



**UNIVERSIDAD DE CARABOBO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**



**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL ACERO  
INOXIDABLE DÚPLEX SAF 2507 SOMETIDO A SOLDADURA POR  
FRICCIÓN**

**LISCANO R. ANTONIO J.**  
**OROZCO G. LUIS E.**

**Valencia, Noviembre de 2008**



**UNIVERSIDAD DE CARABOBO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**



**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL ACERO  
INOXIDABLE DÚPLEX SAF 2507 SOMETIDO A SOLDADURA POR  
FRICCIÓN**

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO PRESENTADO ANTE LA  
ILUSTRE UNIVERSIDAD DE CARABOBO PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**LISCANO R. ANTONIO J.**  
**OROZCO G. LUIS E.**

**Valencia, Noviembre de 2008**



## DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mis padres que desde algún lugar me siguen bendiciendo, a mis hermanos, sobrinos y cuñados ya que sin su apoyo no lo hubiese logrado, a mi novia por darme ánimos en los momentos difíciles y por seguir a mi lado, a mi suegra por recibirme como un hijo más, a los amigos y familiares que creyeron en mi... simplemente gracias.

**Antonio J. Liscano R.**



## **DEDICATORIA**

Este trabajo está dedicado a mis padres Noris de Orozco y José Orozco, quienes todos estos años confiaron en mí, y quienes estaban allí en los momentos de preocupación, dándome aliento para seguir adelante, y a mis hermanos por haberme apoyado en los momentos difíciles.

**Luís E. Orozco G.**



## RESUMEN

En éste trabajo de investigación se estudió el comportamiento mecánico del acero inoxidable dúplex SAF 2507 al ser sometido al proceso de soldadura por fricción. En primera instancia se maquinó un número de 20 probetas para posteriormente soldarlas mediante fricción y proceder a realizar los distintos ensayos, estos ensayos fueron: tracción, microdureza, metalografía y fractografía. Las probetas se prepararon metalográficamente para evaluar los cambios originados en la microestructura luego de aplicarse el proceso de soldadura y el ensayo de tracción sobre las mismas. Tanto para los ensayos mecánicos como para los estudios metalográficos, se tabularon y graficaron los resultados obtenidos. Las probetas preparadas luego de la ocurrencia de la fractura se observaron a través de un microscopio electrónico de barrido (MEB). Del estudio de la microestructura del material se observó que presenta un comportamiento homogéneo en cuanto a sus fases constitutivas (ferrita y austenita), lo que se puede decir es que existe una tendencia a mantener el equilibrio entre las dos de aproximadamente un 50% para cada una, de allí se establece que en condiciones originales y posteriores a los ensayos aplicados; el material sigue manteniendo sus características microestructurales.

Se logró constatar que existe un aumento en la dureza vickers (HV) del material luego de que se realiza la soldadura por fricción sobre el mismo, esto se produce debido a la deformación y altas temperaturas a la cual se somete el acero en la zona soldada. A través del análisis por microscopía electrónica se pudo determinar zonas de fragilidad y ductilidad muy próximas entre si, también se observaron irregularidades y desprendimientos de material en áreas considerables; así como patrones de clivaje y presencia de micro hoyuelos.

Este trabajo pertenece a la línea de investigación de “Comportamiento Mecánico de los Materiales”, del Departamento de Materiales y Procesos de Fabricación.



## SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

- AISI:** American Iron Steel Institute
- ASTM:** American Society for Testing and Materials
- AWS:** American Welding Society
- A<sub>f</sub>:** Área final de la sección transversal después de haber partido la probeta de tracción (mm<sup>2</sup>)
- A<sub>0</sub>:** Área original de la sección transversal de la probeta de tracción (mm<sup>2</sup>)
- DSS:** Dúplex Stainless Steel
- d:** Longitud de la diagonal de la huella del ensayo Vickers (mm)
- e:** Deformación de ingeniería (mm/mm)
- F:** Carga uniaxial aplicada a la probeta de tracción (KN)
- Fe:** Hierro
- t:** Tiempo de contacto entre probetas al momento de realizarse la soldadura (s)
- P:** Presión de contacto entre probetas al momento de realizarse la soldadura (psi)
- VEL:** Velocidad de desplazamiento entre mordazas (mm/min.)
- F<sub>máx</sub>:** Carga uniaxial máxima aplicada a la probeta de tracción (KN)
- F<sub>rup</sub>:** Carga uniaxial de ruptura aplicada a la probeta de tracción (KN)
- HV:** Dureza Vickers
- L:** Carga aplicada para el ensayo Vickers (Kg)
- l<sub>f</sub>:** Longitud final entre las marcas de calibración después de haber partido la probeta de tracción (mm)
- l<sub>0</sub>:** Longitud inicial entre las marcas de calibración de la probeta de tracción (mm)
- MO:** Microscopía Óptica
- N:** Número de granos por pulgada cuadrada (granos/pulg<sup>2</sup>)
- n:** Número ASTM E-112
- SAF:** Sandvik Austenitic Ferritic (Sandvik Austenita Ferrita)



## *Símbolos y Abreviaturas*

---

- $\alpha$ :** Ferrita
- $\varepsilon$ :** Deformación real (mm/mm)
- $\gamma$ :** Austenita
- $\sigma$ :** Esfuerzo de ingeniería (MPa)
- Su:** Esfuerzo máximo (MPa)
- Sf:** Esfuerzo de ruptura (MPa)
- Sy:** Esfuerzo de fluencia (MPa)
- % Alargamiento:** Porcentaje de alargamiento (%)
- % RA:** Porcentaje de reducción de área (%)
- CIMBUC:** Centro de Investigaciones Médicas y Biotecnológicas de la Universidad de Carabobo



## ÍNDICE GENERAL

<b>PORTADA</b> .....	i
<b>PÁGINA DE TÍTULO</b> .....	ii
<b>DEDICATORIA</b> .....	iii
<b>RESUMEN</b> .....	v
<b>SIMBOLOS Y ABREVIATURAS</b> .....	vi
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>CAPÍTULO I</b> .....	4
<b>EL PROBLEMA</b> .....	4
1.1 Planteamiento del problema.....	4
1.2 Objetivos de la investigación.....	5
1.2.1 Objetivo general.....	5
1.2.2 Objetivos específicos.....	5
1.3 Justificación de la investigación.....	5
1.4 Limitaciones.....	6
1.5 Delimitaciones.....	6
<b>CAPÍTULO II</b> .....	8
<b>MARCO TEÓRICO</b> .....	8
2.1 Antecedentes de la investigación.....	8
2.2 Bases teóricas.....	11
2.3 El acero y sus principales características.....	11
2.3.1 Aceros al carbono .....	12
2.3.2 Aceros aleados .....	12
2.3.3 Aceros de baja aleación ultraresistentes .....	12
2.3.4 Aceros inoxidables .....	13



## Índice

---

2.3.5 Aceros de herramientas .....	13
2.4 Elementos químicos y efectos producidos en el acero.....	14
2.4.1 Silicio.....	14
2.4.2 Manganeso .....	14
2.4.3 Cromo .....	14
2.4.4 Niquel .....	15
2.4.5 Molibdeno .....	15
2.4.6 Vanadio .....	15
2.4.7 Cobre.....	16
2.4.8 Titanio .....	16
2.4.9 Boro .....	16
2.4.10 Aluminio .....	16
2.4.11 Tugsteno .....	16
2.4.12 Cobalto.....	17
2.5 Clasificación de los aceros inoxidables .....	17
2.6 Aceros Dúplex .....	18
2.7 Metalurgia básica .....	19
2.8 Proceso de soldadura por fricción .....	20
2.9 Propiedades y pruebas mecánicas .....	22
2.10 Dureza .....	22
2.10.1 Dureza Vickers o a la pirámide de diamante .....	23
2.11 Ensayo de tracción.....	24
2.12 Procedimiento de ensayo metalográfico.....	27
2.13 Microscopía electrónica de barrido y fractografía.....	28
2.14 Conceptos básicos.....	28
<b>GLOSARIO.....</b>	<b>32</b>
<b>CAPITULO III.....</b>	<b>35</b>
<b>MARCO METODOLÓGICO.....</b>	<b>35</b>



## Índice

---

3.1 Nivel de investigación.....	35
3.2 Diseño de la investigación.....	36
3.3 Material utilizado.....	36
3.4 Población y muestra.....	37
3.5 Puesta a punto de la máquina de soldar por fricción .....	37
3.6 Ensayo de tracción.....	38
3.7 Ensayo de metalografía.....	40
3.8 Medición del tamaño del grano.....	42
3.9 Ensayo de microdureza.....	43
3.10 Fractografía.....	45
<b>CAPÍTULO IV .....</b>	<b>47</b>
<b>RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>47</b>
4.1 Soldadura por fricción y ensayo de tracción.....	47
4.1.1 Esfuerzos.....	50
4.1.2 Comportamiento mecánico del material .....	51
4.1.3 Porcentaje de reducción de área.....	56
4.1.4 Porcentaje de elongación.....	56
4.2 Microestructura del material .....	57
4.3 Tamaño de grano .....	61
4.4 Ensayo de microdureza .....	62
4.4 Fractografía .....	67
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>76</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>78</b>
<b>REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>82</b>
<b>APÉNDICE A</b> Certificado de calidad del material .....	<b>84</b>
<b>APÉNDICE B</b> Normas ASTM empleadas.....	<b>87</b>
<b>APÉNDICE C</b> Gráficas de ensayos de tracción.....	<b>102</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>CAPÍTULO II</b> .....	8
2.1 Arbol genealogico de los aceros inoxidable.....	18
2.2 Microestructura del acero al carbono, cristales blancos de ferrita .....	20
2.3 Microestructura de la austenita .....	20
2.4 Esquema de soldadura por fricción .....	21
2.5 Fotografía de piezas soldadas por fricción.....	22
2.6 Diagrama esfuerzo deformación de materiales ductiles en tensión .....	27
<b>CAPÍTULO III</b> .....	35
3.1 Forma y dimensiones de la probeta a soldar por fricción .....	37
3.2 Máquina de soldar por fricción .....	38
3.3 Maquina de ensayo de tracción.....	39
3.4 Dimensiones de la probeta para ensayos de tracción .....	40
3.5 Microdurómetro (Vickers) .....	44
<b>CAPÍTULO IV</b> .....	47
4.1 Manómetro .....	47
4.2 Cronómetro digital .....	47
4.3 Montaje de la probeta en la máquina de soldar por fricción.....	48
4.4 Apariencia de la probeta luego de ser soldada.....	48
4.5 Presión Hidráulica aplicada vs tiempo de contacto entre probeta .....	48
4.6 Apariencia posterior a ensayo de tracción .....	49
4.7 Apariencia posterior a ensayo de tracción .....	49
4.8 Esfuerzo Ingenieril vs. Deformación Ingenieril (Condición original).....	50



## Índice

---

4.9 Esfuerzo Ingenieril vs. Deformación Ingenieril (Probeta 1).....	51
4.10 Esfuerzo Ingenieril vs. Deformación Ingenieril (Probeta 2).....	52
4.11 Esfuerzo Ingenieril vs. Deformación Ingenieril (Probeta 3).....	52
4.12 Esfuerzo Ingenieril vs. Deformación Ingenieril (Probeta 4).....	53
4.13 Esfuerzo Ingenieril vs. Deformación Ingenieril (Probeta 5).....	53
4.14 Esfuerzo Ingenieril vs. Deformación Ingenieril (Probeta 8).....	54
4.15 Esfuerzo Ingenieril vs. Deformación Ingenieril (Probeta 9).....	54
4.16 Esfuerzo Ingenieril vs. Deformación Ingenieril (Probeta 10).....	55
4.17 Microestructura del material, condición original (1: 100X y 2: 400X). ....	57
4.18 Microestructura del material, primera condicion de falla (1: 200X y 2: 400X).. .....	58
4.19 Microestructura del material, segunda condición de falla (1: 200X y 2: 400X).. .....	58
4.20 Microestructura del material, tercera condicion de falla (1: 200X y 2: 400X).... .....	59
4.21 Apariencia del límite de grano, primera condicion de falla (1: 200X y 2: 400X).... .....	60
4.22 Apariencia del límite de grano, tercera condicion de falla (1: 200X y 2: 400X).... .....	60
4.23 Ubicación de puntos de dureza Vickers en la cara longitudinal (Probeta1).....	63
4.24 Ubicación de puntos de dureza Vickers en la cara transversal (Probeta1).....	63
4.25 Ubicación de puntos de dureza Vickers en la cara longitudinal (Probeta2).....	64
4.26 Ubicación de puntos de dureza Vickers en la cara transversal (Probeta2).....	64
4.27 Ubicación de puntos de dureza Vickers en la cara longitudinal (Probeta3).....	65



## Índice

---

4.28 Ubicación de puntos de dureza Vickers en la cara transversal (Probeta3).....	65
4.29 Ubicación de puntos de dureza Vickers en la cara transversal (Condicion original).....	66
4.30 Pulidor de ultrasonido.....	67
4.31 Presencia de impurezas y zonas de desprendimiento de material (Probeta 4) (500X, 50 $\mu\text{m}$ ) .....	68
4.32 Presencia de impurezas y zonas de desprendimiento de material (Probeta 4) (2000X, 10 $\mu\text{m}$ ) .....	68
4.33 Zonas de fragilidad (150X, 100 $\mu\text{m}$ ) (Probeta 4) .....	68
4.34 Zonas de ductilidad (500X, 10 $\mu\text{m}$ ) (Probeta 4) .....	68
4.35 Zonas de transicion ductil-frágil (Probeta 4) (1500X, 10 $\mu\text{m}$ ) .....	68
4.36 Patrones de clivaje (Probeta 4) (1000X, 10 $\mu\text{m}$ ) .....	68
4.37 Zonas de transición dútil-frágil (Probeta 5) (750X, 10 $\mu\text{m}$ ) .....	69
4.38 Micropartícula atrapada en microgrieta (Probeta 5) (1500X, 10 $\mu\text{m}$ ) .....	69
4.39 Zonas de rasgado dúctil (Probeta 5) (750X, 10 $\mu\text{m}$ ) .....	69
4.40 Desprendimiento de material (Probeta 5) (1000X, 10 $\mu\text{m}$ ) .....	69
4.41 Desprendimineto de material (Probeta 5) (100X, 100 $\mu\text{m}$ ) .....	70
4.42 Pequeñas areas de clivaje (Probeta 5) (500X, 50 $\mu\text{m}$ ) .....	70
4.43 Zonas de transición dúctil-frágil (Probeta 7) (1500X, 10 $\mu\text{m}$ ) .....	70
4.44 Microgrietas (Probeta 7) (2000X, 10 $\mu\text{m}$ ) .....	70
4.45 Material fundido (Probeta 7) (1500X, 10 $\mu\text{m}$ ) .....	71
4.46 Zonas de material desprendido (Probeta 7) (500X, 10 $\mu\text{m}$ ) .....	71
4.47 Zonas de transición dúctil-frágil (Probeta 7) (750X, 10 $\mu\text{m}$ ) .....	71
4.48 Cráteres (Probeta 7) (1500X, 10 $\mu\text{m}$ ) .....	71
4.49 Fractura frágil (Probeta 8) (200X, 10 $\mu\text{m}$ ) .....	72
4.50 Area con material fundido solidificado (Probeta 8) (1000X, 10 $\mu\text{m}$ ) .....	72



## Índice

---

4.51 Cráter (Probeta 8) (2000X, 10 $\mu\text{m}$ ) .....	72
4.52 Cráter y patrones de clivaje (Probeta 9) (1000X, 10 $\mu\text{m}$ ) .....	73
4.53 Material fundido solidificado (Probeta 9) (500X, 50 $\mu\text{m}$ ) .....	73
4.54 Diferencia entre zona dúctil y zona frágil (Probeta 9) (350X, 500 $\mu\text{m}$ ) .....	73
4.55 Material fundido solidificado en el sentido de giro al momento de soldarse por fricción (Probeta 10) (1500X, 10 $\mu\text{m}$ ) .....	74
4.56 Hoyuelos (Probeta 10) (1000X, 10 $\mu\text{m}$ ) .....	74
4.57 Patrones de ductilidad y fragilidad (Probeta 10) (1500X, 10 $\mu\text{m}$ ) .....	74



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>CAPÍTULO III</b> .....	3
3.1 Composición química acero inoxidable dúplex SAF 2507 (% Peso) .....	36
3.2 Condicion que deben cumplir las probetas a ensayar según norma ASTM.....	40
3.3 Concentracion de la solucion para el ataque químico.....	42
<b>CAPÍTULO IV</b> .....	47
4.1 Presion hidráulica aplicada y tiempo de contacto entre las probetas .....	48
4.2 Propiedades mecánicas del material en condición de suministro .....	50
4.3 Propiedades mecánicas del acero inoxidable Dúplex SAF 2507 ensayado a tracción.....	51
4.4 Tamaño de grano basado en la norma ASTM, para el acero inoxidable dúplex SAF 2507 .....	62
4.5 Valores de Dureza Vickers en la cara longitudinal (Probeta 1) .....	63
4.6 Valores de Dureza Vickers en la cara transversal (Probeta 1) .....	63
4.7 Valores de Dureza Vickers en la cara longitudinal (Probeta 2) .....	64
4.8 Valores de Dureza Vickers en la cara transversal (Probeta 2) .....	64
4.9 Valores de Dureza Vickers en la cara longitudinal (Probeta 3) .....	65
4.10 Valores de Dureza Vickers en la cara transversal (Probeta 3) .....	65
4.11 Valores de Dureza Vickers en la cara transversal (Condicion original) .....	66



## INTRODUCCIÓN

Actualmente Venezuela y muchos otros países se han visto en la necesidad de usar aceros inoxidable más confiables en cuanto a resistencia a la corrosión y resistencia mecánica, es por eso que se están realizando numerosas investigaciones para producir aceros con una calidad muy superior a la de los que se producen comúnmente hoy en día. Un tipo de estos aceros inoxidables es el denominado Dúplex, llamados así debido a que presentan en su microestructura dos fases (ferrita y austenita), en aproximadamente la misma proporción.

Los aceros inoxidables dúplex debido a su microestructura bifásica, aportan grandes ventajas en cuanto a las propiedades mecánicas (mayor elasticidad, carga de rotura y dureza superficial); también se caracterizan por tener alta resistencia a la corrosión, haciéndolos atractivos para muchas aplicaciones como: componentes expuestos a aguas marinas, plataformas petrolíferas, plantas químicas, nucleares, entre otras.

En el presente trabajo de investigación se busca evaluar el comportamiento mecánico que presenta el acero inoxidable duplex SAF 2507 al ser sometido al proceso de soldadura por fricción. Para la determinación de éste comportamiento se aplicarán diferentes ensayos tales como: tracción, microdureza, microscopía electrónica de barrido y estudios microestructurales.

La presente investigación está estructurada de la siguiente manera:

En el capítulo I se plantea la situación problemática, se definen los objetivos, las limitaciones y delimitaciones de la investigación.



## *Introducción*

---

En el capítulo II se presentan los antecedentes y las bases teóricas relacionadas con la investigación.

En el capítulo III se justifica el nivel de la investigación y se describe la metodología que se llevará a cabo para realizar el estudio.

En el capítulo IV se presentan los resultados y análisis

En el capítulo V, se encuentran las conclusiones y recomendaciones; así como también las referencias bibliográficas y apéndices empleados para el desarrollo de éste trabajo de investigación.

# CAPÍTULO I



## CAPÍTULO I

### 1. EL PROBLEMA

#### 1.1 Planteamiento del Problema

Entendemos bajo la denominación de acero inoxidable todos los aceros que han sido elaborados durante un proceso específico de fundición, que tienen un índice alto de pureza y que reaccionan uniformemente a tratamientos térmicos programados. De forma general se consideran 4 tipos o clases de acero inoxidable: Aceros Inoxidables Martensíticos, Aceros Inoxidables Ferríticos, Aceros Inoxidables Austeníticos y los Aceros Inoxidables Austenoferríticos (Dúplex).

Los Aceros Inoxidables Dúplex tienen la ventaja de poseer una elevada resistencia mecánica alcanzando valores de límite elástico entre 700-900 Mpa (Megapascuales, el doble de límite elástico que los aceros inoxidables austeníticos); lo que representa en muchos casos un ahorro significativo en costos de material.

Al ofrecer los aceros inoxidables Dúplex una gran resistencia mecánica, es de gran interés realizar un proceso evaluativo de las condiciones que pueden aportar sobre las uniones entre piezas de este material los procedimientos de soldadura por fricción, ya que la misma; ofrece propiedades mecánicas generalmente superiores a las encontradas con procesos de soldadura convencionales.



## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General**

“Evaluar el comportamiento mecánico del acero Dúplex SAF 2507 sometido a soldadura por fricción”

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Determinar las propiedades mecánicas del acero inoxidable Dúplex SAF 2507 a temperatura ambiente y sometido a soldadura por fricción a través de los ensayos de tracción (Esfuerzo máximo, porcentaje de alargamiento, porcentaje de reducción de área, esfuerzo de fluencia) y dureza (Microdureza Vickers).
- Evaluar el efecto sobre la microestructura de la soldadura por fricción en piezas de acero inoxidable Dúplex SAF 2507, a través de ensayos metalográficos.
- Realizar estudios de microscopía electrónica de barrido en piezas de acero inoxidable SAF 2507, unidas mediante soldadura por fricción.

## **1.3 Justificación de la Investigación**

En la actualidad los aceros inoxidables Dúplex están siendo usados con más frecuencia en las industrias, debido a que poseen mejores propiedades mecánicas en comparación con los otros tipos de acero inoxidables en cuanto a la alta resistencia mecánica y la alta resistencia a la corrosión por picaduras. Debido a esto surge la idea de estudiar el comportamiento del acero Dúplex SAF 2507 sometido a soldadura por



## Capítulo I

## *El Problema*

fricción, con la finalidad de evaluar y analizar las propiedades mecánicas y la microestructura en la zona afectada por el calor.

### 1.4 Limitaciones

- Poca disponibilidad del acero inoxidable dúplex SAF 2507 en el mercado nacional.
- Elevados costos del material.
- Costos de mecanizado del material.
- Realización de algún tipo de ensayo fuera de las instalaciones universitarias.
- Disponibilidad de uso para acceder a realizar los ensayos en el laboratorio de materiales.

### 1.5 Delimitación

- Todos los estudios se realizarán al acero inoxidable Dúplex SAF 2507.
- La soldadura se realizará con una velocidad de giro constante.
- La cantidad de probetas a evaluar será de 4 para cada tipo de ensayo (tracción, dureza, metalografía y fractografía).

# CAPÍTULO

## II



## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

El contenido presentado en el marco teórico engloba de manera sistemática algunos trabajos de investigación relacionados, así como una serie de definiciones de interés las cuales están enfocadas hacia la explicación y comprensión del tema desarrollado.

#### 2.1 Antecedentes de la Investigación

**Hergueta, R y Zabala, R (2005).** *Evaluación de la tenacidad de impacto de un acero inoxidable Dúplex SAF 2507, sometido a un tratamiento térmico de envejecimiento a una temperatura de 850 °C y un tiempo entre 0.5 y 48 horas.* Trabajo de Grado. Universidad de Carabobo, Valencia. El propósito de este trabajo se basó en realizar estudios metalográficos y fractográficos en el acero inoxidable Dúplex SAF 2507, obteniéndose como resultado de los estudios metalográficos la formación de la fase sigma en la austenita con un porcentaje en peso de 27.62 para el cromo y 64.14 para el hierro, y de los estudios fractográficos se evidenció un mecanismo de fractura dúctil para la condición original del material, mientras que para las condiciones tratadas térmicamente el mecanismo de fractura fue frágil.

**Dieguez, M y Rivas, S (2002).** *Evaluación de la metalurgia en la soldadura por fricción de materiales disímiles.* Trabajo de Grado. Universidad de Carabobo, Valencia. En este trabajo los autores se plantearon como objetivo el estudio de ciertas propiedades de mecánicas (por ejemplo el esfuerzo máximo), al



## Capítulo II

## Marco Teórico

hacerse las combinaciones entre los materiales SAE-1020, AISI-316 y SAE-4140. De estos estudios obtenidos de los ensayos a tracción, se evidenció que la soldadura más resistente fue la de la combinación 4140-4140, ya que esta alcanzó un valor promedio de esfuerzo máximo de 1036.17 Mpa, y la de menor resistencia fue la de combinación 4140-316, con un valor promedio de esfuerzo máximo de 462.64 Mpa, llegando ellos a la conclusión de que el mayor valor promedio de esfuerzo máximo obtenido, fue debido al mayor porcentaje de Carbono que presentaban los materiales en dicha combinación.

**Griman José David - Marcano Eglo José (2005).** *“Evaluación de la tenacidad de impacto del acero inoxidable Dúplex SAF 2205, sometido a un tratamiento térmico de envejecimiento a 475 °C”*. En esta investigación se estudió la influencia del tratamiento térmico de envejecimiento del acero inoxidable dúplex SAF 2205, con la finalidad de conocer los valores de las propiedades mecánicas y tenacidad de impacto, que ofrecen soluciones donde aceros inoxidables comerciales han fallado. Para producir el fenómeno de envejecimiento primero fue necesaria la solubilización del material, sometiendo a las muestras a 1020°C durante 120 minutos, luego se realiza el envejecimiento a 475°C con tiempos de permanencia que oscilan entre 14 y 120 horas.

En el ensayo de tracción se observó cual condición es la que posee la máxima resistencia mecánica con respecto a las demás condiciones y se corroboró que el material pierde ductilidad a medida que se incrementa el tiempo de envejecimiento. Se realizó un estudio de la microdureza de cada una de las fases, donde se observó que la dureza del material aumenta a medida que aumenta el tiempo de envejecimiento. Se realizó el estudio de la superficie de fractura de las probetas del ensayo de tracción e impacto, a través de la microscopía electrónica de barrido (M.E.B.), donde se observó una superficie fibrosa, opaca, con un gran número de



hoyuelos y la presencia de coalescencia de cavidades. También fue necesario realizar un análisis químico EDX (difusión electrónica de rayos x) para verificar la composición química de ciertas partículas irregulares, arrojando como resultado un alto porcentaje en peso de manganeso y cromo con respecto a la condición original.

**Harold Huamanchumo D. - Salvatore A. Ricci F. (2006).** *“Estudio del comportamiento mecánico del acero inoxidable Dúplex SAF 2507, ensayado a tracción a diferentes temperaturas.”* La presente investigación, evalúa las propiedades mecánicas del acero inoxidable dúplex SAF 2507, al ser sometido a ensayos de tracción con modificaciones del tiempo de permanencia y la variación de la temperatura. Dichas variables arrojaron 21 condiciones con estudio de 2 probetas por cada una, para totalizar 42 ensayos, comenzando por una temperatura de 24°C, como estado original, luego para 1 hora de permanencia se ensayaron probetas a 100, 200, 400 y 600 °C, y de igual forma se cubrió el mismo rango de temperaturas para tiempos de permanencia de 2, 4, 12 y 24 horas respectivamente. Los ensayos se realizaron inmediatamente al alcanzar la condición de trabajo, evitando toda posibilidad de enfriamiento que se traduzca en un tratamiento térmico. El comportamiento mecánico del material es caracterizado sólo por el ensayo de tracción. Y a través de la microscopía óptica, se logra exponer el comportamiento del acero para relacionar mediante las fases presentes, sus porcentajes y tamaños de grano los resultados obtenidos en las propiedades mecánicas, además se incorporó la microdureza Vickers como otra propiedad de estudio. Las propiedades mecánicas evaluadas fueron: esfuerzo de fluencia, esfuerzo máximo, esfuerzo de ruptura, porcentaje de reducción de área, alargamiento, coeficiente de endurecimiento y microdureza. La variación de la temperatura, causó en el acero una disminución en las propiedades mecánicas con relación a la condición original, debido al cambio microestructural en el tamaño de grano el cual pasa de un grano fino a un grano



## Capítulo II

## Marco Teórico

grueso, no presentando variaciones significativas de las propiedades entre los tiempos de permanencia. Por otra parte el acero se endureció como consecuencia de la disminución de la superficie de límites de grano. Finalmente la microscopía óptica arrojó un porcentaje de distribución de fases, casi igual, de aproximadamente un 50% de ferrita y 50% de austenita, manteniéndose de la misma forma para todas las condiciones de estudio.

