



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



Evaluación de la influencia de intensidad de la corriente en soldadura disímil entre un acero dúplex SAF 2507 y el acero inoxidable 316L mediante el método TIG sin material de aporte.

García Heraclio.
León Alejandro

Naguanagua, Junio de 2011



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



Evaluación de la influencia de intensidad de la corriente en soldadura disímil entre un acero dúplex SAF 2507 y el acero inoxidable 316L mediante el método TIG sin material de aporte.

Trabajo especial de grado presentado ante la Ilustre Universidad de Carabobo para optar al título de Ingeniero Mecánico

Tutor académico:

Nombre del Tutor. MSc. Ing. Argel Porrello.

Autores.

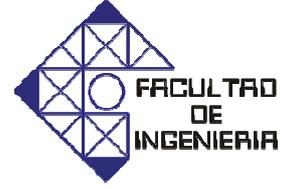
García Heraclio.

León Alejandro.

Naguanagua, Junio de 2011.



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Quien suscribe, tutor y jurado académico de la Escuela de Ingeniería Mecánica para examinar el Trabajo Especial de Grado titulado ***“Evaluación de la influencia de intensidad de la corriente en soldadura disímil entre un acero dúplex SAF 2507 y el acero inoxidable 316L mediante el método TIG sin material de aporte.”***, presentado por los bachilleres: **García Heraclio** y **León Alejandro**, portadores de la Cédula de Identidad N^o: **18.612.858** y **17.778.222**, respectivamente; hacemos constar que hemos revisado y aprobado el mencionado trabajo.

Prof. Tutor, Ing. Argel Porrello.

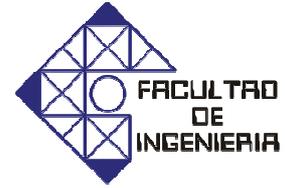
Prof. Jurado, Ing. Luis Sidorovas

Prof. Jurado, Ing. Franklin Camejo

En Naguanagua a los 06 días del mes de Junio de 2011.



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



Evaluación de la influencia de intensidad de la corriente en soldadura disímil entre un acero dúplex SAF 2507 y el acero inoxidable 316L mediante el método TIG sin material de aporte.

Trabajo especial de grado presentado ante la Ilustre Universidad de Carabobo para optar al título de Ingeniero Mecánico

García Heraclio.

León Alejandro

Naguanagua, Junio de 2011

Agradecimientos

“A Dios Todopoderoso sobre todas las cosas”

Queremos expresar, sin tomar en consideración un orden específico, nuestro más sincero agradecimiento a nuestro tutor, por sus consejos, guía y sugerencias oportunas durante el desarrollo de este trabajo de investigación. De igual manera agradecemos a la Universidad de Carabobo por brindarnos la oportunidad de obtener el título de Ingeniero Mecánico.

Igualmente queremos agradecer infinitamente a nuestros familiares y amigos que nos apoyaron, aconsejaron y ayudaron constantemente, quienes son los pequeños engranes que conforman el reloj de nuestra vida.

Dedicatoria

“A Dios Todopoderoso por darme la vida y salud”

A mi Padre Yuny y a mi Madre Gloria, por apoyarme, ayudarme y aconsejarme constantemente. A mis hermanos Douglas y Adrian, mis amigos de sangre que siempre cuidan de mí y me sirven de modelos a seguir. Al resto de la familia León Hernández Olivares que de una u otra forma me ayudaron.

Por último pero sin menor importancia a todos mis amigos, compañeros de clase y conocidos que formaron parte de este recorrido académico.

Mis más sinceras “Gracias”

Alejandro J. León H.

Resumen

La finalidad de esta investigación es evaluar la influencia de intensidad de corriente en soldadura disímil entre un Acero Inoxidable Dúplex SAF 2507 y el Acero Inoxidable 316L mediante el método TIG sin material de aporte, a través de ensayos mecánicos a tracción, doblado, microdureza y análisis metalográfico.

Dicha evaluación se basó en el estudio de tres intensidades de corriente $I_1 = 80$ A, $I_2 = 90$ A, $I_3 = 100$ A. Concluyendo así con la mejor configuración de los parámetros para llevar a cabo la unión disímil.

Índice General

	Pág.(s)
Símbolos y Abreviaturas	i
Índice general	iii
Índice de figuras	iv
Índice de tablas	v
Introducción	1
CAPÍTULO I El Problema	2
1.1 Situación Problemática	1
1.2 Objetivos	5
1.2.1 Objetivo General.	5
1.2.2 Objetivos Específicos.	5
1.3 Alcance	5
1.4 Limitaciones	6
1.5 Antecedentes	6
CAPÍTULO II Marco Teórico	9
2.1 Introducción.	9
2.2 Aceros inoxidables.	9
2.2.1 Origen del acero inoxidable.	9
2.2.2 ¿Qué es el acero inoxidable?	10
2.2.3 Ventajas del acero inoxidable.	12
2.2.4 Principales elementos de aleación y su influencia.	12
2.2.5 Clasificación de acuerdo a su microestructura.	13
2.2.6 Medición y estimación del contenido de ferrita.	18
2.2.7 Soldadura de aceros inoxidables.	21
2.2.8 Sistema. TIG	23
2.2.9 Ensayos mecánicos.	26
CAPÍTULO III Marco Metodológico	35
3.1 Tipo y nivel de la investigación.	35
3.2 Población y muestra.	36
3.3 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.	36

3.4	Técnica de procesamiento de datos	36
3.5	Adquisición del material estudiado.	37
3.6	Procedimiento de soldadura.	37
3.7	Preparación y mecanizado de las muestras ensayadas.	40
3.8	Ensayo de tracción.	42
3.8.1	Esfuerzo de fluencia.	44
3.8.2	Esfuerzo máximo.	44
3.8.3	Esfuerzo de ruptura.	45
3.8.4	Porcentaje de elongación.	45
3.9	Ensayo de doblado.	46
3.10	Estudio metalográfico.	48
3.11	Estudio de la microdureza.	51

CAPÍTULO IV	Resultados y Análisis de Resultados	53
--------------------	--	-----------

4.1	Estudio de los parámetros de soldadura.	53
4.2	Determinación de parámetros mediante las pruebas piloto.	54
4.3	Caracterización del material base.	55
4.3.1	Ensayo de tracción acero inoxidable 316L.	55
4.3.2	Ensayo de tracción acero dúplex SAF 2507.	56
4.3.3	Ensayo de microdureza en el material base.	57
4.3.4	Ensayo microscópico del material base.	58
4.4	Ensayos mecánicos en probetas disímiles unidas mediante el proceso de soldadura TIG.	60
4.4.1	Ensayo de tracción probetas disímiles, bajo condición de 80 amperios como intensidad de corriente.	60
4.4.2	Ensayo de tracción probetas disímiles, bajo condición de 90 amperios como intensidad de corriente.	61
4.4.3	Ensayo de tracción probetas disímiles, bajo condición de 100 amperios como intensidad de corriente.	62
4.5	Ensayo de microscópico de la zona de fusión y zona afectada por el calor.	64
4.6	Ensayo de doblado.	69
4.6.1	Análisis de los ensayos de doblado.	71
4.7	Ensayos de microdureza.	72
4.7.1	Análisis de los ensayos de microdureza Vickers.	76
4.8	Análisis Generales.	76

CAPÍTULO V	Conclusiones y Recomendaciones	79
-------------------	---------------------------------------	-----------

5.1	Conclusiones.	79
5.2	Recomendaciones.	80

Referencias Bibliográficas	82
-----------------------------------	-----------

Índice de Figuras

Figura	Pág.
2.1a El acero inoxidable forma una capa de óxido de cromo	11
2.1b Cuando es rayado, está película protectora es removida	11
2.1c La capa protectora es restaurada	11
2.2 Relación entre el contenido de cromo y níquel en los distintos grupos de aceros inoxidables	14
2.3 Diagrama de Schaeffler	19
2.4 DeLong (FN) Diagrama para Aceros Inoxidables Soldados	21
2.5 Ilustración esquemática de soldadura TIG	24
2.6 Diagrama esquemático del equipo TIG	26
2.7:(a) Montaje de la probeta. (b) Probeta de ensayo antes de la rotura. (c) Después de la rotura	27
2.8 Curva esfuerzo vs deformación ingenieril para un material metálico	29
2.9 Curva esfuerzo vs deformación verdadera en escala log – log	31
2.10 Esquema de montaje de un dispositivo de doblado	32
3.1 Etapas de la metodología	38
3.2 Tipo de unión en la soldadura	39
3.3 Probeta plana	41
3.4 Método “offset”	44
3.5 Equipo para ensayo de tracción. Capacidad: 20TON	46
3.6 Dimensiones probetas de Doblado. Unidades en mm	47
3.7 Esquema del ensayo de doblado según la norma ASTM E190	48
3.8 Equipo para evaluación metalográfico	51
3.9 Equipo para ensayo de dureza	52
4.1 Estudio de los parámetros de soldadura.	54

4.2 Penetración obtenida para un rango de 80-100 A, en la unión disímil.	55
4.3 Esfuerzo vs Deformación Acero Inoxidable 316L	55
4.4 Esfuerzo vs Deformación Acero Dúplex SAF 2507	57
4.5 Acero Dúplex SAF 2507, ataque químico con Bisulfito de Sodio, Aumento 1000X	59
4.6 Acero Inoxidable 316L, ataque químico con Acido Oxálico, Aumento 200X	59
4.7 Graficas Esfuerzo vs Deformación material disímil a 80 Amperios	60
4.8 Graficas Esfuerzo vs Deformación material disímil a 90 Amperios	61
4.9 Graficas Esfuerzo vs Deformación material disímil a 100 Amperios	62
4.10 Comparación de Esfuerzo de Fluencia y Máximos para cada nivel de Intensidad de Corriente empleado	63
4.11 Zona de Fusión, ataque químico: Bisulfito de Sodio. 80 Amperios. Aumento 100X	64
4.12 Zona de Fusión, ataque químico: Bisulfito de Sodio. 90 Amperios Aumento 400X	65
4.13 Zona de Fusión, ataque químico: Bisulfito de Sodio. 100 Amperios Aumento 400X	65
4.14 Transición Dúplex- Zona de Fusión, ataque químico: Bisulfito de Sodio. 80 Amperios Aumento 200X	66
4.15 Transición Dúplex- Zona de Fusión, ataque químico: Bisulfito de Sodio. 90 Amperios Aumento 200X	67
4.16 Transición Dúplex – Zona de Fusión, ataque químico: Bisulfito de Sodio. 100 Amperios Aumento 200X	67
4.17 Transición 316L – Zona de Fusión, ataque químico: Acido Oxálico. 80 Amperios Aumento 100X	68
4.18 Transición 316L – Zona de Fusión, ataque químico: Acido Oxálico. 90 Amperios Aumento 200X	68
4.19 Transición 316L – Zona de Fusión, ataque químico: Acido Oxálico. 100 Amperios Aumento 200X	69
4.20 Gráfico de microdureza para $I_1 = 80$ A	73
4.21 Gráfico de microdureza para $I_2 = 90$ A	74
4.22 Gráfico de microdureza para $I_3 = 100$ A	75
4.23 Valores promedio de dureza para las tres intensidades de corriente.	77

Índice de Tablas

Tabla	Pág.
2.1 Identificación de electrodos	24
2.2 Selección de electrodos	25
2.3 Designación De Dureza Vickers	34
3.1 Composición química del Acero Dúplex SAF 2507	38
3.2 Composición química del Acero Inoxidable 316L	38
3.3 Parámetros de soldadura	39
3.4 Cantidad y condición de probetas soldadas	40
3.5 Dimensiones de probetas planas	41
4.1 Estudio de los parámetros de soldadura individual. Acero Dúplex SAF 2507 y Acero Inoxidable 316L	54
4.2 Niveles de intensidad de corriente, obtenidos a través de las pruebas piloto.	55
4.3 Valores promedios de propiedades mecánicas, Acero Inoxidable 316L	56
4.4 Valores promedios de propiedades mecánicas, Acero Dúplex SAF 2507	56
4.5 Valores promedios de microdureza Vickers (Hv)	58
4.6 Valores promedios de propiedades mecánicas, curva material disímil a 80 Amperios	61
4.7 Valores promedios de propiedades mecánicas, curva material disímil a 90 Amperios	62
4.8 Valores promedios de propiedades mecánicas, curva material disímil a 100 Amperios	63
4.9 Valores obtenidos de los ensayos de doblado.	69
4.9 Valores obtenidos de los ensayos de doblado. (Continuación)	70
4.10 Valores de microdureza en las zonas representativas para $I_1 = 80$ A	73
4.11 Valores de microdureza en las zonas representativas para $I_2 = 90$ A	74
4.12 Valores de microdureza en las zonas representativas para $I_3 = 100$ A	74
5.1 Características mecánicas de la junta soldada a tracción, doblado, dureza.	80

Introducción.

En el mundo de la industria actual surgen constantemente situaciones que implican problemas los cuales resulta indispensable solucionar, en ello radica la importancia de la investigación a nivel de ingeniería, mediante la cual se hace posible llegar a una solución efectiva de cualquier problema que se presente y generalmente esto da paso a la innovación y evolución de los diferentes métodos conocidos. Gran parte de los problemas que se presentan día a día a nivel industrial implican la reparación de maquinarias y equipos cuyo funcionamiento es vital para el proceso en cuestión, generalmente esto conlleva a la sustitución de partes metálicas defectuosas por partes nuevas que deben ser ensambladas al equipo mediante uniones soldadas.

En ocasiones la pieza nueva resulta ser de un material diferente al de la pieza sustituida y al del resto de la máquina, debido a la opción de utilizar un nuevo material de mejores características que se adapte mas adecuadamente al funcionamiento del equipo, es por ello que la búsqueda y prueba de los métodos de soldadura aptos para este tipo de ensamble deviene un factor importante en este ámbito de la ingeniería. Es allí entonces, donde entra el presente trabajo de investigación, donde se investigan y sondean las características de una unión entre un acero de última generación y otro de una generación previa sometida a condiciones controladas de esfuerzo, las propiedades de la misma se verán afectadas y dichos cambios serán objeto de estudio del trabajo a realizar.

CAPÍTULO I

El Problema

1.1 Situación problemática

En el desarrollo de distintos materiales para el uso industrial, el más utilizado y de mayor diversidad es el Acero. La proporción de aleantes en el acero base (Hierro-Carbono), generan distintas características del acero como tal, por consiguiente las posibilidades del acero son virtualmente infinitas. Una concepción muy importante, son los aceros inoxidable. Aleaciones a base de Hierro, Cromo, Carbono y otros elementos, principalmente, Níquel, Molibdeno, Manganeso, Silicio y Titanio. Los cuales generan un incremento en sus propiedades (mecánicas y anticorrosivas) en determinadas aplicaciones industriales. La importancia de este tipo de acero, se extiende más allá de los aceros regulares.

Un tipo de acero inoxidable de gran relevancia son los llamados Austeno-Ferríticos (Dúplex, bifásicos o Dual Phase), cuya composición química ha sido cuidadosamente ajustada para lograr una estructura cristalina mixta, de aproximadamente mitad de fase ferrita y mitad de fase austenita. La aleación resultante presenta características mecánicas muy superiores a las

de un acero inoxidable austenítico. A esto se suma muy buena resistencia a la corrosión uniforme y localizada, como corrosión por picaduras, corrosión en grietas y corrosión bajo tensión o cracking.

El valor monetario de los distintos tipos de acero depende en gran medida del número de aleaciones presentes en el mismo, es decir, un acero no aleado y/o con baja aleación tiene menor costo que por ejemplo un acero inoxidable. Cronológicamente los aceros de bajas aleaciones se implementaron primero, y debido a eso muchas aplicaciones requieren, ya sea por fallas o por mejoras, de sustituciones por aceros con mayor número de aleantes. Más específicamente en las aplicaciones ya existente de aceros inoxidables muchas podrían ser tentativamente suplidas por acero dúplex. Sin embargo como estos últimos resultan ser más costosos que los primeros, éste reemplazo generalmente no es total.

Los aceros, son expuestos permanente, intermitentemente u ocasionalmente al ataque de productos químicos como: líquidos, sólidos, gases condensados, en solución o suspensión, por contacto directo, inmersión, salpique o rociado. En condiciones ideales, para mejorar la protección de las estructuras expuestas, se sustituye el acero por un acero dúplex, pero en la realidad no es rentable, ya que el acero dúplex es más costoso que un acero de baja aleación. Dado el caso, surge la posibilidad de usar aceros dúplex solo en zonas específicas críticas a las condiciones de corrosión las cuales requieran de mayor protección. Y dejar el resto de la aplicación con el acero anterior. Logrando así mejor protección y gastos menos crecidos.

La posibilidad de utilizar dos materiales distintos unidos en la misma estructura recae en el proceso de soldadura disímil. Las uniones soldadas en las aplicaciones se encuentran sometidas a ciertos esfuerzos, los cuales, según la calidad de la soldadura, pueden afectar la unión, produciendo

porosidades y grietas que promueven la corrosión en los materiales, y por lo tanto la funcionalidad de la aplicación se verá gravemente afectada. Al realizar una soldadura es importante tomar en cuenta las características de los materiales a unir, ya que el proceso de soldadura utilizado afectará de algún modo las propiedades de los mismos, siendo este otro factor importante que podría comprometer la funcionalidad de la estructura. He aquí la importancia de realizar una soldadura de alta calidad utilizando el método y los parámetros más adecuados según las necesidades.

Actualmente existen distintos métodos de soldadura y uno de los más utilizados en la industria es el sistema de soldadura al arco con protección gaseosa o TIG. Este proceso de soldadura se usa para soldar aceros inoxidables y por lo tanto se hace necesario realizar estudios de las características de las uniones de estos materiales mediante el mencionado proceso, y sin la necesidad de usar material de aporte ya que el espesor del material lo permite, contribuyendo a la reducción de costos. De lo contrario sería imposible lograr avances en el procedimiento. Cuando se trata de una unión disímil, el estudio realizado debe enfocarse en la influencia que pueda tener los parámetros de soldadura en la unión de ambos materiales. Más específicamente se centra la atención en la influencia del nivel de intensidad de corriente en una unión disímil.

Mencionado lo anterior se plantea la necesidad de evaluar la influencia de la intensidad de corriente en una soldadura disímil entre un acero dúplex SAF 2507 y el acero inoxidable 316L mediante el método TIG sin material de aporte, para comprender mejor las alternativas de aplicación en equipos que requieran una sustitución, ya sea por fallas o mejoras, de alguno de sus componentes de acero inoxidable 316L por acero dúplex SAF 2507, el cual se unirá con el resto de componentes de acero inoxidable 316L, mediante una soldadura disímil.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General.

Evaluar la influencia de la intensidad de corriente en la soldadura disímil entre un acero dúplex SAF 2507 y el acero inoxidable 316L mediante el método TIG sin material de aporte.

1.2.2 Objetivos Específicos.

- Estudiar los parámetros de soldadura individual, del acero dúplex SAF 2507 y el acero inoxidable 316L por el método TIG, sin material de aporte.
- Caracterizar las propiedades mecánicas y microestructurales individuales del acero dúplex SAF 2507 y el acero inoxidable 316L.
- Determinar el valor más apropiado de intensidad de corriente en combinación con los parámetros establecidos para la soldadura disímil, mediante pruebas piloto.
- Determinar las características mecánicas y microestructurales de la junta soldada, a tracción, doblado y dureza.

1.3 Alcance

La investigación estará limitada por la evaluación de la influencia de la intensidad de corriente en una soldadura disímil mediante el método TIG, sin material de aporte según la norma AWS D1.6. En uniones a tope de láminas de acero dúplex SAF 2507 de 3 mm de espesor y láminas de acero inoxidable 316L del mismo de espesor. Para ello sólo se estudio el efecto del nivel de intensidad de corriente en un rango de 80, 90 y 100 Amperios, de corriente continua, polaridad directa, electrodo negativo. Se usó un gas de protección de Argón al 99,99%, y un electrodo de Tungsteno-Torio (W-Th) punta roja (3/32") Según la norma AWS A5.2. Una velocidad de pasada de

aproximadamente 100 mm/min. Para la elaboración de los ensayos se demandó de cuatro probetas planas por cada nivel de intensidad de corriente, para su posterior ensayo a tracción, y cuatro probetas planas por cada nivel de intensidad de corriente, para su posterior ensayo a doblado, de igual manera se aplicó ensayo de dureza y se analizó la microestructura de la unión, según las normas ASTM E8, ASTM E190, ASTM E92, ASTM E3 y ASTM E407 respectivamente.

1.4 Limitaciones

El impedimento que se presentó a lo largo del desarrollo de la investigación, radicó en la insuficiencia del tiempo disponible para la culminación de la misma.

1.5 Antecedentes

Entre algunas investigaciones que se han realizado previamente y que guardan relación con esta investigación se tienen las siguientes:

Un trabajo de investigación en el cual se realizó la soldadura de seis cupones de Acero Inoxidable Dúplex 2205 de 0,6 cm de espesor por el proceso de arco con protección gaseosa y electrodo de tungsteno (GTAW), empleando material de aporte. Se determinaron los parámetros de soldadura, como lo son: la corriente y longitud de arco, la velocidad de avance y la separación de raíz, con el fin de realizar el menor número de pases posibles para evitar daño en la microestructura. Posteriormente se determinó el efecto de la velocidad de enfriamiento sobre el cordón de soldadura, sometiendo el cupón soldado a dos medios de enfriamiento distintos (agua y aire agitado). En conclusión se logró soldar por el proceso GTAW, obteniéndose cordones de soldadura con buena penetración, buen acabado superficial y excelentes propiedades mecánicas. Adicionalmente se observó en el pase de raíz la presencia de austenita con morfología globular, resultado de un tratamiento

térmico, debido al calentamiento del cordón base cuando se lleva a cabo el pase de relleno. (Ramírez et al., 2006).

