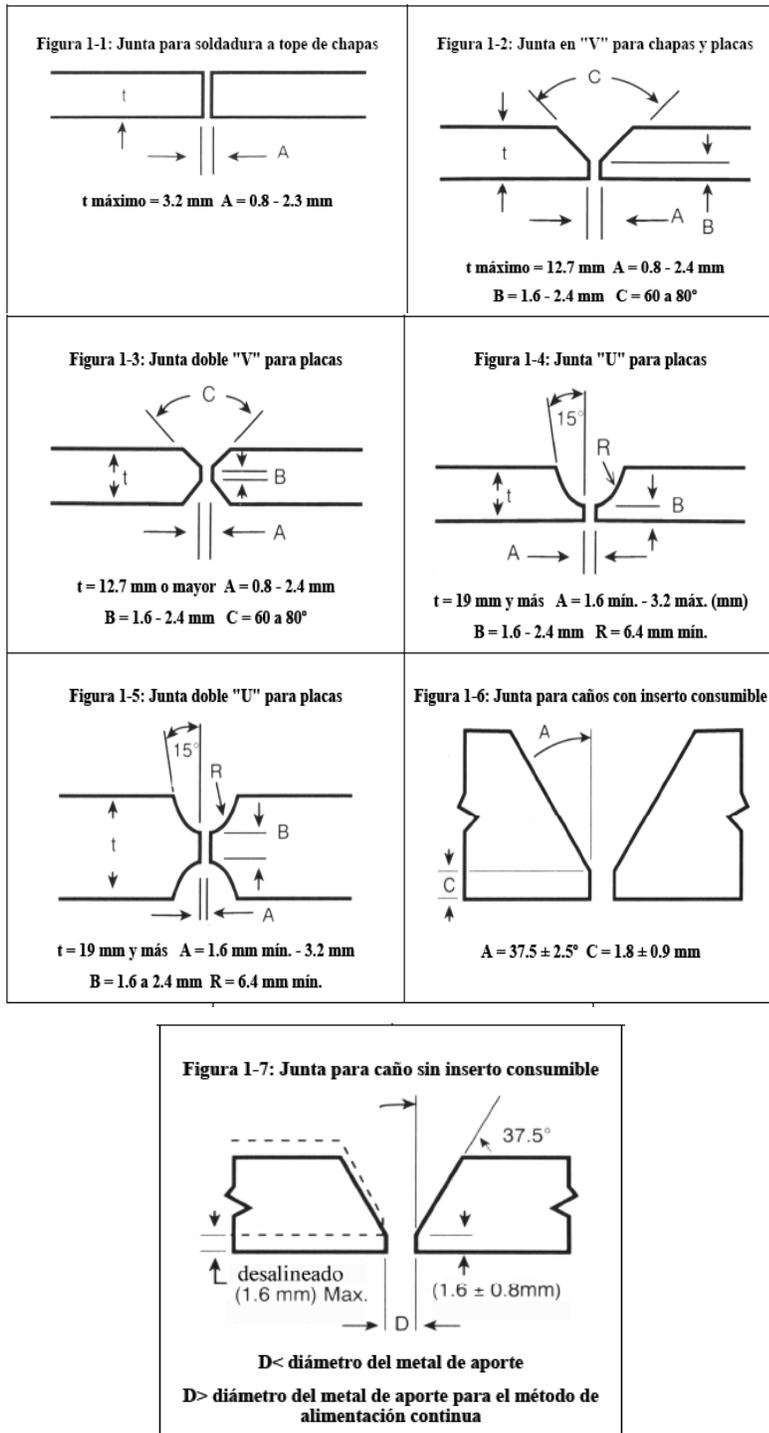
- Aceros austeníticos: los cuales adicional al cromo contienen níquel en distintas proporciones y otros elementos tales como titanio, columbio, etc. Específicamente los que contienen más del 7% de Ni y más del 17% de Cr son los recomendados para ser soldados por los distintos procesos de soldadura debido a sus características de tenacidad y ductilidad cuando se están trabajando.

Por lo general, en la soldadura al arco se utiliza la polaridad inversa, es decir, que la pieza de trabajo va conectada al terminal negativo del generador y el electrodo al terminal positivo. En casos cuando el espesor de la plancha sea mayor de una pulgada se usará la polaridad usual ya que en la práctica se han obtenido mejores resultados en lo referente a buena fusión y penetración. (8)

La preparación de las piezas a soldar hace parte fundamental del proceso de soldadura ya que esta afecta las caras a unir, esto depende no solo del tipo de unión, sino también depende del espesor de las piezas a unir. Existen varios tipos básicos de uniones para integrar dos partes de una junta, estos diseños para la soldadura de chapas y planchas se muestran en la figura 5. (11)

Para soldar aros o chapas circulares usando soldadura angular deberá hacerse a la pieza un reborde de 1 ó 2 pulgadas a su alrededor con el fin de evitar combaduras o alabeos y de esta forma se une el caso o el aro a la chapa por soldadura a tope. (11)

## Figura 5. Biselado para soldaduras



Fuente: <http://www.cientificosaficionados.com/libros/solinox1.pdf>

La soldadura de cualquier acero inoxidable deberá hacerse con un electrodo que posea cualidades muy similares a las de la pieza de trabajo, para que la mezcla sea lo más homogénea posible porque la penetración del acero inoxidable en sí mismo, en estado fundido, es mejor que la del acero dulce por su fluidez. (1)

Por la alta resistencia al calor del acero inoxidable, la soldadura no forma mucha escama y el cordón tiene que protegerse aplicando una capa de fundente en la superficie del electrodo evitando que este fundente contenga materias carbonosas, porque al solidificarse el metal y entrar en contacto con el aire, se oxidará el cromo y dicho cordón se quemará fácilmente. Por lo que usarán electrodos de acero Cr-Ni con porcentaje de carbono inferior al 0.08%.

### **2.3.1. Soldadura de aceros inoxidables austeníticos**

Estos aceros por su alta resistividad eléctrica pueden soldarse aún cuando la alimentación del calor sea baja conservando la temperatura alrededor del área soldada, siempre que exista la fusión y penetración adecuada. Para adaptar un material a condiciones óptimas antes de ser soldado se deberá calentar a una temperatura entre 1050-1150°C con un enfriamiento rápido en agua con la finalidad de disolver completamente los carburos de cromo sin que se precipiten en los límites de grano. Esto es valedero tanto para los aceros estabilizados como para los sensibilizados y los de extra-bajo carbono. (6)

Los aceros inoxidables extra-bajo carbono se recomiendan para usos debajo de los 427°C. Para altas temperaturas arriba de los 427°C se recomiendan los estabilizados y cuando se trabaje en medios corrosivos en el rango de sensibilización (427°C – 871°C) deberá contener adicionalmente

niobio más tantalio o titanio, y de composición similar deberá ser el material de aportación.

Estos aceros tienen una excelente soldabilidad ya que no hay ninguna transformación de fase desde la temperatura de fusión hasta la temperatura ambiente. Aunque pueden presentar tres tipos de problema durante la soldadura,

- Sensibilización. Es la precipitación del cromo en el área adyacente al límite del grano, dejando una cantidad insuficiente de cromo para mantener la capa de protección. La posible solución es disminuir la cantidad de carbono en 0.03%, añadir elementos a fines al carbono ó tratar térmicamente la soldadura con un recocido a una temperatura entre 559 – 590°C.
- Formación de fase sigma. Es un compuesto intermetálico de hierro y cromo, duro y frágil a la vez, cuya formación se vio favorecida, si las piezas trabajan entre 590 – 930°C, una de las posibles soluciones es realizar un calentamiento a una temperatura de unos 1010°C, para intentar disolver la fase.
- Fisuración en caliente. Es un inconveniente típico de la soldadura de los aceros inoxidable austeníticos, y se debe a la acumulación de impurezas, se puede eliminar produciendo tensiones mecánicas o eliminando impurezas. Estas microfisuras conocidas también como agrietamiento en caliente son de carácter interdendrítico y aparecen antes del enfriamiento de la soldadura a la temperatura ambiente y se deben principalmente a:
  - a. La presencia de ranuras o muescas en la pieza

- b. La composición del metal soldado (contenido de elementos residuales)
- c. La microestructura del metal soldado a solidificarse
- d. La cantidad de tensión desarrollada en la soldadura durante el enfriamiento
- e. La ductilidad del metal soldado a altas temperaturas

Las microfisuras pueden minimizarse:

- Controlando la cantidad de ferrita en el metal de aportación y por ende en la unión
- Usando electrodos con el revestimiento apropiado
- Usando electrodos con la calidad de alambre adecuada

Cuando se sueldan secciones delgadas deberá ponerse especial atención para evitar que se pandeen durante el enfriamiento, y el templado puede llevarse a cabo en agua.

De preferencia los aceros inoxidable austeníticos no deberán precalentarse porque para ciertas aplicaciones puede originar un incremento de precipitación de carburos indeseables o distorsión de la configuración de la pieza, o bien incrementar la tendencia a descomposición térmica. (8)

Una vez que la soldadura se ha terminado se hace necesario un alivio de tensiones por medio de un tratamiento térmico para:

- Asegurar su estabilidad dimensional, ya que por la presencia de tensiones residuales las propiedades mecánicas del metal se ven afectadas

- Evitar fallas prematuras
- Evitar excesiva distorsión causada por tensiones adicionales en las etapas subsiguientes de fabricación debido al esfuerzo efectivo de cedencia que varía de un punto a otro

El alivio de tensiones que se lleva a cabo calentando uniformemente la pieza en un rango de temperaturas que dependerá del grado de relajación requerido. La temperatura elegida deberá ser compatible con el grado aceptable de precipitación de carburos y con la resistencia a la corrosión deseada.

El tiempo para los rangos de temperatura varía desde 1 hora por pulgada de espesor de sección para temperaturas por encima de 649°C a 4 horas por pulgada de espesor de sección para temperaturas debajo de los 649°C. El enfriamiento desde la temperatura de alivio de tensiones debe ser lento debido al gran coeficiente de expansión y la baja conductividad térmica que posee este acero.

Para aceros inoxidable no estabilizados no se podrán aliviar las tensiones en el rango de temperatura de sensibilización sin sacrificar la resistencia a la corrosión. Los aceros extra-bajo carbono son afectados en menor grado porque la precipitación de carburos es más lenta y los estabilizados en menor grado que los anteriores porque la precipitación es aún más lenta. (8)

### **2.3.2. Soldadura de aceros inoxidable martensíticos**

Los aceros inoxidable martensíticos presentan una soldabilidad baja debido a su templabilidad, es decir, la soldadura provoca que se forme martensita de gran dureza en el área afectada térmicamente. Existe por tanto, riesgo de fisuración a causa de la baja ductilidad de la martensita, combinado con tensiones mecánicas de tracción y compresión. Su soldabilidad varía en función de su composición. (6)

Estos aceros son los más difíciles de soldar debido a su balance químico que los hace duros, fuertes y menos dúctiles durante el tratamiento térmico, y en el caso de una soldadura los cambios se restringen al área soldada la cual estará susceptible a agrietarse por las altas tensiones presentes. (8)

En condiciones normales cuando el contenido de carbono es mayor del 0.4%, estos aceros son considerados no soldables, sin embargo realizándoles un tratamiento térmico especial pueden volverse soldables. Para esto debe disponerse del diagrama tiempo-temperatura-transformación. El grado de formación de martensita dependerá del contenido de cromo y carbono pero aparece el problema que al aumentar el contenido de carbono se aumenta la dureza y se disminuye la ductilidad del material.

Cuando en una soldadura la resistencia o la dureza son elementos importantes en primer plano, se deberán usar electrodos de composición semejante o igual a la del metal base para obtener una mezcla con las mismas características. (8)

La necesidad de precalentar dependerá de la cantidad de carbono presente porque si es menor del 0.10% rara vez se efectuará el

precalentamiento, en cambio si la cantidad es mayor deberá hacerse para evitar resquebrajamiento. El rango usual de temperatura es de 205-316°C. Otros factores que deben tomarse en cuenta son la masa de la unión, grado de fijación de la pieza y composición del metal de relleno. (6)

Después de terminada la soldadura deberá hacerse un tratamiento térmico a toda la pieza y cuando se trate de reparaciones se hará un revenido antes de soldar. Se puede correlacionar el precalentamiento y el tratamiento térmico post soldadura con el contenido de carbono y las características de la soldadura tomando en cuenta los siguientes aspectos (9):

- Cantidad de carbono abajo del 0.10%; generalmente no se precalentará ni se hará recocido post soldadura.
- Cantidad de carbono del 0.10% al 0.20%; precalentar a 260°C, soldar a esta temperatura y enfriar lentamente.
- Cantidad de carbono de 0.20% a 0.50%; precalentar a 260°C, soldar a esta temperatura y recocer.
- Cantidad de carbono arriba del 0.50%; precalentar a 269°C, soldar con gran entrada de calor y recocer. El recocido puede omitirse si la soldadura será endurecida y empleada inmediatamente después de hecha, de otra manera, el recocido se llevará a cabo sin enfriar, a la temperatura ambiente.

### **2.3.3. Soldadura de aceros inoxidables ferríticos**

Los aceros inoxidables ferríticos son más soldables que los martensíticos y menos que los austeníticos. En forma muy general, se consideran ferríticos a aquellos que contienen como mínimo un 10% de cromo y un máximo de 0.25% de carbono.

Presentan una soldabilidad baja, ya que presentan cambios estructurales entre las distintas zonas de soldadura, como precipitación de carburos y fases intermedias. En las zonas afectadas térmicamente se presentan los siguientes fenómenos (6):

- Crecimiento del grano: deteriora la tenacidad, esto se puede arreglar mediante un tratamiento térmico.
- Precipitación de carburos: deteriora la tenacidad, y en los aceros estabilizados con titanio ó niobio, disminuye su resistencia mecánica.
- Transformación de fases: deteriora la resistencia mecánica a la tracción y el impacto, en los aceros con menos del 20% de cromo, la austenita se transforma parcialmente durante el enfriamiento en fases maduras, especialmente en martensita.

Como la soldadura se lleva a cabo a altas temperaturas, en un rango de 900°C al punto de fusión, los granos que se forman son gruesos originando uniones con baja dureza y formación de pequeñas cantidades de austenita la cual durante el enfriamiento se transforma en martensita resultando al final una estructura dúplex ferrita-martensita. La martensita reduce la tenacidad y ductilidad del acero tornándolo quebradizo.

Las propiedades ferríticas pueden restaurarse por recocido pero se corre el riesgo de que aparezcan distorsiones en zonas que hayan sido previamente trabajadas en frío. Esto no quiere decir que el tamaño del grano se reducirá, lo que es imposible a menos de que se logre una recristalización después de una deformación mecánica. Para reducir al mínimo el crecimiento del grano de la ferrita, la aportación de energía debe mantenerse en un nivel bajo usando electrodos de medida reducida y un avance rápido al efectuar la operación de soldadura.

Debido a todo lo anterior se es muy difícil soldar aceros inoxidable ferríticos sin emplear metal de aporte. Como material de aporte se pueden usar aceros austeníticos o ferríticos. Los austeníticos depositan un material más tenaz dejando solamente una zona débil en el material base pero si el conjunto debe trabajar a alta temperatura y en presencia de una atmósfera reductora, no es recomendable el uso de estos electrodos por la poca resistencia a la corrosión en presencia de azufre, así que se deberán utilizar metales de aportación ferríticos o con un reducido nivel de níquel.

