



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

“ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DE LA SOLDADURA REALIZADA MEDIANTE EL PROCESO GTAW EN TUBERÍAS DE ACERO DÚPLEX 2205 EN POSICIÓN 6G”

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO

JARAMILLO MEDINA MARCO JAVIER
marco.jaramillo@epn.edu.ec

MARTÍNEZ OCAÑA FÁTIMA KATHERINE
fatima.martinez@epn.edu.ec

DIRECTOR:
Ing. CARLOS WIME DÍAZ CAMPOVERDE, M.Sc.
carlos.diaz@epn.edu.ec

CO-DIRECTOR:
Ing. GALO HOMERO BARRAGÁN CAMPOS, M.Sc.
galo.barragan@epn.edu.ec

Quito, octubre 2017

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **JARAMILLO MEDINA MARCO JAVIER** y **MÁRTINEZ OCAÑA FÁTIMA KATHERINE**, bajo mi supervisión.

Ing. Carlos Díaz, M.Sc.

DIRECTOR DE PROYECTO

Ing. Galo Barragán, M.Sc.

CO-DIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Nosotros, **Marco Javier Jaramillo Medina y Fátima Katherine Martínez Ocaña**, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de vuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Marco Javier Jaramillo Medina

Fátima Katherine Martínez Ocaña

DEDICATORIA

El presente trabajo es dedicado a mi Dios todo poderoso y a la Santísima Virgen del Quinche por darme el aliento necesario cuando más lo necesitaba.

A mis padres Marco y Janneth por todo el esfuerzo y sacrificio a lo largo de todos estos años.

A mi abuelito Simon Jaramillo que en paz descansa por brindarme su protección siempre.

Javier

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi Dios todo poderoso y a la Santísima Virgen del Quinche por brindarme su protección a lo largo de toda mi vida estudiantil.

A mis padres Marco y Janneth por todo el esfuerzo, dedicación, consejos y apoyo que me brindan incondicionalmente ya que sin ellos no fuera la persona que soy ahora, siempre les estaré eternamente agradecidos por todo el sacrificio que hicieron y lo siguen haciendo por mí, tantos momentos duros que tuvimos que pasar pero que al fin están rindiendo sus frutos.

A mis abuelitos Simon y Ester por todo el cariño y amor brindado en todo este tiempo.

A mis tíos Carlos, Elvio y Juan ya que hicieron el papel de padres durante muchos años, además por todos los consejos y por enseñarme a ser una persona humilde de corazón y fuerte de carácter.

A mis tías Patricia, Alexandra, Yolanda y María ya que hicieron el papel de madre y nunca dejaron que nada me falte.

A mi hermano Marco Antonio por los consejos de vida que siempre los llevo presentes además de las locuras que hicimos de jóvenes.

A mis primos Daniela, Alejandro, Andrea y Carla que son los hermanos con los que crecí por todo su apoyo en los momentos más difíciles, por las locuras y travesuras que vivimos todos estos años y por las que vendrán.

A mi cosa Katy Liz ya que su llegada a mi vida fue un momento clave para mí, además de todo el amor, locuras, peleas, paciencia y bellos momentos que vivimos juntos, así como del apoyo incondicional brindado por ella y por toda su familia.

A mis amigos Byron, Mauricio, Willy y Andrés por apoyarme en los momentos más difíciles de mi vida.

A mi amiga Fátima por todo el apoyo a lo largo de todos estos años, por los consejos, las actitudes y sobre todo por no dejar que situaciones sentimentales afecten mi labor estudiantil, gracias más mejor amiga.

A los Camaradas un grupo de amigos con los cuales siempre estuve seguro, además de tantas historias que quedaran en nuestros recuerdos, momentos felices, tristes, chupas malditas y esa alegría de saber que se puede confiar en una persona ajena a la familia.

Javier

DEDICATORIA

A mis padres Alicia y Duval por ser mi apoyo e inspiración, que con esfuerzo, amor y dedicación han inculcado en mi la responsabilidad de cumplir todos los objetivos trazados.

A mis hermanos, Pablo y Duval A., por estar presentes y levantarme en todos los momentos en que me sentí derrotada.

Fátima

AGRADECIMIENTO

A Dios por darme la sabiduría, coraje y valor suficiente para culminar con éxito esta etapa de mi vida.

A mis padres, Alicia y Duval, por ser mis primeros maestros de vida, mi mejor ejemplo para seguir adelante y darme todo sin pedir nada a cambio.

A mis hermanos, Duval A. y Pablo, por ser mis primeros amigos, confidentes y compañeros de travesuras.

A mi abuelita, Romelia, por su amor, consejos y sobre todo por enseñarme a encontrar la felicidad en las cosas sencillas.

A mis tíos, Eustorgio, Jorge y Franklin, tías y primos por todas sus palabras de aliento y nunca permitirme desfallecer a lo largo de mi vida.

A mi compañero y amigo de tesis, Javier, por darme su apoyo y consejos a lo largo de estos años de estudio, gracias por todo más mejor amigo.

A mis amigas Andrea, Gabriela, María Fernanda y Tamara, por darme incondicionalmente su amistad, las quiero “ponnys”.

A mi grupo de amigos, Los Camaradas, por todo su apoyo, cariño y sobre todo por ser la familia que uno elige.

A mis amig@s Alejandra P., Álvaro E., Cristina O., David M., Erika Q., Guillermo L., José Luis y Leslie S., por todos los momentos vividos a su lado, por sus consejos y sobre todo por su paciencia.

A mis dos grandes amores de “peloteo”, Potras y Dunamis, gracias por todos los triunfos logrados, tanto dentro como fuera de la cancha.

A mi estimada Institución, Escuela Politécnica Nacional y a su loable carrera de Ingeniería Mecánica, por acogerme durante todo estos años, gracias por todo el conocimiento dado para mi vida profesional y personal.

A mi querido y estimado director de Tesis, Ing. Carlos Díaz, por permitirme desarrollar este tema de tesis bajo su tutela y brindarme todo su conocimiento para llevarla a cabo.

Al Ing. Gabriel Velasteguí, Ing. Barragán y Jorge por darnos su apoyo en la realización de esta tesis, sin ustedes esto hoy no sería posible.

Fátima

ÍNDICE

CERTIFICACIÓN.....	i
DECLARACIÓN.....	ii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xiii
GLOSARIO DE TÉRMINOS	xiv
RESUMEN.....	xv
ABSTRACT	xvi
INTRODUCCIÓN.....	1
Pregunta de Investigación	2
Objetivo general.....	2
Objetivos específicos.....	2
1 MARCO TEÓRICO	3
1.1. Generalidades.....	3
1.1.1. Metalurgia de los aceros dúplex.....	3
1.1.2. Composición química.....	5
1.1.2.1. Cromo.....	5
1.1.2.2. Molibdeno	6
1.1.2.3. Nitrógeno	6
1.1.2.4. Níquel	6
1.1.3. Propiedades físicas de los aceros dúplex.....	7
1.1.4. Propiedades mecánicas de los aceros dúplex.....	7
1.1.4.1. Resistencia a la tracción	7
1.1.4.2. Resistencia al impacto	8
1.1.4.3. Resistencia a la corrosión	8
1.1.5. Aplicaciones de los aceros dúplex	10
1.2. Acero inoxidable dúplex 2205	11
1.3. Soldadura del acero dúplex 2205.....	12
1.3.1. Proceso GTAW	12
1.3.1.1. Equipo.....	12
1.3.1.2. Régimen de soldadura	13
1.3.1.3. Material de aporte	13
1.3.1.4. Parámetros	14

1.3.1.5.	Variables.....	14
1.3.1.6.	Gases utilizados.....	14
2.	METODOLOGÍA	16
2.1.	Soldadura GTAW.....	16
2.1.1.	Probetas para soldadura.....	16
2.1.2.	Equipos para soldadura	17
2.1.3.	Procedimiento para soldadura	17
2.2.	Tintas penetrantes	18
2.2.1.	Probeta para ensayo de tintas penetrantes.....	18
2.2.2.	Equipos para ensayo de tintas penetrantes.....	19
2.2.3.	Procedimiento de tintas penetrantes	19
2.3.	Ensayo de tracción.....	20
2.3.1.	Probetas para ensayo de tracción.....	20
2.3.2.	Equipos para ensayo de tracción	21
2.3.3.	Procedimiento del ensayo de tracción.....	21
2.4.	Ensayo de doblado guiado.....	22
2.4.1.	Doblado transversal de cara	22
2.4.2.	Doblado transversal de raíz	22
2.4.3.	Probetas para ensayo de doblado guiado de cara y raíz.....	22
2.4.4.	Equipos para ensayo de doblado guiado de cara y raíz	23
2.4.5.	Procedimiento del ensayo de doblado guiado	23
2.5.	Ensayos metalográficos	23
2.5.1.	Probetas utilizadas para ensayo de metalografía	24
2.5.2.	Equipos para ensayo metalográfico	24
2.5.3.	Procedimiento del ensayo metalográfico.....	26
2.6.	Ensayo de dureza	26
2.6.1.	Probetas para el ensayo de dureza.....	27
2.6.2.	Equipos para el ensayo de dureza	27
2.6.3.	Procedimiento del ensayo de dureza	28
2.7.	Análisis de composición química.....	28
2.7.1.	Probeta para el análisis de la composición química	29
2.7.2.	Equipos para el análisis de la composición química.....	29
2.7.3.	Procedimiento para el análisis de la composición química	30

3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	31
3.1.	Resultados.....	31
3.1.1.	Ensayo de tintas penetrantes.....	31
3.1.2.	Ensayo de tracción.....	31
3.1.3.	Ensayo de doblado guiado.....	33
3.1.4.	Ensayo metalográfico.....	33
3.1.4.1.	Zona transversal del cordón.....	33
3.1.4.2.	Cordón de soldadura.....	35
3.1.5.	Ensayo de dureza.....	38
3.1.5.1.	Zona transversal del cordón.....	38
3.1.5.2.	Cordón de soldadura.....	39
3.1.6.	Análisis de la composición química.....	41
3.2.	Discusión.....	41
3.2.1.	Ensayo de tintas penetrantes.....	41
3.2.2.	Ensayo de tracción.....	41
3.2.3.	Ensayo de doblado guiado.....	44
3.2.4.	Ensayo metalográfico.....	45
3.2.4.1.	Zona transversal del Cordón.....	46
3.2.4.2.	Cordón de soldadura.....	46
3.2.5.	Ensayo de dureza.....	47
3.2.5.1.	Zona transversal del cordón.....	47
3.2.5.2.	Cordón de soldadura.....	48
3.2.6.	Análisis de la composición química.....	52
3.3	Validación de la soldadura realizada.....	53
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	55
4.1.	Conclusiones.....	55
4.2.	Recomendaciones.....	56
	Referencias Bibliográficas.....	57
	Anexos.....	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Diagrama Energía de Impacto Vs Temperatura de diversos aceros dúplex.	8
Figura 2.1. Diseño de la junta de soldadura.	17
Figura 2.2. Probeta para ensayo de tintas penetrantes.	18
Figura 2.3. Dimensiones de la Probeta de Tracción para Tubería.	20
Figura 2.4. Dimensiones de las Probetas para ensayos de doblado de cara y doblado de raíz.	22
Figura 2.5. (a) Corte longitudinal a través de la soldadura, (b) Corte transversal.	24
Figura 2.6. Probetas de ensayo de dureza.	27
Figura 2.7. Probetas para composición química.	29
Figura 3.1. Fractura de la probeta T1.	32
Figura 3.2. Fractura de la probeta T2.	32
Figura 3.3. Probetas ensayadas (doblado de cara).	33
Figura 3.4. Probetas ensayadas (doblado de raíz).	33
Figura 3.5. Metalografía del MB (50X).	34
Figura 3.6. Metalografía del ZAC (100X).	34
Figura 3.7. Metalografía del ZAC (100X).	34
Figura 3.8. Metalografía del MA (100X).	35
Figura 3.9. Esquema del recorrido del barrido metalográfico.	35
Figura 3.10. Microestructura representativa parte superior del cordón (100X).	36
Figura 3.11. Microestructura representativa de la parte superior del cordón (200X).	36
Figura 3.12. Microestructura representativa parte media superior del cordón (100X).	36
Figura 3.13. Microestructura representativa parte central del cordón (100X).	37
Figura 3.14. Microestructura representativa pase de raíz cordón de soldadura (100X).	37
Figura 3.15. Microestructura representativa de la raíz y relleno de la junta soldada (200X).	37
Figura 3.16. Divisiones de la ZAC para el ensayo de Dureza.	38
Figura 3.17. Posiciones y tomas para el ensayo de dureza.	38
Figura 3.18. Ubicación de la indentación vs. Dureza vickers zona transversal del Cordón.	39
Figura 3.19. Posiciones y tomas de dureza del cordón de soldadura.	40
Figura 3.20. Ubicación de la indentación vs. Dureza vickers del cordón de soldadura.	40
Figura 3.21. Cuadro comparativo de resistencias de tracción.	42
Figura 3.22. Indicación en la zona de fallo espécimen T-1 (0,63X).	43

Figura 3.23. (a) Probeta 1 vista superior (b) Probeta 2 vista superior (c) Probeta 1 vista lateral (d) Probeta 2 vista lateral Doblado de Cara.....	44
Figura 3.24. (a) Probeta 1 vista superior (b) Probeta 2 vista superior (c) Probeta 1 vista lateral (d) Probeta 2 vista lateral Doblado de Raíz.	45
Figura 3.25. Metal Base Microestructura bifásica (100X).	46
Figura 3.26. Metal Base Microestructura bifásica referencia (200X).	46
Figura 3.27. Máximos y mínimos de cada sección.	48
Figura 3.28. Máximos y mínimos zona transversal del cordón.	48
Figura 3.29. Distribución de zonas cordón longitudinal de soldadura.	49
Figura 3.30. (a) Máximo y (b) Mínimo zona I.	49
Figura 3.31. (a) Máximo y (b) Mínimos zona II.	50
Figura 3.32. (a) Máximo y (b) Mínimos zona III.	50
Figura 3.33. (a) Máximo y (b) Mínimo zona IV.	51
Figura 3.34. Ubicación de la indentación vs. Dureza vickers cordón de soldadura.	51
Figura 3.35. Perfil de durezas (HRC) a lo largo de los pases de raíz y acabado.	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Tipos de Aceros Dúplex.	5
Tabla 1.2. Propiedades Físicas de los Aceros Dúplex a Altas Temperaturas.....	7
Tabla 1.3. Composición química del acero dúplex 2205.	11
Tabla 1.4. Propiedades físicas del acero dúplex 2205.	11
Tabla 1.5. Propiedades mecánicas del acero dúplex 2205.	12
Tabla 1.6. Diámetro de electrodo e intensidad de corriente para soldadura GTAW. ...	13
Tabla 1.7. Polaridad, rango de amperaje, rango de voltaje y rango de velocidad de avance en función del pase realizado.	14
Tabla 2.1. Especificaciones de la máquina soldadura.....	17
Tabla 2.2. Materiales para ensayo de tintas penetrantes.	19
Tabla 2.3. Especificaciones de la máquina universal de ensayos.	21
Tabla 2.4. Especificaciones de la máquina universal de ensayos de doblado.....	23
Tabla 2.5. Especificaciones máquina de desbaste grueso.	25
Tabla 2.6. Especificaciones máquina devastadora y pulidora.	25
Tabla 2.7. Especificaciones microscopio metalográfico.	26
Tabla 2.8. Especificaciones durómetro.	28
Tabla 2.9. Especificaciones espectrómetro de chispa.....	30
Tabla 3.1. Resultados del Ensayo de Tracción.	31
Tabla 3.2. Resultados del análisis de composición química.....	41
Tabla 3.3. Comparación composición química acero dúplex.....	53
Tabla 3.4. Hoja de validación para la soldadura.....	54

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO I. Propiedades Físicas a Temperatura Ambiente de los Aceros Dúplex.....	60
ANEXO II. Propiedades Físicas a Altas Temperaturas de los Aceros Dúplex	61
ANEXO III. WPS	63
ANEXO IV. Número de Probetas para Ensayos de Tracción y Doblado	65
ANEXO V. Informe de Tintas Penetrantes	66
ANEXO VI. Informe de Ensayo de Tracción.....	70
ANEXO VII. Informe Análisis de la composición química	73

GLOSARIO DE TÉRMINOS

GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
γ	Austenita
δ	Ferrita
AOD	Argon-oxygen decarburisation (Descarburación de argón y oxígeno)
VOD	Vacuum oxygen decarburisation (Descarburación con oxígeno al vacío)
VARP	Vacuum arc remelting process (Proceso de refundición del arco de vacío)
σ	Fase sigma
χ	Fase chi
γ	Fase gamma
Ni	Níquel
N	Nitrógeno
Mo	Molibdeno
Cr	Cromo
I	Intensidad de Corriente
V	Voltaje
S	Velocidad de avance
MB	Metal Base
Ar	Argón
He	Helio
WPS	Welding Procedure Specification
VI	Inspección Visual
ACG	Austenita de contorno de grano
AW	Austenita de Widmanstätten
AI	Austenita Intergranular
MB	Metal Base
MBI	Metal Base Izquierda
MBC	Metal Base Centro
ZAC	Zona Afectada por el Calor
MA	Material de Aporte

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se estudió y caracterizó la microestructura de la soldadura realizada mediante el proceso GTAW en tubería de acero dúplex 2205 en posición 6G. Para este propósito se analizó su comportamiento mecánico y metalográfico, mediante diferentes ensayos tanto destructivos como no destructivos los cuales permitieron cuantificar tanto las propiedades mecánicas y microestructurales que posee la soldadura después de ser realizada.

Una vez realizada la soldadura, bajo los parámetros establecidos en el WPS (Welding Procedure Specification), el mismo que sigue los lineamientos para este tipo de material, se procedió a realizar una serie de ensayos. En cuanto a los resultados obtenidos de los diferentes tipos de ensayos, la soldadura aprobó los criterios de aceptación que se encuentran descritos en el código ASME sección IX.

Dentro de las metalografías obtenidas es importante aclarar que se presentaron diversas microestructuras, las mismas que dependen de la región analizada, así como de su velocidad de enfriamiento. Entre las diversas microestructuras presentes se tiene la ACG, AW y AI las mismas que son propias de una soldadura de acero inoxidable dúplex 2205. Del mismo modo las durezas obtenidas dependen de dicha microestructura ya que estas están íntimamente ligadas entre sí. Adicionalmente se constató que la región que presenta mayor dureza, en comparación a las demás regiones, es la que se encuentra ubicada en la parte de la raíz del cordón de soldadura.

Palabras clave: Caracterización, microestructura, código ASME sección IX, proceso GTAW, soldadura, tubo de acero inoxidable dúplex 2205, velocidad de enfriamiento.

ABSTRACT

In the present research work it's considered and characterized the microstructure of the weld made by the GTAW process in duplex steel pipe 2205 in 6G position. For this purpose the mechanical and metallographic behavior was analyzed by different, destructive and non-destructive tests, which allowed to quantify both the mechanical and microstructural properties of the weld after being made.

Once the welding was carried out, under the parameters established in the WPS (Welding Procedure Specification), the same which follows the guidelines for this type of material, a series of tests were fulfilled. Regarding the results obtained from the different types of tests, the welding approved the criteria of acceptance that are described in the code ASME section IX. Within the metallography obtained it's important to clarify that several microstructures were produced, the same ones that depend on the analyzed region, as well as their cooling rate. Among the various presents microstructures we have the ACG, AW and AI, all this microstructures have the same properties of a duplex stainless steel weld 2205. In the same way, the hardnesses obtained depend on the mentioned microstructure, since they are intimately connected to each other. In addition, it was verified that the region which presents the greatest hardness, in comparison to the other regions, is located in the part of the root of the weld collar.

Keywords: Characterization, microstructure, code ASTM section IX, GTAW process, Weld, duplex stainless steel pipe 2205, cooling rate.

“ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DE LA SOLDADURA REALIZADA MEDIANTE EL PROCESO GTAW EN TUBERÍAS DE ACERO DÚPLEX 2205 EN POSICIÓN 6G”

INTRODUCCIÓN

La AWS (American Welding Society) define a GTAW como un proceso de soldadura de arco que utiliza el arco eléctrico que salta entre un electrodo de tungsteno (no consumible) y la pieza a soldar, mientras un gas inerte protege el baño de fusión sin la aplicación de presión (Jeffus, 2010). La implementación de la soldadura GTAW puede emplearse para soldar una gama de materiales más amplia en comparación a otros procesos de soldadura, entre los diversos materiales soldables con este proceso se tiene los aceros al carbono, aluminios, aceros inoxidable, etc. Ya que dicho proceso de soldadura es uno de los más utilizados en soldadura de aceros dúplex, las principales razones para emplear esta técnica de soldeo son que provee soldaduras de alta calidad, buen acabado superficial, defectos en la soldadura son casi nulos, siempre y cuando se siga de manera correcta el procedimiento de soldeo, además de generar una alta pureza metalúrgica.

El acero inoxidable dúplex 2205 se destaca principalmente por su composición bifásica, en cantidades aproximadamente iguales de ferrita y austenita. Además, dicho acero está constituido de elementos aleantes tales como nitrógeno, cromo, níquel y molibdeno que combinados con su constituyente mayoritario (Hierro-carbono) provee al acero de propiedades mecánicas y de resistencia a la corrosión por encima a la de otros aceros inoxidables.

Dado a las buenas características anticorrosivas que presenta el acero inoxidable dúplex 2205, lo ha hecho apto para diversos usos, entre los cuales se tiene a la industria de procesamiento químico, plantas de desalación, tuberías de petróleo, tuberías de intercambiadores de calor, plataformas de ultramar, plantas petroquímicas, industria de la celulosa (Ibarra M., Nuñez E. & Huerta J., 2010).