La investigación realizada por Dadfar et al., (2007) se investigó en solución fisiológica. El comportamiento de la corrosión en solución fisiológica a 37°C fue investigado con curvas potenciodinámicas de polarización. La microestructura del metal base (316L) y del metal de soldadura fueron estudiados mediante exploración con microscopía electrónica. Los comportamientos de la corrosión del metal de soldadura, del metal base y de las uniones soldadas se compararon en conjunto. Para detectar la microestructura y las fases en el metal base y el metal de soldadura, fue realizado un análisis de difracción de rayos X. Finalmente, el tratamiento térmico post soldadura fue realizado en las muestras ya soldadas. Los resultados indicaron que el comportamiento de la corrosión en el metal de soldadura fue mejor que en el metal base. Este fenómeno fue atribuido a las fases secundarias que estaban presentes en el metal base. Las fases secundarias en el metal de soldadura se disuelven cuando el metal base se funde debido al proceso de la soldadura. De acuerdo con los resultados del análisis electroquímico, se determinó que el índice de corrosión de una unión soldada era mayor que el de otras piezas. La zona afectada por el calor es responsable de este fenómeno. Las zonas adyacentes al metal de soldadura son clásicamente menos resistentes a la corrosión, de tal modo siendo atacado preferentemente cuando el acero se expone a ambientes corrosivos. El tratamiento térmico post soldadura disminuyó el índice de corrosión de las uniones soldadas.

En el trabajo de Dorta (2006) se llevó a cabo la unión por soldadura de probetas ideales de dos materiales metálicos diferentes, acero inoxidable dúplex SAF 2205 y aluminio 6063-T5. La Unión se realizó mediante el proceso de soldadura homogénea GMAW automático, para así estudiar la influencia de las variables operacionales, intensidad, voltaje y velocidad de

avance, sobre las propiedades mecánicas y la eficiencia de la junta en cuestión. Así mismo se analizaron tanto los perfiles de temperatura como las variaciones de las temperaturas máximas obtenidos durante el proceso para diferentes condiciones en estudio.

El estudio se basa en la realización de cordones de soldaduras utilizando una fuente de poder de potencia constante y argón comercial como gas protector. Para la aleación de aluminio sensible al endurecimiento por precipitación, Al 6063-T5, se usó corriente continua polaridad reserva (DCRP) y como alambres de aluminio ER5356 según la norma AWS A5. Por otra parte para el acero inoxidable dúplex SAF 2205 se utilizó corriente continua polaridad reserva y el material de aporte fue un electrodo E-ER 2209 de acuerdo a las normas AWS5-4-92 y 5.9-93. A su vez, se cuantificaron los ciclos térmicos generados en el proceso con el equipo de lectura y recolección de temperaturas Pico TC-08 y termopares tipo R y K, para el acero dúplex y para el aluminio, respectivamente. Por otra parte, se realizaron ensayos mecánicos de tracción según norma ASTM A370 con velocidad de 3 mm/min.

El comportamiento térmico de las soldaduras fue evaluado y se comparó con las temperaturas obtenidas según el modelo matemático de Rosenthal, observando que siguen la misma tendencia pero con eficiencias del proceso de 0,45 para el acero dúplex y 0.40 para el aluminio.

Los modelos matemáticos desarrollados para determinar las temperaturas máximas alcanzadas en función de las variables operacionales y de la distancia desde la línea de fusión son adecuados para predecir dichas temperaturas, pues presentan unos coeficientes de determinación cuyos valores son cercanos a uno, por lo tanto es altamente recomendada su utilización. Sin embargo, los modelos establecidos para determinar la resistencia, tanto a la fluencia como a carga máxima, en función de los parámetros de soldadura, no muestran el mismo comportamiento, teniendo coeficientes de correlación bajos.

CAPÍTULO II

Marco Teórico

2.1 Introducción

En este capítulo se presentan explícitamente los aspectos fundamentos teóricos referentes al desarrollo de este trabajo de investigación. Inicialmente se hace referencia a los diferentes tipos de acero inoxidable con su respectiva descripción, y posteriormente se especifican con detalle los aceros inoxidables austeníticos, además se describe el proceso de soldadura utilizado y sus aspectos de mayor relevancia, así como también se ilustra le teoría en general de los ensayos a realizar.

2.2 Aceros Inoxidables

2.2.1 Origen del Acero Inoxidable

Existen muchas versiones diferentes sobre el origen del acero inoxidable. Una de ellas afirma que poco antes de la Primera Guerra Mundial, un comerciante francés en chatarra se dio cuenta que un cañón permanecía brillante y limpio entre un montón de oxidados cañones. Las investigaciones revelaron que se había agregado una cantidad excesiva de cromo al acero

básico durante la fabricación de este cañón especial. Así, el acero inoxidable, habría sido descubierto por casualidad.

En 1905-1906 Quillet (Francia) fue la primera persona en producir y explorar, metalúrgica y mecánicamente, los aceros inoxidables en las composiciones que entran en las tres clases principales: Austeníticos, Ferríticos y Martensíticos. Sin embargo, él no descubrió el fenómeno de la pasividad (la resistencia sobresaliente de los aceros inoxidables a las soluciones químicas más corrosivas que atacarían fácilmente a los aceros al carbono). Entre 1908-1910 la investigación de Monnartz (Alemania) dio a conocer la inoxidabilidad de estos aceros como función de la pasividad. Él notó la importancia del mínimo de aproximadamente 11% de cromo, la necesidad de bajo carbono, el hecho de que el carbono podía estabilizarse y la contribución del molibdeno para realizar la resistencia a la corrosión.

En la actualidad el Instituto Americano del Hierro y Acero (IAHA) enumera aproximadamente 60 tipos convencionales. En los años recientes los aceros inoxidables para endurecimiento por precipitación (EP) han emergido como la cuarta clase. Más recientemente, los aceros inoxidables dúplex, que contienen aproximadamente 50% de Ferrita y 50% de Austenita están siendo promovidos como para ambientes agresivos en donde la resistencia a la corrosión por tensiones es de gran importancia (Núñez et al., 2010)

2.2.2 ¿Qué es el Acero Inoxidable?

Los aceros inoxidables son aleaciones a base de Hierro, con bajo contenido de Carbono y un mínimo de 11% de Cromo. La mayoría de los grados comerciales contiene al menos 11% de Cromo y hasta 0.8% de Carbono. Algunos grados contienen níquel como segundo elemento de

aleación. Cuando el contenido total de la aleación excede aproximadamente el 50%, la designación “resistente al calor” es más aplicable que inoxidable.

Su principal característica es su alta resistencia a la corrosión. Esta resistencia es debido a la formación espontánea de una capa de óxido de cromo en la superficie del acero. Aunque es extremadamente fina, esta película invisible está firmemente adherida al metal y es extremadamente protectora en una amplia gama de medios corrosivos. Dicha película es rápidamente restaurada en presencia del oxígeno, y así daños por abrasión, corte o mecanizados son reparados rápidamente (Figura.2.1)

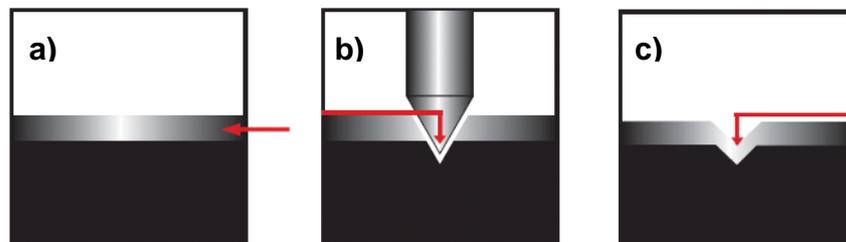


Figura 2.1. a) El acero inoxidable forma una capa de óxido de cromo. b) Cuando es rayado, esta película protectora es removida. c) La capa protectora es restaurada (Echeverría et al., 2010)

Para aumentar la resistencia a la corrosión o para requerimientos de fabricación específicos, el cromo puede aumentarse y pueden añadirse otros elementos tales como níquel o molibdeno. Con aproximadamente 11% de Cromo, se formará una película protectora suficiente para soportar un ambiente poco agresivo como puede ser el interior de una vivienda, pero con el tiempo, si este acero presta servicio a la intemperie, acabará corroyéndose. Con alrededor de 18% de Cromo, el acero está en condiciones de soportar las más rigurosas condiciones atmosféricas. El grado de impenetrabilidad de la capa de óxido en ciertos ambientes depende no sólo de la composición de la aleación, sino también en el medio específico, de la temperatura de éste, y de la concentración del agente corrosivo (Núñez et al., 2010)

2.2.3 Ventajas del Acero Inoxidable

- Resistencia a la corrosión

Todos los aceros inoxidables tienen una alta resistencia a la corrosión. Los grados de baja aleación, resisten la corrosión en condiciones atmosféricas; los grados altamente aleados pueden resistir la corrosión en la mayoría de los medios ácidos, incluso a elevadas temperaturas.

- Resistencia a la alta y baja temperatura

Algunos grados resisten grandes variaciones térmicas y mantendrán alta resistencia a temperaturas muy altas, otros demuestran dureza excepcional a temperaturas criogénicas.

- Facilidad para la fabricación

La mayoría de aceros inoxidables pueden ser cortados, soldados, forjados y mecanizados con resultados satisfactorios.

- Resistencia mecánica

La característica de endurecimiento por trabajo en frío de muchos aceros inoxidables, se usa en el diseño para reducir espesores y así, los costos. Otros aceros inoxidables pueden ser tratados térmicamente para hacer componentes de alta resistencia.

- Estética

El acero inoxidable está disponible en muchas terminaciones superficiales. Se mantiene fácilmente dando por resultado una alta calidad.

- Propiedades higiénicas.

La facilidad de limpieza del acero inoxidable lo hace la primera opción en hospitales, cocinas, e instalaciones alimenticias y farmacéuticas.

- Ciclo de trabajo

El acero inoxidable es un material durable, y es la opción más barata considerando el ciclo vital.

2.2.4 Principales Elementos de Aleación y su Influencia

- Cromo

- Formador de Ferrita y Carburo.
- Principal responsable de la resistencia a la corrosión y de la formación de la película de óxido.
- No presenta aporte significativo en la resistencia a altas temperaturas y a la fluencia lenta.
- Níquel
 - Formador de Austenita.
 - Mejora la resistencia general a la corrosión en líquidos no oxidantes.
 - Mejora la tenacidad y la ductilidad.
 - Reduce la conductividad del calor.
 - Aumenta la resistencia eléctrica.
 - Aumenta la resistencia a la fatiga.
 - Aumenta la capacidad de ser soldado.
 - Se añade a los grados con cromo para mejorar las propiedades mecánicas.
- Molibdeno
 - Formador de Ferrita y Carburo.
 - Mejora la resistencia a temperaturas elevadas y a la fluencia lenta.
 - Mejora la resistencia general a la corrosión en medios no oxidantes, y la resistencia a la corrosión por picadura en todos los medios.

2.2.5 Clasificación de acuerdo a su Microestructura

Los tres tipos principales de aceros inoxidable utilizados en la industria son las clases Martensítica, Ferrítica y Austenítica, nombres derivados de la fase predominante que se encuentra a temperatura ambiente. Una cuarta clase, los tipos EP (Endurecimiento por Precipitación), ha alcanzado importancia en las últimas décadas. En los últimos años, la clase Dúplex ha despertado gran interés. Esta clasificación se puede observar en base al contenido de Cromo y Níquel en la Figura 2.2

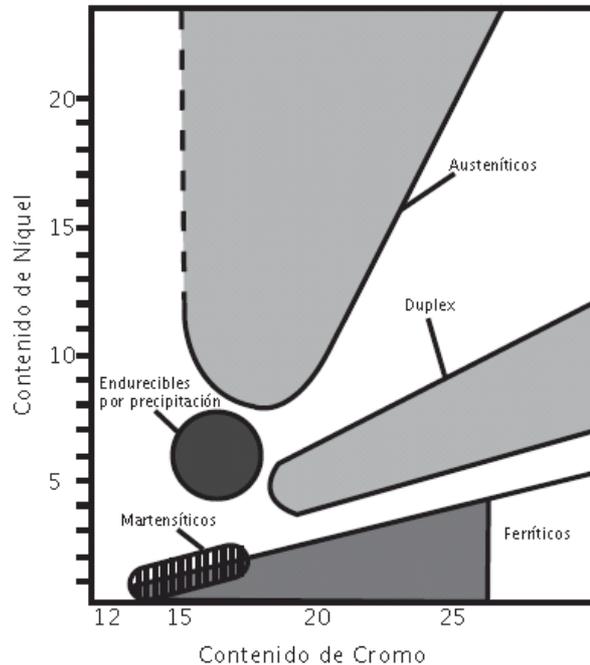


Figura 2.2 Relación entre el contenido de cromo y níquel en los distintos grupos de aceros inoxidables (Echeverría et al., 2010)

- Aceros Inoxidables Austeníticos

La clase austenítica contiene níquel como segundo elemento principal de aleación. El Ni se utiliza para suprimir la transformación de la Austenita y hacerla estable incluso a temperatura ambiente y más baja. Así, cuando el níquel se agrega al acero inoxidable en cantidades suficientes, la estructura cambia a Austenita.

Los metales de aporte serie 300 de acero inoxidable Austenítico (con contenido de Cr que varía desde 15-32% y contenido de Ni de 8-37% aproximadamente) se utilizan en la mayor parte de las aplicaciones de soldadura ya que ellos son mucho más soldables que los aceros inoxidables ferríticos, martensíticos o de endurecimiento por precipitación.

- Aceros Inoxidables Ferríticos

Se caracterizan por una estructura Ferrítica a cualquier temperatura ya que no presentan transformación de Ferrita en Austenita durante el calentamiento ni transformación Martensítica en el enfriamiento. Por esta razón no hay posibilidad de cambios de fase. Como se observa en la Figura 1. Apéndice, si a un acero inoxidable se le aumenta el porcentaje de Cr y se limita la cantidad de C la vertical que representa a aleación se situará a la derecha del bucle gamma y el acero será ferrítico a cualquier temperatura, ya que no atraviesa ninguna línea de transformación, y no podrá ser templado, como por ejemplo los inoxidables tipo 430, 442, y 446. Los aceros Ferríticos son conocidos como los aceros inoxidables de Cromo directo. Su contenido de Cromo que varía entre 10,5% (Tipo 409) y el 30% (Tipo 448), pero con bajo contenido de Carbono. Ejemplos son los aceros AISI 405, 430, 442 y 446. La más común de las aleaciones es la tipo 430 (UNS S43000), con 16% a 18% de cromo, 0,12% máx. de Carbono.

- Aceros Inoxidables Martensíticos

Son aleaciones que atraviesan el campo gamma del diagrama de equilibrio Cr-Fe (ver Figura 2. Apéndice) debido a lo cual pueden austenizarse y templarse. Pueden estar aleados con pequeñas cantidades de otros elementos. Son ferríticos en estado de recocido pero martensíticos con un enfriamiento más rápido ya sea en aire o en un medio líquido desde una temperatura superior a la crítica. Fueron los primeros aceros inoxidables desarrollados comercialmente (como cuchillería) y tienen contenido relativamente alto del carbono (0,1 - 1,2%) comparado a otros aceros inoxidables. Aceros de este grupo en general no contienen más de 14% de Cr, excepto los tipos 440 A, B, y C que contienen 16-18%Cr y una cantidad de Carbono suficiente para producir el endurecimiento. Junto con la clase de aceros inoxidables Ferríticos comparten la denominada serie AISI 400. En

contraste con los aceros inoxidables auténticos, no contienen Níquel como elemento de aleación. Algunos ejemplos son aceros tipo AISI 410, 416, 420, 431, 501 y 502.

- **Aceros Inoxidables Endurecibles por Precipitación**

Son aleaciones base hierro, con Cr entre 12% y 18% y Ni entre 4% y 9%, además de elementos aleantes que producen el endurecimiento por precipitación tales como Molibdeno (Mo), Titanio (Ti), Nitrógeno (N), Cobre (Cu), Aluminio (Al), Tántalo (Ta), Niobio (Nb), Boro (B) y Vanadio (V). Han sido formulados de tal forma que puedan ser suministrados en condición de solución sólida (en la cual ellos son maquinables) y así puedan ser endurecidos después de la fabricación a través de un proceso de “envejecimiento” a baja temperatura entre 482-593°C minimizando los problemas asociados con los tratamientos a temperaturas elevadas. El principio del endurecimiento por precipitación se basa en someter al material a un tratamiento de solubilización a una temperatura de unos 1050°C con posterior enfriamiento al aire, dando lugar a una matriz martensítica sobresaturada. A continuación, se envejece el acero a una temperatura comprendida entre 455 y 565°C, que da lugar a la precipitación de los compuestos intermetálicos endurecedores.

- **Aceros Inoxidables Dúplex**

Son aleaciones base hierro con Cr, Mo y una cantidad de estabilizadores de la Austenita como Ni y N para lograr el balance deseado entre las fases ferríticas y austeníticas de donde deriva su denominación dúplex. El nitrógeno aumenta el límite de fluencia y reduce la velocidad de la formación de compuestos intermetálicos frágiles. El molibdeno mejora la resistencia a la corrosión por picadura y rendija. Fueron desarrollados considerando que los aceros inoxidables austeníticos son vulnerables al agrietamiento por corrosión de tensiones (ACT) en ambientes de cloruro, aunque presentan una excelente

soldabilidad. Los aceros inoxidable Ferríticos tienden a ser frágiles y son difíciles de soldar pero resisten el agrietamiento por corrosión de tensiones. Los aceros inoxidable dúplex combinan algunas de las mejores características de los aceros inoxidable Austeníticos y Ferríticos. La Austenita proporciona ductilidad y la Ferrita resistencia al ACT. Debido al balance existente entre estas dos fases, presentan ventajas en severas condiciones de temperatura y contenido de cloruros, donde los Inoxidables austeníticos sufren ACT, picaduras y rendijas.

El contenido típico de Ferrita de estos aceros va entre un 40 y 60%. Contienen Cr relativamente alto (entre 18 y 28%) para mantener la resistencia a la corrosión de los aceros Austeníticos y cantidades moderadas de Ni (entre 4.5 y 8%) para aumentar el contenido de Ferrita y así aumentar la resistencia a ACT en medios con cloruros a alta temperatura.

Ejemplos de aleaciones dúplex son los grados 312, 315, 318, 325 y 329. La aleación 2205 (UNS S31803) es una de las aleaciones dúplex más ampliamente usada. Comparando la composición de esta aleación con una de acero inoxidable completamente austenítico, tal como el tipo 316, la aleación 2205 es más alta en cromo, más baja en níquel y contiene nitrógeno. (Núñez et al., 2010)

Aplicaciones típicas

- Tuberías de intercambiadores térmicos, tuberías de petróleo, plataformas de ultramar, pozos de gas, tuberías en línea, cuerpos de válvulas para manejar agua de mar y bombas de fundición.
- Industria de procesamiento químico.
- Usos marinos, particularmente a temperaturas levemente elevadas.
- Plantas de desalación.
- Plantas petroquímicas.
- Industria de la Celulosa.

Hay muchos aceros inoxidable que no están en el Sistema IAHA como los endurecibles por precipitación (clase EP) y la mayoría de los aceros dúplex. Un grupo importante de estos aceros se designa con nombres propios registrados (ejemplo 17-4PH, SAF2507, Zerón 100, Ferralium 255 etc.) o simplemente por su UNS.

2.2.6 Medición y Estimación del Contenido de Ferrita

El contenido real de Ferrita se puede determinar por medio de un examen metalográfico o a través de gráficos especialmente diseñados conociendo la composición química del metal depositado.

- Medición del contenido de Ferrita por instrumentos magnéticos

Considerando que la Ferrita es magnética y la Austenita no, la cantidad de Ferrita en una soldadura puede determinarse midiendo su atracción magnética, la cual es directamente proporcional a la cantidad de Ferrita presente. Existen diferentes instrumentos disponibles para esta medición. El Severn Gauge compara densidades y de esta manera aísla las cantidades de Ferrita. El Magna Gauge mide la tensión requerida por un resorte para separar a un imán de la soldadura. La fuerza necesaria es relacionada con el porcentaje de Ferrita. Este equipo es más exacto pero está limitado como instrumento de laboratorio mientras que el Severn Gauge se puede aplicar en fábrica y obra. La calibración de dichos instrumentos es crítica. La SAS ha desarrollado un procedimiento de calibración, además de detallar como se debe realizar el relleno y la preparación para el muestreo, dado que estos influyen la medición.

- Estimación del contenido de Ferrita mediante examen metalográfico

Este método es más exacto cuando la Ferrita está en un rango de 4 a 10%. Una de las ventajas de dicho método es que puede usar pequeñas

muestras obtenidas del metal depositado y puede ser usado cuando los otros métodos no sean prácticos (Echeverría et al., 2010)

- Estimación del contenido de Ferrita por la composición química del metal depositado

Se han desarrollado a través de los años diferentes diagramas para predecir el porcentaje de Ferrita. Los resultados obtenidos con los diferentes diagramas pueden presentar diferencias. Algunos diagramas son:

- Diagrama de Schaeffler (ver Figura.2.3).
- Diagrama DeLong (ver Figura.2.4).