El precalentamiento de las piezas, antes de iniciar con el proceso de soldado, se hace en un rango de temperatura entre 149 – 205°C dependiendo de la composición, propiedades mecánicas y espesor de la chapa a soldar. Durante la operación de soldadura se deberá poner especial cuidado cuando el espesor sea menor a 1/4 de pulgada porque la posibilidad de agrietamiento es grande. La soldadura puede agrietarse también por el tipo de junta, localización de la unión, medio de fijación, proceso de soldadura y tasa de enfriamiento.

Después que se ha terminado la soldadura será conveniente recocer en un rango de temperatura de 788-844°C para lograr una estructura completamente ferrítica y restaurar las propiedades mecánicas y la resistencia a

la corrosión que pudieran haber sido adversamente halladas en la soldadura y además para evitar la formación de austenita y granos gruesos. (6)

#### **2.4. Metales de aportación para aceros inoxidables**

Los metales de aportación para aceros inoxidables que se utilizarán en la aplicación de la soldadura deberán cumplir con especificaciones exigidas por la *AWS American Welding Society*. La AWS, es una organización dedicada a promover la ciencia, tecnología y aplicación de la soldadura, sus aliados de unión y procesos de corte, incluyendo la soldadura, soldadura fuerte y proyección térmica.

A continuación presentaremos en las tablas III, IV y V, los aceros inoxidables divididos en sus categorías, presentando en cada uno de ellos los aceros soldados existentes y los electrodos que se pueden utilizar para soldarlos. (Investigación de electrodos comerciales en Guatemala, **Apéndice A**). (6)

**TABLA III. Propiedades y utilidades de los aceros austeníticos**

ACEROS AUSTENÍTICOS						
Tipo de acero soldado	Servicio del acero	Electrodo	Características	Utilización	Resistencia a la tracción (psi)	
304L	Soldado y con alivio de esfuerzos	308L y 347	Arco suave, mínimo chisporroteo y tiene una excelente apariencia. Tiene un bajo contenido de Carbono.	Se usa para reparar equipos médicos, sanitarios y químicos, tanques, tuberías.	83000	
302B y 309	Soldado	309	Electrodo de acero inoxidable de bajo contenido de carbono.	Se usa para revestir aceros donde la corrosión intergranular debe mantenerse al mínimo. Aplicable en la reconstrucción con excelente soldabilidad.	84000	
303	Soldado y recocido	312	Resistente a altas temperaturas y abrasión severa. El maquinado del metal base incrementará la probabilidad de agrietamiento en caliente del metal de aportación. El metal de relleno del tipo 312 proporciona depósitos que contienen gran cantidad de ferrita para prevenir el agrietamiento en caliente.	Se usa para soldar aceros expuestos a máxima tensión y tiene excelente resistencia a la rotura. Se puede aplicar como capa intermedia debido a recargues duros.	120000	
310 y 310S	Soldado	310	El tipo 310 con 1.5% de Silicio como máximo, puede ser usado como material de relleno pero la aceleración del Silicio del metal base puede causar agrietamiento en caliente en la soldadura.	Se usa para soldar todo tipo de aceros inoxidables y sirve para reparar partes expuestas a condiciones severas de corrosión y calor.	90000	
316 y 316L 317 y 317L	Soldado, recocido y con alivio de esfuerzos	316, 316L, 317, 317Cb y 318	Las soldaduras pueden restaurarse por medio de un recocido, tipos 316 y 317 de 1066-1121 °C, 316L y 317L a 871 °F y 318 de 871-899 °C.	Se usan cuando no sea de importancia la corrosión en la condición soldada.	78000	
301, 302, 304, 308, 321 y 347	Soldado, estabilizado y con alivio de tensiones	347	Electrodo estabilizado con Columbio para evitar la precipitación del carburo de Cromo.	Se usa para soldar chapas delgadas, pero se debe tener cuidado con agrietamientos en zona térmica.	90000	

Fuente: elaboración propia

**TABLA IV. Propiedades y utilidades de los aceros martensíticos**

ACEROS MARTENSITICOS						
Tipo de acero soldado	Servicio del acero	Electrodo	Características	Utilización	Resistencia a la tracción (psi)	
403, 410, 416 y 416Se	Recocido, endurecido y con alivio de tensiones	410	Este se encuentra recocido suave y dúctil en la zona afectada por el calor y en la soldadura. El metal de aporte responde al tratamiento térmico de manera similar que el material base.	Se usan cuando existen altas probabilidades de corrosión y oxidación debido a temperaturas de 750 °C	85000	
403, 410, 416 y 416Se	Soldado	308, 309, 310 y 312	Estos metales de aporte austeníticos son suaves y dúctiles en la condición soldada pero la zona afectada por el calor tendrá ductilidad limitada.	Se usan para reparar partes expuestas a severas condiciones de corrosión y calor.	83000 – 90000	
420	Recocido, endurecido y con alivio de tensiones	420	No requiere un precalentamiento cuidadoso y se es necesario un tratamiento térmico post soldadura para evitar agrietamiento	Se usan para reparar ejes e instrumentos quirúrgicos	90000	
431	Recocido, endurecido y con alivio de tensiones	410	La temperatura de trabajo es hasta 450 °C. Se recomienda un precalentamiento y tratamiento térmico post soldadura.	Se usan cuando no es importante los aspectos de corrosión, erosión y abrasión.	85000	
431	Soldado	308, 309 y 310	Requiere de un cuidadoso precalentamiento. Y en la soldadura se debe detener consideraciones en zonas afectadas por el calor endurecidas.	Se usan para reparar partes expuestas a severas condiciones de corrosión y calor.	83000-90000	

Fuente: elaboración propia

**TABLA V. Propiedades y utilidades de los aceros ferríticos**

<b>ACEROS FERRÍTICOS</b>					
<b>Tipo de acero soldado</b>	<b>Servicio del acero</b>	<b>Electrodo</b>	<b>Características</b>	<b>Utilización</b>	<b>Resistencia a la tracción (psi)</b>
405	Recocido	405Cb y 430	Una pasada sobre acero al carbono permite obtener un acero del tipo AISI 410 (11% Cr). Resiste la escamación con una temperatura de hasta 870 °C. El metal de aporte tipo 405 contiene niobio más aluminio para reducir la dureza.	Se usan para soldar recargues de asientos de válvulas.	79750
405 y 430	Soldado	308, 309 y 310	Requiere de un cuidadoso precalentamiento. Y en la soldadura se debe de tener consideraciones en zonas afectadas por el calor endurecidas.	Se usan para reparar partes expuestas a severas condiciones de corrosión y calor.	83000-90000
430F y 430FSe	Soldado	308, 309 y 312	Estos metales de aporte austeníticos son suaves y dúctiles en la condición soldada pero la zona afectada por el calor tendrá ductilidad limitada.	Se usan para reparar partes expuestas a severas condiciones de corrosión y calor.	83000-90000
430, 430F y 430FSe	Recocido	430	El recocido se emplea para incrementar la ductilidad en la junta de unión de la soldadura.	Se usan para soldar recargues de asientos de válvulas.	79750
446	Soldado y recocido	446	Es consumible a base de níquel, es el más adecuado para aplicaciones con temperaturas elevadas, excepto en presencia de azufre	Para su uso, se debe de tomar en cuenta los coeficientes de expansión térmica del metal base y el metal de aporte.	80000

Fuente: elaboración propia

## **2.5. Selección de los metales de aportación**

Para soldar acero inoxidable se requiere hacer consideraciones de los constituyentes microestructurales del metal de aportación depositado porque son estos quienes al final determinarán las propiedades mecánicas, sensibilidad a agrietamiento y resistencia a la corrosión de la soldadura. Los constituyentes más importantes son austenita, delta-ferrita y carburos precipitados. Para elegir el mejor electrodo, se deberá realizar un análisis de los requerimientos, de la pieza a soldar y el lugar en el cuál se encontrará operando, a todo ello se podrá tomar en cuenta la información anteriormente detallada en las tablas III, IV y V.  
(6)

## **2.6. Defectos en la soldadura**

Es importante recordar que la soldadura es una unión de carácter permanente. Si por alguna razón las piezas a unir deben separarse, es conveniente investigar y utilizar otros métodos de fijación o sujeción.

La accesibilidad es un factor muy importante porque muy rara vez se obtienen buenos resultados con soldaduras en sitios poco accesibles. Cuando se van a unir varias piezas, es conveniente estudiar la posibilidad de utilización de un dispositivo.

Cualquier falla o defecto que ocurra en el proceso de soldar se considera como un defecto en la soldadura. Esta deficiencia puede ser referida a dimensiones, discontinuidades estructurales o algunas otras circunstancias que puedan atribuirse al producto.

La detección de un defecto no necesariamente indicará que la pieza será rechazada porque para esto se han creado códigos que rigen sobre los límites permisibles de aceptación o rechazo dependiendo de la magnitud del defecto y uso destinado de la pieza. (4)

Las diferentes clases de defectos que pueden encontrarse en una soldadura se mostrarán a continuación.

- **Porosidad:** se usa para describir los huecos globulares, libre de todo material sólido, que se encuentra con frecuencia en los cordones de la soldadura. En realidad, los huecos son una forma de inclusión que resulta de las reacciones químicas que tienen lugar durante la aplicación de la soldadura. Difieren de las inclusiones de escoria que contienen gases y no materia sólida. Los gases que forman los huecos se derivan de los gases liberados por el enfriamiento del metal de la soldadura, como consecuencia de la reducción de solubilidad al descender la temperatura y de las reacciones químicas que tienen lugar dentro de la propia soldadura. (4)

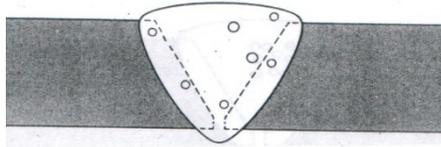
Sus causas se dan,

- a. Debido a un arco corto, excepto con electrodos inoxidables o de bajo hidrógeno
- b. Tiempo insuficiente de fusión
- c. Metal base muy deteriorado
- d. Electrodo deficiente

Su solución,

- a. Limpiar debidamente el metal base
- b. Permitir más tiempo para la fusión, para que los gases se escapen

**Figura 6. Porosidad en soldaduras**



Fuente: CRUZ V., Juan Francisco. *Soldadura de Acero Inoxidable y Análisis Práctico de Ensayos No Destructivos*. Pág. 25.

- **Inclusiones de escoria:** son los óxidos no metálicos que se encuentran a veces en forma de inclusiones alargadas y globulares en los cordones de soldadura. Durante la formación del depósito y la subsecuente solidificación del metal de la soldadura, tienen lugar muchas reacciones químicas entre los materiales (fundente), o con la escoria producida. Algunos de los productos de dichas reacciones son compuestos no metálicos, solubles solo en cierto grado en el metal fundido. Debido a su menor densidad, tienden a buscar la superficie exterior del metal fundido, salvo que encuentren restricciones para ello. (4)

Sus causas se dan,

- a. Debido a una ineficiente limpieza de la escoria en los cordones de la soldadura
- b. Inclusión de la escoria a la orilla del cordón en forma intermitente y escalonada

- c. El corte y la superficie de los biseles se da de forma irregular
- d. Técnica incorrecta al manipular la soldadura
- e. El voltaje y amperaje son inadecuados al tamaño del metal base

Su solución,

- a. Cepillar y cincelar la escoria al finalizar el cordón de la soldadura
- b. Remover la escoria del cordón de la soldadura
- c. Alisar la superficie de los biseles, que queden limpios y uniformes
- d. Corregir los valores eléctricos en la máquina de soldar

**Figura 7. Inclusiones de escoria en soldadura**



Fuente: CRUZ V., Juan Francisco. *Soldadura de Acero Inoxidable y Análisis Práctico de Ensayos No Destructivos*. Pág. 23.

- **Falta de fusión:** son vacíos alargados entre los cordones de la soldadura y las superficies de las juntas a ser soldadas.

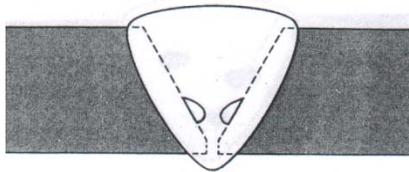
Sus causas se dan,

- a. Por velocidad incorrecta
- b. Corriente mal ajustada
- c. Preparación de la pieza en forma defectuosa
- d. Electrodo de diámetro inadecuado

Su solución,

- a. Ajustar adecuadamente el tamaño del electrodo
- b. La oscilación debe ser suficientemente ancha para fundir los lados de la junta

**Figura 8. Falta de fusión en soldadura**



Fuente: CRUZ V., Juan Francisco. *Soldadura de Acero Inoxidable y Análisis Práctico de Ensayos No Destructivos*. Pág. 24.

- **Falta de penetración:** esta expresión se usa para describir la situación en que el metal depositado y el metal base no se funden en forma integral en la raíz de la soldadura. Puede ser ocasionada porque la cara de la raíz de la soldadura de ranura no alcance la temperatura de fusión a toda su altura, o porque el metal de la soldadura no llegue a la raíz de una soldadura de filete, y deje el hueco ocasionado por el puenteo del metal de la soldadura desde un miembro al otro. Aunque la penetración incompleta puede deberse en unos cuantos casos a la falta de disolución de los óxidos e impurezas de la superficie, las condiciones de transmisión de calor que existen en la junta son una fuente más frecuente de este defecto. La penetración incompleta es indeseable, particularmente si la raíz de la soldadura está sujeta ya sea a tensión directa o a esfuerzos flexionantes. El área que no se funde permite concentraciones de esfuerzos que pueden resultar en fallas sin deformación apreciable. (4)

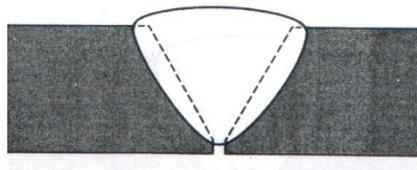
Sus causas se dan,

- a. Velocidad muy rápida
- b. Electrodo muy grueso
- c. Corriente muy baja

Su solución,

- a. Usar corriente suficiente para obtener la penetración deseada; se debe soldar despacio
- b. Calcular correctamente la penetración del electrodo

**Figura 9. Falta de penetración en soldadura**



Fuente: CRUZ V., Juan Francisco. *Soldadura de Acero Inoxidable y Análisis Práctico de Ensayos No Destructivos*. Pág. 23.

- **Socavado:** consiste en la eliminación por fusión de la pared de una ranura de la soldadura en el borde del cordón, con la formación de una depresión marcada en la pared lateral de la zona a la que debe unirse por fusión el siguiente cordón. (4)

Sus causas se dan,

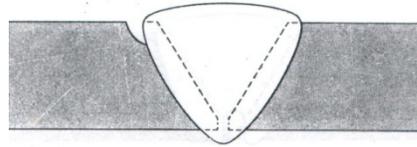
- a. Manejo impropio del electrodo
- b. Electrodo inadecuado

- c. Corriente muy alta
- d. Exceso de calor

Su solución,

- a. Usar una oscilación uniforme en soldaduras a tope
- b. Evitar el uso de electrodos muy gruesos
- c. Corregir el amperaje de la máquina

**Figura 10. Socavado en soldadura**



Fuente: CRUZ V., Juan Francisco. *Soldadura de Acero Inoxidable y Análisis Práctico de Ensayos No Destructivos*. Pág. 21.