### 2.2 Bases Teóricas

Este trabajo de investigación pretende estudiar en primer lugar las bases teóricas que sustentan el logro de la misma.

### 2.3 El acero y sus principales características

El acero es básicamente una aleación o combinación de hierro y carbono (alrededor de 0,05% hasta menos de un 2%). Algunas veces otros elementos de aleación específicos tales como el Cr (Cromo) o Ni (Níquel) se agregan con propósitos determinados.

Ya que el acero es básicamente hierro altamente refinado (más de un 98%), su fabricación comienza con la reducción de hierro (producción de arrabio) el cual se convierte más tarde en acero.

El hierro puro es uno de los elementos del acero, por lo tanto consiste solamente de un tipo de átomos. No se encuentra libre en la naturaleza ya que químicamente reacciona con facilidad con el oxígeno del aire para formar óxido de hierro - herrumbre. El óxido se encuentra en cantidades significativas en el mineral de hierro, el cual es una concentración de óxido de hierro con impurezas y materiales térreos.



## Capítulo II

## Marco Teórico

Los diferentes tipos de acero se agrupan en cinco clases principales: aceros al carbono, aceros aleados, aceros de baja aleación ultrarresistentes, aceros inoxidable y aceros de herramientas.

### 2.3.1 Aceros al carbono

Más del 90% de todos los aceros son aceros al carbono. Estos aceros contienen diversas cantidades de carbono y menos del 1,65% de manganeso, el 0,60% de silicio y el 0,60% de cobre. Entre los productos fabricados con aceros al carbono figuran máquinas, carrocerías de automóvil, la mayor parte de las estructuras de construcción de acero, cascos de buques, etc.

### 2.3.2 Aceros aleados

Estos aceros contienen una proporción determinada de vanadio, molibdeno y otros elementos, además de cantidades mayores de manganeso, silicio y cobre que los aceros al carbono normales. Estos aceros se emplean, por ejemplo, para fabricar engranajes y ejes de motores, patines o cuchillos de corte.

### 2.3.3 Aceros de baja aleación ultrarresistentes

Esta familia es la más reciente de las cinco grandes clases de acero. Los aceros de baja aleación son más baratos que los aceros aleados convencionales ya que contienen cantidades menores de los costosos elementos de aleación. Sin embargo, reciben un tratamiento especial que les da una resistencia mucho mayor que la del acero al carbono. Por ejemplo, los vagones de mercancías fabricados con aceros de baja aleación pueden transportar cargas más grandes porque sus paredes son más delgadas que lo que sería necesario en caso de emplear acero al carbono. Además,



## Capítulo II

## Marco Teórico

como los vagones de acero de baja aleación pesan menos, las cargas pueden ser más pesadas. En la actualidad se construyen muchos edificios con estructuras de aceros de baja aleación. Las vigas pueden ser más delgadas sin disminuir su resistencia, logrando un mayor espacio interior en los edificios.

### 2.3.4 Aceros inoxidables

Los aceros inoxidables contienen cromo, níquel y otros elementos de aleación, que los mantienen brillantes y resistentes a la herrumbre y oxidación a pesar de la acción de la humedad o de ácidos y gases corrosivos. Algunos aceros inoxidables son muy duros; otros son muy resistentes y mantienen esa resistencia durante largos periodos a temperaturas extremas. Debido a sus superficies brillantes, en arquitectura se emplean muchas veces con fines decorativos. El acero inoxidable se utiliza para las tuberías y tanques de refinerías de petróleo o plantas químicas, para los fuselajes de los aviones o para cápsulas espaciales. También se usa para fabricar instrumentos y equipos quirúrgicos, o para fijar o sustituir huesos rotos, ya que resiste a la acción de los fluidos corporales. En cocinas y zonas de preparación de alimentos los utensilios son a menudo de acero inoxidable, ya que no oscurece los alimentos y pueden limpiarse con facilidad.

### 2.3.5 Aceros de herramientas

Estos aceros se utilizan para fabricar muchos tipos de herramientas y cabezales de corte y modelado de máquinas empleadas en diversas operaciones de fabricación. Contienen volframio, molibdeno y otros elementos de aleación, que les proporcionan mayor resistencia, dureza y durabilidad.



## 2.4 Elementos químicos y efectos producidos en el acero

### 2.4.1 Silicio

Para fabricar el acero, se desoxida el acero fundido añadiéndole pequeñas cantidades de silicio; el acero común contiene menos de un 0,03% de silicio. El acero de silicio, que contiene de 2,5 a 4% de silicio, se usa para fabricar los núcleos de los transformadores eléctricos, pues la aleación presenta baja histéresis.

### 2.4.2 Manganeso

El uso principal del manganeso es la formación de aleaciones de hierro, obtenidas mediante el tratamiento de pirolusita en altos hornos con hierro y carbono. Las aleaciones de hierro y manganeso (hasta un 78% de manganeso), utilizadas para fabricar aceros, y las aleaciones *spiegeleisen* (de un 12 a un 33% de manganeso), son las más importantes. En pequeñas cantidades, el manganeso se añade al acero como desoxidante, y en grandes cantidades se emplea para formar una aleación muy resistente al desgaste. Las cajas fuertes están hechas de acero de manganeso, con un 12% de manganeso. Entre las aleaciones no ferrosas de manganeso se encuentran el bronce de manganeso (compuesto de manganeso, cobre, estaño y cinc), resistente a la corrosión del agua de mar y que se utiliza en la fabricación de hélices de barcos y torpedos, y la manganina (compuesta de manganeso, cobre y níquel), usada en forma de cables para mediciones eléctricas de alta precisión, dado que su conductividad eléctrica apenas varía con la temperatura.

### 2.4.3 Cromo

Principalmente se utiliza en la creación de aleaciones de hierro, níquel o cobalto. Al añadir el cromo se consigue aumentar la dureza y la resistencia a la corrosión de la aleación. En los aceros inoxidable, constituye el 10% de la composición final. Debido a su dureza, la aleación de cromo, cobalto y wolframio se emplea para herramientas de corte rápido de metales. Al depositarse electrolíticamente, el cromo proporciona un acabado brillante y resistente a la corrosión.



#### **2.4.4 Níquel**

El níquel se emplea como protector y como revestimiento ornamental de los metales; en especial de los que son susceptibles de corrosión como el hierro y el acero. La placa de níquel se deposita por electrólisis de una solución de níquel. Finamente dividido, el níquel absorbe 17 veces su propio volumen de hidrógeno y se utiliza como catalizador en un gran número de procesos, incluida la hidrogenación del petróleo.

El níquel se usa principalmente en aleaciones, y aporta dureza y resistencia a la corrosión en el acero. El acero de níquel, que contiene entre un 2% y un 4% de níquel, se utiliza en piezas de automóviles, como ejes, cigüeñales, engranajes, llaves y varillas, en repuestos de maquinaria y en placas para blindajes.

#### **2.4.5 Molibdeno**

El metal se usa principalmente en aleaciones con acero. Esta aleación soporta altas temperaturas y presiones y es muy resistente, por lo que se utiliza en la construcción, para hacer piezas de aviones y piezas forjadas de automóviles.

#### **2.4.6 Vanadio**

Debido a su dureza y gran resistencia a la tracción, el metal se utiliza en muchas aleaciones, como el ferrovanadio, el níquel-vanadio y el cromo-vanadio. Los aceros de cromo-vanadio se utilizan para fabricar muelles y en mecanismos de transmisión y otras piezas de los motores. Las aleaciones de titanio-vanadio se usan para vainas de proyectiles, bastidores de motores a reacción y componentes de reactores nucleares.



## Capítulo II

## Marco Teórico

### 2.4.7 Cobre

El cobre tiene una gran variedad de aplicaciones a causa de sus ventajosas propiedades, como son su elevada conductividad del calor y electricidad, la resistencia a la corrosión, así como su maleabilidad y ductilidad.

### 2.4.8 Titanio

Debido a su resistencia y su peso ligero, el titanio se usa en aleaciones metálicas y como sustituto del aluminio.

### 2.4.9 Boro

Aunque el boro tiene valencia 3 y su posición en el sistema periódico indicaría una relación cercana con el aluminio, en realidad es mucho más parecido al carbono y al silicio en sus propiedades químicas. En sus compuestos, el boro actúa como un no metal, pero a diferencia de casi todos los no metales, el boro puro es un conductor eléctrico, como los metales y el carbono (grafito). El boro cristalino es similar al diamante en apariencia y propiedades ópticas, y es casi tan duro como él. Los hidruros de boro son todavía más parecidos a los compuestos de silicio y carbono

### 2.4.10 Aluminio

Se puede preparar una amplia gama de aleaciones recubridoras y aleaciones forjadas que proporcionen al metal más fuerza y resistencia a la corrosión o a las temperaturas elevadas. Algunas de las nuevas aleaciones pueden utilizarse como planchas de blindaje para tanques y otros vehículos militares.

### 2.4.11 Tungsteno

Los principales usos del wolframio son los filamentos de las lámparas incandescentes, los alambres en hornos eléctricos y la producción de aleaciones de acero duras y resistentes.

**2.4.12 Cobalto**

Las aleaciones resistentes a la temperatura, llamadas superaleaciones, contienen cobalto y se emplean en la industria y en las turbinas de los aviones. Una aleación con acero llamada acero de cobalto se utiliza para fabricar imanes permanentes. Con el carburo de wolframio, el cobalto forma una aleación resistente conocida comúnmente como carboloy; ésta aleación es usada para cortar y trabajar el acero; en aleación con el cromo, el cobalto produce la estelitita para usos similares al anterior. Pero este efecto es de naturaleza indirecta porque promueve la partición del cromo y del molibdeno en la ferrita. La presencia de nitrógeno favorece la descomposición espinodal en aceros ferríticos, sin embargo, en los aceros inoxidable dúplex, la situación es más complicada porque el nitrógeno se encuentra en la austenita y por eso la cantidad de nitrógeno disuelta en la ferrita no es una simple función del contenido medio de nitrógeno. La dureza y la tenacidad son los parámetros más sensibles para detectar la fragilización a 475°C.

**2.5 Clasificación de los aceros inoxidables**

El acero inoxidable puede ser clasificado en cinco diferentes familias; cuatro de éstas corresponden a las particulares estructuras cristalinas formadas en la aleación: austenita, ferrita, martensita, y dúplex (austenita más ferrita); mientras que la quinta familia son las aleaciones endurecidas por precipitación, que están basadas más en el tipo de tratamiento térmico usado que en la estructura cristalina.

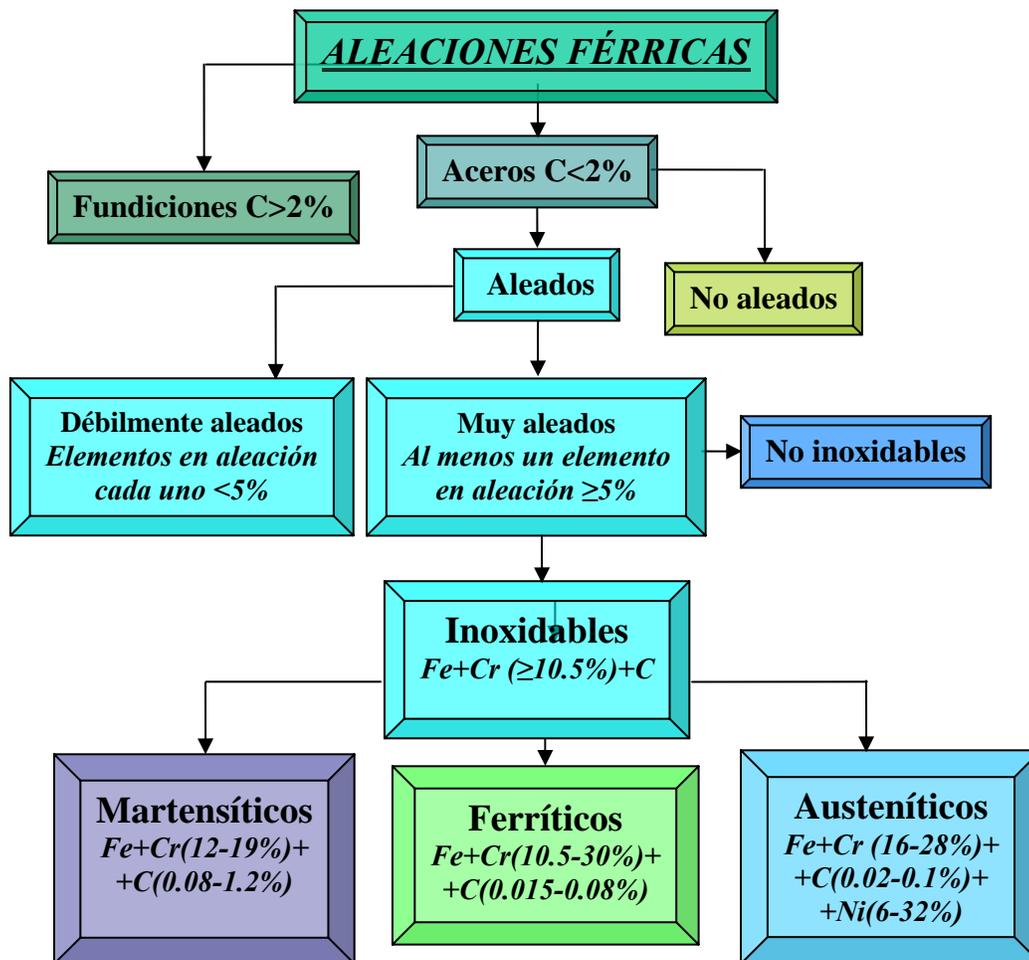


Figura 2.1 Árbol genealógico de los aceros inoxidable [Di Caprio, 1999]

## 2.6 Aceros Dúplex

Los aceros inoxidable dúplex ó DSS (Dúplex Stainless Steel) pueden ser definidos como una familia de aceros que tienen una microestructura consistente de dos fases: ferrita y austenita, el termino DSS es reservado para aleaciones en las cuales la ferrita y la austenita están presentes en cantidades relativamente grandes y aproximadamente iguales en fracción volumétrica.

La estructura 50-50 de ferrita/austenita proporciona una resistencia a la corrosión y a la tracción mejorada, lo cual puede resultar en un significativo ahorro de diseño y en peso, muchas veces haciendo del dúplex un costo efectivo y alternativo.



## Capítulo II

## Marco Teórico

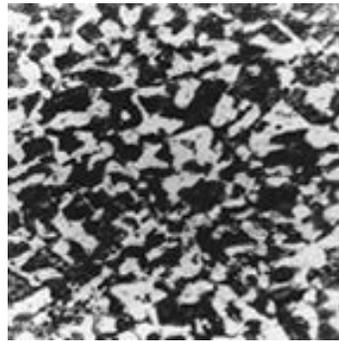
Los aceros inoxidable dúplex son los de más reciente desarrollo; son aleaciones cromo-níquel-molibdeno que forman una mezcla de cantidades aproximadamente iguales de austenita y ferrita.

Sus características son las siguientes:

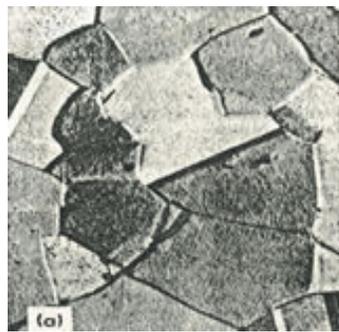
- Son magnéticos.
- No pueden ser endurecidos por tratamiento térmico.
- Buena soldabilidad.
- La estructura dúplex mejora la resistencia a la corrosión de fractura bajo tensión en ambientes con iones de cloruro.

### 2.7 Metalurgia básica

Los aceros inoxidable dúplex presentan dos fases: dispersión de austenita fcc (estructura cristalina cúbica centrada en las caras) en una matriz de ferrita bcc (estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo). La cantidad exacta de cada fase está en función de la composición y el tratamiento térmico. Los principales elementos de aleación son cromo y níquel, sin embargo la cantidad de níquel es insuficiente para desarrollar completamente la estructura cristalina austenítica. El contenido de cromo varía del 18 al 26%, y el contenido de níquel de 4.5 a 6.5%. La adición de elementos como nitrógeno, molibdeno, cobre, silicio, y tungsteno permite controlar el balance en la configuración metalográfica, así como impartir ciertas características de resistencia.



**Figura 2.2** Microestructura del acero al carbono, cristales blancos de ferrita



**Figura 2.3** Microestructura de la austenita

### **2.8 Proceso de soldadura por fricción**

La soldadura por fricción es un método de soldadura que aprovecha el calor generado por la fricción mecánica entre dos piezas en movimiento.

Es utilizada para unir dos piezas aun cuando una de ellas por lo menos sea de igual o distinta naturaleza, por ejemplo: acero duro y acero suave, aluminio y aleaciones, acero y cobre, etc. El principio de funcionamiento consiste en que la pieza de revolución gira en un movimiento de rotación a velocidad constante o variable alrededor de su eje longitudinal y la misma se pone en contacto con otra pieza en

condición estática. Cuando la cantidad de calor producida por rozamiento es suficiente para llevar las piezas a la temperatura de soldadura, se detiene bruscamente el movimiento, y se ejerce un empuje el cual produce la soldadura por penetración granular. La soldadura de la fricción es un proceso totalmente mecánico de la fase sólida en el cual el calor es generado por la fricción para producir un empalme soldado entre metales similares o disímiles.

Las ventajas de este tipo de soldadura son metalúrgicas y físicas. Se forma un empalme consolidado sin hacer uso de ningún metal de relleno, flujo o gas del protector. El proceso está ambientalmente limpio; no se generan arcos, chispas, humos o llamas. La preparación superficial y la limpieza no son tan significativas con la mayoría de los materiales puesto que en el proceso se queman y desplazan impurezas superficiales. A continuación se presentan en la figura 2.4 un esquema del proceso de soldadura por fricción y en la figura 2.5 se muestra una foto al momento de fundirse los metales en contacto.

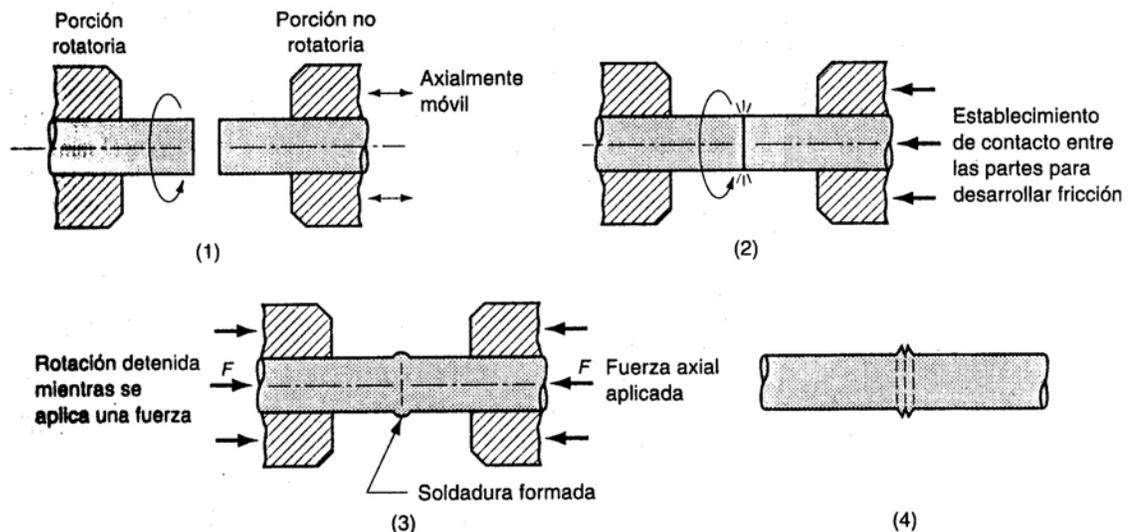
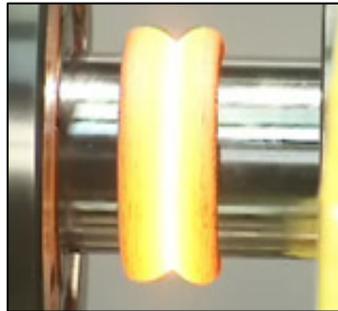


Figura 2.4 Esquema de soldadura por fricción



**Figura 2.5 Fotografía de piezas soldadas por fricción**

Este tipo de soldadura se usa comúnmente para unir materiales con secciones transversales circulares y de cuerpo macizo con medidas de diámetros que pueden estar comprendidas entre 5mm y mas de 100mm y sus aplicaciones se encuentran en industrias como la agrícola, automotriz, petrolera, marina y aeroespacial.

Algunas limitaciones de este proceso de soldadura radican en la forma de las piezas a soldar, ya que la que es sometida a giro debe poseer un eje de simetría sobre el cual pueda rotar, la alineación de las piezas de trabajo es el punto mas critico del proceso ya que de ello depende el frotamiento y calentamiento uniforme que deben tener dichas piezas para lograr una unión óptima.

### **2.9 Propiedades y pruebas mecánicas**

Las propiedades mecánicas a evaluar se describen por separado en las secciones siguientes.

### **2.10 Dureza**

La dureza se utiliza con mucha más frecuencia que las otras propiedades mecánicas para especificar las condiciones finales de una parte estructural. Se debe,



en parte; a que las pruebas de dureza son menos costosas en tiempo y dinero para efectuarlas. La prueba puede efectuarse en una pieza terminada sin necesidad de maquinar un a muestra o probeta especial. Es decir, una prueba de dureza puede ser no destructiva, pues se puede efectuar en una pieza real sin perjudicar su función en servicio.

La dureza se define como la capacidad de un material para resistir la deformación plástica ó la penetración con un indentador que tenga un extremo esférico o cónico.

### **2.10.1 Dureza Vickers o a la pirámide de diamante**

La dureza (Hp) a la pirámide de diamante o la dureza Vickers (Hv) como es mejor conocida, es el número de dureza que se obtiene al dividir la carga aplicada a un indentador piramidal con base cuadrada entre el área de la superficie de la indentacion.

Este es de diamante industrial y el área de los dos pares de caras opuestas está tallada con precisión aun ángulo incluso de 136°. La carga aplicada puede variar desde 100 g para lecturas de microdureza hasta 120 Kg. Para lecturas estándar de macrodureza.

La indentacion en la superficie de trabajo es cuadrada. Para determinar este número de dureza se mide la longitud de las dos diagonales de la indentacion y se emplea el valor promedio de la ecuación:

$$HV = \frac{2 \times L \times \text{sen}(\alpha/2)}{d^2} = \frac{(1,854) \times L}{d^2} \quad (2.1)$$



Donde  $L$  = carga aplicada, Kg.

$d$  = diagonal de la indentación, mm

$\alpha$  = ángulo de cara de la pirámide,  $136^\circ$

La ventaja principal del indentador de cono o pirámide es que produce indentaciones cuya configuración geométrica es similar sin que importe la profundidad, lo cual no ocurre con el indentador de esfera o bola.

### **2.11 Ensayo de Tracción**

Se efectúa en una máquina que puede aplicar cargas de tracción o compresión uniaxiales a las probetas y tiene componentes para registrar con exactitud el valor de la carga y la cantidad de deformación que ocurre en la muestra. La probeta para tracción puede ser un cilindro o una tira plana con sección transversal reducida, llamada (sección de calibración), a la mitad de su longitud para asegurar que la fractura no ocurra en los puntos de sujeción. La longitud mínima de la sección reducida para una muestra normal (estándar) es de cuatro veces su diámetro.

La probeta que más se emplea tiene una sección de calibración de 0.505 pulg. de diámetro (superficie de la sección transversal de 0.2 pulg.<sup>2</sup>) y que tiene una longitud de 2 y  $\frac{1}{4}$  de pulg. para recibir una sección de calibración de 2 pulg. de longitud.

La prueba de tracción, además de las propiedades de resistencia, rigidez y ductilidad, también da información respecto al comportamiento esfuerzo-deformación del material.



## Capítulo II

## Marco Teórico

La resistencia es una propiedad de un material; es la medida de su capacidad para soportar esfuerzos o de su capacidad de carga. Para determinar el valor numérico de la resistencia, se divide la carga correspondiente (de fluencia, máxima, de fractura, cortante, cíclica, de arrastre, etc.) entre el área transversal original de la probeta y se le da la identificación  $S$

Por tanto:

$$S = \frac{P}{A_0} \quad (2.2)$$

Los subíndices y, u, f y s se agregan a  $S$  para denotar las resistencias de fluencia, último, de fractura y cortante, respectivamente.

El esfuerzo es una respuesta del material debida a una carga aplicada. Si en una pieza no hay cargas, tampoco habrá esfuerzos.

El esfuerzo axial en la probeta se calcula dividiendo la carga  $P$  entre el área de la sección transversal ( $A$ ):

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2.3)$$

Cuando en este cálculo se emplea el área inicial de la probeta, el esfuerzo resultante se denomina esfuerzo nominal (esfuerzo convencional o esfuerzo de



ingeniería). Se puede calcular un valor más exacto del esfuerzo axial, conocido como esfuerzo real.

La deformación unitaria axial media se determina a partir del alargamiento “d” medido entre las marcas de calibración, al dividir “d” entre la longitud calibrada  $L_0$ . Si se emplea la longitud calibrada inicial se obtiene la deformación unitaria nominal ( $\varepsilon$ ).

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L_0} \quad (2.4)$$

Después de realizar una prueba de tensión y de establecer el esfuerzo y la deformación para varias magnitudes de la carga, se puede trazar un diagrama de esfuerzo contra deformación. Tal diagrama es característico del material y proporciona información importante acerca de las propiedades mecánicas y el comportamiento típico del material.

En la figura 2.6 se muestra el diagrama esfuerzo-deformación representativo de los materiales dúctiles. El diagrama empieza con una línea recta desde O hasta A. En esta región, el esfuerzo y la deformación son directamente proporcionales, y se dice que el comportamiento del material es lineal. Después del punto A ya no existe una relación lineal entre el esfuerzo y la deformación, por lo que el esfuerzo en el punto A se denomina límite de proporcionalidad. La relación lineal entre el esfuerzo y la deformación puede expresarse mediante la ecuación  $\sigma = E \times \varepsilon$ , donde E es una constante de proporcionalidad conocida como el módulo de elasticidad del material. El módulo de elasticidad es la pendiente del diagrama esfuerzo-deformación en la región linealmente elástica y su valor depende del material particular que se utilice.