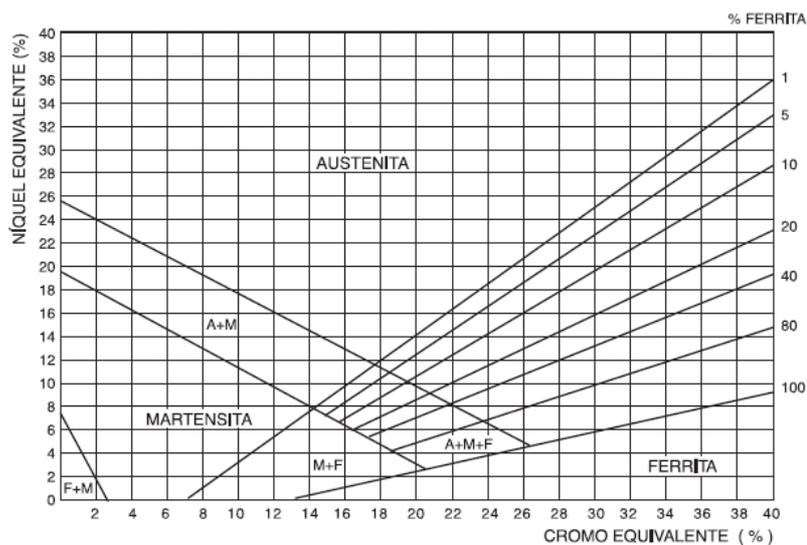


Figura 2.3 Diagrama de Schaeffler (Echeverría et al., 2010)

Al principio, los diagramas representaban la Ferrita en unidades de volumen (%). Los diagramas más recientes del Welding Research Council, WRC, determinan el número de Ferrita, NF, por respuesta magnética. El NF y el volumen (%) son equivalentes hasta el 6%, pero difieren a niveles más altos.

El contenido de Ferrita en el metal de aporte de acero inoxidable austenítico, puede controlarse al variar la composición química. El cromo

promueve la formación de Ferrita, mientras que el níquel se opone a dicha formación. Otros elementos actúan con distintos grados de potencia de la misma manera como lo hace el cromo o el níquel. Por esta razón tenemos un equivalente de Cromo (ferritizantes) vs. un equivalente de Níquel (austenitizantes).

- Diagrama de Schaeffler

Procede de su antecesor, el diagrama de Maurer, el cual presenta las estructuras que va a presentar un acero al Cr-Ni de acuerdo a los porcentajes de estos presentes en el acero. Antón Scheaffler lo mejoró, incorporando la influencia de distintos elementos de aleación en la formación de Ferrita y Austenita. Se definió así el concepto de Cromo equivalente y Níquel equivalente. El cromo equivalente incorpora los elementos alfa genos (formadores de Ferrita) y el níquel equivalente los elementos gamma genos (formadores de Austenita). Cada elemento va multiplicado por un factor que depende de su grado de influencia en la formación de Ferrita o Austenita respectivamente.

Cromo equivalente:

$$\%Cr + \%Mo + (1,5 \times \%Si) + (0,5 \times \%Nb).$$

Níquel Equivalente:

$$\%Ni + (30 \times \%C) + (0,5 \times \%Mn).$$

El diagrama de Schaeffler muestra la presencia de las fases Austenítica, Ferrítica y Martensítica propias de los aceros Inoxidables cuando son enfriados a las velocidades normales de soldadura. Además presenta las zonas de fragilización en Frío debido a la presencia de Martensita, la zona de Fragilidad en caliente originada por la presencia de Austenita, la zona de Fragilidad por presencia de fase Sigma y la zona de Crecimiento de grano Ferrítico. (Figura 2.3).

El trabajo en el diagrama de Schaeffler fue realizado considerando soldadura manual con electrodos revestidos, donde se asumía que los depósitos contenían aproximadamente de 0,06% de nitrógeno. Con el desarrollo de nuevos procesos de soldadura que incorporan desde el aire atmosférico al metal fundido distintos niveles de Nitrógeno, fue necesario desarrollar nuevos gráficos que incorporaran la influencia del nitrógeno como elemento formador de Ferrita. En estos casos es preferible utilizar una revisión del diagrama de Schaeffler, llamado diagrama de DeLong (ver Figura 2.4).

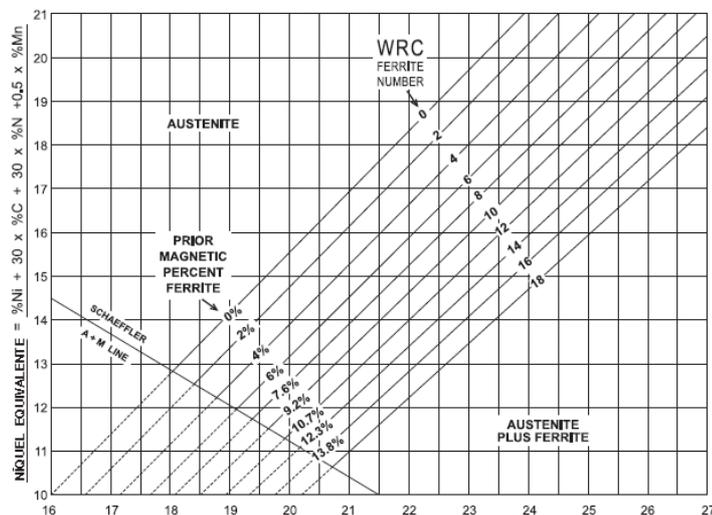


Figura 2.4 DeLong (FN) Diagrama para Aceros Inoxidables Soldados (Echeverría et al., 2010)

2.2.7 Soldadura de aceros inoxidables

Las propiedades de los aceros inoxidables difieren considerablemente de las de los aceros al carbono. Esto requiere una revisión detallada de sus características, fenómenos a los cuales están expuestos al someterlos a una fuente de calor y procesos de soldadura, para finalmente llegar a algunas recomendaciones prácticas que ayuden a soldadores e ingenieros de materiales a obtener soldaduras satisfactorias.

Como todas las soldaduras, los depósitos de acero inoxidable varían en calidad de acuerdo con la experiencia y calidad del soldador. Sin embargo no

es posible permitir soldaduras de segunda calidad tratándose de aceros inoxidables, no sólo por el alto costo de estas aleaciones sino que también porque la mayoría de las aplicaciones de los inoxidables son tan críticas que una soldadura de buena calidad es absolutamente esencial.

- Calidad del Metal Base y de Aporte

Los materiales base y metales de aporte deben cumplir con ciertos estándar de calidad especificados por normas tales como AWS, AISI, ASME y MIL-E-22200/2A. La utilización de materiales de baja calidad puede generar defectos que deberán repararse posteriormente o una vida útil reducida.

- Inspección de Soldaduras

Las soldaduras de un Acero Inoxidable deberán ser ensayadas por Gammagrafía o ultrasonido para asegurar la calidad de la unión. Para obtener una buena radiografía la superficie de la soldadura debe estar libre de irregularidades. Debe removerse toda contaminación.

- Diseño de la Unión

Una junta muy angosta dificulta el acceso del material de aporte y la remoción de escoria. Una junta muy ancha requiere mucho material de aporte lo cual aumenta el costo de la soldadura. Salvo indicación contraria y aplicaciones específicas, se recomienda mantener una separación de raíz igual al diámetro del electrodo y un ángulo de la unión de 60° para biseles en "V".

- Forma del Cordón de Soldadura

Se recomiendan cordones levemente convexos. Cordones cuya sección sea excesivamente convexa pueden ir acompañados de poca penetración e inclusiones. Las inclusiones de escoria pueden causar que la soldadura falle en el ensayo de doblado. Se recomiendan cordones con perfiles lisos para

facilitar la remoción de escoria. El ancho del cordón no deberá ser de más de 2,5 veces el diámetro del electrodo. (Núñez et al., 2010)

2.2.8 Sistema TIG

En nuestros días, las exigencias tecnológicas en cuanto a calidad y confiabilidad de las uniones soldadas, obligan a adoptar nuevos sistemas, destacándose entre ellos la soldadura al Arco con Electrodo de Tungsteno y Protección Gaseosa.

El sistema TIG es un sistema de soldadura al arco con protección gaseosa, que utiliza el intenso calor de un arco eléctrico generado entre un electrodo de tungsteno no consumible y la pieza a soldar, donde puede o no utilizarse metal de aporte. Se utiliza un gas de protección cuyo objetivo es desplazar el aire, para eliminar la posibilidad de contaminación de la soldadura por el oxígeno y nitrógeno presentes en la atmósfera.

Como gas protector se puede emplear argón o helio, o una mezcla de ambos.

La característica más importante que ofrece este sistema es entregar alta calidad de soldadura en todos los metales, incluyendo aquellos difíciles de soldar, como también para soldar metales de espesores delgados y para depositar cordones de raíz en unión de cañerías. Las soldaduras hechas con el sistema TIG son más fuertes, más resistentes a la corrosión y más dúctiles que las realizadas con electrodos convencionales. Cuando se necesita alta calidad y mayores requerimientos de terminación, se hace necesario utilizar el sistema TIG para lograr soldaduras homogéneas, de buena apariencia y con un acabado completamente liso. En la Figura 2.5 se indica esquemáticamente una soldadura por sistema TIG.

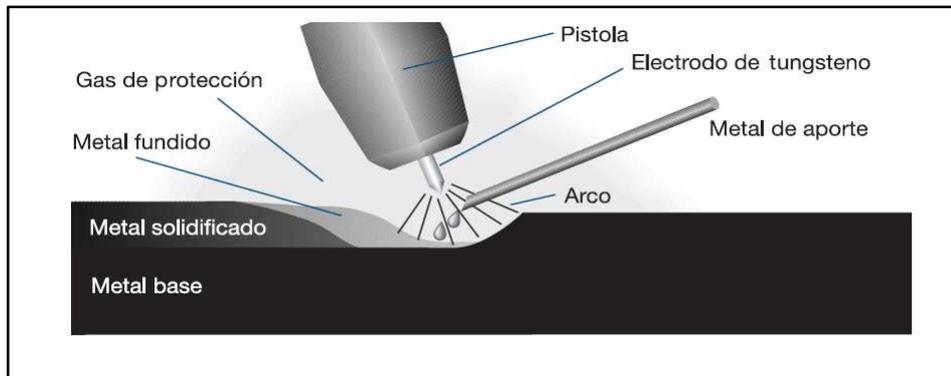


Figura 2.5 Ilustración esquemática de soldadura TIG (Echeverría et al., 2010)

- Electrodo para Sistema TIG

Los electrodos para sistema TIG, están fabricados con tungsteno o aleaciones de tungsteno, lo que los hacen prácticamente no consumibles, ya que su punto de fusión es sobre los 3.800°C. Su identificación se realiza por el color de su extremo:

Tabla 2.1 Identificación de electrodos (Echeverría., 2007)

Tipos de electrodos	Identificación	AWS
• Electrodo de Tungsteno puro	Punto verde	EWP
• Electrodo de Tungsteno-Torio (0,8-1,2% Th)	Punto amarillo	EWTh-1
• Electrodo de Tungsteno-Torio (1,7-2,2% Th)	Punto rojo	EWTh-2
• Electrodo de Tungsteno-Zirconio (0,15-0,4% Zr)	Punto café	EWZr
• Electrodo de Tungsteno-Lantano (1,0% La)	Punto negro	EWLa-1
• Electrodo de Tungsteno-Lantano (1,5% La)	Punto dorado	EWLa-1,5
• Electrodo de Tungsteno-Lantano (2,0% La)	Punto azul	EWLa-2
• Electrodo de Tungsteno-Cerio (1,8-2,2% Ce)	Punto naranja	EWCe-2

Diámetros más utilizados: 1,6 mm; 2,4 mm; 3,2 mm.

Largos estándar: 76 y 178 mm.

La adición de 2% de torio permite una mayor capacidad de corriente, mejor iniciación y estabilidad del arco.

Tabla 2.2 Selección de electrodos (Echeverría., 2007)

Material	Tipo de corriente	Penetración	Gas	Electrodo
Aluminio	CAAF	Media	Argón	W
Acero inox.	CCEN	Alta	Argón	W-Th
Acero dulce	CCEN	Alta	Argón o Helio	W-Th
Cobre	CCEN	Alta	Argón o Helio	W-Th
Níquel	CCEN	Alta	Argón	W-Th
Magnesio	CAAF	Media	Argón	W

Nota: CAAF : Corriente Alternada y Alta Frecuencia W : Tungsteno
 CCEN : Corriente Continua, Electrodo Negativo W-Th : Tungsteno-Torio

- Gas de protección argón

El argón se obtiene como un subproducto en la fabricación del oxígeno. Al seleccionar un gas protector, un hecho que debe ser considerado es la ionización potencial del gas. El potencial de la ionización es moderado en voltios y es el punto donde el arco de la soldadura se establecerá entre el electrodo y la pieza a soldar a través del gas protector. La ionización potencial de argón es 15,7 voltios. Así que éste es el voltaje mínimo que debe mantenerse en el circuito de la soldadura al establecer el arco para soldadura con argón.

El argón tiene una baja conductividad térmica lo que significa que no es buen conductor de calor. Esto produce un arco de densidad más compacto, superior. La densidad del arco se refiere a la concentración de energía en el arco. Con argón esta energía se confina a un área estrecha o con más precisión. El argón proporciona excelente estabilidad al arco y un efecto limpio incluso a bajos amperajes (Lozano., 2000)

- Equipo para realizar soldadura TIG (Figura 2.6).

El equipo para sistema TIG consta básicamente de:

- Fuente de poder
- Unidad de alta frecuencia
- Pistola
- Suministro gas de protección

- Suministro agua de enfriamiento.

La pistola asegura el electrodo de tungsteno que conduce la corriente, el que está rodeado por una boquilla de cerámica que hace fluir concéntricamente el gas protector.

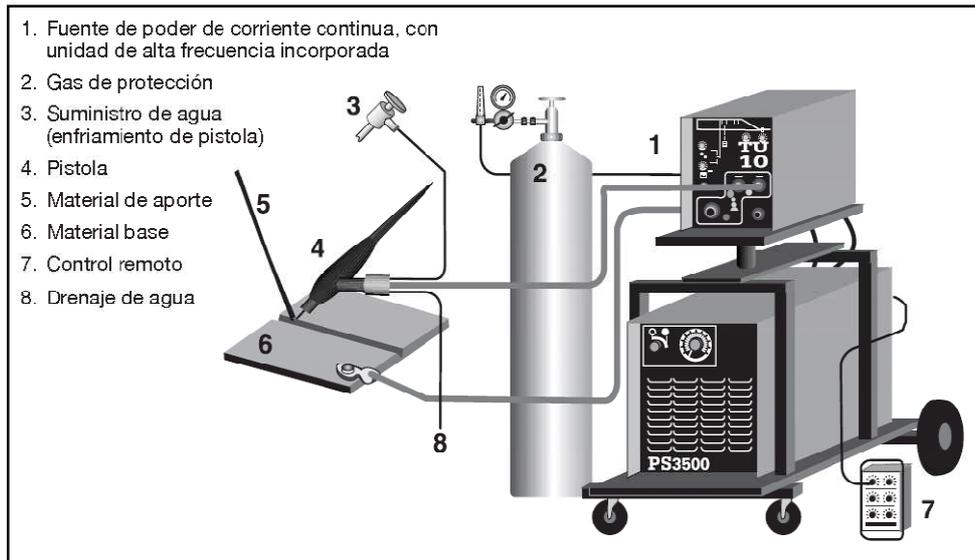


Figura 2.6 Diagrama esquemático del equipo TIG (Echeverría., 2007)

2.2.9 Ensayos Mecánicos.

- Ensayo de Tracción

El ensayo de tracción es uno de los ensayos más utilizados para determinar la relación existente entre los esfuerzos y las deformaciones en un material que es deformado debido a una carga uniaxial.

La figura 2.7(a) muestra un montaje de un ensayo de tracción, y la figura 2.7 (b) y 2.7(c) muestran una probeta típica utilizada durante los ensayos de tracción y un espécimen luego de la rotura respectivamente.

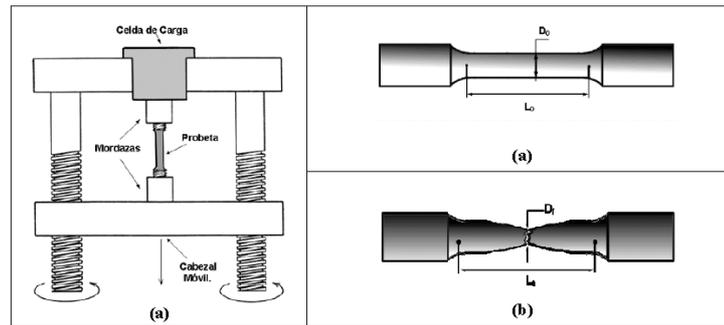


Figura 2.7: (a) Montaje de la probeta. (b) Probeta de ensayo antes de la rotura. (c) Después de la rotura (Mielnik., 1991).

- *Curva Esfuerzo – Deformación Ingenieril.*

Del ensayo de tracción se obtiene la curva carga – alargamiento, a partir de la cual se obtiene la curva esfuerzo – deformación ingenieril (Figura 2.8), la cual se define a partir de la sección transversal original del espécimen de prueba y de su longitud inicial como lo indican las ecuaciones 2.1. y 2.2

$$S = \frac{F}{A_0} \quad (2.1)$$

$$e = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (2.2)$$

Donde S (MPa) es el esfuerzo ingenieril, F (N) es la carga aplicada en el ensayo, A_0 (mm^2) es el área de la sección transversal inicial de la muestra, e (mm) la deformación ingenieril, L (mm) es la longitud entre marcas calibradas instantánea y L_0 (mm) la longitud inicial entre marcas calibradas de la muestra.

Existen dos zonas de diferente comportamiento en una curva esfuerzo – deformación:

Zona Elástica: El esfuerzo es lineal a la deformación, y el material recobra su longitud inicial si se libera de carga. El comportamiento se rige por la Ley de Hooke.

$$S = E \cdot e \quad (2.3)$$

Donde E (MPa) es el módulo de elasticidad del material, el cual es una constante de proporcionalidad cuyo valor depende del material y es la pendiente de dicho comportamiento lineal.

Zona Plástica: En esta zona no existe proporcionalidad entre los esfuerzos y las deformaciones, debido a que el material se deforma permanentemente, experimentándose un endurecimiento por deformación. La transición elasto – plástica está marcada por el punto de fluencia. El esfuerzo para el cual ocurre la deformación permanente del material se conoce como resistencia a la fluencia (S_y), y es un valor característico del material.

El esfuerzo de fluencia puede identificarse en la curva por el cambio en la pendiente, al final de la región lineal, pero existen materiales en los que no se pueden detectar fácilmente; entonces se define como el “esfuerzo que produce una desviación del 0.2% con respecto a la línea recta”. Según la norma ASTM, se conoce como Método Offset para determinar el esfuerzo de fluencia en materiales dúctiles. Esto se ilustra en la Figura 2.8.

Posteriormente el material continúa deformándose e incrementando la carga; esta elongación del material va acompañada de una reducción uniforme del área, debido a que el volumen permanece constante. La máxima carga alcanzada durante el ensayo, dividida por el área inicial del espécimen de prueba, recibe el nombre de resistencia a la tracción o resistencia última del material (S_u).

La ductilidad es la capacidad de un material para deformarse plásticamente sin fracturarse, y se puede expresar en función del incremento en la longitud o de la reducción en el área.

$$\% \text{Alargamiento} = \frac{L_f - L_o}{L_o} \times 100 \quad (2.4)$$

$$\% \text{Reduccion de Área} = \frac{A_o - A_f}{A_o} \times 100 \quad (2.5)$$

Donde L_f (mm) es la longitud final entre marcas calibradas y A_f (mm²) es el área de la sección transversal final de la muestra.

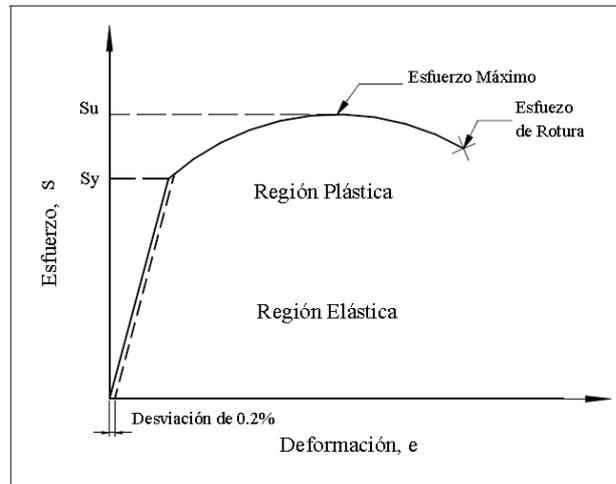


Figura 2.8: Curva esfuerzo vs deformación ingenieril para un material metálico (Mielnik., 1991).

La energía absorbida por el material antes de su rotura se conoce como tenacidad, mientras que la energía absorbida por el material durante la deformación elástica se denomina resiliencia del material.

Es importante señalar que luego del punto máximo de carga, la variación de la longitud deja de ser uniforme, debido a que comienza la formación de cuello en la muestra de ensayo; esto hace que el resto de la muestra mantenga la longitud y solo exista alargamiento de la zona de cuello, además de ser esta última una zona de inestabilidad plástica. Por esta razón se recomienda a partir del punto máximo, estimar la deformación en función de la sección transversal. (Mielnik., 1991).