- **Agrietamiento:** el agrietamiento de las juntas soldadas ocurre por la presencia de esfuerzos multidireccionales localizados que en algún punto rebasan la resistencia máxima del metal. Cuando se abren grietas durante la soldadura o como resultado de ésta, generalmente solo es aparente una ligera deformación de la pieza de trabajo. Después que se ha enfriado una junta soldada, hay más probabilidades de que ocurra agrietamiento cuando el material es duro o frágil. Un material dúctil soporta concentraciones de esfuerzo que pudieran ocasionar falla en un material duro o frágil. (4)

Sus causas son,

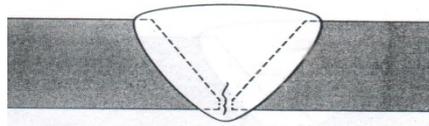
- a. Electrodo incorrecto

- b. Desproporción de la soldadura con el tamaño de las piezas
- c. Soldadura defectuosa
- d. Junta rígida

Su solución,

- a. El diseño de la estructura debe eliminar juntas rígidas
- b. Calentar las piezas antes de soldar
- c. Evitar soldar cordones en hileras
- d. Mantener libres los extremos para moverse tanto como sea posible

**Figura 11. Agrietamiento en soldadura**



Fuente: CRUZ V., Juan Francisco. *Soldadura de Acero Inoxidable y Análisis Práctico de Ensayos No Destructivos*. Pág. 27.

- **Soplo magnético:** el soplo magnético es una de las mayores dificultades con la que nos encontramos cuando soldamos con arco de corriente continua. El soplo magnético se forma debido a fuerzas electromagnéticas, éstas actúan sobre el arco del electrodo, sobre todo cuando este se encuentra en bordes, extremos ó partes de piezas con forma aguda, produciendo un ir y venir en el arco, cambiando de dirección y dando violentos movimientos. Cuando aparece es algo imposible de controlar. La distorsión del campo magnético, se debe a que el arco no va por el camino más corto del electrodo a la pieza, sino que se desvía por los campos

electromagnéticos que aparecen en la misma, producida por la intensidad de corriente necesaria para soldar. (4)

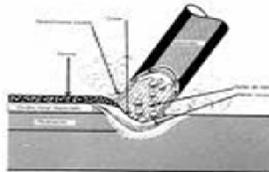
Su causa es,

- a. Debido a que campos magnéticos hacen que el arco se desvíe de su curso normal

Su solución,

- a. Usar bloques de acero para alterar el curso magnético alrededor del arco
- b. Dividir en varios ramales la conexión de tierra
- c. Soldar en la misma dirección del soplo

**Figura 12. Soplo magnético en soldadura**



Fuente: [www.google.com.gt/imgres?imgurl=http://4.bp.blogspot.com/\\_vN8GkKCgmCc/Sz3\\_U4whI2I/AAAAAAAAAT0/AAX2JFMmKNE/s320/esquema%2Belectr.bmp&imgrefurl](http://www.google.com.gt/imgres?imgurl=http://4.bp.blogspot.com/_vN8GkKCgmCc/Sz3_U4whI2I/AAAAAAAAAT0/AAX2JFMmKNE/s320/esquema%2Belectr.bmp&imgrefurl)



### 3. MÁQUINAS DE ENSAYO

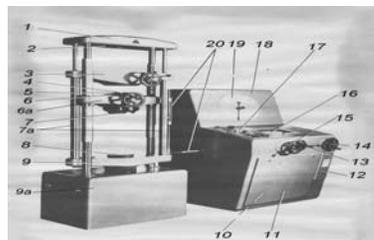
#### 3.1. Máquina universal de ensayo de tensión y compresión

En ingeniería se denomina máquina universal a una máquina semejante a una prensa con la que es posible someter materiales a ensayos de tracción y compresión para medir sus propiedades mecánicas. La presión se logra mediante placas o mandíbulas accionadas por tornillos o un sistema hidráulico, con ayuda de un motor eléctrico, esto para la parte encargada de la aplicación de la carga a las probetas; para la parte de medición, la máquina de ensayos está equipada de un dinamómetro con barra a torsión de baja inercia. (3)

##### 3.1.1. Propiedades de una máquina universal

En la figura 13, se enumeran las partes de una máquina universal y se especifica cada una de ellas, con esto se logra observar la importancia de cada una de ellas con respecto a los diferentes ensayos que se puedan realizar. (Explicación en base a numeración de cada una de las figuras, **Apéndice B**). (3)

**Figura 13. Máquina universal**



Fuente: [www.google.com.gt/imgres?imgurl=http://](http://www.google.com.gt/imgres?imgurl=http://)

[www.utp.edu.co/~gcalle/Contenidos/WPM40\\_archivos/image002.jpg&imgrefurl](http://www.utp.edu.co/~gcalle/Contenidos/WPM40_archivos/image002.jpg&imgrefurl)

La instalación de ensayo se compone de:

- Máquina de ensayo
- Panel de control

La máquina y el panel de control están unidos entre sí por líneas hidráulicas y eléctricas. La máquina de ensayo consta de:

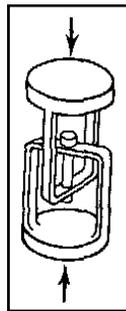
- Base
- Marco suspendido por placas y unidas solidariamente por dos columnas
- Placa de altura ajustable
- Placa de guía
- Regleta y otros dispositivos de medida
- Dispositivos de sujeción y agarre

En el panel de control se utiliza un sistema operativo, el cual se basa en un software que ha sido desarrollado regularmente bajo un ambiente de *Windows*, y ha sido instalado bajo un sistema operativo XP garantizando la compatibilidad con todo tipo de programas actuales y futuros. Todas las aplicaciones, tantos ensayos, creación de códigos, registros, consultas, estadísticas y ayudas, se encuentran en este *software*. Este consta de:

- Sistema hidráulico de aplicación de carga
- Dinamómetro (dispositivo de medición de la carga) con carátula
- Tablero de control

Ya que el sistema hidráulico posee un cilindro de simple efecto, al aplicar presión hidráulica la placa sube realizando una acción de compresión contra la placa ajustable. Para poder realizar una acción de tracción la máquina posee un inversor. Que consta de las placas unidas solidariamente por las columnas. (3)

**Figura 14. Inversor de una máquina universal de ensayos**

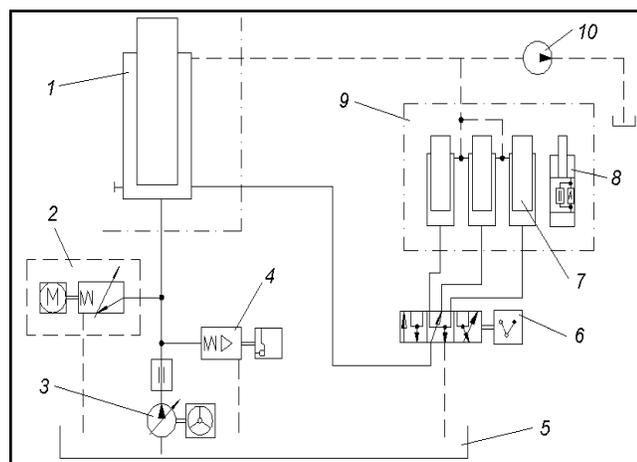


Fuente: <http://www.google.com.gt/imgres?imgurl=>

[http://www.utp.edu.co/~gcalle/Contenidos/WPM40\\_archivos/image006.gif&imgrefurl=](http://www.utp.edu.co/~gcalle/Contenidos/WPM40_archivos/image006.gif&imgrefurl=)

El sistema hidráulico consta de dos partes: sistema de potencia y sistema de medición. A continuación se muestra el sistema hidráulico de la máquina.

**Figura 15. Esquema hidráulico general máquina universal WPM ZD 40**



Fuente: [www.google.com.gt/imgres?imgurl=](http://www.google.com.gt/imgres?imgurl=)

[http://www.utp.edu.co/~gcalle/Contenidos/WPM40\\_archivos/image007.gif&imgrefurl=](http://www.utp.edu.co/~gcalle/Contenidos/WPM40_archivos/image007.gif&imgrefurl=)

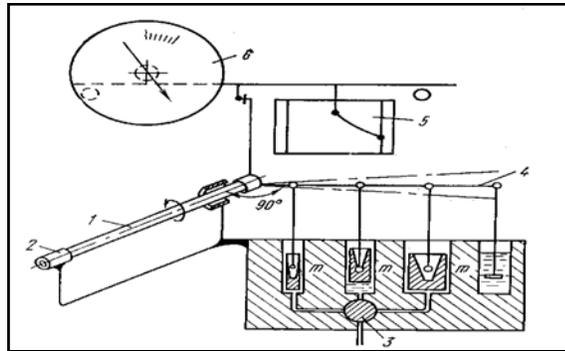
La bomba de alta presión succiona el aceite del depósito y lo envía por la línea de alta presión hacia el cilindro de trabajo, el pistón del cual, empieza a levantarse. Si durante este movimiento el pistón encuentra alguna resistencia (por ejemplo la probeta está instalada entre las placas) la presión en el cilindro de trabajo subirá haciendo que el pistón ejerza una fuerza creciente aplicada a la probeta hasta causar la rotura de la misma, o hasta la fuerza que sea necesaria en el ensayo.

En la línea secundaria de la línea de alta presión se encuentra la válvula de aplicación de la carga, esta válvula trabaja como una válvula de descarga de sobreflujo, es decir al superar la presión en la línea la presión para la que ésta está regulada, el aceite descarga al depósito. La regulación de esta válvula se realiza manualmente (anteriormente era posible accionarla por medio de un motor de velocidad variable), para aumentar a voluntad o sostener la fuerza realizada sobre la probeta. La válvula es una válvula de descarga que actúa como válvula de seguridad. Los escapes de aceite entre el pistón y el cilindro de trabajo son colectados por la bomba auxiliar y retornados al depósito. (3)

Para la medición de la fuerza ejercida a la probeta, la máquina posee un dinamómetro de barra de torsión, este dinamómetro consta de dos partes: hidráulica y eléctrica.

La parte hidráulica puede observarse en la figura 15. La presión de trabajo en el cilindro es conducida al selector de rango de carga (válvula distribuidora de 3 posiciones correspondientes a 4, 20 y 40 toneladas máximas de carga) y de allí al cilindro de medición apropiado para actuar sobre la barra de torsión del dinamómetro. (3)

**Figura 16. Funcionamiento del dinamómetro**



Fuente: [www.google.com.gt/imgres?imgurl=http://](http://www.google.com.gt/imgres?imgurl=http://www.publimotos.com/testdrive/bajajxcd125/img/dinamometro.jpg&imgrefurl=)

[www.publimotos.com/testdrive/bajajxcd125/img/dinamometro.jpg&imgrefurl=](http://www.publimotos.com/testdrive/bajajxcd125/img/dinamometro.jpg&imgrefurl=)

En la figura 16 se muestra un esquema de funcionamiento del dinamómetro. La barra de torsión posee un extremo fijo. Sobre el segundo extremo, por medio de la palanca perpendicular se aplica una fuerza proporcional a la presión del líquido en el cilindro de trabajo de la máquina. La unión entre el cilindro y el dinamómetro se realiza con ayuda de cilindros adicionales de émbolos *m*. Los cuales se conectan de acuerdo a la posición de la válvula selectora, adecuada a mediciones en distintas gamas de fuerza.

Cuanto más distante está el cilindro de la barra de torsión tanto mayor es el brazo de la palanca y a mayor ángulo se puede torsionar la barra. Esta última está unida al indicador de carátula por medio de una transmisión de rueda dentada y cremallera. El registrador se encuentra fuera de servicio en nuestra máquina. (3)

### **3.1.2. Características de una máquina universal**

Esta máquina es ampliamente utilizada en la caracterización de nuevos materiales. Así por ejemplo, se ha utilizado en la medición de las propiedades de tensión de los polímeros. Se utiliza para hacer una gran variedad de

ensayos, tanto de concretos, metalurgia, maderas y textiles. Apta para ensayos de compresión tracción, flexión, plegado y cizalla.

La medición de la variable fuerza se realiza directamente en el dial de la máquina universal. Esta medición está dada en kgf. (3)

### **3.1.3. Tipos de ensayo**

Los términos de ensayo de tensión y compresión se usan normalmente a la hora de hablar de ensayos en los cuales una probeta preparada es sometida a una carga monoaxial gradualmente creciente hasta que ocurre una falla. En un ensayo de tensión, la operación se realiza sujetando los extremos opuestos de la pieza de material y separándolos. La probeta se alarga en una dirección paralela a la carga aplicada.

En un ensayo de compresión, se logra sometiendo una pieza de material a una carga en los extremos que produce una acción aplastante. La pieza se acorta. Dentro de los límites de practicidad, la resultante de la carga se hace coincidiendo con el eje longitudinal de la probeta.

Los ensayos estáticos de tensión y de compresión son los más realizados, además de ser los más simples de todos los ensayos mecánicos. Estos ensayos implican la normalización de las probetas con respecto a tamaño, forma y método de preparación y la de los procedimientos de ensayo. El ensayo de tensión es el apropiado para uso general en el caso de la mayoría de los metales y aleaciones no ferrosas, fundidos, laminados o forjados; para los materiales quebradizos como el concreto, cuya resistencia a la tensión es baja, en comparación con la resistencia a la compresión, el ensayo de compresión es más significativo y de mayor aplicación. (12)

Aunque ciertos requerimientos fundamentales pueden establecerse y ciertas formas de probeta se acostumbran usar para tipos particulares de ensayos, las probetas para ensayos de tensión se hacen en una variedad de formas. La sección transversal de la probeta es redonda, cuadrada o rectangular.

Para los metales, si una pieza de suficiente grueso puede obtenerse de tal manera que pueda ser fácilmente maquinada, se usa comúnmente una probeta redonda; para láminas y placas en almacenamiento se emplea una probeta plana. La porción central del tramo es usualmente, de sección menor que los extremos para provocar que la falla ocurra en una sección donde los esfuerzos no resulten afectados por los dispositivos de sujeción.