Al existir la necesidad de realizar procesos de fabricación, producción o reparación de elementos soldados, es importante llevar a cabo el estudio del efecto del proceso de soldadura GTAW en el acero inoxidable dúplex 2205 y de cómo este incide en la microestructura y en sus propiedades mecánicas.

El presente estudio se lleva a cabo en tubería de acero inoxidable dúplex 2205 ($\varnothing=12$ cm, $e=5$ mm), soldada en posición 6G mediante el proceso GTAW; empleando el electrodo EWTh-2 (Wolframio toriado al 2%), adicionalmente se tomaron los parámetros y variables más importantes para dicho proceso de soldadura como son la intensidad de corriente, el voltaje en el arco y la velocidad de avance, las mismas que se especifican en los documentos de soldadura anexados.

Pregunta de Investigación

El reciente auge del acero dúplex 2205 dentro del campo industrial, usado especialmente en instalaciones que necesitan características anticorrosivas, ha incrementado el uso de soldaduras no convencionales. A pesar de los beneficios que aporta la soldadura, la microestructura que se genera durante este proceso de soldadura ocasiona un cambio metalúrgico significativo que se traduce en un grave problema de corrosión que puede iniciarse en el cordón de soldadura o en el pie del mismo lo que provoca una pérdida y deterioro del material reduciendo su vida útil en muchos casos a semanas o meses.

Objetivo general

Estudiar y caracterizar la microestructura de la soldadura realizada mediante el proceso de soldadura GTAW en tuberías de acero dúplex 2205 en posición 6G.

Objetivos específicos

Obtener una soldadura óptima con el fin de realizar los respectivos análisis metalográficos y mecánicos al acero dúplex 2205.

Estudiar las diferentes fases que presenta la microestructura del material en la soldadura GTAW posición 6G.

Estudiar el comportamiento metalográfico y mecánico obtenido de la soldadura GTAW posición 6G.

1 MARCO TEÓRICO

1.1. Generalidades

Los aceros dúplex se caracterizan por poseer una microestructura bifásica, en proporciones casi similares de austenita (γ) y ferrita (δ). Para poder obtener la microestructura bifásica se emplea elementos aleantes, siendo los principales: Níquel (Ni), Nitrógeno (N), Cromo (Cr) y Molibdeno (Mo), siendo estos últimos los que confieren al acero dúplex una óptima resistencia a la corrosión y excelentes propiedades mecánicas.

Las características principales de los aceros dúplex son:

- Poseen carácter magnético.
- Buena soldabilidad.
- No pueden ser endurecidos mediante tratamientos térmicos.
- Buena resistencia a la corrosión ya sea esta general o por picadura.
- La resistencia a la tracción y punto de fluencia es mayor en comparación a los aceros austeníticos y ferríticos.
- Buena maleabilidad.
- Su resistencia a la corrosión por fatiga resulta estar en un rango intermedio con respecto a los aceros austeníticos y ferríticos.
- Excelente resistencia a la abrasión y erosión.
- Óptimo coeficiente de expansión térmica, esta característica resultar ser útil debido a que reduce las tensiones en soldaduras.

1.1.1. Metalurgia de los aceros dúplex

El proceso de fabricación de los aceros dúplex es similar a la de los aceros convencionales, pero cuenta con ciertas variantes, con el fin de obtener la microestructura bifásica. “Dicho proceso inicia con la fusión de hierro, chatarra y ferroaleaciones de acuerdo con el grado de acero a preparar” (TECNIACEROS, 2017).

Existen dos métodos de fusión para la obtención de un acero dúplex, el primero es fundir el material de alta pureza en un horno convencional de inducción y el segundo es colocar chatarra de alta aleación en un horno de arco eléctrico seguido de convertidores AOD, VOD o VARP, siendo éste el que produce un menor contenido de azufre; siempre y cuando la chatarra seleccionada sea la adecuada, los convertidores realicen condiciones reductoras y se dé una mezcla óptima.

La finalidad de este proceso es reducir al máximo la presencia de fósforo y azufre dentro del acero, puesto que esto influye directamente a la resistencia a la corrosión.

Para asegurar la obtención idónea de un acero dúplex, se tiene que tener en cuenta su composición química. Por ende, se debe determinar el porcentaje de ferrita (ver Ecuación 1.1.) presente en el acero, calculado como:

$$\%ferrita = -20,93 + 4,01 Cr_{eq} - 5,6 Ni_{eq} + 0,016 T$$

Ecuación 1.1. Determinación de porcentaje de ferrita.

Siendo T, la temperatura de recocido en °C; la misma que oscila entre 1050 a 1150 °C. Cr_{eq} y Ni_{eq} , se calculan mediante las Ecuación 1.2. y Ecuación 1.3., respectivamente.

$$Cr_{eq} = \%Cr + 1,75 \%Si + 0,88 \%Mo$$

Ecuación 1.2. Cálculo de Cromo equivalente. ¹

$$Ni_{eq} = \%Ni + 24,55 \%C + 21,75 \%N + 0,4 \%Cu$$

Ecuación 1.3. Cálculo de Níquel equivalente. ¹

Como se observa en la Ecuación 1.2. y Ecuación 1.3. la austenita se transforma en ferrita, para evitar este efecto el material debe ser sometido a un temple con agua, lo que asegura un enfriamiento rápido, evitando así la transición de fases en el metal.

Una vez obtenido el material fundido se le añade ciertos agentes para desoxidarlo e inocularlo, permitiendo así la eliminación de impurezas y reducción del contenido de Carbono, a este proceso se lo conoce como refinamiento. El refinamiento se logra gracias a la adición de: SiCaMn, SiCaCe, REM (Metales de tierras raras, por sus siglas en inglés), Al, Ti, Mg, Nb, Zr, etc., al añadir estos elementos los óxidos presentes se precipitan y sirven como sitios de nucleación múltiple para los cristales de ferrita, además de proporcionar un refinamiento de grano; cabe tener en cuenta que la velocidad de enfriamiento también tiene un efecto significativo en el tamaño de grano. (Gunn, 2003)

El acero líquido es colado en continuo, se corta en planchones y se forman los rollos rolados en caliente. El proceso termina con el trenes de laminación en frío, recocido y limpieza (TECNIACEROS, 2017). Cabe mencionar que el proceso de laminación consta de cuatro etapas que son: Recocido y decapado de la materia prima, trenes de laminación en frío, línea de recocido y limpieza final, y por último la estación de acabado superficial (CENDI, 2009).

La finalidad de los trenes de laminación es reducir el espesor de acero, siendo este lo más preciso posible, además en esta etapa se consigue una excelente planicidad.

¹ Las composiciones de los elementos en % en peso

Una vez finalizada la laminación se prosigue a la realización de un recocido, debido a que se desea eliminar los esfuerzos internos (endurecimiento) generados en el proceso anterior. La limpieza se realiza mediante baños electrolíticos y/o mezclas de ácidos.

Por último, el acabado superficial se da mediante el uso de rollos, para obtener mejores acabados se emplea pulido con abrasivos.

1.1.2. Composición química

Una característica importante de los aceros dúplex es su composición química, ya que es la responsable directa de conferir las propiedades específicas a dichos aceros, estos elementos dependiendo de su cantidad proporcionan características propias a cada acero inoxidable ya que al variar dichos porcentajes sus propiedades presentan cambios significativos.

En la Tabla 1.1. se muestran los porcentajes de los elementos aleantes de los diversos tipos de aceros dúplex presentes en el mercado.

Tabla 1.1. Tipos de Aceros Dúplex.

TIPO	UNS	COMPOSICIÓN, %								Otros
		C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	P	S	
329, No.7 Mo	S32900	0,10	2	1	25-30	3-6	1-2	0,045	0,03	---
3RE60	---	0,03	1,5	1,7	18,5	4,9	2,7	0,03	0,03	--
SAF2205/AF22	---	0,03	2	0,8	22	5,5	3	0,03	0,02	0,14N
FERRALIUM 255	S32550	0,03	2	1	26	5	3	0,03	0,02	0,17N, 20Cu
DP-3	---	0,03	2	1	25	6,5	3	0,03	0,02	0,5Cu 0,15 N

Fuente: (Molera Solá, 1990)

A continuación, se mencionan los principales elementos aleantes y el papel que desempeñan dentro del acero dúplex.

1.1.2.1. Cromo

Este elemento aleante es el encargado de formar una fina lámina, la misma que se encarga de proteger al material contra la corrosión provocada por el contacto con el medio ambiente. Esta lámina se conoce como capa pasiva, la misma que se forma en la superficie del acero, debido a que el cromo entra en contacto directo con el oxígeno del aire, igualmente cabe mencionar que esta capa es auto reparable en presencia de oxígeno.

Al ser mayor el contenido de cromo dentro del acero la resistencia a la corrosión aumenta. El contenido mínimo de este elemento dentro de un acero dúplex es de un 10,5%, puesto

que provoca la formación de una estructura cúbica centrada en el cuerpo (BCC) y a su vez la formación de la fase ferrítica.

A medida que el contenido de cromo aumenta dentro del acero la formación de fases intermetálicas (σ , χ y γ) también aumenta, por otra parte, el cromo brinda resistencia ante la oxidación producido por altas temperaturas.

1.1.2.2. Molibdeno

Se emplea para mejorar la resistencia a la corrosión por picaduras, esto se debe a que el molibdeno suprime los sitios activos mediante la formación de un oxi-hidróxido o ión de molibdato (Gunn, 2003) . Al igual que el cromo, el molibdeno promueve la formación de la fase ferrítica y a su vez la formación de fases intermetálicas (σ , χ y γ), las que resultan ser perjudiciales para el material. Debido a esto su contenido no debe superar el 4%.

1.1.2.3. Nitrógeno

Se emplea debido a que aumenta la resistencia a la corrosión por picaduras e intersticios, también la resistencia mecánica se ve mejorada de manera sustancial.

Los aceros dúplex gozan de mejor tenacidad gracias a este elemento, ya que el nitrógeno promueve a la formación de la fase austenítica y evita la formación de fases intermetálicas; ya que retrasa su formación.

Dentro de los aceros dúplex el nitrógeno aumenta la velocidad de endurecimiento por deformación de la austenita, incrementa la resistencia mecánica de la austenita por endurecimiento de la solución sólida (International Molybdenum Association, 2012).

1.1.2.4. Níquel

Dentro de los aceros dúplex es el encargado, al igual que el Nitrógeno, de formar la fase austenítica. Dentro de la microestructura del acero la adición de níquel provoca el cambio de estructura cristalina, haciendo que ésta pase de una estructura cúbica centrada en el cuerpo (BCC) a una cúbica centrada en las caras (FCC); es decir que promueve el cambio de fase ferrítica a austenítica (International Molybdenum Association, 2012).

Este elemento brinda una mejor resistencia a la corrosión en líquidos, aumenta tanto la ductilidad y tenacidad del acero dúplex, esto se debe a la estructura cristalina FCC. Además, mejora la capacidad del material para ser soldado.

La cantidad de níquel a ser añadido al acero dependerá directamente del contenido de cromo que presente la aleación, puesto que debe existir un balance entre la Ecuación 1.2. y Ecuación 1.3. Su porcentaje dentro del acero esta entre el 3% hasta un 6%.

1.1.3. Propiedades físicas de los aceros dúplex

Dentro de las propiedades físicas que presentan los aceros inoxidable dúplex se mencionan las más importantes como son la densidad, el calor específico, la resistencia eléctrica y el módulo de Young, debido a que estas propiedades son las más empleadas en la industria en general.

En el ANEXO I. se muestran varias de las propiedades físicas de diferentes aceros dúplex a temperatura ambiente, mientras que en el ANEXO II. se muestran las mismas propiedades físicas, pero a diferentes temperaturas.

1.1.4. Propiedades mecánicas de los aceros dúplex

Dentro de las propiedades mecánicas que los aceros inoxidable dúplex presentan es importante mencionar que estas son notablemente superiores a la de los aceros tradicionales, por consiguiente, la utilización del mismo es más recomendable cuando se va a trabajar en ambientes que requieran estándares elevados, tales como en la industria alimenticia donde la contaminación en el proceso productivo debe ser nula y el material debe reducir el riesgo de CBT (corrosión bajo tensiones), en intercambiadores de calor que emplean agua salada y por ende sus tuberías deben ser resistentes a la corrosión, en conducciones de recolección de gas y aplicaciones de procesos en plataformas marinas, puesto que se puede reducir el espesor del acero dúplex sin que este pierda su alta resistencia.

1.1.4.1. Resistencia a la tracción

Los aceros dúplex presentan una buena resistencia a la tracción en comparación con los aceros inoxidable austeníticos, como se muestra en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2. Propiedades Físicas de los Aceros Dúplex a Altas Temperaturas.

DESIGNACIÓN UNS	TIPO	RESISTENCIA A LA FLUENCIA (MPa)	RESISTENCIA MÁXIMA (MPa)
S30403	204L	170	485
S31603	316L	170	485
S31703	317L	305	515
S32205	2205	450	655
S32304	2304	400	600

Fuente: (Lázaro Giraldo, 2010)

1.1.4.2. Resistencia al impacto

La resistencia al impacto de los aceros dúplex se ve influenciada por la presencia de ferrita y de fases intermetálicas dentro del acero, al presentarse en mayor cantidad estas fases la resistencia al impacto disminuye.

El acero dúplex al ser sometido a temperaturas que oscilan entre 280 a 450 °C por largos periodos de tiempo, experimenta un envejecimiento; siendo esto también un factor importante para que la tenacidad del material decrezca y es por esto que el rango de trabajo para estos aceros se encuentra entre -50 a 300°C.

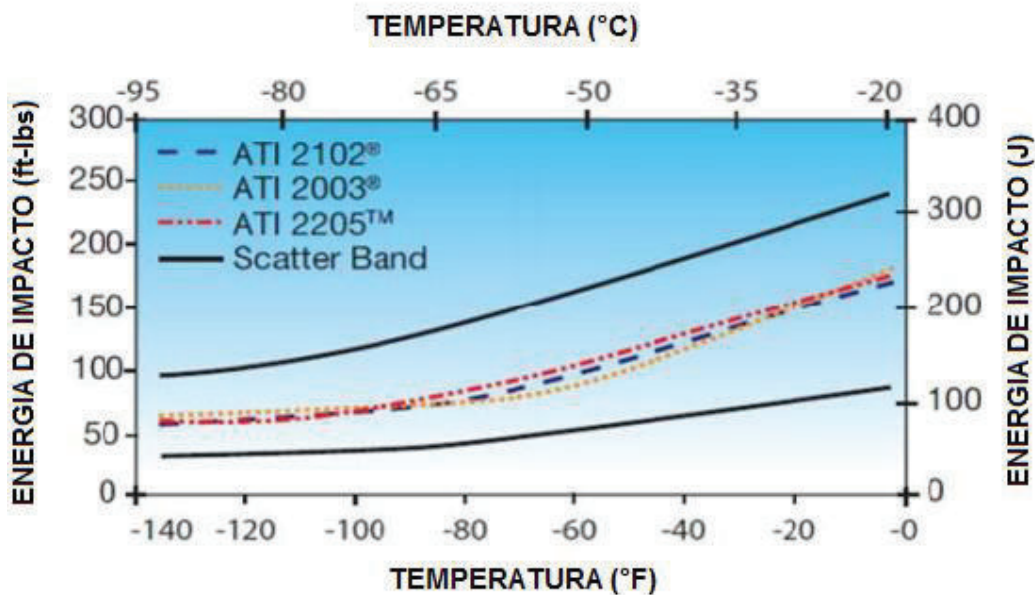


Figura 1.1. Diagrama Energía de Impacto Vs Temperatura de diversos aceros dúplex.
Fuente: (ATI Allegheny Ludlum, 2009)

1.1.4.3. Resistencia a la corrosión

Los aceros dúplex presentan una excelente resistencia a la corrosión, esto se debe al contenido de elementos aleantes, especialmente al Cromo.

Si dentro del acero dúplex la presencia de ferrita se encuentra entre un 25 a 30% el material resulta ser más resistente a la corrosión bajo tensiones causada por cloruros. Las principales corrosiones que se dan en los aceros inoxidable dúplex son:

1.1.4.3.1. Corrosión Uniforme

Es la corrosión más frecuente en los aceros. Se produce al momento de exponer al material ya sea a la atmósfera, agua o sustancias químicas. Lo que caracteriza a esta corrosión es la pérdida de material (reducción del espesor del acero), dicha pérdida se da en las zonas que han sido expuestas al medio corrosivo, además es evidenciable en el cambio de rugosidad del material.

La etapa de iniciación de esta corrosión empieza en la superficie del material. “El ataque se basa en la acción corrosiva celular localizada, donde los ánodos y cátodos actúan sobre la superficie de la misma al mismo tiempo”. (Mateos, 2017)

1.1.4.3.2. Corrosión por Picadura

La corrosión por picadura se hace presente cuando el material se encuentra en contacto con soluciones que contengan halogenuros (iones de bromuros, cloruros, etc.)

Este tipo de corrosión empieza en las zonas más débiles de la capa pasiva, principalmente donde se encuentran inclusiones o zonas intergranulares próximas a precipitados de cromo, ya sean estos carburos, fase sigma, etc. (Álvarez & Charles, 2009). Después empieza a propagarse incrementando la concentración de cloruros dentro de la picadura, los cuales sufren hidrólisis, lo que hace disminuir el pH conllevando a la disolución del acero a altas velocidades. (Bilmes & Pereda, 2010). Lo curioso de esta corrosión es que puede detenerse o reanudarse, ya sea en otro o el mismo lugar, si el acero presenta una alta tasa de repasivación. (Álvarez & Charles, 2009)

1.1.4.3.3. Corrosión por Rendijas (Crevice corrosion)

Se la conoce también como corrosión por aireación diferencial. Lo que caracteriza a esta corrosión es su iniciación, ya que se da en zonas confinadas tales como lugares donde existe falta de penetración de la soldadura, pequeñas separaciones entre compuestos solapados, por debajo de salpicaduras de soldadura, etc. Cabe mencionar que mayor será la probabilidad que exista corrosión por rendija en un entorno de volumen, si la brecha presente en éste es estrecha. (Gunn, 2003)

Una vez iniciada, se propaga gracias a que se altera la pasividad del acero, pues absorbe todo el oxígeno que se encuentra presente en la rendija lo cual provoca el incremento de la concentración de cationes metálicos; haciendo que éstos atraigan a aniones tales como el Cl⁻ (ion de cloro), esta corrosión se va propagando conforme la cantidad de iones de cloruro aumenta, por lo que se dice que es una corrosión auto-catalítica. Su propagación es semejante a la de la corrosión por picadura. (Bilmes & Pereda, 2010)

El acero dúplex debe poseer una capa pasiva resistente a las agresiones del medio externo, de igual manera una excelente cinética de las etapas de disolución anódica para evitar esta corrosión.

1.1.4.3.4. Corrosión Intergranular

Esta corrosión se da estrictamente en los límites de grano, ya sea por diferencia de la orientación de los cristales o por la diferencia de microestructuras. Dichos límites son idóneos para la precipitación de fases intermetálicas (fases χ , γ o σ) o compuestos metálicos (nitruros y carburos), de igual modo atrae solutos como boro, fósforo y silicio.

Uno de los métodos más efectivos para reducir o eliminar este tipo de corrosión es exponer al acero a un descenso repentino de temperatura, lo ideal es realizar un enfriamiento rápido después de realizar un tratamiento térmico. (Bruce, y otros, 2016)

1.1.4.3.5. Corrosión Bajo Tensiones

Por lo general a esta corrosión se la conoce como CBT, es un tipo de corrosión donde el acero se degrada debido a la acción simultánea de carga mecánica conjuntamente con el ambiente corrosivo. Esto da origen a la existencia de pequeñas fisuras, las cuales se propagan a una velocidad acelerada. (Fernández, 2015)

Este proceso ocurre con mayor frecuencia si se aumenta la concentración de cloruros, temperatura y el pH disminuye.

1.1.5. Aplicaciones de los aceros dúplex

Dado a las buenas características anticorrosivas que presenta este material, lo ha hecho apto para diversos usos, entre los cuales se tiene (Ibarra M., Nuñez E. & Huerta J., 2010):

- Industria de procesamiento químico.
- Plantas de desalación.
- Tuberías de petróleo, tuberías de intercambiadores de calor.
- Plataformas de ultramar.
- Pozos de gas.
- Tuberías en línea.
- Cuerpos de válvulas para manejar agua de mar y bombas de fundición.
- Plantas petroquímicas.
- Industria de la celulosa.

1.2. Acero inoxidable dúplex 2205

El acero inoxidable dúplex 2205 es uno de los aceros más utilizados a nivel industrial, por lo que el estudio de su comportamiento microestructural después de haber realizado una soldadura GTAW es necesaria, en este ámbito se procede a proporcionar información relevante acerca de este acero como es su composición química (Tabla 1.3.), sus propiedades físicas (Tabla 1.4.) y propiedades mecánicas (Tabla 1.5.).

Tabla 1.3. Composición química del acero dúplex 2205.

Elemento	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
Porcentaje	≤0,03	≤1	≤2	≤0,035	≤0,015	22-23	4,5-6,5	3-3,5	0,14-0,2

Fuente: (ACERINOX, 2013)

Tabla 1.4. Propiedades físicas del acero dúplex 2205.

	20°C	100°C	200°C	300°C
Densidad (Kg/dm ³)	7,8	--	--	--
Calor específico (J/Kg*K)	500	--	--	--
Módulo de elasticidad (GPa)	200	194	186	180
Coefficiente medio de dilatación térmica (10 ⁻⁶ *K ⁻¹)	---	13	13,5	14
Conductividad térmica (W/mK)	15	--	--	--
Resistencia eléctrica (Ω*mm ² /m)	0,80	--	--	--
Dureza (HB)	290			

Fuente: (ACERINOX, 2013)

Tabla 1.5. Propiedades mecánicas del acero dúplex 2205.