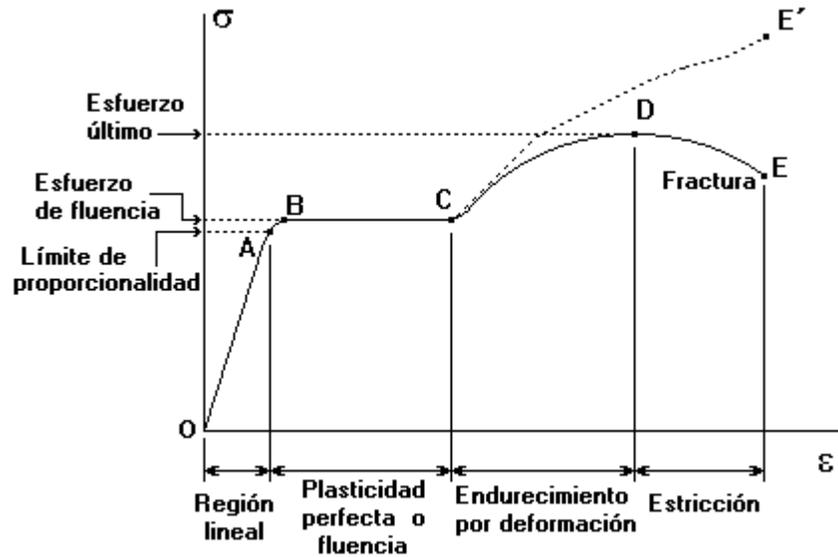


Figura 2.6 Diagrama esfuerzo-deformación de materiales dúctiles en tensión

La ecuación  $\sigma = E \times \varepsilon$  se conoce comúnmente como ley de Hooke.

## 2.12 Procedimiento de ensayo metalográfico

Por ensayo metalográfico se conoce aquel tipo de ensayo mediante el cual se logra la obtención y valoración de micrografías. Las probetas de material se rectifican y pulen con el fin de eliminar las rugosidades procedentes de la fabricación y poder reconocer fallos del material tales como: inclusiones de escoria, óxidos y sulfuros, así como grietas, poros y burbujas de gas.

Si se aplican ácidos a la superficie, se colorean los componentes de la textura o se vuelven rugosos. Bajo la acción de una fuente de luz, las probetas tratadas de esta forma, vistas al microscopio muestran diferencias de luminosidad debido a que los



colores o irregularidades reflejan la luz de forma distinta; en cierto modo aparece la imagen de la textura.

### **2.13 Microscopía electrónica de barrido y Fractografía**

El microscopio electrónico de barrido es un instrumento que permite la observación y caracterización superficial de materiales orgánicos e inorgánicos, aportando valiosa información sobre la morfología del material analizado. A través de este tipo de microscopio se observan distintas clases de señal que provienen de la muestra y se utilizan para examinar un gran número de sus características.

Las aplicaciones del microscopio electrónico de barrido son muy variadas, y van desde la industria petroquímica o la metalurgia hasta la medicina forense. Sus análisis proporcionan datos como textura, tamaño y forma de la muestra.

En cuanto al análisis de materiales se refiere, se puede obtener la caracterización microestructural de los mismos, identificación, análisis de fases cristalinas y transiciones de fases en diversos tipos tales como metales, cerámicas, materiales compuestos, semiconductores, polímeros y minerales. Además de esto se obtienen valiosos datos sobre la composición de superficies y tamaño de grano, la valoración del deterioro de materiales, determinación del grado de cristalinidad y presencia de defectos, identificación del tipo de degradación (fatiga, corrosión, fragilización), etc.

### **2.14 Conceptos Básicos**

#### **Propiedades Mecánicas**

Las propiedades mecánicas de los materiales son las que definen el comportamiento de estos. Las más importantes son elasticidad, rigidez, plasticidad, dureza, fragilidad, tenacidad, resistencia a la fatiga, resiliencia y resistencia mecánica.



## Capítulo II

## Marco Teórico

---

**Elasticidad** es la capacidad que tienen los materiales elásticos de recuperar la forma primitiva cuando cesa la carga que los deforma. Si se rebasa el límite elástico, la deformación que se produce es permanente. La rigidez es su opuesto, en este caso se rebasará antes el límite de elasticidad y el material se fracturará.

**Plasticidad** es la capacidad que tienen los materiales de adquirir deformaciones permanentes bajo la acción de esfuerzos exteriores, sin llegar a la ruptura.

**Dureza** es la mayor o menor resistencia que oponen los cuerpos a ser rayados o penetrados.

**Fragilidad** es la propiedad opuesta a la tenacidad; el intervalo plástico es muy corto y por tanto, sus límites elásticos y de rotura están muy próximos.

**Tenacidad** es la capacidad de absorción de energía que posee un material tanto en el campo elástico como en el campo plástico.

**Resistencia a la Fatiga** es la resistencia que ofrece un material a la rotura producida por la acción de cargas dinámicas cíclicas.

**Resiliencia** es la cantidad de energía que puede absorber un material, antes de que comience la deformación irreversible, esto es, la deformación plástica. Se corresponde con el área bajo la curva de un ensayo de tracción entre la deformación nula y la deformación correspondiente al esfuerzo de fluencia.

**Resistencia Mecánica** es la capacidad de los materiales a soportar esfuerzos de tracción o compresión, cizalladura o esfuerzos cortantes, flexión y torsión.

**Esfuerzos a que pueden ser sometidos los materiales.**

Los materiales sólidos responden a fuerzas externas como la tensión, la compresión, la torsión, la flexión o la cizalladura. Los materiales sólidos responden a dichas fuerzas con:

- Una deformación elástica (en la que el material vuelve a su tamaño y forma originales cuando se elimina la fuerza externa)
- Una deformación permanente
- Una fractura

**Tracción** es una fuerza que tira; por ejemplo, la fuerza que actúa sobre un cable que sostiene un peso. Cuando un material está sometido a tensión suele estirarse, y recupera su longitud original (deformación elástica), si esta fuerza no supera el límite elástico del material. Bajo esfuerzos mayores, el material no vuelve completamente a su situación original (deformación plástica), y cuando la fuerza es aún mayor, se produce la ruptura del material.

**Compresión** es una fuerza que prensa, esto tiende a causar una reducción de volumen. Si el material es rígido la deformación será mínima, siempre que la fuerza no supere sus límites; si esto pasa el material se doblaría y sobre él se produciría un esfuerzo de flexión.

Si el material es plástico se produciría una deformación en la que los laterales se deformarían hacia los lados.

**Flexión** es una fuerza en la que actúan simultáneamente fuerzas de tensión y compresión; por ejemplo, cuando se flexiona una varilla, uno de sus lados se estira y el otro se comprime.



## Capítulo II

## Marco Teórico

---

Si estas fuerzas no superan los límites de flexibilidad y compresión de del material este solo se deforma, si las supera su produce la ruptura del material.

**Torsión** es una fuerza que dobla el material, esto se produce cuando el material es girado hacia lados contrarios desde sus extremos. En este tipo de fuerza también actúan simultáneamente tensión y compresión.

Si no se superan sus límites de flexión este se deformará en forma de espiral, si se superan el material sufrirá un ruptura.

**Cizalladura** es una fuerza que corta, esto se produce cuando el material presionado (en dos partes muy cercanas) por arriba y pro abajo. En este tipo de fuerza también actúan simultáneamente tensión y compresión. Si esta fuerza no supera los límites de flexión y compresión del material este se deformará, si los supera la fuerza producirá un corte en éste.



## GLOSARIO

**Austenita ( $\gamma$ ):** Solución sólida intersticial de carbono en hierro. Tiene una estructura cristalina cúbica centrada en las caras (FCC).

**Ductilidad:** Capacidad de material para deformarse plásticamente sin fracturarse, medida por la elongación o reducción de área en una prueba de tracción.

**Dureza:** Resistencia de un material a la penetración.

**Ferrita ( $\alpha$ ):** Solución sólida intersticial de carbono. Tiene una estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo (BCC).

**Fase:** Parte químicamente homogénea de una microestructura.

**Fase Sigma ( $\sigma$ ):** compuesto intermetálico concentrado de Fe-Cr.

**Fluencia:** Deformación plástica de un material como una función del tiempo que tiene lugar cuando esta sujeto a la acción de una carga.

**Grano:** Cristal diminuto e individual en una microestructura policristalina.

**Limite Elástico:** Esfuerzo máximo al que un material puede someterse sin que resulte ninguna deformación permanente después de la liberación completa de esfuerzos.

**Metalografía:** La metalografía es la ciencia que estudia las características estructurales o constitutivas de un metal o aleación relacionándolas con las propiedades físicas y mecánicas.



**Microdureza:** Dureza determinada al usar un microscopio para medir la diagonal de la impresión dejada por un indentador Knoop o Vickers. La dureza es igual a la carga dividida entre el área de la impresión.

**Punto de Fluencia:** Primer esfuerzo en un material, generalmente menor que el máximo esfuerzo que se puede obtener, en el que ocurre un incremento de deformación sin aumento de esfuerzo. Solo ciertos metales exhiben un punto de fluencia. Si hay un decremento de esfuerzo después de la fluencia, se puede establecer la diferencia entre los puntos superior e inferior de fluencia.

**Clivaje:** Es la tendencia de un mineral a romperse a lo largo de una superficie plana. El término es usado para describir el arreglo geométrico producido por su rompimiento.

# CAPÍTULO III



## CAPÍTULO III

### 3. MARCO METODOLÓGICO

Este capítulo tiene como finalidad describir los pasos y técnicas que se ejecutarán en el trabajo de investigación, con el propósito de alcanzar los objetivos anteriormente planteados.

#### 3.1 Nivel de investigación

**Exploratorio:** Se estudia y analiza el comportamiento del acero Dúplex SAF 2507 cuando es sometido al proceso de soldadura por fricción, con el fin de evaluar las propiedades mecánicas y la microestructura de la junta soldada. Esta investigación posee cierto carácter exploratorio, ya que no existen antecedentes de procesos de soldadura por fricción en este tipo de material.

**Descriptivo:** Se realizará el estudio del comportamiento mecánico en la soldadura por fricción de un grupo de probetas de acero Dúplex SAF 2507 a través de ensayos mecánicos y metalográficos.

**Explicativo:** Por medio de los diferentes ensayos mecánicos como lo son tracción y dureza, además de los análisis microscópicos; se puede explicar el comportamiento mecánico del acero Dúplex SAF 2507 cuando es sometido a soldadura por fricción, analizando y evaluando las distintas propiedades del mismo.



### 3.2 Diseño de la investigación

Para cumplir el logro de los objetivos propuestos, se han planteado una serie de actividades resumidas en la siguiente lista:

- A. Adquisición del material.
- B. Análisis químico.
- C. Mecanizado del material para obtener las probetas que se utilizarán en el proceso de soldadura por fricción.
- D. Puesta a punto de la máquina a soldar por fricción.
- E. Realizar la soldadura por fricción.
- F. Mecanizado de probetas soldadas según las normas para ensayos de tracción.
- G. Realizar los ensayos de tracción.
- H. Análisis metalográfico.
- I. Análisis fractográfico.
- J. Mecanizado de probetas según las normas para ensayos de dureza.
- K. Realizar los ensayos de Microdureza.

### 3.3 Material utilizado

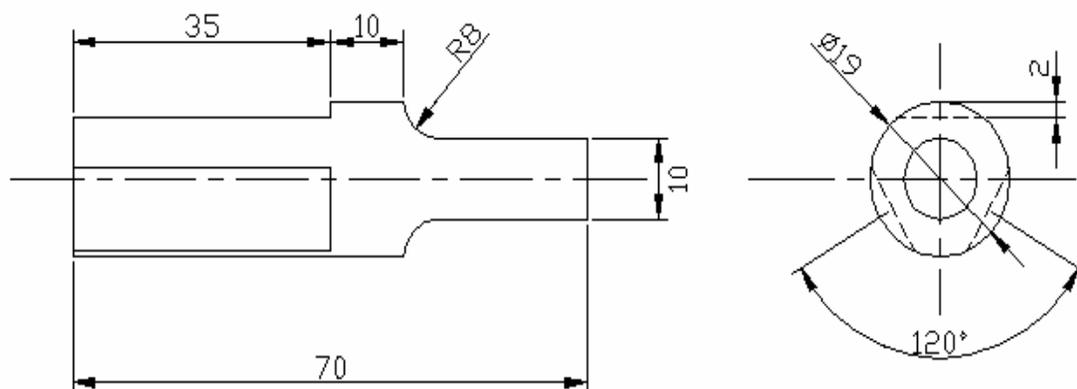
Se usarán barras cilíndricas macizas de acero inoxidable dúplex SAF 2507, proporcionado por SANVEN STEEL C.A, las mismas poseen un diámetro de 20mm y su composición química (% en peso) se muestra a continuación.

**Tabla 3.1 Composición química acero inoxidable dúplex SAF 2507 SANDVICK (% Peso)**

<b>Nombre Comercial</b>	<b>Standard UNS</b>	<b>Cr (%)</b>	<b>Mo (%)</b>	<b>Ni (%)</b>	<b>N (%)</b>	<b>C (%)</b>	<b>Fe (%)</b>
<b>SAF 2507</b>	<b>S32750</b>	<b>25.15</b>	<b>3.91</b>	<b>6.96</b>	<b>0.282</b>	<b>0.014</b>	<b>62.46</b>

### 3.4 Población y muestra

La población a la cual se le realizó los distintos ensayos y análisis fue de 20 probetas individuales, las cuales posteriormente se soldaron por fricción; el número de probetas evaluadas se debe a razón de que las circunstancias económicas y de suministro de este tipo de acero no fueron favorables. Dichas probetas cumplieron con ciertas dimensiones y características normadas, con el fin de que el proceso de estudio se realizara de la manera más adecuada. En la figura 3.1 se observan las dimensiones y formas de las probetas a soldar por fricción.



**Figura 3.1 Forma y dimensiones de la probeta a soldar por fricción**

### 3.5 Puesta a punto de la máquina de soldar por fricción

La máquina que se usó para realizar la soldadura por fricción se encuentra en el laboratorio de procesos de fabricación de la facultad de ingeniería de la Universidad de Carabobo.

El proceso de puesta a punto de la máquina consiste en realizar varias soldaduras usando el mismo material ó un material similar al que se va a evaluar, con el fin de



comprender el funcionamiento de la máquina y determinar algunos parámetros como son la velocidad de rotación y la presión de trabajo, para así fijar valores óptimos que permitan realizar un correcto proceso de soldadura de acuerdo al material empleado.

A continuación en la figura 3.2 se muestra la máquina que se usó para realizar la soldadura por fricción.



**Figura 3.2 Máquina de soldar por fricción**

### **3.6 Ensayo de tracción**

Por medio del ensayo de tracción se podrán medir las propiedades mecánicas del material soldado por fricción sometido a cargas uniaxiales de tracción.

En la figura 3.3 se muestra la máquina donde se realizaron los ensayos de tracción. La maquina esta compuesta por dos mordazas, una fija y la otra móvil que sirven de

sujeción a la probeta; la capacidad máxima de carga aportada por la máquina es 100KN.



**Figura 3.3 Máquina de ensayo de tracción (GALDABINI)**

Todas las probetas se sometieron a cargas normales aplicadas perpendicularmente sobre sus secciones transversales, para ello se utilizó el equipo de tracción “CTM-20” marca: GALDABINI el cual se encuentra ubicado en el Laboratorio de Materiales de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo

En la figura 3.4 se muestra un esquema de la probeta normalizada para ensayos de tracción y la tabla 3.2 presenta las especificaciones de la misma según la norma ASTM B557M, la cual se corresponde con las dimensiones tomadas del Small-Size Specimens Proportional to Standard (APENDICE B).

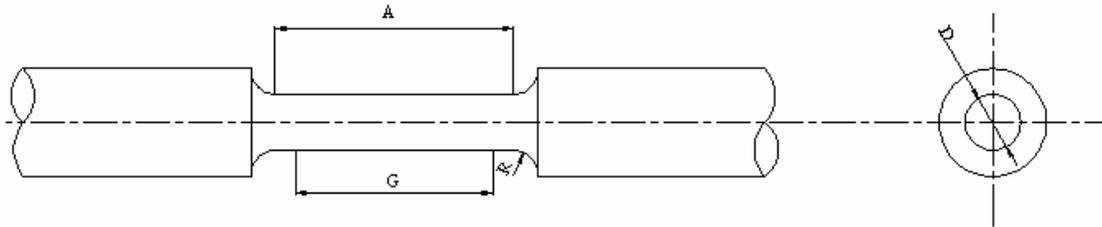


Figura 3.4 Dimensiones de la probeta para ensayos de tracción.

Tabla 3.2 Condición que deben cumplir las probetas a ensayar según norma ASTM B 557M

Dimensiones	(mm)
D = Diámetro	9
G = Longitud Calibrada	45 ± 0.09
R = Radio	8
A = longitud de la sección reducida mínima	54

### 3.7 Ensayo de metalografía

La metalografía microscópica tiene como objetivo determinar la microestructura de los materiales, para así poder identificar las fases presentes en los mismos además de evaluar posibles defectos microscópicos originados por de los distintos procesos de conformado a los que pudiesen haber sido sometidos.

La preparación de las muestras para el análisis metalográfico está formada por una serie de pasos que deben realizarse de manera sistemática bajo las normas ASTM E 3-95 (APENDICE B)



**Toma de la muestra:** Se obtendrán muestras de la zona calibrada de las probetas luego de ser traccionadas, en las mismas se generarán las superficies que posteriormente se prepararán para ser observadas en el microscopio. Igualmente las mismas serán utilizadas para la medición en los ensayos de microdureza Vickers.

**Debaste:** Este procedimiento consiste en desbastar la superficie del material con papel abrasivo de diferentes tamaños de granos, hasta lograr una superficie lisa, plana y libre de irregularidades. La finalidad del debaste es preparar la superficie para el pulido. Para lograr la superficie adecuada para el estudio se utilizaran papeles de lija con los siguientes números de grano y en el siguiente orden de utilización (240, 320, 400, 600,1200).

El debaste se realizará perpendicularmente al inmediato anterior para lograr la eliminación de la mayor cantidad de rayas posibles y obtener una superficie lo mas plana y lisa.

**Pulido:** El equipo encargado de llevar a cabo este paso es una pulidora metalográfica, la cual esta formada por discos de pulido sobre las que se rocía alúmina con la finalidad de eliminar las rayas en la superficie del material dejadas en la operación inmediatamente anterior para obtener así un acabado tipo espejo.

El pulido se efectúa en dos etapas: una con un pulimento grueso que se hace sobre un disco giratorio recubierto con un paño de mesa de billar el cual se impregna con alúmina de 1 micra (abrasivo).En la siguiente etapa se realiza un pulimento fino usando un disco similar al anterior, sólo que en este caso el disco giratorio está recubierto con un paño de mesa de billar limpio e impregnado con alumina de 0,5 micras.



**Ataque:** Tiene como finalidad descubrir la microestructura del material y algunos otros detalles a nivel microscópico mediante una reacción química que se consigue al poner en contacto la cara pulida del material con un reactivo químico apropiado.

Para realizar el análisis se utilizó el siguiente reactivo químico con sus respectivas concentraciones.

*Bisulfito de sodio ( $Na_2S_2O_5$ ) + Acido Clorhídrico (HCL) + Agua destilada*

**Tabla 3.3 Concentración de la solución para el ataque químico.**

<i><math>Na_2S_2O_5</math></i>	<i>HCL</i>	<i>Agua destilada</i>
<b>0,5 gr</b>	<b>7.5 ml</b>	<b>50 ml</b>

Posterior al ataque las muestras fueron llevadas al microscopio para determinar las microestructuras presentes utilizando distintos aumentos para lograr enfoques mas adecuados.

### **3.7 Medición del tamaño de grano**

Para la designación del tamaño de grano se utilizó el método de comparación, el cual; mediante observaciones de prueba y error se establece un patrón que coincida con la muestra en estudio y entonces se designa el tamaño de grano del metal por el número correspondiente al número índice del patrón mixto. El método descrito anteriormente es más conveniente y bastante preciso en muestras de granos de ejes iguales.

Para aplicar ésta metodología se observaron las muestras respectivas en el microscopio localizado en el laboratorio de materiales, utilizando un aumento establecido como norma en 100X y se hizo la comparación respectiva determinando el patrón correspondiente.



La medición de tamaño de grano para la condición original y las condiciones después de los ensayos se realizó según las normas ASTM E-112-96 (APENDICE B).

El número de grano por pulgada cuadrada se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$N = 2^{n-1} \quad (3.1)$$

Donde:

n = Número de tamaño de grano

N = Número de grano por pulgada cuadrada

### **3.9 Ensayo de microdureza**

Las probetas utilizadas para el ensayo de microdureza fueron las mismas empleadas para el estudio metalográfico, éste ensayo consiste en determinar la resistencia a la penetración local en puntos cercanos a la zona donde ocurre la soldadura y en consecuencia donde se genera la mayor exposición de calor sobre el material.

Se utilizó un microdurómetro marca LEITZ WETZLAR GERMANY, con dispositivo de iluminación incluido de 8 voltios y 0,6 amperios, dicho instrumento posee con un sistema tipo revolver con ocular de 10X y objetivos de 10X y 40X además de la inclusión del disparador remoto por cable (figura 3.5). Se empleó el método Vickers, el cual expresa la dureza del material en valores de presión originados bajo el indentador en kilogramos por milímetro cuadrado.



El indentador es un diamante en forma de pirámide con base cuadrada y un ángulo en el vértice de 136°.



**Figura 3.5 Microdurómetro (Vickers)**

Debido a la forma del indentador, la huella dejada en la zona estudiada es un cuadrado y su diagonal se mide mediante un microscopio con ocular micrométrico e índices móviles. La distancia entre índices se mide por medio de un tornillo micrométrico graduado en milésimas de milímetro. Conocida la longitud de la diagonal se puede determinar la dureza aplicando la siguiente ecuación o buscando el valor directamente de una tabla apropiada.

$$HV = \frac{(1,854) \times L}{d^2} \quad (3.2)$$

Donde:

HV: dureza Vickers.

d: longitud de la diagonal de la huella (mm).

L: carga aplicada (Kg.)



Se designaron tres probetas cilíndricas para realizar parte de éste ensayo, las mismas se mecanizaron longitudinalmente para lograr caras planas a lo largo del eje de simetría, luego fueron embutidas para hacer el estudio de una manera más adecuada; en otras tres probetas se realizó el ensayo usando la sección transversal preparada metalográficamente.

Para este trabajo de investigación, se analizaron las probetas número 1,2 y 3 tanto en las caras superiores que fueron preparadas para el estudio microestructural como en las caras longitudinales luego de ser embutidas las muestras mencionadas anteriormente, todos los ensayos de microdureza se realizaron aplicando una carga de 200gr.

### **3.10 Fractografía**

Luego de realizar los ensayos de tracción, las superficies de fractura se analizaron para identificar el tipo de falla e irregularidades presentes, las muestras se obtuvieron haciendo un corte transversal a las probetas determinadas para éste estudio, estableciendo así las piezas cilíndricas; las cuales contenían en uno de sus extremos las superficies donde ocurrieron las fallas originadas del ensayo a tracción.

Los detalles de las distintas superficies se evaluaron haciendo uso de un microscopio electrónico de barrido (*SEM* por sus siglas en ingles), ubicado en el Centro de Investigaciones Médicas y Biotecnológicas de la Universidad de Carabobo (*CIMBUC*).

# CAPÍTULO

## IV

**CAPITULO IV****RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS****4.1 Soldadura por fricción y ensayo de tracción**

Se adecuaron las dimensiones de las probetas a soldar por fricción siguiendo la norma ASTM B557M. (APENDICE B) con la finalidad de lograr el tamaño necesario que permitiese posicionarlas en la máquina para ensayos de tracción (GALDABINI). La dimensión modificada para la probeta a soldar por fricción fue la de sujeción a las mordazas, la cual se estableció como 43 mm.

Se realizó la soldadura por fricción a un total de 20 probetas para dar origen a 10 probetas soldadas, el ensayo se efectuó a una velocidad de giro constante de 740rpm, la presión aplicada osciló entre 250psi y 350psi y el tiempo de contacto entre probetas osciló entre 5 y 8 segundos (los valores de presión fueron registrados por un manómetro ubicado en el equipo de soldar por fricción y los tiempos de contacto por un cronómetro digital).



**Figura 4.1**  
**Manómetro**



**Figura 4.2**  
**Cronómetro digital**



Figura 4.3

Montaje de probetas en la maquina de soldar por fricción



Figura 4.4

Apariencia de probetas luego de ser soldadas por fricción

Los valores de presión hidráulica aplicada y tiempos de contacto entre probetas se tabularon de la siguiente forma.

Tabla 4.1 Presión hidráulica aplicada y tiempos de contacto entre las probetas.

740rpm	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
P(psi)	342	316	268	328	275	305	311	300	331	340
t(s)	7,41	6,27	5,45	6,82	5,29	5,73	5,76	5,96	6,55	7,12

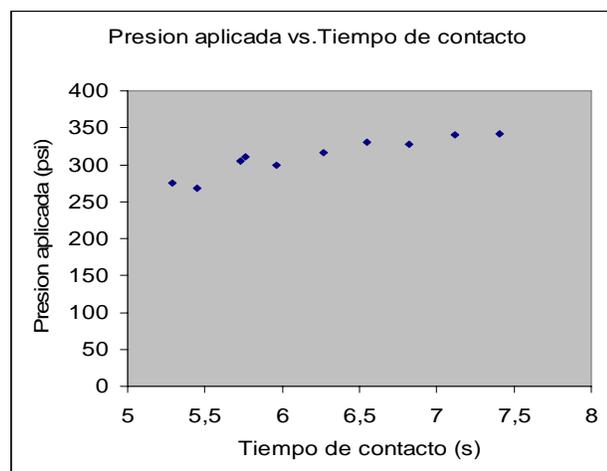


Figura 4.5 Presión hidráulica aplicada vs. Tiempos de contacto entre probetas.

## Capítulo IV

## Resultados y Análisis de Resultados

En la gráfica se puede observar una cierta tendencia de valores de presión relativamente cercanos entre si, para tiempos superiores a los 6,5 segundos hasta los 7,5 segundos de contacto entre probetas.

Luego de realizar las distintas soldaduras se procedió a realizar el ensayo de tracción correspondiente, a continuación se observan algunas figuras obtenidas de dichos ensayos.



**Figura 4.6**

**Apariencia posterior a ensayo de tracción**



**Figura 4.7**

**Apariencia posterior a ensayo de tracción**

En las figuras (4.6 y 4.7) se muestra la apariencia posterior a los ensayos de tracción para dos probetas ensayadas, además de esto se observa en un tono claro la zona soldada.

Los resultados obtenidos de los ensayos de tracción permiten establecer las propiedades mecánicas de resistencia que ofrece la soldadura por fricción en el acero inoxidable dúplex SAF 2507, los mismos se realizaron a todas las muestras soldadas y a temperatura ambiente. Las propiedades mecánicas extraídas de los ensayos fueron: Esfuerzo máximo, esfuerzo de fluencia, esfuerzo de ruptura, porcentaje de alargamiento y porcentaje de reducción de área.