La forma de los extremos debe ser adecuada al material, y tal, que ajuste debidamente en el dispositivo de sujeción a emplear. Los extremos de las probetas redondas pueden ser simples, cabeceados, o roscados. La relación entre el diámetro o ancho del extremo y el diámetro o ancho de la sección reducida, es determinada en gran parte por la costumbre, aunque para los materiales quebradizos es importante tener los extremos suficientemente grandes para evitar la falla debida a la combinación del esfuerzo axial y los esfuerzos debidos a la acción de las mordazas. Una probeta debe ser simétrica con respecto a un eje longitudinal a toda su longitud, para evitar la flexión durante la aplicación de la carga. (12)

### **3.2. Máquina de prueba de impacto**

La máquina consta de 2 paralelos paralelos, totalmente perpendiculares a su base fijada en el suelo, estos paralelos soportan un eje, el cual sostiene al péndulo, que en su parte inferior sostiene al martillo, el cual se puede cambiar

según la prueba que se vaya a realizar. El martillo tiene un determinado peso y dimensiones que cumplen con la norma ASTM E-23. En la base se encuentra una prensa o soporte de la probeta intercambiable para el ensayo que se vaya a realizar, su fin es sujetar las probetas cuando el péndulo las golpea. (18)

**Figura 17. Máquina de prueba de impacto**



Fuente: [www.fundicionesgomez.com/Probeta-para-Ensayo-de-Impacto-Charpy](http://www.fundicionesgomez.com/Probeta-para-Ensayo-de-Impacto-Charpy)

Las partes principales de la máquina son: la estructura y el péndulo. La estructura o todo el soporte de la máquina consisten en dos canales de acero que están paralelos entre sí, perpendiculares a la base. La máquina debe ser anclada al piso 15 centímetros como especifica la norma. En el momento de realizar el anclaje debe tenerse especial cuidado, para no alterar las condiciones de paralelismo y perpendicularidad, sobre las cuales se diseñó la máquina. Para anclar la estructura al piso se utilizan dos tornillos en cada una de las esquinas. Uno de los tornillos es el de nivelación y el otro es el de anclaje. La estructura se nivela utilizando los tornillos de nivelación, y cuando se encuentra totalmente nivelada, se ajustan en el piso los tornillos de anclaje.

El péndulo es la parte más delicada de la máquina, pesa aproximadamente 40 libras y debe ser accionada solamente al liberar el sistema de freno, a través del mecanismo proporcionado para ello. El péndulo al igual que el resto de la máquina cumple con la norma ASTM E-23; su diseño debe cumplir con características de: velocidad, centro de percusión y punto de golpeo.

En esta máquina se encuentra un sistema de medición y registro, el cual permite establecer la medida del ángulo desde el cual se suelta el péndulo y el ángulo hasta el cual llega luego del impacto y ruptura de la probeta. Este es un sistema basado en el funcionamiento de un compás. El sistema consta de una barra pequeña que se encuentra unida al centro del eje y una lámina puesta en medio de la estructura del eje, sobre el cual se encuentra la escala graduada. La escala es rayada por una mina que se encuentra en el extremo de la barra que está unida al eje del péndulo. (18)

**Figura 18. Sistema de péndulo**



Fuente: [www.google.com.gt/imgres?imgurl=http://www.tecnun.es/asignaturas/control1/proyectos/pdobleinv/imagpdoble/modelopdoble.gif&imgrefurl](http://www.google.com.gt/imgres?imgurl=http://www.tecnun.es/asignaturas/control1/proyectos/pdobleinv/imagpdoble/modelopdoble.gif&imgrefurl)

En el registro quedan dos ángulos de importancia, el primero es  $\alpha$ , el cual representa el ángulo de salida del péndulo, el segundo es  $\beta$ , éste último representa el ángulo hasta el cual llegó el péndulo luego de romper la probeta. (17)

### **3.2.1. Propiedades de una máquina de prueba de impacto**

Una prueba de impacto es un tipo de prueba de vibración, que se hace normalmente en una máquina que no está en operación. La máquina se equipa con uno o más transductores de vibración y después se le imparte un golpe con un objeto macizo como un martillo. La máquina responderá al impacto con una vibración que se extinguirá y las señales de los transductores se graban y se mandan a un análisis de espectro. Ese espectro resultante contendrá picos que corresponden a las frecuencias naturales o resonancias de la máquina. En cualquier máquina las fuerzas de excitación de su operación normal deben ser alejadas de las resonantes que pueden causar niveles de vibración muy altos y destructivos. (18)

### **3.2.2. Característica de una máquina de prueba de impacto**

A medida que se cambia la velocidad de un cuerpo al golpear, debe ocurrir una transferencia de energía; se realiza trabajo sobre las partes que reciben el golpe. La mecánica del impacto involucra no solamente la cuestión de los esfuerzos inducidos, sino también una consideración de la transferencia de energía, su absorción y disipación. La energía de un golpe puede absorberse de varias maneras:

- A través de la deformación elástica de los miembros y las partes de un sistema
- A través de los efectos de la histéresis en las partes
- A través de las deformaciones plásticas de las partes
- A través de la acción friccional entre las partes
- A través de los efectos de la inercia de las partes en movimiento

El efecto de una carga de impacto que produzca esfuerzo depende de la cantidad de energía utilizada en causar deformación; al tratar los problemas que involucran las cargas de impacto, la manera predominante en que la carga haya de resistirse obviamente determina el tipo de información que se necesita. La meta es proveer margen para la absorción de tanta energía como sea posible a través de acción elástica y luego confiar en alguna clase de contención para disiparla. En la mayoría de los ensayos para determinar las características de absorción energética de los materiales bajo cargas de impacto, el objeto es utilizar la energía del golpeo para causar la ruptura de la probeta. (18)

La propiedad de un material en relación con el trabajo requerido para causar la ruptura ha sido designada como tenacidad; esta depende fundamentalmente de la resistencia, la ductilidad y parece ser independiente del tipo de carga. No todos los materiales responden de la misma manera a las variaciones de velocidad de la aplicación de la carga; algunos materiales muestran lo que se denomina sensibilidad a la velocidad en un grado mucho más alto que otros. Ejemplos notorios son el del vidrio ordinario, el cual es perforado con un agujero muy limpio por una bala de alta velocidad, pero se estrella bajo carga concentrada y lenta.

Además del efecto de la velocidad, la forma de una pieza puede mostrar un marcado efecto sobre su capacidad para resistir las cargas de impacto; a temperaturas ordinarias una barra simple de metal dúctil no se fracturará bajo una carga de impacto en flexión. Para poder inducir la ocurrencia de la fractura con un solo golpe, las probetas de un material dúctil se ranuran. (18)

Cuando un material es sujeto a un golpe repentino y violento, en el que la velocidad de deformación es extremadamente rápida, se puede comportar en una forma mucho más frágil que la que se observa en otro tipo de pruebas, por

ejemplo en el ensayo de tensión. Esto, se puede observar en muchos plásticos, ya que al estirarlo con mucha lentitud, las moléculas del polímero tienen tiempo de desenredarse o las cadenas de deslizarse entre sí y permitir deformaciones plásticas grandes.

Sin embargo, si se aplica una carga de impacto, el tiempo es insuficiente para que esos mecanismos jueguen un papel en el proceso de deformación, y los materiales se rompen en forma frágil, con frecuencia se usa un ensayo de impacto para evaluar la fragilidad de un material bajo estas condiciones. En contraste con el ensayo de tensión, en el de impacto las tasas de deformación unitaria son mucho mayores. (18)

Muchas máquinas, tuberías, dispositivos y piezas están sometidas comúnmente a cargas de impacto; un tipo importante de carga dinámica es aquel en que la carga se aplica súbitamente como en el caso del impacto de una masa en movimiento; aquí se trata de algunos de los aspectos de comportamiento de los materiales, en especial del acero inoxidable, bajo tales cargas de impacto.

El ensayo de impacto ideal sería uno en el cual toda la energía de un golpe se transmitiera a la probeta. En realidad este ideal nunca se alcanza; siempre se pierde alguna energía por fricción, por deformación de los apoyos y la masa de golpeo, y por vibración de varias partes de la máquina de ensayo. Al realizar un ensayo de impacto, la carga puede aplicarse en flexión, tensión, compresión o torsión, siendo la carga flexionante la más común. (18)

### **3.2.3. Tipos de ensayo**

Los tipos de ensayos de impacto son los siguientes:

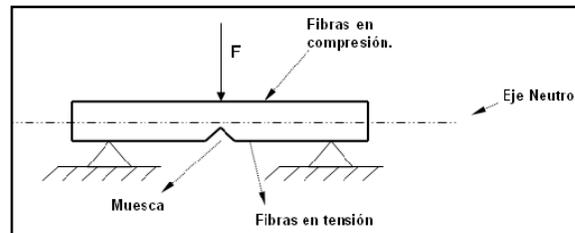
Ensayo tipo Charpy. La primera opinión que se tiene al observar el péndulo de Charpy, es que se trata de una máquina de ensayo muy simple desde el punto de vista mecánico. Sin embargo, a pesar de esa sencillez mecánica, con este instrumento se pueden diseñar varias pruebas de impacto donde se demuestra de forma rápida y didáctica, la influencia que tienen determinados factores en el comportamiento mecánico de los materiales. Este ensayo consiste en romper una probeta simplemente apoyada en posición horizontal, por medio de un golpe en su punto medio, en donde previamente se le ha hecho una muesca. El martillo golpea en dirección opuesta a la muesca.

El goniómetro de máximos permite conocer los ángulos de salida y llegada para establecer cuanta energía absorbe la probeta antes y durante la ruptura. La realización de la práctica consiste en una máquina que se encuentra acoplada a un ordenador mediante una tarjeta de adquisición de datos, a través de la cual es posible registrar las curvas fuerza-tiempo generada durante los ensayos, y a su vez nos permite obtener el valor de la energía absorbida por los materiales en el proceso de fractura. Las probetas usadas en los experimentos tienen forma de paralelepípedos.

El péndulo en la prueba de Charpy es la parte de la máquina más delicada, pesa aproximadamente 40 libras y debe ser accionada solamente al liberar el sistema de freno, a través del mecanismo proporcionado a ello. El péndulo al igual que el resto de la máquina cumple con la norma ASTM E-23; su diseño debe cumplir con características de velocidad, centro de percusión y punto de golpeo. Para esta prueba, las mordazas deben sujetar la probeta por

cada uno de sus extremos, dejando un canal para el paso del péndulo, que debe tener una distancia de 40 mm. (2)

**Figura 19. Ensayo de Charpy**

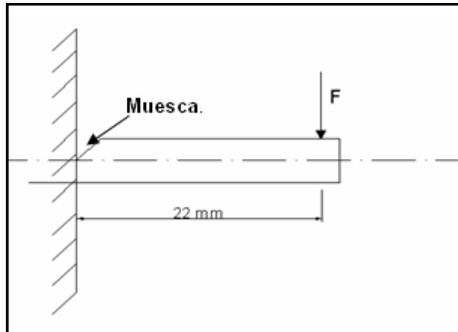


Fuente: GARAVITO, Julio. Manual de impacto de protocolo, curso de materiales. 27 p.

Ensayo tipo Izod. Así como el método de Charpy, este ensayo se encarga de romper el material bajo un efecto dinámico que se produce por el impacto sobre la probeta de una masa de peso con una velocidad conocida. Esta probeta se encuentra sostenida en voladizo en posición horizontal, y se llega a producir un golpe en su extremo libre. En su base, a ésta probeta también se le hace una muesca, sin embargo, esta es realizada a toda una sección transversal de la probeta. Los soportes utilizados en la prueba de Izod, son mordazas utilizadas para sujetar la probeta para que el golpe se dé a 22 milímetros de la muesca según la norma ASTM E-23.

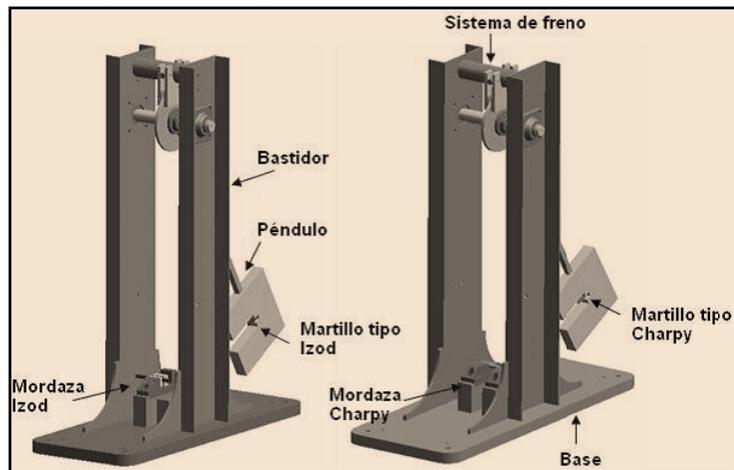
El martillo de golpeo para pruebas de impacto tipo Izod, también requieren que se cumpla con una disposición específica de los ángulos y dimensiones que entran en contacto con la probeta. Es necesario tener en cuenta que como la probeta está en posición horizontal, el martillo de golpeo debe ser colocado a un giro de 90° respecto al eje del péndulo. Es por esto que el péndulo posee un orificio diseñado de forma tal que el martillo se introduzca sin ninguna complicación de forma correcta. El goniómetro de máximos marca los ángulos de salida y llegada con los cuales se establece la energía absorbida por la probeta de determinado material. (2)

**Figura 20. Ensayo de Izod**



Fuente: GARAVITO, Julio. Manual de impacto de protocolo, curso de materiales. 27 p.

**Figura 21. Máquinas para ensayos Charpy e Izod**



Fuente: GARAVITO, Julio. Manual de impacto de protocolo, curso de materiales. 27 p.



## **4. ENSAYOS DE LA SOLDADURA DE ACERO INOXIDABLE**

En el momento de realizar el ensayo de tensión se utilizaron dos probetas, el objetivo era tener dos resultados que se puedan utilizar como una comparación para poder tener la capacidad de definir en un momento determinado las características o detalles que se necesitarán en algún montaje u otra situación similar que se encuentre relacionado con los aceros inoxidable, donde se tenga la posibilidad de escoger entre los beneficios de soldar una estructura dada la situación ó tratar de mantener el material base y realizar estructuras mecánicas siguiendo los lineamientos necesitados.

Para lo que es el ensayo de doblado se utilizó una probeta soldada, y en base a ello se obtuvieron resultados los cuales se pueden utilizar para tener conclusiones acerca de una soldadura de acero inoxidable en una barra que tenga determinadas medidas, y sus potenciales ventajas en lo que puede ser la ductilidad de los materiales.

### **4.1. Ensayo 1. Tensión**

El ensayo de tracción de un material consiste en someter una probeta normalizada a un esfuerzo axial de tracción creciente hasta que se produce la rotura de la probeta. Este ensayo mide la resistencia de un material a una fuerza estática ó aplicada lentamente. Las velocidades de deformación en un ensayo de tensión suelen ser muy pequeñas. En un ensayo de tracción pueden determinarse diversas características de los materiales elásticos. (3) Por ejemplo:

- Módulo de elasticidad o Módulo de Young, que cuantifica la proporcionalidad de la elasticidad del material
- Coeficiente de Poisson, que cuantifica la razón entre el alargamiento longitudinal y el acortamiento de las longitudes transversales a la dirección de la fuerza
- Límite de proporcionalidad valor de la tensión por debajo de la cual el alargamiento es proporcional a la carga aplicada
- Límite de fluencia o límite elástico aparente, valor de la tensión que soporta la probeta en el momento de producirse el fenómeno de la cedencia o fluencia. Este fenómeno tiene lugar en la zona de transición entre las deformaciones elásticas y plásticas, caracterizándose por un rápido incremento de la deformación sin aumento apreciable de la carga aplicada
- Límite elástico, valor de la tensión a la que se produce un alargamiento prefijado de antemano (0,2%, 0,1%, etc.) en función del extensómetro empleado
- Carga de rotura o resistencia a la tracción: carga máxima resistida por la probeta dividida por la sección inicial de la probeta
- Alargamiento de rotura: incremento de longitud que ha sufrido la probeta. Se mide entre dos puntos cuya posición está normalizada y se expresa en un tanto por ciento

- Estricción: es la reducción de la sección que se produce en la zona de la rotura

Normalmente, el límite de proporcionalidad no suele determinarse ya que carece de interés para los cálculos. Tampoco se calcula el módulo de young, ya que éste es característico del material; así, todos los aceros tienen el mismo módulo de elasticidad aunque sus resistencias puedan ser muy diferentes (3).