DESIGNACIÓN UNS	TIPO	RESISTENCIA A LA FLUENCIA (MPa)	RESISTENCIA MÁXIMA (MPa)	DUREZA (HV)
S32205/S31803	2205	450	620	305

Fuente: (Lázaro Giraldo, 2010) modificado

1.3. Soldadura del acero dúplex 2205

1.3.1. Proceso GTAW

La soldadura GTAW es un proceso mediante el cual la unión permanente de los metales base, se produce por medio del calentamiento de los mismos hasta su temperatura de fusión por medio de un arco voltaico que es producido por la interacción entre el electrodo de Tungsteno no consumible y las piezas de trabajo, la principal característica de este proceso es la implementación de una atmósfera protectora en la zona del arco la cual se obtiene mediante la inyección de un gas inerte, el cual puede ser completamente puro o una combinación de varios gases; entre estos gases inertes tenemos al Argón o Helio ya que estos proporcionan una alta pureza (99%) la cual asegura que no exista ningún tipo de contaminación, ni entre el electrodo ni en la pileta de soldadura (Soldadura, 2012)

La soldadura GTAW dentro del campo de los aceros dúplex es uno de los procesos más empleados ya que proporcionan ventajas comparativas superiores a otros procesos de soldeo tales como:

- Soldaduras de alta calidad.
- Buen acabado superficial.
- Defectos en la soldadura son nulos, siempre y cuando se siga de manera correcta el procedimiento de soldeo.
- Genera una alta pureza metalúrgica.

1.3.1.1. Equipo

Para llevar a cabo una correcta soldadura GTAW se deben emplear varios equipos indispensables entre los que se tiene:

- Fuente de Poder: Esta debe ser de corriente constante
- Unidad de alta frecuencia.
- Sistema economizador de gas: válvula solenoide
- Sistema de suministro de gas: cilindro, reductor de presión, flujómetro y mangueras

1.3.1.2. Régimen de soldadura

En el proceso de soldadura GTAW es importante reconocer las variables más importantes que deben ser controladas a fin de obtener una soldadura óptima, estas son las responsables directas del tipo de cordón resultante y son:

- Intensidad de corriente (I): Está en función del diámetro del material de aporte, como lo muestra la Tabla 1.6.
- Voltaje en el arco (V).
- Velocidad de avance de soldadura (S).

Tabla 1.6. Diámetro de electrodo e intensidad de corriente para soldadura GTAW.

Diámetro del electrodo [mm]	Corriente continua (DC-, Argón) [A]
0,25	0-15
0,51	5-20
1,02	15-80
1,59	70-150
2,38	150-250
3,18	250-400
3,97	350-500
4,76	500-750
6,35	750-1000

Fuente: (Soldadura, 2012)

1.3.1.3. Material de aporte

El material de aporte que se debe emplear en este tipo de proceso, y más específicamente para un acero dúplex 2205, debe ser enriquecido en níquel y unas condiciones de proceso específicas para un enfriamiento controlado, permiten obtener soldaduras con un correcto balance microestructural y químico. Con esto es posible mantener en la zona soldada unas propiedades mecánicas, de tenacidad y frente a la corrosión óptima (ACERINOX, 2013). Dadas las especificaciones anteriores el material de aporte que va a ser utilizado es el ER2209 designación AWS y el electrodo no consumible que se emplea es uno de Wolframio toriado al 2%; el cual debe estar rectificado de forma cónica con un ángulo de 30 a 60 grados y una pequeña parte plana en el extremo (International Molybdenum Association, 2012).

1.3.1.4. Parámetros

El tipo de corriente que se relaciona con este proceso es la corriente continua de polaridad directa, debido a que ese tipo de polaridad nos proporciona un cordón con una mayor profundidad lo que es ventajoso para este tipo de metal base.

Así mismo la progresión que se va a emplear es ascendente con una velocidad de avance constante y movimiento oscilante en todos los pases.

1.3.1.5. Variables

Como se mencionó las variables importantes a considerar en este proceso son la intensidad de corriente (I), voltaje del arco (V), y la velocidad de la soldadura (s).

- **Intensidad de corriente (I):** El rango de amperaje a emplearse es de 70 a 100[A] y este va a depender de cada pasada que se realice, en la Tabla 1.7 se muestra el número de pasadas con su correspondiente intensidad.
- **Voltaje en el arco (V):** El rango de voltaje a emplearse es de 8 a 10[V] y este va a depender de cada pasada que se realice, en la Tabla 1.7. se muestra el número de pasadas con su correspondiente voltaje.
- **Velocidad de avance (S):** La velocidad de soldadura es de 4-5 cm/min y esta va a ser constante en todas las pasadas que se realice.

Tabla 1.7. Polaridad, rango de amperaje, rango de voltaje y rango de velocidad de avance en función del pase realizado.

Pase (s)	Tipo y Polaridad	Rango de Amperaje [A]	Rango de Voltaje [V]	Rango de velocidad de avance [cm/min]
1	DC-	76	8	4
2	DC-	95	10	5
3	DC-	95	10	5
4	DC-	90	8	4

Fuente: Propia

1.3.1.6. Gases utilizados

En el proceso de soldadura GTAW la implementación de gases de protección es indispensable, debido a que los mismos son los encargados de asegurar la atmósfera protectora del proceso a fin de garantizar una soldadura de calidad. A continuación, se presentan los gases de protección empleados usualmente en este proceso.

Argón (Ar): La implementación del argón en este proceso es adecuada cuando se requiera una buena penetración, debido a que posee una baja conducción térmica lo que asegura

una concentración del calor en el centro del arco de soldadura. Además, que el argón provee una buena estabilidad del arco de soldadura y un fácil encendido del mismo.

Helio (He): La implementación del helio es menos frecuente en comparación a la del argón debido a que este necesita de un caudal mucho mayor, así mismo la tracción que se debe aplicar es mayor lo que ocasiona menor penetración y mayor ancho del cordón obtenido.

Mezcla Argón-Hidrógeno: Esta mezcla de gases se emplea únicamente para aceros inoxidable ya que el hidrógeno puede dar origen a fisuras en aceros al carbono o en aceros de baja aleación. El hidrógeno actúa como aditivo del argón (máximo hasta el 5% de hidrógeno) con lo que se obtiene varias ventajas entre las cuales tenemos el aumento del aporte térmico, aumenta la anchura y penetración del cordón de soldadura y permite aumentarla velocidad de desplazamiento. Esta mezcla es ampliamente utilizable puesto que el argón combustiona catalíticamente con el hidrógeno eliminando de esta manera al oxígeno, y evitando así que la soldadura se oxide. Pero esta mezcla no es recomendable para el acero dúplex puesto que la susceptibilidad a la fragilización por hidrógeno aumenta proporcionalmente con el aumento de la fracción de ferrita en la región de la soldadura. (Vasconcellos, 2008)

Mezcla Argón-Nitrógeno

La adición de nitrógeno es favorable para la soldadura de aceros dúplex puesto que se garantiza el porcentaje de austenita dentro del acero.

Normalmente se pierde nitrógeno y se observa la presencia de elemento que estabilizan a la ferrita cuando se emplea como gas de protección al argón en las juntas. Esto provoca un equilibrio desigual en las dos fases (austenita y ferrita). El nitrógeno juega un papel importante como estabilizador activo de la austenita, y la soldabilidad del acero dúplex se mejora añadiendo este elemento a temperaturas elevadas. (Pramanik A., Littlefair G., Basak K., 2015). Por lo tanto, debido a que el nitrógeno es un formador de austenita muy fuerte, la adición de pequeñas cantidades de nitrógeno en el gas de protección de argón durante la soldadura disminuye drásticamente la cantidad de ferrita en el metal de soldadura. (Muñoz , García, Guiñon, & Pérez, 2005). Al emplear esta mezcla también se tiene un menor riesgo de precipitación con nitruro en granos de ferrita cerca de la superficie de la soldadura. También se observa el efecto beneficioso del nitrógeno sobre la resistencia a la corrosión localizada en ambientes que contienen cloruro. (Nicolio C., Holmquist M., 2002)

En el caso del presente trabajo se procede a utilizar un gas de protección de 100% Argón, el cual además debe contar con un caudal de 15-20 litros/min.

2. METODOLOGÍA

Para efectuar el estudio y caracterización de la soldadura en la tubería de acero inoxidable dúplex 2205 es necesario realizar una serie de ensayos que permitan obtener información acerca del comportamiento mecánico y carácter microestructural que posee la misma, a fin de realizar una comparación con los criterios de aceptación que proporciona el código ASME sección IX. A su vez esta norma establece los diferentes ensayos mecánicos a realizar, dimensiones y número de las probetas (especímenes), criterios de aceptación, etc.

Dado que se trata de una soldadura, se lleva a cabo un ensayo no destructivo de tintas penetrantes, la cual tiene la finalidad de establecer defectos superficiales que se pueden presentar en el cordón de soldadura. Por otra parte, los ensayos destructivos a efectuarse son: Ensayo de tracción, Ensayo de doblado (cara y raíz), Ensayo de dureza, las cuales son las encargadas de proporcionar las características mecánicas de la soldadura. Mientras que el carácter microestructural se obtendrá mediante ensayos metalográficos (Macro y micrografía).

2.1. Soldadura GTAW

El primer paso por realizar es la soldadura de la tubería, la misma que debe ser acorde al tipo de material base que se posee, por lo que la mejor opción es la soldadura GTAW ya que como se referenció anteriormente este tipo de soldadura nos proporciona excelentes acabados con un mínimo de defectos. Dicha soldadura se rige al WPS previamente diseñado (ANEXO III.) con el fin de garantizar un cordón de soldadura óptimo.

2.1.1. Probetas para soldadura

El diseño de la junta a soldarse debe estar acorde a las dimensiones del material base proporcionado. Un buen diseño de la junta es un requerimiento indispensable al momento de tratar de reducir los diferentes defectos propios de una soldadura, especialmente una falta de penetración del material de aporte.

Como se muestra en la Figura 2.1. el biselado en V es de 60°, el mismo que se obtuvo mediante un proceso de torneado.

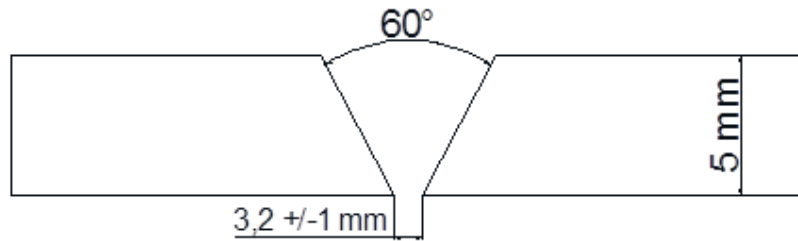


Figura 2.1. Diseño de la junta de soldadura.
Fuente: Propia

2.1.2. Equipos para soldadura

El proceso de soldadura se lleva a cabo en el Laboratorio de Soldadura de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional. El equipo que se emplea es: soldadura eléctrica para proceso TIG (GTAW), en la Tabla 2.1. se detalla sus especificaciones.

Tabla 2.1. Especificaciones de la máquina soldadura.

Nombre	SOLDADORA ELÉCTRICA			
Marca	LINCOLN ARC SQUARE WAVE TIG 255			
Proceso	<i>GTAW</i>	Voltaje (V)	10-32	
		Amperaje (A)	5-315	
Código	10022	Frecuencia (Hz)	60	
		Fase (Ph)	1	

Fuente: Propia

2.1.3. Procedimiento para soldadura

- Diseñar del WPS.
- Cortar por secciones de la tubería proporcional de acuerdo con los ensayos a realizarse.
- Realizar el biselado correspondiente al diseño expuesto en el WPS.
- Preparar y calibrar el equipo de soldeo bajo los parámetros establecidos en el WPS.
- Efectuar la soldadura de tres puntos equidistantes para la fijación de las probetas a unir.
- Colocar la probeta unida en posición 6G.

- Sellar los extremos y parte de la junta de soldadura con cinta resistente a alta temperatura, esto se realiza con el fin ejecutar la purga con el gas de protección.
- Verificar los principales parámetros (V, I) de soldadura en cada pase.
- Llevar a cabo la soldadura y limpieza de los diferentes pases especificados en el WPS.

2.2. Tintas penetrantes

Una vez que se realiza la soldadura es importante efectuar un ensayo no destructivo, complementario a la Inspección Visual (VI), en este caso un ensayo de tintas penetrantes. La misma que nos permite observar la presencia de defectos superficiales que se pueden presentar en el cordón de soldadura o alrededores.

2.2.1. Probeta para ensayo de tintas penetrantes

En este caso la probeta para el ensayo de tintas es la tubería soldada, ver Figura 2.2., puesto que la prueba se la realiza en todo el cordón obtenido. Es importante mencionar que, debido a la geometría de la probeta, ésta se dispone hacer evaluada en tres secciones uniformes abarcando así la totalidad de su perímetro.






Figura 2.2. Probeta para ensayo de tintas penetrantes.
Fuente: Propia

2.2.2. Equipos para ensayo de tintas penetrantes

El ensayo de tintas penetrantes se lleva a cabo dentro de las instalaciones del Laboratorio de Ensayos No Destructivos (END) de la Escuela Politécnica Nacional. Se emplean los siguientes materiales: Removedor, penetrante, revelador (ver Tabla 2.2.) adicionalmente se emplea el flexómetro y galga de medición.

Tabla 2.2. Materiales para ensayo de tintas penetrantes.

MATERIALES		
Limpiador / removedor:	Penetrante	Revelador
Met-L-check E-59 ^a	Met-L-check VP-30	Met-L-check D-70
		

Fuente: Propia

2.2.3. Procedimiento de tintas penetrantes

- Efectuar la limpieza de toda la superficie del cordón de soldadura utilizando el limpiador/removedor.
- Utilizar el flexómetro para dividir en secciones iguales la tubería y dibujar líneas de referencia.
- Anotar las posibles discontinuidades que son observadas a lo largo de todo el cordón de soldadura.
- Aplicar sobre la superficie el penetrante por 10 minutos.
- Realizar un lavado suave en agua para remover el penetrante excedente.
- Aplicar el revelador por 10 minutos.
- Observar si se presentan las indicaciones anotadas anteriormente y descartar las que no se presenten.
- Repetir estos pasos para las diferentes secciones en las que se dividió la tubería.

2.3. Ensayo de tracción

El ensayo de tracción es de suma importancia ya que por medio de este ensayo destructivo se valida la soldadura realizada. Este ensayo nos permite cuantificar la carga máxima que el espécimen soporta antes de sufrir la fractura, es importante mencionar que el código ASME, sección IX, artículo 1 brinda los criterios de aceptación, QW 153, y las dimensiones para los especímenes, QW-462.1 (b), a ser ensayados.

2.3.1. Probetas para ensayo de tracción

Luego de realizar el ensayo de tintas penetrantes, se realiza el corte de la tubería con la finalidad de obtener las probetas que serán mecanizadas y posteriormente ensayadas. Para este caso luego del corte se procede a efectuar el maquinado en la fresadora; con el objetivo de alcanzar las dimensiones estipuladas en el código ASME sección IX.

En cuanto a las dimensiones se establecen en la subsección QW-462.1 (b), la cual es específicamente para tubería. Las dimensiones se esquematizan en la Figura 2.3.

La cantidad de probetas a ensayar es determinada mediante el espesor de la tubería, esto se detalla en la subsección QW-451.1 del código ASME sección IX, ver ANEXO IV.

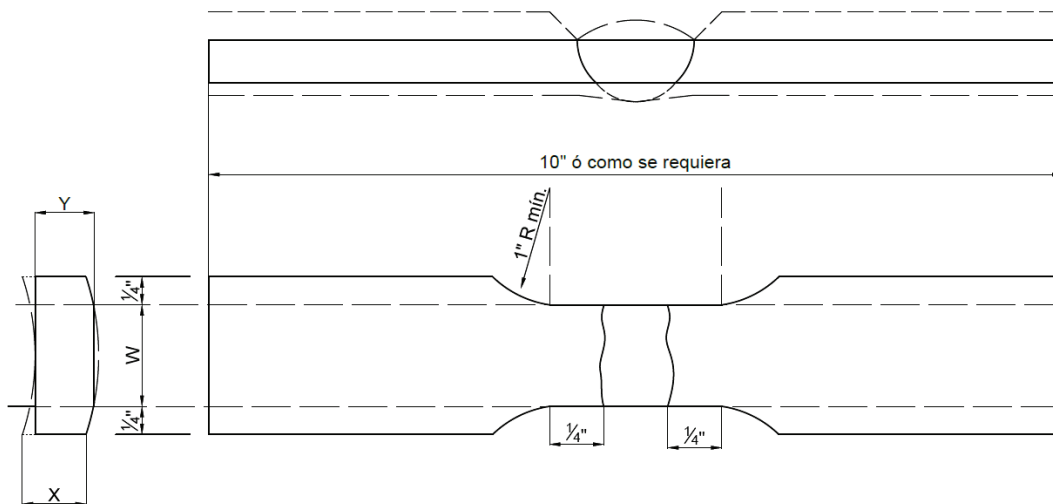


Figura 2.3. Dimensiones de la Probeta de Tracción para Tubería.

Fuente: (CÓDIGO ASME SECCIÓN IX, 1998) modificado

Dónde:

x = espesor de muestras con inclusión de refuerzo

y = espesor de espécimen

T = espesor de muestra con exclusión de refuerzo

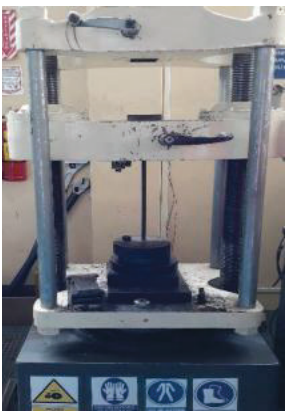
W = ancho de espécimen $\frac{3}{4}$ pulg.

2.3.2. Equipos para ensayo de tracción

El ensayo de tracción se realiza en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones (LAEV) de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional. Los equipos empleados son: calibrador pie de rey, marcador metálico y la máquina universal de ensayos de la cual se detallan las especificaciones en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Especificaciones de la máquina universal de ensayos.

Nombre	Máquina Universal de Ensayos		
Marca	TINIUS OLSEN		
Modelo	SÚPER L		
Proceso	<i>Ensayo de Tracción</i>	Capacidad de carga	3 000 Kn
		Aplicación de carga	Sistema Hidráulico



Fuente: Propia

2.3.3. Procedimiento del ensayo de tracción

- Preparar las probetas de acuerdo con el código ASME sección IX artículo 1.
- Tomar las diferentes medidas de espesor de las probetas a ensayar.
- Colocar la probeta en la máquina universal de ensayos, sujetando de manera adecuada para evitar el deslizamiento de las mismas.
- Programar la máquina de acuerdo con los valores de espesor y de la norma a emplear, para posteriormente encenderla y dar paso al ensayo.
- Proceder a registrar los datos obtenidos por el software con el que cuenta la máquina universal de ensayos.
- Retirar la probeta ensayada de la máquina.

2.4. Ensayo de doblado guiado

Los ensayos de doblado guiado, así como los de tracción son indispensables al momento de la validación de la soldadura realizada, ya que este tipo de ensayo proporciona información acerca de la existencia o no de indicaciones generadas en el cordón de soldadura. Los ensayos de doblado guiado que se realizan al material soldado son el de doblado transversal de cara y de raíz, de acuerdo con el código ASME sección IX, a continuación, se detalla cada uno de los ensayos mencionados.

2.4.1. Doblado transversal de cara

Este ensayo se describe en la subsección QW-161.2 del código ASME sección IX donde se expresa: “La soldadura es transversal al eje longitudinal del espécimen, el cual es doblado de modo que la superficie de cara se vuele a la superficie convexa del espécimen doblado”.

2.4.2. Doblado transversal de raíz

El código ASME sección IX, subsección QW-161.3 establece: “La soldadura es transversal al eje longitudinal del espécimen, el cual es doblado de modo que la superficie de raíz se vuele la superficie convexa del espécimen doblado”.

2.4.3. Probetas para ensayo de doblado guiado de cara y raíz

Una vez obtenida la soldadura de la tubería se procede a cortarla de tal manera que se obtengan las probetas con las dimensiones que se describen en el código ASME sección IX, sub sección QW 462.3 (a) como se muestra en la Figura 2.4.

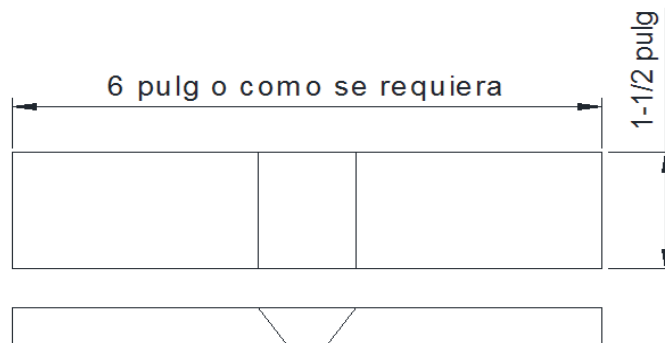


Figura 2.4. Dimensiones de las Probetas para ensayos de doblado de cara y doblado de raíz.
Fuente: (CÓDIGO ASME SECCIÓN IX, 1998) modificado

2.4.4. Equipos para ensayo de doblado guiado de cara y raíz

Tanto el ensayo de doblado de cara como de raíz se realizan en el Laboratorio de Soldadura de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional. El equipo utilizado es Máquina Universal de Ensayos de Doblar, las especificaciones se aprecian en Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Especificaciones de la máquina universal de ensayos de doblado.