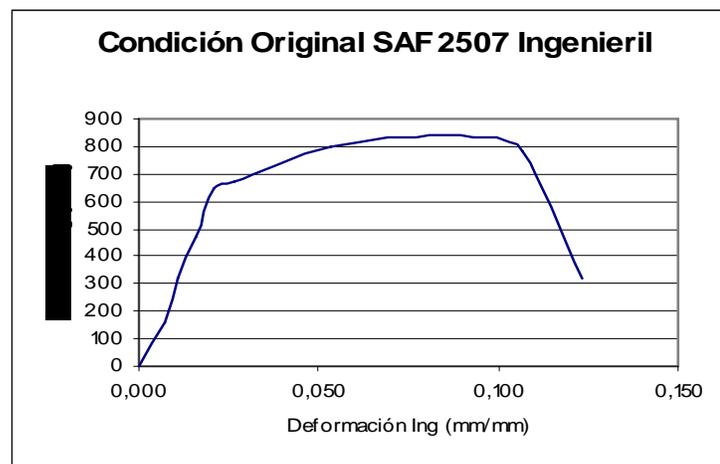
**4.1.1 Esfuerzos**

A continuación se presentan las tablas y graficas obtenidas a partir de los ensayos de tracción realizados a las diez probetas soldadas y a una probeta en condición original.

En la siguiente tabla 4.1 se muestran los valores de las propiedades del acero Dúplex SAF 2507 en condición original.

**Tabla 4.2 Propiedades mecánicas del material en condición de suministro.**

<b>FMAX=100KN VEL=2mm/min.</b>	<b>Esfuerzo de Fluencia Sy (MPa)</b>	<b>Esfuerzo Máximo Sf (MPa)</b>	<b>Esfuerzo de Ruptura Su (MPa)</b>	<b>Porcentaje de Reducción de Área (%)</b>	<b>Alargamiento (%)</b>
<b>PROBETA ENSAYADA</b>	<b>645,17</b>	<b>846,54</b>	<b>302,14</b>	<b>20,1</b>	<b>14,2</b>



**Figura 4.8 Esfuerzo ingenieril vs. Deformación ingenieril (Condición Original)**

En la siguiente tabla se muestran los valores de las propiedades del acero Dúplex SAF 2507 luego de aplicarse el ensayo de tracción a las diez probetas.

**Capítulo IV****Resultados y Análisis de Resultados**

Tabla 4.3 Propiedades mecánicas del acero inoxidable Duplex SAF 2507 luego de ser ensayado a tracción.

FMAX=100KN VEL=2mm/min.	Sy (Mpa)	Su (Mpa)	Sf (Mpa)	Reducción de Área %	Alargamiento %
PROBETA 1	725,28	725,28	725,28	0	0
PROBETA 2	576,46	576,46	576,46	0	0
PROBETA 3	426,31	426,31	426,31	0	0
PROBETA 4	598,15	598,15	598,15	0	0
PROBETA 5	452,05	452,05	452,05	0	0
PROBETA 6	458,37	476,73	362,87	1.1	0.17
PROBETA 7	542,06	542,06	542,06	0	0
PROBETA 8	502,21	502,21	502,21	0	0
PROBETA 9	601,67	601,67	601,67	0	0
PROBETA 10	658,44	658,44	658,44	0	0
PROMEDIO	554,1	555,94	544,55	0.11	0,017

**4.1.2 Comportamiento mecánico del material**

A continuación se presentan las gráficas resultantes de los distintos ensayos de tracción realizados a las diez probetas soldadas.

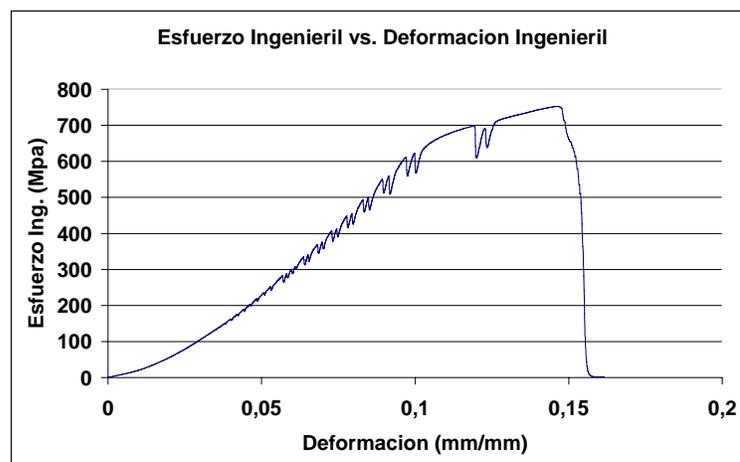


Figura 4.9 Esfuerzo ingenieril vs. Deformación ingenieril (Probeta 1)

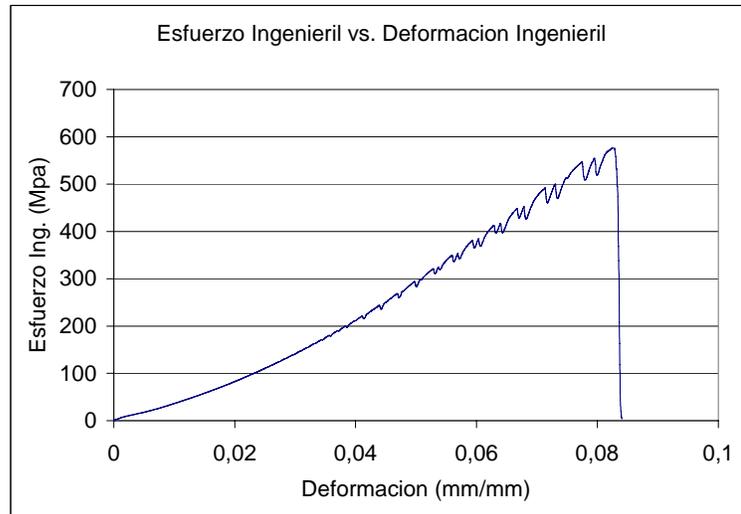


Figura 4.10 Esfuerzo ingenieril vs. Deformación ingenieril (Probeta 2)

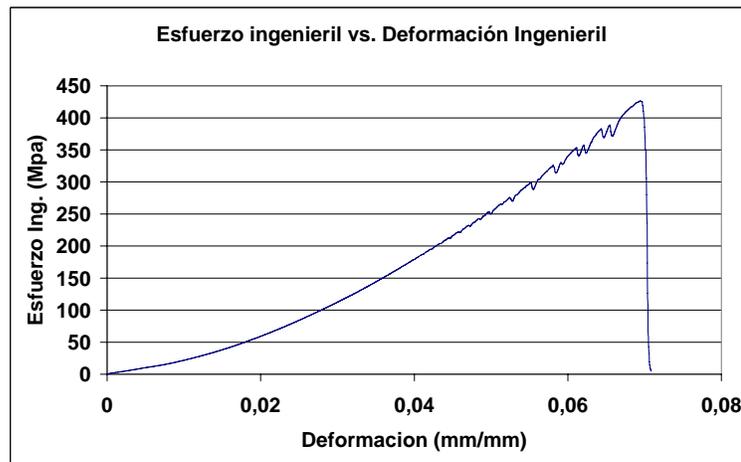


Figura 4.11 Esfuerzo ingenieril vs. Deformación ingenieril (Probeta 3)

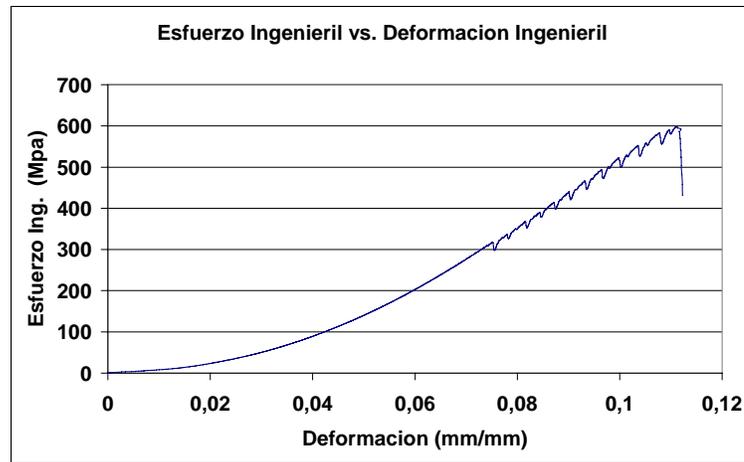


Figura 4.12 Esfuerzo ingenieril vs. Deformación ingenieril (Probeta 4)

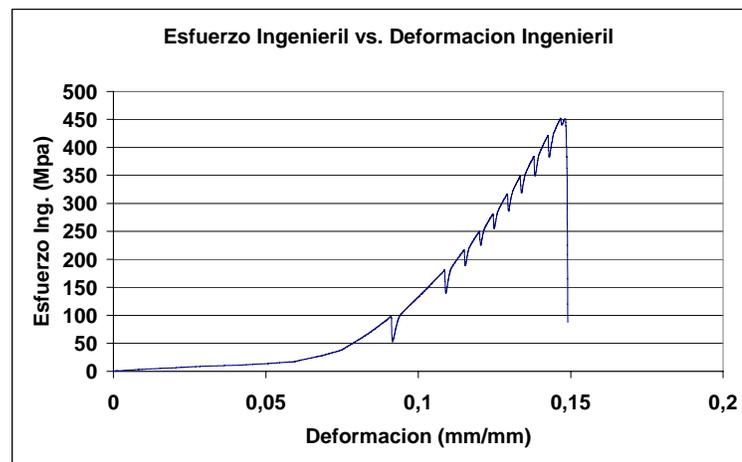


Figura 4.13 Esfuerzo ingenieril vs. Deformación ingenieril (Probeta 5)

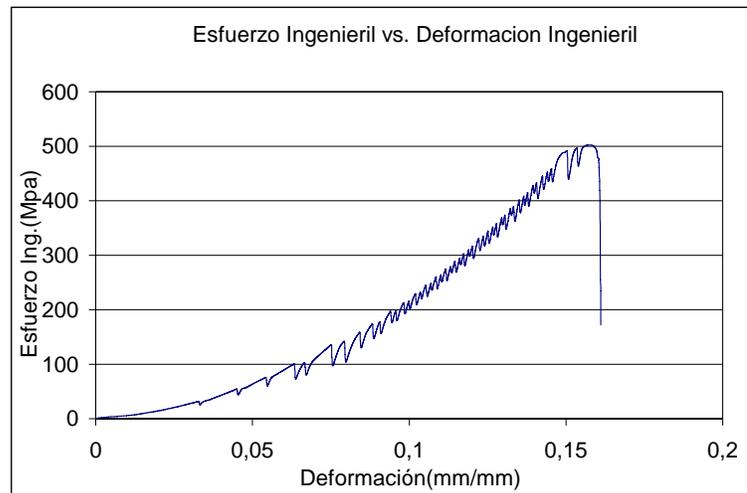


Figura 4.14 Esfuerzo ingenieril vs. Deformación ingenieril (Probeta 8)

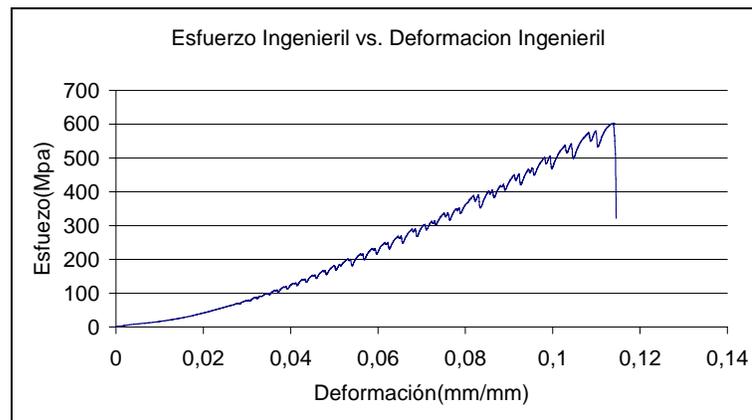


Figura 4.15 Esfuerzo ingenieril vs. Deformación ingenieril (Probeta 9)

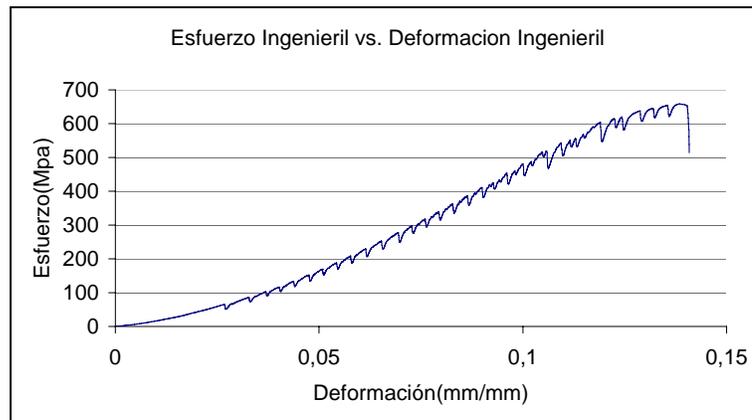


Figura 4.16 Esfuerzo ingenieril vs. Deformación ingenieril (Probeta 10)

Los valores de esfuerzos generados en el ensayo de tracción para la condición original fueron superiores tanto para el  $S_y$  como para el  $S_u$ , los mismos presentaron valores de 645,17Mpa y 846,54Mpa respectivamente comparados con los 554,1Mpa y 555,94Mpa presentados en promedio por las diez probetas ensayadas; para el  $S_f$  se presentó un incremento del valor promedio arrojado por las probetas ensayadas con respecto a la condición original; el mismo varió de 302,14Mpa a 544,55Mpa

La tendencia presentada por las graficas obtenidas a partir de los ensayos de tracción, define un comportamiento elástico; generando como resultado común una fractura frágil que tiene lugar en la zona soldada. Solamente dos ensayos de los diez realizados no siguieron el comportamiento descrito anteriormente, la probeta número 6 presentó una zona plástica bien definida antes del momento de fracturar; mientras que la probeta numero 7 resultó en un ensayo deficiente debido a fallas ocurridas en el equipo de tracción, las cuales ocasionaron el detenimiento anticipado de las mordazas sujetadoras sin poderse definir un comportamiento apropiado, cabe destacar que estos dos ensayos no son representativos en el estudio realizado.



### **4.1.3 Porcentaje de Reducción de Área**

A través del porcentaje de reducción de área se obtiene el máximo cambio en las áreas transversales de las probetas ensayadas, el cambio producido refleja la ductilidad o fragilidad del material mediante el intervalo de dicha variación, ésta propiedad es característica primordial al momento de hacer la selección de algún material; ya que representa la capacidad del mismo para deformarse plásticamente sin llegar a fallar por fractura.

Cabe destacar que esta condición se presentó sólo en la probeta número 6 (una sola de las diez ensayadas); sin ser la presión aplicada en la soldadura ni el tiempo de contacto entre probetas, parámetros que permitiesen concluir directamente sobre éste fenómeno, la variación de esta característica con respecto a la condición original del material fue del 20.1% para dicha condición y de 1.1% para la probeta número 6.

### **4.1.4 Porcentaje de Alargamiento**

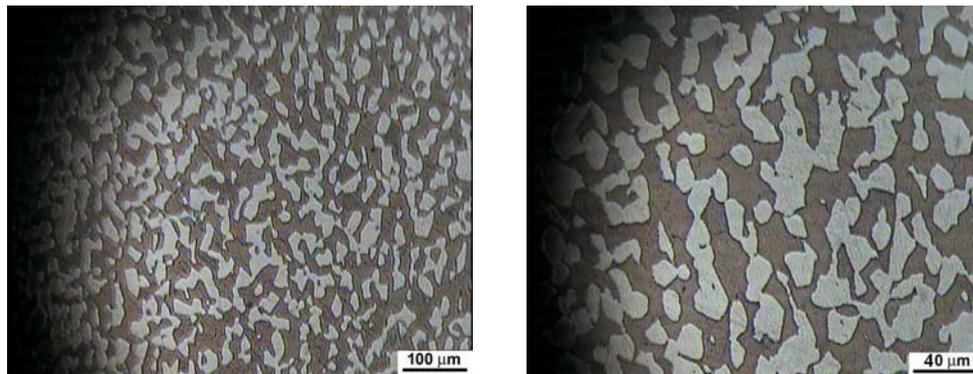
El porcentaje de elongación del material es una medida aproximada de la ductilidad del mismo y se obtiene cuando el cambio en la longitud calibrada para el ensayo de tracción luego de la fractura se divide entre la longitud original de calibración expresándose este valor de manera porcentual.

Al igual que para el porcentaje de reducción de área, existió un único valor de esta propiedad; la cual correspondió igualmente a la probeta número 6, variando dicho valor de 14,2% a 0,17% con respecto a la condición original.

## 4.2 Microestructura del material

Para la microscopía se seleccionaron tres muestras cilíndricas analizando en ellas las superficies que fueron soldadas, además de una muestra para la condición original a temperatura ambiente. Después de ser preparadas metalográficamente se atacaron con una solución de bisulfito de sodio disuelto en ácido clorhídrico diluido lo que permitió revelar a nivel microscópico las fases microestructurales presentes en las mismas, además de esto se realizó un ataque con ácido oxálico para observar de una manera mas clara los límites de granos presentes para la primera y tercera condición de falla.

### Probeta no ensayada a tracción (Microestructuras)



(1: 200X)

(2: 400X)

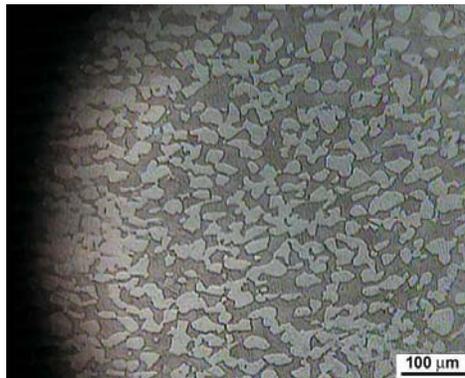
**Figura 4.17** Microestructura del material, condición original (1: 200X y 2: 400X).

Como se observa, la microestructura está constituida por un número granos de características similares en ferrita (granos oscuros) y austenita (granos claros).

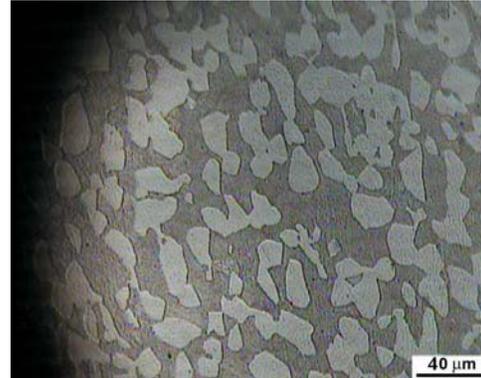
### Probeta para la primera condición de falla (Microestructuras)

Presión aplicada (342psi.), Tiempo de contacto (7.41s) (Soldadura por fricción)

$S_y = S_u = S_f = 725,28\text{Mpa}$  (Ensayo de tracción)



(1: 200X)



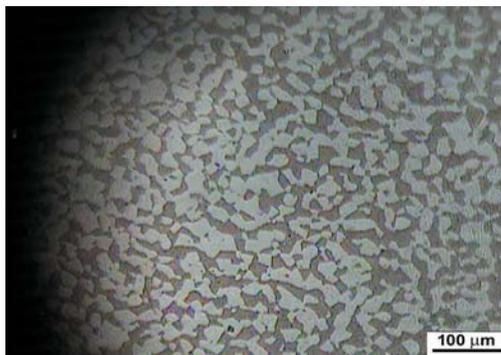
(2: 400X)

Figura 4.18 Microestructura del material, primera condición de falla (1: 200X y 2: 400X).

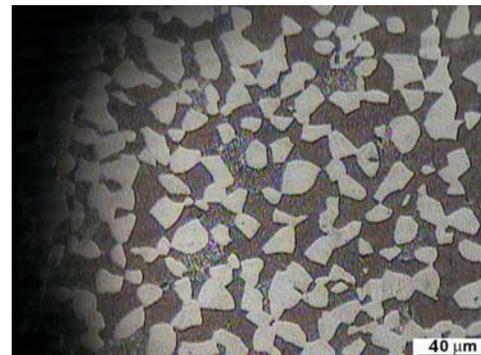
**Probeta para la segunda condición de falla (Microestructuras)**

Presión aplicada (268psi.), Tiempo de contacto (5.45s) (Soldadura por fricción)

$S_y = S_u = S_f = 576,46\text{Mpa}$  (Ensayo de tracción)



(1: 200X)



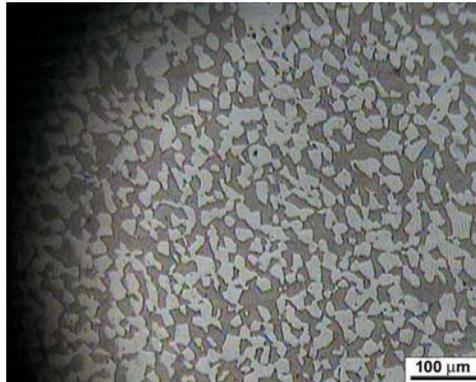
(2: 400X)

Figura 4.19 Microestructura del material, segunda condición de falla (1: 200X y 2: 400X).

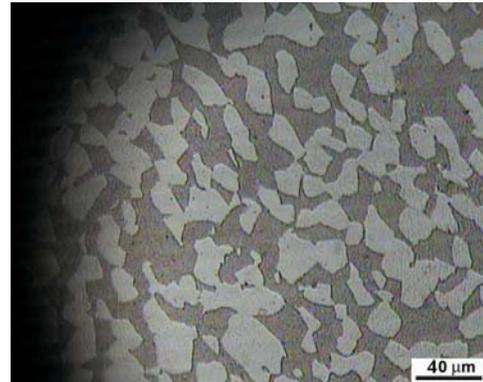
**Probeta para la tercera condición de falla (Microestructuras)**

Presión aplicada (311psi.), Tiempo de contacto (5,76s) (Soldadura por fricción)

$S_y = S_u = S_f = 426,31\text{Mpa}$  (Ensayo de tracción)



(1: 200X)



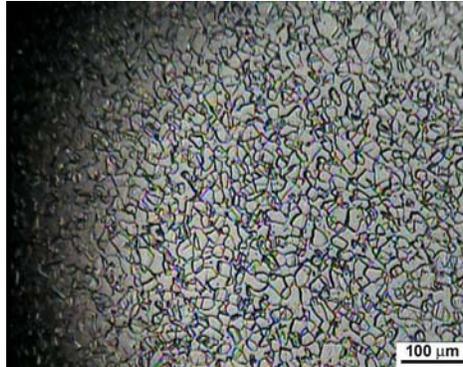
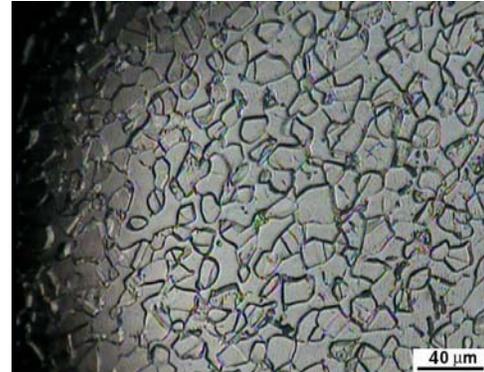
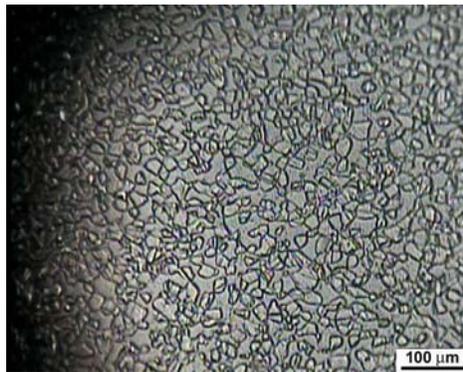
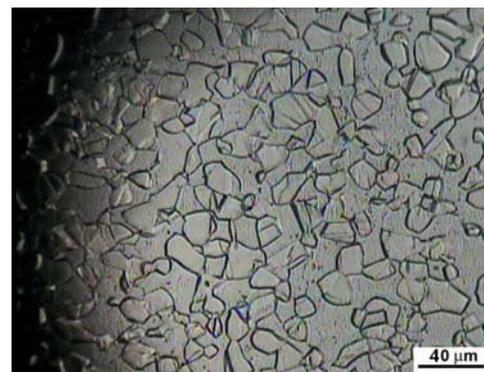
(2: 400X)

**Figura 4.20** Microestructura del material, tercera condición de falla (1: 200X y 2: 400X).

Como se observa, la microestructura está constituida por granos de características similares en ferrita (granos oscuros) y austenita (granos claros).

De acuerdo con los resultados obtenidos por la microscopía óptica, en las figuras 4.17; 4.18; 4.19 y 4.20 se puede observar la tendencia a mantener el equilibrio en cuanto a la apariencia y la cantidad de granos austeníticos y granos ferríticos.

A continuación se presentan algunas figuras de probetas atacadas con ácido oxálico para observar de una manera más clara los límites de grano presentes en las zonas analizadas.

**Probetas atacadas con ácido oxálico****(1: 200X)****(2: 400X)****Figura 4.21 Apariencia del límite de grano, primera condición de falla (1: 200X y 2: 400X).****(1: 200X)****(2: 400X)****Figura 4.22 Apariencia del límite de grano, tercera condición de falla (1: 200X y 2: 400X).**

Se observa que a pesar de someterse el material a ensayos donde se generan altas temperaturas debidas a la fricción, no se presentan diferencias marcadas entre las microestructuras analizadas.

Se comprueba también que el material en su estado de origen posee una gran homogeneidad en cuanto a la microestructura ya que no se observan impurezas que pudiesen afectar directamente sus propiedades, además se aprecia un límite de grano



bien definido y equilibrado entre la matriz ferrítica presente y su contraparte austenítica.

### **4.3 Tamaño de grano**

Para la medición del tamaño de grano se observaron las mismas muestras utilizadas en el estudio metalográfico, para la condición original y tres condiciones distintas de falla, dichas muestras se prepararon a través de las técnicas metalográficas convencionales, de manera que al ser observadas fueron comparadas según los patrones de tamaño de grano establecidos en la norma ASTM E-112 (APENDICE B).

De acuerdo a lo observado en el microscopio con un aumento de 100X, se comparó la microestructura presente con el patrón superpuesto a la misma, determinando así un número de dicho patrón aproximado a 8 para las tres probetas ensayadas; por referencias aportadas en trabajos investigativos anteriores se sabe que el patrón apropiado para este tipo de acero en condiciones originales es de 9, el número de grano por pulgada cuadrada se calcula por medio de la ecuación 3.1.