En el ensayo mide la deformación de la probeta entre dos puntos fijos de la misma a medida que se incrementa la carga aplicada, y se representa gráficamente en función de la tensión. En general, la curva tensión-deformación así obtenida presenta cuatro zonas diferenciadas:

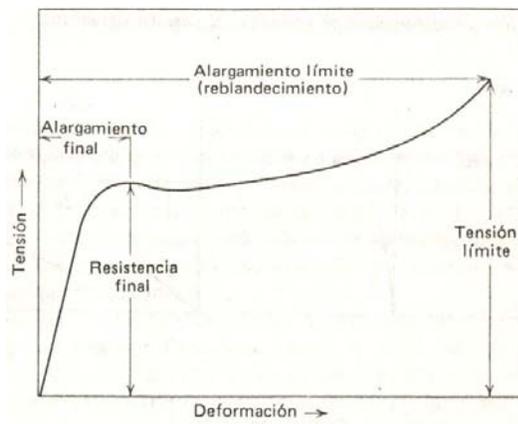
- **Deformaciones elásticas:** en esta zona las deformaciones se reparten a lo largo de la probeta, son de pequeña magnitud y, si se retirara la carga aplicada, la probeta recuperaría su forma inicial. El coeficiente de proporcionalidad entre la tensión y la deformación se denomina módulo de elasticidad o de Young y es característico del material. La tensión más elevada que se alcanza en esta región se denomina límite de fluencia y es el que marca la aparición de este fenómeno. Pueden existir dos zonas de deformación elástica, la primera recta y la segunda curva, siendo el límite de proporcionalidad el valor de la tensión que marca la transición entre ambas. Generalmente, este último valor carece de interés práctico y se define entonces un límite elástico como aquél para el que se produce un alargamiento prefijado de antemano
- **Fluencia o cedencia:** es la deformación brusca de la probeta sin incremento de la carga aplicada. El fenómeno de fluencia se da cuando las impurezas o los elementos de aleación bloquean las dislocaciones de la

red cristalina impidiendo su deslizamiento, mecanismo mediante el cual el material se deforma plásticamente. Alcanzado el límite de fluencia se logra liberar las dislocaciones produciéndose la deformación bruscamente. La deformación en este caso también se distribuye uniformemente a lo largo de la probeta pero concentrándose en las zonas en las que se ha logrado liberar las dislocaciones. No todos los materiales presentan este fenómeno, en cuyo caso la transición entre la deformación elástica y plástica del material no se aprecia de forma clara

- **Deformaciones plásticas:** si se retira la carga aplicada en dicha zona, la probeta recupera sólo parcialmente su forma quedando deformada permanentemente. Las deformaciones en esta región son más acusadas que en la zona elástica
- **Estricción:** llegado un punto del ensayo, las deformaciones se concentran en la parte central de la probeta apreciándose una acusada reducción de la sección de la probeta, momento a partir del cual las deformaciones continuarán acumulándose hasta la rotura de la probeta por esa zona. La estricción es la responsable del descenso de la curva tensión-deformación; realmente las tensiones no disminuyen hasta la rotura, sucede que lo que se representa es el cociente de la fuerza aplicada entre la sección inicial y cuando se produce la estricción la sección disminuye, efecto que no se tiene en cuenta en la representación gráfica. Los materiales frágiles no sufren estricción ni deformaciones plásticas significativas, rompiéndose la probeta de forma brusca. Terminado el ensayo se determina la carga de rotura, carga última o resistencia a la tracción, la máxima resistida por la probeta dividida por su sección inicial, el alargamiento en (%) y la estricción en la zona de la rotura

Otras características que pueden darse mediante el ensayo de tracción son la resiliencia y la tenacidad, que son, respectivamente, las energías elásticas y totales absorbidas y que vienen representadas por el área comprendida bajo la curva tensión-deformación hasta el límite elástico en el primer caso y hasta la rotura en el segundo.

**Figura 22. Curva Esfuerzo-Deformación para materiales**



Fuente: [www.google.com.gt/imgres?imgurl=http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales4090015/images/graficos/cap4/tens-deforpol.jpg&imgrefurl=](http://www.google.com.gt/imgres?imgurl=http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales4090015/images/graficos/cap4/tens-deforpol.jpg&imgrefurl=)

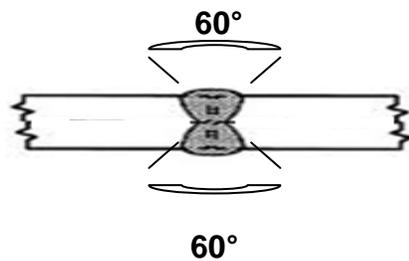
#### **4.1.1. Fabricación de placas del ensayo de tensión**

A continuación se explicarán los detalles sobre el proceso de fabricación de las probetas de acero inoxidable destinadas a los ensayos de tensión para poder obtener las propiedades mecánicas de una probeta con soldadura y sin soldadura.

Probeta Soldada. La barra fue cortada de un eje cuadrado de acero inoxidable AISI 304, proporcionada por la empresa Suplidora Industrial S.A., tratando así de cumplir con las medidas de longitud y área transversal necesarias para poder colocar la pieza en la máquina de ensayo de tensión.

Esta barra fue dividida en dos pedazos de igual longitud para luego ser soldada con un electrodo 308L, relleno así el biselado que se le realizó previamente al proceso de soldado con un ángulo de 30°, en cada uno de los lados de la pieza, formando un prisma tridimensional debido a que la junta realizada era una unión a tope en V doble.

**Figura 23. Ángulo de biselado unión a tope en V doble**



Fuente: [www.google.com.gt/imgres?imgurl](http://www.google.com.gt/imgres?imgurl)

<http://sudandolagotagorda.blogspot.com/2007/10/interpretando-la-simbologa-para-la.html&usg>

Las medidas y peso final de la fabricación de la placa, se mostrarán en la tabla VI.

**Tabla VI. Medidas de probeta soldada**

<i>Medidas y Pesos</i>	
Longitud de la pieza unida (cm)	47.70
Longitud de la pieza sin unir (cm)	23.5
Espesor (cm)	2.21
Ancho (cm)	2.213
Área (cm <sup>2</sup> )	4.89
Peso (Kg)	1.858
Angulo de biselado	30°

Fuente: elaboración propia

Probeta Material Base. Esta barra utilizada como probeta fue obtenida de un eje cuadrado de acero inoxidable AISI 304 con una longitud inicial de 5 metros de largo, llevada a la longitud que se necesitaba la cual era de 47.1 centímetros cortando el eje en uno de sus extremos, tratando de igual forma que la probeta soldada, cumplir con las medidas reglamentarias para su colocación en la máquina de ensayo de tensión. Eje proporcionado por la empresa Suplidora Industrial S.A.

Las medidas y peso final de la fabricación de la placa, se mostrarán en la tabla VII.

**Tabla VII. Medidas de probeta material base**

<i>Medidas y Pesos</i>	
Longitud (cm)	47.1
Espesor (cm)	2.224
Ancho (cm)	2.252
Área (cm <sup>2</sup> )	5.01
Peso (Kg)	1.828

Fuente: elaboración propia

#### **4.1.2. Pulido de placas del ensayo de tensión**

Probeta Soldada. La probeta fue pulida a lo largo del cordón después de realizada la soldadura con un disco de pulidora de 2.5 centímetros de radio, potencia de 750 watts y una velocidad de 2700 revoluciones por minuto; obteniendo al finalizar la operación una superficie lisa y recta.

En la soldadura de los aceros inoxidables se necesita efectuar una limpieza de los depósitos, recurriendo al uso de abrasivos y sustancias corrosivas (soluciones de ácido sulfúrico y clorhídrico). Para ello, se desarrolló

una pasta decapante para la limpieza y el pasivado de los depósitos; con un mínimo riesgo para el personal que los manipula y con la debida protección al material soldado (la pasta decapante no contiene cloruros o azufres). La pasta decapante, se utiliza en la limpieza de superficies oxidadas del revenido que aparece después de aplicar soldadura (eléctrica o autógena) en los aceros inoxidable.

La pasta decapante utilizada fue una UTP decapante para aceros inoxidable, con una composición de mezcla de sulfatos y ácidos. Este material fue utilizado para los laterales de la probeta y no para la cara donde se realizará el ataque químico, ya que esto genera un alto valor a la resistencia contra el ataque químico.

Probeta Material Base. A esta placa únicamente se le realizó un pulido en las caras laterales para brindarle brillo, utilizando el mismo material UTP decapante que en la probeta soldada.

#### **4.1.3. Análisis del ensayo de tensión**

En este capítulo se presentan resultados numéricos en base a la realización de los ensayos de tensión sobre probetas rectangulares, una con material base y otra con material de aporte o soldada. El objetivo fundamental es analizar la influencia de la carga y esfuerzo máximo en la deformación de la probeta, tomando en cuenta paralelamente las resistencias en base al diseño.

El estado de la carga se provoca generando mediante una máquina de ensayo de tensión, dos fuerzas con sentidos opuestos que formen una tracción en la probeta para así determinar a qué valor de carga axial máxima existe una fatiga del material y así también determinar las diferencias que existen entre

una probeta soldada y otra de material base, tomando en cuenta la reducción del área en la probeta material base, ya que en la probeta soldada únicamente un desprendimiento de la unión.

**Figura 24. Ensayo de tensión probeta sin soldadura, laboratorio CII**



Fuente: elaboración propia

Se realizará la comparación entre la probeta soldada y la probeta material base; posterior a eso se analizarán los resultados obtenidos. Estos cálculos son mostrados en la tabla VIII.

**Tabla VIII. Resultados ensayo de tensión**

Identificación	Longitud (cm)	Espesor (cm)	Ancho (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Peso (Kg)	Carga Máxima (Kg)	Esfuerzo Máximo (Mpa)	Elongación 20%	Reducción de área (cm <sup>2</sup> .)
Tensión (con soldadura)	47.7	2.21	2.213	4.89	1.858	30000	601.63	5	----
Tensión (sin soldadura)	47.1	2.224	2.252	5.01	1.828	35000	685.1	32	1.91

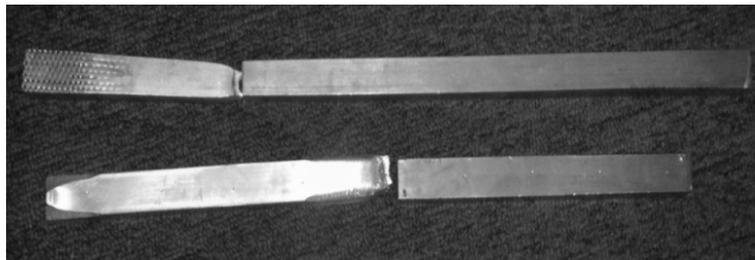
Fuente: elaboración propia

De los resultados que se pueden obtener sobre el ensayo a tensión, aquí se analizarán exclusivamente aquellos que sirven para cumplir el objetivo de este trabajo de graduación.

En base a ello, se puede definir cierta superioridad en la carga máxima que puede soportar una barra sin soldadura o únicamente con material base, teniendo un aproximado de 15% de superioridad. Determinando de igual manera que la probeta material base al no ser expuesta a cambios térmicos debido a la soldadura, mantiene su fragilidad baja aumentando su ductilidad retardando la fractura en la pieza. El esfuerzo máximo da como resultado aproximadamente 84 Mpa de diferencia, donde de igual manera es superior la barra sin soldadura.

La principal influencia en la deformación de rotura del material es la biaxialidad del campo tensional, tanto así que la velocidad de deformación tiende a aumentar o disminuir la deformación de la ruptura, ya que un material dúctil mantiene una resistencia a la ruptura mayor que una material frágil.

**Figura 25. Probetas al finalizar el ensayo de tensión**



Fuente: elaboración propia

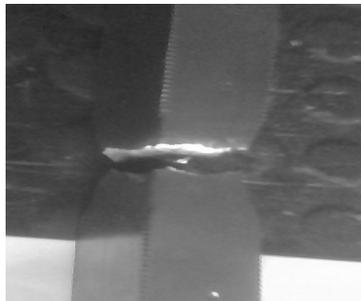
Se podría mejorar la soldadura mediante un biselado más exacto, para tener la oportunidad de aumentar su capacidad de carga y esfuerzo máximo. Ya que una buena soldadura puede ayudar a mejorar las propiedades mecánicas de una pieza que vaya a ser utilizada con un fin industrial, inclusive superando las características de la resistencia mecánica de una pieza sin soldadura.

Las variables que se deben considerar para el análisis comparativo podría ser el tipo de electrodo a utilizar, el ángulo del biselado si se pudiera mejorar ó

hacerlo de manera más exacta y el efecto que tiene la pieza al sufrir un precalentamiento debido a la soldadura.

Principios metalúrgicos pueden afectar los resultados finales de los procesos de soldadura, como lo pueden ser; la temperatura de fusión, la velocidad de calentamiento y de enfriamiento, esto a la larga puede tener consecuencias en las propiedades mecánicas de una pieza de acero inoxidable. Si el metal desarrolla esfuerzos residuales que pueden ocasionar fractura, se recomienda el precalentamiento y el post calentamiento.

**Figura 26. Falla de probeta sin soldadura**



Fuente: elaboración propia

**Figura 27. Falla de probeta soldada**



Fuente: elaboración propia

#### **4.1.4. Análisis metalográfico del ensayo de tensión**

El trabajo de investigación tiene como fin determinar las estructuras cristalinas que se forman debido al esfuerzo al que se somete el material Acero Inoxidable AISI 304. La forma más sencilla de realizar el estudio, es examinando las superficies metálicas a simple vista, logrando determinar de esta forma las características macroscópicas. Este examen se denomina macrográfico y de ellos se extraen datos sobre los tratamientos mecánicos sufridos por el material, es decir, determinar los defectos de las grietas en las partes soldadas.

Por otra parte existe otro tipo de examen que es el utilizado en esta investigación, el micrográfico, que representa una técnica avanzada y se basa en la amplificación de la superficie mediante instrumentos ópticos como el microscopio, para observar las características estructurales microscópicas. Este tipo de examen permite realizar el estudio o controlar el proceso térmico al que ha sido sometido un metal, debido a que los mismos colocan en evidencia la estructura o los cambios estructurales que sufren en dicho proceso. Como consecuencia de ello también es posible deducir las variaciones que experimentan sus propiedades mecánicas, dependiendo de los constituyentes metalográfico presentes en la estructura.