Nombre	UNIDAD HIDRAÚLICA	
Marca	Sin Especificaciones	
Proceso	ENSAYO DE DOBLADO	
Rpm	1720	
Serie	Sin especificaciones	
Código	Sin especificaciones	

Fuente: Propia

2.4.5. Procedimiento del ensayo de doblado guiado

- Realizar el corte de la tubería para la obtención de las probetas, tomando en cuenta las dimensiones establecidas en el código ASME sección IX, ver Figura 2.4.
- Encender y calibrar la máquina de doblado.
- Ubicar las probetas obtenidas en la máquina de doblado, teniendo en cuenta en que especímenes se realiza el doblado de cara y doblado de raíz.
- Aplicar la carga a las probetas, hasta que estas adquieran la forma convexa.
- Retirar la probeta de la máquina de doblado para su análisis respectivo.

2.5. Ensayos metalográficos

Para determinar la microestructura que posee la soldadura efectuada en la tubería es indispensable realizar los ensayos metalográficos correspondientes (Macro y Micrografía), ya que en base a estas se podrá apreciar las diversas microestructuras existentes. Es importante mencionar que los ensayos se deben realizar tanto en la zona afectada por el calor (MB, ZAC, MA) como a lo largo del cordón de soldadura.

2.5.1. Probetas utilizadas para ensayo de metalografía

Las probetas para el ensayo metalográfico son extraídas juntamente con las probetas anteriormente señaladas. En este caso se distinguen dos probetas diferentes, una de ellas extraída del cordón de la soldadura de manera longitudinal (Figura 2.5. a), y otra de manera transversal (Figura 2.5 b) a fin de observar la microestructura que presenta la ZAC.

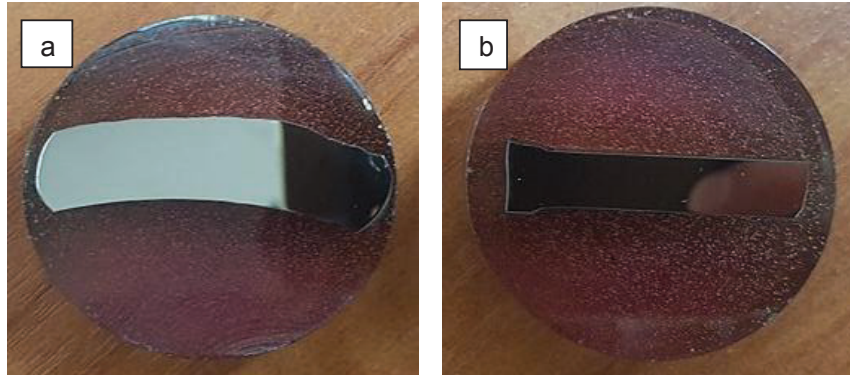



Figura 2.5. (a) Corte longitudinal a través de la soldadura, (b) Corte transversal.
Fuente: Propia

2.5.2. Equipos para ensayo metalográfico

El ensayo metalográfico se realiza en el Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla (LABMET) de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional. Los equipos, materiales, accesorios e insumos que se emplean son: Herramientas de corte (sierras manuales), máquina de desbaste grueso (especificaciones Tabla 2.5.), máquina de desbaste fino y pulido (especificaciones Tabla 2.6.), resinas, lubricante, líquido de suspensión, agua regia y microscopio micrográfico y metalográfico (especificaciones Tabla 2.7.).

Tabla 2.5. Especificaciones máquina de desbaste grueso.

Nombre	MÁQUINA DE DESBASTE GRUESO	
Marca	BUEHLER	
Modelo	121-0M-84	
# Abrasivo (granos/in²)	100	
Voltaje	220	
Amperaje	6,2 A	


Fuente: Propia

Tabla 2.6. Especificaciones máquina devastadora y pulidora.

Nombre	MÁQUINA DESBASTADORA Y PULIDORA	
Marca	FORCIMAT	
Modelo	FORCIMATPOL 2V	
Serie	N20161076	
Voltaje	230 V	
Frecuencias	50/60 Hz	

Fuente: Propia

Tabla 2.7. Especificaciones microscopio metalográfico.

Nombre	MICROSCOPIO METALOGRAFICO	
Marca	OLYMPUS	
Modelo	GX41F	
Serie	4D41167	
Voltaje	100-120 / 230-240 V	
Frecuencias	50/60 Hz	

Fuente: Propia

2.5.3. Procedimiento del ensayo metalográfico

- Cortar de manera manual las probetas de manera longitudinal y transversal al cordón de soldadura.
- Ubicar las probetas cortadas dentro de moldes los cuales son llenados con resina de poliéster, dejar secar por unos 30 minutos. Es importante que las caras de las probetas sean paralelas entre sí ya que esto es indispensable para el ensayo de dureza.
- Extraer las probetas del molde y realizar el desbaste grueso con el equipo mencionado anteriormente.
- Proceder al desbaste fino de las probetas mediante el equipo especializado.
- Efectuar el ataque químico con agua regia (ácido nítrico + ácido clorhídrico) con un tiempo de inmersión de 10 segundos.
- Observar las macrografías presentes en las probetas.
- Observar las micrografías presentes en las probetas.

2.6. Ensayo de dureza

La prueba de dureza, así como las otras pruebas realizadas es de suma importancia ya que ésta nos permite establecer la resistencia que presenta el material ensayado contra la deformación permanente ocasionada por la penetración de otro material de mayor dureza. Es importante indicar que la dureza depende de la estructura cristalina que el material

disponga, por lo que se toma en consideración los diferentes cordones efectuados en la soldadura del mismo modo en la ZAC.

2.6.1. Probetas para el ensayo de dureza

Las probetas para la prueba de dureza son las mismas que se emplean en la prueba metalográfica, puesto que la dureza varía conforme al cambio de la microestructura presente tanto en la ZAC como en el cordón longitudinal. Cabe mencionar que como se indica anteriormente las probetas a ser ensayadas deben tener sus caras lo más paralelas posible como se indica en la Figura 2.6. y sin presentar rastros de resina, de no cumplirse esta condición el ensayo de dureza no es admisible.




Figura 2.6. Probetas de ensayo de dureza.
Fuente: Propia

2.6.2. Equipos para el ensayo de dureza

El ensayo de dureza se realiza en el Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla (LABMET) de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional. Los equipos, materiales, accesorios que se emplean son: Máquina de microdureza (especificaciones Tabla 2.8.), software computacional, probetas a ensayar.

Tabla 2.8. Especificaciones durómetro.

Nombre	MICRODUROMETRO	
Marca	METKON	
Modelo	DUROLINE-M	
Serie	T20150002	
Dimensiones	57x58,5x25	
Peso	30 kg	

Fuente: Propia

2.6.3. Procedimiento del ensayo de dureza

- Encender y calibrar la máquina de ensayo de dureza (durómetro), teniendo en consideración que para el tipo de material a ensayar se necesita emplear una carga de 1 Kg con un tiempo de ejecución de 20 seg.
- Posicionar de manera adecuada las probetas en el durómetro.
- Realizar el ensayo bajo los parámetros ya establecidos.
- Emplear el programa Kameram, con el objetivo de visualizar las indentaciones hechas y proceder a tomar las fotografías respectivas.
- Emplear las herramientas computacionales proporcionadas por el software (multifocus, panoramic) con el objetivo de obtener una imagen lo suficientemente clara para un análisis posterior.
- Efectuar las medidas de dureza empleando la herramienta micro hardness que proporciona el programa computacional, es importante mencionar que esto se lo realiza mediante el trazo de las diagonales en las imágenes obtenidas, además se debe tener en consideración que estas deben ser lo más exactas posibles; pues de estas dependen la efectividad de los datos que el durómetro nos proporciona.

2.7. Análisis de composición química

El análisis de la composición química es de suma importancia ya que permite evaluar la calidad del material, la misma que se logra mediante la comparación de los valores en un análisis químico con valores referenciales establecidos en normativas. Los principales elementos

de comparación para un acero dúplex son: el contenido de carbono (C), manganeso (Mn), fósforo (P), azufre (S), silicio (Si), níquel (Ni), cromo (Cr), molibdeno (Mo) y nitrógeno (N).

2.7.1. Probeta para el análisis de la composición química

La probeta utilizada para el análisis de la composición química es extraída de la tubería de acero dúplex 2205, la misma que fue maquinada mediante una prensa hidráulica a fin de obtener una superficie plana como se observa en la Figura 2.7.

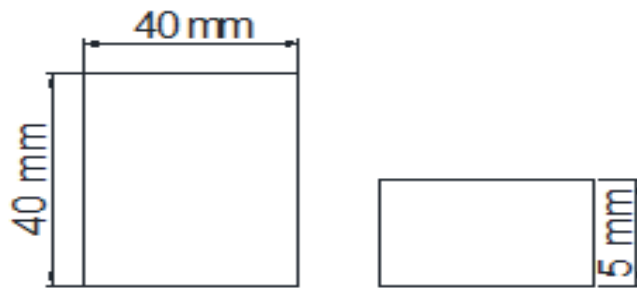


Figura 2.7. Probetas para composición química.
Fuente: Propia

2.7.2. Equipos para el análisis de la composición química

El ensayo de composición química se realiza en el Laboratorio de Fundición de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional. Los equipos, materiales, accesorios que se emplean son: Espectrómetro de chispa (especificaciones Tabla 2.9.), probeta a ensayar.

Tabla 2.9. Especificaciones espectrómetro de chispa.

Nombre	ESPECTRÓMETRO	
Marca	BRUKER	
Modelo	Q2 ION	
Voltaje	100/240 V	
Frecuencia	50/60 Hz	
Peso	28 kg.	

Fuente: Propia

2.7.3. Procedimiento para el análisis de la composición química

Para el análisis de composición química este ensayo emplea el método de espectrometría por chispa, en el cual el equipo genera un arco eléctrico directamente sobre la superficie de la probeta, calentando así la superficie a fin de excitar a los átomos, los mismo que emiten ondas que inciden sobre el espectroscopio, el mismo que entrega de manera cuantitativa los porcentajes de los aleantes principales del acero dúplex basándose en la longitud de onda característica de cada elemento.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se abordarán los resultados obtenidos de los diferentes ensayos tanto destructivos como no destructivos que fueron descritos en el capítulo anterior, a su vez que estos servirán para la comparación en base a los diferentes criterios de aceptación que presentan tanto el código ASME sección IX como de las propiedades específicas del material base (Acero dúplex 2205). Así mismo se discutirá las diferentes microestructuras obtenidas en la ZAC y en el cordón de soldadura, con el fin de dar una caracterización de la soldadura realizada, mediante sus propiedades mecánicas y microestructura propia.

3.1. Resultados

3.1.1. Ensayo de tintas penetrantes

Los resultados obtenidos mediante este ensayo indican la presencia de una sola mordedura de aproximadamente 1 mm de longitud, ver ANEXO V.

3.1.2. Ensayo de tracción

Los resultados obtenidos del ensayo de tracción se encuentran descritos en el informe técnico, ANEXO VI. En la Tabla 3.1. se muestra la carga máxima que cada espécimen registra y de la resistencia a la tracción de cada uno de estos. Adicionalmente se muestra en la Figura 3.1. y Figura 3.2. el lugar donde sucede la fractura de las probetas T1 y T2, respectivamente.

Tabla 3.1. Resultados del Ensayo de Tracción.

ID	Ancho Promedio	Espesor promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción		Obs.
	Mm	mm	Lbf	N	Ksi	MPa	
T-1	19,90	5,70	20.600	91.633	117,2	808,4	FJS
T-2	19,92	5,75	20.100	89.409	113,2	780,2	FJS

Fuente: LAEV, 2017

FJS: Fallo en la Junta soldada.



Fractura en el cordón de soldadura



Figura 3.1. Fractura de la probeta T1.
(a) Cara Frontal (b) Cara Posterior.
Fuente: Propia



Fractura en el cordón de soldadura



Figura 3.2. Fractura de la probeta T2.
(a) Cara Frontal (b) Cara Posterior.
Fuente: Propia

31.3. Ensayo de doblado guiado

Tanto en el ensayo de doblado guiado de cara y de raíz no se encontró indicaciones de ningún tipo como se muestra en las Figura 3.3. y Figura 3.4., respectivamente.



Figura 3.3. Probetas ensayadas (doblado de cara).
Fuente: Propia



Figura 3.4. Probetas ensayadas (doblado de raíz).
Fuente: Propia

3.1.4. Ensayo metalográfico

En el ensayo metalográfico realizado se observa las diferentes microestructuras que se presentan a continuación tanto en la zona transversal del cordón (Material Base, ZAC, Material de Aporte) como en el cordón de soldadura.

3.1.4.1. Zona transversal del cordón

Las metalografías más representativas obtenidas a lo largo de la zona transversal del cordón se presentan a continuación, teniendo en cuenta la subdivisión de esta zona.

MB

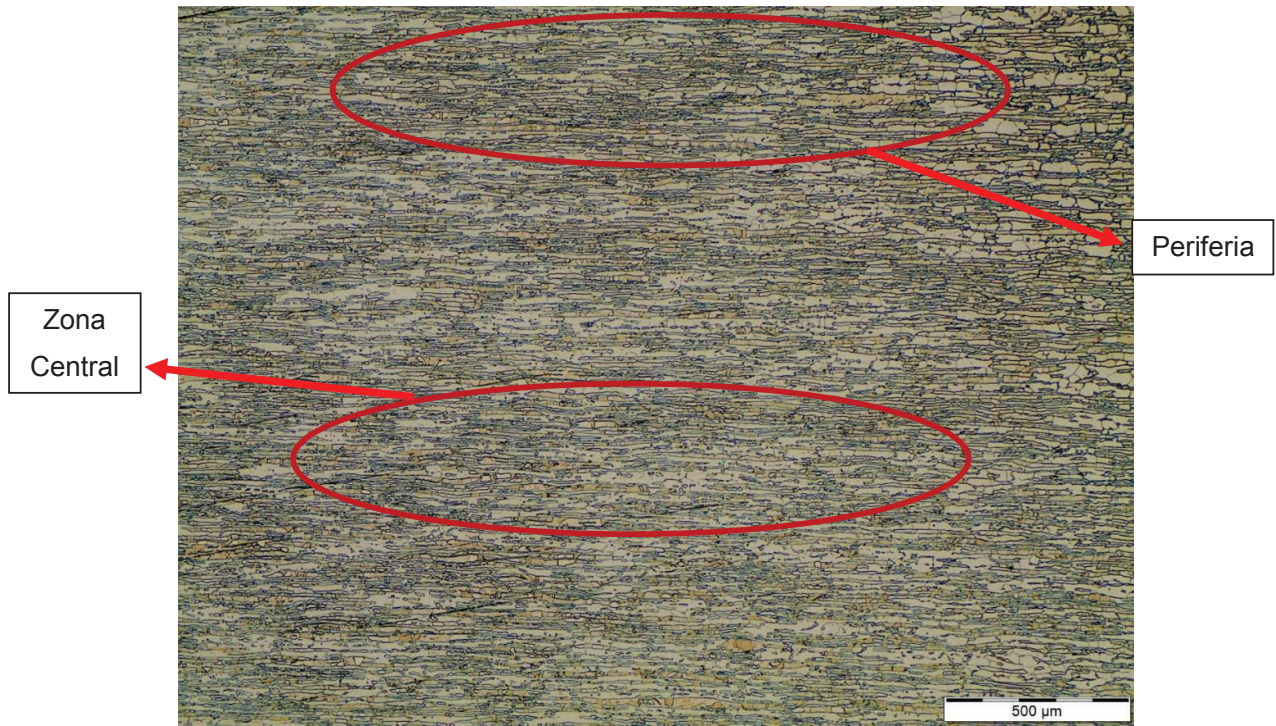


Figura 3.5. Metalografía del MB (50X).
Fuente: Propia

ZAC

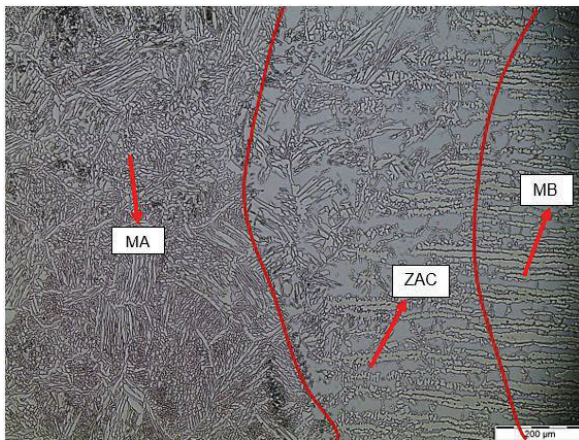


Figura 3.6. Metalografía del ZAC (100X).
Fuente: Propia

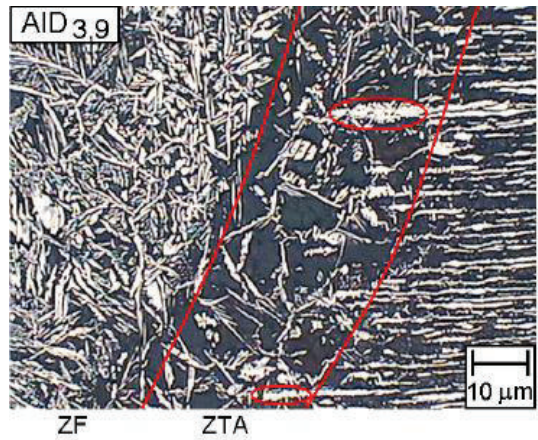


Figura 3.7. Metalografía del ZAC (100X).
Fuente: (Vasconcellos, 2008)

MA

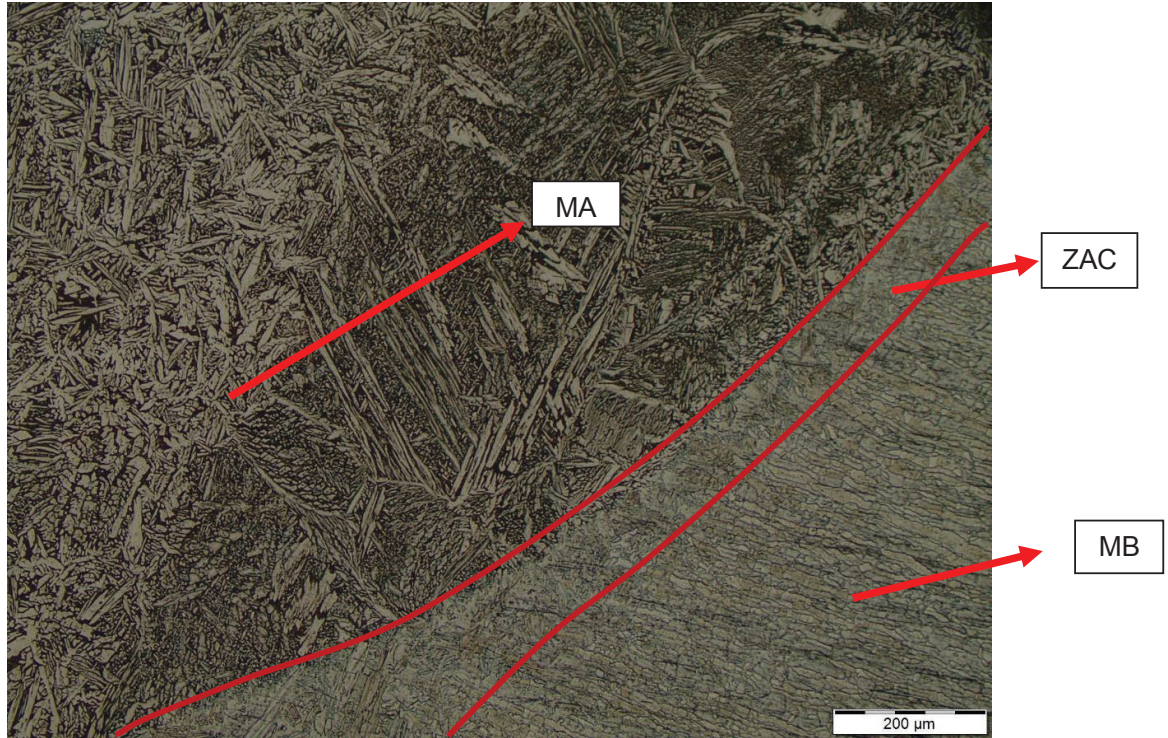


Figura 3.8. Metalografía del MA (100X).
Fuente: Propia

3.1.4.2. Cordón de soldadura

En este caso puntual cabe mencionar que se realiza un barrido a lo largo y ancho del cordón, como se muestra en la Figura 3.9., con la finalidad de abarcar la mayor superficie del cordón para obtener las metalografías más representativas del mismo.

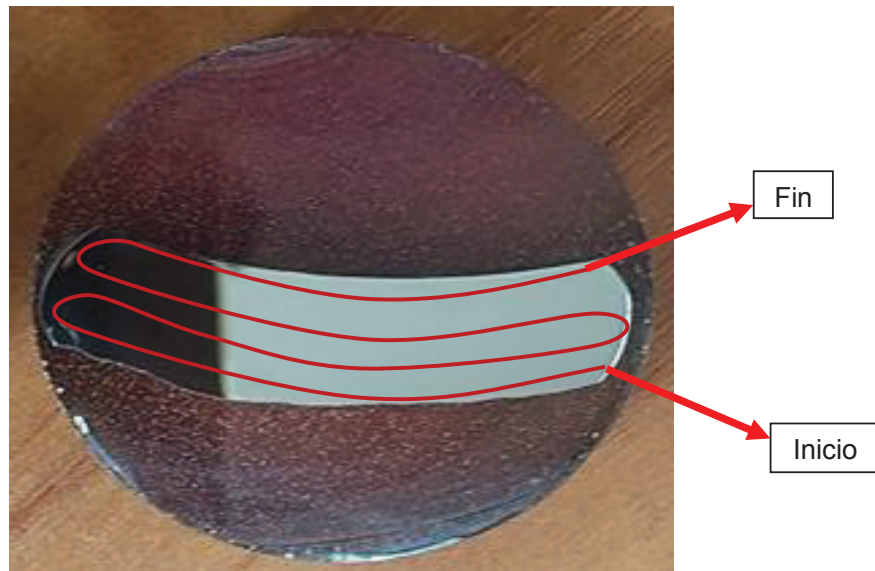


Figura 3.9. Esquema del recorrido del barrido metalográfico.
Fuente: Propia

A continuación, se presentan las micrográficas más representativas que se encuentran presentes en el cordón de soldadura (ver Figura 3.10. hasta Figura 3.15.).