Condiciones:

Original (Sin ensayo previo)

1era condición:  $S_y = S_u = S_f = 725,28\text{MPa}$

2da condición:  $S_y = S_u = S_f = 576,46\text{MPa}$

3era condición:  $S_y = S_u = S_f = 426,31\text{Mpa}$

**Capítulo IV****Resultados y Análisis de Resultados****Tabla 4.4 Tamaño de grano basado en la norma ASTM E-112, para el acero inoxidable dúplex SAF 2507.**

	<b>Ferrita</b>	<b>Ferrita</b>	<b>Austenita</b>	<b>Austenita</b>
<b>Condición</b>	<b>N° ASTM</b>	<b>N (granos/pulg<sup>2</sup>)</b>	<b>N° ASTM</b>	<b>N (granos/pulg<sup>2</sup>)</b>
<b>Original</b>	<b>9</b>	<b>256</b>	<b>9</b>	<b>256</b>
<b>1ra condición</b>	<b>8</b>	<b>128</b>	<b>8</b>	<b>128</b>
<b>2da condición</b>	<b>8</b>	<b>128</b>	<b>8</b>	<b>128</b>
<b>3ra condición</b>	<b>8</b>	<b>128</b>	<b>8</b>	<b>128</b>

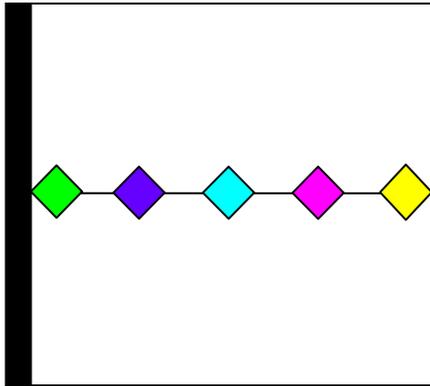
Después de hacer la comparación respectiva con los patrones que estipula la norma ASTM E-112, se puede apreciar un aumento en el tamaño de grano, cambiando el número de granos por pulgada cuadrada de 256 en su condición original a 128 para las tres condiciones de falla designadas para éste ensayo, tanto para la austenita como para la ferrita; esto se traduce en una disminución en las propiedades mecánicas como esfuerzo de fluencia y esfuerzo máximo.

Para condiciones originales se comprueba que el material posee mayor resistencia mecánica debido a la presencia de un mayor número de granos por pulgada cuadrada, luego de los ensayos de soldadura por fricción y tracción éste valor disminuye desfavoreciendo las condiciones mecánicas del material.

**4.4 Ensayo de microdureza**

Para la determinación de la dureza del material se aplicó el ensayo de microdureza Vickers (HV), tomando cinco puntos de lectura a lo largo del eje de simetría de las probetas 1, 2 y 3 después de haber sido cortadas con disco de diamante estableciendo caras planas de aproximadamente 12mm de longitud, luego se tomaron diez puntos en las caras preparadas metalográficamente para las muestras espejo a las anteriores; a continuación se presentan los resultados obtenidos para cada condición de estudio en dichas muestras y además de una muestra en condición original.

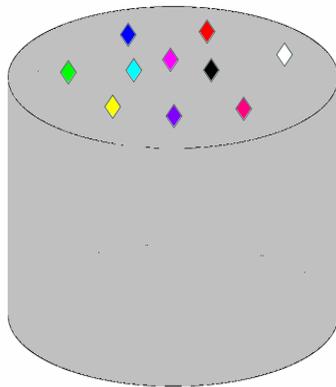
Probeta 1 (Cara longitudinal, el primer punto identifica la zona soldada)



Punto	Dureza HV
	341
	317
	319
	315
	321

Figura 4.23 y Tabla 4.5, ubicación de puntos y valores de microdureza Vickers determinados.

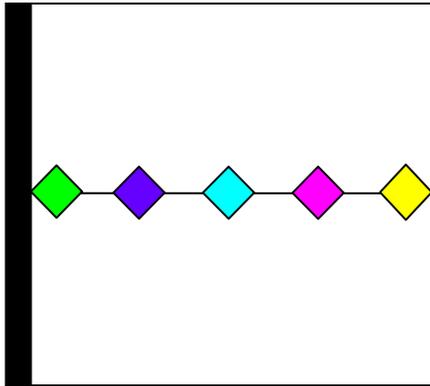
Probeta 1 (Cara transversal soldada)



Punto	Dureza HV
	351
	355
	362
	358
	334
	339
	341
	381
	376
	360
<b>Promedio</b>	<b>355,7</b>

Figura 4.24 y Tabla 4.6, ubicación de puntos y valores de microdureza Vickers determinados.

**Probeta 2 (Cara longitudinal, el primer punto identifica la zona soldada)**



Punto	Dureza HV
	334
	321
	312
	310
	330

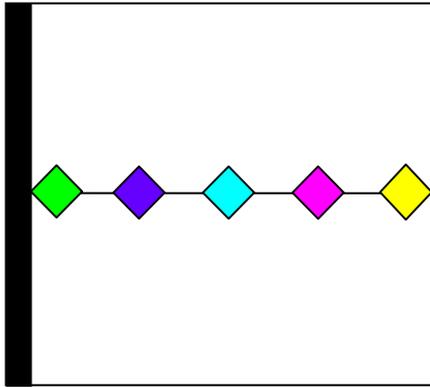
Figura 4.25 y Tabla 4.7, ubicación de puntos y valores de microdureza Vickers determinados.

**Probeta 2 (Cara transversal soldada)**



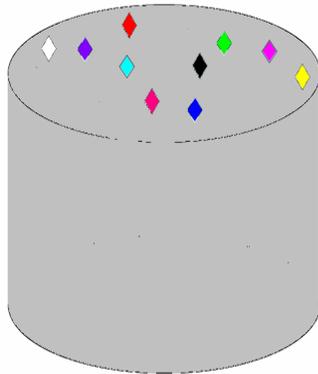
Punto	Dureza HV
	336
	343
	321
	334
	312
	329
	330
	332
	325
	323
<b>Promedio</b>	<b>328,5</b>

Figura 4.26 y Tabla 4.8, ubicación de puntos y valores de microdureza Vickers determinados.

**Probeta 3 (Cara longitudinal, el primer punto identifica la zona soldada)**

Punto	Dureza HV
	351
	303
	271
	321
	312

Figura 4.27 y Tabla 4.9, ubicación de puntos y valores de microdureza Vickers determinados.

**Probeta 3 (Cara transversal soldada)**

Punto	Dureza HV
	374
	353
	362
	349
	336
	334
	341
	332
	329
	321
<b>Promedio</b>	<b>343,1</b>

Figura 4.28 y Tabla 4.10, ubicación de puntos y valores de microdureza Vickers determinados.

**Capítulo IV****Resultados y Análisis de Resultados**

En la probeta analizada bajo condición original se establecieron cinco puntos de estudio sobre una de las caras transversales (pieza cilíndrica), obteniendo los siguientes valores de microdureza Vickers (HV).

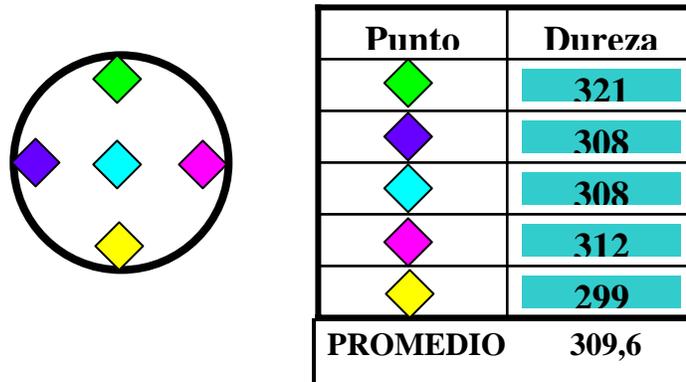


Figura 4.29 y Tabla 4.11, ubicación de puntos y valores de microdureza Vickers determinados para condición original.

Para las probetas analizadas longitudinalmente se pueden apreciar valores de microdureza que tienden a disminuir hacia el centro del eje de simetría y a aumentar tanto en la zona soldada como en la zona cortada con disco de diamante para establecer las muestras cilíndricas.

Los valores de dureza mayores en los extremos de la superficie analizada ocurren debido a la deformación que sufren las muestras por la fricción y los esfuerzos de corte soportados. Para las probetas analizadas sobre las caras preparadas metalográficamente se pueden apreciar valores de microdureza relativamente cercanos pero en su mayoría un poco mayores a los que se presentan para la condición original.

Para condiciones originales el número de grano es superior al de las probetas designadas para los distintos ensayos, esto se traduce en una mayor capacidad de resistencia y dureza, por todo lo anterior se verifica que la dureza es inversamente proporcional al tamaño de grano. Aunque se hayan presentado valores superiores en cuanto a la microdureza vickers para las probetas ensayadas se puede adjudicar éste

comportamiento al proceso de deformación sufrido por el material al momento de soldarse y maquinarse.

#### **4.5 Fractografía**

Se realizó la toma de imágenes a un total de 9 probetas, las cuales; fueron limpiadas con anticipación en el pulidor de ultrasonido ubicado en el laboratorio de materiales de la facultad de ingeniería (Universidad de Carabobo). Este proceso de limpieza se llevo a cabo con la finalidad de eliminar impurezas y micropartículas que pudiesen afectar la calidad de las imágenes tomadas así como su fidelidad.



**Figura 4.30 Pulidor de ultrasonido**

A continuación se presentan las imágenes obtenidas a través del microscopio electrónico de barrido en las distintas probetas analizadas.

## Probeta 4

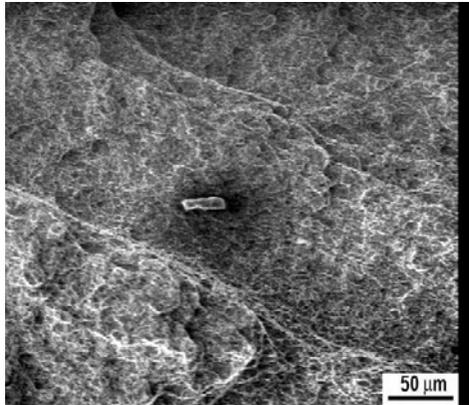


Figura 4.31 500X, 50μm.

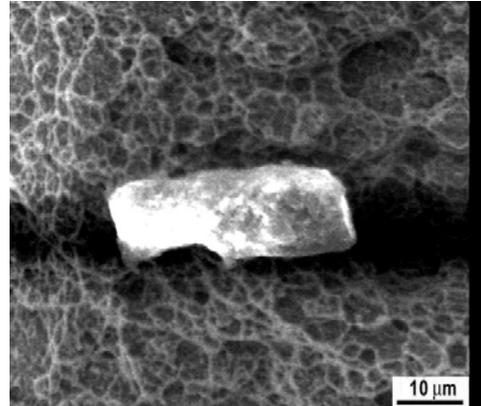


Figura 4.32 2000X, 10μm.

Figuras 4.31 y 4.32 presencia de impurezas y zonas de desprendimiento de material

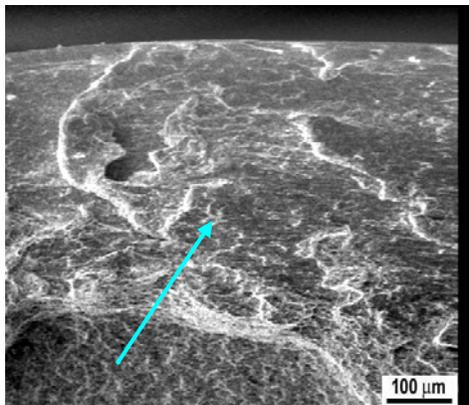


Figura 4.33 150X, 100μm.

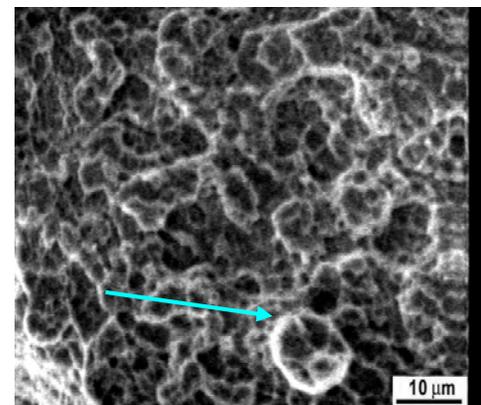


Figura 4.34 1500X, 10μm.

Figuras 4.33 y 4.34 zonas de fragilidad y ductilidad.

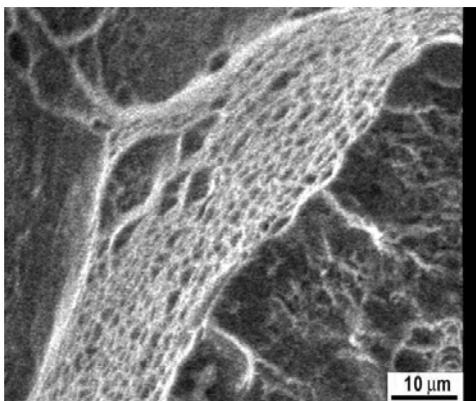


Figura 4.35 1500X, 10μm.

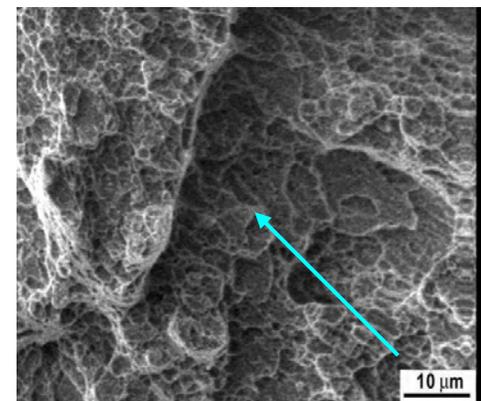
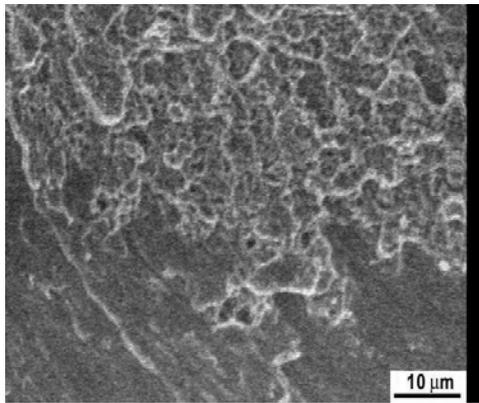
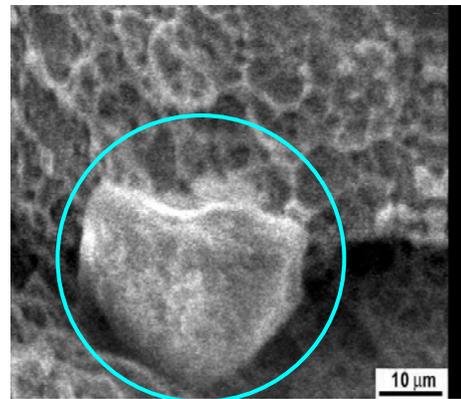


Figura 4.36 1000X, 10μm.

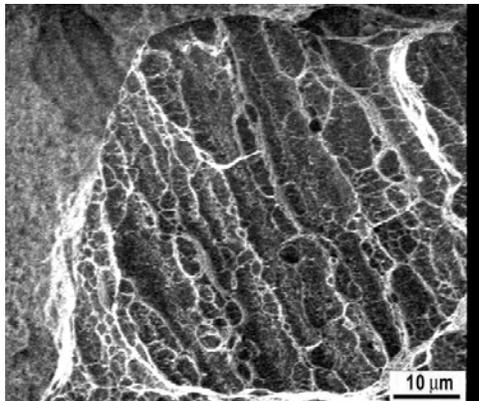
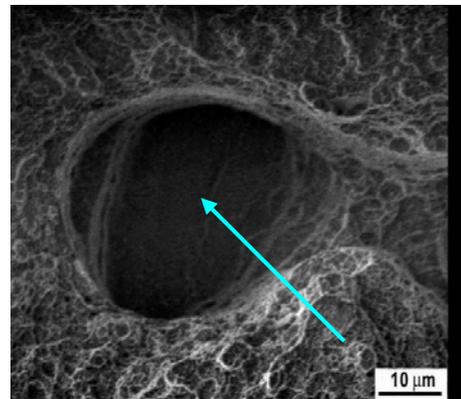
Figuras 4.35 y 4.36 zonas de transición dúctil-frágil y patrones de clivaje

**Capítulo IV****Resultados y Análisis de Resultados**

En las figuras 4.31 a 4.36 se observa la presencia de zonas de transición dúctil-frágil, así como impurezas alojadas en microgrietas; también se pueden observar patrones de clivaje característicos de las fracturas frágiles además de áreas donde se muestra claramente el desprendimiento de material.

**Probeta 5****Figura 4.37 750X, 10μm.****Figura 4.38 1500X, 10μm.**

**Figuras 4.37 y 4.38 zonas de transición dúctil-frágil y micropartícula atrapada en microgrieta.**

**Figura 4.39 750X, 10μm.****Figura 4.40 1000X, 10μm.**

**Figuras 4.39 y 4.40 zonas de rasgado dúctil y desprendimiento de material.**

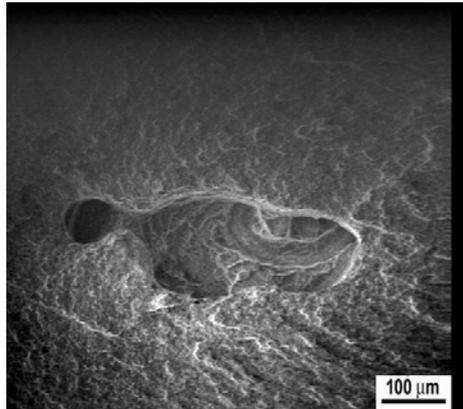


Figura 4.41 100X, 100μm.

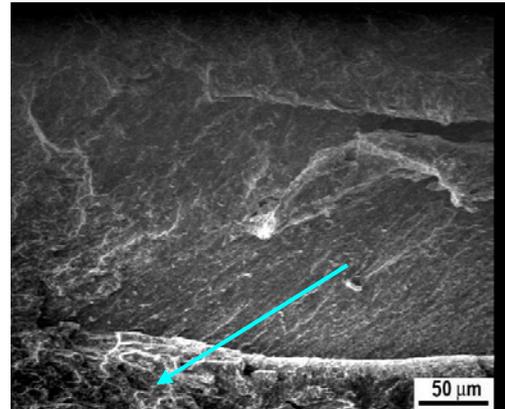


Figura 4.42 500X, 50μm.

Figuras 4.41 y 4.42 desprendimiento de material y pequeñas áreas de clivaje.

En las figuras 4.37 a 4.42 se observan zonas de transición dúctil-frágil, además de áreas con presencia de rasgado dúctil y pequeñas áreas de clivaje identificadas como deformación plástica.

Existe también presencia de cráteres producidos por el desprendimiento de gran cantidad de material al momento de ocurrir la fractura y partículas atrapadas en microgrietas.

### Probeta 7

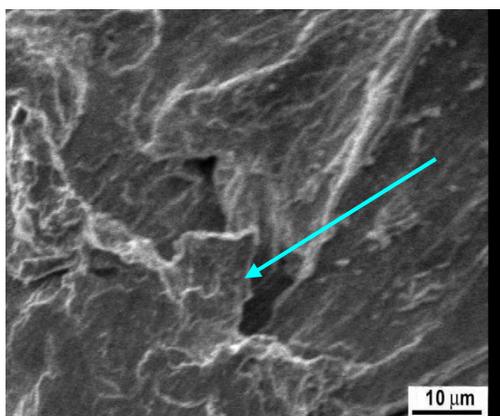


Figura 4.43 1500X, 10μm.

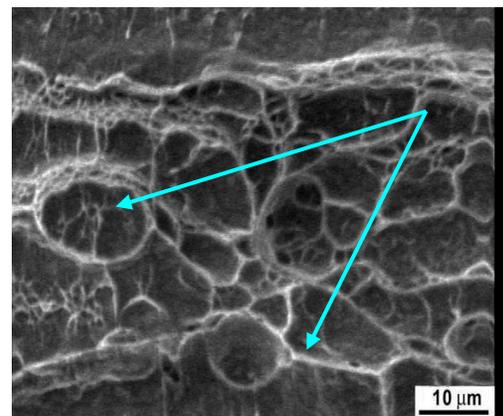
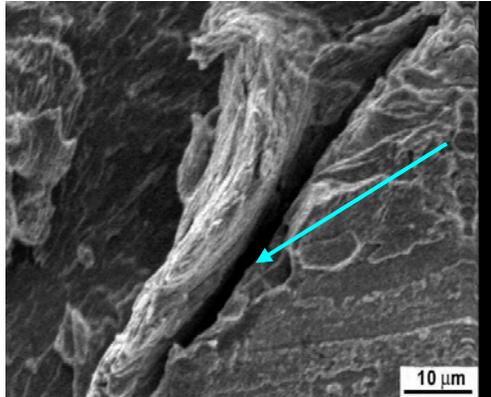
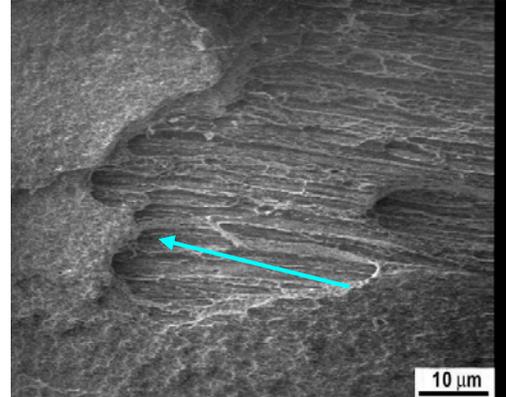
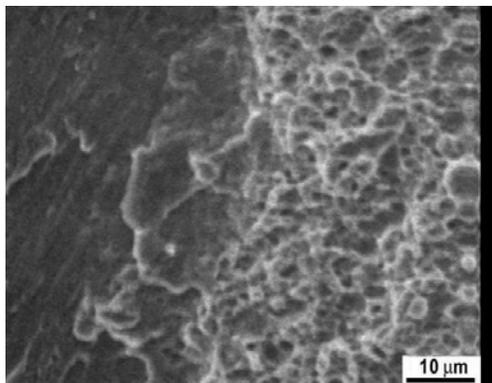
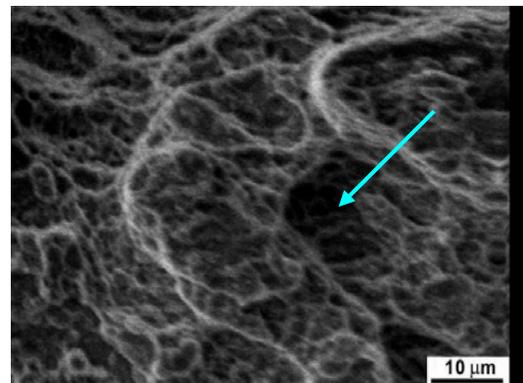


Figura 4.44 2000X, 10μm.

Figuras 4.43 y 4.44 zonas de transición dúctil-frágil y microgrietas.

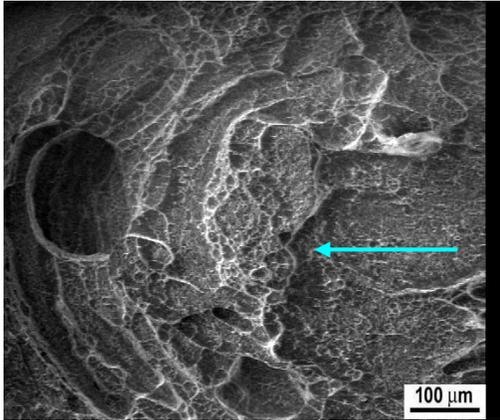
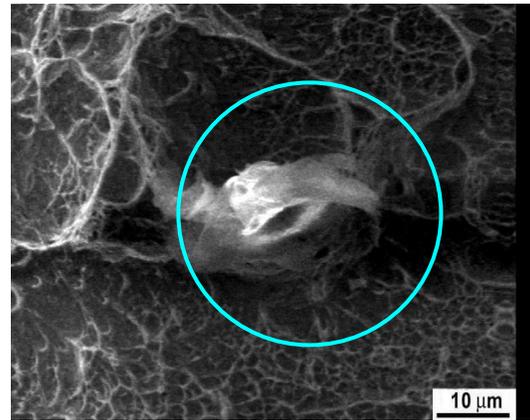
**Figura 4.45 1500X, 10µm.****Figura 4.46 500X, 10µm.**

**Figuras 4.45 y 4.46 material fundido y zonas de material desprendido.**

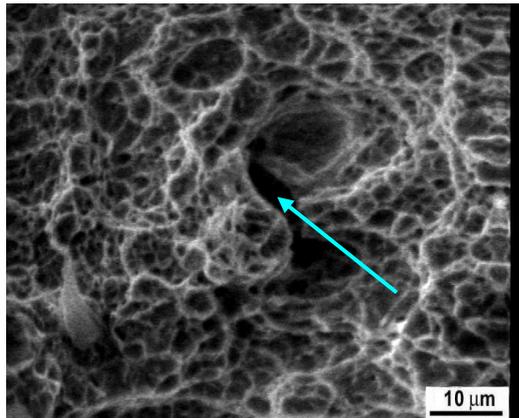
**Figura 4.47 750X, 10µm.****Figura 4.48 1500X, 10µm.**

**Figuras 4.47 y 4.48 zonas de transición dúctil-frágil y cráteres.**

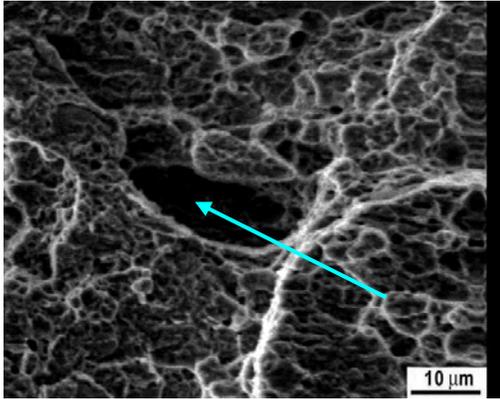
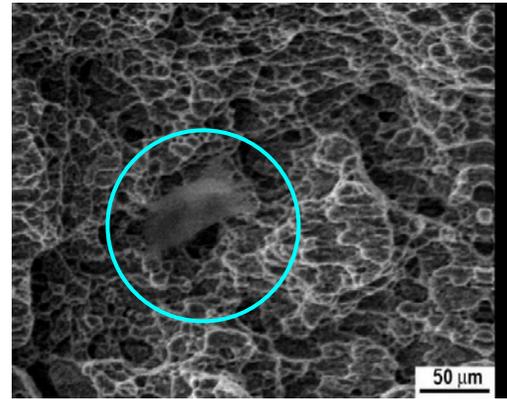
En las figuras 4.43 a 4.48 se observan zonas de transición dúctil-frágil así como áreas donde se puede apreciar cráteres y material fundido y solidificado que generó grietas en el proceso de deformación.

**Probeta 8****Figura 4.49 200X, 100μm.****Figura 4.50 1000X, 10μm.**

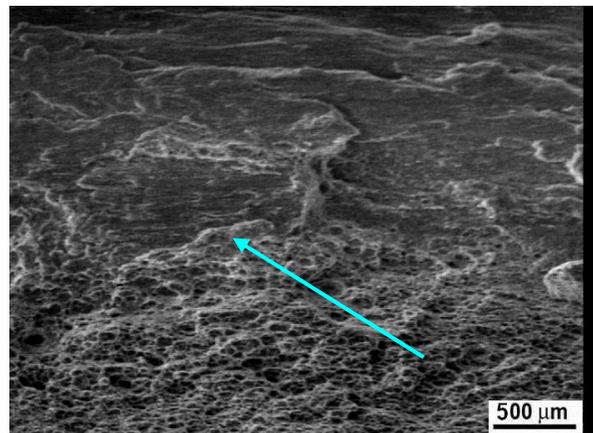
**Figuras 4.49 y 4.50 fractura frágil y áreas con material fundido solidificado.**

**Figura 4.51 2000X, 10μm.****Figura 4.51 cráter.**

En las figuras 4.49 a 4.51 se observan zonas con presencia de cráteres además de material solidificado saliendo de la superficie en el sentido de la aplicación del esfuerzo axial generado en el ensayo de tracción.