Los estudios ópticos microscópicos producen resultados que no solo son útiles a los investigadores sino también a los ingenieros. El examen de la microestructura es muy útil para determinar si un metal o aleación satisface las especificaciones en relación a trabajos mecánicos anteriores, tratamientos térmicos y composición en general. La microestructura es un instrumento para analizar las fallas metálicas y para controlar procesos industriales. Para un estudio de ella se necesita una preparación aún más cuidadosa de la superficie.

No obstante el procedimiento de preparación de la superficie es básicamente el mismo para ambos ensayos metalográficos.

Las técnicas de preparación metalográficas dejan una superficie limpia y pareja, las dejan aptas para el ataque por el reactivo químico, como por ejemplo puede ser nital para el caso de los aceros al carbono o ácido clorhídrico para el caso de aceros inoxidable, ya que es una solución más fuerte necesitada para este tipo de material; de tal manera de hacer visibles las características estructurales del material metálico o aleación. La selección del reactivo de ataque está determinada por el metal o aleación y la estructura específica que se desea ver.

En los materiales metálicos analizados se pueden encontrar estructuras de una o más fases, en los cuales es posible la obtención de contrastes o más específicamente, la visión de fronteras de granos, producto de las diferencias en la rapidez a que los diversos granos son atacados por el reactivo. Esta diferencia en la rapidez de ataque guarda relación con el ángulo que se forma entre las diferentes secciones de grano con el plano de la superficie pulida. La luz del microscopio se reflejara fuera del microscopio al chocar con la orilla de estos valles, haciendo que las fronteras de grano aparezcan como líneas oscuras.

La amplificación máxima obtenida con el microscopio óptico es de unos 2000x. La limitación principal es la longitud de onda de la luz visible, la cual limita la resolución de los detalles finos de la muestra metalográfica. La utilidad del microscopio metalúrgico puede ser ampliada debido a la incorporación de diversos aparatos auxiliares, como son los que permiten observar aspectos estructurales que no son visibles en condiciones normales. Puesto que el ojo

humano es insensible a las diferencias de fase, debe incorporarse al microscopio un aparato óptico especial.

Las diferencias de fases causados por variaciones extremadamente pequeñas al nivel de micro estructuras, se transforman más tarde, en diferencias de intensidad en la imagen observada, revelando de esta forma aspectos invisibles bajo iluminación ordinaria.

Preparación de la muestra. La muestra debe seleccionarse de la zona de la pieza que necesita examinarse y en la orientación apropiada, debe ser de un tamaño de fácil manipulación. La muestra plana contenía partes en su área transversal a atacar disparejas y con un esmeril se emparejo, manteniendo la muestra fría sumergiéndola frecuentemente en agua durante la operación de esmerilado, cosa de no alterar su estado con el calor que se produce en el acto de pulido y así mantener una misma fase.

En todas las operaciones de esmerilado, la muestra debe moverse en sentido perpendicular a la ralladura existente. El esmerilado continuó hasta que la superficie quedó plana y todas las ralladuras debidas al corte manual o al disco cortador no sean visibles, emulando la superficie a un espejo. Es decir, si el flujo de grano o la distorsión es importante, puede ser que una sección transversal de la parte no muestre granos alargados; únicamente una tajada paralela a la dirección de laminado revelaría adecuadamente los granos alargados.

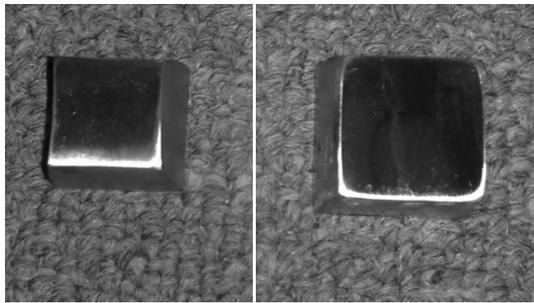
Luego del paso anterior, la muestra se pule sobre una serie de hojas de esmeril o lijas que contienen abrasivos finos. El primer papel fue una lija número 50 luego 150, 600, 1000 y finalmente fue posible encontrar en el mercado una número 2000, debido a que se obtuvo al finalizar un acabado tipo espejo.

**Figura 28. Probetas de ensayo de tensión pulidas con lija 1000**



Fuente: elaboración propia

**Figura 29. Probetas de ensayo de tensión pulidas con lija 2000**



Fuente: elaboración propia

Cuando se cambiaba al siguiente número de lija se realizó un giro de 90° a la muestra, a fin de eliminar el rayado realizado con la lija anterior. Las operaciones de pulido intermedio con lijas de esmeril se hacen en húmedo; sin embargo, en ciertos casos, es conveniente realizar este paso en seco ya que ciertas aleaciones se corroen fácilmente por la acción del agua.

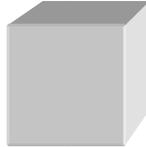
**Figura 30. Diseño volumétrico de probeta con soldadura**



Fuente: elaboración propia

Las medidas de la probeta de la figura 30 son las siguientes, altura de 1.3 cm, ancho de 2.2 cm y grosor de 2.1 cm

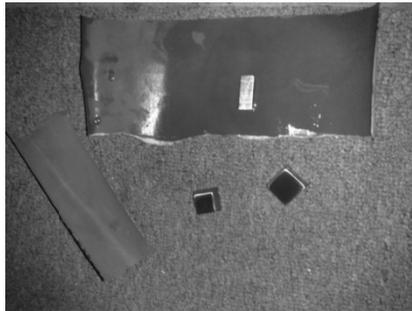
**Figura 31. Diseño volumétrico de probeta sin soldadura**



Fuente: elaboración propia

Las medidas de la probeta de la figura 31 son las siguientes, altura de 1.4 cm, ancho de 1.8 cm y grosor de 1.8 cm.

**Figura 32. Operación de pulido de probetas**



Fuente: elaboración propia

Al finalizar la preparación de las probetas, se llevo a cabo lo que es el ataque químico. Una vez se logró el acabado de espejo, se atacó el material con varias mezclas, y sus pruebas fueron las siguientes:

1er. Intento. Una mezcla de ácido clorhídrico al 5%, mezclado con alcohol desnaturalizado (al 99%), al 95%. Fue colocada en un ojo de guey, en una cantidad de 10 mililitros introduciendo la cara pulida de la probeta en la pequeña laguna de mezcla, dando así un lapso de 2 minutos. La pieza mostró una capa blanquecina, manteniendo una superficie sin óxido. Al tomar las

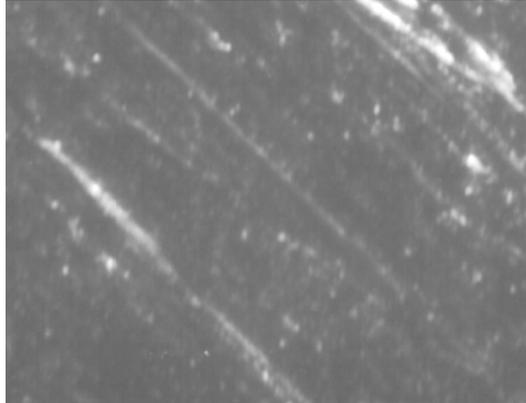
micrografías en el microscopio nos mostró una estructura distorsionada, la cual todavía mostraba rayas de la forma del lijado.

2do. Intento. Una mezcla de ácido clorhídrico al 10%, con alcohol desnaturalizado (al 99%), al 90%. Fue colocada en un ojo de guey, en una misma cantidad de 10 mililitros introduciendo la cara pulida de la probeta en la pequeña laguna de mezcla, esto por un lapso de 15 minutos. La pieza mostró una capa blanquecina, manteniendo una superficie con poco óxido. Al tomar las micrografías en el microscopio nos mostró una estructura cristalina deteriorada, esta mezcla no fue suficiente para determinar la forma del grano.

3er. Intento. Una mezcla de ácido clorhídrico al 15%, con alcohol desnaturalizado (al 99%), al 85%. Fue colocada en un ojo de guey, en una cantidad de 10 mililitros introduciendo la cara pulida de la probeta en la pequeña laguna de mezcla. Por un lapso de 30 minutos. La pieza mostró una capa blanquecina, manteniendo la superficie sin óxido. Al tomar las micrografías en el microscopio mostró una imagen, la cual muestra de manera semiclara la estructura cristalina del acero.

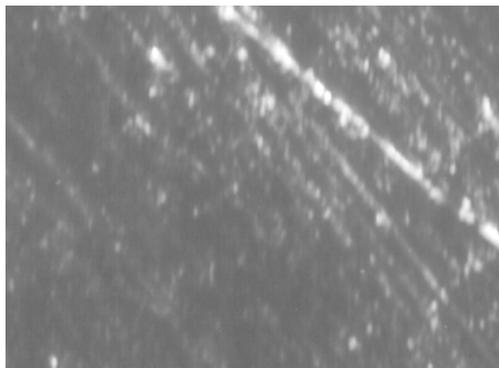
Se mostrarán las siguientes figuras con lo que respecta a las micrografías de acero inoxidable 304 según la composición de la mezcla utilizada para revelar la estructura del grano después de una ruptura a tensión. Las micrografías 1, 2 y 3 según su descripción, serán:

**Figura 33. Micrografía No. 1A. Probeta acero inoxidable AISI 304.  
Ensayo de tensión, muestra con soldadura. 5% de HCL con 95% alcohol  
desnaturalizado**



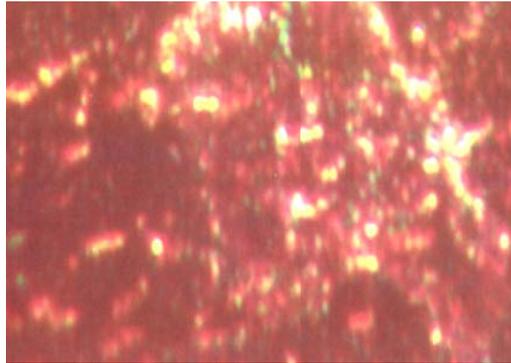
Fuente: elaboración propia

**Figura 34. Micrografía No. 1B. Probeta acero inoxidable AISI 304.  
Ensayo de tensión, muestra sin soldadura. 5% de HCL con 95% alcohol  
desnaturalizado**



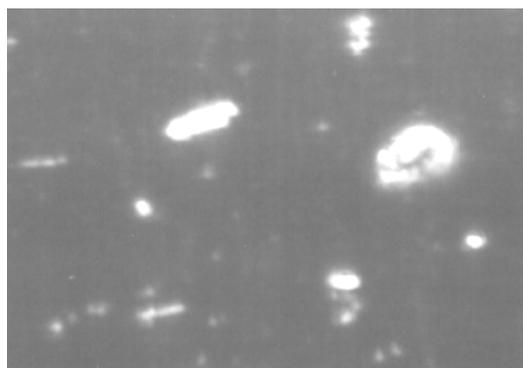
Fuente: elaboración propia

**Figura 35. Micrografía No. 2A. Probeta acero inoxidable AISI 304.  
Ensayo de tensión, muestra con soldadura. 10% de HCL con 90% alcohol  
desnaturalizado**



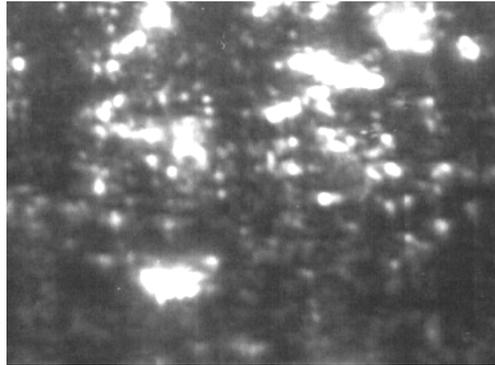
Fuente: elaboración propia

**Figura 36. Micrografía No. 2B. Probeta acero inoxidable AISI 304.  
Ensayo de tensión, muestra sin soldadura. 10% de HCL con 90% alcohol  
desnaturalizado**



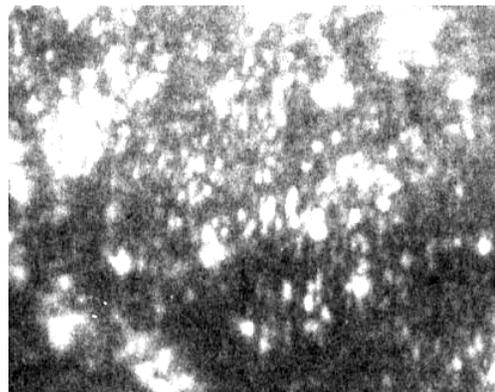
Fuente: elaboración propia

**Figura 37. Micrografía No. 3A. Probeta acero inoxidable AISI 304.  
Ensayo de tensión, muestra con soldadura. 15% de HCL con 85% alcohol  
desnaturalizado**



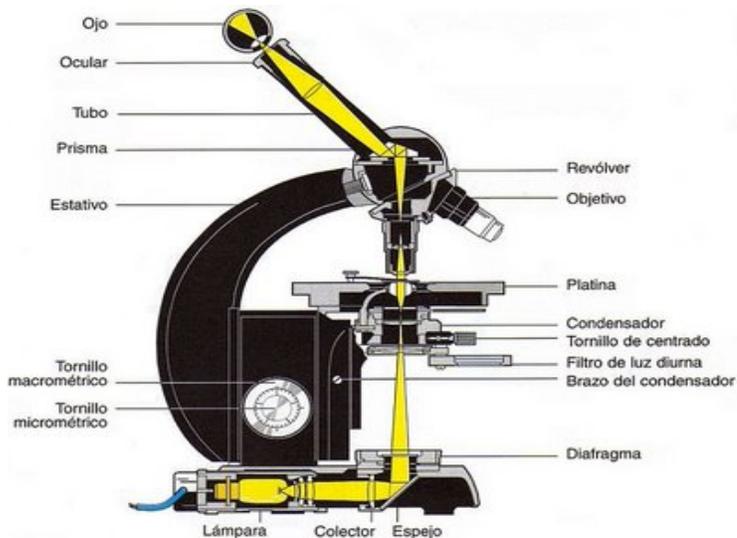
Fuente: elaboración propia

**Figura 38. Micrografía No. 3B. Probeta acero inoxidable AISI 304.  
Ensayo de tensión, muestra sin soldadura. 15% de HCL con 85% Alcohol  
desnaturalizado**



Fuente: elaboración propia

**Figura 39. Partes del microscopio**



Fuente: [http://4.bp.blogspot.com/\\_whBA\\_UV\\_fsc/Sg2uIVHDeQI/AAAAAAAAANo/95k2C\\_j7H-I/s400](http://4.bp.blogspot.com/_whBA_UV_fsc/Sg2uIVHDeQI/AAAAAAAAANo/95k2C_j7H-I/s400)

#### **4.2. Ensayo 2. Doblado**

Es evidente que para fabricar las cosas, se utilizan materias diversas, y para conocer su utilidad debemos realizar ensayos, ya que no sirve para lo mismo la madera que el acero, ambas substancias tienen cualidades diferentes. Los materiales que nos interesan aquí son los metales, y de sus cualidades más importantes: su composición química y sus características mecánicas.