- *Curva Esfuerzo – Deformación Verdadera.*

La curva esfuerzo – deformación ingenieril, no considera la variación que se va generando en el área de la sección transversal de la probeta. La curva esfuerzo – deformación real, la cual considera tanto el cambio en la sección transversal como en la deformación infinitesimal. La deformación y el esfuerzo real se determinan a través de las relaciones 2.6 y 2.7:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.6)$$

$$\varepsilon = \ln \frac{L}{L_0} = \ln \frac{A_0}{A} \quad (2.7)$$

Donde A (mm^2) es el área instantánea, ε (mm/mm) es la deformación real o logarítmica y σ (MPa) es el esfuerzo real.

La diferencia entre ambas curvas radica en que los valores de esfuerzos son más altos en la región plástica por considerar en los cálculos las áreas instantáneas, las cuales van disminuyendo, desplazando la curva hacia arriba; además la deformación logarítmica es menor a la ingenieril y genera un desplazamiento en la curva hacia la izquierda. Las deformaciones logarítmicas presentan la propiedad de ser sumativas, a diferencia de las ingenieriles.

$$\varepsilon_{02} = \varepsilon_{01} + \varepsilon_{12} \quad (2.8)$$

La curva esfuerzo – deformación ingenieril puede relacionarse con la curva real mediante las siguientes ecuaciones:

$$\sigma = S(1 + e) \quad (2.9)$$

$$\varepsilon = \ln(1 + e) \quad (2.10)$$

Estas ecuaciones son válidas solo hasta el punto máximo, debido a que luego de este punto el material entra en una etapa de inestabilidad plástica, y la variación de longitud no es uniforme, por lo que las ecuaciones 2.9 y 2.10 no predicen el comportamiento real del material después de carga máxima. Es por esto que se recomienda medir la sección transversal a final del ensayo, determinar con este valor el esfuerzo real de ruptura (σ_u), y denotar solo este punto sobre la curva real después del punto máximo.

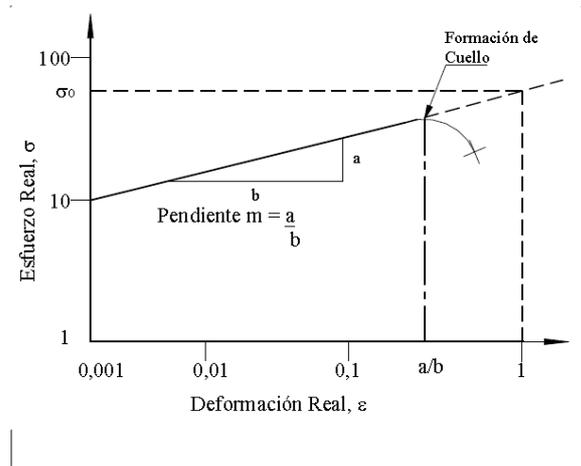


Figura 2.9: Curva esfuerzo vs deformación verdadera en escala log – log (Mielnik., 1991).

Conforme el esfuerzo aumenta el material se vuelve más resistente, debido al endurecimiento por deformación experimentado. Este comportamiento plástico del material a partir del esfuerzo de fluencia, si se lleva a una escala log-log, el resultado podría ser una relación lineal como lo muestra la Figura 2.9. Este comportamiento se puede representar mediante la ecuación 2.11 denominada Ecuación de Fluencia o Ley de Hollomon.

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \varepsilon^m \quad (2.11)$$

A σ_0 se le conoce como coeficiente de resistencia, y es el esfuerzo para una deformación verdadera igual a 1. Al parámetro “ m ” se le llama coeficiente de endurecimiento por deformación y es la pendiente de la línea recta obtenida en escala log-log.

Para obtener el esfuerzo real y la deformación ingenieril es necesario poseer un dispositivo que permita medir instantáneamente, el área y la longitud entre marcas calibradas, este dispositivo se conoce como extensómetro.

En resumen, el comportamiento de un material metálico en la zona elástica puede definirse mediante la Ley de Hooke según la ecuación 2.3 y en la zona plástica mediante la Ecuación de Fluencia según 2.11. (Mielnik, 1991)

- Ensayo de Doblado

El proceso de doblado se refiere a la deformación de una chapa alrededor de un eje recto, como lo muestra la Figura 2.10. Durante la operación el metal es sometido a un momento flector, lo cual genera un estado de tensión de compresión en el lado interno del doblado y una tracción en el lado externo. La zona de transición en la cual no existe deformación, se conoce como *plano neutro*.

El doblado de los metales ocasiona una deformación plástica con respecto al eje lineal, y produce poco o ningún cambio lineal en el área superficial. Cuando la deformación es muy pequeña – inferior a 0,25 – el plano neutro equidista de los extremos de la lámina deformada, como lo indica la Figura 2.10, pero por lo general estas deformaciones son superiores y el plano neutro se desplaza hacia la zona de compresión, debido a que el esfuerzo de fluencia de los metales sometidos a compresión es ligeramente mayor que a tracción y esto hace que se abulte el lado interior del doblado, mientras que el lado exterior sujeto a tracción se adelgaza. (Groover, 2007).

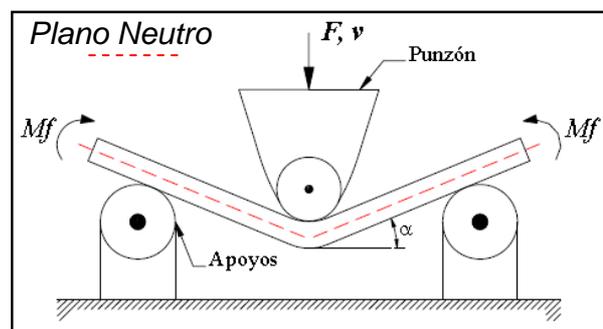


Figura 2.10: Esquema de montaje de un dispositivo de doblado. (Groover, 2007)

- Ensayo de Dureza Vickers

Se emplea como cuerpo de penetración una pirámide cuadrangular de diamante. La huella vista desde arriba es un cuadrado. Este procedimiento es apropiado para aceros nitrurados y cementados en su capa externa, así como para piezas de paredes delgadas de acero o metales no férreos.

La dureza Vickers (HV) se calcula partiendo de la fuerza en Newton y de la diagonal en mm² de la huella de la pirámide según la fórmula:

$$HV = 1,8544 \cdot \frac{P}{d^2} \quad (2.12)$$

P: carga aplicada en N

d: Diagonal media de la huella en mm.

La diagonal (*d*) es el valor medio de las diagonales de la huella (*d*₁) y (*d*₂).

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (2.13)$$

Este ensayo, se basa en el principio de calcular el valor de dureza relacionando la fuerza de aplicación sobre la superficie de la impresión en el material. Lo hemos simplificado utilizando en este caso el valor de la longitud de la diagonal.

Los valores de las cargas más usados van desde 1 a 120 Kg.

Numero de dureza Vickers

Existen tres tipos de ensayo de dureza Vickers caracterizados por diferentes intervalos de fuerzas de ensayo.

Tabla 2.3 Designación de dureza Vickers.

Designación	Símbolo de Dureza	Carga nominal de ensayo F (N)
Ensayo de dureza Vickers	HV 5 a HV 100	49,03 a 980,7
Ensayo de dureza de baja carga	HV 0,2 < HV 5	1,961 a 49,03
Ensayo de Microdureza Vickers	< HV 0,2	< 1,961

Designación

El número de dureza Vickers es seguido por las siglas HV con un primer sufijo convencional y un segundo sufijo que indica el tiempo de aplicación de la carga, cuando este último difiere del tiempo normal, el cual es de 10 a 15 segundos.

Las pruebas de dureza

Vickers se efectúan con cargas desde 1,96 N hasta 980,7 N. En la práctica, el número de dureza Vickers se mantiene constante para cargas usadas de 49 N o mayores. Para cargas menores el número de dureza varía dependiendo de la carga aplicada. A continuación indicamos los números de dureza Vickers para cargas de prueba de 9,8 N. (Groover, 2007).

CAPÍTULO III

Marco Metodológico

En el apartado próximo se definen las técnicas y métodos que fueron necesarios para ejecutar la investigación y cumplir con los objetivos fijados previamente, dichas técnicas se establecieron dependiendo del tipo de investigación que se realiza. El método científico guía esta selección, en fin de aclarar y generar fácilmente respuestas a la situación problemática que se presenta, además de ello permite organizar y definir las etapas a cumplir a lo largo de la investigación así como proporciona un vasto conocimiento sobre el tema de estudio. Para ello se llevo a cabo la metodología mostrada en la figura 3.1.

3.1 Tipo y nivel de la investigación.

El tipo de investigación que se realizó tiene una finalidad aplicada debido a que aporta beneficios y comprensión en un área en específico, y su tipo de investigación fue carácter experimental ya que el estudio se realizó mediante observaciones, registro y análisis de variables. El nivel de la investigación fue descriptivo debido a que se realizó sistemáticamente, además de ser también explicativa ya que se responden las causas del evento estudiado. (Tamayo., 2003)

3.2 Población y Muestra.

La población para la cual son válidas las conclusiones referentes al presente trabajo de investigación está constituida por acero inoxidable dúplex SAF 2507 y acero inoxidable 316L

3.3 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.

Los diversos métodos referentes a la recolección de datos dependen en mayor medida del tipo de investigación a desarrollar, gran parte de la información aportada por diversos medios es tanto numérica, como visual, por lo que se aplican las normas apropiadas para cada contenido. En el caso particular de la investigación presente, la adquisición o pesquisas de información se llevó a cabo por medio de técnicas o procedimientos variados como lo es la observación directa y data de los ensayos de tracción y ensayo de doblado, análisis documental de los resultados obtenidos en evaluación de la microscopía óptica y dureza Vickers. Esta información es recopilada en gráficos, tablas, fotografías y formatos preestablecidos según las normas ASTM E8, ASTM E92, ASTM E190, ASTM E3 y ASTM E407 para los demás ensayos.

Con relación a los instrumentos utilizados para la recolección de datos, se encuentran; equipos, en donde se realizan los ensayos de propiedades mecánicas en las cuales se puede conseguir o no la presencia de recolectores de data electrónicos dependiendo de la prueba correspondiente, tablas de recolección de datos, equipos audiovisuales, medidores de diversa índole, entre otros. Cabe destacar que dichas técnicas e instrumentos serán detalladas en apartados posteriores.

3.4 Técnica de procesamiento de datos.

Al obtener de manera precisa y total los datos necesarios, adecuados a las necesidades del proyecto de investigación, estos fueron ordenados, y

concretados en tablas, gráficos e imágenes donde se indica su proveniencia, función, y otros datos importantes individuales de cada resultado, en fin de facilitar su procesamiento.

El procesamiento y análisis de estos, se estableció de acuerdo a las normas ya referidas para cada ensayo o prueba realizada ASTM E8, ASTM E92, ASTM E190, ASTM E3 y ASTM E407, para las pruebas que traten sobre características de resistencia mecánica. Dichas normas recomiendan parámetros y guías; tanto matemáticas que incluyen cálculos y cómputos, como prácticas que tratan sobre la comparación de imágenes, entre otros, alcanzado así resultados finales genéricos, que fueron comparados con otros ensayos similares y sirvieron para el estudio y comparación de los datos obtenidos.

3.5 Adquisición del Material Estudiado.

Se adquirió láminas de 12 mm de espesor de acero Dúplex SAF 2507 y láminas de acero inoxidable 316L 6mm de espesor, suministrado por la empresa Industrias Acero Placencia C.A. cuya composición química de los materiales fue suministrada por la misma y se muestra en las tablas 3.1 y 3.2:

3.6 Procedimiento de Soldadura.

Inicialmente se debió llevar el material suministrado al espesor deseado por la investigación, para ello se sometieron las laminas a un proceso de limado, usando una herramienta de acero rápido, donde se redujo el espesor de las laminas a 3mm.

Posteriormente se alinearon las láminas de forma intercalada para realizar una unión a tope. Figura 3.2.

Los parámetros utilizados en la soldadura se seleccionaron según recomendaciones de la norma AWS D1.6, y mediante los resultados arrojados

en pruebas piloto en el material de muestra, para el procedimiento de soldadura al arco con protección gaseosa (TIG). La soldadura TIG fue llevada a cabo por un soldador calificado por la SAS.



Figura 3.1 Etapas de la metodología.

Tabla 3.1 Composición química del Acero Dúplex SAF 2507. (Industrias Acero Placencia C.A.)

Cr (%)	Mo (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Ni (%)	N (%)	C (%)	Cu (%)
25,15	3,91	0,33	0,77	0,017	0,0006	6,96	0,282	0,014	0,11

Tabla 3.2 Composición química del Acero Inoxidable 316L (Industrias Acero Placencia C.A.)

Cr (%)	Mo (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Ni (%)	C (%)
16-18	2-2,5	0,1	2,00	0,045	0,015	10-13	0,03

Tabla 3.3 Parámetros de soldadura.

VARIABLES.	CONDICIÓN DE TRABAJO.
Intensidad de corriente (A)	80, 90, 100
Tipo de corriente	CCEN
Velocidad de avance prom. (mm/min)	100
Tipo de electrodo.	Tungsteno-Torio (W-Th)
Gas de protección.	Argón.

La velocidad de avance, aunque sea un proceso manual, se consideró ya que es importante para el mismo. Durante el proceso de soldadura, se tomó el tiempo en el cual el soldador tardó en realizar un cordón. Conociendo que la velocidad es la relación de la distancia entre el tiempo en que se recorre esa distancia, se calculó de forma sencilla el valor de velocidad, el cual se refleja en la Tabla 3.3, como el promedio de todos los cordones realizados en la investigación.

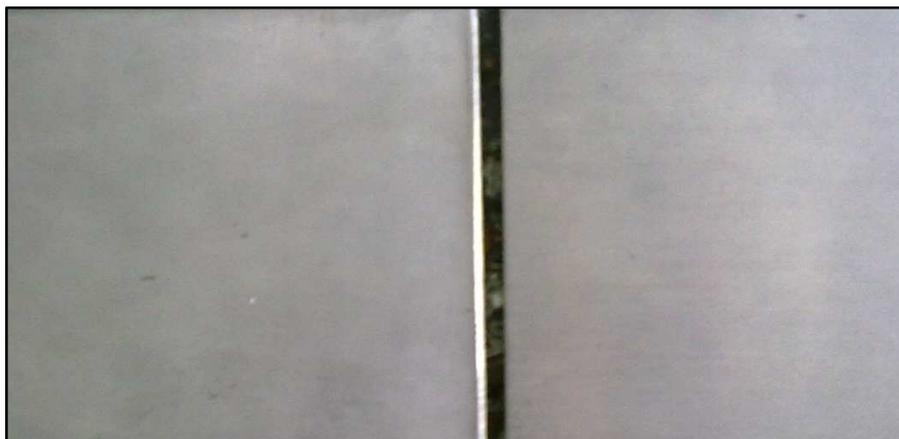


Figura 3.2 Tipo de unión en la soldadura.

La soldadura a realizar se llevó a cabo en láminas de 3 mm de espesor de acero dúplex SAF 2507 y acero inoxidable 316L, en unión a tope por ambas caras de las láminas.

Tabla 3.4 Cantidad y condición de probetas soldadas.

CANTIDAD DE PROBETAS	CONDICIÓN.
8	Soldada a 80 Amperios
8	Soldada a 90 Amperios
8	Soldada a 100 Amperios

3.7 Preparación y Mecanizado de las Muestras Ensayadas.

Según el material suministrado se procedió a la elaboración de veinticuatro (24) probetas de ensayo, de las cuales doce (12) fueron destinadas al ensayo de tracción y el resto para ensayo de doblado, de manera de tener cuatro (4) probetas de cada intensidad para ambos ensayos. De las probetas de doblado fue tomada una (1) de cada intensidad para realizar el ensayo de microdureza y posteriormente estas mismas se utilizaron para realizar la microscopía.

El corte de las probetas se realizó en Guadagnini C.A. (Ver Figura 3. Apéndice), por chorro de agua. La forma y dimensiones de las probetas para el ensayo de tracción están normalizadas según ASTM E8, las cuales se presentan en la Tabla 3.5.

De acuerdo a lo anterior, las dimensiones de las probetas planas que se utilizaron fueron las pertenecientes a la tipo Sub Tamaño.

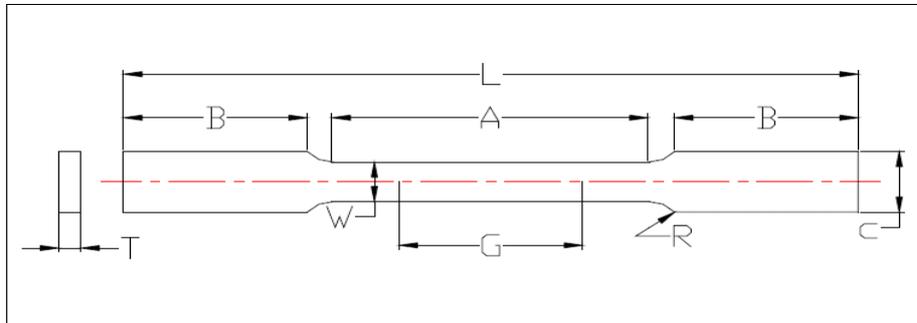


Figura 3.3 Probeta plana. (Fuente Norma ASTM E8)

Tabla 3.5 Dimensiones de probetas planas. (Fuente Norma ASTM E8)

Nomenclatura	Dimensiones		
	Especímenes Estándar		Sub Tamaño (in)
	Tipo Placa (in)	Tipo Hoja (in)	
G – Longitud calibrada	8,00 ± 0.01	2,000 ± 0,005	1,000 ± 0,003
W – Ancho	1 ½ + 1/8, - ¼	0,500 ± 0,010	0,250 ± 0,005
T – Espesor	----	Espesor del material	----
R – Radio del filete	1	½	¼
L – longitud total	18	8	4
A – Longitud de la sección reducida	9	2 ¼	1 ¼
B – Longitud dentro de mordazas	3	2	1 ¼
C – Ancho dentro de mordazas	2	¾	3/8

3.8 Ensayo de Tracción

La finalidad de este ensayo fue evaluar el comportamiento del material en sus diferentes condiciones a fuerza de tensión uniaxial. Para este estudio se utilizaron cuatro (4) probetas para cada valor de intensidad de corriente, ya que la norma ASTM E8 establece un mínimo de tres (3) y se tomó una (1) más si acaso ocurre una eventualidad, totalizando la cantidad de doce (12). Se utilizó una velocidad de 2mm/min y la misma se fue incrementando durante el ensayo hasta el valor de 10mm/min para mantener el equilibrio en toda la sección transversal.

a) Materiales y equipos utilizados.

- *Máquina de ensayos:* Para la realización de este ensayo se utilizó una máquina universal, Marca Galdabini, 20 TON de capacidad, controlada por computadora. Dicha máquina debe tener las especificaciones según la norma ASTM E8.
- *Dispositivos de agarre:* se usaron mordazas de agarre para asegurar una buena transmisión de la fuerza aplicada por la máquina a la probeta. Para el caso de las probetas en estudio se utilizaron mordazas.
- *Sistema computarizado para recolección de data.*
- *Instrumentos de medición:* vernier Marca Mitutoyo 0,05mm de apreciación y un rango 0-150mm para medición de dimensiones lineales.

b) Procedimiento.

Se determinó el área de sección transversal de la probeta: Esto se logró midiendo las dimensiones que conforman la sección transversal de la probeta

en el centro del área reducida. Luego se marcaron los límites o distancia calibrada de la probeta. El marcado se realizó mediante el uso de tinta y ya fue indicado en la Figura 3.3.

Seguido a lo anterior se encendió la máquina de ensayos Galdabini, siguiendo el procedimiento establecido por el Laboratorio de Materiales de la Universidad de Carabobo. En donde se colocaron las probetas en las mordazas del equipo, se ajustó la velocidad de ensayo y carga máxima durante el ensayo.

c) Determinación de variables.

Al realizar el ensayo de tracción a las probetas, se obtuvieron los gráficos de Carga vs. Alargamiento y a partir de ellas se construyeron las gráficas Esfuerzo vs. Deformación. Para calcular el esfuerzo a partir de la carga, se utilizó la ecuación 2.1. A su vez, para calcular la deformación a partir del alargamiento, se utilizó la ecuación 2.2.

De la gráfica Esfuerzo vs. Deformación se obtuvo una serie de propiedades mecánicas importantes para entender el comportamiento del material, entre ellas se encuentran: esfuerzo de fluencia, esfuerzo máximo, esfuerzo de ruptura, porcentaje de elongación, porcentaje de reducción de área y coeficiente de endurecimiento. Mediante la realización de este ensayo fue posible determinar los parámetros de resistencia a la tracción para cada una de las intensidades de corriente utilizadas en las uniones soldadas.

A partir de los valores obtenidos de las Ecuaciones 2.1 y 2.2 se pudo determinar el Esfuerzo y la Deformación real del ensayo mediante las ecuaciones 2.9 y 2.10.

3.8.1 Esfuerzo de fluencia.

Debido a que no hay punto definido en la curva de Esfuerzo vs. Deformación, en donde se aprecie la finalización de la deformación elástica y el inicio de la deformación plástica se eligió el método del "offset" tomando la distancia más común, que es de 0,2% de deformación plástica. El procedimiento a seguir fue dibujar una línea paralela a la parte elástica (lineal) de la gráfica definida como OA y luego se trazó una paralela a esta a un 0,2% de la deformación total, entonces el punto donde esta línea se intercepta con la parte superior de la gráfica, indicó el esfuerzo de fluencia del material. Este procedimiento se muestra en la Figura 3.4.