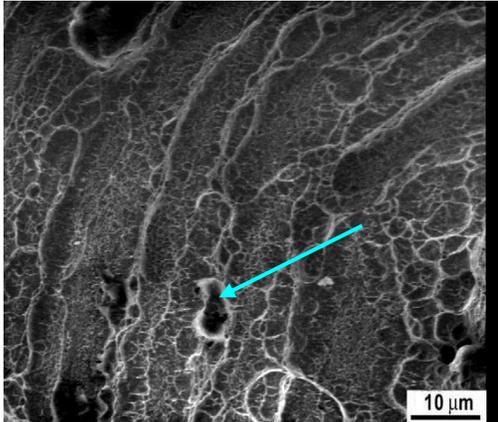
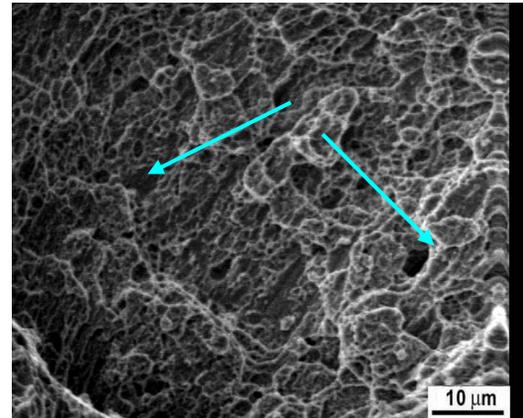
**Probeta 9****Figura 4.52 1000X, 10μm.****Figura 4.53 500X, 50μm.**

**Figuras 4.52 y 4.53 cráter, áreas con material fundido solidificado y patrones de clivaje.**

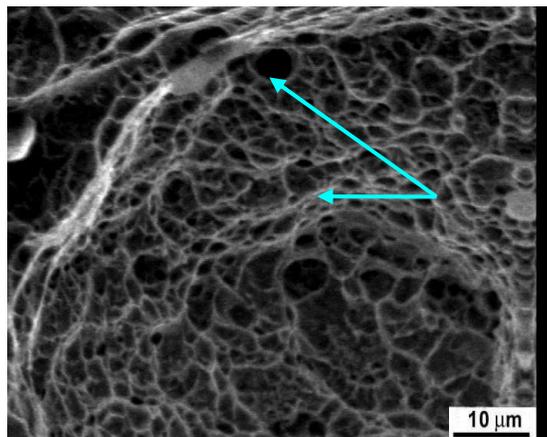
**Figura 4.54 350X, 500μm.**

**Figuras 4.54 diferencia entre zona dúctil y zona frágil.**

En las figuras 4.52 a 4.54 se observan zonas con presencia de clivajes además de zonas bastante diferenciadas entre la fractura frágil y la dúctil, también se observa material fundido solidificado y cráteres.

**Probeta 10****Figura 4.55 1500X, 10μm.****Figura 4.56 1000X, 10μm.**

**Figuras 4.55 y 4.56 hoyuelos y material fundido solidificado en el sentido de giro al momento de soldarse por fricción.**

**Figura 4.57 1500X, 10μm.**

**Figura 4.57 patrones de ductilidad y fragilidad.**

En las figuras 4.55 a 4.57 se observan zonas con gran número de hoyuelos ó dimples, también existe presencia de impurezas y áreas con patrones de ductilidad y fragilidad relativamente cercanos, además de esto se observa el material fundido solidificado siguiendo la trayectoria del movimiento rotacional generado por la soldadura por fricción.

# CAPÍTULO

## V



## CONCLUSIONES

### Acero Inoxidable DÚPLEX SAF 2507

Después de realizar el análisis de los resultados obtenidos puede concluirse:

- A través del análisis microscópico se determinó que el porcentaje de las fases presentes para los distintos ensayos metalográficos es homogénea y aproximadamente igual a 50% para ferrita y 50% para austenita.
- El incremento de temperatura de la condición original a las condiciones que se presentan al momento de realizarse la soldadura por fricción produce un cambio en el tamaño de grano de las fases presentes, pasando de un grano fino a un grano más grueso, disminuyendo así de 256 granos/pulg<sup>2</sup> a 128 granos/pulg<sup>2</sup>.
- El ensayo de microdureza arrojó valores relativamente parecidos para las probetas ensayadas transversalmente y longitudinalmente, aunque estas últimas presentaron valores un poco mayores en los extremos debido al proceso de endurecimiento por deformación, con respecto a la condición original; los valores se incrementaron levemente, variando en promedio de 310HV para dicha condición a 330HV para las muestras ensayadas.
- Mediante la utilización de la microscopía electrónica de barrido se pudo observar a distintos aumentos, la gran cantidad de zonas de transición dúctil-frágil que presenta el acero dúplex SAF 2507 en los mecanismos de fractura; se pudo constatar también la existencia de numerosas grietas, zonas de clivaje y presencia de hoyuelos e impurezas sobre las superficies analizadas.



- De las probetas ensayadas se pudo determinar que la mejor combinación entre presión hidráulica aplicada y tiempo de contacto entre probetas al momento de soldar por fricción, correspondió a los valores de 342psi. y 7,41 segundos respectivamente (probeta 1); ya que ésta combinación de parámetros generó el mayor esfuerzo de ruptura para el ensayo de tracción (725,28Mpa)
- Los porcentajes de reducción de área y de elongación ocurrieron solamente en la probeta número 6, las demás probetas ensayadas presentaron fractura frágil.
- Todas las probetas fallaron en la zona soldada.



## RECOMENDACIONES

De los resultados obtenidos a lo largo de la investigación, se sugiere realizar los ensayos a un mayor número de probetas, para ahondar más en el estudio de las propiedades mecánicas del material así como en la influencia que pudiesen tener directamente los tiempos de contacto y las fuerzas aplicadas al momento de soldar las probetas sobre la propia resistencia a la tracción.

Efectuar el estudio del comportamiento mecánico del acero duplex SAF 2205 bajo los mismos ensayos realizados al acero duplex SAF 2507 para compararlos posteriormente y establecer las condiciones favorables o desfavorables que puedan presentar cada uno.

Realizar ensayos de fatiga a las probetas unidas mediante soldadura por fricción para evaluar sus comportamientos en presencia de condiciones cíclicas de trabajo.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. William F. Smith. "Fundamentos de la Ciencia de Materiales". Editorial Mc Graw Hill. 3<sup>ra</sup> Edición 1998.
2. Sandvik Materials Technology "Mechanical Properties of Sandvik SAF 2507". Sandviken. Suecia. 2000
3. Sydney H. Avner. "Introducción a la Metalurgia Física". Editorial Mc Graw Hill. Edición 1978.
4. Shackelford James F. Ciencia de Materiales para Ingeniería. Editorial Prentice Hall. 3<sup>ra</sup> Edición, 1999.
5. ASTM Metals Handbook. Volumen 8. Metallography, structures and Phase Diagrams. 8<sup>va</sup> Edición 1973.
6. ASTM A 276-79 "Standard Specification for Stainless Steel Bars and Shapes". EVA 1994.
7. ASTM A 370-97A "Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products". EVA 1994.
8. ASTM E 112-96 "Standard Test Methods for Determining Average Grain Size". EVA 1994.
9. Thomas H. Courtney. "Mechanical Behavior of Materials". 2<sup>da</sup> Edition, Editorial Mc Graw Hill. 1995



### *Referencia Bibliográfica*

---

10. Brooks Charlie, Chouhury Ashok, "Failure Analysis of Engineering Material". Editorial Mc Graw Hill. 2002.
11. Bernard A. "Metalurgia General". Editorial Hispano Europea. 1<sup>ra</sup> Edición 1973
12. Morral F, Jimeno E, Molera P. "Metalurgia General". Editorial Revérte año 1985.



*Apéndice A*

---

A  
P  
É  
N  
D  
I  
C  
E  
  
A

**Apéndice A**

Página 1 de 2



CERTIFICATE No. A/06-060956 Rev 00

Page 1/2

INSPECTION CERTIFICATE acc to  
EN 46757/53SANVEN STEEL, C.A.  
AVENIDA FRANCISCO DE MIRANDA  
TORRE LA PRIMERA. PISO 4 OFC 4A  
CAMPO ALEGRE/CARACAS 1060  
VENEZUELA

Customer References		Sandvik References						
SMT-2006	Customer order	Order No.	Subs No.	ABSMT Dispatch note				
	2006-06-03	84-72430	72	757/5				
610-32003	SANVEN	ABSMT No.	C.Code					
		84-72430	72					
Material description		Steel/material Designations						
HOT WORKED STAINLESS BAR STEEL		Sandvik	SS					
ANNEALED & STRAIGHTENED		SAF 2507	2328					
PEEL TURNED AND POLISHED		UNS	EN no					
		S32750	1.4410					
Steel making process								
Electric furnace								
Technical requirements								
EN 10088-3:-2005								
EXTENT OF DELIVERY								
It	Product designation	Heat	Lot	Pieces	Kg			
01	MBR-SAF2507-20	5073	32003	14	154.0			
	MA-3200							
			Total	14	154.0			
TEST RESULTS								
Chemical composition (weight%)								
Heat	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
5073	0.014	0.33	0.77	0.017	0.0006	25.15	6.96	3.91
	Cu	N						
5073	0.11	0.282						
Tensile test at room temperature								
	Yield strength		Tensile strength		Elongation	Red. of Area		
	MPa	MPa	MPa	%	%			
Lot	Rp0.2	Rp1.0	Rm	A	Z			
32003	629	707	867	36	67			
Hardness test								
	Min	Max						
Lot	HRC	HRC						
32003	22.0	23.0						
Quality assurance - Ulf Svensson/QA-manager Primary Products MTC Service / Certificates								

**Apéndice A**

Página 2 de 2

CERTIFICATE No. A/06-060956 Rev 00  
Page 2/2

Following controls/tests have been satisfactorily performed:

- Material Identification.
- Visual inspection and dimensional control.

**Heat Treatment:**

1100 degrees C/30 min. Quenched in water.

The delivered products comply with the specifications and requirements of the order.

The material is manufactured according to a Quality system, approved and registered to ISO 9001.

The certificate is produced with EDP and valid without signature.



*Apéndice B*

---

**A  
P  
É  
N  
D  
I  
C  
E  
  
B**



Designation: A 276 - 97

## Standard Specification for Stainless Steel Bars and Shapes<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation A 276; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon ( $\epsilon$ ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense. Consult the DoD Index of Specifications and Standards for the specific year of issue which has been adopted by the Department of Defense.

### 1. Scope

1.1 This specification covers hot-finished or cold-finished bars except bars for reforging (Note 1). It includes rounds, squares, and hexagons, and hot-rolled or extruded shapes, such as angles, tees, and channels in the more commonly used types of stainless steels. The free-machining types (Note 2), for general corrosion resistance and high-temperature service, are covered in a separate specification.

Note 1—For bars for reforging, see Specification A 314.

Note 2—For free-machining stainless bars designed especially for optimum machinability, see Specification A 582/A 582M.

Note 3—These are standards covering high nickel, chromium, austenitic, corrosion, and heat resisting alloy materials. These standards are under the jurisdiction of ASTM Subcommittee B07.07 and may be found in *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 07.04.

1.2 The values stated in inch-pound units are to be regarded as the standard.

### 2. Referenced Documents

#### 2.1 ASTM Standards

A 314 Specification for Stainless Steel Billets and Bars for Forging<sup>2</sup>

A 370 Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products<sup>2</sup>

A 484/A 484M Specification for General Requirements for Stainless Steel Bars, Billets, and Forgings<sup>2</sup>

A 582/A 582M Specification for Free-Machining Stainless Steel Bars<sup>2</sup>

A 751 Test Methods, Practices, and Terminology for Chemical Analysis of Steel Products<sup>2</sup>

E 527 Practice for Numbering Metals and Alloys (UNS)<sup>3</sup>

#### 2.2 Other Document

SAE J1086 Recommended Practice for Numbering Metals and Alloys<sup>4</sup>

### 3. Ordering Information

3.1 It is the responsibility of the purchaser to specify all requirements that are necessary for material ordered under this specification. Such requirements may include but are not limited to the following:

- 3.1.1 Quantity (weight or number of pieces),
- 3.1.2 Name of material: stainless steel,
- 3.1.3 Form (bars, angles, etc.),
- 3.1.4 Condition (Section 5.1),
- 3.1.5 Finish (Section 4 of Specification A 484/A 484M),
- 3.1.6 Surface preparation of shapes (Section 4 of Specification A 484/A 484M),
- 3.1.7 Applicable dimensions including size, thickness, width, and length,
- 3.1.8 Cross section (round, square, etc.),
- 3.1.9 Type or UNS designation (Table 1),
- 3.1.10 ASTM designation and date of issue, and
- 3.1.11 Whether bars are to be rolled as bars or cut from strip or plate.
- 3.1.12 Test for magnetic permeability when specified in customer purchase order when ordering Types 201 and 20
- 3.1.13 Special requirements.

Note 4—A typical ordering description is as follows: 5000 lb (227 kg) Stainless Steel Bars, Annealed and Centerless Ground, 1½ in. (38 mm) Round, 10 to 12 ft (3.05 to 3.66 m) in length, Type 304, ASTM Specification A 276 dated \_\_\_\_\_. End use: machined valve parts.

### 4. General Requirements

4.1 In addition to the requirements of this specification all requirements of the current edition of Specification A 484/A 484M shall apply. Failure to comply with 1 general requirements of Specification A 484/A 484M constitutes nonconformance to this specification.

### 5. Manufacture

#### 5.1 Condition:

5.1.1 Bars shall be furnished in one of the following conditions listed in the Mechanical Requirements table:

5.1.1.1 Condition A—Annealed

5.1.1.2 Condition H—Hardened and tempered at a relatively low temperature

5.1.1.3 Condition T—Hardened and tempered at a relatively high temperature

5.1.1.4 Condition S—Strain Hardened—Relatively light cold work

5.1.1.5 Condition B—Relatively severe cold work

### 6. Chemical Composition

6.1 The steel shall conform to the requirements of chemical composition specified in Table 1.

6.2 Methods and practices relating to chemical analysis required by this specification shall be in accordance with Test Methods, Practices, and Terminology A 751.

<sup>1</sup> This specification is under the jurisdiction of ASTM Committee A-1 on Steel, Stainless Steel, and Related Alloys and is the direct responsibility of Subcommittee A6.1.37 on Flat Stainless Steel Products.

Current edition approved March 10, 1997. Published November 1997. Originally published as A 276 - 45. Last previous edition A 276 - 96.

<sup>2</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol. 07.05.

<sup>3</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol. 01.01.

<sup>4</sup> Available from Society of Automotive Engineers, 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA 15096.



Apêndice B

A 276

7. Mechanical Properties Requirements

7.1 The material shall conform to the mechanical test requirements specified in Table 2.

7.2 The martensitic grades shall be capable of meeting the hardness requirements after heat treating as specified in Table 3.

7.3 Hardness measurements, when required, shall be made at a location midway between the surface and the center of the cross section

8. Magnetic Permeability

8.1 When required by the purchase order, the magnetic permeability of Types 201 and 203 in the annealed condition

shall not exceed 1.2 as tested by a Severn-type indicator.

9. Certification

9.1 Upon request of the purchaser in the contract or order, the producer's certification that the material was manufactured and tested in accordance with this specification, together with a certified report of the test results shall be furnished at the time of the shipment.

10. Keywords

10.1 austenitic stainless steel; austenitic-ferritic duplex stainless steel; ferritic stainless steel; martensitic stainless steel; stainless steel bars; stainless steel shapes

TABLE 1 Chemical Requirements<sup>a</sup>

Table with columns: UNS Designation, Type, Carbon, Manganese, Phosphorus, Sulfur, Silicon, Chromium, Nickel, Molybdenum, Nitrogen, and Other Elements. It lists various stainless steel grades and their chemical compositions.



A 276

TABLE 1 Continued

UNS Designation <sup>a</sup>	Type	Composition, %									
		Carbon	Manganese	Phosphorus	Sulfur	Silicon	Chromium	Nickel	Molybdenum	Nitrogen	Other Elements
Austenitic-Ferritic Grades											
S 31100	CN-20	0.06	1.00	0.040	0.030	1.00	25.00-27.00	6.00-7.00			Ti 0.25
S 31603		0.030	2.00	0.030	0.020	1.00	21.00-23.00	4.50-6.50	2.50-3.50	0.06-0.20	
S 32304		0.030	2.50	0.040	0.030	1.00	21.00-24.50	3.00-5.50	0.05-0.60	0.06-0.20	Cu 0.05-0.60
S 32760 <sup>b</sup>		0.030	1.00	0.030	0.010	1.00	24.00-26.00	6.00-8.00	3.00-4.00	0.20-0.30	Cu 0.50-1.00 W 0.50-1.00
Ferritic Grades											
S 40500	405	0.08	1.00	0.040	0.030	1.00	11.50-14.50	...			Al 0.10-0.30
S 42000	420	0.12	1.00	0.040	0.030	1.00	14.00-16.00	...			...
S 43000	430	0.12	1.00	0.040	0.030	1.00	16.00-18.00	...			...
S 44400		0.025	1.00	0.040	0.030	1.00	17.5-19.5	1.00	1.75-2.50	0.005	Ti+Cb 0.20+4 x (C+N) 0.80
S 44500	445	0.20	1.50	0.040	0.030	1.00	23.00-27.00	...		0.25	...
S 44627	44627 <sup>c</sup>	0.010 <sup>d</sup>	0.40	0.020	0.020	0.40	25.00-27.50	0.50 max	0.75-1.50	0.015 <sup>e</sup>	Cu 0.20 Cb 0.05-0.20 C-N 0.025 Co 0.15 Cr+N 0.25 Cr 0.15
S 44700		0.010	0.30	0.020	0.020	0.20	28.00-30.00	0.15 max	3.50-4.20	0.020	
S 44800		0.010	0.30	0.025	0.020	0.20	28.00-30.00	2.00-2.50	3.50-4.20	0.020	
Martensitic Grades											
S 40300	403	0.15	1.00	0.040	0.030	0.50	11.50-13.00	...			...
S 41000	410	0.15	1.00	0.040	0.030	1.00	11.50-13.50	...			...
S 41040	41040	0.18	1.00	0.040	0.030	1.00	11.50-13.50	...			Cu 0.06-0.30
S 41406	414	0.15	1.00	0.040	0.030	1.00	11.50-13.50	1.25-2.50			...
S 41500	415	0.25	0.50-1.00	0.030	0.030	0.60	11.50-14.00	3.50-5.50	0.50-1.00		...
S 42000	420	max 0.15	1.00	0.040	0.030	1.00	12.00-14.00	...			...
S 42010		0.15-0.30	1.00	0.040	0.030	1.00	13.50-15.00	0.35-0.85	0.40-0.85		...
S 43100	431	0.20	1.00	0.040	0.030	1.00	15.00-17.00	1.25-2.50			...
S 44202	442	0.60-0.75	1.00	0.040	0.030	1.00	16.00-18.00	...	0.75		...
S 44203	442	0.75-0.95	1.00	0.040	0.030	1.00	16.00-18.00	...	0.75		...
S 44204	442	0.95-1.20	1.00	0.040	0.030	1.00	16.00-18.00	...	0.75		...
S 50400	5	0.15	0.30-0.60	0.030	0.030	0.75-1.00	8.00-10.00	...	0.60-1.10		...

<sup>a</sup> Where a range or minimum is indicated.

<sup>b</sup> Designation established in accordance with Practice E 507 and SAE J1086.

<sup>c</sup> For some applications, the substitution of Type 304L for Type 304, or Type 316L for Type 316 may be undesirable because of design, fabrication, or service requirements. In such cases, the purchaser should indicate on the order.

<sup>d</sup> Nitrogen content is to be reported for this grade.

<sup>e</sup>  $5 \text{ Cr} + 33 \text{ Ni} + 16 \text{ x N} \geq 40$ .

<sup>f</sup> Nickel plating shall be 0.50 x max.

<sup>g</sup> Production tolerance over the maximum limit for carbon and nitrogen shall be 0.002 x.

<sup>h</sup> Where applicable of CA 619M.



Apêndice B

A 276

TABLE 2 Mechanical Requirements

Type	Condition	Finish	Diameter or Thickness in (mm)	Tensile Strength, min		Yield Strength, <sup>a</sup> min		Elongation in 2 in (50 mm) <sup>b</sup> or 4D min, %	Reduction of Area, <sup>c</sup> min, %	Impact Hardness, <sup>d</sup> max
				KSI	MPa	KSI	MPa			
Austenitic Grades										
201, 202	A	hot-finished or cold-finished	all	75	515	40	275	40	40	...
S20151	A	hot-finished or cold-finished	all	125	880	50	345	40	40	255
205	A	hot-finished or cold-finished	all	100	690	50	414	40	50	...
XM-19	A	hot-finished or cold-finished	all	100	690	55	380	35	55	...
	As hot-rolled	hot-finished or cold-finished	up to 2 (50.8) incl	135	930	105	725	20	50	...
			over 2 to 3 (50.8 to 76.2) incl	115	795	75	515	25	50	...
			over 3 to 6 (76.2 to 152.4) incl	100	690	60	415	30	50	...
S21600	A	hot-finished or cold-finished	all	95	655	50	345	35	55	241
XM-10, XM-11	A	hot-finished or cold-finished	all	90	620	50	345	45	60	...
XM-29	A	hot-finished or cold-finished	all	100	690	55	380	30	50	...
XM-28	A	hot-finished or cold-finished	all	100	690	55	380	30	50	...
S 24565	A	hot-finished or cold-finished	all	115	795	60	415	35	40	...
S 28200	A	hot-finished or cold-finished	all	130	760	60	410	35	55	...
302, 302B, 304, 304L, 305, 308, 309, 309S, 309CB, 310, 310S, 310CA, 314, 316, 316LN, 316LN, 316L, 317, 321, 347, 348	A	hot-finished or cold-finished	all	75 <sup>e</sup>	515	30 <sup>f</sup>	205	40 <sup>g</sup>	50	...
			up to 1/2 (12.7) incl	90	620	45	310	30	40	...
			over 1/2 (12.7)	75 <sup>h</sup>	515	30 <sup>f</sup>	205	30	40	...
304L, 316L	A	hot-finished or cold-finished	all	70	485	25	170	40 <sup>g</sup>	50	...
			up to 1/2 (12.7) incl	90	620	45	310	30 <sup>g</sup>	40	...
			over 1/2 (12.7)	70	485	25	170	30	40	...
304N, 316N	A	hot-finished or cold-finished	all	80	550	35	240	30	...	...
			up to 1/2 (12.7) incl	125	860	100	690	12	35	...
212, 212L, 304, 304N, 311, 316N	C	cold-finished	up to 1/2 (12.7) incl	115	795	60	415	15	35	...
			over 1/2 (12.7) to 1 (25.4)	105	725	65	450	20	35	...
			over 1 (25.4) to 1 1/2 (38.1)	100	690	50	345	24	45	...
			over 1 1/2 (38.1) to 1 3/4 (44.45)	95	655	45	310	28	45	...
			over 1 3/4 (44.45) to 2 (50.8) incl	90	620	40	275	30	40	...
304, 304L, 316, 316N	D	cold-finished	up to 2 (50.8) incl	95	655	75	515	25	40	...
			over 2 to 2 1/2 (50.8 to 63.5) incl	90	620	70	485	30	40	...
			over 2 1/2 (63.5) to 3 (76.2) incl	80	550	55	380	30	40	...
XM 21, S 30454, S 31654	A	hot-finished or cold-finished	all	90	620	50	345	30	50	...
XM 21, S 30454, S 31654	E	cold-finished	up to 1 (25.4) incl	145	1000	125	860	15	45	...
			over 1 (25.4) to 1 1/4 (31.75)	135	930	115	795	16	45	...
			over 1 1/4 (31.75) to 1 1/2 (38.1)	135	895	105	725	17	45	...
			over 1 1/2 (38.1) to 1 3/4 (44.45)	125	850	100	690	18	45	...
S 30215	A	hot-finished or cold-finished	all	87	600	45	310	40	50	...
S 31754	A	hot-finished or cold-finished	all	90	620	45	310	35	50	...
S 31725	A	hot-finished or cold-finished	all	75	515	50	205	40	...	...
S 31734	A	hot-finished or cold-finished	all	70	485	45	240	40	...	...



A 276

TABLE 2 Continued

Type	Condition	Finish	Diameter or Thickness in. (mm)	Tensile Strength, <sup>a</sup> min		Yield Strength, <sup>a</sup> min		Elonga- tion in 2 in. (50 mm), <sup>b</sup> or 4D min. %	Reduc- tion of Area, <sup>c</sup> min. %	Other Hard- ness, <sup>d</sup> min.
				ksi	MPa	ksi	MPa			
Austenitic/Ferritic Grades										
304/28	A	hot-finished or cold-finished	48	90	620	65	450	25	55	...
316/302	A	hot-finished cold-finished	48	90	520	65	448	25	...	290
316/304	A	hot-finished cold-finished	48	91	500	58	400	25	...	290
321/304	A	hot-finished or cold-finished	48	110	790	82	500	15.0	...	300
321/316	A	hot-finished or cold-finished	48	105	750	83	550	20	...	290
321/316	E	cold-finished	48	125	880	105	720	10	...	335
Ferritic Grades										
405 <sup>e</sup>	A	hot-finished cold-finished	48	...	...	...	...	...	...	200 217
409	A	hot-finished cold-finished	48	70	490	40	275	23	45	...
430	A	hot-finished cold-finished	48	70	490	40	275	16	45	...
430	A	hot-finished or cold-finished	48	68	415	30	257	20	45	...
446/409	A	hot-finished cold-finished	48	60	415	40	270	20	45	217
446/409/27	A	hot-finished cold-finished	48	65	415	45	270	16	45	217
446/409/27	A	hot-finished cold-finished	48	65	450	40	275	20	45	219
447/409	A	hot-finished cold-finished	48	70	480	35	350	20	40	...
449/409	A	hot-finished cold-finished	48	75	500	30	415	15	50	...
449/409	A	hot-finished cold-finished	48	75	480	35	380	20	50	...
449/409	A	hot-finished cold-finished	48	75	520	30	415	15	50	...
Martensitic Grades										
420/410	A	hot-finished cold-finished	48	70	480	40	275	20	45	...
420/410	T	hot-finished cold-finished	48	100	590	50	350	15	45	...
420/410	T	hot-finished cold-finished	48	100	590	50	350	12	40	...
420/410	T	hot-finished cold-finished	48	125	600	100	400	15	45	302
420/410	H	hot-finished cold-finished	48	125	640	100	500	12	35	...
420/410	H	hot-finished cold-finished	48	120	600	90	450	12	40	...
420/410	A	hot-finished cold-finished	48	120	600	90	450	12	40	...
420/410	A	hot-finished cold-finished	48	70	480	40	275	13	45	235
414	A	hot-finished or cold-finished	48	70	480	40	275	12	55	...
414	A	hot-finished or cold-finished	48	...	...	...	...	...	...	250
414	T	hot-finished or cold-finished	48	115	790	90	620	15	45	...
414/300	T	hot-finished or cold-finished	48	115	795	90	620	15	45	255
42 <sup>f</sup>	A	hot-finished cold-finished	48	...	...	...	...	...	...	241
42 <sup>f</sup>	A	hot-finished cold-finished	48	...	...	...	...	...	...	255
5.0/215	A	hot-finished or cold-finished	48	...	...	...	...	...	...	235
42 <sup>g</sup>	A	hot-finished or cold-finished	48	...	...	...	...	...	...	265
42 <sup>g</sup>	A	hot-finished or cold-finished	48	...	...	...	...	...	...	245
40+ 440B, and 440C	A	hot-finished cold-finished	48	...	...	...	...	...	...	267 261
5.0/304(C)	A	hot-finished or cold-finished	48	60	415	30	267	30	45	130
5.0/304(C)	T	hot-finished or cold-finished	48	100	600	80	350	15	35	241

<sup>a</sup> Yield strength shall be determined by the 0.2% offset method in accordance with Test Methods and Definitions A 370. An alternative method of determining yield strength may be used based on a total extension under load of 0.5%.