El ensayo de doblado es sumamente importante, ya que nos muestra el plegado que puede tener un material sin fracturarse. Esta práctica consiste en colocar la probeta en dos apoyos, se somete a una carga progresiva en el centro de la misma, se dobla hasta la aparición de grietas o hasta que se considere suficiente el ángulo de doblado, y el estudio de la zona del doblado. Las grietas, si las hay, los pliegues y demás detalles de esa zona proporcionan información útil sobre el comportamiento de ese material en trabajos de flexión.

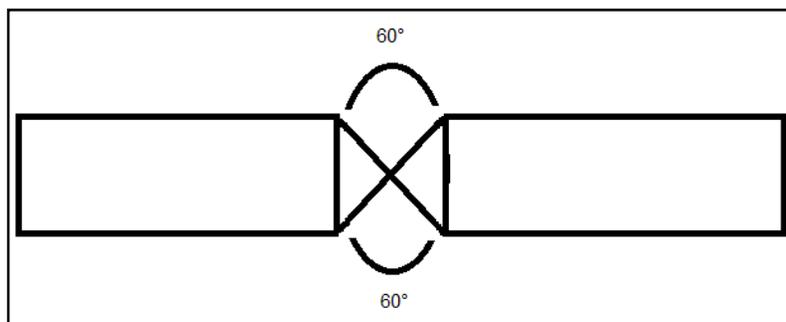
La máquina donde es colocada esta probeta se llama Máquina Plegadora, procediendo consecutivamente a su doblado con el radio de giro marcado en la norma y que va a depender directamente del ancho de la barra, doblando finalmente la probeta  $180^\circ$  de la posición final. Y como un buen resultado final, la placa deberá de quedar de la misma forma que sin haber realizado el ensayo, sin fisuras, grietas ó desprendimientos del material.

#### 4.2.1. Fabricación de placas del ensayo de doblado

La pieza de acero inoxidable AISI 304 utilizada para el ensayo de doblado igualmente que la utilizada en el ensayo a tensión fue brindada por la empresa Suplidora Industrial S.A. La placa fue cortada en dos partes de igual largo con 13 centímetros, espesor de 0.93 centímetros y 1 pulgada de ancho en cada una de ellas. Estas piezas fueron unidas por medio de una soldadura especial para aceros inoxidables, construyendo finalmente una sola probeta.

De igual forma que las piezas del ensayo de tensión, se realizó el biselado a las placas divididas a  $30^\circ$ , formando ángulo completo de la unión de  $60^\circ$ , con un triangulo interno para rellenarlo con material de aporte, electrodo 308L.

**Figura 40. Ángulo de biselado unión a tope en V doble**



Fuente: elaboración propia

Las medidas y peso final de la placa ya fabricada, se mostrarán en la tabla siguiente;

**Tabla IX. Medidas de probeta de ensayo de doblado**

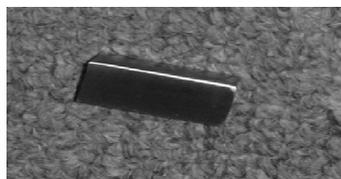
<i>Medidas y Pesos</i>	
Longitud de la pieza unida (cm)	25.8
Longitud de la pieza sin unir (cm)	13
Espesor (cm)	0.936
Ancho (cm)	2.384
Área (cm <sup>2</sup> )	1.08
Peso (Kg)	0.452
Angulo de biselado	30°

Fuente: elaboración propia

#### **4.2.2. Pulido de placas del ensayo de doblado**

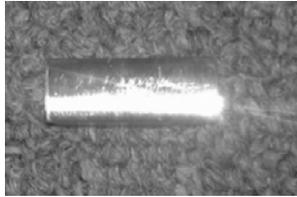
Esta placa con material de aporte, al igual que se realizó con las probetas de ensayos de tensión, fue pulida al finalizar la soldadura para obtener una superficie lisa. Al finalizar este proceso se continuo con un pulido más fino, se realizó con los siguientes tipos de lijas; 50, 180, 600, 1000, 2000 y una esponja para pulir. Todo esto se llevo a cabo con la ayuda de un decapante especial para pulir aceros inoxidable.

**Figura 41. Probeta de ensayo de doblado pulida con lija 1000**



Fuente: elaboración propia

**Figura 42. Probeta de ensayo de doblado pulida con lija 2000**



Fuente: elaboración propia

#### **4.2.3. Análisis del ensayo de doblado**

El ensayo de doblado fue realizado para una probeta soldada aproximadamente en su centro, en donde se deseaba obtener propiedades mecánicas que pudieran brindar las características que conlleva una soldadura de acero inoxidable, en este caso para utilidades industriales diferentes a las de tracción, tratando así de observar el comportamiento de la soldadura a través de una carga en el centro de gravedad que pueda hacer que la probeta muestre la ductilidad en su material, sus ventajas y desventajas con lo que respecta a su uso, tratando así de investigar información experimental sobre uno de los materiales creados con mejores virtudes en el mercado actual, el acero inoxidable.

**Tabla X. Resultados ensayo de doblado**

Identificación	Longitud (cm)	Espesor (cm)	Ancho (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Peso (Kg)	Carga Máxima (Kg)	Prueba de Doblado 90°
Doblado (Soldadura)	25.8	0.936	2.384	1.08	0.452	1480	Paso Prueba

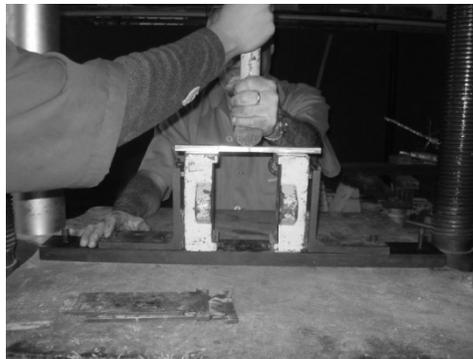
Fuente: elaboración propia

**Figura 43. Probeta para ensayo de doblado**



Fuente: elaboración propia

**Figura 44. Ensayo de doblado, laboratorio CII**



Fuente: elaboración propia

La resistencia del material en un ensayo de tensión no es el único parámetro que debe utilizarse al diseñar o analizar una estructura; controlar las deformaciones para que la estructura cumpla con el propósito para el cual se diseñó tiene la misma o mayor importancia. El análisis de las deformaciones se relacionan con los cambios en la forma de la estructura que generan las cargas aplicadas, tomando en cuenta los cambios manteniendo alta su rigidez o su ductilidad, dependiendo el tipo de material o el tratamiento térmico al cual haya sido sometido.

La prueba del análisis fue exitosa, ya que superó la prueba de doblado a 90°, obteniendo que la carga máxima soportada por la barra sea de 1480 Kg. El doblado es un indicador de la ductilidad del material definido ya sea por la ausencia o presencia de fisuras en este ensayo, además permite determinar la aptitud a la deformación plástica del material. La probeta definida para esto mantuvo su rigidez durante el ensayo hasta el punto donde la ductilidad del material no permitió la ruptura de la unión, dando como resultado baja magnitud de grietas al finalizarlo; pero deformando el grano de la soldadura en la unión.

En la actividad de soldadura la preparación de los metales base como la limpieza y el biselado con los ángulos de inclinación adecuados son el factor primordial para la obtención de una unión resistente, a todo ello se puede definir que el biselado de las piezas al unirse en la junta durante el momento de la soldadura fue el adecuado, tomando en cuenta el ángulo utilizado de 30° en cada placa, permitiendo que el cordón del material de aporte colocado en la concavidad angular sea uniforme.

Basándose en la teoría de los diagramas de esfuerzo-deformación de los materiales se conoce que cada uno de ellos son similares si se trata del mismo material y de manera general permite agrupar los materiales dentro de dos categorías con propiedades afines que se denominan materiales dúctiles y materiales frágiles. Los diagramas de materiales dúctiles se caracterizan por ser capaces de resistir grandes deformaciones antes de la rotura, en este caso verificándolo mediante el ensayo de doblado con la probeta soldada en su centro; mientras que los frágiles presentan un alargamiento bajo cuando llegan al punto de rotura.

Y es así que todos los materiales metálicos tienen una combinación de comportamiento elástico y plástico en mayor o menor proporción, la placa al ser

removida de la máquina tuvo un cambio en su forma, no regresando a su estado original, mostrando así un cambio en su curva de esfuerzo-deformación, proporcionando que el esfuerzo utilizado haya sido suficiente para que el material fluyera plásticamente hacia la deformación obtenida, superando su límite elástico.

#### **4.2.4. Análisis metalográfico del ensayo de doblado**

El análisis metalográfico se centraliza en experiencias que conllevan metodologías para poder entender la estructura del grano en un acero inoxidable, indica una forma de preparar muestras pequeñas de acero, con el fin de realizar un examen metalográfico. Los pasos a seguir en el procedimiento de preparación son los mismos para todos los materiales difiriendo solo las herramientas de corte y el grado de finura de los papeles de esmeril según la dureza del material. Tomando en cuenta siempre el reactivo de ataque a utilizar dependiendo del tipo de aleación.

Los ensayos micrográficos se realizan sobre muestras o probetas de los materiales que han de ser sometidos a estudio, se preparan en una superficie que luego de ser pulida convenientemente, se ataca con reactivos químicos apropiados a la finalidad de determinar la estructura cristalina y la forma del grano.

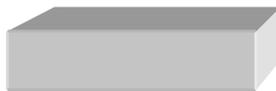
La importancia del pulido de la muestra es fundamental, ya que los granos y otras características de los metales no pueden verse al menos que la muestra se desbaste y se pula para eliminar las ralladuras. Se utilizan diferentes métodos de pulido tales como el electrolítico, el rotatorio o el de vibración.

El propósito del ataque químico es hacer visibles las características estructurales del metal o aleación. El proceso debe ser tal que queden claramente diferenciadas las partes de la microestructura, esto se logra mediante un reactivo apropiado que somete a la superficie pulida a una acción química. Los reactivos que se utilizan consisten en ácidos orgánicos o inorgánicos y los álcalis disueltos en alcohol, agua u otros solventes.

Preparación de la muestra. La muestra debe seleccionarse de la zona de la pieza que necesita examinarse y en la orientación apropiada. Los pasos seguidos para la realización de la probeta que fue utilizada para el análisis metalográfico en el ensayo de doblado fueron iguales a los realizados para las muestras en análisis metalográfico del ensayo de tensión.

Probeta utilizada para el ensayo de doblado, fue cortada por medio de una sierra eléctrica de disco que cuenta con sistema de enfriamiento manual, se realizó un corte, y este fue en la sección transversal.

**Figura 45. Diseño volumétrico de probeta para ensayo de doblado**



Fuente: elaboración propia

Las medidas de la probeta de la figura 43 son las siguientes, altura de 1.1 cm, ancho de 2.3 cm y grosor de 0.9 cm.

A la superficie superior se les fue aplicado un esmerilado para retirar el exceso de material producido por el corte. Esta misma cara fue pulida con distintos números de lija de agua, para delimitar una superficie plana a lo largo

de los cortes y facilitar el estudio. Las lijas utilizadas fueron número 50, 150, 600, 1000 y 2000.

Al finalizar la preparación de las probetas, se llevo a cabo lo que es el ataque químico. Una vez se logró el acabado de espejo, se atacó el material con varias mezclas y sus pruebas serán detalladas a continuación.

1er. Intento. Una mezcla de ácido clorhídrico al 5%, mezclado con alcohol desnaturalizado (99), al 95%. Fue colocada en un ojo de guey, en una cantidad de 10 mililitros introduciendo la cara pulida de la probeta en la pequeña laguna de mezcla, dando así un lapso de 2 minutos. La pieza mostró una capa blanquecina, manteniendo una superficie sin óxido. Al tomar las micrografías en el microscopio nos mostró una estructura distorsionada, la cual todavía mostraba rayas de la forma del lijado.

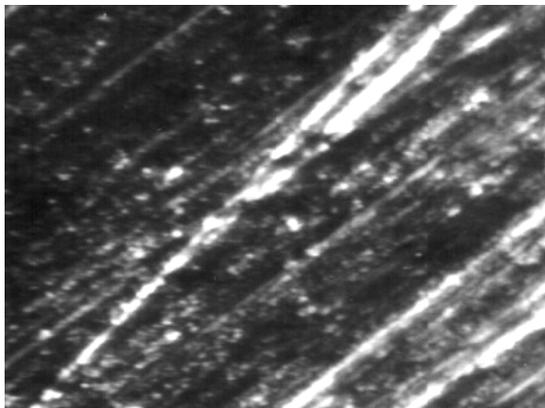
2do. Intento. Una mezcla de ácido clorhídrico al 10%, con alcohol desnaturalizado (99%), al 90%. Fue colocada en un ojo de guey, en una cantidad de 10 mililitros introduciendo la cara pulida de la probeta en la pequeña laguna de mezcla, esto por un lapso de 15 minutos. La pieza mostró una capa blanquecina, manteniendo una superficie sin óxido. Al tomar las micrografías en el microscopio nos mostró una estructura cristalina deteriorada, esta mezcla no fue suficiente para determinar la forma del grano.

3er. Intento. Una mezcla de ácido clorhídrico al 15%, con alcohol desnaturalizado (99%), al 85%. Fue colocada en un ojo de guey, en una cantidad de 10 mililitros introduciendo la cara pulida de la probeta en la pequeña laguna de mezcla. Por un lapso de 30 minutos. La pieza mostró una capa blanquecina, manteniendo la superficie sin óxido. Al tomar las micrografías

en el microscopio mostró una imagen, la cual muestra de manera semiclaro la estructura cristalina del acero.

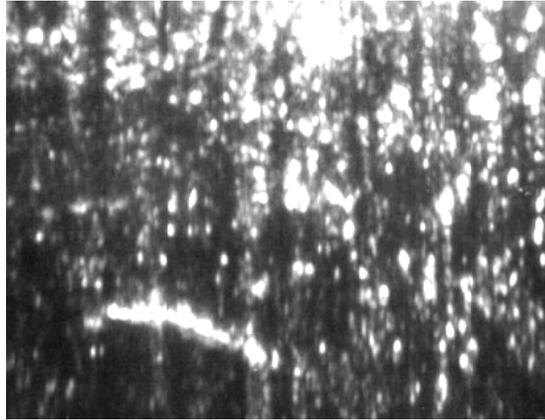
A continuación se mostrarán las siguientes figuras con lo que respecta a las micrografías de un acero inoxidable 304 según la composición de la mezcla utilizada para revelar la estructura del grano después de una deformación plástica de la pieza al finalizar el ensayo de doblado. Las micrografías 4, 5 y 6 según su descripción, serán:

**Figura 46. Micrografía No. 4A. Probeta acero inoxidable AISI 304.  
Ensayo de doblado. 5% de HCL con 95% alcohol desnaturalizado**



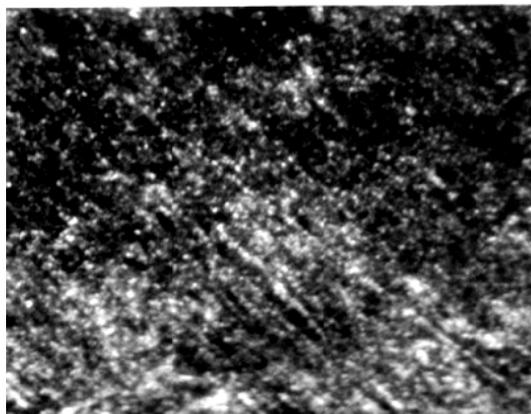
Fuente: elaboración propia

**Figura 47. Micrografía No. 4B. Probeta acero inoxidable AISI 304. Ensayo de doblado. 10% de HCL con 90% alcohol desnaturalizado**



Fuente: elaboración propia

**Figura 48. Micrografía No. 4C. Probeta acero inoxidable AISI 304. Ensayo de doblado. 15% de HCL con 85% alcohol desnaturalizado**



Fuente: elaboración propia



## CONCLUSIONES

1. La junta utilizada para realizar la probeta con material de aporte en los ensayos de tensión y doblado fue una unión a tope en V doble con biselado a  $30^\circ$  en cada pieza, debido a que ésta es una de las uniones con una resistencia a la ruptura bastante alta.
2. A través de los ensayos metalográficos es posible analizar las fallas de materiales, los cuales permiten eliminar las causas que han originado dichas fracturas o fisuras.
3. Al realizar el ensayo de tensión comparando 2 tipos de probeta; una con soldadura y una sin soldadura, se puede observar la importancia de mantener en una sola pieza el material en su instalación, ya que aunque la soldadura sea de alta calidad y la unión sea la indicada, no iguala a los esfuerzos de tensión originales de una pieza con material base para la carga máxima aplicada.
4. Con lo que respecta al análisis del ensayo de doblado, se puede analizar que el tipo de soldadura y biselado realizado para la probeta fue el deseado, con el fin de que ésta no sufriera una ruptura en su centro al doblar la pieza a  $90^\circ$ , manteniendo alta la ductilidad de la probeta.
5. Para escoger el electrodo de acero inoxidable correcto es necesario analizar las condiciones de trabajo en particular y luego determinar el tipo y diámetro de electrodo que más se adapte a estas condiciones.