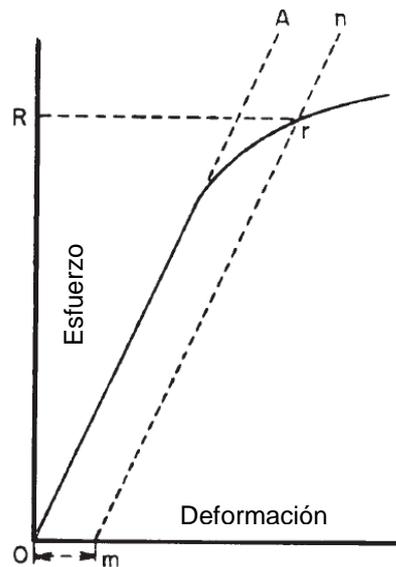


Figura 3.4 Método "offset" (Mielnik., 1991).

3.8.2 Esfuerzo máximo.

Para calcular el esfuerzo máximo se dividió la fuerza máxima obtenida entre el área de sección transversal inicial, de la siguiente manera:

$$\sigma_{\text{máx}} = \frac{F_{\text{máx}}}{A_0} \quad (3.1)$$

De donde:

$\sigma_{\text{máx}}$ = Esfuerzo máximo (MPa)

$F_{\text{máx}}$ = Fuerza uniaxial máxima aplicada a la probeta en la tracción (N)

A_o = Área original de la sección transversal de la probeta (mm^2).

3.8.3 Esfuerzo de ruptura.

Para calcular el esfuerzo de ruptura se dividió la fuerza de ruptura obtenida entre el área de sección transversal inicial, de la siguiente manera:

$$\sigma_u = \frac{F_u}{A_o} \quad (3.2)$$

De donde:

σ_u = Esfuerzo de ruptura (MPa)

F_u = Fuerza uniaxial máxima aplicada a la probeta en la tracción (N)

A_o = Área original de la sección transversal de la probeta (mm^2)

3.8.4 Porcentaje de elongación.

La cantidad de elongación que presentaron las muestras bajo tensión durante los ensayo proporcionaron los valores de la ductilidad de los metales, y para este cálculo se aplica la ecuación 2.4.



Figura 3.5 Equipo para ensayo de tracción. Galdabini. Capacidad: 20 TON

3.9 Ensayo de doblado.

Los ensayos de doblado se realizaron para completar la información relacionada con las propiedades mecánicas del material y estudiar el comportamiento de la junta soldada bajo esta condición. Para este estudio se utilizaron cuatro (4) probetas para cada valor de intensidad de corriente, ya que la norma ASTM E190 establece un mínimo de tres (3) y se tomó una (1) más si acaso ocurre una eventualidad, totalizando la cantidad de doce (12). Las dimensiones de las probetas ensayadas se presentan en la Figura 3.6.

a) Materiales y equipos utilizados.

- Máquina de ensayos: Para la realización de este ensayo se utilizó una máquina universal, Marca Galdabini, 20 TON de capacidad, (Figura 3.5) controlada por computadora.
- Punzón para doblado: Se utilizó un punzón de un diámetro de 18 mm, determinado según la norma ASTM E190.
- Rodillos o apoyos: Los apoyos utilizados fueron dispuestos a una distancia de separación de 46 mm, determinada según la norma ASTM E190.
- Sistema computarizado para recolección de data.
- Instrumentos de medición: vernier Marca Mitutoyo 0,05mm de apreciación, rango 0-150mm para medición de dimensiones lineales.

Se determinó la distancia de separación entre los apoyos para el ensayo de doblado, según lo establecido en la norma ASTM E190. Posteriormente se colocaron las probetas a ensayar en forma horizontal sobre los apoyos, siguiendo la disposición mostrada en la norma ASTM E190 (Figura 3.7),

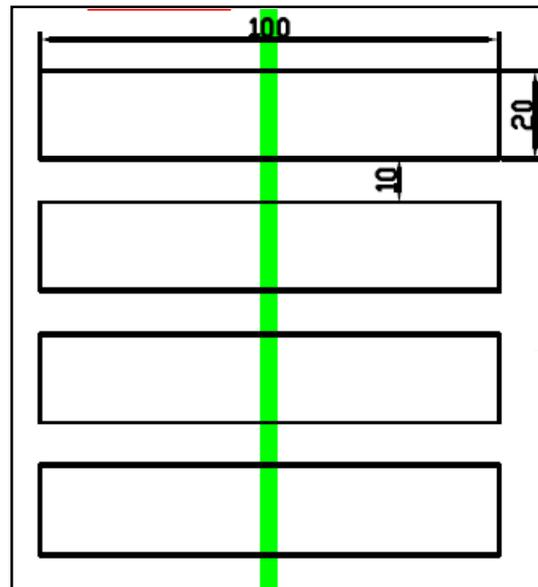
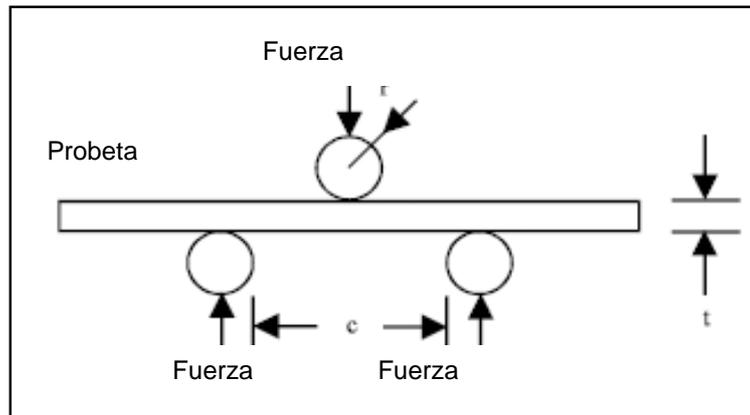


Figura 3.6 Dimensiones probetas de Doblado. Unidades en mm

b) Procedimiento.

garantizando que el cordón de soldadura quedara ubicado en el centro de la separación entre estos, fue necesario medir con el vernier para garantizar dicha condición. Para llevar a cabo cada uno de los ensayos se colocó el punzón y se bajó la máquina de ensayo hasta que el punzón tocara ligeramente la probeta posicionada para el ensayo, este paso amerita de gran cuidado ya que se debe garantizar que no exista precarga aplicada a la probeta. Realizado lo anterior se introdujeron los parámetros del ensayo en el software controlador del equipo de ensayo universal, según lo establecido en la norma ASTM E190. Posteriormente se puso en marcha la máquina de manera de ejecutar el ensayo. Cada uno de los ensayos realizados fue culminado en el momento en que las probetas fueron dobladas hasta presentar forma de “U”, según lo establecido en la norma ASTM 190.

El ensayo de doblado fue utilizado para evaluar la calidad de la soldadura en función de la ductilidad, quedando como evidencia la resistencia a la rotura durante el doblado.



$$C = 2r + 3t \pm t/2 \quad (3.3)$$

C = Distancia entre los apoyos.
r = radio del punzón.
t = espesor de la muestra a ensayar.

Figura 3.7 Esquema del ensayo de doblado según la norma ASTM E190

3.10 Estudio Metalográfico.

La metalografía microscópica de los materiales se realizó con el fin de revelar las estructuras y constituyentes de los metales para así evaluar las propiedades del material de estudio. Para este estudio se utilizó una (1) probeta para cada intensidad, siendo un total de tres (3) probetas preparadas previamente según las especificaciones de las normas ASTM E3 y ASTM E407.

a) Materiales y equipos utilizados.

- Desbastadora de cinta.
- Lijas con tamaño de grano 240, 320, 400 y 600.
- Pulidora Buehler para pulido fino y grueso.
- Paño de pulido grueso marca Buehler, modelo Billard, color verde.

- Paño de pulido fino marca Buehler, modelo Microcloth, color marrón.
- Alúmina gruesa, marca Buehler, modelo Masterpolish.
- Alumina fina, marca Buehler, modelo Micropolish.
- Microscopio óptico, marca Unión. Aumento: 100X, 200X, 400X y 1000X (Figura 3.8)
- Pinzas, Ethanol, guantes, secador.
- Reactivo de Acido Oxálico al 10% (para el acero 316L), según lo recomendado por la norma ASTM E407-99.
- Reactivo de Bisulfito de Sodio (para el acero Dúplex y la zona de fusión), según lo establecido por la norma ASTM E407-93.
- Máquina de pulido/ataque electrolítico, marca Buehler, Modelo Electromet.

b) Procedimiento.

En primer lugar se realizó el desbaste grueso con la desbastadora de cinta, aplicado por una de las caras laterales de cada probeta, directamente sobre ambos materiales base y la zona de fusión del cordón, se continuó el proceso de desbaste de manera manual utilizando las lijas comenzando por las de grano 240 y posterior a este se prosiguió con el desbaste fino con las lijas de grano 320, 400 y 600 finalmente. Posteriormente se llevaron las muestras ya desbastadas al banco de pulido, en donde se realizó un pulido grueso y un pulido fino, utilizando alúmina gruesa y fina respectivamente. Una vez culminado el proceso de pulido se procedió a aplicar el ataque químico. Para las zonas del acero Dúplex y la zona de fusión se utilizó como reactivo el Bisulfito de Sodio aplicado mediante frotamiento de la superficie tratada

durante un minuto, siguiendo las recomendaciones de las normas ASTM E3-95 y ASTM E407-93. Para las zonas del acero 316L se efectuó un ataque químico con el equipo pulido/ataque electrolítico con una solución de Acido Oxálico al 10% el cual se aplicó durante dos minutos, con una tensión de 3 V y utilizando un cátodo de acero inoxidable. Para llevar a cabo la microscopía se llevan las probetas al microscopio óptico, donde una vez atacadas las superficies de las probetas, se pudieron observar de forma clara y analizar todas las estructuras y constituyentes que se generan después del proceso de soldadura en la zona de fusión, zonas afectadas por el calor tanto del acero Dúplex como del 316L, y el material base. Es importante aclarar que primero se realizó el ataque y la microscopía para la zona de fusión y las zonas del acero Dúplex de las muestras, y posteriormente se aplicó el ataque electrolítico para realizar la microscopía en el acero 316L, de manera de evitar realizar la microscopía en las zonas del acero Dúplex con superficies sobre atacadas.



Figura 3.8 Equipo para evaluación metalográfica.

3.11 Estudio de la Microdureza.

El estudio de la microdureza fue realizado con la finalidad de revelar las variaciones de la resistencia a la penetración de los materiales involucrados en el estudio y además debido a la posibilidad que brinda el ensayar en regiones muy pequeñas para ser evaluadas por métodos de macrodureza. Las muestras utilizadas para este estudio fueron de una (1) por cada nivel de

intensidad de corriente, en la cuales se realizaron cinco (5) indentaciones en cada zona estudiada. Para el ensayo se utilizó el método Vickers según la norma ASTM E92.

a) Materiales y equipos utilizados.

- Microdurómetro marca Buehler, modelo Indemet 1104 (Figura 3.9), indentador de diamante con forma de pirámide de base cuadrada con ángulo de vértice de 136°. Carga 25 kgf, ya que con este valor se logra una huella claramente visible en la superficie del material.

b) Procedimiento.

Para el ensayo de microdureza fueron utilizadas tres (3) probetas, teniendo una probeta para cada intensidad. Se realizaron tres indentaciones para cada zona de cada una de las probetas ensayadas, es decir zona de fusión (ZF), zona afectada del acero 316L (ZA 316L), zona afectada acero Dúplex (ZA Dúplex), material base acero 316L (MB 316L) y material base acero Dúplex (MB Dúplex), promediando las tres medidas de microdureza de manera de obtener una medida promedio para cada zona de cada una de las probetas.

Para llevar a cabo el procedimiento del ensayo, primeramente se encendió el microdurometro Buehler Indemet, especificando el método Vickers. Una vez activado el equipo se procedió a colocar la primera probeta a ensayar en la mordaza del microdurometro, posteriormente se tomó la referencia base de las líneas de ajuste para medición de diagonales y se marcó el origen de medición. Luego se ajustó la vista de aumento entre las dos opciones disponibles, en la zona en la cual se tomaría la medición, una vez chequeada la zona se procedió a realizar la huella con el indentador de diamante para posteriormente obtener las medidas de las diagonales de la huella con la ayuda de las líneas de ajuste, y de esta manera obtener el valor

de dureza Vickers arrojado por el equipo. Luego de anotar la medición obtenida se repitió el proceso tres veces para cada una de las zonas analizadas en la probeta y posteriormente se repitió el proceso en su totalidad para cada una de las probetas.



Figura 3.9 Equipo para ensayo de dureza.

Capítulo IV

Resultados y Análisis de Resultados

Para obtener los resultados de la investigación fue necesaria la recopilación de información detallada acerca de los procedimientos y consideraciones a tener en cuenta, tanto para realizar una soldadura homogénea como para una soldadura heterogénea por el sistema TIG. De igual forma se requirió de la elaboración y posterior ensayo de probetas, ya sea para caracterizar el material en estudio o para evaluar la soldadura bajo las condiciones a las cuales se llevo a cabo. Los ensayos realizados son de tracción, doblado y dureza, acompañado de un análisis microscópico. En donde se plasmaron una serie de análisis en base a los resultados obtenidos durante la presente etapa del estudio, esto condujo a la sucesión del cumplimiento de los objetivos propuesto al inicio de la investigación.

4.1 Estudio de los parámetros de soldadura.

A través de la recopilación de información en la Norma AWS D1.6, material bibliográfico y conocimientos del soldador calificado por la AWS, sobre los

parámetros de soldadura individual del Acero Duplez SAF 2507 y del Acero Inoxidable 316L, ambos obedecen a una clasificación de Aceros Inoxidables. Estos parámetros recomendados sirvieron de punto de inicio para las pruebas piloto (Figura 4.1) para así determinar el valor más apropiado de intensidad de corriente en combinación con los demás parámetros.



Figura 4.1 Estudio de los parámetros de soldadura.

Tabla 4.1 Estudio de los parámetros de soldadura individual. Acero Dúplex SAF 2507 y Acero Inoxidable 316L

Variables.	Rango de trabajo Dúplex.	Rango de trabajo 316L
Intensidad de corriente (A)	80-100	60-80
Tipo de corriente	CCEN	CCEN
Velocidad avance (mm/min)	100	100
Tipo de electrodo.	Tungsteno-Torio (W-Th)	Tungsteno-Torio (W-Th)
Gas de protección.	Argón.	Argón.

4.2 Determinación de parámetros mediante las pruebas piloto.

Debido a que ambos materiales en estudio entran en la clasificación de Acero Inoxidable, muchos de los parámetros de soldadura son similares, excepto el nivel de intensidad de corriente. Para determinar el rango de valores mas óptimos para llevar a cabo la unión permanente se realizaron pruebas piloto, en donde se varió la intensidad de corriente, dejando resto de los parámetros inalterables. La variación de la intensidad de corriente se hizo hasta obtener una penetración sustancial (mitad del espesor de la lámina, Figura 4.2). Obteniendo así un rango de valores de intensidad de corriente que generaron

un buen cordón de soldadura en función de la penetración presente en el mismo.



Figura 4.2 Penetración obtenida para un rango de 80-100 A, en la unión disímil.

Tabla 4.2 Niveles de intensidad de corriente, obtenidos a través de las pruebas piloto.

VARIABLES.	RANGO DE TRABAJO.
Intensidad de corriente (A)	80, 90, 100
Tipo de corriente	CCEN
Velocidad de avance (mm/min)	100
Tipo de electrodo.	Tungsteno-Torio (W-Th)
Gas de protección.	Argón.

4.3 Caracterización del material base

En el proceso de caracterización del material base se realizó para así determinar con exactitud las propiedades mecánicas del material en estudio y así corroborar las mismas en comparación con los valores nominales para estos materiales.

4.3.1 Ensayo de Tracción Acero Inoxidable 316L

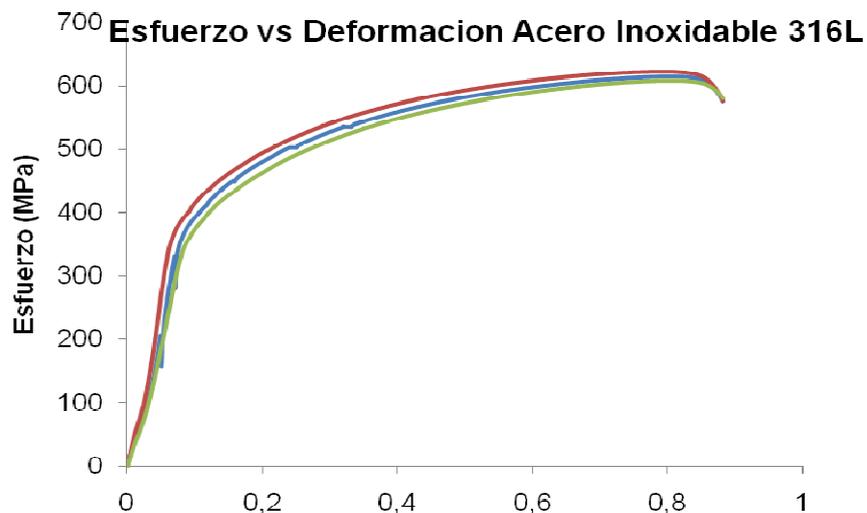


Figura 4.3 Esfuerzo vs Deformación Acero Inoxidable 316L

Para lograr la caracterización del material se precisó de tres probetas para tracción, de esta forma se logró una mayor aproximación de los valores obtenidos, dichas probetas fueron ensayadas según la norma ASTM E8, arrojando como resultado los datos de carga vs alargamiento en el ensayo. Aplicando las Ecuaciones 2.1 y 2.2 en conjunto con las dimensiones de la probeta (Tabla 3.3) se determinó la curva Esfuerzo vs Deformación del material. A través de la Figura 4.3 se obtienen las propiedades mecánicas del Acero Inoxidable 316L aplicando las Ecuaciones 2.4, 3.1, y 3.2, de igual forma aprovechando el método "Offset" (Sección 3.8.1)

Tabla 4.3 Valores promedios de propiedades mecánicas, Acero Inoxidable 316L. Valores teóricos (Industrias Acero Placencia C.A.)

Propiedades Mecánicas	Resultado Experimental	Desviación Estándar	Valores Teóricos
Esfuerzo de Fluencia (MPa)	365	12,35	312
Esfuerzo de Máximo (MPa)	615	5,14	564
Esfuerzo de Ruptura (Mpa)	595	1	550
Elongación (%)	65	1,1	50

4.3.2 Ensayo de Tracción Acero Dúplex SAF 2507

A través de la Figura 4.4 se obtienen las propiedades mecánicas del Acero Dúplex SAF 2507 (Tabla 4.2) aplicando las Ecuaciones 2.4, 3.1 y 3.2, de igual forma aprovechando el método "Offset" (Sección 3.8.1)

Tabla 4.4 Valores promedios de propiedades mecánicas, Acero Dúplex SAF 2507. Valores teóricos (Industrias Acero Placencia C.A.)

Propiedades Mecánicas	Resultado Experimental	Desviación Estándar	Valores Teóricos
Esfuerzo de Fluencia (MPa)	523	62,1	580
Esfuerzo de Máximo (MPa)	660	72,1	700
Esfuerzo de Ruptura (Mpa)	627	62,6	680
Elongación (%)	37	1,2	36

En relación a los valores obtenidos se verifica que el Acero Duplex SAF 2507 posee mayores propiedades mecánicas que el Acero Inoxidable 316L. Al momento de realizar los ensayos mecánicos en las probetas disimiles, se infiere que su ruptura será por el lado del 316L, siempre y cuando el cordón de soldadura sea óptimo.

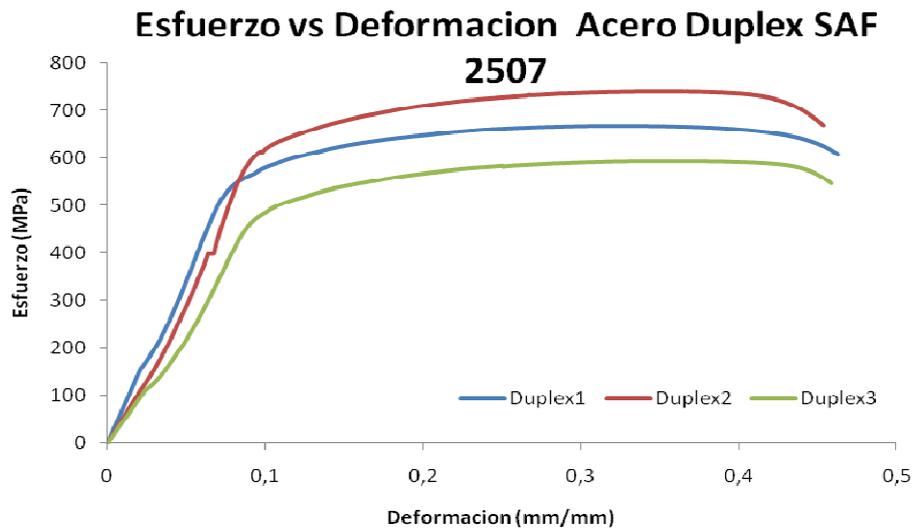


Figura 4.4 Esfuerzo vs Deformación Acero Dúplex SAF 2507

Para ambas caracterizaciones se logró conseguir resultados similares a los valores nominales según fabricantes y otras investigaciones, confirmando así sus propiedades mecánicas.

Durante el ensayo de tracción ocurrieron deslizamientos entre las mordazas del equipo y la probeta, lo cual produjo datos de alargamiento que son incorrectos. Debido a lo anterior se realizó la acción de eliminar esos valores, desplazando las curvas desde el punto que finalizó el deslizamiento al origen del sistema de referencia.