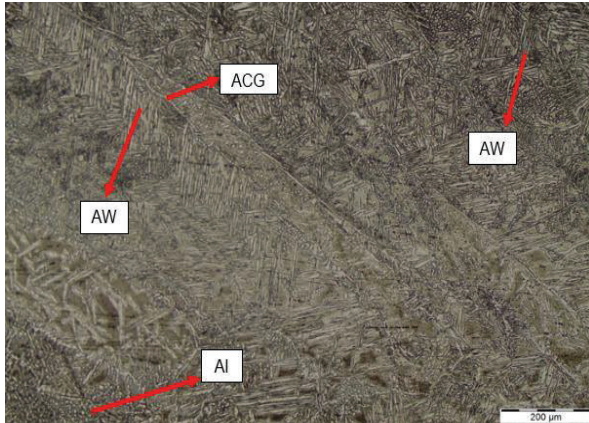


Figura 3.10. Microestructura representativa parte superior del cordón (100X).
Fuente: Propia

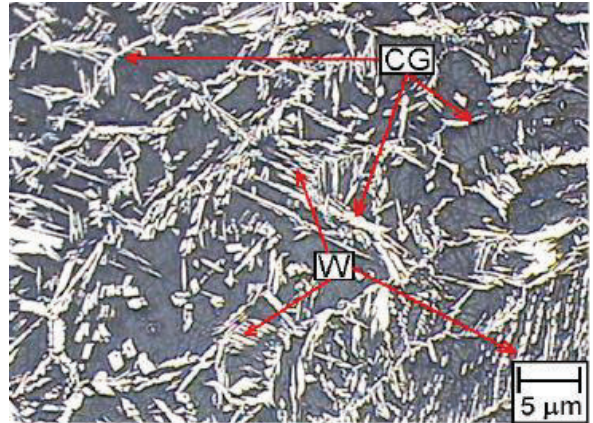


Figura 3.11. Microestructura representativa de la parte superior del cordón (200X).
Fuente: (Vasconcellos, 2008)

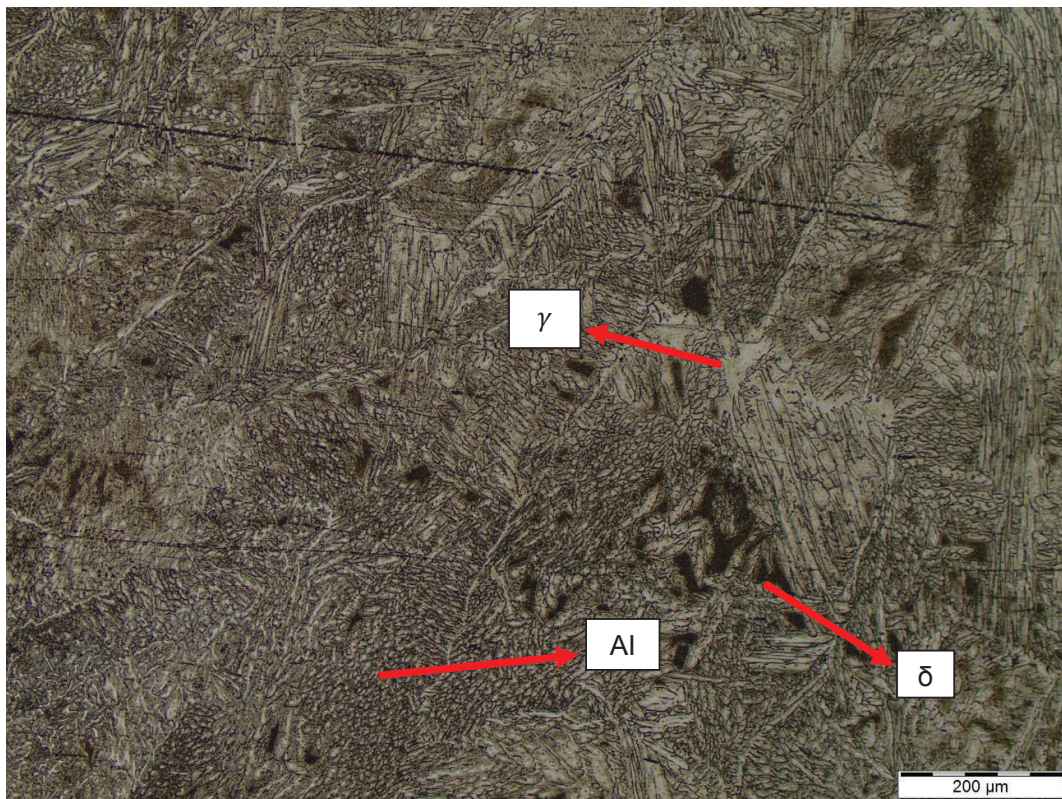


Figura 3.12. Microestructura representativa parte media superior del cordón (100X).
Fuente: Propia

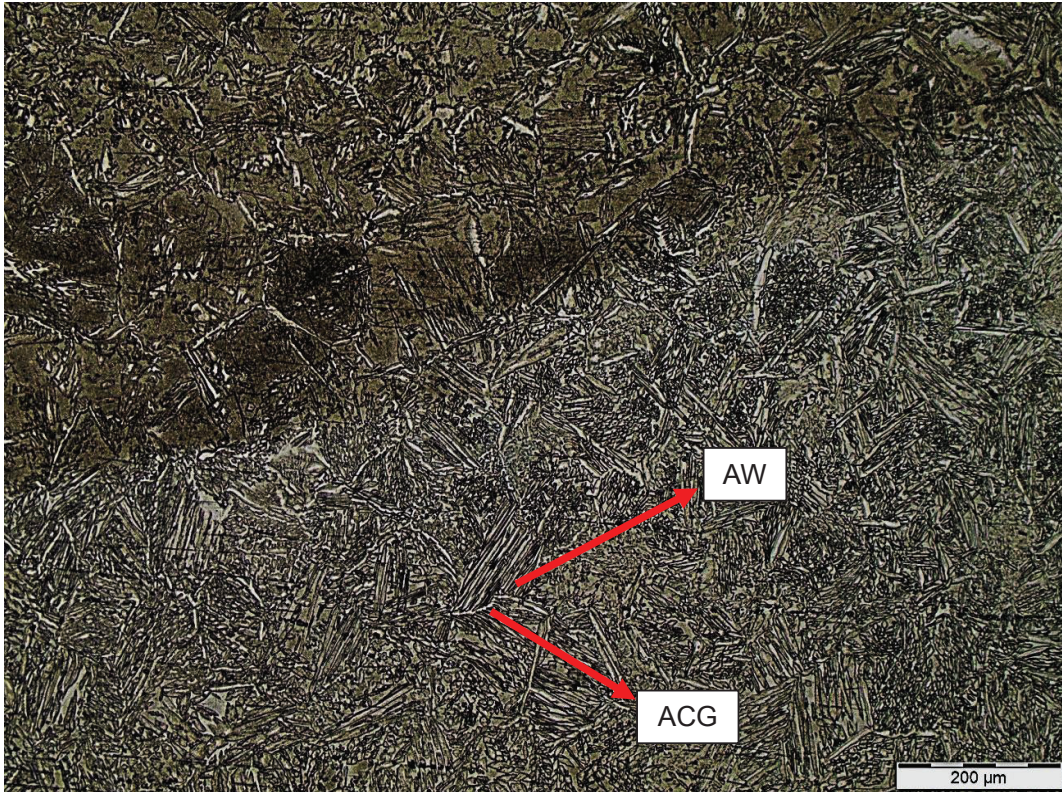


Figura 3.13. Microestructura representativa parte central del cordón (100X).
Fuente: Propia

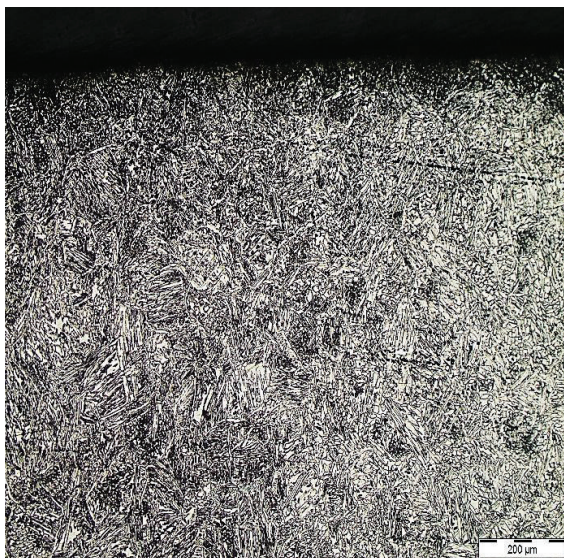


Figura 3.14. Microestructura representativa pase de raíz cordón de soldadura (100X).
Fuente: Propia

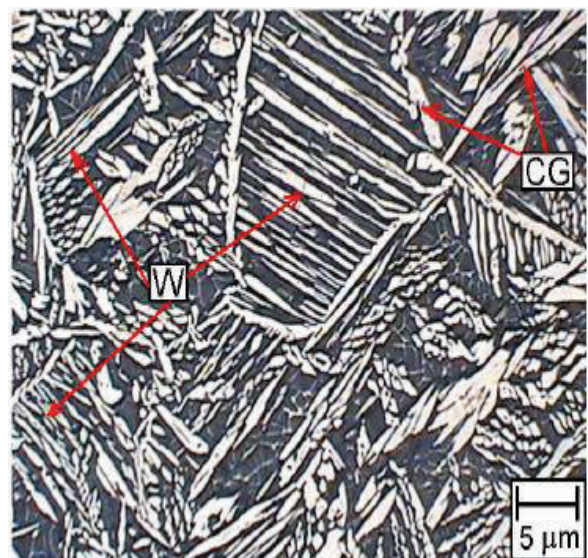


Figura 3.15. Microestructura representativa de la raíz y relleno de la junta soldada (200X).
Fuente: (Vasconcellos, 2008)

3.1.5. Ensayo de dureza

Los resultados obtenidos dentro de este ensayo son los mostrados a continuación tanto en la zona transversal del cordón como en el cordón de soldadura.

3.1.5.1. Zona transversal del cordón

Para realizar el ensayo de dureza se tiene en consideración que a la probeta se divide en tres secciones, ver Figura 3.16., las cuales son: el metal base (MB), la Zona afectada por el calor (ZAC) y el metal de aporte (MA). Además, es importante señalar que la toma de medidas se lo realiza de forma longitudinal realizando un barrido que va desde el material base hasta del material de aporte y en sentido ascendente, ver Figura 3.17.

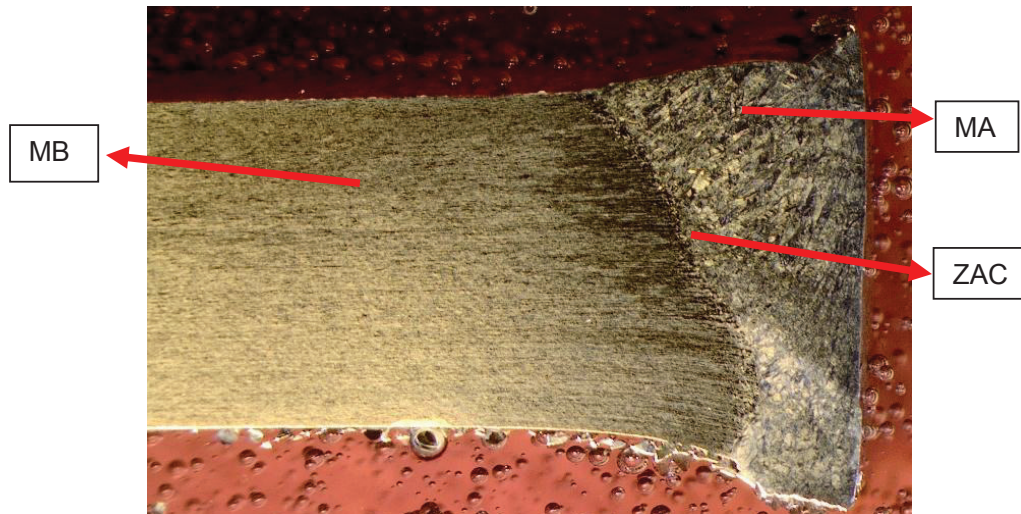


Figura 3.16. Divisiones de la ZAC para el ensayo de Dureza.
Fuente: Propia



Figura 3.17. Posiciones y tomas para el ensayo de dureza.
Fuente: Propia

A continuación, se esquematiza en la Figura 3.18. los datos obtenidos de las pruebas de dureza realizadas en las tres secciones antes mencionadas en función de la ubicación de la indentación realizada.

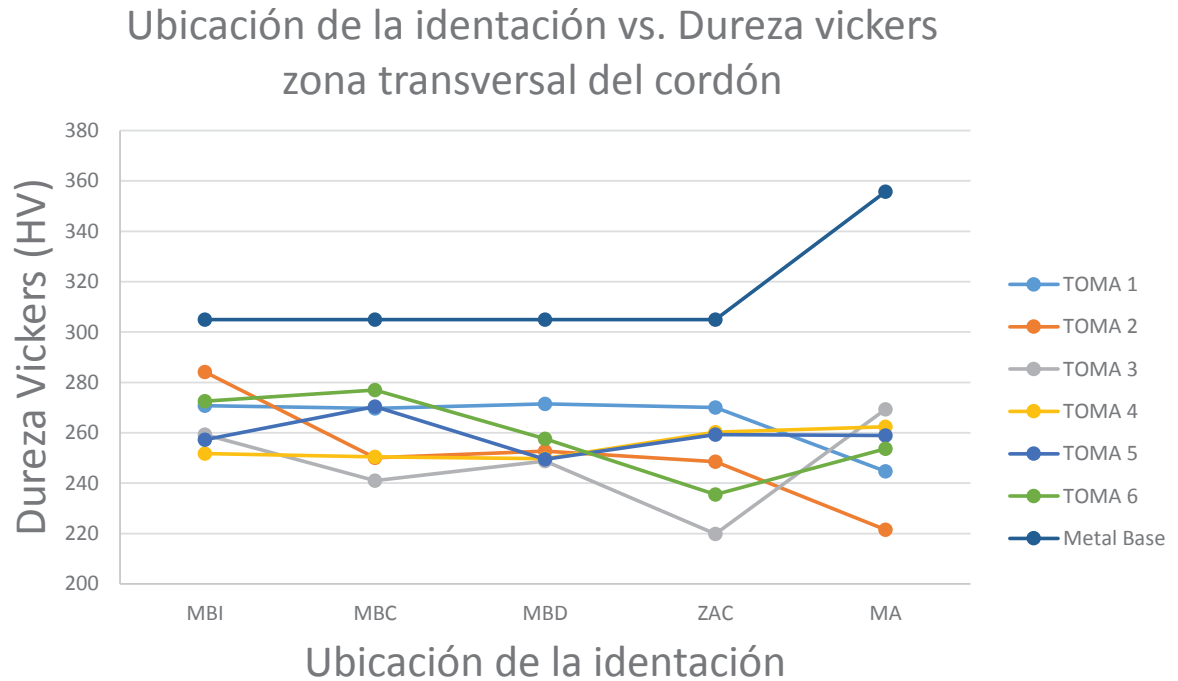


Figura 3.18. Ubicación de la indentación vs. Dureza vickers zona transversal del Cordón.
Fuente: Propia

3.1.5.2. Cordón de soldadura

Para obtener los resultados de este ensayo se procede a realizar un barrido el cual englobe la mayor superficie del cordón de soldadura, teniendo esto en cuenta ya que como se observa en la micrografía se tiene varias microestructuras las cuales afectan directamente a la dureza del material presente. La Figura 3.19. esquematiza el recorrido del barrido antes mencionado.

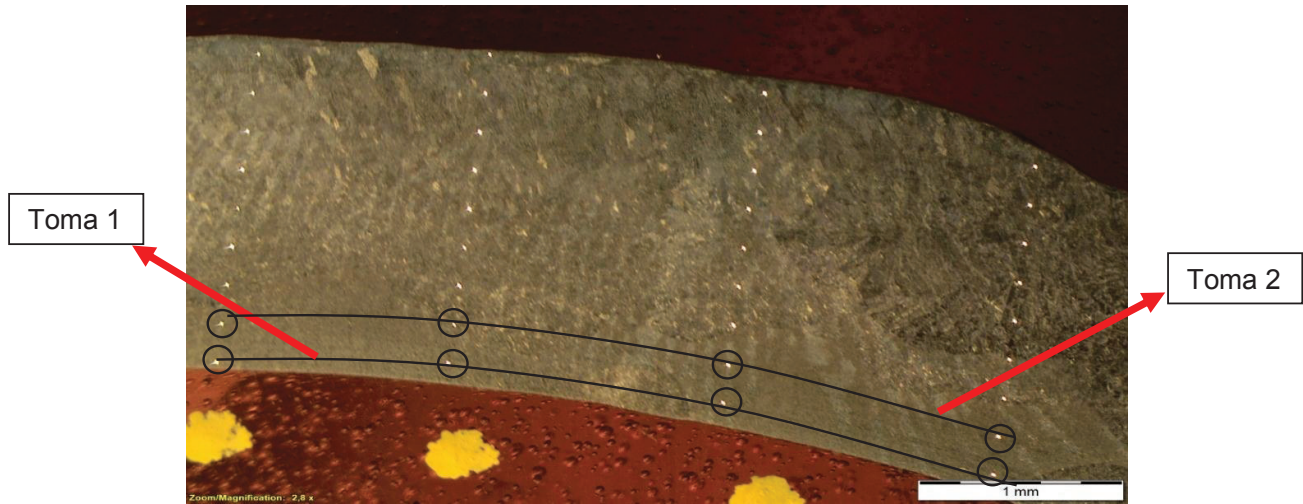


Figura 3.19. Posiciones y tomas de dureza del cordón de soldadura.
Fuente: Propia

A continuación, en la Figura 3.20., se presenta los datos de dureza obtenidos en función de la posición de cada indentación, teniendo en cuenta que el cordón es dividido en 9 regiones horizontales equidistantes y en cada una de ellas se procede a la toma de 4 medidas a lo largo década región (I, II, III, IV).

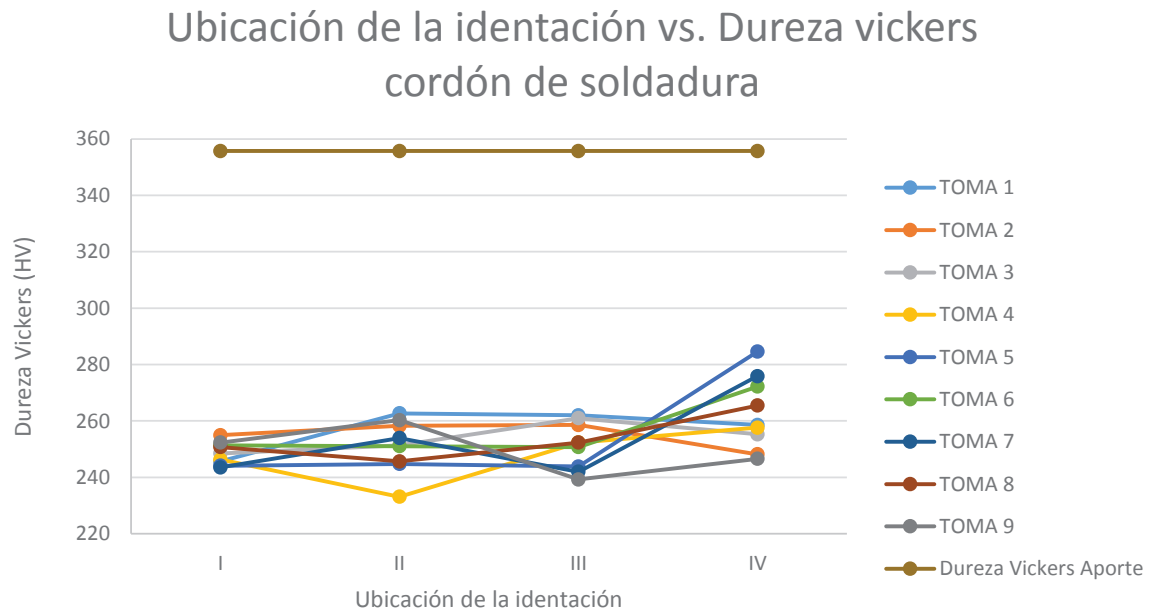


Figura 3.20. Ubicación de la indentación vs. Dureza vickers del cordón de soldadura.
Fuente: Propia

3.1.6. Análisis de la composición química

Los resultados obtenidos del ensayo de la composición química se encuentran detallados en el ANEXO VII. En la Tabla 3.2. se resumen los porcentajes de los elementos aleantes más representativos del acero dúplex, dichos valores son resultado de un promedio de la toma de 3 mediciones realizadas en la probeta.

Tabla 3.2. Resultados del análisis de composición química.