<sup>b</sup> For some specific products, it may not be practicable to use a 2-in. or 50-mm gage length. The use of sub-size test specimens, when necessary, is permissible in accordance with Test Methods and Definitions A 370.

<sup>c</sup> Evaluation of area does not apply on flat bars 4 in. (102 mm) and under in thickness as the determination is not generally made in the product size.

<sup>d</sup> Or equivalent Rockwell hardness.

<sup>e</sup> For reduced shapes of all 400-series grades of Division A, the yield strength shall be 25 ksi (170 MPa) min and tensile strength shall be 70 ksi (480 MPa) min.

<sup>f</sup> Values shall be because of being heat treated to a maximum Brinell hardness of 250 when as-quenched from 1750°F (950°C).

<sup>g</sup> For shapes having section thickness of 1/2 in. (12.5 mm) or less, 30% min. elongation is acceptable.



Designation: A 370 – 97a

## Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation A 370; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption, or in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last approval. A superscript letter indicates an editorial change since the last revision or approval.

This standard was developed for use in applications of the Department of Defense.

### 1. Scope

1.1 These test methods<sup>2</sup> cover procedures and definitions for the mechanical testing of wrought and cast steel products. The various mechanical tests herein described are used to determine properties required in the product specifications. Variations in testing methods are to be avoided and standard methods of testing are to be followed to obtain reproducible and comparable results. In those cases where the testing requirements for certain products are unique or at variance with these general procedures, the product specification testing requirements shall control.

1.2 The following mechanical tests are described:

Section	Section
Terms	1 to 13
Bar <sup>3</sup>	14
Hardness	15
Bridgman	16
Rockwell	17
Ritter	18
Superficial	19 to 20
Torsion	20

1.3 Annexes covering details peculiar to certain products are appended to these test methods as follows:

Section	Section
Bar Products	1
Tubular Products	2
Fasteners	3
Round Wire Products	4
Verification of Indirect-Impact Testing	5
Conducting Fatigue Fracture of Round Wire Products to 10 <sup>7</sup> Cycles in the Fatigue Regime	6
Testing Wire Wire Straps	7
Rounding of Not Data	8
Methods for Testing and of Hardness Tests	9
Procedure for Use and Control of Heat-Treated Specimens	10

1.4 The values stated in inch-pound units are to be regarded as the standard.

1.5 When this document is referenced in a metric product specification, the yield and tensile values may be determined in inch-pound (ksi) units then converted into SI (MPa) units. The

elongation determined in inch-pound gage lengths of 2 or 8 in. may be reported in SI unit gage lengths of 50 or 200 mm, respectively, as applicable. Conversely, when this document is referenced in an inch-pound product specification, the yield and tensile values may be determined in SI units then converted into inch-pound units. The elongation determined in SI unit gage lengths of 50 or 200 mm may be reported in inch-pound gage lengths of 2 or 8 in., respectively, as applicable.

1.6 Attention is directed to Practices A 880 and E 1505 when there may be a need for information on criteria for evaluation of testing laboratories.

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

### 2. Referenced Documents

#### 2.1 ASTM Standards

- A 70/A 70M Specification for Steel Castings, General Requirements, for Pressure-Containing Parts<sup>3</sup>
- A 781/A 781M Specification for Castings, Steel and Alloy, Common Requirements, for General Industrial Use<sup>3</sup>
- A 833 Practice for Indentation Hardness of Metallic Materials by Comparison Hardness Testers<sup>4</sup>
- A 880 Practice for Criteria for Use in Evaluation of Testing Laboratories and Organizations for Examination and Inspection of Steel, Stainless Steel, and Related Alloys<sup>5</sup>
- E 14 Practice for Force Verification of Testing Machines<sup>6</sup>
- E 6 Terminology Relating to Methods of Mechanical Testing<sup>7</sup>
- E 8 Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials<sup>8</sup>
- E 8M Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric]<sup>8</sup>
- E 10 Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials<sup>9</sup>
- E 18 Test Methods for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials<sup>9</sup>

<sup>1</sup> These test methods and definitions are under the jurisdiction of ASTM Committee E1 on Steel, Stainless Steel and Related Alloys and are the direct responsibility of Subcommittee E1.1.1 on Mechanical and Chemical Testing and Processing Methods of Steel Products and Processes.

<sup>2</sup> Current edition approved for use as a Standard Method on November 1, 1997. Equivalent published as S 950-95A last previous edition A 370-95a.

<sup>3</sup> For a list of products and processes of steel and alloy applications, see related specifications E 1505 in Section 3 of this Guide.

<sup>3</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol. 01.02.

<sup>4</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol. 01.02.

<sup>5</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol. 01.02.

<sup>6</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol. 01.02.

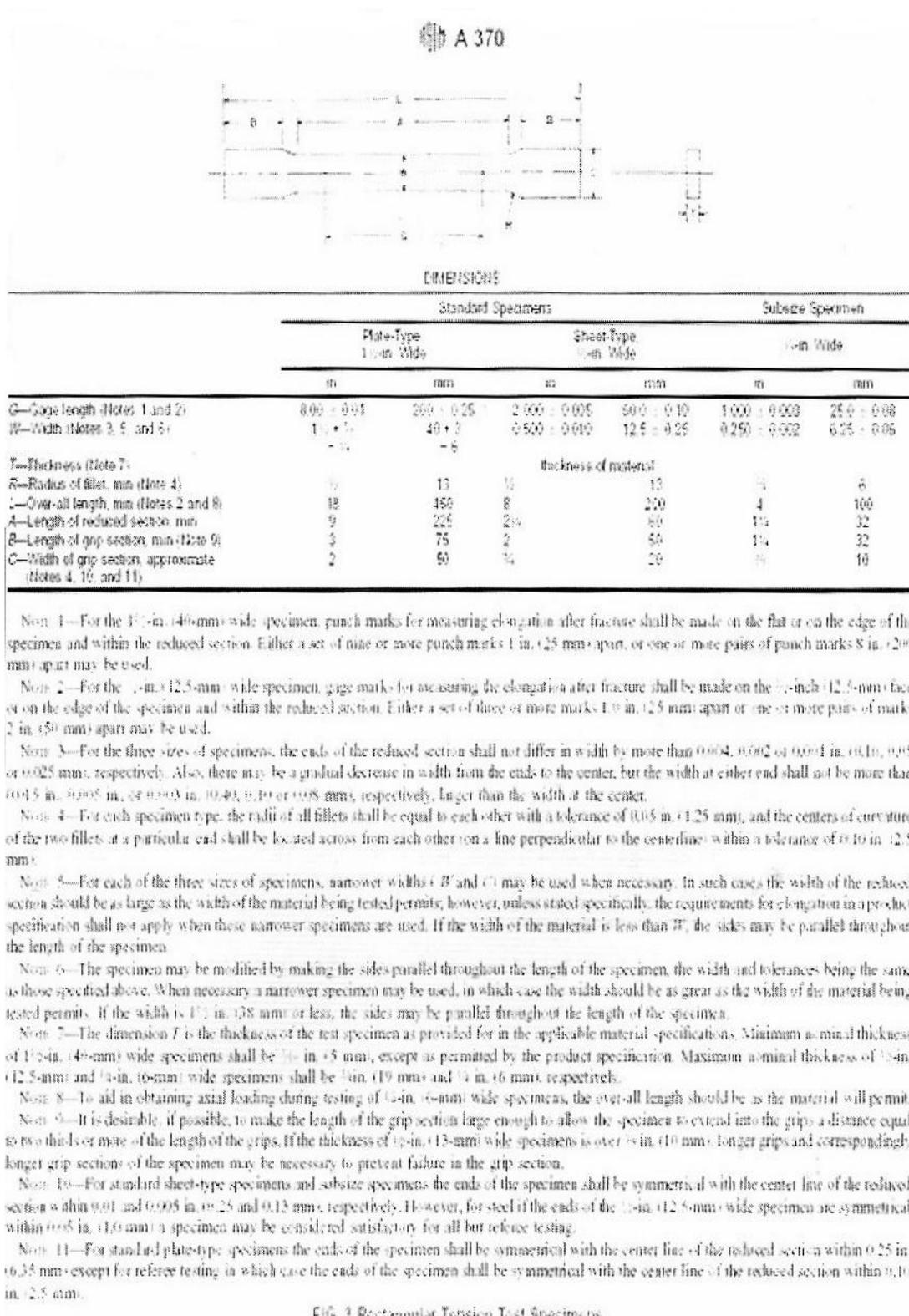
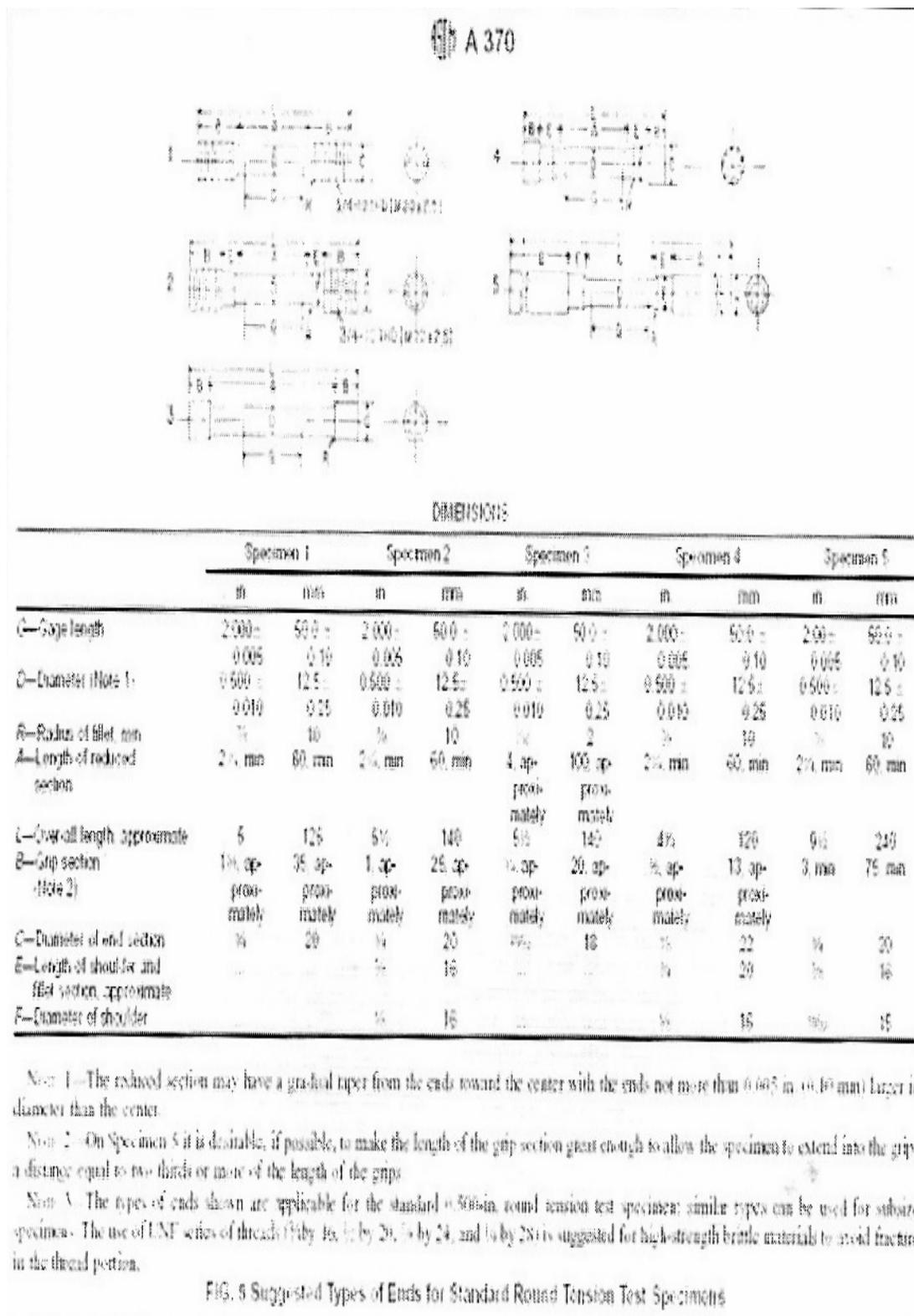
**Apéndice B**


FIG. 3 Rectangular Tension Test Specimens

**Apéndice B**




Designation: E 112 - 96

## Standard Test Methods for Determining Average Grain Size<sup>1</sup>

This standard is covered under the Code designation E 112, the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript (e) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense to replace Methods 31.1.1 and 11.2 of Federal Test Method Standard No. 1512. Consult the DoD Index of Specifications and Standards for the specific year of issue which has been adopted by the Department of Defense.

### INTRODUCTION

These test methods of determination of average grain size in metallic materials are primarily measuring procedures and, because of their purely geometric basis, are independent of the metal or alloy concerned. In fact, the basic procedures may also be used for the estimation of average grain, crystal, or cell size in nonmetallic materials. The comparison method may be used if the structure of the material approaches the appearance of one of the standard comparison charts. The intercept and planimetric methods are always applicable for determining average grain size. However, the comparison charts cannot be used for measurement of individual grains.

### 1. Scope

1.1 These test methods cover the measurement of average grain size and include the comparison procedure, the planimetric (or Jeffries) procedure, and the intercept procedures. These test methods may also be applied to nonmetallic materials with structures having appearances similar to those of the metallic structures shown in the comparison charts. These test methods apply chiefly to single phase grain structures but they can be applied to determine the average size of a particular type of grain structure in a multiphase or multiconstituent specimen.

1.2 These test methods are used to determine the average grain size of specimens with a unimodal distribution of grain areas, diameters, or intercept lengths. These distributions are approximately log normal. These test methods do not cover methods to characterize the nature of these distributions. Characterization of grain size in specimens with duplex grain size distributions is described in Test Methods E 1181. Measurement of individual, very coarse grains in a fine grained matrix is described in Test Methods E 930.

1.3 These test methods deal only with determination of planar grain size, that is, characterization of the two-dimensional grain sections revealed by the sectioning plane. Determination of spatial grain size, that is, measurement of the size of the three-dimensional grains in the specimen volume, is beyond the scope of these test methods.

1.4 These test methods describe techniques performed manually using either a standard series of graded chart images for the comparison method or simple templates for the manual counting methods. Utilization of semi-automatic digitizing tablets or automatic image analyzers to measure

grain size is described in Test Methods E 1382.

1.5 These test methods deal only with the recommended test methods and nothing in them should be construed as defining or establishing limits of acceptability or fitness of purpose of the materials tested.

1.6 The measured values are stated in SI units, which are regarded as standard. Equivalent inch-pound values, when listed, are in parentheses and may be approximate.

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

1.8 The paragraphs appear in the following order:

Section	Number
Scope	1
References	2
Terminology	3
Significance and Use	4
Generalization of Application	5
Sampling	6
Test Specimens	7
Calibration	8
Preparation of Photomicrographs	9
Comparison Procedure	10
Planimetric (Jeffries) Procedure	11
General Intercept Procedures	12
Linear Intercept Procedure	13
Circular Intercept Procedures	14
Ballard Single-Circle Procedure	14.1
Average Three-Circle Procedure	14.2
Statistical Analysis	15
Specimens with Non-equiaxed Grain Shapes	16
Specimens Containing Two or More Phases or Constituents	17
Report	18
Precision and Bias	19
Keywords	20
Annexes	
Basis of ASTM Grain Size Number	A1
Equations for Conversions Among Various Grain Size Measurements	A2
Automatic Grain Size, Ferritic and Austenitic Steels	A3
Fracture Grain Size Method	A4
Requirements for Wrought Copper and Copper Base Alloys	A5
Application to Specific Situations	A6

<sup>1</sup> These test methods are under the jurisdiction of ASTM Committee E-4 on Metallography and are the direct responsibility of Subcommittee E04.08 on Grain Size.

Current edition approved May 10, 1996. Published July 1996. Originally published as E 112 - 73. Last previous edition E 112 - 95.



## E 112

$P_L$	= $P_L$ on a planar oriented surface for a non-equiaxed grain structure
$\bar{Q}$	= correction factor for comparison chart ratings using a non-standard magnification for microscopically determined grain sizes
$\bar{Q}_m$	= correction factor for comparison chart ratings using a non-standard magnification for macroscopically determined grain sizes
$s$	= standard deviation
$S_V$	= grain boundary surface area to volume ratio for a single phase structure
$S_{V\alpha}$	= grain boundary surface area to volume ratio for a two phase (constituent) structure
$t$	= student's $t$ multiplier for determination of the confidence interval
$V_{V\alpha}$	= volume fraction of the $\alpha$ phase in a two phase (constituent) microstructure
95 % CI	= 95 % confidence interval
% RA	= percent relative accuracy

#### 4. Significance and Use

4.1 These test methods cover procedures for estimating and rules for expressing the average grain size of all metals consisting entirely, or principally, of a single phase. The test methods may also be used for any structures having appearances similar to those of the metallic structures shown in the comparison charts. The three basic procedures for grain size estimation are:

4.1.1 *Comparison Procedure*—The comparison procedure does not require counting of either grains, intercepts, or intersections but, as the name suggests, involves comparison of the grain structure to a series of graded images, either in the form of a wall chart, clear plastic overlays, or an eyepiece reticle. There appears to be a general bias in that comparison grain size ratings claim that the grain size is somewhat coarser ( $1/2$  to 1  $G$  number lower) than it actually is (see X1.3.5). Repeatability and reproducibility of comparison chart ratings are generally  $\pm 1$  grain size number.

4.1.2 *Planimetric Procedure*—The planimetric method involves an actual count of the number of grains within a known area. The number of grains per unit area,  $N_A$ , is used to determine the ASTM grain size number,  $G$ . The precision of the method is a function of the number of grains counted. A precision of  $\pm 0.25$  grain size units can be attained with a reasonable amount of effort. Results are free of bias and repeatability and reproducibility are less than  $\pm 0.5$  grain size units. An accurate count does require marking off of the grains as they are counted.

4.1.3 *Intercept Procedure*—The intercept method involves an actual count of the number of grains intercepted by a test line or the number of grain boundary intersections with a test line, per unit length of test line, used to calculate the mean linear intercept length,  $\bar{L}$ .  $\bar{L}$  is used to determine the ASTM grain size number,  $G$ . The precision of the method is a function of the number of intercepts or intersections counted. A precision of better than  $\pm 0.25$  grain size units can be attained with a reasonable amount of effort. Results are free of bias, repeatability and reproducibility are less than  $\pm 0.5$  grain size units. Because an accurate count can be made without need of marking off intercepts or intersections, the

intercept method is faster than the planimetric method for the same level of precision.

4.2 For specimens consisting of equiaxed grains, the method of comparing the specimen with a standard chart is most convenient and is sufficiently accurate for most commercial purposes. For higher degrees of accuracy in determining average grain size, the intercept or planimetric procedures may be used. The intercept procedure is particularly useful for structures consisting of elongated grains.

4.3 In case of dispute, the intercept procedure shall be the referee procedure in all cases.

4.4 No attempt should be made to estimate the average grain size of heavily cold worked material. Partially recrystallized wrought alloys and lightly to moderately cold-worked material may be considered as consisting of non-equiaxed grains, if a grain size measurement is necessary.

4.5 *Individual grain measurements should not be made based on the standard comparison charts.* These charts were constructed to reflect the typical log normal distribution of grain sizes that result when a plane is passed through a three dimensional array of grains. Because they show a distribution of grain dimensions, ranging from very small to very large, depending on the relationship of the planar section and the three-dimensional array of grains, the charts are not applicable to measurement of individual grains.

#### 5. Generalities of Application

5.1 It is important, in using these test methods, to recognize that the estimation of average grain size is not a precise measurement. A metal structure is an aggregate of three-dimensional crystals of varying sizes and shapes. Even if all these crystals were identical in size and shape, the grain cross sections, produced by a random plane (surface of observation) through such a structure, would have a distribution of areas varying from a maximum value to zero, depending upon where the plane cuts each individual crystal. Clearly, no two fields of observation can be exactly the same.

5.2 The size and location of grains in a microstructure are normally completely random. No normally random process of positioning a test pattern can improve this randomness, but random processes can yield poor representation by concentrating measurements in part of a specimen. *Representative* implies that all parts of the specimen contribute to the result, not, as sometimes has been presumed, that fields of average grain size are selected. Visual selection of fields, or casting out of extreme measurements, may not falsify the average when done by unbiased experts, but will in all cases give a false impression of high precision. For representative sampling, the area of the specimen is mentally divided into several equal coherent sub-areas and stage positions pre-specified, which are approximately, at the center of each sub-area. The stage is successively set to each of these positions and the test pattern applied blindly, that is, with the light out, the shutter closed, or the eye turned away. No touch up of the position so selected is allowable. Only measurements made on fields chosen in this way can be validated with respect to precision and bias.

#### 6. Sampling

6.1 Specimens should be selected to represent average conditions within a heat lot, treatment lot, or product, or to



## E 112

assess variations anticipated across or along a product or component, depending on the nature of the material being tested and the purpose of the study. Sampling location and frequency should be based upon agreements between the manufacturers and the users.

6.2 Specimens should not be taken from areas affected by shearing, burning, or other processes that will alter the grain structure.

### 7. Test Specimens

7.1 In general, if the grain structure is equiaxed, any specimen orientation is acceptable. However, the presence of an equiaxed grain structure in a wrought specimen can only be determined by examination of a plane of polish parallel to the deformation axis.

7.2 If the grain structure on a longitudinally oriented specimen is equiaxed, then grain size measurements on this plane, or any other, will be equivalent within the statistical precision of the test method. If the grain structure is not equiaxed, but elongated, then grain size measurements on specimens with different orientations will vary. In this case, the grain size should be evaluated on at least two of the three principle planes, transverse, longitudinal, and planar (or radial and transverse for round bar) and averaged as described in Section 16 to obtain the mean grain size. If directed test lines are used, rather than test circles, intercept counts on non-equiaxed grains in plate or sheet type specimens can be made using only two principle test planes, rather than all three as required for the planimetric method.

7.3 The surface to be polished should be large enough in area to permit measurement of at least five fields at the desired magnification. In most cases, except for thin sheet or wire specimens, a minimum polished surface area of 160 mm<sup>2</sup> (0.25 in<sup>2</sup>) is adequate.

7.4 The specimen shall be sectioned, mounted (if necessary), ground, and polished according to the recommended procedures in Practice E 3. The specimen shall be etched using a reagent, such as listed in Practice E 407, to delineate most, or all, of the grain boundaries (see also Annex A3).

### 8. Calibration

8.1 Use a stage micrometer to determine the true linear magnification for each objective, eyepiece and bellows, or zoom setting to be used within ±2%.

8.2 Use a ruler with a millimetre scale to determine the actual length of straight test lines or the diameter of test circles used as grids.

### 9. Preparation of Photomicrographs

9.1 When photomicrographs are used for estimating the average grain size, they shall be prepared in accordance with Guide E 883.

### 10. Comparison Procedure

10.1 The comparison procedure shall apply to completely recrystallized or cast materials with equiaxed grains.

10.2 When grain size estimations are made by the more convenient comparison method, repeated checks by individuals as well as by interlaboratory tests have shown that unless the appearance of the standard reasonably well approaches that of the sample, errors may occur. To minimize such

TABLE 1 Suggested Comparison Charts for Metallic Materials

Notes—These suggestions are based upon the customary practices in industry. For specimens prepared according to special techniques, the appropriate comparison standards should be selected on a structural appearance basis in accordance with 8.2.

Material	Plate Number	Basic Magnification
Aluminum	I	100X
Copper and copper base alloys (see Annex A4)	II or IV	75X, 100X
Iron and steel		
Austenitic	II or IV	100X
Ferritic	I	100X
Carburized	IV	100X
Stainless	II	100X
Magnesium and magnesium-base alloys	I or II	100X
Nickel and nickel base alloys	II	100X
Super strength alloys	I or II	100X
Ti and Ti-base alloys	I or II	100X

errors, the comparison charts are presented in four categories as follows:<sup>4</sup>

10.2.1 *Plate I*—Untwinned grains (flat etch). Includes grain size numbers 00, 0, 1/2, 1, 1 1/2, 2, 2 1/2, 3, 3 1/2, 4, 4 1/2, 5, 5 1/2, 6, 6 1/2, 7, 7 1/2, 8, 8 1/2, 9, 9 1/2, 10, at 100X.

10.2.2 *Plate II*—Twinned grains (flat etch). Includes grain size numbers, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, at 100X.

10.2.3 *Plate III*—Twinned grains (contrast etch). Includes nominal grain diameters of 0.200, 0.150, 0.120, 0.090, 0.070, 0.060, 0.050, 0.045, 0.035, 0.025, 0.020, 0.015, 0.010, 0.005 mm at 75X.

10.2.4 *Plate IV*—Austenite grains in steel (McQuaid-Ehn). Includes grain size numbers 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, at 100X.

10.3 Table 1 lists a number of materials and the comparison charts that are suggested for use in estimating their average grain sizes. For example, for twinned copper and brass with a contrast etch, use Plate III.

NOTE 1—Examples of grain size standards from Plates I, II, III, and IV are shown in Figs. 1, 2, 3, and 4.

10.4 The estimation of microscopically-determined grain size should usually be made by direct comparison at the same magnification as the appropriate chart. Accomplish this by comparing a projected image or a photomicrograph of a representative field of the test specimen with the photomicrographs of the appropriate standard grain-size series, or with suitable reproductions or transparencies of them, and select the photomicrograph which most nearly matches the image of the test specimen or interpolate between two standards. Report this estimated grain size as the ASTM grain size number, or grain diameter, of the chart picture that most closely matches the image of the test specimen or as an interpolated value between two standard chart pictures.

10.5 Good judgment on the part of the observer is necessary to select the magnification to be used, the proper size of area (number of grains), and the number and location in the specimen of representative sections and fields for estimating the characteristic or average grain size. It is not

<sup>4</sup> Plates I, II, III, and IV are available from ASTM Headquarters, Order No. 11-501120-10 (Plate I), 11-501120-20 (Plate II), 11-501120-30 (Plate III), and 11-501120-40 (Plate IV). A combination of all four plates is also available. Order No. 11-501121-25.