Este procedimiento se realizó para cada una de las curvas que se obtuvieron del ensayo de un total de doce (12) probetas.

4.3.3 Ensayo de Microdureza en el material base

En la Tabla 4.5 se presentan los valores obtenidos de los ensayos de dureza Vickers (HV) realizados tanto para el Acero Inoxidable 316L como para el Acero Dúplex SAF 2507.

Tabla 4.5 Valores promedios de microdureza Vickers (Hv)

	Dúplex	316L
HV1	283	247
	D1= 12,6 D2=13	D1= 13,6 D2=13,8
HV2	308,9	266,1
	D1= 12,4 D2=12,1	D1=13,4 D2= 13
HV3	299,1	235,7
	D1= 12,1 D2=12,1	D1=13,9 D2= 13,5
HV4	300,3	258,4
	D1= 12,3 D2=12,2	D1=13,1 D2= 13,3
HV5	293,7	240,9
	D1= 12,6 D2=12,9	D1=13,6 D2= 13,2
Hvpromed	297	249,62

Los valores de D1 y D2 indican las diagonales correspondientes a la indentación en el ensayo. Fueron tomadas tres medidas para cada uno de los materiales, cada medida tomada de una probeta diferente de material destinada a la caracterización de los mismos, para luego obtener un promedio del valor y de esta manera realizar un análisis homogéneo para ambos materiales.

En relación a los resultados obtenidos se puede verificar que el Acero Dúplex SAF 2507 posee mayor resistencia a la penetración que el Acero Inoxidable 316L

4.3.4 Ensayo Microscópico del material base

Las figuras mostradas para la condición original del material base, Acero Dúplex SAF 2507

En las Figura 4.5 se puede observar la microestructura del Acero Dúplex SAF 2507, a distintos niveles de aumento. Se observan dos fases bien

definidas, Austenita (γ) en una matriz de Ferrita (α) de color oscuro. A partir de lo anterior se distingue una distribución equitativa de mencionadas fases. De esta forma se corrobora la condición de este material, de poseer dos fases (Austenita y Ferrita) de manera estable.

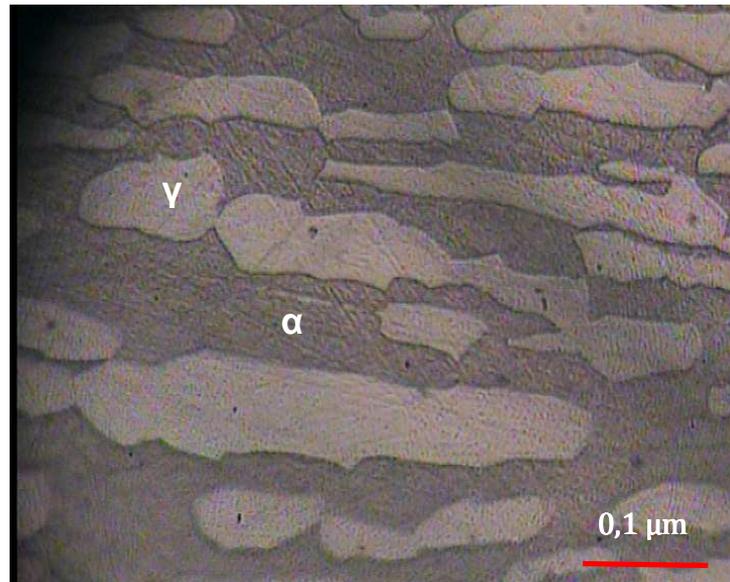


Figura 4.5 Acero Dúplex SAF 2507, ataque químico con Bisulfito de Sodio, Aumento 1000X

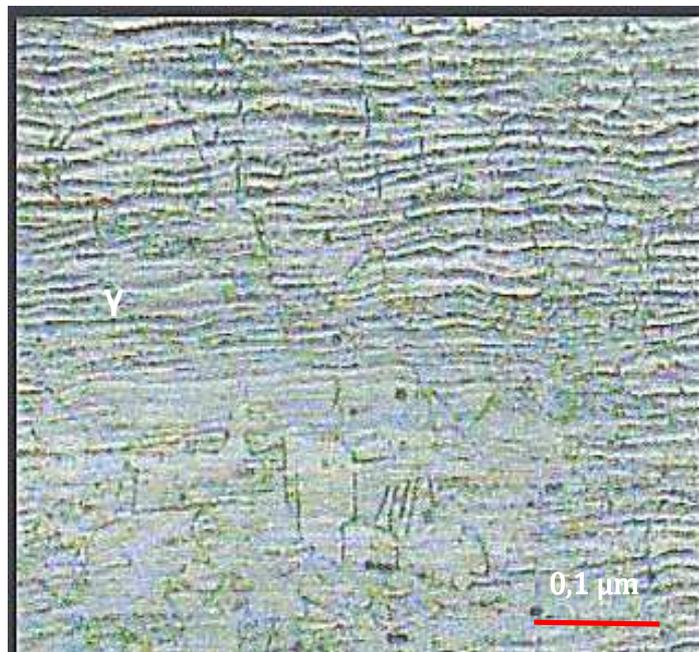


Figura 4.6 Acero Inoxidable 316L, ataque químico con Acido Oxálico, Aumento 200X

En la figura 4.6 se puede observar claramente la microestructura del Acero Inoxidable 316L, en donde se presenta un grano poligonal característico de una estructura austenítica (γ), de igual forma se manifiesta líneas de fluencia por el proceso de laminación ejercido por el fabricante previamente al estudio.

4.4 Ensayos Mecánicos en probetas disímiles unidas mediante el proceso de soldadura TIG

A continuación se evaluó las propiedades mecánicas del cordón de soldadura, el cual se realiza siguiendo los parámetros previamente establecidos. (Sección 1.4)

Los siguientes ensayos arrojaron resultados con las mismas características a los expuestos en la sección 4.3.1 y 4.3.2, es por ello que el procedimiento de obtención de Gráficas, valores promedios y aproximaciones obedecen al mismo conjunto de ecuaciones y procedimientos.

4.4.1 Ensayo de tracción probetas disímiles, bajo condición de 80 Amperios como Intensidad de Corriente.

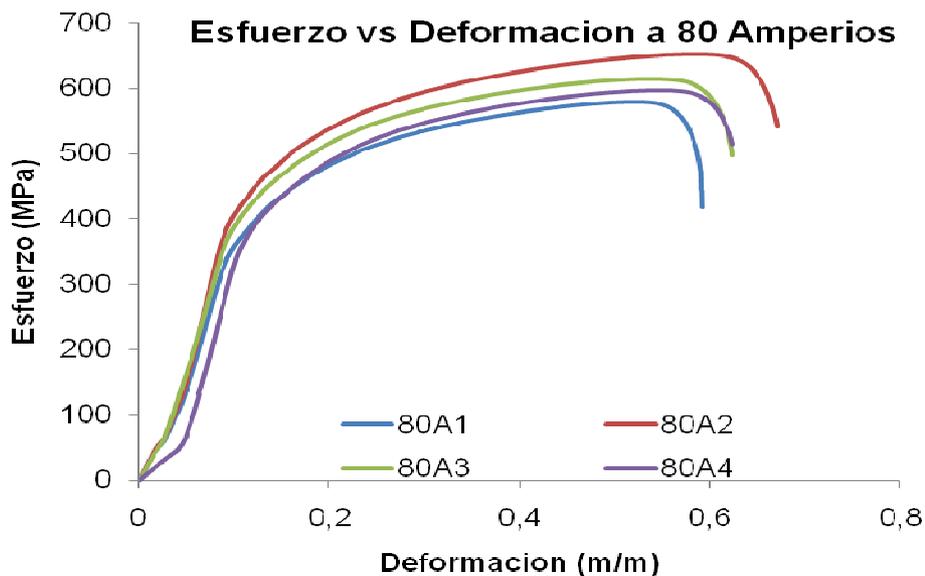


Figura 4.7 Gráficas Esfuerzo vs Deformación material disímil a 80 Amperios

Tabla 4.6 Valores promedios de propiedades mecánicas, curva material disímil a 80 Amperios

Propiedades Mecánicas	Resultado Experimental	Desviación estándar
Esfuerzo de Fluencia (MPa)	380	15,1
Esfuerzo de Máximo (MPa)	610	31,74
Esfuerzo de Ruptura (Mpa)	560	22,5
Elongación (%)	50	2,2

Todas las probetas ensayas bajo esta condición rompieron por el lado del Acero Inoxidable 316L

4.4.2 Ensayo de tracción probetas disimiles, bajo condición de 90 Amperios como Intensidad de Corriente.

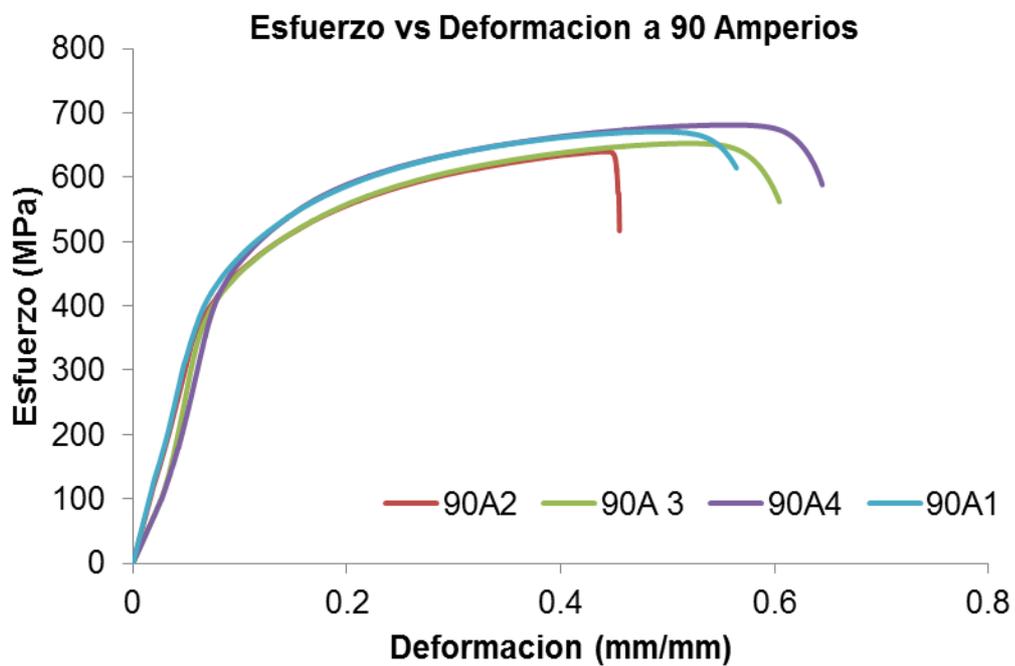


Figura 4.8 Graficas Esfuerzo vs Deformación material disímil a 90 Amperios

Tabla 4.7 Valores promedios de propiedades mecánicas, curva material disímil a 90 Amperios

Propiedades Mecánicas	Resultado Experimental	Desviación Estándar
Esfuerzo de Fluencia (MPa)	370	1,63
Esfuerzo de Máximo (MPa)	600	13,1
Esfuerzo de Ruptura (Mpa)	590	12,3
Elongación (%)	35	2,6

Todas las probetas ensayas bajo esta condición rompieron por el lado del Acero Inoxidable 316L

Estos resultados reflejan una gran aproximación a los obtenidos en la caracterización del Acero Inoxidable 316L (4.3.1), lo cual apunta que la ruptura de la probeta se dio por el sector que estaba conformado por el mencionado Acero. Resultado que evidentemente se dio en la práctica con la falla en lado del material de menores propiedades mecánicas (Acero 316L).

4.4.3 Ensayo de tracción probetas disimiles, bajo condición de 100 Amperios como Intensidad de Corriente.

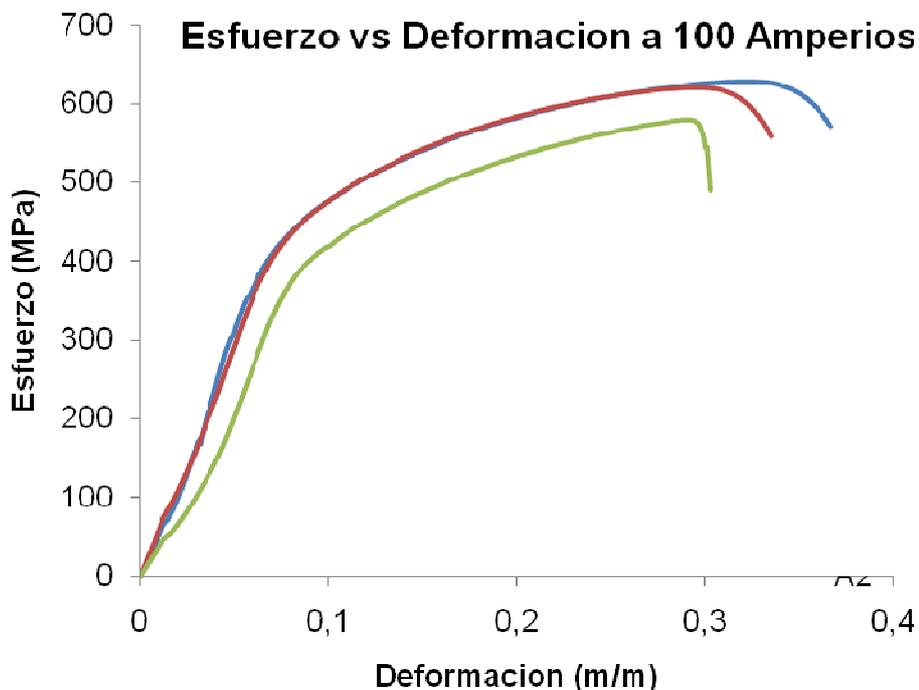


Figura 4.9 Graficas Esfuerzo vs Deformación material disímil a 100 Amperios

Tabla 4.8 Valores promedios de propiedades mecánicas, curva material disímil a 100 Amperios

Propiedades Mecánicas	Resultado Experimental	Desviación Estándar
Esfuerzo de Fluencia (MPa)	360	5,2
Esfuerzo de Máximo (MPa)	580	26,5
Esfuerzo de Ruptura (Mpa)	604	21,9
Elongación (%)	26	2,4

Tres (3) probetas ensayas bajo esta condición rompieron en el cordón de soldadura, y una (1) probeta rompió por el lado del Acero Inoxidable 316L.

Estos resultados no expresan valores aproximados al del Acero 316L, el material de menores propiedades mecánicas, esto sugiera que el cordón de soldadura no fue óptimo en la unión permanente de los materiales, de igual forma la elongación en las probetas también se vio afectada notablemente. Esto apunta a una falla del cordón antes de que lo hiciera el Acero 316L, lo cual resultó así en la práctica.

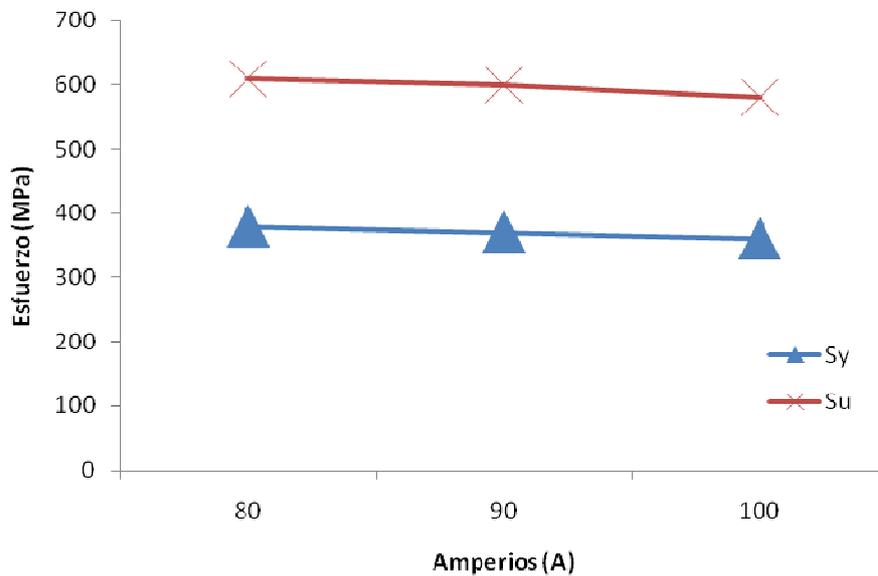


Figura 4.10 Comparación de Esfuerzo de Fluencia y Máximos para cada nivel de Intensidad de Corriente empleado

Analizando los resultados obtenidos se logra apreciar una tendencia a la disminución de los esfuerzos (Figura 4.10) a medida que la intensidad de corriente empleada aumenta, esta relación inversa se acentúa más en aquellas probetas unidas permanentemente con una intensidad de 100 Amperios. Esta condición se observó para: Esfuerzo de Fluencia, Esfuerzo de Ruptura, Esfuerzo Máximo y porcentaje de elongación.

Esto se debe al aumento de la intensidad de corriente lo cual aumenta la carga térmica suministrada en la coalescencia de los materiales, y esto origina mayores cambios en los granos microestructurales, provocando así disminución en las propiedades mecánicas en función del aumento de la intensidad de corriente.

4.5 Ensayo de Microscópico de la zona de fusión y zona afectada por el calor.

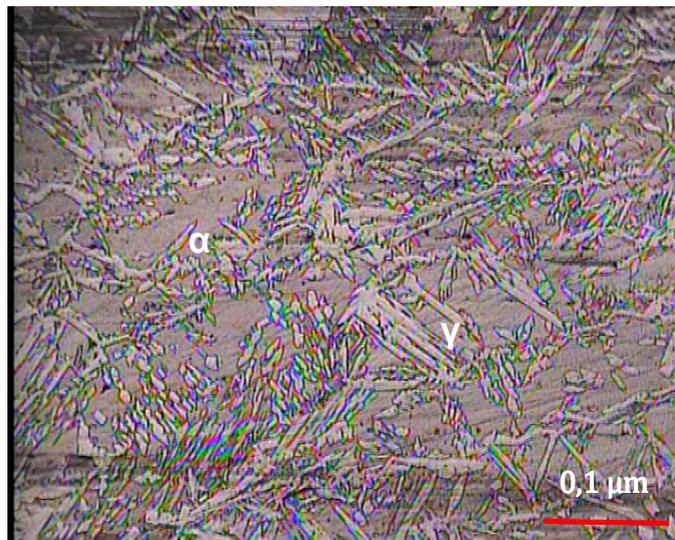


Figura 4.11 Zona de Fusión, ataque químico: Bisulfito de Sodio. 80 Amperios. Aumento 100X

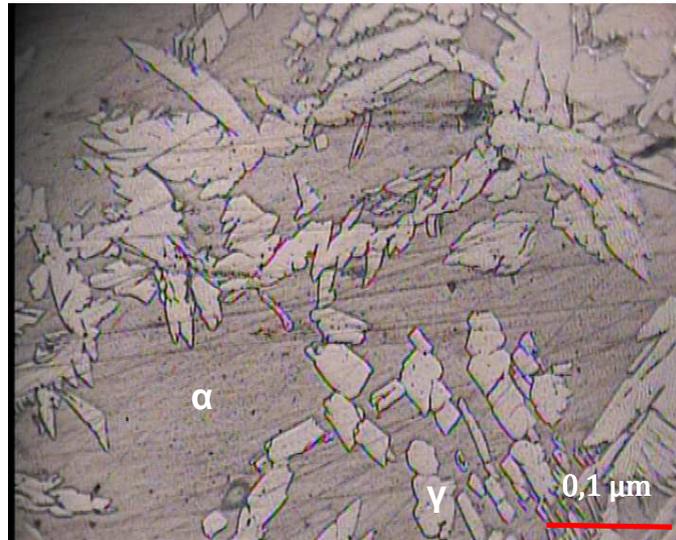


Figura 4.12 Zona de Fusión, ataque químico: Bisulfito de Sodio. 90 Amperios
Aumento 400X

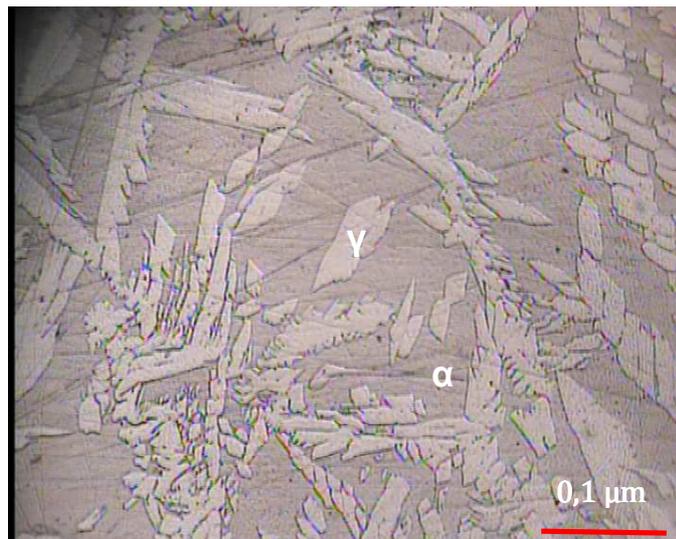


Figura 4.13 Zona de Fusión, ataque químico: Bisulfito de Sodio. 100 Amperios
Aumento 400X

En las figuras 4.11, 4.12 y 4.13 se muestra la microestructura en la junta soldada (zona de fusión) para las condiciones de 80, 90 y 100 Amperios, se observan las fases constituyentes, Austenita de un color claro y Ferrita de un color más oscuro. En este caso se presentó un crecimiento desordenado de cristales aciculares y detríticos de Austenita en una matriz de Ferrita, este

crecimiento se debe al desequilibrio entre las fases debido al subenfriamiento luego del proceso de soldadura. En la zona de fusión se observó tanto la fase de Austenita como la fase de Ferrita.