6. El tipo de ácido y su concentración utilizado para revelar la forma del grano en los ensayos metalográficos para aceros se encuentra en función del tipo de aleación, ya que las resistencias al agente químico varían.
  
7. La forma del grano variará dependiendo los cambios térmicos al que esté expuesto el material, ya que al realizar un proceso de unión por soldadura en una pieza se modifica su estructura cristalina.

## RECOMENDACIONES

1. Cuando se realiza una soldadura de acero inoxidable, durante la cual ciertas partes conductoras de energía eléctrica están al descubierto, el operador tiene que observar con especial cuidado las reglas de seguridad industrial, a fin de contar con la máxima protección personal y también proteger a las otras personas que trabajan a su alrededor.
2. Para la recomposición de la capa pasiva en el acero inoxidable se recomienda utilizar una solución de ácido nítrico (15% o 20%), mezclado con alcohol desnaturalizado al 99%, que debe actuar sobre el material por 30 minutos, después de que el mismo deba ser lavado con abundante agua.
3. En el momento que se debe soldar una pieza de acero inoxidable se debe verificar el tipo de electrodo a utilizar, el cual sea compatible al material base y pueda brindar las mejores propiedades de unión en la pieza, tomando en cuenta el biselado respectivo dependiendo del grosor del objeto a soldar.
4. Tomar las medidas de precaución respectivas al utilizar los diferentes tipos de ácidos para lo que es el ataque químico, ya que el acero inoxidable es un material bastante difícil de trabajar y los ácidos utilizados tienen un potencial alto de corrosión al tener contacto con la piel.

5. Definir el ángulo correcto de biselado, ya que esto aumenta el esfuerzo de doblado y tracción en las piezas soldadas, mejorando la resistencia mecánica del material.

## BIBLIOGRAFÍA

1. CRUZ V., Juan Francisco. *Soldadura de Acero Inoxidable y Análisis Práctico de Ensayos No Destructivos*. Facultad de ingeniería de la Universidad de San Carlos, Guatemala. 1988. 65 p.
2. GARAVITO, Julio. *Manual de Impacto de Protocolo, curso de materiales*. Laboratorio de producción, escuela colombiana de ingeniería. Colombia. 2004. 27 p.
3. HORWITZ, Henry. *Soldadura, Aplicaciones y Práctica*. 1ª edición. México: Editorial Marcombo-Alfaomega, 1997. 787 p. ISBN: 9701502302.
4. BERNASCONI, Eduardo. *Análisis de fallas* [en línea]. Septiembre, 2007. Disponible en web: <<http://analizandofallas.blogspot.com>> [Consulta: Mayo de 2010]
5. WIKIPEDIA. *Steel Glossary, American Iron and Steel Institute* [en línea]. Marzo, 2011. Disponible en web: <[http://es.wikipedia.org/wiki/Acero\\_inoxidable](http://es.wikipedia.org/wiki/Acero_inoxidable)> [Consulta: Marzo de 2010]
6. ALL WOW. *Soldadura* [en línea]. Enero, 2011. Disponible en web: <<http://wow-video.ru/index.php?key=soldadura>> [Consulta: Junio de 2010]

7. EMPRESAS LARY S.A. DE C.V. *Soldadura UTP, consejos para soldadura de acero inoxidable* [en línea]. Febrero, 2011. Disponible en web: <<http://www.empresaslary.com/>> [Consulta: Septiembre de 2010]
8. FUNDICIONES GÓMEZ, S.A. *Probetas para ensayos destructivos*. Marzo 2011. Disponible en web: <<http://www.fundicionesgomez.com/>> [Consulta: Junio de 2010]
9. PRERA F., José Antonio. *Guía para el cálculo, diseño y fabricación de construcciones soldadas*. Facultad de ingeniería de la Universidad de San Carlos, Guatemala. 1999. 392 p.
10. ZUÑIGA R., Pablo Rodolfo. *Historia de la Soldadura*. Facultad de ingeniería de la Universidad de San Carlos, Guatemala. 2008. 33 p.
11. \_\_\_\_\_ . *Soldabilidad de los Aceros*. Facultad de ingeniería de la Universidad de San Carlos, Guatemala. 1999. 92 p.

## APÉNDICE

### Apéndice A

#### Electrodos comerciales en Guatemala

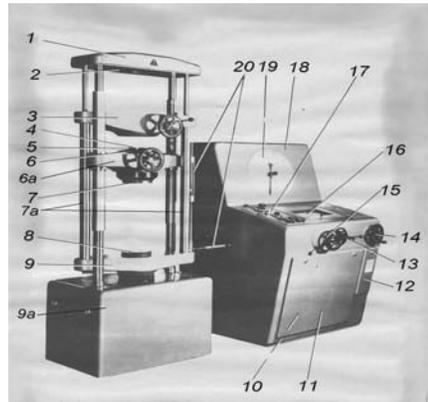
Electrodos de Acero Inoxidable Comerciales en Guatemala (únicamente serie 300)				
<i>Electrodo</i>	<i>Empresa Distribuidora</i>	<i>Servicio del acero</i>	<i>Utilización</i>	<i>Resistencia a la tracción (psi)</i>
308	Distribuidora Técnica S.A., Tecno Industrial, Casa del Soldador, Fabrigas.	Soldado, estabilizado y con alivio de tensiones	Arco suave, mínimo chisporroteo, excelente apariencia para equipos médicos, sanitarios, químicos, tanques, recipientes y tuberías.	83000
309	Distribuidora Técnica S.A., Tecno Industrial, Fabrigas.	Soldado	Electrodo de acero inoxidable de bajo contenido de carbón, se usa para revestir aceros donde la corrosión intergranular debe mantenerse al mínimo.	84000
310	Tecno Industrial, Fabrigas.	Soldado	Para soldar todo tipo de aceros inoxidables para reparar partes expuestas a severas condiciones de corrosión y calor.	90000
312	Distribuidora Técnica S.A., Tecno Industrial, Casa del Soldador, Fabrigas.	Soldadura de tuberías de alimentos	Para soldar aceros expuestos a máxima tensión, resiste altas temperaturas, abrasión severa, base para recubrimientos duros.	120000
316	Distribuidora Técnica S.A., Casa del Soldador, Fabrigas.	Soldadura de tuberías de alimentos	Se usan cuando no sea de importancia la corrosión en la condición soldada.	78000

Fuente: elaboración propia.

Datos obtenidos por cotización a empresas guatemaltecas que se encargan de distribuir electrodos para soldadura de acero inoxidable.

## Apéndice B

### Máquina Universal



La instalación de ensayo se compone de:

- Máquina de ensayo en sí (1)
- Panel de control (18)

La máquina de ensayo consta de:

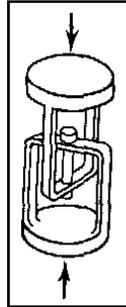
- Placa de guía (2)
- Dispositivos de sujeción y agarre (4, 5, 6, 7 y 8)
- Base (9a)
- Placa de altura ajustable (6a)
- Marco suspendido con las placas (3) y (9), unidas solidariamente por dos columnas (7a).
- Regleta y otros dispositivos de medida (20)

Aplicaciones de ensayos, creación de códigos, registros, consultas, estadísticas y ayudas se encuentran en este software. Este consta de:

- Sistema hidráulico de aplicación de carga.
- Tablero de control (17)
- Dinamómetro (dispositivo de medición de la carga) con carátula (19)

Fuente: FUNDICIONES GÓMEZ, S.A. *Probetas para ensayos destructivos*. Marzo, 2011.  
<http://www.fundicionesgomez.com/Probeta-para-Ensayo-delImpacto Charpy>.

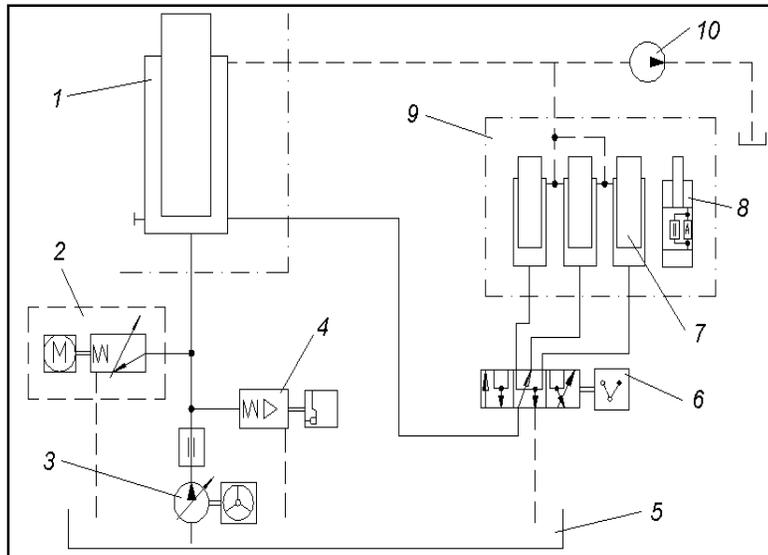
## Inversor de una máquina universal de ensayos



El sistema hidráulico posee un cilindro de simple efecto, al aplicar presión hidráulica la placa (9) “sube” realizando una acción de compresión contra la placa ajustable (6a). Para poder realizar una acción de tracción la máquina posee un “inversor”. Que consta de las placas (9) y (3) unidas solidariamente por las columnas (7a).

Fuente: FUNDICIONES GÓMEZ, S.A. *Probetas para ensayos destructivos*. Marzo, 2011.  
<http://www.fundicionesgomez.com/Probeta-para-Ensayo-deImpacto Charpy>.

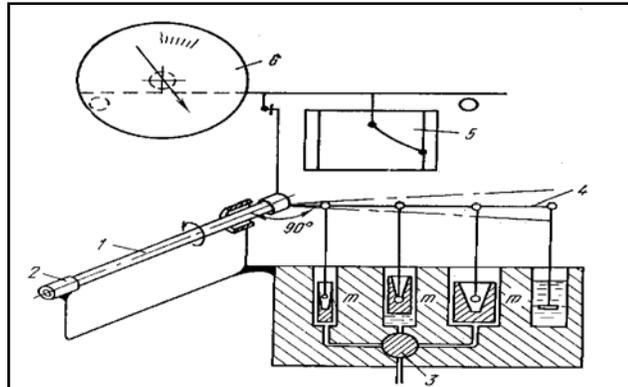
## Esquema hidráulico general de la máquina universal WPM ZD 40



El sistema hidráulico consta de la bomba de alta presión (3) succiona el aceite del depósito (5) y lo envía por la línea de alta presión hacia el cilindro de trabajo (1), el pistón del cual, empieza a levantarse. Si durante este movimiento el pistón encuentra alguna resistencia (por ejemplo la probeta está instalada entre las placas) la presión en el cilindro de trabajo subirá haciendo que el pistón ejerza una fuerza creciente aplicada a la probeta hasta causar la rotura de la misma, o hasta la fuerza que sea necesaria en el ensayo. En la línea secundaria de la línea de alta presión se encuentra la válvula de aplicación de la carga (2), esta válvula trabaja como una válvula de descarga de sobreflujo, es decir al superar la presión en la línea la presión para la que ésta está regulada, el aceite descarga al depósito. La regulación de esta válvula se realiza manualmente (anteriormente era posible accionarla por medio de un motor de velocidad variable), para aumentar a voluntad o sostener la fuerza realizada sobre la probeta. La válvula (4) es una válvula de descarga que actúa como válvula de seguridad. Los escapes de aceite entre el pistón y el cilindro de trabajo son colectados por la bomba auxiliar 10 y retornados al depósito.

Fuente: FUNDICIONES GÓMEZ, S.A. *Probetas para ensayos destructivos*. Marzo, 2011.  
<http://www.fundicionesgomez.com/Probeta-para-Ensayo-delImpacto Charpy>.

## Funcionamiento del dinamómetro



Para la medición de la fuerza ejercida a la probeta, la máquina posee un dinamómetro de barra de torsión, este dinamómetro consta de dos partes: hidráulica y eléctrica. La parte hidráulica puede observarse en la figura del Funcionamiento del dinamómetro. La presión de trabajo en el cilindro (1) es conducida al selector de rango de carga (6) (válvula distribuidora de 3 posiciones correspondientes a 4, 20 y 40 toneladas máximas de carga) y de allí al cilindro de medición apropiado (7) para actuar sobre la barra de torsión del dinamómetro. En la Fig. 16, se muestra un esquema de funcionamiento del dinamómetro. La barra de torsión (1) posee un extremo fijo (2). Sobre el segundo extremo, por medio de la palanca perpendicular (4) se aplica una fuerza proporcional a la presión del líquido en el cilindro de trabajo de la máquina. La unión entre el cilindro y el dinamómetro se realiza con ayuda de cilindros adicionales de émbolos *m*. Los cuales se conectan de acuerdo a la posición de la válvula selectora (3), adecuada a mediciones en distintas gamas de fuerza. Cuanto más distante está el cilindro de la barra de torsión (1) tanto mayor es el brazo de la palanca (4) y a mayor ángulo se puede girar (torsionar) la barra (1). Esta última está unida al indicador de carátula (6) por medio de una transmisión de rueda dentada y cremallera. El registrador (5) se encuentra fuera de servicio en nuestra máquina.

Fuente: FUNDICIONES GÓMEZ, S.A. *Probetas para ensayos destructivos*. Marzo, 2011.

<http://www.fundicionesgomez.com/Probeta-para-Ensayo-delImpacto-Charpy>.