E 112

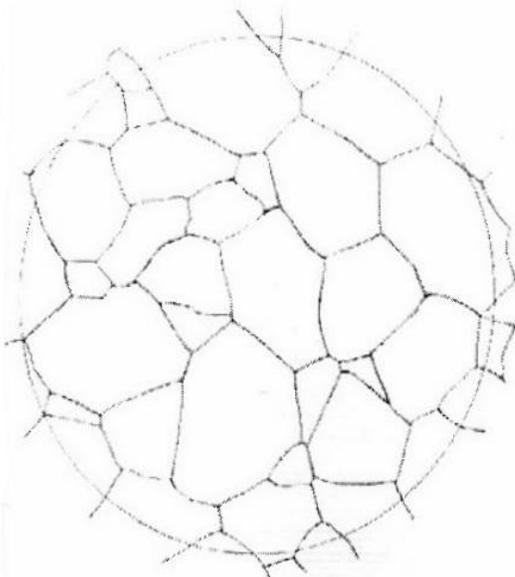


FIG. 1 Example of Untwinned Grains (Flat Etch) from Plate I. Grain Size No. 3 at 100X



FIG. 3 Example of Twin Grains (Contrast Etch) from Plate III. Grain Size 0.090 mm at 75X

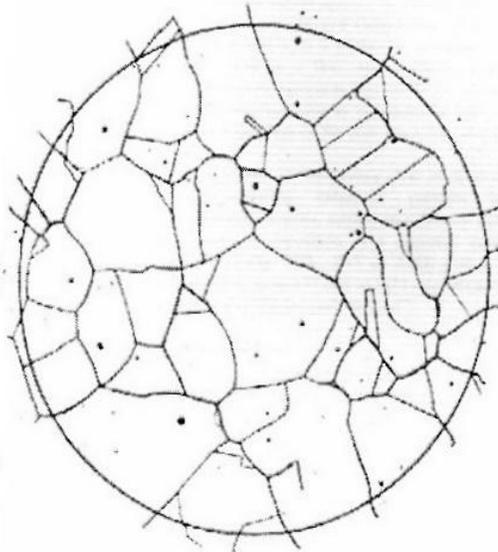


FIG. 2 Example of Twin Grains (Flat Etch) from Plate II. Grain Size No. 3 at 100X

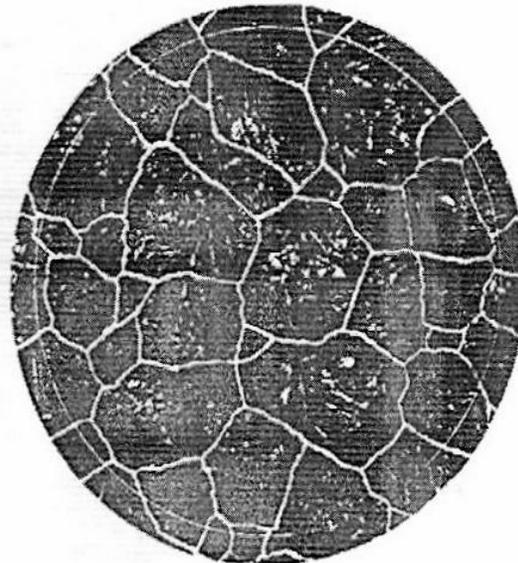


FIG. 4 Example of Austenite Grains in Steel from Plate IV. Grain Size No. 3 at 100X

sufficient to visually select what appear to be areas of average grain size. Recommendations for choosing appropriate areas for all procedures have been noted in 5.2.

10.6 Grain size estimations shall be made on three or more representative areas of each specimen section.

10.7 When the grains are of a size outside the range

covered by the standard photographs, or when magnifications of 75X or 100X are not satisfactory, other magnifications may be employed for comparison by using the relationships given in Note 2 and Table 2. It may be noted that alternative magnifications are usually simple multiples of the basic magnifications.



Designation: E 407 - 93

## Standard Practice for Microetching Metals and Alloys<sup>1</sup>

This standard is used under the trade designation E 407. The number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

### 1. Scope

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

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

### 2. Referenced Documents

- 2.1 *ASTM Standards*
- D1193 Specification for Reagent Water<sup>2</sup>
- E 7 Terminology Relating to Metallography<sup>3</sup>

### 3. Terminology

#### 3.1 Definitions

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

#### 3.2 Description of Terms Specific to This Standard

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

3.2.2 *vacuum-deposition interference layer method*—a technique for producing enhanced contrast between microstructural constituents, usually in color, by thin films formed by vacuum deposition of a dielectric compound (such as ZnTe, ZnSe, TiO<sub>2</sub>, ZnS or ZnO) with a known index of refraction, generally due to light interference effects (also known as the "Pepperhoff method").

### 4. Significance and Use

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

### 5. Summary of Practice

5.1 Table 1 is an alphabetical listing of the etchants (including rare earths) and their alloys for which no information is available. For each metal and alloy, or more etchant numbers and their corresponding  $\alpha$  indicated. Alloys are listed as a group or series when  $\alpha$  more etchants are common to the group or series. No alloys are listed only when necessary. When more than one etchant number is given for a particular use, they are given in order of preference. The numbers of etchant solutions are *italicized* to differentiate them from non etchant solutions.

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

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

5.4 If the common name of an etchant is known (e.g., Vilella's, etc.), and it is desired to know the composition, Table 3 contains an alphabetical listing of etchant names, each coded with a number corresponding to etchant composition given in Table 2.

### 6. Safety Precautions

6.1 Special safety precautions are mentioned in Table 1 only for extremely hazardous mixtures such as the cyanide and those that can form nitrogen dioxide gas. However, all chemicals are potentially dangerous and it is assumed the person using any of the etchants is thoroughly familiar with all of the chemicals involved and the proper procedure for handling, mixing and disposing of these chemicals.

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

6.2.1 When pouring, mixing, or etching, always use proper protective equipment (glasses, gloves, apron, etc.).

6.2.2 Use proper devices (glass or plastic) for weighing, mixing, containing, and storage of solutions.

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

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

6.2.5 In general, it is good practice to work under properly designed chemical fume hood, and it is imperative with those etchants that give off noxious odors or toxic vapors.

6.2.6 Methanol is a cumulative poison hazard. Wet etchant or methanol are listed as alternatives, ethanol is

<sup>1</sup> This practice is under the jurisdiction of ASTM Committee E 8 on Metallography and is the direct responsibility of Subcommittee E 8.01 on Etching, Specimen Preparation, and Polishing.

<sup>2</sup> Current edition approved Nov. 17, 1993. Published October 1994.

<sup>3</sup> Replaces E 7-82 and E 7-83.

<sup>4</sup> Replaces E 7-82 and E 7-83.

<sup>5</sup> The boldface in this standard represents changes to the last reissues of this standard.



Designation: E 3 – 95

## Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens<sup>1</sup>

This standard is issued under the designation E 3 of the numbering system for voluntary consensus standards. It is subject to revision at any time without notice. A number in parentheses indicates the year of last revision. A number in brackets indicates the year of last approval. A number in italics indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This practice is the responsibility of the Committee on Metals and Alloys, E 3.01, of the American Society for Testing and Materials.

### 1. Scope

1.1 The primary objective of metallographic examinations is to reveal the constituents and structure of metals and their alloys by means of the light microscope. In special cases, the objective of the examination may require the development of less detail than in other cases but, under nearly all conditions, the proper selection and preparation of the specimen is of major importance. Because of the diversity in available equipment and the wide variety of problems encountered, the following text presents for the guidance of the metallographer only those practices which experience has shown are generally satisfactory; it cannot and does not describe the variations in technique required to solve individual problems.

*Note 1.* For a more extensive description of various metallographic techniques, refer to Samuels, L. E., *Metallography, Principles, Microchemical Methods*, American Society for Metals (ASM), Metals Park, OH, 2nd Ed., 1967; Pearson, G., *Metallurgical Laboratory, ASM, 1970*; and Vanderhoff, G., *Metallography, Principles and Practice*, McGraw-Hill, NY, 1964.

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

### 2. Referenced Documents

- 2.1 *ASTM Standards*<sup>2</sup>
- E 7 Terminology Relating to Metallography<sup>3</sup>
- E 45 Practice for Determining the Inclusion Content of Steel<sup>4</sup>
- E 340 Test Method for Macroetching Metals and Alloys<sup>5</sup>
- E 407 Test Methods for Microetching Metals and Alloys<sup>6</sup>
- E 1077 Test Method for Estimating the Depth of Decarburization of Steel Specimens<sup>7</sup>
- E 1268 Practice for Assessing the Degree of Banding or Orientation of Microstructures<sup>8</sup>
- E 1558 Guide to Electrolytic Polishing of Metallographic Specimens<sup>9</sup>

### 3. Significance and Use

- 3.1 Microstructures have a strong influence on the prop-

erties and successful application of metals and alloys. Determination and control of microstructure requires the use of metallographic examination.

3.2 Many specifications contain a requirement regarding microstructure, hence, a major use for metallographic examination is inspection to ensure that the requirement is met. Other major uses for metallographic examination are in failure analysis, and in research and development.

3.3 Proper choice of specimen location and orientation will minimize the number of specimens required and simplify their interpretation. It is easy to take too few specimens for study, but it is seldom that too many are started.

### 4. Selection of Metallographic Specimens

4.1 The selection of test specimens for metallographic examination is extremely important because, if their interpretation is to be of value, the specimens must be representative of the material that is being studied. The intent or purpose of the metallographic examination will usually dictate the location of the specimens to be studied. With respect to purpose of study, metallographic examination may be divided into three classifications:

4.1.1 *General Studies or Routine Work*—Specimens from locations that are most likely to reveal the maximum variations within the material under study should be chosen. For example, specimens should be taken from a casting in the zones wherein maximum segregation might be expected to occur as well as specimens from sections where segregation should be at a minimum. In the examination of strip or wire, test specimens should be taken from each end of the coils.

4.1.2 *Study of Failures*—Test specimens should be taken as closely as possible to the fracture or to the initiation of the failure. Before taking the metallographic specimens, study of the fracture surface should be complete or, at the very least, the fracture surface should be documented. Specimens should be taken in many cases from a sound area for a comparison of structures and properties.

4.1.3 *Research Studies*—The nature of the study will dictate specimen location, orientation, etc. Sampling will usually be more extensive than in routine examinations.

4.2 Having established the location of the metallographic samples to be studied, the type of section to be examined must be decided. For a casting, a section cut perpendicular to the surface will show the variations in structure from the outside to the interior of the casting. In hot-worked or cold-worked metals, both transverse and longitudinal sections should be studied. Special investigations may at times require specimens with surfaces prepared parallel to the

<sup>1</sup>This practice is under the jurisdiction of ASTM Committee E 3 on Metallography and is the direct responsibility of Subcommittee E 3.01 on Sampling, Specimen Preparation and Photography.

Current edition received Jan. 15, 1995. Published May 1, 1995. Original published as E 3-71. Last previous edition, E 3-90, 1990.

<sup>2</sup>For all other standards referenced herein, see Part 1 of this practice.



*Apéndice C*

---

A  
P  
É  
N  
D  
I  
C  
E  
  
C



## Apéndice C

CENTRO DE INVESTIGACION DE MATERIALES  
UNIVERSIDAD DE CARABOBO

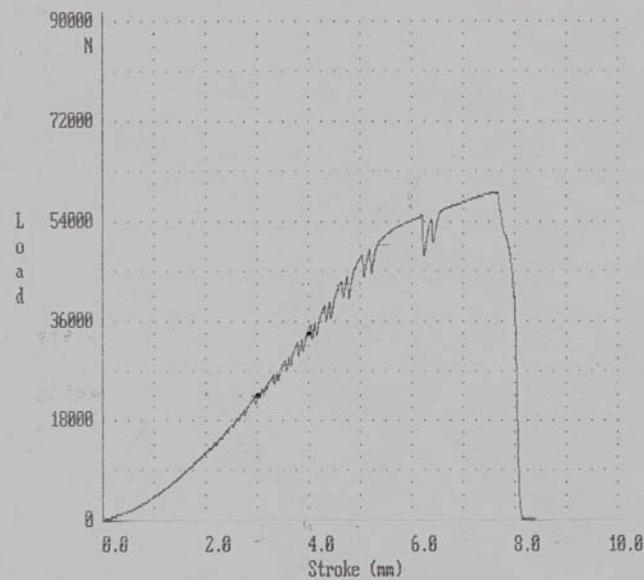
Manual processing  
CTM 20 GALDABINI

Ensayo de Traccion

Codigo muestra : Acero Duplex SAF 2507

Probeta nro 1  
V 2-8 mm/min

Maximum load : 59084.00 N



Fecha : 05-05-2008 Hora : 09:01:58

Operador : YOSMART P.



## Apéndice C

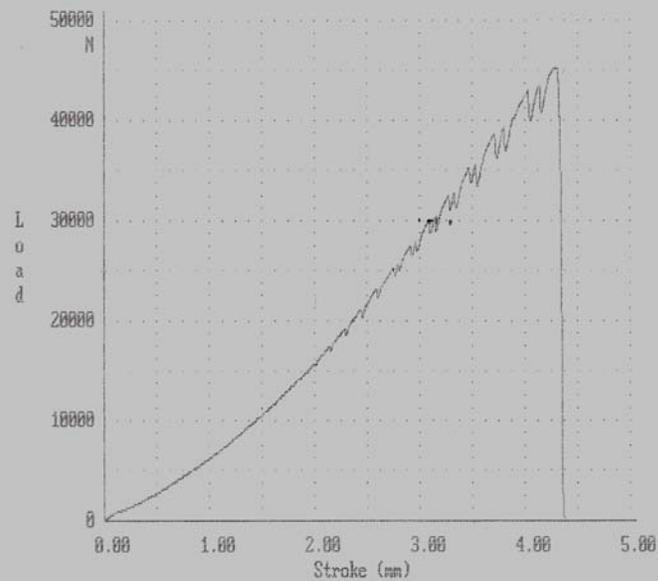
CENTRO DE INVESTIGACION DE MATERIALES  
UNIVERSIDAD DE CARABOBO

Manual processing  
CTM 20 GALDABINT

Ensayo de Traccion  
Codigo muestra : Acero Duplex SAF 2507

Probeta nro 2  
V-2mm/min

Maximum load : 45275.00 N



Fecha : 05-05-2008 Hora :09:07:37

Operador : YOSMART P...



## Apéndice C

CENTRO DE INVESTIGACION DE MATERIALES  
UNIVERSIDAD DE CARABOBO

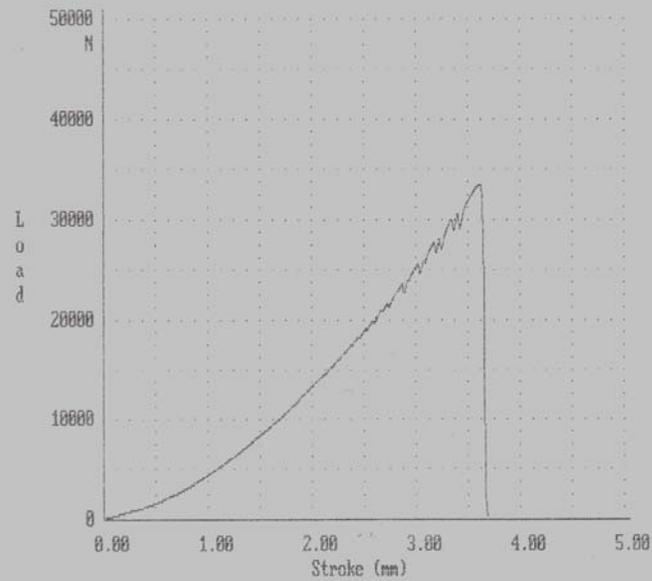
Manual processing  
CTM 20 GALDABINI

Ensayo de Traccion

Codigo muestra : Acero Duplex SAF 2507

Probeta nro 3  
V=2mm/min

Maximum load : 33482.00 N



Fecha : 05-05-2008 Hora : 09:11:42

Operador : YOSMART P...



## Apéndice C

CENTRO DE INVESTIGACION DE MATERIALES  
UNIVERSIDAD DE CARABOBO

Manual processing

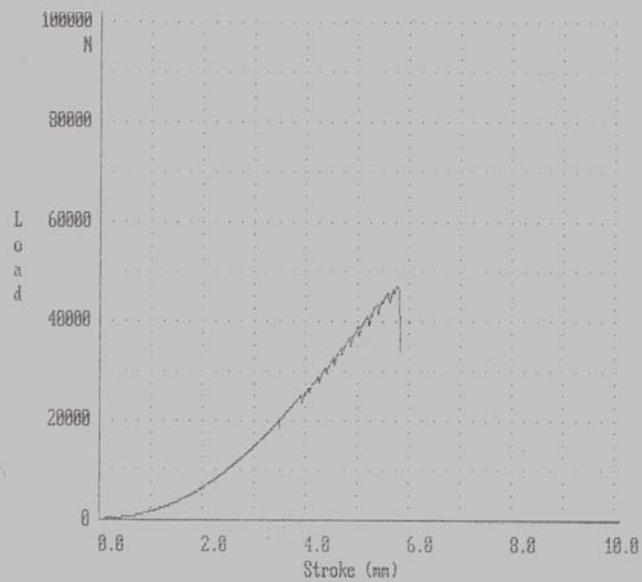
CTM 20 GALDABINT

ENSAYO DE TRACCION

Codigo muestra : ACERO INOXIDABLE DUPLEX

PROBETA Nro 4  
VELOCIDAD 2 mm/min

Maximum load : 46979.00 N



Fecha : 28-07-2008 Hora :09:45:31

Operador : YOSMART P...



## Apéndice C

CENTRO DE INVESTIGACION DE MATERIALES  
UNIVERSIDAD DE CARABOBO

Manual processing

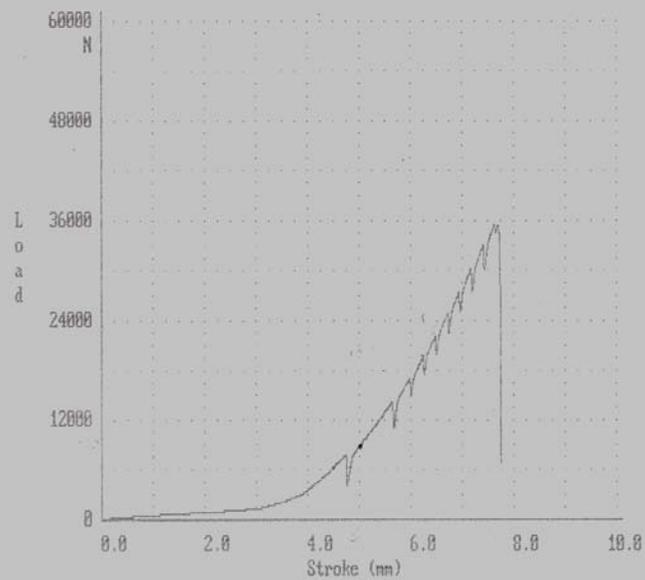
GTM 20 GALDABINI

ENSAYO DE TRACCION

Codigo muestra : ACERO INOXIDABLE DUPLEX

PROBETA Nro 5  
VELOCIDAD 2 mm/min

Maximum load : 35504.00 N



Fecha : 28-07-2008 Hora : 09:53:05

Operador : YOSMART P...



## Apéndice C

CENTRO DE INVESTIGACION DE MATERIALES  
UNIVERSIDAD DE CARABOBO

Manual processing

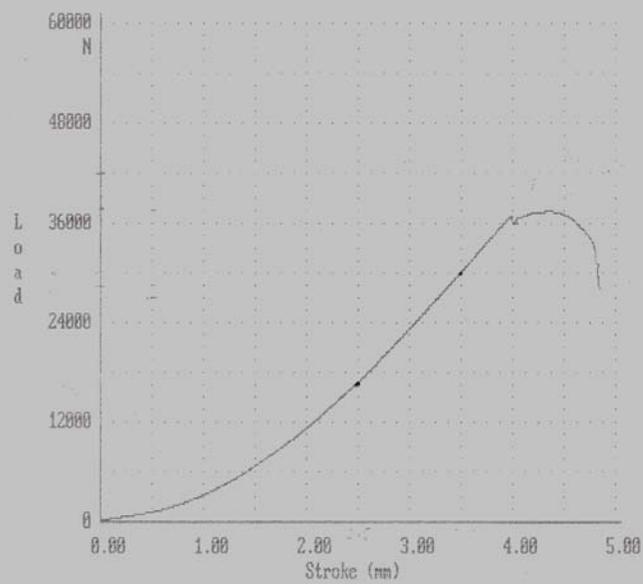
GTM 20 GALDARTNI

ENSAYO DE TRACCTON

Codigo muestra : ACERO INOXIDABLE DUPLEX

PROBETA Nro 6  
VELOCIDAD 2 mm/min

Maximum load : 37443.00 N



Fecha : 28-07-2008 Hora : 09:58:04

Operador : .....



Apéndice C

CENTRO DE INVESTIGACION DE MATERIALES  
UNIVERSIDAD DE CARABOBO

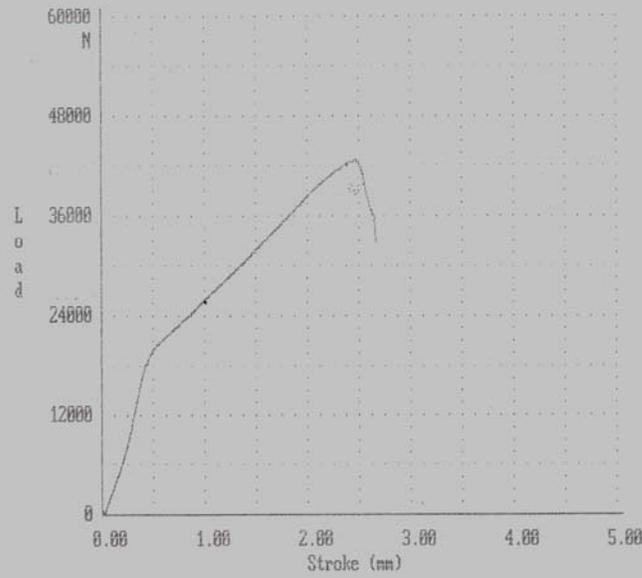
Manual processing  
CTM 20 GALDABINI

ENSAYO DE TRACCION

Codigo muestra : ACERO INOXIDABLE DUPLEX

PROBETA Nro 7  
VELOCIDAD 2 mm/min

Maximum load : 42573.00 N



Fecha : 28-07-2008

Hora : 10:06:26

Operador : YOSMART P...

se rompió en 19000 N



## Apéndice C

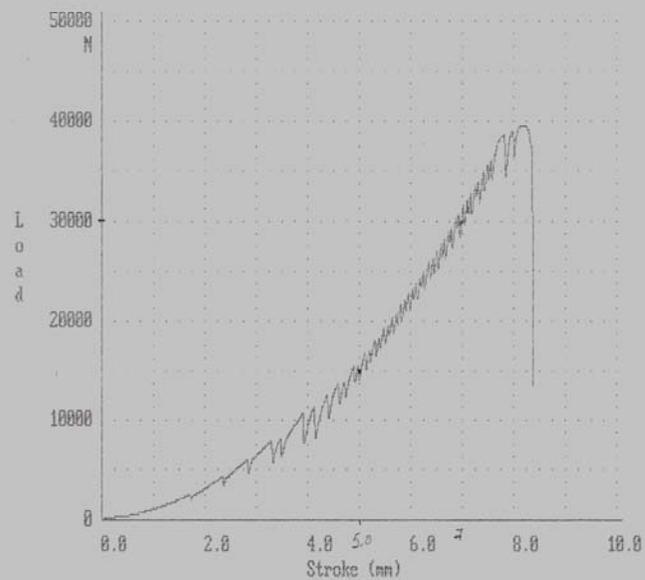
CENTRO DE INVESTIGACION DE MATERIALES  
UNIVERSIDAD DE CARABOBO

Manual processing  
CTM 20 GALDARINI

Ensayo de traccion  
Codigo muestra : Probeta Nro 8

Acero Duplex SAF 2507  
V-8

Maximum load : 39444.00 N



Fecha : 10-10-2008 Hora : 09:06:33

Operador : YOSMART P..



## Apéndice C

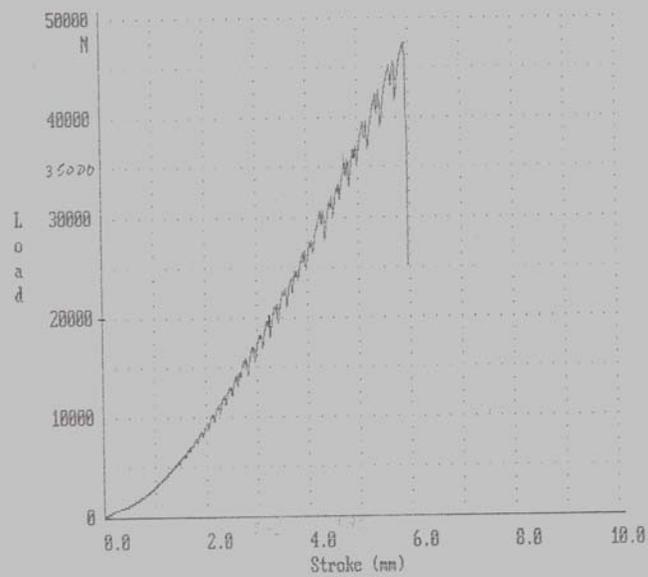
CENTRO DE INVESTIGACION DE MATERIALES  
UNIVERSIDAD DE CARABOBO

Manual processing  
CTM 20 GALDABINI

Ensayo de traccion  
Codigo muestra : Probeta Nro 9

Acero Duplex SAF 2507  
V-8

Maximum load : 47255.00 N



Fecha : 10-10-2008 Hora :09:14:16

Operador : YOSMART P..



## Apéndice C

CENTRO DE INVESTIGACION DE MATERIALES  
UNIVERSIDAD DE CARABOBO

Manual processing

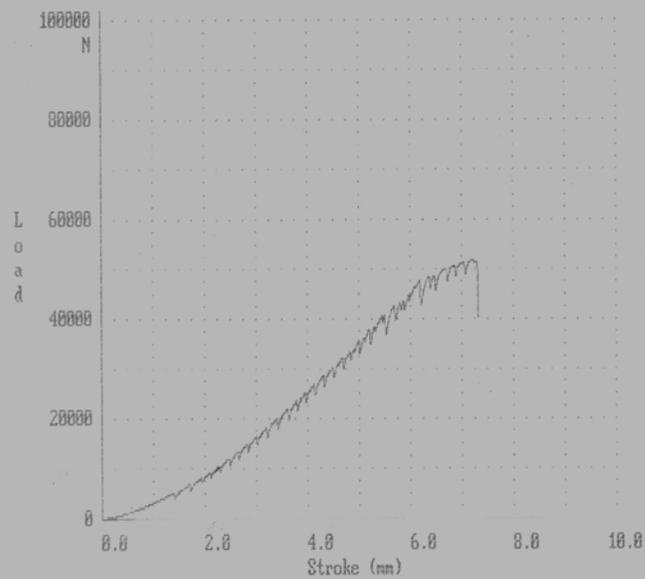
CTM 20 GALDABINT

Ensayo de traccion

Codigo muestra : Probeta Nro 10

Acero Duplex SAF 2507  
V-8

Maximum load : 51714.00 N



Fecha : 10-10-2008 Hora : 09:24:12

Operador : YOSMART P...