Elemento	Valor [%]
Carbono[C]	0,05
Manganeso [Mn]	1,311
Fosforo [P]	0,03
Azufre [S]	<0,003
Silicio [Si]	0,674
Níquel [Ni]	6,237
Cromo [Cr]	18,01
Molibdeno [Mo]	3,53

Fuente: Laboratorio Fundición, 2017

3.2. Discusión

3.2.1. Ensayo de tintas penetrantes

De acuerdo con este ensayo realizado la soldadura aprueba la inspección, dado que solo se encontró una mordedura de 1 mm de longitud por lo que cumple con los criterios de aceptación establecidos en el código ASME sección IX, subsección QW-1952.2, la cual indica que los exámenes de tintas penetrantes serán juzgados como inaceptables cuando la prueba exhiba indicaciones en exceso de los siguientes límites:

- Indicaciones lineales importantes
- Indicaciones redondeadas importantes mayores a 4,76 mm (3/16 pulg.).
- Cuarto o más indicaciones redondeadas importantes en una línea separada por 1,58 mm (1/16 pulg.) o menos (orilla a orilla).

3.2.2. Ensayo de tracción

Como se observa en la Tabla 3.1 la resistencia a la tracción de la soldadura realizada en el espécimen T-1 es de 117.2 ksi (808.4 MPa) superando en un 30.38% la resistencia

proporcionada por el material base la cual es de 90 ksi (620 MPa). Mientras que el espécimen T-2 obtuvo una resistencia ultima a la tracción de 113.2 ksi (780.2 MPa) la misma que excede en un 25.83% a la del metal base. Este análisis se esquematiza en la Figura 3.21.

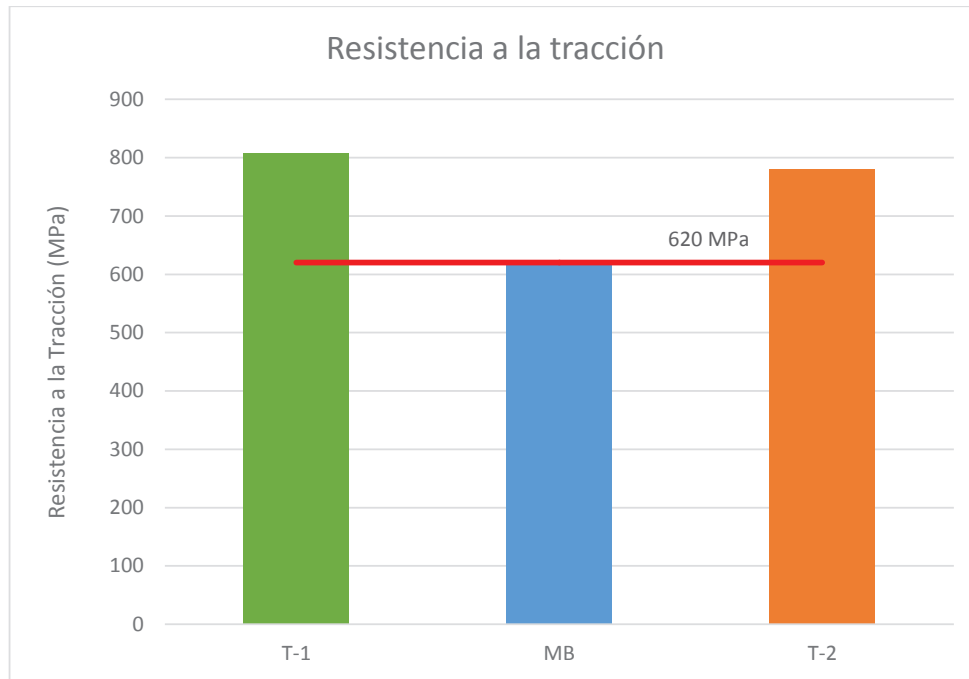


Figura 3.21. Cuadro comparativo de resistencias de tracción.
Fuente: Propia

Tanto el espécimen T-1 y T-2 presentan una fractura dúctil en la zona de fallo (ver Figura 3.1. y Figura 3.2.), misma que se encuentran ubicada en el cordón de soldadura, esto es evidenciado gracias al ensayo metalográfico ya que como se observa en la Figura 3.10. y Figura 3.13. dichas microestructuras no son homogéneas permitiendo así la formación de fisuras las cuales son las originarias de la fractura. (González, 2004)

Además, se debe tener en cuenta la orientación de los granos presentes en el cordón de soldadura ya que dichos granos al estar perpendiculares a la fuerza aplicada por la máquina universal de ensayos tienden a provocar la fractura en dicha zona.

El espécimen T-1 presenta un poro como se observa en la Figura 3.22., ya que presenta en la zona de fallo una indicación circular de 1,43 mm de diámetro, es importante aclarar que esta indicación no repercute en el resultado de aprobación. El espécimen T-2 no presenta ninguna indicación en la zona de fallo.

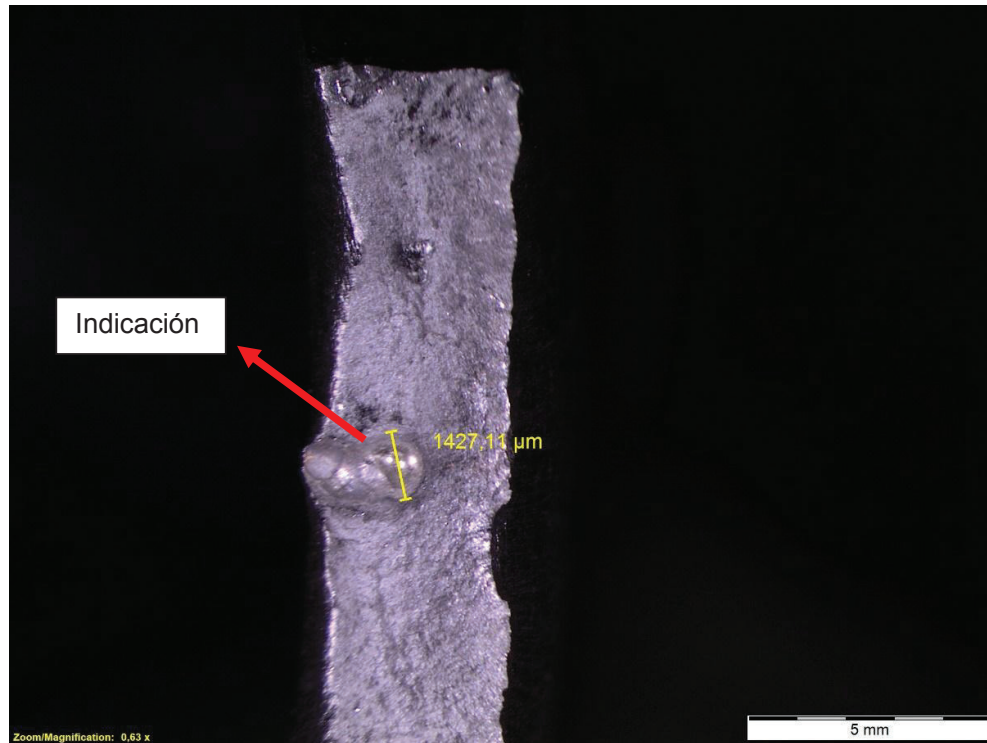


Figura 3.22. Indicación en la zona de fallo espécimen T-1 (0,63X).
Fuente: Propia

Según lo descrito anteriormente los especímenes T-1 y T-2 aprueban el ensayo de tracción, puesto que las resistencias obtenidas superan a la resistencia del material base, cumpliendo así los criterios de aceptación establecidos en el código ASME sección IX, subsección QW-153, la misma que detalla que el espécimen a ser ensayado debe tener una resistencia a la tracción que no sea menor que:

- La mínima resistencia de tracción especificada del metal base.
- La mínima resistencia de tracción especificada del más débil de los dos, si se usan metales base de resistencia de tracción mínima diferentes.
- La mínima resistencia de tracción especificada del metal de soldadura cuando la sección aplicable da disposiciones para el uso de metal de soldadura que tiene resistencia a temperatura ambiente inferior que el metal base.
- Si el espécimen se rompe en el metal base afuera de la soldadura o de la línea de fusión la prueba será aceptada como que satisface los requerimientos, siempre y cuando la resistencia no esté más del 5% abajo de la mínima resistencia de tracción especificada del metal base.

3.2.3. Ensayo de doblado guiado

Los especímenes sometidos a la prueba de doblado de cara y de raíz no muestran ningún tipo de indicación como se observa en la Figura 3.23. y Figura 3.24., respectivamente; cumpliendo de esta manera los criterios de aceptación descritos en la subsección QW-163 del código ASME sección IX, la cual indica que los especímenes de doblado guiado no deben tener defectos abiertos en la soldadura o en la zona afectada por el calor que excedan a 3,17 mm (1/8 pulg.) medido en cualquier dirección sobre la superficie convexa del espécimen después de ser realizado el doblado, así mismo los defectos abiertos que ocurran en las esquinas del espécimen durante la prueba no se tomaran en cuenta a menos que haya evidencia precisa de que ellos resultan por falta de fusión, inclusiones de escoria u otros defectos internos.



Figura 3.23. (a) Probeta 1 vista superior (b) Probeta 2 vista superior (c) Probeta 1 vista lateral (d) Probeta 2 vista lateral Doblando de Cara.

Fuente: Propia



Figura 3.24. (a) Probeta 1 vista superior (b) Probeta 2 vista superior (c) Probeta 1 vista lateral (d) Probeta 2 vista lateral Doblado de Raíz.

Fuente: Propia

3.2.4. Ensayo metalográfico

Cuando se habla de aceros inoxidable dúplex, es importante mencionar los tipos de microestructuras que se pueden presentar en el mismo después de un proceso de soldadura (GTAW), por ello es importante mencionar que en las secciones siguientes se establecerá una abreviación de dichas microestructuras entre las que se tiene: Austenita de Contorno de Grano (ACG), Austenita de Widmanstätten (AW) y la Austenita Intergranular (AI).

En el proceso de enfriamiento al cual es sometido el acero dúplex se debe considerar que la fase austenítica (γ) surge como un precipitado en los contornos de la Ferrita (δ) o en el interior del mismo. La ACG es la primera en precipitarse, esta puede formarse de forma discontinua a elevadas velocidades de enfriamiento, pero a medida que esta velocidad disminuya se va tornando más continua, la AW corresponde a la segunda precipitación y empieza su nucleación en la ACG, esta se caracteriza por tener un crecimiento orientado al interior del grano de δ cuando el mismo llega a un punto de saturación en sus límites de grano de la ACG. Finalmente, la última en precipitarse es la AI la cual se caracteriza de

tener una mayor velocidad de precipitado a mayor velocidad de enfriamiento. (Vasconcellos, 2008)

3.2.4.1. Zona transversal del Cordón

Las metalografías obtenidas revelan que en el material base efectivamente se encuentra una parte austenítica contenida en una matriz ferrítica, la cual es muy fácilmente diferenciable ya que la matriz ferrítica se presenta con una coloración más oscura en comparación a la parte austenítica (ver Figura 3.25. y Figura 3.26.).

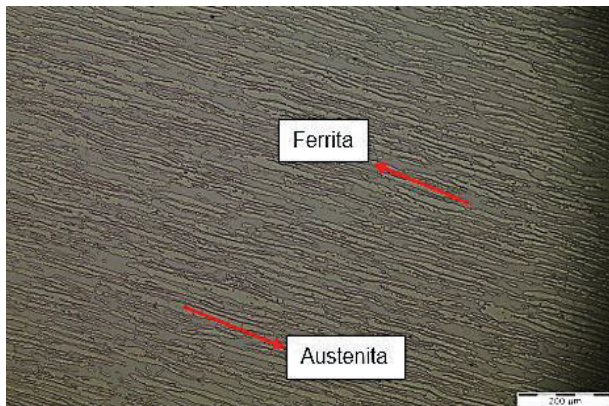


Figura 3.25. Metal Base Microestructura bifásica (100X).
Fuente: Propia

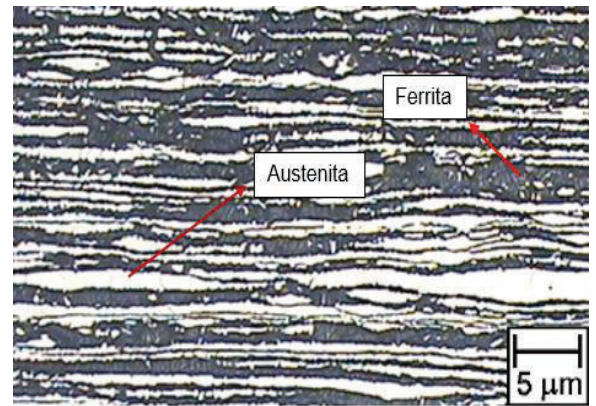


Figura 3.26. Metal Base Microestructura bifásica referencia (200X).
Fuente: (Vasconcellos, 2008) modificado

La Figura 3.26. representa la microestructura que corresponde a la de los aceros dúplex que han sido laminados o extruidos, teniendo esto es cuenta es fácilmente deducible que el MB empleado fue producto de un proceso de laminado ya que dichas microestructuras son muy similares.

En cuanto al ZAC se observa como los granos de ferrita y austenita se van modificando para dar paso a diferentes microestructuras en el MA como se observa en la Figura 3.8. Lo que caracteriza al ZAC es la presencia de ACG, además de la formación incipiente de AW que está cercana al MA, es importante mencionar que la misma incrementa conforme se acerca al MA. Ésta última zona se caracteriza por la presencia tanto de ACG, AW, Al y Ferrita.

3.2.4.2. Cordón de soldadura

En esta sección se encuentran las microestructuras ya mencionadas, cabe señalar que a lo largo del cordón de soldadura se observa una alta variedad de combinación de todas estas, por lo que es importante identificar cada una de ellas.

En la Figura 3.10. se observa la presencia de las diferentes precipitaciones de γ , mientras que en la Figura 3.12. se presentan fases γ , δ y Al las cuales son fácilmente diferenciables por su forma y color característico. Mientras que en la Figura 3.13. se observa claramente que la AW nace en el contorno de ACG en forma de ramificaciones alargadas y finas.

3.2.5. Ensayo de dureza

3.2.5.1. Zona transversal del cordón

Con base a la Figura 3.18., en cuanto a las medidas de dureza obtenidas en el MB se observa que en sus tres regiones (MBI, MBC y MBD) poseen una dureza que no es completamente uniforme, puesto que la dureza va disminuyendo conforme se acerca al centro del material base, ya que como se observa en la Figura 3.5., existe una variación sustancial en el tamaño de grano que el MB posee. Los mayores valores de dureza se presentan en la periferia ya que en esta se localizan granos más pequeños en comparación al centro del material.

Dentro de la zona del MB la dureza máxima obtenida se encuentra en su zona izquierda de la Toma 2 con un valor de 284,18 HV (28 HRC) y la dureza mínima presente se encuentra en la Toma 3 de la parte central con un valor de 241,06 HV (21 HRC), estos valores en relación a la dureza dada en la Tabla 1.5. posee una variación del 6.82% y 20.96% a la dureza máxima y mínima, respectivamente. Esta variación de dureza existente en el MB se debe a los diferentes procesos de conformado para la producción de la tubería de acero dúplex.

En cuanto a la zona afectada por el calor ésta presenta una dureza variable en cada una de sus tomas, siendo la de mayor valor la que se ubica en la Toma 1 correspondiente al valor de 270,05 HV (26HRC) y una dureza mínima de 219,89 HV localizada en la toma 3, cabe mencionar que esta medida es la más baja entre el MB, ZAC y MA. La variabilidad en la dureza está íntimamente relacionada con la microestructura que presenta esta zona, como se observa en la Figura 3.6.

En el MA a diferencia de las otras secciones se realizó la toma de dos medidas más en sus extremos debido a que en esta sección se encuentra la sobremonta y la raíz del cordón de soldadura, en donde su máxima dureza presente se encuentra en la toma adicional de raíz con un valor de 300,72 HV (30 HRC) mientras que su mínimo le pertenece a la Toma 2 correspondiente al valor de 221,51 HV.

A continuación, se esquematiza en la Figura 3.27. y Figura 3.28. los máximos y mínimos valores de dureza de las regiones analizadas y mencionadas anteriormente.

Ubicación de la indentación vs. Dureza vickers zona transversal del cordón

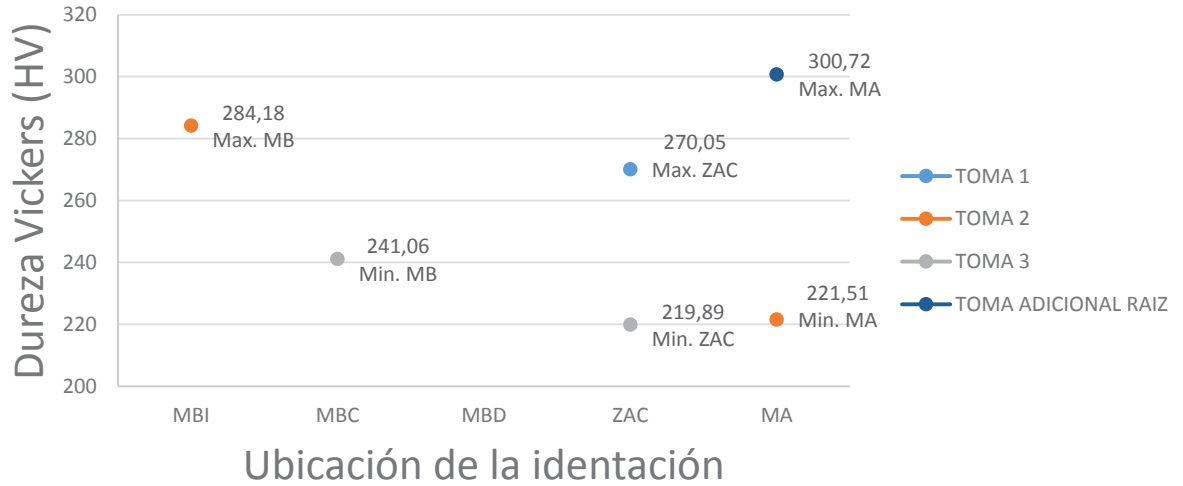


Figura 3.27. Máximos y mínimos de cada sección.
Fuente: Propia

Ubicación de la indentación vs. Dureza vickers zona transversal del cordón

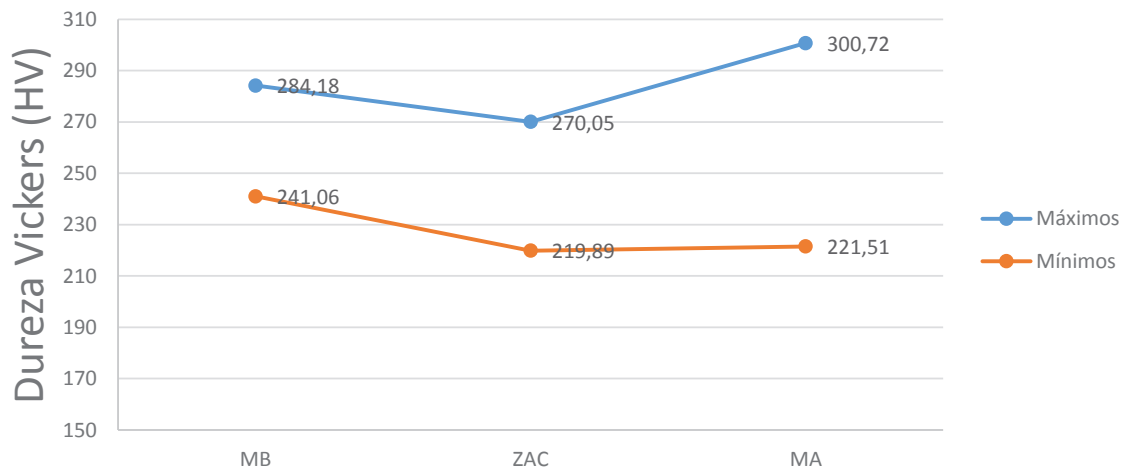


Figura 3.28. Máximos y mínimos zona transversal del cordón.
Fuente: Propia

3.2.5.2. Cordón de soldadura

En el caso de la dureza obtenida en el cordón de soldadura, es importante tener en cuenta que el ensayo se realiza mediante el barrido del mismo, separándolo en 4 regiones equidistantes (I, II, III, IV) como se observa en la Figura 3.29.

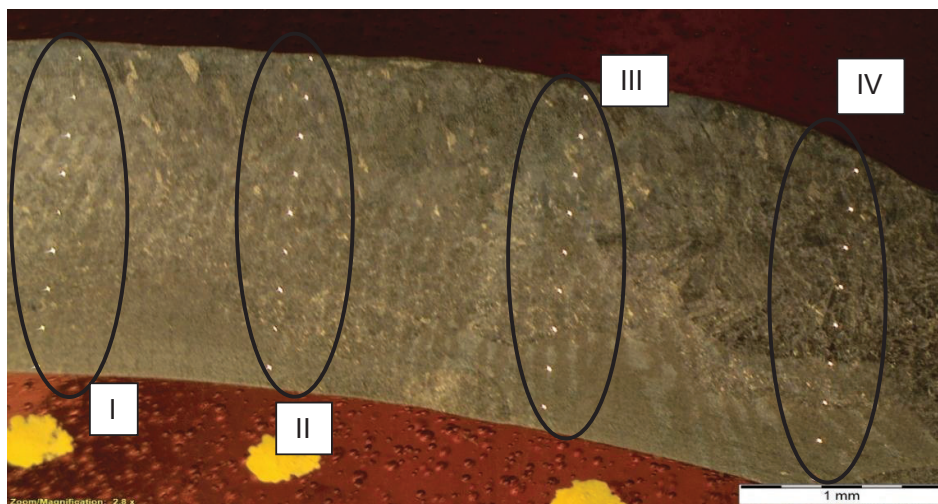


Figura 3.29. Distribución de zonas cordón longitudinal de soldadura.
Fuente: Propia

Para la primera región, I, como se observa en la Figura 3.30., existe un cambio significativo en la microestructura, es así como la zona que posee la máxima dureza presenta una micrografía con un tamaño de grano más pequeño (a) y compacto en comparación a la zona que posee la mínima dureza (b). La máxima dureza obtenida corresponde al valor de 254,95 HV (24 HRC) ubicada en la Toma 2, mientras que la mínima dureza se encuentra en la Toma 7 con un valor correspondiente a 243,52 HV (22 HRC).