En las figuras 4.14, 4.15 y 4.16 muestran la zona de transición para las condiciones de 80, 90 y 100 Amperios de intensidad de corriente en la soldadura. Se observa dos fases presentes, Austenita y Ferrita de color claro y oscuro respectivamente, se puede notar un cambio en la forma del cristal. Debido al aumento de la temperatura y rápido enfriamiento del material.

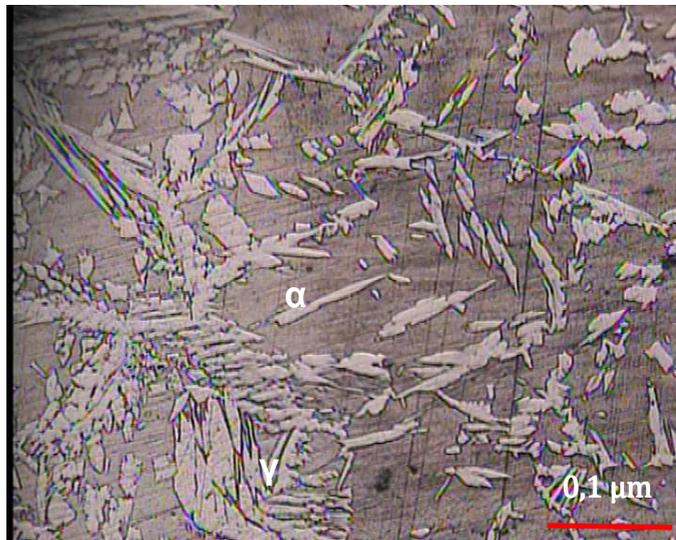


Figura 4.14 Transición Dúplex- Zona de Fusión, ataque químico: Bisulfito de Sodio. 80 Amperios Aumento 200X

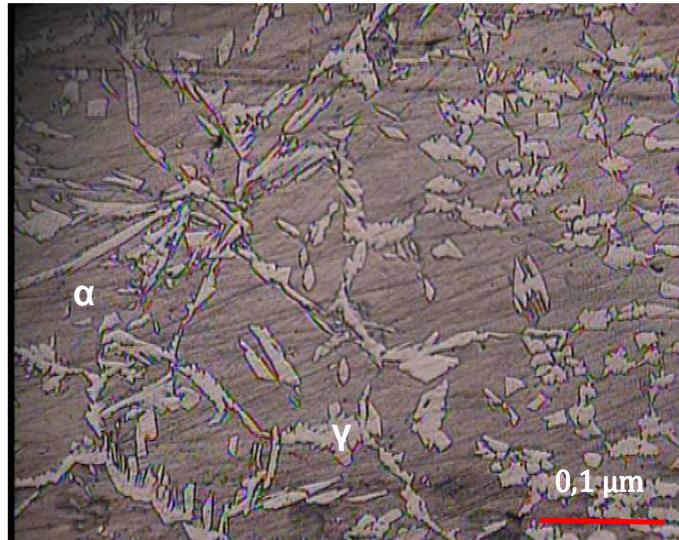


Figura 4.15 Transición Dúplex- Zona de Fusión, ataque químico: Bisulfito de Sodio. 90 Amperios Aumento 200X

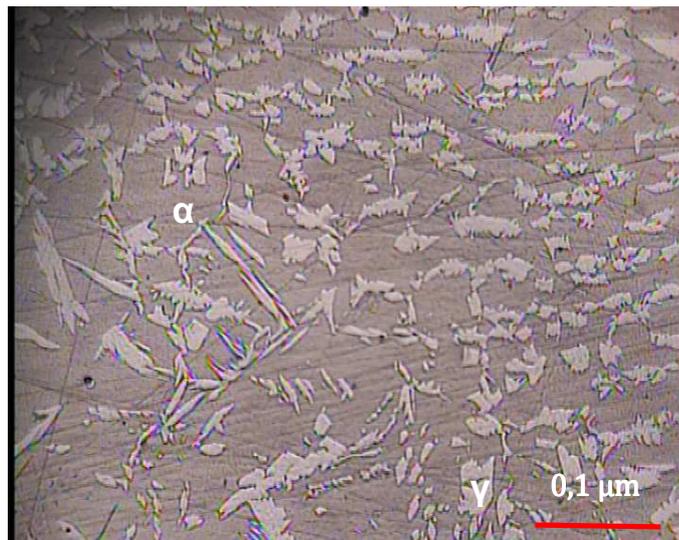


Figura 4.16 Transición Dúplex – Zona de Fusión, ataque químico: Bisulfito de Sodio. 100 Amperios Aumento 200X

68 Evaluación de la influencia de intensidad de la corriente en soldadura disímil entre un acero dúplex SAF 2507 y el acero inoxidable 316L mediante el método TIG sin material de aporte.

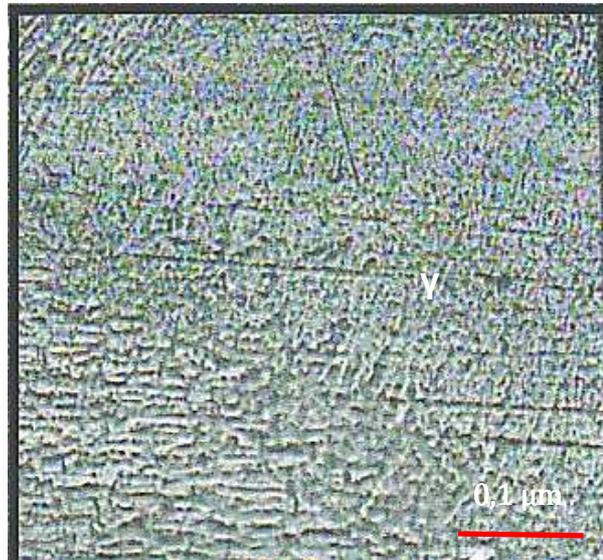


Figura 4.17 Transición 316L – Zona de Fusión, ataque químico: Acido Oxálico.
80 Amperios Aumento 100X

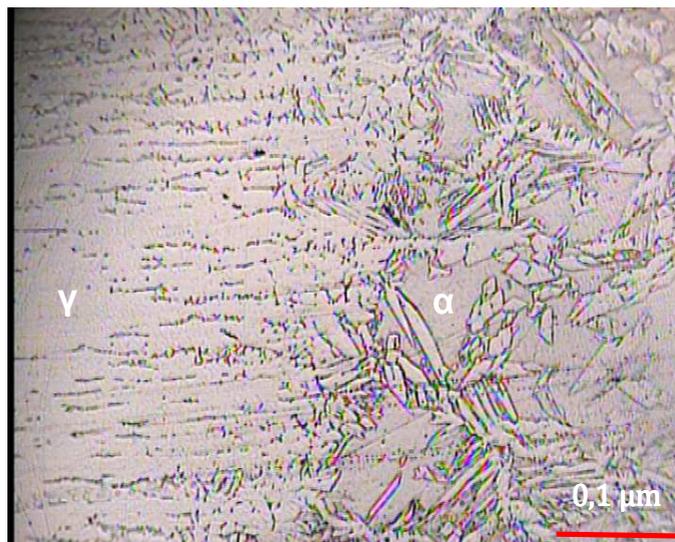


Figura 4.18 Transición 316L – Zona de Fusión, ataque químico: Acido Oxálico.
90 Amperios Aumento 200X



Figura 4.19 Transición 316L – Zona de Fusión, ataque químico: Acido Oxálico.
100 Amperios Aumento 200X

En las figuras 4.17, 4.18 y 4.19 muestran la zona de transición para las distintas intensidades empleadas y en las cuales se presentó una morfología detrítica con constituyentes formada por Ferrita y Austenita, dicha morfología se obtuvo debido a la solidificación brusca del material.

4.6 Ensayo de Doblado

Resultados de los ensayos de doblado, se emplearon cuatro probetas por cada intensidad de corriente, para doblado de cara.

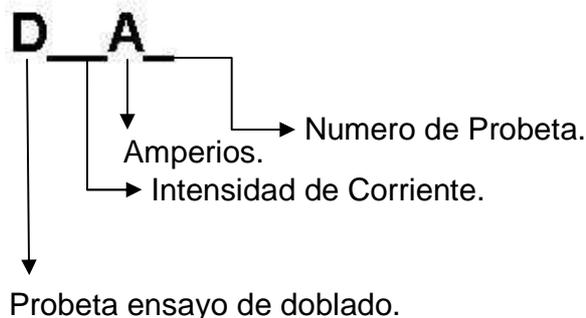
Tabla 4.9 Valores obtenidos de los ensayos de doblado.

Muestra	Fuerza Máxima (N)	Observaciones
D80A1	1872	La probeta se dobló por el lado del acero de mayor ductilidad debido a la realización de un montaje inadecuado para el ensayo, por lo cual el cordón se vio muy poco afectado presentando solamente un ligero alargamiento.
D80A2	3110	No se presentaron grietas ni fisuras, cordón de soldadura centrado y alargado.

(Continuación) Tabla 4.9 Valores obtenidos de los ensayos de doblado.

Muestra	Fuerza Máxima (N)	Observaciones
D80A3	2670	No hubo grietas ni fisuras, el cordón de soldadura presentó alargamiento y su deformación presentó una ligera tendencia en dirección al lado del acero 316L.
D80A4	3120	No se mostraron grietas ni fisuras, cordón de soldadura centrado y alargado. Se evidenciaron dos poros de 0,5 mm y un poro de 1 mm.
DD90A1	2282	No se expusieron grietas ni fisuras, cordón de soldadura centrado y alargado.
D90A2	2485	No se vieron grietas ni fisuras, cordón de soldadura centrado y alargado.
D90A3	2246	No se presentaron grietas ni fisuras, el cordón de soldadura presentó alargamiento y su deformación presentó una ligera tendencia en dirección al lado del acero 316L.
D90A4	2280	No se mostraron grietas ni fisuras, cordón de soldadura centrado y alargado. Se evidenció un poro de 1mm.
D100A1	2043	No se expusieron grietas ni fisuras, el cordón de soldadura presentó alargamiento y su deformación presentó una ligera tendencia en dirección al lado del acero 316L. Se evidenciaron dos porosidades de 1 mm y tres porosidades de 0,5 mm.
D100A2	2119	No se vieron grietas ni fisuras, el cordón de soldadura presentó alargamiento y su deformación exhibió una ligera tendencia en dirección al lado del acero 316L.
D100A3	2570	No se presentaron grietas ni fisuras, cordón de soldadura centrado y alargado. Se evidenciaron dos porosidades de 0,5 mm.
D100A4	2348	No se mostraron grietas ni fisuras, cordón de soldadura centrado y alargado.

La nomenclatura adoptada para identificar las probetas es la siguiente:



4.6.1 Análisis de los ensayos de doblado

Mediante los ensayos de doblado se busca verificar la calidad de la soldadura y garantizar una buena ductilidad mediante la verificación cualitativa de la deformación entre las zonas principales (zona de fusión, zona afectada por el calor y zona del material base), que garanticen mejor el desempeño de la misma.

Para la intensidad de corriente $I_1 = 80$ A, se obtuvo una fuerza máxima de doblado para la probeta D80A4 cuyo valor fue de 3120 N. Las demás probetas presentaron valores poco distantes del valor mayor, a excepción del caso de la probeta D80A1, debido a la realización de un montaje inadecuado, el punzón de la máquina de ensayos presentó deslizamiento sobre la probeta causando que la deformación de la probeta ocurriera casi en su totalidad del lado del acero 316L debido a que este resulta ser el material menos resistente, y por lo tanto el valor de la carga resultó considerablemente menor que en el resto de los ensayos, y el cordón de soldadura se vio muy poco afectado al final del ensayo. En cuanto a las condiciones de la soldadura posterior al ensayo, solamente se pudo observar una reducida presencia de porosidades en una de las probetas.

En cuanto a la intensidad de corriente $I_2 = 90$ A la mayor fuerza registrada fue de 2485N. El resto de las probetas ensayadas para esta intensidad presentaron valores de carga cercanos al anterior. Al final de los ensayos para las probetas con esta intensidad, al igual que para las de 80 A sólo pudo observarse una reducida cantidad de pequeñas porosidades, pero las mismas son irrelevantes de acuerdo a la norma AWS D1.6.

En los ensayos de las probetas de intensidad de corriente $I_3 = 100$ A, el máximo valor de carga obtenido fue de 2570 N. Para este valor de intensidad se puede observar que existe una mayor dispersión en los valores de carga obtenidos en los diferentes ensayos, en comparación con los valores obtenidos para otras intensidades, sin embargo esta dispersión no llega a ser

considerable ya que los mismo siguen siendo valores muy cercanos. Al final de los ensayos con las probetas soldadas a 100 A, se pudo observar en tres de ellas la presencia varias porosidades pequeñas en la zona del cordón.

Para varias de las probetas ya ensayadas es posible presenciar que el cordón de soldadura sufrió una mayor deformación del lado del acero de menor resistencia, es decir el acero 316L, por eso se dice que en estos casos que su deformación tiende en esta dirección. Esta deformación ligeramente asimétrica del cordón ocurre debido a que el acero 316L requiere una menor carga de deformación que el acero Dúplex y que la zona de fusión del cordón, y por lo tanto la deformación final de la probeta es levemente mayor por el lado del acero 316L.

En cuanto a las pequeñas porosidades encontradas en algunas de las probetas, puede decirse que estas imperfecciones son aceptables ya que se cumple con los criterios de inspección establecidos por la norma AWS D1.6 la cual establece que cualquier defecto sobre la superficie (poros, fisuras, rompimiento), no debe ser mayor de 3 mm medidos en cualquier dirección, y la suma de todos no debe exceder de los 10 mm.

De las tres intensidades de corriente evaluadas, el mayor valor de fuerza para el ensayo de doblado se obtuvo para $I_1 = 80$ A, valor para el cual se obtuvieron los mejores resultados en general para este ensayo en cuanto a valores de fuerza.

4.7 Ensayos de Microdureza

Para la ejecución del ensayo de microdureza se siguió lo establecido en la norma ASTM E92, obteniendo diversos valores para cada zona en estudio y para cada nivel de intensidad de corriente, finalmente se tomó un promedio para que zona y se represento en las Figuras 4.20, 4.21 y 4.22

A continuación se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de microdureza tomando en cuenta las siguientes zonas del material:

ZF: Zona de fusión.

ZA Dúplex: Zona afectada en el acero Dúplex SAF 2507.

ZA 316L: Zona afectada en el acero 316L.

Estas constituyen el conjunto de zonas de estudio más representativas y de importancia para la microdureza, las cuales se encuentran en la sección transversal de la soldadura. El ensayo fue realizado utilizando una carga aplicada de 25 Kgf. A continuación se muestran los valores obtenidos para dichos ensayos.

Intensidad de Corriente $I_1 = 80 \text{ A}$

Tabla 4.10 Valores de microdureza en las zonas representativas para $I_1 = 80 \text{ A}$

80 A	MB Dúplex	ZA Dúplex	ZF	ZA 316L	MB 316L
	288,4	305,8	312,2	299,1	256,3
HV1	D1= 12,2 D2=12,4	D1= 12,3 D2=12,4	D1= 12,3 D2= 12,1	D1=12,6 D2=12,3	D1= 13,5 D2=13,6
	303,1	316	311,5	296,7	252,9
HV2	D1= 12,1 D2=12,3	D1= 12,1 D2= 12,1	D1= 12,2 D2= 12,2	D1=12,8 D2=12,4	D1=13,2 D2= 13,2
	291,6	305,3	311,5	297,2	274,1
HV3	D1= 12,1 D2=12	D1= 12,2 D2= 12,6	D1= 12,2 D2= 12,2	D1=12,7 D2=12,3	D1=13,1 D2= 13,3
	296,3	304	310,8	297,1	267,8
HV4	D1=12,3 D2=12,5	D1= 12,1 D2=12,6	D1= 12,3 D2= 12,5	D1=12,5 D2=12,4	D1=13,4 D2= 13,1
	292,5	311,2	310,4	298,3	254,4
HV5	D1=12,4 D2=12,1	D1= 12,2 D2= 12,1	D1= 12,1 D2= 12,2	D1=12,7 D2=12,6	D1=13,3 D2= 13,2
Hvpromed	294,38	308,46	311,28	297,68	261,10

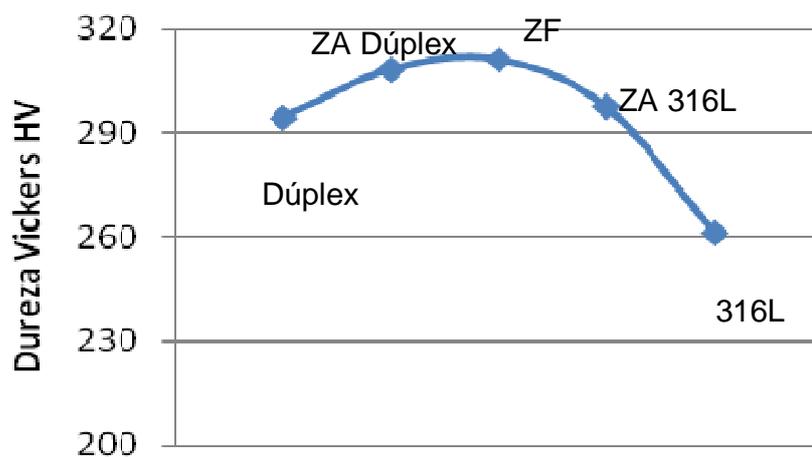


Figura 4.20 Gráfico de microdureza para $I_1 = 80 \text{ A}$

Intensidad de Corriente $I_2 = 90$ A

Tabla 4.11 Valores de microdureza en las zonas representativas para $I_2 = 90$ A

90 A	MB Dúplex	ZA Dúplex	ZF	ZA 316L	MB 316L
HV1	297,2	314	359,9	311,9	260,6
	D1= 12,1 D2=12,2	D1= 12 D2=12,3	D1= 11,1 D2= 11,6	D1=11 D2=11,5	D1= 13,3 D2=13,7
HV2	300,6	316,6	360,4	301,5	282,3
	D1= 12,4 D2=12,2	D1= 12 D2=12,2	D1= 11,3 D2= 11,2	D1=12,6 D2=12,2	D1=13 D2= 13,1
HV3	307,8	317,3	356,7	307,2	263,9
	D1= 12 D2=12,1	D1= 12,1 D2=12,2	D1= 11,5 D2= 11,3	D1=11,7 D2=11,9	D1=13,4 D2= 13,8
HV4	304,3	315,8	356,9	309,3	258,3
	D1= 12,2 D2=12,3	D1= 12,3 D2=12,1	D1= 11,4 D2= 11,5	D1=11,1 D2=11,3	D1= 13,1 D2=13,5
HV5	299,5	316,1	355,2	304,5	279,4
	D1= 12,1 D2=12,1	D1= 12,1 D2=12,4	D1= 11,2 D2= 11,1	D1=11,4 D2=11,6	D1=13 D2= 13
Hvpromed	301,88	315,96	357,82	306,88	268,9

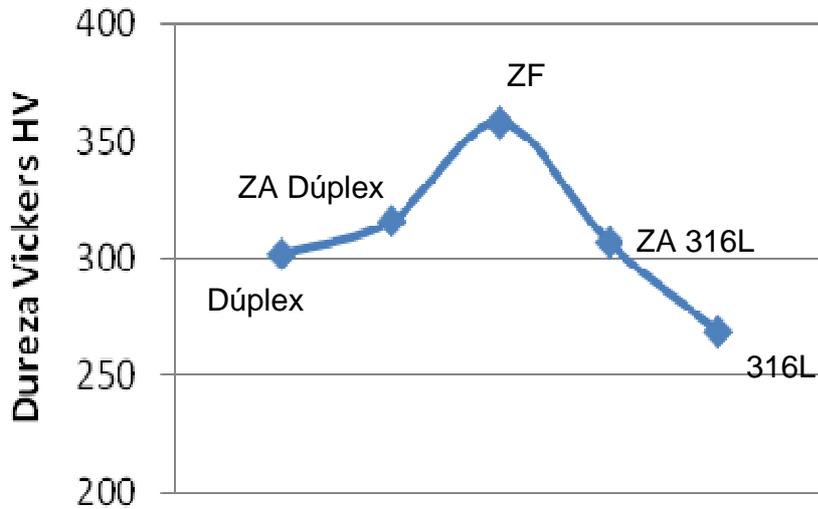


Figura 4.21 Gráfico de microdureza para $I_2 = 90$ A

Intensidad de Corriente $I_3 = 100$ A

Tabla 4.12 Valores de microdureza en las zonas representativas para $I_3 = 100$ A

100 A	MB Dúplex		ZA Dúplex		ZF		ZA 316L		MB 316L	
HV1	284,5		301,1		299		270,1		233,2	
	D1= 12	D2=12,3	D1= 12,6	D2=12,3	D1= 12,7	D2= 12,2	D1=13,2	D2=13	D1= 13,6	D2=13,1
HV2	291,4		299,1		306,4		268,1		248,9	
	D1= 12,2	D2=12,5	D1= 12,5	D2=12,5	D1=12,2	D2= 12,4	D1=13,1	D2=13,2	D1=13,4	D2= 13,3
HV3	281,3		299,1		303,8		273,6		271,3	
	D1= 12,2	D2=12,1	D1= 12,5	D2=12,5	D1=12,4	D2= 12,6	D1=13,1	D2=13,4	D1=13,2	D2= 13,5
HV4	283,8		301,4		304,7		269,3		242,5	
	D1= 12,2	D2=12,1	D1= 12,5	D2=12,2	D1=12,3	D2= 12,1	D1=13,2	D2=13,2	D1= 13,3	D2=13,1
HV5	287,6		298,2		301,5		271,9		259,7	
	D1= 12,3	D2=12,4	D1= 12,3	D2=12,6	D1= 12,5	D2= 12,3	D1=13,2	D2=13,3	D1=13,2	D2= 13,1
Hvpromed	285,72		299,78		303,08		270,6		251,12	

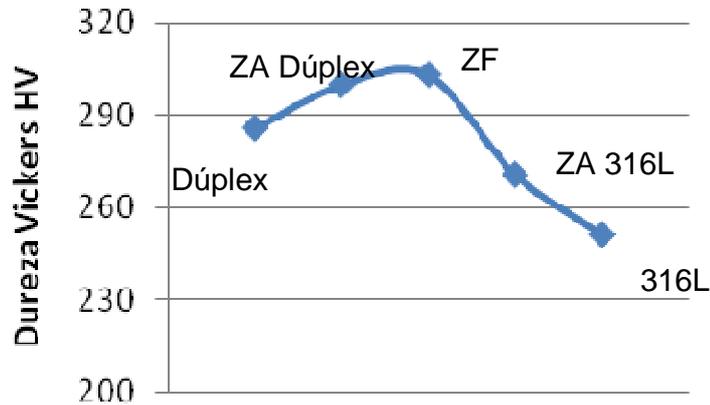


Figura 4.22 Gráfico de microdureza para $I_3 = 100$ A

4.7.1 Análisis de los ensayos de microdureza Vickers.

Al analizar los valores obtenidos a partir del ensayo de microdureza Vickers, se evidenció el mayor valor de dureza en la zona denominada zona de fusión, que consiste en la zona en donde existe una combinación de acero dúplex y acero 316L en el cordón de soldadura, se infiere que esto se debe a que dicha zona recibe la mayor temperatura durante el proceso de soldadura, lo cual genera cambios en la estructura de los granos que junto a una rápida solidificación se incide en esta propiedad, además se pudo observar en los

ensayos metalográficos la presencia de ferrita delta, la cual depende de la temperatura a la cual se eleve el material y su posterior solidificación.