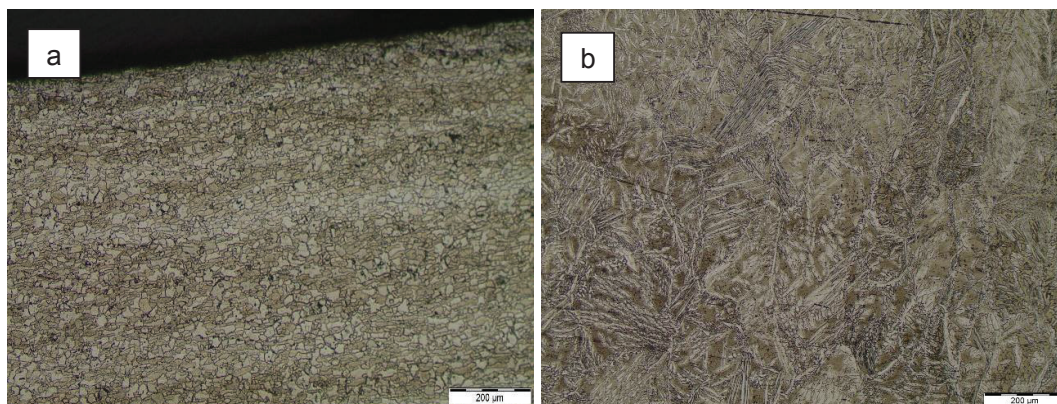


Figura 3.30. (a) Máximo y (b) Mínimo zona I.
Fuente: Propia

En la segunda región, II, la mayor dureza se presenta en la Toma 1 (a) y la menor dureza en la toma 4 (b), ver Figura 3.31., siendo sus valores de 262,68 HV (25 HRC) y 233,14 HV, respectivamente. Cabe recalcar que esta mínima dureza de la zona II representa a su vez la mínima dureza presente en todo el cordón de soldadura.

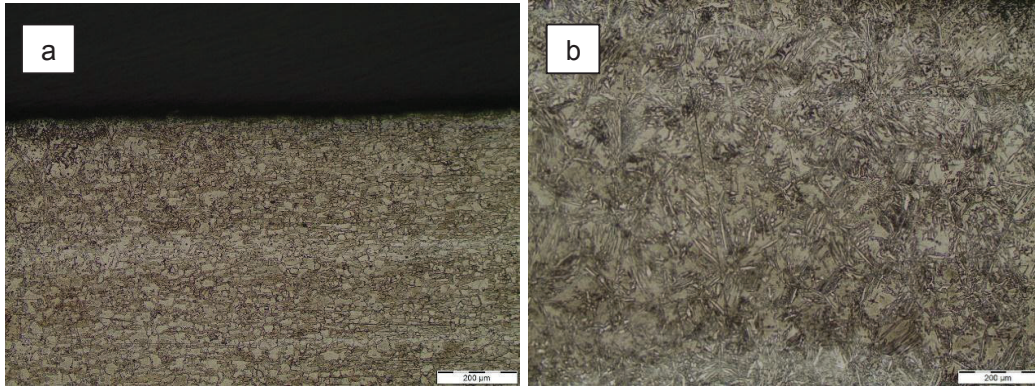


Figura 3.31. (a) Máximo y (b) Mínimos zona II.
Fuente: Propia

En la tercera región, III, la máxima dureza se obtiene en la Toma 1 (a) y la mínima dureza en la Toma 9 (b), ver Figura 3.32., cuyos valores corresponden a 262 HV (25 HRC) y 239,28 HV, respectivamente.

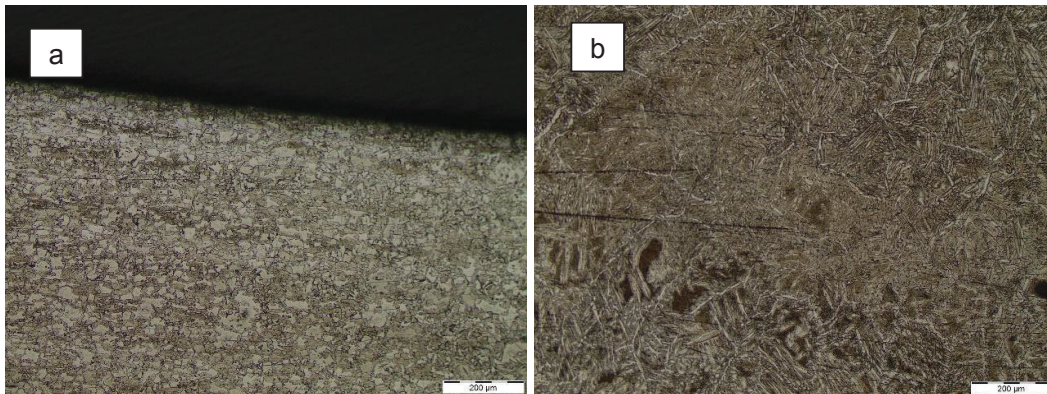


Figura 3.32. (a) Máximo y (b) Mínimos zona III.
Fuente: Propia

Finalmente, la cuarta región, IV, posee en la Toma 5 la mayor dureza (a) con un valor de 284,57 HV (28HRC) y una mínima dureza (b) en la toma 9 correspondiente al valor de 246,59 HV (22HRC). Es importante mencionar que esta dureza máxima representa a su vez la dureza máxima presente en todo el cordón de soldadura. Ver Figura 3.33.

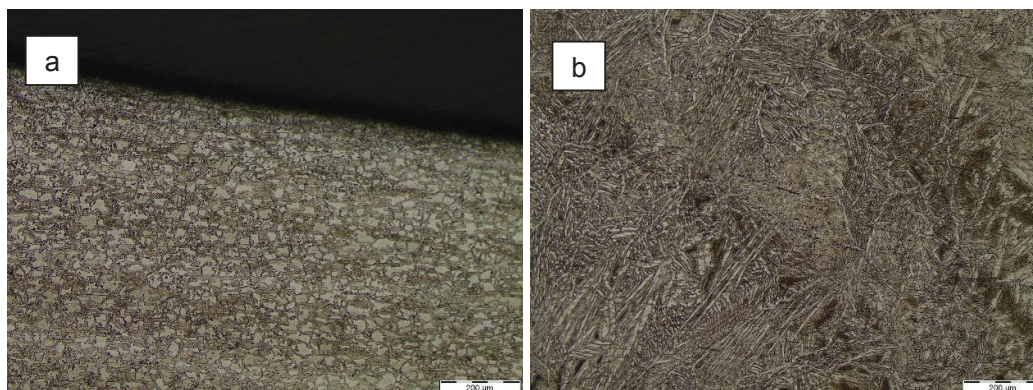


Figura 3.33. (a) Máximo y (b) Mínimo zona IV.
Fuente: Propia

Ubicación de la indentación vs. Dureza vickers cordón de soldadura

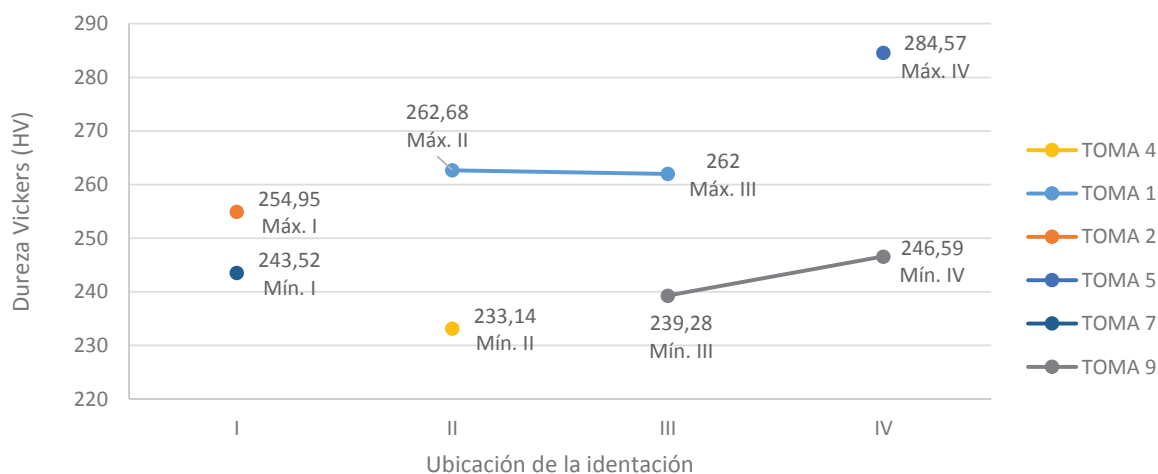


Figura 3.34. Ubicación de la indentación vs. Dureza vickers cordón de soldadura.
Fuente: Propia

Como se observa en la Figura 3.34. el cordón de soldadura posee una tendencia a tener sus valores máximos de dureza en la parte inferior del cordón, que corresponde a la parte de la raíz de la soldadura teniendo correlación con lo establecido anteriormente (análisis metalográfico).

Así mismo las durezas obtenidas en el presente trabajo son comparables con el estudio realizado por (Vasconcellos, 2008) en el cual nos presenta el perfil de durezas ver Figura 3.35. muy similar al que se obtiene como se observa en la Figura 3.28., de igual manera la máxima dureza se presenta la zona de pase de raíz. Adicionalmente se constata que la

dureza obtenida en el cordón de soldadura posee un valor de 29 HRC lo que es semejante a la dureza obtenida en el presente estudio la cual tiene un valor de 30 HRC ubicada igualmente en el pase de raíz del cordón de soldadura.

Como podemos ver en la Figura 3.14. la metalografía que se observa corresponde a la zona del pase de raíz la misma que presenta una fase de AW, adicionalmente es importante mencionar que en las Figura 3.30. (a), Figura 3.31. (a), Figura 3.32. (a) y Figura 3.33. (a) de dureza presentan una microestructura que corresponde a la del MB, ya que guardan relación con la Figura 3.8.

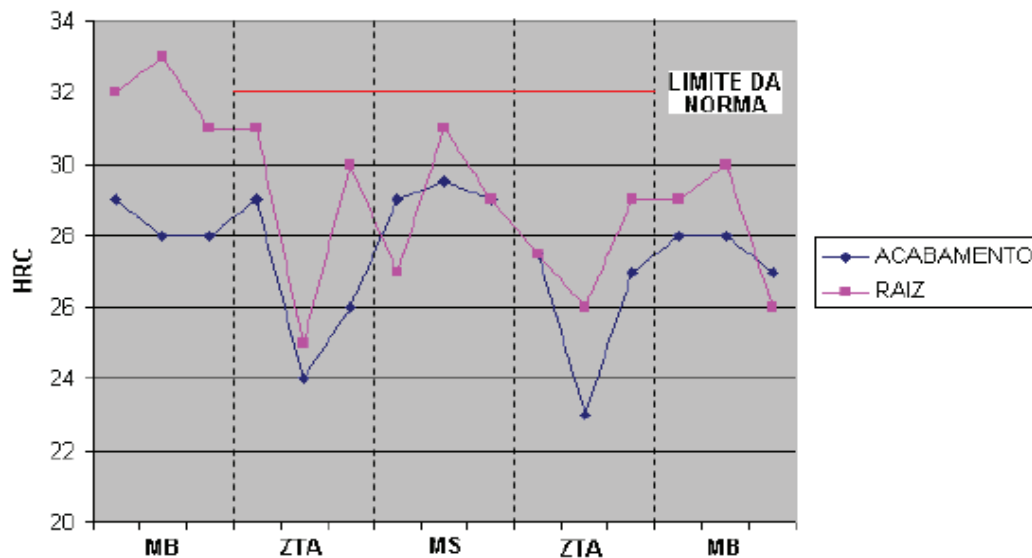


Figura 3.35. Perfil de durezas (HRC) a lo largo de los pases de raíz y acabado.
Fuente: (Vasconcellos, 2008)

3.2.6. Análisis de la composición química

La composición química que presenta el acero dúplex 2205 ensayado en comparación al que nos entrega la norma ASTM A789 se lo puede apreciar en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Comparación composición química acero dúplex.

Elemento	Valor laboratorio [%]	Valor norma ASTM [%]
Carbono [C]	0,05	0,03
Manganeso [Mn]	1,311	2,00
Fosforo [P]	0,03	0,03
Azufre [S]	<0,003	0,02
Silicio [Si]	0,674	1,00
Níquel [Ni]	6,237	4,5-6,5
Cromo [Cr]	18,01	21,0-23,0
Molibdeno [Mo]	3,53	2,5-3,5

Fuente: Propia

Como es observable existe una variación en cuanto a los porcentajes de los principales elementos aleantes, dicha variación surge como resultado de la apreciación del equipo empleado para realizar el análisis de la composición química; a pesar de esto el acero dúplex 2205 que se ensayó cumple las normativas dispuestas por la norma ASTM A 789 ya que dichos porcentajes se encuentran dentro de los parámetros permitidos.

3.3 Validación de la soldadura realizada

Como es evidenciable la soldadura realizada mediante el proceso GTAW del acero inoxidable dúplex 2205 cumple con todos los criterios de aceptación dispuestos en el código ASME sección IX, tanto para ensayos no destructivos como destructivos. Así mismo el análisis de la composición química que fue realizado nos confirma que exactamente se trabajó con el acero dúplex 2205 designación UNS 31803, ya que cumple con la cantidad en porcentaje que cada uno de los elementos aleantes debe contener según la norma ASTM A 789.

Las metalografías realizadas muestran la presencia de tres tipos de austenita (ACG, AW, AI) las cuales fueron mencionadas anteriormente, así mismo se indicó como es la formación de cada una de éstas; en cuanto al ensayo de dureza es importante remarcar que las mediciones realizadas indican que en el pase de raíz existe la mayor dureza presente, de la misma manera esto es corroborado gracias a las metalografías realizadas ya que en esta zona mencionada se encuentra un tipo de grano que es más compacto y pequeño en comparación al resto del cordón de soldadura.

En la Tabla 3.4. se resume los requisitos necesarios para la validación de la soldadura del acero inoxidable dúplex 2205 según el código ASME sección IX y la norma ASTM A 789.

Tabla 3.4. Hoja de validación para la soldadura.

HOJA DE VALIDACIÓN PARA LA SOLDADURA DE ACERO DUPLEX 2205				
Requisito	Parámetro		Norma	
			ASME/ASTM	
			Cumple	No cumple
Mecánicos	Composición química del acero		X	
	Resistencia a la tracción (MPa)		X	
	Doblado	de cara	X	
		de raíz	X	
Extras	Tintas Penetrantes (Defectos superficiales ¹)		X	
Observaciones generales:				
¹ Este requisito cumple las normativas a pesar de presentar una mordedura de aproximadamente 1 mm de longitud, ver ANEXO V.				

Fuente: Propia

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

En el presente trabajo se ha logrado cumplir de manera satisfactoria con los objetivos específicos planteados, pues la soldadura obtenida ha aprobado de forma correcta los criterios de calificación requeridos en el código empleado (ASME sección IX), así mismo el estudio tanto mecánico como su comportamiento metalográfico se lleva a cabo bajo los lineamientos propios para este tipo y forma de material (tubería de acero inoxidable dúplex 2205).

La diversidad de microestructuras obtenidas en la soldadura del acero dúplex 2205 pueden ser posibles causales para que el material sufra problemas de corrosión propias de este acero, deteriorándolo y haciendo que su vida útil resulte ser relativamente corta.

Es importante mencionar que la soldadura realizada se la llevó a cabo bajo los lineamientos descritos en el WPS adjunto (ANEXO III.), puesto que, si se realiza cambios en las variables principales, como un aumento en el amperaje provocará que la soldadura sufra penetración excesiva y a la vez produciendo quemaduras en el cordón de soldadura.

Los resultados de durezas tienen una correlación directa con el tipo de microestructura presente en el material, ya que como se menciona con anterioridad a mayor tamaño de grano menor es la dureza obtenida, así mismo existe una tendencia que nos indica que la raíz del cordón de soldadura presenta las mayores durezas en comparación al resto del material de aporte.

4.2. Recomendaciones

Antes de realizar la soldadura de la tubería, es aconsejable llevar a cabo un análisis de la composición química del material; con la finalidad de establecer y comparar los porcentajes de elementos que lo componen y de esta manera predecir qué tipo de microestructuras se pueden presentar después de realizada la soldadura.

De ser necesario, someter al material (tubería) a un calentamiento previo a la soldadura puesto que este procedimiento ayuda a reducir la formación de microestructuras no deseadas como lo es la martensita en el acero inoxidable dúplex 2205.

Para la extracción de las diversas probetas es importante realizar el corte de las mismas con un procedimiento adecuado, de tal forma que este no afecte térmicamente a la soldadura realizada. Por lo que es aconsejable ejecutar un corte manual y no un oxicorte o similares; puesto que con estos últimos se estaría realizando un tratamiento térmico no deseado, el mismo que conllevaría un cambio microestructural del material.

Tener sumo cuidado al momento de realizar el ataque químico para las probetas de metalografía, ya que en este caso en específico se emplean químicos altamente tóxicos para la salud del operario, adicionalmente se debe prestar atención al tiempo de exposición al que son sometidas las probetas; puesto que si se excede este tiempo la probeta sufre quemaduras considerables, las mismas que afectan el ensayo metalográfico.

Al momento de realizar la medición de dureza es importante tener en cuenta los parámetros a los cuales debe estar la máquina, dado que estos dependen del tipo de material a ensayar. Así mismo, la toma de mencionadas medidas debe ser de una forma ordenada con el objetivo de realizar los perfiles de durezas adecuadas.

Referencias Bibliográficas

- ACERINOX. (2013). Acero Inoxidable Dúplex ACX 900. Madrid: ACERINOX S.A.
- Álvarez, I., & Charles, J. (2009). Duplex Stainless Steels. Londres: ISTE.
- ASME. (1998). CÓDIGO ASME SECCIÓN IX.
- ASTM. (2017). ASTM A 789 Standard Specification for Seamless and Welded Ferritic/Austenitic Stainless Steel Tubing for General Service. USA: ASTM.
- ATI Allegheny Ludlum. (2009). ATI 2102. Technical Data Sheet.
- Bilmes, P., & Pereda, D. (2010). Aceros Inoxidables. De la Plata: UNP.
- Bruce, N., Stipanicev, M., Jackson, J., Jenkins, A., Melot, D., Scheie, J., & Vittonato, J. (2016). La corrosión: La lucha más extensa. Schlumberger.
- CENDI. (2009). Acero Inoxidable: Clasificación y Características. San Luis, México: CENDI A.C.
- Díaz, C. D. (Marzo de 2003). Tesis Doctoral. Diseño y Desarrollo de Aceros Inoxidables Dúplex con bajo Contenido en Níquel. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.
- Fargas, G. (2011). Mejoras en el proceso de producción de los aceros inoxidable dúplex. Barcelona-España: Limusa.
- Fernández, J. (2015). Comportamiento frente a corrosión bajo tracción en ambiente marino de armaduras de acero inoxidable dúplex. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Ginzburg, V. (2005). Metallurgical Design of flat Rolled Steels. Pennsylvania, Estados Unidos: Marcel Dekker.
- Gómez J., Ureña A., Barranco V., Álvarez M. . (2010). Soldadura TIG de los aceros inoxidable dúplex del tipo 22-05 (Uranus 45N y Avesta). Estudio de la microestructura y de las propiedades mecánicas. Madrid, España: Revista de metalurgia.
- González, M. (2004). Análisis teórico y experimental del comportamiento a fatiga de las uniones soldadas. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Gunn, R. (2003). Duplex Stainless Steels: Microstructure, properties and applications. Cambridge, Inglaterra: Abington Publishing.
- Ibarra M., Nuñez E. & Huerta J. (2010). Manual de Aceros Inoxidables. Chile: INDURA.
- International Molybdenum Association. (2012). Directrices prácticas para la Fabricación de los Aceros Inoxidables Dúplex. Londres: IMO A.
- Iris Alvarez, Suzanne Degallaix. (2009). Duplex Stainless Steels. New York, Estados Unidos: ISTE Ltd.
- Jeffus, L. (2010). Manual de Soldadura GTAW (TIG). Madrid: Paraninfo.

- Lázaro Giraldo, J. C. (2010). Estudio de la Resistencia a la Corrosión y Microestructura en la Soldadura del Acero Dúplex 2205. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Lázaro, Á. (2010). Propiedades y soldabilidad de los aceros inoxidable. Estados Unidos: Lincoln Electric.
- Mateos, A. (2017). Comportamiento tribocorrosivo y frente a la. Valladolid: Universidad de Valladolid.
- Molera Solá, P. (1990). Metales Resistentes a la Corrosión. Barcelona: Marcombo.
- Muñoz, A., García, J., Guiñon, J., & Pérez, V. (2005). Effect of Nitrogen in Argon as a Shielding Gas on Tungsten Inert Gas Welds of Duplex Stainless Steels. NACE Internacional.
- Nicolio C., Holmquist M. (2002). Duplex Alloys; Challenging Corrosion in the New Millennium. Houston, Texas, Estados Unidos: NACE International.
- Porta C., Cerpa S., León J., Quintero A. (2001). Soldadura de un Acero Inoxidable Dúplex 2205 por GMAW mediante el Uso de la Técnica de Arco Pulsado. Caracas, Venezuela: Universidad Central de Venezuela (UCV).
- Pramanik A., Littlefair G., Basak K. (2015). Weldability of Duplex Stainless Steel. Estados Unidos: Taylor & Francis Group, LLC.
- Ramírez A., Cerpa S., Mejias G., León J., Quintero A. (2006). Soldadura de un Acero Inoxidable Dúplex 2205 por el Proceso de Soldadura GTAW. Caracas, Venezuela: Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela (UCV).
- Soldadura, L. d. (2012). Folleto de Tecnología de Soldadura. Quito: Facultad de Ingeniería Mecánica.
- TECNIACEROS. (2017). Acero Inoxidable Clasificación y Características . Guatemala: Tecniaceros.
- Varol I., Baeslack A., Lippold J. (1989). Characterization of Weld Solidification Cracking in Duplex Stainless Steel. New York, Estados Unidos: Elsevier Science Publishing Co.
- Vasconcellos, P. I. (2008). SOLDAGEM EM CAMPO DE TUBOS DE AÇO INOX DUPLEX E. Río de Janeiro, Brazil: UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE – UENF.

Anexos

ANEXO I. Propiedades Físicas a Temperatura Ambiente de los Aceros Dúplex

Tabla I. Propiedades Físicas de los Aceros Dúplex a Temperatura Ambiente.

Tipo	UNS No.	Densidad		Calor específico		Resistividad eléctrica		Módulo de Young	
		g/cm ³	lb/in ³	J/Kg K	Btu/lb°F	micro Ω m,	micro Ω in,	GPa	x10 ⁶ psi
Acero al carbono	G10200	7,64	0,278	447	0,107	0,10	3,9	207	30,0
EN 1.4301 (AISI 304)	S30400	7,98	0,290	502	0,120	0,73	28,7	193	28,0
EN 1.4401 (AISI 316)	S31600	7,98	0,290	502	0,120	0,75	29,5	193	28,0
EN 1.4460 (AISI 329)	S32900	7,70	0,280	460	0,110	0,80	31,5	200	29,0
	S31500	7,75	0,280	482	0,115			200	29,0
	S32101	7,80	0,281	500	0,119	0,80	31,5	200	29,0
EN 1.4362 (2304)	S32304	7,75	0,280	482	0,115	0,80	31,5	200	29,0
	S31803	7,80	0,281	500	0,119	0,80	31,5	200	29,0
EN 1.4462 (2205)	S32205	7,80	0,281	500	0,199	0,80	31,5	200	29,0
	S31260	7,80	0,281	502	0,120			200	29,0
	S32750	7,85	0,285	480	0,114	0,80	31,5	205	29,7
255	S32550	7,81	0,282	488	0,116	0,84	33,1	210	30,5
	S39274	7,80	0,281	502	0,120			200	29,0
	S32760	7,84	0,281			0,85	33,5	190	27,6
	S32520	7,85	0,280	450	0,108	0,85	33,5	205	29,7
EN 1.4410 (2507)	S32750	7,79	0,280	485	0,115	0,80	31,5	200	29,0

Fuente: (International Molybdenum Association, 2012)

ANEXO II. Propiedades Físicas a Altas Temperaturas de los Aceros Dúplex

Tabla II. Propiedades Físicas de los Aceros Dúplex a altas temperaturas.

Tipo	UNS No.	20°C (68 °F)	100°C (212 °F)	200°C (392 °F)	300°C (572 °F)	400°C (754 °F)	500°C (932 °F)
Módulo elástico en tracción en función de la temperatura en unidades de GPa (Ksi x 1.000)							
Acero al carbono	G10200	207(30,0)					
EN 1.4301 (AISI 304)	S30400	193 (28,0)	192 (27,9)	183 (26,6)	177 (25,7)	168(24,4)	159 (23,0)
EN 1.4460 (AISI 329)	S32900	200 (29,0)	195 (28,0)	185 (27,0)			
	S31500	200 (29,0)	190 (27,6)	180 (26,1)	170 (24,7)	160 (23,2)	150 (21,8)
	S32101	200 (29,0)	194 (28,0)	186 (27,0)	180 (26,1)		
EN 1.4362 (2304)	S32304	200 (29,0)	190 (27,6)	180 (26,1)	170 (24,7)	160 (23,2)	150 (21,8)
	S31803	200 (29,0)	190 (27,6)	180 (26,1)	170 (24,7)	160 (23,2)	150 (21,8)
EN 1.4462 (2205)	S32205	200 (29,0)	190 (27,6)	180 (26,1)	170 (24,7)	160 (23,2)	150 (21,8)
255	S32550	210 (30,5)	200 (29,9)	198 (28,7)	192 (27,8)	182 (26,4)	170 (24,7)
	S32520	205 (29,7)	185 (26,8)	185 (26,8)	170 (24,7)		
EN 1.4410 (2507)	S32750	200 (29,0)	190 (27,6)	180 (26,1)	170 (24,7)	160 (23,2)	150 (21,8)
Coefficiente de dilatación térmica-desde 20°C (68°F) a T en unidades de 10⁻⁵/K (10⁻⁵/°F)							
Acero al carbono	G10200	N/A	12,1 (6,70)	13,0 (7,22)		14,0 (7,78)	
EN 1.4301 (AISI 304)	S30400	N/A	16,4 (9,10)	16,9 (9,40)	17,3 (9,60)	17,6 (9,80)	18,0 (10,0)
EN 1.4460 (AISI 329)	S32900	N/A	10,9 (6,10)	11,0 (6,30)	11,6 (6,40)	12,1 (6,70)	12,3 (6,80)
	S31500	N/A	13,0 (7,22)	13,5 (7,50)	14,0 (7,78)	14,5 (8,06)	15,0 (8,33)
	S32101	N/A	13,0 (7,22)	13,5 (7,50)	14,0 (7,78)		
EN 1.4362 (2304)	S32304	N/A	13,0 (7,22)	13,5 (7,50)	14,0 (7,78)	14,5 (8,06)	15,0 (8,33)
	S31803	N/A	13,0 (7,22)	13,5 (7,50)	14,0 (7,78)	14,5 (8,06)	15,0 (8,33)
EN 1.4462 (2205)	S32205	N/A	13,0 (7,22)	13,5 (7,50)	14,0 (7,78)	14,5 (8,06)	15,0 (8,33)

Tipo	UNS No.	20°C (68 °F)	100°C (212 °F)	200°C (392 °F)	300°C (572 °F)	400°C (754 °F)	500°C (932 °F)
255	S32550	N/A	12,1 (6,72)	12,6 (7,00)	13,0 (7,22)	13,3 (7,39)	13,6 (7,56)
EN 1.4410 (2507)	S32520	N/A	12,5 (6,94)	13,0 (7,22)	14,0 (7,78)		
	S32750	N/A	13,0 (7,22)	13,5 (7,50)	14,0 (7,78)	14,5 (8,06)	15,0 (8,33)
Conductividad térmica en función de la temperatura en unidades de W/m K (Btu in/hr ft² °F)							
Acero al carbono	G10200	52 (360)	51 (354)	49 (340)		43 (298)	
EN 1.4301 (AISI 304)	S30400	14,5 (100)	16,2 (112)	17,8 (123)	19,6 (135)	20,3 (140)	22,5 (155)
EN 1.4460 (AISI 329)	S32900						
	S31500	16,0 (110)	17,0 (118)	19,0 (132)	20,0 (138)	21,0 (147)	22,0 (153)
	S32101	15,0 (105)	16,0 (110)	17,0 (118)	18,0 (124)		
EN 1.4362 (2304)	S32304	16,0 (110)	17,0 (118)	19,0 (132)	20,0 (138)	21,0 (147)	22,0 (153)
	S31803	16,0 (110)	17,0 (118)	19,0 (132)	20,0 (138)	21,0 (147)	22,0 (153)
EN 1.4462 (2205)	S32205	16,0 (110)	17,0 (118)	19,0 (132)	20,0 (138)	21,0 (147)	22,0 (153)
255	S32550	13,5 (94)	15,1 (105)	17,2 (119)	19,1 (133)	20,9 (145)	22,5 (156)
	S32520	17,0 (118)	18,0 (124)	19,0 (132)	20,0 (138)		
EN 1.4410 (2507)	S32750	16,0 (110)	17,0 (118)	19,0 (132)	20,0 (138)	21,0 (147)	22,0 (153)

Fuente: (International Molybdenum Association, 2012)

ANEXO III. WPS



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
LABORATORIO DE SOLDADURA
WPS



POSICIONES QW-405		TRATAMIENTO TÉRMICO POST SOLDADURA QW-407						
Posiciones en ranura:	Todas	Rango de Temperatura:	N/A					
Progresión de Soldadura:	Ascendente	Rango de Tiempos:	N/A					
PRECALENTAMIENTO QW-406		GAS						
Temperatura de Precalentamiento mínima:	N/A	Protección:	100% Argón					
Temperatura entre pases máxima:	N/A	Flujo de Gas:	15 a 20 litros por minuto					
		Respaldo:	8 a 10 litros por minuto					
		Otro:	N/A					
CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS QW-409								
	GTAW		Otras Variables					
Corriente (A):	DC-		Tipo de Tungsteno y dimensión:					
Amperios (Rango):	60-100		EWTh2/ 2,4 mm					
Voltaje (Rango):	8-10		Modo de Transferencia en GMAW					
Polaridad:			N/A					
Directa (-):	Directa (-) raíz, caliente y capa		Velocidad de avance de metal de aporte:					
Inversa (+):	N/A		3-5 cm/min					
TÉCNICA QW-410								
Recto u oscilado			Recto y oscilado					
Tamaño de boquilla			15 mm					
Limpieza de raíz e interpases			Cepillado y esmerilado					
Método de repelado de raíz			N/A					
Oscilación			12 mm Máx.					
Distancia del trabajo al tubo de contacto			5 mm					
Pase simple o múltiple por lado			Múltiple					
Electrodo único o múltiple			Único					
Rango de velocidad de avance			3-5 cm/min					
Martillado			N/A					
Otro			N/A					
		Metal de Aporte		Corriente				
Capa(s) soldadura	Proceso	Clasificación	Diámetro	Tipo y Polaridad	Rango (A)	Rango (V)	Rango de Velocidad	Progresión de Soldadura
1	GTAW	ER 2209	2,4 mm	DC-	76	8	4 cm/min	↑
2	GTAW	ER 2209	2,4 mm	DC-	95	10	5 cm/min	↑
3	GTAW	ER 2209	2,4 mm	DC-	95	10	5 cm/min	↑
4	GTAW	ER 2209	2,4 mm	DC-	90	8	4 cm/min	↑

ANEXO IV. Número de Probetas para Ensayos de Tracción y Doblado

Tabla IV. Número de Probetas para prueba de Tracción y de doblez Transversal de Soldadura en Ranura.

Espesor T de muestra de Prueba Soldada, pulg.	Orden de Espesor T de Metal Base Calificado, pulg. [Nota (1)]		Espesor t de Metal de Soldadura Depositado Calificado, pulg. [Nota (1)]		Tipo y Número de Pruebas Requeridas Pruebas de Tracción y de Doblez Guiado [Nota (4)]				
	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Tracción QW-150	Doble Lateral QW-160	Doble de Cara QW-160	Doble de Raíz QW-160	
Menos de 1/16	T	2T		2t	2	...	2	2	
1/16 a 3/8 incl.	1/16	2T		2t	2	Nota (3)	2	2	
Arriba de 3/8, pero menos de 3/4	3/16	2T		2t	2	Nota (3)	2	2	
3/4 hasta menos de 1 1/2	3/16	2T		2t cuando t < 3/4	2 (5)	4	
3/4 hasta menos de 1 1/2	3/16	2T		2t cuando t ≥ 3/4	2 (5)	4	
1 1/2 y más	3/16	8 (2)		2t cuando t < 3/4	2 (5)	4	
1 1/2 y más	3/16	8 (2)		8 (2) cuando t ≥ 3/4	2 (5)	4	

Fuente: (CÓDIGO ASME SECCIÓN IX)

Notas:

- (1) Vea QW-403 (.2,.3,.6,.9,.10), QW-404.32 y QW-407.4 para límites adicionales en orden de espesores calificados. Vea también QW-202(.2, .3, .4) para excepciones permisibles.
- (2) Para los procesos de soldar de QW-403.7 solamente; de otra manera según nota (1) o 2T, o 2t, cualquiera que sea aplicable
- (3) Cuatro pruebas de doblez lateral pueden servir en lugar de las pruebas requeridas de doblez de cara y de doblez de raíz, cuando el espesor T es de 3/8" y de más.
- (4) Para combinación de procedimientos de soldar, vea QW-200.4
- (5) Vea QW-151 (.1, .2, .3) para detalles sobre especímenes múltiples cuando los espesores son de arriba de 1".

ANEXO V. Informe de Tintas Penetrantes

REPORTE DE INSPECCIÓN POR LIQUIDOS PENETRANTES

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
LABORATORIO DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS
DEPARTAMENTO DE MATERIALES

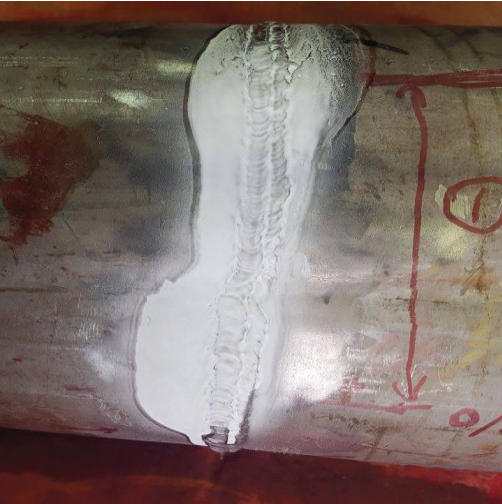

DATOS GENERALES	
Cliente: Jaramillo Javier- Martínez Fátima, Estudiante EPN	Reporte N°: 01-2017
Fecha: Lunes 7 de agosto de 2017	Lugar: Quito-Ecuador
IDENTIFICACIÓN DE LA PIEZA	
Descripción: Soldadura de tubería	Identificación: 0000001
Material: Acero dúplex 2205	Estado Superficial: Rugosidad Normal del material
ESQUEMA DE LA PIEZA	




a



- a. Tuberia soldada seccion 1.
- b. Tuberia soldada seccion 2.
- c. Tuberia soldada seccion 3.

MATERIALES Y EQUIPOS		
Líquidos:		
Limpiador / removedor: Met-L-check E-59 ^a		Emulsificador: N/A
Penetrante Met-L-check VP-30	Revelador Met-L-check D-70	
Accesorios: Flexómetro, galga de medición		
CONDICIONES DE TRABAJO		
Procedimiento: basado en ASTM E 165, Tipo II método A		Limpieza: Con solvente
Tiempos:		
Penetrante: 10 minutos	Emulsificador: N/A	Revelador: 10 minutos
Luz de observación: Visible (sobre los 1700 lux)		Tiempo:
Normas de Aceptación / Rechazo No Aplicable. Examinación de zona de soldadura.		
RESULTADOS		
ZONA	IMAGEN	OBSERVACIONES
Tubería zona 1 (125 mm)		No se detectan discontinuidades relevantes.
Tubería zona 2 (125 mm)		No se detectan discontinuidades relevantes.

<p>Tubería zona 3 (125 mm)</p>		<p>Se detecta una mordedura de aproximadamente 1 mm de longitud.</p>
<p>OPERADOR: Verónica Sotomayor</p>		
<p>Nivel: LÍQUIDOS PENETRANTES- NIVEL II</p>	<p>Firma:</p>	
<p align="center">Laboratorio de Ensayos No Destructivos LAB-END</p> <p>Fecha: 14-08-2017</p> <p>Firma: Ing. Verónica Sotomayor JEFE LAB-END</p>	<p align="center">Cliente</p> <p>Fecha:</p> <p>Firma: Sr. Javier Jaramillo Estudiante EPN</p>	

ANEXO VI. Informe de Ensayo de Tracción



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
MECÁNICA



LABORATORIO DE ANÁLISIS
DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES

INFORME TÉCNICO

LAEV – AGO.17.18.0

Quito, 16 de agosto de 2017

TRABAJO SOLICITADO POR: ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
M.Sc. Carlos Díaz

Los resultados contenidos en el presente informe corresponden a ensayos realizados en tubería de acero pertenecientes a los señores Fátima Martínez y Marco Jaramillo para el proyecto de titulación "ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DE LA SOLDADURA REALIZADA MEDIANTE EL PROCESO GTAW EN TUBERÍA DE ACERO DUPLEX 2205 EN POSICIÓN 6G". Las probetas fueron entregadas en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones de la Escuela Politécnica Nacional.

RESULTADOS

1. **MUESTRAS:** Dos (2) probetas de junta soldada para ensayo de tracción.

2. ENSAYO DE TRACCIÓN

En la tabla 1 se presenta los resultados del ensayo de tracción realizado a las juntas soldadas.

Tabla 1. Resultados del ensayo de tracción.

Id.	Ancho Promedio	Espesor Promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción		Obs.
	mm	mm	lbf	N	ksi	MPa	
T-1	19,90	5,70	20.600	91.633	117,2	808,4	FJS
T-2	19,92	5,75	20.100	89.409	113,2	780,2	FJS

En la junta soldada.





LAEV-EPN



Página 1 de 3

Las curvas de esfuerzo vs. porcentaje de deformación se muestran en el anexo. El porcentaje de deformación que se puede observar en las curvas corresponde al desplazamiento del cabezal de la máquina universal de ensayos.

	REVISADO POR:	APROBADO POR:
Firma:		
Nombre:	Ing. Jonathan Castro, M.Sc.	Ing. Mario Granja, M.Sc.
Cargo:	PROFESOR OCASIONAL II	JEFE
LABORATORIO DE ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES		



ANEXO

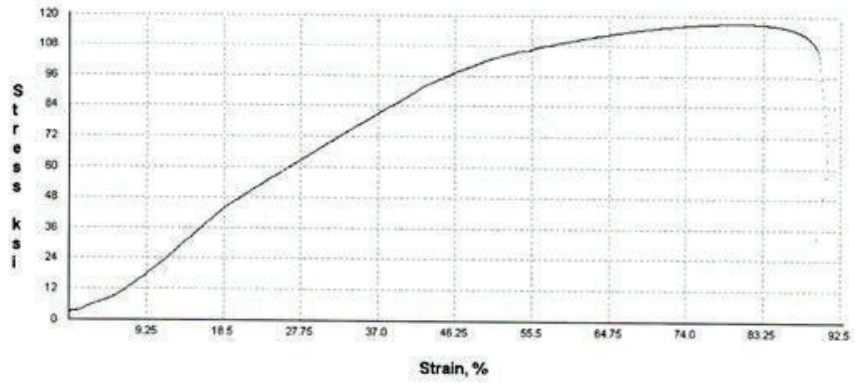


Figura 1. Curva de Esfuerzo vs porcentaje de deformación de la probeta T-1.

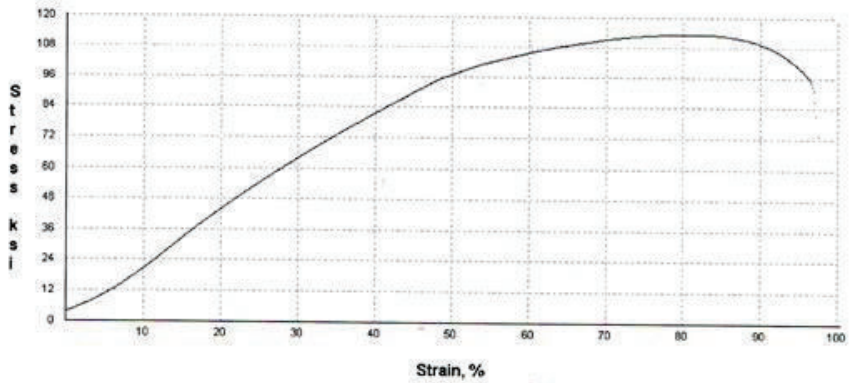


Figura 2. Curva de Esfuerzo vs porcentaje de deformación de la probeta T-2



ANEXO VII. Informe Análisis de la composición química



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

DEPARTAMENTO DE MATERIALES

LABORATORIO DE FUNDICIÓN

INFORME TÉCNICO

Solicitado por: M.Sc. Carlos Díaz / Javier Jaramillo / Fátima Martínez

Tipo de Trabajo: Espectrometría por chispa

Fecha: 20 de septiembre del 2017

Realizado por: Ing. Oscar Sotomayor, Ing. Francisco Montalvo

Descripción: Ensayo de espectrometría por chispa en probeta de acero relacionado al proyecto de titulación "Estudio y caracterización microestructural de la soldadura realizada mediante el proceso GTAW en tuberías de acero DUPLEX 2205 en posición 6G".

1. ANTECEDENTES.

Se recibe en el Laboratorio de Fundición de la Escuela Politécnica Nacional una probeta suelta.

Se solicita realizar la prueba con la finalidad de determinar los componentes presentes en las muestras entregadas.

2. IDENTIFICACIÓN DE LAS PROBETAS.

Las probetas para el análisis correspondiente son identificadas como se muestra a continuación:

Nombre	Identificación de la probeta
Probetas acero	P1: Muestra 1 de tubería de acero





ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

DEPARTAMENTO DE MATERIALES

LABORATORIO DE FUNDICIÓN

3. VALORES OBTENIDOS

El análisis de espectrometría por chispa se realiza empleando el espectrómetro marca BRUKER modelo Q2 ION. Para el análisis se toman 3 mediciones por muestra promediando su valor.

Elemento	Muestra
	P1
Elemento	Valor [%]
Carbono [C]	0,05
Silicio [Si]	0,674
Manganeso [Mn]	1,311
Fosforo [P]	0,03
Azufre [S]	<0,0030
Cromo [Cr]	18,01
Molibdeno [Mo]	3,53
Níquel [Ni]	6,237
Cobre [Cu]	0,057
Aluminio [Al]	0,01
Cobalto [Co]	0,102
Niobio [Nb]	<0,0100
Titanio [Ti]	0,0049
Vanadio [V]	0,046
Hierro [Fe]	69,94

Ing. Diego Marchán

Técnico Responsable



Ing. Oscar Sotomayor

Jefe del Laboratorio de Fundición.