De los ensayos realizados se obtuvo el mayor valor de dureza para la intensidad corriente $I_2 = 90$ A en la zona de fusión con un valor de 358,3 HV. Para las demás medidas obtenidas, es un hecho que a medida de que las mediciones se alejen de la zona de mayor temperatura alcanzada los valores de dureza disminuirán poniendo en evidencia la influencia del calor generado en el proceso de soldadura, por esto los valores de dureza obtenidos de las zonas afectadas por el calor son en todos los casos menores a los de la zona de fusión. Es posible también verificar que el calor generado en el proceso de soldadura y el posterior enfriamiento genera un incremento en los valores de microdureza para ambos materiales, comparando dichos los valores obtenidos en las respectivas zonas afectadas con los valores obtenidos en cada uno de los materiales base, indicados anteriormente en la caracterización de los materiales (Sección 4.3). En la Figura 4.23 se muestra una comparación con los valores promedio obtenidos por cada intensidad de corriente, para las zonas estudiadas, en esta Figura 4.23 se puede observar que para las tres intensidades el mayor valor es el de la zona de fusión, seguido de la zona afectada por el calor del acero Dúplex y las medidas de menor dureza en los tres casos corresponden a la zona afectada por el calor del acero 316L.

4.8 Análisis Generales.

A través de la microscopía óptica y el ensayo de tracción se determinó que la unión disímil entre el Acero Dúplex SAF 2507 y el Acero Inoxidable 316L perdía ductilidad a medida que la intensidad de corriente aumentaba. Ya que durante la coalescencia ocurrieron cambios a nivel estructural que originaron la aparición de cristales dendríticos los cuales se responsabiliza por la mencionada pérdida de ductilidad. Esto último también se puede corroborar por medio del porcentaje de elongación para cada nivel de intensidad de

corriente, durante el ensayo de tracción, el cual varió de forma inversa a la intensidad de corriente.

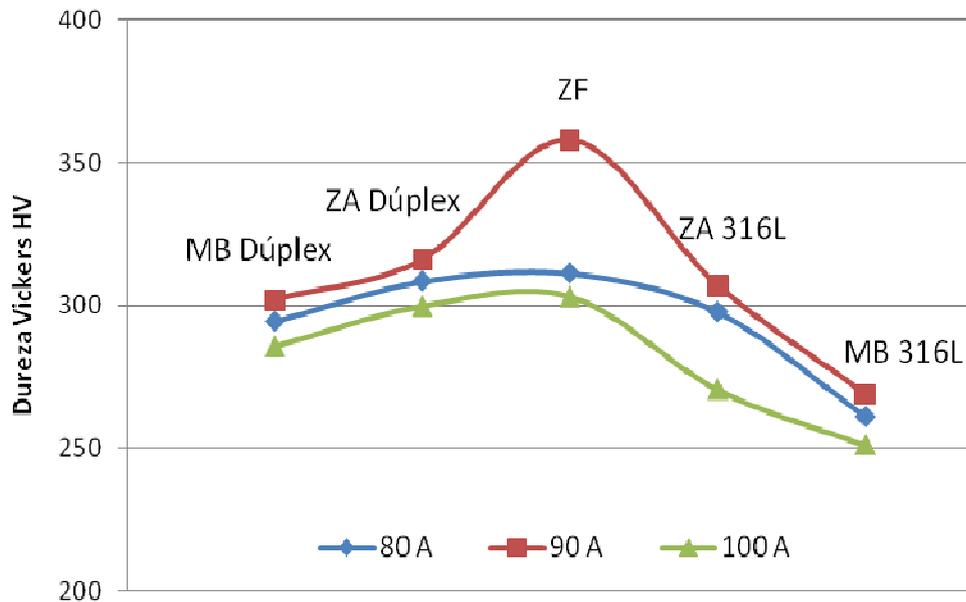


Figura 4.23 Valores promedio de dureza para las tres intensidades de corriente.

El valor de intensidad de corriente más adecuado del rango de intensidades evaluado para realizar uniones disimiles entre acero Inoxidable Dúplex SAF 2507 y Acero inoxidable 316L es en definitiva el menor valor del rango es decir $I_1 = 80$ A, para el cual se evidenciaron mejores resultados en los ensayos de tracción y doblado en comparación con el resto de los valores estudiados ya que presentó mayor esfuerzo de ruptura, mayor esfuerzo de fluencia y mayor porcentaje de elongación además de una mayor carga de doblado, que los valores obtenidos para el resto de las intensidades evaluadas.

En la unión de soldadura disímil es posible verificar la efectividad de la soldadura cuando en el ensayo de tracción la probeta falla por el lado en donde se encuentra el acero que presente menor resistencia a la tracción de los dos materiales involucrados, y por ende no falle en el cordón, lo cual garantiza que el cordón de la soldadura es al menos más resistente que uno

de los materiales que conforman la unión. En el caso de las intensidades evaluadas únicamente para $I_1 = 80$ A, todas las probetas fallaron por el acero de menores propiedades mecánicas, es decir, el Acero 316L, por lo que se ratifica que este valor de intensidad resulta ser el más adecuado.

Es importante realizar la caracterización individual de los materiales base de la soldadura al estudiar juntas disímiles ya que esto permite tener una idea de los valores aproximados que se obtendrán en los diferentes ensayos realizados además de establecer un punto de comparación al momento de realizar los análisis de los mismos.

Capítulo V

Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

Estudiando los parámetros de soldadura individual, del Acero Dúplex SAF 2507 y el Acero Inoxidable 316L se logró establecer un punto de referencia para la unión permanente de los dos materiales.

Con la caracterización de las propiedades mecánicas individuales del Acero Dúplex SAF 2507 y del Acero Inoxidable 316L, se obtuvo valores aproximados del comportamiento de dichos materiales (Tabla 4.3 y Tabla 4.4) y así establecer el punto de comparación para los ensayos en la unión disímil.

Las pruebas piloto realizadas antes del proceso de soldadura definitivo permitieron obtener un rango de intensidades de corriente adecuado para evaluar la influencia de la intensidad de corriente en la soldadura disímil entre acero Inoxidable Dúplex SAF 2507 y Acero inoxidable 316L sin uso de material de aporte, además de verificar que para llevar a cabo juntas soldadas a tope sin material de aporte lo más recomendable es soldar por ambas caras del material.

Mediante la aplicación adecuada de las respectivas normas para ensayos de tracción, doblado, dureza y análisis microscópico se logró determinar las características mecánicas de las juntas soldadas a los diferentes niveles de intensidad de corriente, las cuales se presenta en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1 Características mecánicas de la junta soldada a tracción, doblado, dureza.

Intensidad de Corriente	Propiedad Mecánica	Valor
80 A	Esfuerzo de Fluencia (MPa)	380
	Esfuerzo Máximo (MPa)	610
	Dureza en ZF (Hv)	311,28
	Carga Máxima de Doblado (N)	3110
90 A	Esfuerzo de Fluencia (MPa)	370
	Esfuerzo Máximo (MPa)	600
	Dureza en ZF (Hv)	357,82
	Carga Máxima de Doblado (N)	2280
100 A	Esfuerzo de Fluencia (MPa)	360
	Esfuerzo Máximo (MPa)	580
	Dureza en ZF (Hv)	303,08
	Carga Máxima de Doblado (N)	2570

Con los resultados obtenidos en las probetas ensayadas a las distintas intensidades de corriente, siguiendo los parámetros establecidos previamente se determinó que la intensidad de corriente más adecuada para este tipo de unión permanente es de 80 Amperios.

5.2 Recomendaciones

Evaluar la influencia de otros parámetros en la soldadura disímil entre un acero dúplex SAF 2507 y el acero inoxidable 316L sin material de aporte, por

ejemplo tipo de corriente, flujo de gas de protección, etc. Y así recorrer la mayoría de las posibilidades para obtener la soldadura más idónea.

Realizar una inspección de la soldadura mediante ultrasonido para así verificar porosidades internas las cuales son imposibles de percibir mediante una metalografía

Evaluar la soldadura disímil entre el acero Dúplex SAF 2507 y el acero inoxidable 316L mediante un proceso de soldadura diferente al TIG, para así comprar y verificar si el método usado en la investigación es el mejor para dicha aplicación

Referencias Bibliográficas

- ASM International, Metal Handbook, Tenth Edition, Volume 1, **Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys**, 1990.
- ASM International, Metal Handbook, Tenth Edition, Volume 8, **Mechanical Testing and Evaluation**, 1990.
- ASM International, Metal Handbook, Tenth Edition, Volume 9, **Metallography and Microstructures**, 1990.
- AWS D1.6 (2003). Welding Stainless Steel. **Welding Stainless Steel AWS**.
- AWS A5.2 (2003). Welding Stainless Steel. **Welding Stainless Steel AWS**.
- Dadfar, M., Fathi, M., Karimzadeh, F., Dadfar, M., y Saatchi, A. (2007). Effect of TIG welding on corrosion behavior of 316L stainless steel. **Materials Letters** , 2343–2346.
- Dorta Almenara, Minerva (2006). Estudio del Comportamiento de Uniones Soldadas a Tope de Acero Dúplex SAF 2205 y Aluminio 6063 T5 mediante GMAW. **Trabajo de Ascenso**. Universidad Simón Bolívar
- Echeverría, Mauricio Ibarra Núñez Solís Eduardo, y Huerta Ibáñez José Miguel (Marzo de 2010). **Stainless Steel Manual**. INDURA S.A. Chile: 2M Impresores Ltda.
- Echeverria M. Ibarra (Marzo de 2007). INDURA S.A. **Sistema de Materiales y Soldadura**. Disponible en <http://www.indura.net>

- El Wahabi, M. (Diciembre de 2002). *Tesis Doctorales en Red*. Disponible en <http://www.tdr.cesca.es/>
- Groover Mikell P. (2007). ***Fundamentos de Manufactura Moderna***. Prentice-Hall Hispanoamericana. México.
- López Ospina, R., Aguirre Corrales, H., y Parra L., H. (2007). Soldabilidad en aceros inoxidable y aceros disimiles. ***Scientia Et Technica*** , XIII (034), 273-278.
- Lozano J., Moreda P., C. Llorente L. y Bilmes P.D. (2000) ***Características de Fusión de Soldaduras GMAW de Aceros Inoxidables Austeníticos***.
- Miller Electric, C. (2008). ***TIG Handbook***. USA: Printed in USA.
- Mielnik Edward M. (1991). ***Ciencia del conformado e Ingeniería***. Mc Graw-Hill. Segunda edición. Mexico
- Núñez Solís Eduardo, Echeverria, Mauricio Ibarra y Huerta Ibáñez José Miguel (Marzo de 2010). ***Manual de Acero Inoxidable***. INDURA S.A. . Chile: 2M Impresores Ltda.
- Ramírez, A., Cerpa, S., Mejias, G., León B., J., y Quintero, A. (2006). Soldadura de un acero inoxidable Dúplex 2205 por el proceso de soldadura GTAW. ***Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*** .
- Tamayo y Tamayo (2003). ***Metodología de la investigación***. Editorial Mc GrawHill, México.

Símbolos y Abreviaturas

A	<i>Amperios</i>
ACT	<i>Agrietamiento por corrosión de tensiones</i>
AISI (IAHA)	<i>Instituto Americano del Hierro y Acero (American Iron and Steel Institute)</i>
Ao	<i>Área Sección transversal inicial</i>
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers (Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos)</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales)</i>
AWS (SAS)	<i>Sociedad Americana de Soldadura (American Welding Society)</i>
C	<i>Carbono</i>
CAAF	<i>Corriente Alterna, Alta Frecuencia</i>
CCEN	<i>Corriente Continua, Electrodo Negativo</i>
Cr	<i>Cromo</i>
d	<i>Diagonal media de huella de indentacion</i>
E	<i>Modulo de Young</i>
e	<i>Deformación Ingenieril</i>
EP	<i>Endurecimiento por Precipitación</i>
F	<i>Carga Aplicada</i>
Fe	<i>Hierro</i>
Fmax	<i>Carga Máxima</i>
Fu	<i>Carga Ultima</i>
GTAW	<i>Gas Tugsten Arc Welding (Soldadura de Tungsteno con arco eléctrico y gas)</i>
Hv	<i>Dureza Vickers</i>
I	<i>Corriente de Soldadura</i>
L	<i>Longitud entre marcas calibradas</i>
Lf	<i>Longitud final entre marcas calibradas</i>
Lo	<i>Longitud inicial entre marcar calibradas</i>
m	<i>Coeficiente de Endurecimiento</i>
MB	<i>Material Base</i>
N	<i>Newton</i>
NF	<i>Numero de Ferrita</i>
Ni	<i>Níquel</i>
P	<i>Carga Aplicada</i>
S	<i>Esfuerzo Ingenieril</i>
Su	<i>Esfuerzo Ultimo</i>

Sy	<i>Esfuerzo de Fluencia</i>
TIG	<i>Tungsten Inert Gas (Soldadura de Tungsteno con gas inerte)</i>
UNS	<i>Unified Numbering System (Sistema de numeración unificado)</i>
V	<i>Voltios</i>
W	<i>Tungsteno</i>
W-Th	<i>Tungsteno – Torio</i>
ZA	<i>Zona afectada por el calor</i>
ZF	<i>Zona de fusión</i>
A	<i>Austenita</i>
γ	<i>Ferrita</i>
ϵ	<i>Deformación real</i>
σ	<i>Esfuerzo real</i>
σ_{max}	<i>Esfuerzo máximo</i>
σ_0	<i>Coeficiente de resistencia</i>
σ_u	<i>Esfuerzo ultimo</i>

Apéndice

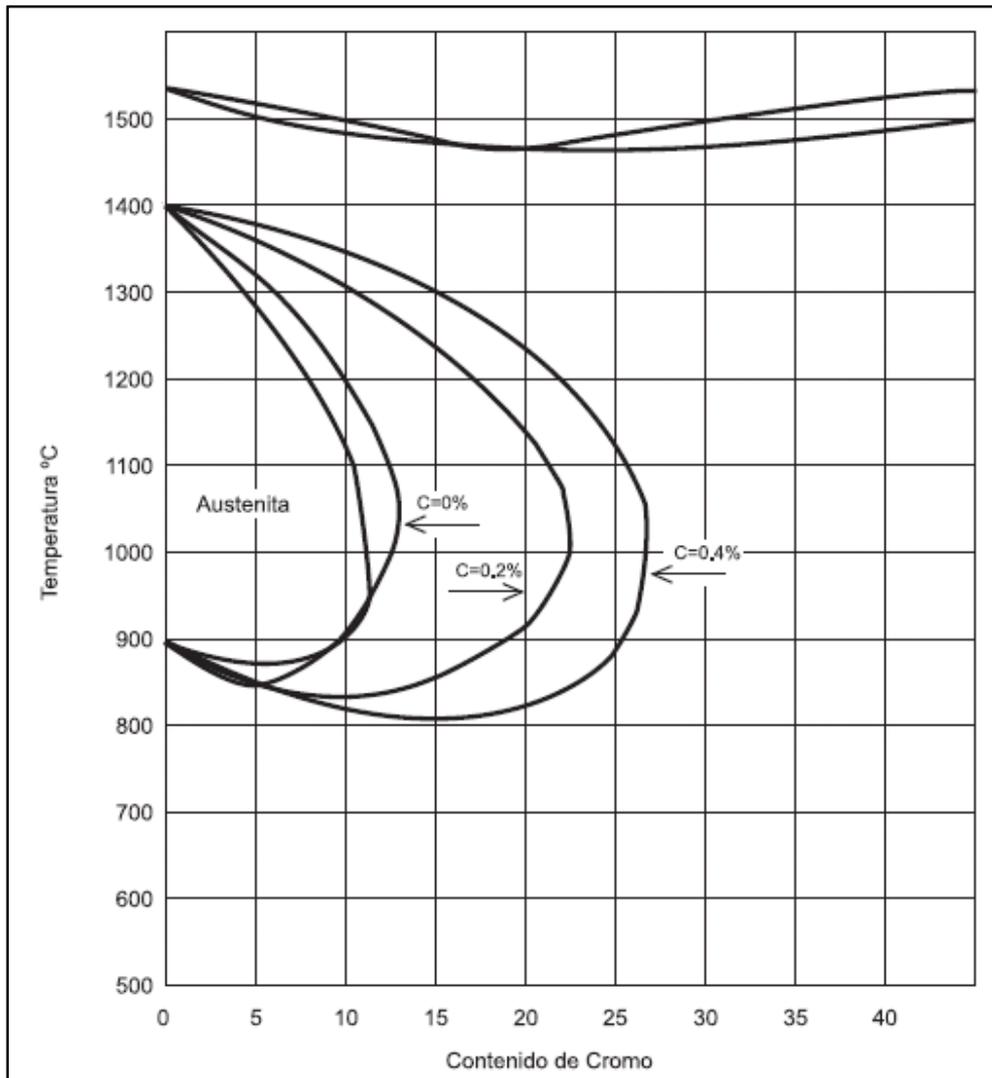


Figura 1. Transformación Martensítica en el enfriamiento.

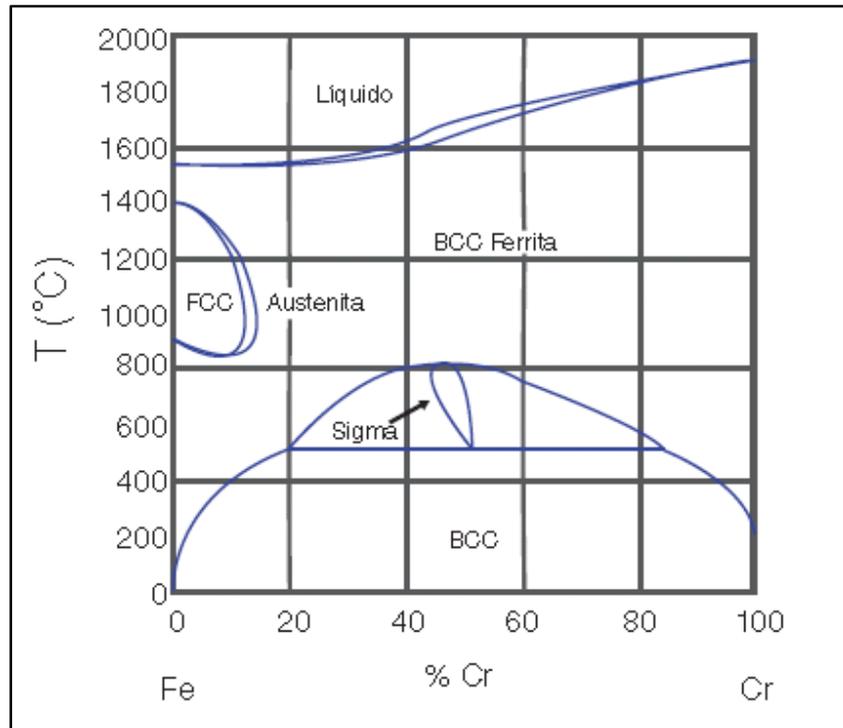


Figura 2. Diagrama de equilibrio Cr-Fe.



Figura 3. Corte de las probetas de ensayo.